

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İYONKÜRE İÇERİSİNDE YAYILAN YÜKSEK FREKANSLI (HF)
ELEKTROMANYETİK DALGALARIN ALAN ŞİDDETİNİN
HESAPLANMASI VE ÖLÇÜLMESİ**

734809

İbrahim ÜNAL

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

DOKTORA TEZİ

FİZİK ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2003

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İYONKÜRE İÇERİSİNDE YAYILAN YÜKSEK FREKANSLI
(HF) ELEKTROMANYETİK DALGALARIN ALAN
ŞİDDETİNİN HESAPLANMASI VE ÖLÇÜLMESİ**

İbrahim ÜNAL

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

Bu tez, 21.03.2003 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman : Prof. Dr. Osman ÖZCAN

Üye : Prof. Dr. Mehmet AYDOĞDU

Üye : Doç. Dr. Birsen SAKA TANATAR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Esat GÜZEL

Üye : Yrd. Doç. Dr. H. Hasan BALIK

.....
.....
.....
.....
.....

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunun 02.04.2003 tarih ve 13/3 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmam boyunca, ilgi ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof.Dr. Osman ÖZCAN'a, değerli fikirlerinden faydalandığım hocam Prof.Dr. Mehmet AYDOĞDU'ya, teorik çalışmalarımda desteğini gördüğüm Yrd.Doç.Dr. Esat GÜZEL'e, Dr. Ali YEŞİL'e, Uzm. Murat CANYILMAZ'a ve deneysel verilerin sağlanmasında yardımlarını esirgemeyen Dr. John CARUANA'ya (IPS Radio&Space Services-Sidney, Avustralya) teşekkürlerimi ve şükranlarımı sunarım.

İbrahim ÜNAL



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
TEŞEKKÜR	II
İÇİNDEKİLER	III
ŞEKİLLER LİSTESİ	V
TABLolar LİSTESİ	VII
SİMGELER LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1. GİRİŞ	1
2. İYONKÜRE PLAZMASINDA YAYILAN YÜKSEK FREKANSLI DALGALAR.....	4
2.1. İyonküre Plazmasının Elektriksel İletkenliği	4
2.2 İyonküre Plazmasının Dielektrik Tensörü	7
2.3. İyonküre Plazması İçerisinde Yayılan Dalganın Elektrik Alanı	9
3. İYONKÜRE PLAZMASINDA YAYILAN HF ELEKTROMANYETİK DALGANIN ALAN ŞİDDETİ.....	13
3.1. Elektromanyetik Dalganın Dikey ($\theta = 0$) Yayılımındaki Sönüm	15
3.1.1. Dalganın Kırılma İndisi	15
3.1.2. Elektrik Alan Şiddetindeki Sönüm	18
3.2. Elektromanyetik Dalganın Eğik Yayılımındaki Sönüm	19
3.2.1. Dalganın Kırılma İndisi	20
3.2.2. Elektrik Alan Şiddetindeki Sönüm	22
4. MATERYAL VE METOT	24
5. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	28
5.1. Dikey Yayılan HF Elektromanyetik Dalganın İyonküre İçerisindeki Davranışı	28
5.2. Dikey Yayılan HF Elektromanyetik Dalganın İyonküre İçerisindeki Sönümü	42
5.2.1. Elektrik Alan Şiddetinin Yükseklikle Değişimi	42
5.2.2. Elektrik Alan Şiddetinin Günlük ve Frekansla Değişimi	49
5.2.3. Elektrik Alan Şiddetinin Mevsimsel Değişimi	54

5.3. Eğik Yayılan HF Elektromanyetik Dalganın İyonküre İçerisindeki Sönümü	56
5.3.1. Elektrik Alan Şiddetinin Yükseklikle Değişimi	56
5.3.2. Elektrik Alan Şiddetinin Günlük ve Frekansla Değişimi	62
5.3.3. Elektrik Alan Şiddetinin Mevsimsel Değişimi	65
5.4. Eğik Yayılan HF Elektromanyetik Dalga İçin Yapılan Ölçümler	67
5.4.1. Elektrik Alan Şiddetinin Günlük ve Frekansla Değişimi	67
5.4.2. Elektrik Alan Şiddetinin Mevsimsel Değişimi	70
6. SONUÇLAR	73
KAYNAKLAR	75



ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 3.1. Elektromanyetik dalganın ilerleme doğrultusu ve manyetik alan geometrisi.....	14
Şekil 4.1. Çalışılan koordinatlarda yansıyan elektromanyetik dalga yolu.....	24
Şekil 4.2. İyonküreye dikey ve eğik gönderilen ve yansıtılarak geri alınan radyo dalgasının izlediği yol [12].....	26
Şekil 4.3. Leeds (İngiltere)-Oslo (Norveç) arasındaki elektromanyetik dalga yolu.....	27
Şekil 5.1. 4 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b:Yansdıktan sonra).....	30
Şekil 5.2. 5 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b:Yansdıktan sonra).....	31
Şekil 5.3. 3 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b:Yansdıktan sonra).....	33
Şekil 5.4. 4 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b:Yansdıktan sonra).....	34
Şekil 5.5. 5 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b:Yansdıktan sonra).....	35
Şekil 5.6. 4 MHz frekanslı dalganın 21 Aralık saat 12.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b:Yansdıktan sonra).....	37
Şekil 5.7. 5 MHz frekanslı dalganın 21 Aralık saat 12.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b:Yansdıktan sonra).....	38
Şekil 5.8. 3 MHz frekanslı dalganın 21 Aralık saat 24.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b:Yansdıktan sonra).....	41
Şekil 5.9. 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 4 MHz, b: 5 MHz)	43
Şekil 5.10. 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 3 MHz, b: 4 MHz, c: 5 MHz)	44
Şekil 5.11. 23 Eylül saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 4 MHz, b: 5 MHz)	45
Şekil 5.12. 23 Eylül saat 24.00 YZ'daki 3 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi	47
Şekil 5.13. 21 Aralık saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 4 MHz, b: 5 MHz)	48

Şekil 5.14. 21 Aralık saat 24.00 YZ'daki 3 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi	49
Şekil 5.15. 21 Haziranda dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi	50
Şekil 5.16. $h_m F_2$ yüksekliğindeki elektron yoğunluğunun günlük ve mevsimsel değişimi	50
Şekil 5.17. 23 Eylülde dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi	52
Şekil 5.18. 21 Aralıkta dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi	53
Şekil 5.19. 3 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.....	54
Şekil 5.20. 4 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.....	55
Şekil 5.21. 5 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.....	55
Şekil 5.22. 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 8 MHz, b: 10 MHz)	57
Şekil 5.23. 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 6 MHz, b: 8 MHz, c: 10 MHz)	58
Şekil 5.24. 23 Eylül saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 8 MHz, b: 10 MHz)	59
Şekil 5.25. 23 Eylül saat 24.00 YZ'daki 6 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi	60
Şekil 5.26. 21 Aralık saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 8 MHz, b: 10 MHz)	61
Şekil 5.27. 21 Aralık saat 24.00 YZ'daki 6 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi	62
Şekil 5.28. 21 Haziranda dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi	63
Şekil 5.29. 23 Eylülde dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi	64
Şekil 5.30. 21 Aralıkta dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi	65
Şekil 5.31. 6 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.....	66
Şekil 5.32. 8 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.....	66
Şekil 5.33. 10 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.....	67
Şekil 5.34. 21 Haziranda ölçülen elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.....	68
Şekil 5.35. 23 Eylülde ölçülen elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.....	69
Şekil 5.36. 21 Aralıkta ölçülen elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.....	70
Şekil 5.37. 5.47 MHz lik dalga için ölçülen elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.....	71
Şekil 5.38. 7.87 MHz lik dalga için ölçülen elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.....	71
Şekil 5.38. 10.4 MHz lik dalga için ölçülen elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.....	72

TABLÖLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 5.1. 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri	29
Tablo 5.2. 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri	32
Tablo 5.3. 21 Aralık saat 12.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri	36
Tablo 5.4. 21 Aralık saat 24.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri	40
Tablo 5.5. 23 Eylül (ekinoks) saat 12.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri	46
Tablo 5.6. 23 Eylül (ekinoks) saat 24.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri	47
Tablo 5.7. 3, 4 ve 5 MHz frekanslı dalgaların iyonküreden yansıma noktalarının günlük ve mevsimsel değişimleri	51

SİMGELER LİSTESİ

m_e	: Elektronun kütlesi
m_i	: İyonun kütlesi
v_e	: Elektron çarpışma frekansı
v_i	: İyon çarpışma frekansı
v_{ei}	: Elektron-iyon çarpışma frekansı
v_{en}	: Elektron-nötr parçacık çarpışma frekansı
t	: Zaman
V_e	: Elektronun hızı
$q_e=e$	: Elektronun yükü
E	: Elektrik alan şiddeti
E_0	: İyonküreye giren dalganın elektrik alan şiddeti
B_0	: Yerin manyetik alanı
B	: Elektromanyetik dalganın manyetik alanı
k	: Elektromanyetik dalga vektörü
r	: Yerdeğiştirme vektörü
f	: Dalganın çizgisel frekansı
ω	: Dalganın açısal frekansı
ω_{ce}	: Elektronun dönme frekansı
ω_{pe}	: Elektron için plazma salınım frekansı
J	: Akım yoğunluğu
N_e	: Elektron yoğunluğu
N_i	: İyon yoğunluğu
N_n	: Nötr parçacık yoğunluğu
σ	: İletkenlik
D	: Elektriksel akı yoğunluğu
ϵ_0	: Serbest uzayın dielektrik katsayısı
ϵ	: İyonküre plazmasının dielektrik katsayısı
H	: Manyetik alan şiddeti
∇	: Dell operatörü
μ_0	: Serbest uzayın manyetik geçirgenliği

ρ	: Yük yoğunluğu
c	: Işık hızı
n	: kırılma indisi
μ	: Kırılma indisinin reel kısmı
χ	: Kırılma indisinin sanal kısmı
$\underline{I}$	: Birim tensör
h	: Yükseklik
T_e	: Elektron sıcaklığı
Λ	: Coulomb kesilim frekansı



KISALTMALAR LİSTESİ

HF	: Yüksek frekans
h_mF2	: F2 bölgesi tepe yüksekliği
YZ	: Yerel zaman
IRI	: International Reference Ionosphere
ITU	: International Telecommunication Union
CCIR	: International Radio Consultative Committee



ÖZET

Doktora Tezi

İYONKÜRE PLAZMASINDA YAYILAN YÜKSEK FREKANSLI (HF) ELEKTROMANYETİK DALGALARIN ALAN ŞİDDETİNİN HESAPLANMASI VE ÖLÇÜLMESİ

İbrahim ÜNAL

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı
2003, Sayfa: 79

3-30 MHz arasındaki dalgalara yüksek frekanslı (HF) elektromanyetik dalga denir. Yüksek frekans bandındaki dalgalar iyonküre plazması tarafından yansıtılan ve uzak mesafelere kadar yayılabilen dalgalardır. Özellikle güvenlik bakımından HF bandındaki haberleşmeler halen çok önemlidir. Bu banttaki haberleşmenin daha verimli yapılabilmesi için, iyonküre parametrelerinin yanında dalga yayılım özelliklerinin de bilinmesi gerekir.

Bu tezde, dikey ve eğik yayılan HF radyo dalgası ve dalganın elektrik alan şiddetinin iyonküre parametrelerine bağlı ifadeleri elde edilmiştir. Bu ifadeler kullanılarak elektrik alan şiddetinin sayısal değerleri hesaplanmıştır. Elektrik alan şiddetinin yükseklik, günlük, ve mevsimsel değişimleri incelenmiştir. Genel olarak elektrik alan şiddetindeki zayıflama gece saatlerine göre gündüz saatlerinde daha fazladır. Dalga, iyonkürenin alt bölgelerinde daha fazla zayıflamaktadır. Mevsimsel olarak dalganın yaz aylarındaki zayıflaması kış aylarına göre daha fazladır. Frekans büyüdükçe dalganın zayıflaması azalmaktadır.

Teorik olarak elde edilen bu sonuçlar ITU-R HF alan şiddeti ölçüm sistemi ile alınan deneysel veriler ile karşılaştırılmıştır. Genel olarak teorik sonuçların deneysel sonuçlarla uyum içerisinde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: İyonküre, HF bandı, alan şiddeti, dalga sönümü.

ABSTRACT

PhD Thesis

THE CALCULATION AND MEASUREMENT OF THE FIELD STRENGTH OF HIGH FREQUENCY (HF) ELECTROMAGNETIC WAVES PROPAGATING THROUGH IONOSPHERIC PLASMA

İbrahim ÜNAL

Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics
2003, Page: 79

The 3-30 MHz waves are called the high frequency (HF) electromagnetic waves. The waves in the high frequency band are reflected by the ionospheric plasma and they propagate to the long distances. Especially, respect to the communications security the HF band is very important sense. For an efficient communication in this band, it is also necessary to know both ionospheric parameters and wave propagation characteristics.

In this thesis, analytical expressions of the propagation of the vertical and oblique HF radio waves and the electric field strength of the waves related to the ionospheric parameters have been obtained. Numerical values of the electric field strength have been calculated by using these expressions. The altitudinal, diurnal and seasonal variations of the electric field strength have been investigated. Generally, the attenuation in the electric field strength is higher in daily hours than in night hours. The wave has been mostly attenuated at the low altitudes of the ionosphere. The attenuation of the wave in summer is more than in winter. The attenuation of the wave decreases with increases of the frequency.

The obtained theoretical results are compared with the experimental data taken from the ITU-R HF field strength measurement system. Generally, a good agreement between the theoretical and experimental results have been obtained.

Keywords: Ionosphere, HF band, field strength, wave attenuation.

1. GİRİŞ

Yüksek frekans (HF) bandı 3 MHz ile 30 MHz frekans aralığını kapsar ve iyonküreden yansıyabilecek en yüksek frekans bandıdır. HF elektromanyetik dalgalar Yer dalgası ve gök dalgası olmak üzere başlıca iki yolla yayılır. Yer dalgaları en fazla 100 km ye kadar yayılan dalgalardır. Gök dalgaları ise iyonküre plazmasından yansıtılan ve istenen her mesafeye yayılabilen dalgalardır. HF bandındaki gök dalgaları, kısa mesafelerin yanı sıra oldukça uzun mesafelere de tekrarlayıcılara ihtiyaç duyulmadan yayılabilirler.

Yüksek frekans bandındaki gök dalgalarının en önemli özelliği iyonküre plazması ve Yer'den yansımalarla uzak mesafelere kadar yayılmalarıdır. Bu özellik, ilk olarak Marconi tarafından 1901 yılında okyanus aşırı sinyal deneyleri ile gösterilmiştir [1]. 1902'de Kennely ve Heaviside dalgaların atmosferin üst kısımlarındaki iletken bir tabakadan yansıdığını belirtmişlerdir. 1902'de Marconi gece ve gündüz yayılım koşullarının değiştiğini belirtmiştir. 1918 yılında yüksek frekans bandı, uçak ve gemiler tarafından kullanılmaya başlanmıştır. I. Dünya Savaşında Barkhausen fısıldayan dalgaları keşfetmiştir. 1920'li yıllarda HF bandından yayılıma verilen önem artmıştır. Marconi, yaptığı deneyler sonucunda Güneş'teki aktiviteler ile manyetik fırtınaların radyo dalgasının yayılımını etkilediğini bulmuştur. Daha sonra öne sürülen yansıtıcı iletken bölge teorisi, Appleton ve Barnett tarafından yapılan deneylerle ispatlanmıştır [2]. 1930'lu yıllardan itibaren iyonküre ile ilgili daha net veriler elde edilmeye başlanmış, The Radio Research Station, Cavendish Laboratory, National Bureau of Standards, Carnegie Institution gibi çeşitli kurumlar konuyla ilgilenmeye başlamıştır. 20. yüzyılın ikinci yarısında ise HF elektromanyetik dalga çalışmaları konusu tam dalga teorisi, geometrik optik ve iletkenlik olarak üçe bölünerek çalışılmıştır. Bunlar 1950'li yıllardaki, 1960'lı yıllardaki ve son 30 yıldaki çalışmalar olmak üzere sınıflandırılabilir [3]. Uydu-Yer haberleşme sistemleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmasına rağmen, sivil ve askeri amaçlar için HF radyo spektrumu kullanımı artarak devam etmektedir [4]. 1970'li yılların başında uydu haberleşmesinin gündeme gelmesiyle birlikte HF bandındaki yayılım ile ilgili çalışmalar azalmaya başlamıştır. Fakat uydu iletişiminin pahalı olması ve ayrıca askeri alanda başka bir ülke tarafından yapılan uydunun kullanılması bazı şüphelere neden olduğundan, HF bandından yayılım yeniden değer kazanmıştır [5]. Özellikle olağanüstü durumlardaki haberleşme sistemlerinin çökmesi durumunda, bu banttaki haberleşme hayati bir önem taşımaktadır.

HF bandındaki gök dalgaları iyonküre plazmasından yansıtıldıklarına göre, dalganın yansımasını etkileyen iyonküre özelliklerinin bilinmesi gerekir. İyonküre plazması, atmosferin serbest elektronlar, pozitif iyonlar ve nötr bileşenlerden oluşan iletken bir tabakasıdır. Yaklaşık Yer'den 50 km yükseklikten başlar, üst sınırı kesin olarak belli olmamakla beraber Hidrojen ve

Helyum gibi hafif iyonların Oksijen gibi ağır iyonlara göre baskın oldukları yüksekliğe kadar devam ettiği kabul edilir [1]. Negatif ve pozitif yüklü parçacıkların birleşiminin bir gaz olduğu düşünülmese de, plazmanın davranışı iletken katılara benzer ve akışkanlar için geliştirilen formüller kullanılarak tanımlanabilir [6]. İyonküre elektron yoğunluğuna göre D, E, F1 ve F2 olmak üzere dört bölgeye ayrılır. Bu bölgelerin yaklaşık yükseklik aralıkları aşağıdaki gibidir:

- D bölgesi :50-90 km arası,
- E bölgesi :90-140 km arası,
- F1 bölgesi :140-210 km arası,
- F2 bölgesi :210 km nin üzeri.

Elektron yoğunluğu bakımından iyonkürenin en zengin ve kararlı bölgesi F2 bölgesidir. Gün boyunca, E bölgesinde ara sıra görülebilen ve sporadik E olarak adlandırılan bir tabaka meydana gelir. Bu tabakanın nerede ve ne zaman meydana geleceğini ve ne kadar süre devam edeceğini bilmek zordur. Ancak bu bölgenin elektron yoğunluğunun F bölgesindeki yoğunluğa hemen hemen eşit olduğu bilinir. HF haberleşmeleri için kullanılabilir ve normal E tabakası için kullanılan frekanslardan daha yüksek frekanslar için elverişlidir. Güneş döngüsü süresince belli zamanlarda F1 bölgesi, F2 bölgesinden ayırt edilemeyebilir. Fakat F1 ve F2 bölgeleri F tabakasıyla sınırlıdır. Gece saatlerinde D, E ve F1 bölgelerindeki elektron kaybı çok fazladır. Bu nedenle, gece saatlerindeki HF haberleşmelerinde sadece F2 bölgesi kullanılır. Çünkü geceleri elektronların ömrünün en uzun olduğu bölge F2 bölgesidir. Bununla beraber sporadik E genelde gece saatlerinde meydana gelir. E ve F1 mevcut olduğunda, HF dalgaları yansıtan tabakalar sporadik E ve F2 dir. Elektron yoğunluğunun az olmasına rağmen D bölgesi önemlidir. Çünkü D bölgesi, yüksek frekanslı radyo dalgalarını yansıtmamakla birlikte, onları soğurur ve zayıflatır. F2 bölgesi yüksek frekanslı radyo dalgalarının yayılımında en önemli bölgedir [7]. Çünkü,

- Günün 24 saati mevcuttur,
- Büyük yüksekliklerdeki yansımalarla, çok uzak mesafelerle haberleşmeye izin verir,
- Genellikle HF aralığındaki en yüksek frekansları yansıtır [8].

Radyo dalgaları iyonküre plazması içerisinde yayılırken, sahip oldukları frekansa, plazma ortamındaki elektronların salınım frekansına ve ortamın kırılma indisine bağlı olarak değişik davranışlar gösterirler. Bu davranışlara bağlı olarak, dalga kırılır, yansır veya ortam tarafından soğurularak zayıflatılır [9-11]. Soğurulmalar genel olarak Güneş aktivitesine de bağlıdır. Güneş aktivitesinin artmasıyla iyonküredeki elektron sayısı ve elektronların termal dalgalanmaları artacaktır. Dolayısıyla elektronların iyonlarla ve nötr parçacıklarla çarpışmaları artacaktır. Çarpışmaların artmasından dolayı soğurulma artar ve radyo dalgasının alan şiddeti

azalır. Bunun sonucu olarak iyonkürede yayılan dalganın genliğinde soğurulmadan dolayı azalma olur. İyonkürenin soğurucu özelliği, ortamın kırılma indisinin sanal kısmına bağlıdır. Çünkü çarpışma terimi kırılma indisinin sanal kısmının meydana gelmesine sebep olur [12-14].

Yüksek frekanslı dalgaların sönümü, gündüz sönümü veya ani iyonküresel karışıklıklar olarak da isimlendirilir. Gündüz sönümü, dünyanın Güneş alan bölgelerinde ve daha çok Güneş'ten gelen radyasyonun geliş açısına ve Güneş'in aktif olduğu saatlerdeki iyonlaşma yoğunluğuna bağlı olarak gerçekleşir. İyonküredeki ani karışıklıklar Güneş patlamaları sonucunda iyonlaşmanın artmasından kaynaklanır. Böylece HF radyo dalgalarının daha fazla soğurulmasına neden olur. Gece boyunca HF radyo dalgası haberleşmesinde D bölgesinin olmamasından dolayı, F2 bölgesi tarafından radyo dalgalarının soğurulması daha düşüktür. HF dalga sönümü sadece gündüz haberleşme devrelerinde etkilidir. Soğurulma düşük frekanslarda daha büyüktür ve dalga başlangıçta etkilenerek geri alınana kadar devam eder. Daha yüksek frekanslar normal olarak daha az etkilendir ve kullanılabilirler [8].

Bu çalışmada, iyonküre plazması içerisinde ilerleyen yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar incelenecektir. Bu çalışmanın ikinci bölümünde iyonküre plazması içerisinde ilerleyen dalganın elektrik alanı bileşenleri cinsinden elde edilecektir. Bir ortamdaki elektromanyetik dalganın davranışını belirleyen temel faktörlerden biri ortamın iletkenliğidir. Tensör formunda bulunacak iletkenlik ifadesi kullanılarak ortamın dielektrik katsayısı elde edilecektir. Maxwell denklemlerinden elde edilecek olan elektromanyetik dalganın ayrılım bağıntısında dielektrik tensör kullanılarak, dalganın elektrik alanı bileşenleri cinsinden analitik olarak elde edilecektir.

nc bölümde dikey ve eğik olarak gönderilen ve alınan HF radyo dalgasının elektrik alan şiddetindeki sönüm miktarı incelenecektir. Bu bakımdan ortamın iletkenliği ve dalganın ayrılım bağıntılarının çözümünden, ortamın kırılma indisi ifadesi tanımlanacaktır. Kırılma indisi reel ve sanal kısımlarına ayrılarak dalganın sönüm ifadesi analitik olarak elde edilecektir.

Dördüncü bölümde materyal ve metot, beşinci bölümde ise dalganın elektrik alanı ve dalganın sönümü ile ilgili sonuçlar verilecektir. Hesaplamalar için gerekli olan iyonküre parametreleri International Reference Ionosphere (IRI)-95 Modeli kullanılarak elde edilecektir. İyonküre plazması içerisinde yayılan HF dalgaların davranışı ve sönümü yükseklik, günlük, mevsimsel ve frekansa bağlı olarak incelenecektir. Daha sonra teorik olarak elde edilen dalganın elektrik alan şiddeti, International Telecommunication Union (ITU)-R HF alan şiddeti olm sistemi ile ollen elektrik alan şiddeti sonuçlarıyla karışlaştırılacaktır.

2. İYONKÜRE PLAZMASINDA YAYILAN YÜKSEK FREKANSLI DALGALAR

Bu bölümde iyonküre plazması içerisinde ilerleyen yüksek frekanslı elektromanyetik dalgalar incelenecektir. Elektromanyetik dalgaların özellikleri Maxwell denklemleri ile tanımlıdır. Maxwell denklemlerinden hareketle dalganın elektrik alanı, bileşenleri cinsinden manyetik alan şiddetine bağlı olarak diferensiyel formda ifade edilebilir. Ancak bu ifadelerin tam analitik çözümleri yapılamamaktadır. Bu nedenle iyonküre içerisinde ilerleyen yüksek frekanslı dalganın elektrik alanı incelemeleri için bazı yaklaşımlarla bir çözüm elde edilecektir.

Bir ortamdaki elektromanyetik dalganın ilerlemesinde etkili olan temel parametrelerden biri de ortamın iletkenliğidir. Ortamın iletkenliği ve dielektrik sabiti dalganın kırılmasını ve yansımalarını belirler. Bu nedenle, elektromanyetik dalganın davranışını belirlemeden önce, ortamın iletkenlik ifadesinin ve buna bağlı olarak ortamın dielektrik tensörünün bilinmesi gerekir. İyonküre plazmasının elektrik iletkenliği, yüklü parçacığın hareket denkleminin çözümünden elde edilecektir. Dielektrik tensörü ise elde edilen iletkenliğe bağlı olarak bulunacaktır. Dielektrik tensörü elektromanyetik dalganın davranışını tanımlayan Maxwell denklemlerinde kullanılarak, dalganın elektrik alanı bileşenleri cinsinden ifade edilecektir.

İyonküre plazması içerisindeki elektromanyetik dalganın yayılması ve yansımaları, plazma ortamındaki yük yoğunluğuna, manyetik alana, yüklü parçacıkların plazma içerisindeki çarpışma frekanslarına, dalganın ilerleme doğrultusunun manyetik alan ile yaptığı açıya ve iyonküre plazmasına gönderilen elektromanyetik dalganın frekansına bağlıdır. Elektronun kütlesi (m_e), iyonun kütlesine (m_i) göre çok küçük ($m_e \ll m_i$) olduğundan, plazma içerisindeki iyonun hareketi elektronun hareketinin yanında ihmal edilebilir. Bu nedenle 3-30 MHz aralığındaki frekanslar çalışılacağından, sadece elektronun hareketi göz önüne alınacaktır [15]. Ayrıca elektronun kütlesinin çok küçük olması nedeni ile elektronun çarpışma frekansı, iyonun çarpışma frekansından çok büyüktür [16].

2.1. İyonküre Plazmasının Elektriksel İletkenliği

İyonküre plazması içerisindeki yüklü parçacıkların üzerine etki eden kuvvetler aşağıdaki gibi yazılabilir [17].

$$\begin{aligned} \text{Kütle} \times \text{İvme} &= \text{Elektriksel kuvvetler} \\ &+ \text{Manyetik kuvvetler} \\ &+ \text{Çekim (gravitasyonel) kuvvetleri} \\ &+ \text{Basınç değişimi kuvvetleri} \\ &+ \text{Çarpışma kuvvetleri} \end{aligned} \tag{2.1}$$

Bu çalışmada soğuk plazma yaklaşımı yapılmıştır. Bu yaklaşımda parçacıkların sıcaklıklarından dolayı oluşan ısı hareketler göz önüne alınmadığından, (2.1) denklemindeki basınç değişim kuvvetleri ihmal edilebilir [18]. Benzer şekilde yerçekiminden dolayı etki eden çekim kuvveti, elektrik ve manyetik kuvvetlere göre çok çok küçük olduğundan ihmal edilebilir. Böylece soğuk plazma yaklaşımının yapıldığı ve çekim kuvvetlerinin ihmal edildiği plazma ortamındaki elektronun hareket denklemi,

$$m_e \frac{d\mathbf{V}_e}{dt} = q_e [\mathbf{E} + \mathbf{V}_e \times (\mathbf{B}_0 + \mathbf{B})] - m_e \nu_e \mathbf{V}_e \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilir. Bu ifadedeki m_e elektronun kütlesi, $\mathbf{V}_e$ elektronun hızı, q_e elektronun yükü, $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{B}$ iyonküre plazmasına gönderilen elektromanyetik dalganın elektrik ve manyetik alanları, $\mathbf{B}_0$ Yer'in manyetik alanı ve ν_e ise elektron çarpışma frekansıdır. Bu ifade sadece Yer'in manyetik alanının bulunduğu iyonküredeki elektromanyetik dalganın yayılımının anlaşılmasında değil, diğer bazı uygulamalarda da önemlidir. Yüksek frekanslı dalgalar çalışıldığından $\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}$ terimi $\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}_0$ teriminin yanında ihmal edilebilir [6]. Hız, elektrik ve manyetik alanın zamanla $e^{-i\omega t}$ şeklinde değiştiği ve $q_e = -e$ olduğu göz önüne alınırsa (2.2) denklemi,

$$i\omega \mathbf{V}_e = -\frac{e}{m_e} (\mathbf{E} + \mathbf{V}_e \times \mathbf{B}_0) + \nu_e \mathbf{V}_e \quad (2.3)$$

olarak yazılır. Seçilen kartezyen koordinat sisteminde x-ekseni coğrafik doğuyu, y-ekseni coğrafik kuzeyi ve z-ekseni ise düşey doğrultuda yukarı yönü gösterebilir. Buna göre, dalganın elektrik alanı $\mathbf{E} = \hat{x}E_x + \hat{y}E_y + \hat{z}E_z$ ve elektronun hızı $\mathbf{V}_e = \hat{x}V_{ex} + \hat{y}V_{ey} + \hat{z}V_{ez}$ olur. Yer'in manyetik alanının $\mathbf{B}_0 = \hat{z}B_0$ olduğu kabul edilirse, (2.3) denklemindeki $\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}_0$ terimi,

$$\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ V_{ex} & V_{ey} & V_{ez} \\ 0 & 0 & B_0 \end{bmatrix} = \hat{x}V_{ey}B_0 - \hat{y}V_{ex}B_0 \quad (2.4)$$

şeklinde yazılır. $\mathbf{V}_e \times \mathbf{B}_0$ ifadesinin bu değeri (2.3) denkleminde yerine yazılarak elektronun hızı, bileşenleri cinsinden aşağıdaki gibi elde edilir.

$$V_{ex} = -\frac{e(v_e - i\omega)}{m_e[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]}E_x - \frac{e\omega_{ce}}{m_e[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]}E_y \quad (2.5)$$

$$V_{ey} = \frac{e\omega_{ce}}{m_e[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]}E_x - \frac{e(v_e - i\omega)}{m_e[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]}E_y \quad (2.6)$$

$$V_{ez} = -\frac{e}{m_e(v_e - i\omega)}E_z \quad (2.7)$$

Bu ifadelerdeki ω dalganın frekansı, $\omega_{ce} \left(= -\frac{eB_0}{m_e} \right)$ ise elektronun dönme (siklotron) frekansıdır. (2.5)-(2.7) ifadeleri kullanılarak elektron için akım yoğunluğu $\mathbf{J} (= -eN_e \mathbf{V}_e)$, bileşenleri cinsinden aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$J_x = \frac{\epsilon_0 \omega_{pe}^2 (v_e - i\omega)}{[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]}E_x + \frac{\epsilon_0 \omega_{pe}^2 \omega_{ce}}{[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]}E_y \quad (2.8)$$

$$J_y = -\frac{\epsilon_0 \omega_{pe}^2 \omega_{ce}}{[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]}E_x + \frac{\epsilon_0 \omega_{pe}^2 (v_e - i\omega)}{[\omega_{ce}^2 + (v_e - i\omega)^2]}E_y \quad (2.9)$$

$$J_z = \frac{\epsilon_0 \omega_{pe}^2}{(v_e - i\omega)}E_z \quad (2.10)$$

Buradaki ϵ_0 serbest uzayın dielektrik katsayısı ve $\omega_{pe}^2 \left(= \frac{e^2 N_e}{m_e \epsilon_0} \right)$ ise elektron için plazma

titreşim frekansıdır. Bu durumda, sabit manyetik alanda $\mathbf{J}$ akım yoğunluğunun x bileşeninin sadece $\mathbf{E}$ 'nin x bileşenine değil, hem x hem de y bileşenine bağlı olduğu açık olarak görülmektedir. Bu özelliğin tanımıyla yukarıdaki eşitlikler için matris yazılımı kullanılabilir. Genelleştirilmiş Ohm kanunu göz önüne alınarak bu ifadeler,

$$\begin{bmatrix} J_x \\ J_y \\ J_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & 0 \\ -\sigma_2 & \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

şeklinde yazılır. Böylece σ iletkenlik tensörü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_1 & \sigma_2 & 0 \\ -\sigma_2 & \sigma_1 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_0 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Buradaki $\sigma_0 = \frac{\epsilon_0 \omega_{pe}^2}{(\nu_e - i\omega)}$, $\sigma_1 = \frac{\epsilon_0 \omega_{pe}^2 (\nu_e - i\omega)}{[\omega_{ce}^2 + (\nu_e - i\omega)^2]}$ ve $\sigma_2 = \frac{\epsilon_0 \omega_{pe}^2 \omega_{ce}}{[\omega_{ce}^2 + (\nu_e - i\omega)^2]}$ dir.

2.2. İyonküre Plazmasının Dielektrik Tensörü

İyonküre plazmasının dielektrik tensörü, ortamın parametrelerine bağlı olarak elde edilen iletkenlik ifadesinin elektriksel akı yoğunluğu ($\mathbf{D}$) içerisinde kullanılmasıyla elde edilir. Buna göre, plazma ortamındaki elektriksel akı yoğunluğu,

$$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} = \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mathbf{J} \quad (2.13)$$

dir. Bu ifadedeki akım yoğunluğu yerine $\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E}$ yazılarak,

$$\mathbf{D} = \left(\epsilon_0 - \frac{\sigma}{i\omega} \right) \mathbf{E} \quad (2.14)$$

şeklinde bir ifade elde edilir. Buradan plazma ortamının dielektrik tensörü,

$$\epsilon = \left(\epsilon_0 - \frac{\sigma}{i\omega} \right) \quad (2.15)$$

olduğu görülmektedir. İyonkürenin soğuk bir plazma olarak kabul edildiği bu durum için çarpışmaların da ihmal edilmesiyle, (2.12) denklemiyle verilen σ iletkenlik tensörü,

$$\sigma = \begin{bmatrix} -\frac{i\varepsilon_0\omega\omega_{pe}^2}{(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} & \frac{\varepsilon_0\omega_{pe}^2\omega_{ce}}{(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} & 0 \\ -\frac{\varepsilon_0\omega_{pe}^2\omega_{ce}}{(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} & -\frac{i\varepsilon_0\omega\omega_{pe}^2}{(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{i\varepsilon_0\omega_{pe}^2}{\omega} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

şeklinde yazılır [19]. Serbest uzayın dielektrik katsayısının da tensör olduğunu dikkate alarak [20], (2.16) denklemiyle verilen iletkenlik ifadesi (2.15) ifadesinde yerine yazılırsa plazma ortamının dielektrik tensörü,

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \varepsilon_0 - \frac{1}{i\omega} \begin{bmatrix} -\frac{i\varepsilon_0\omega\omega_{pe}^2}{(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} & \frac{\varepsilon_0\omega_{pe}^2\omega_{ce}}{(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} & 0 \\ -\frac{\varepsilon_0\omega_{pe}^2\omega_{ce}}{(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} & -\frac{i\varepsilon_0\omega\omega_{pe}^2}{(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{i\varepsilon_0\omega_{pe}^2}{\omega} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifade yeniden düzenlenirse dielektrik tensör,

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & 0 \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

olarak elde edilir. Bu ifadedeki tensör bileşenleri aşağıdaki gibidir.

$$\varepsilon_{11} = \varepsilon_{22} = \varepsilon_0 \left(1 + \frac{\omega_{pe}^2}{(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} \right) \quad (2.19)$$

$$\varepsilon_{12} = -\varepsilon_{21} = \frac{i\varepsilon_0\omega_{pe}^2\omega_{ce}}{\omega(\omega_{ce}^2 - \omega^2)} \quad (2.20)$$

$$\epsilon_{33} = \epsilon_0 \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2} \right) \quad (2.21)$$

2.3. İyonküre Plazması İçerisinde Yayılan Dalganın Elektrik Alanı

Yukarıda elde edilen dielektrik tensörü kullanılarak, $\mathbf{B}_0$ manyetik alanına paralel yayılan plazma ortamındaki elektromanyetik dalgaların elektrik alanı elde edilebilir. Bunun için Maxwell denklemlerini,

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.22)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.23)$$

olarak yazıp, $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ olduğu göz önüne alınırsa (2.22) denklemi,

$$\nabla \times \mathbf{E} = i\omega\mu_0 \mathbf{H} \quad (2.24)$$

şekline dönüşür. Buradaki μ_0 serbest uzayın manyetik geçirgenlik katsayısıdır. Sabit bir manyetik alan için hiçbir iletim akımının olmadığı durumda ($\mathbf{J}=0$), bu ifadenin her iki tarafının rotasyoneli alınır ve (2.23) denkleminde bu ifade yerine yazılırsa,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \mu_0 \omega^2 \mathbf{D} \quad (2.25)$$

ifadesi elde edilir. Aynı zamanda bu eşitliğin sol tarafı,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} \quad (2.26)$$

olduğundan, (2.25) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} - \mu_0 \omega^2 \mathbf{D} = 0 \quad (2.27)$$

Bu ifadedeki,

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (2.28)$$

ve buradaki ρ yük yoğunluğu,

$$\rho = -e(N_e - N_i) \quad (2.29)$$

şeklinde ifade edilir. Düzenli plazmada $N_e = N_i$ olarak kabul edildiğinden, (2.27) denklemi,

$$\nabla^2 \mathbf{E} + \mu_0 \omega^2 \mathbf{D} = 0 \quad (2.30)$$

olarak elde edilir. Burada $\mathbf{B}_0$ 'a paralel yayılan düzlem dalga için elektrik alanın z bileşeni yoktur ($E_z=0$) [21]. Elektrik alanının enine bileşenlerinin z'den başka herhangi bir koordinat ile değişmeyeceği [6] ve $\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}$ ilişkisi göz önüne alınarak (2.30) denklemi,

$$\frac{d^2}{dz^2} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ 0 \end{bmatrix} + \mu_0 \omega^2 \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (2.31)$$

şeklinde yazılır. Bu ifadeden elektrik alan şiddetinin x ve y bileşenleri,

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} + \mu_0 \omega^2 (\epsilon_{11} E_x + \epsilon_{12} E_y) = 0 \quad (2.32)$$

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} + \mu_0 \omega^2 (\epsilon_{21} E_x + \epsilon_{22} E_y) = 0 \quad (2.33)$$

şeklindeki dalga denklemleriyle ifade edilirler. Bu ifadeler lineer bir şekilde kutuplanmış dalgayı belirtir. Bu ifadenin çözümü mümkün değildir. Örneğin (2.32) denklemindeki birinci terim sadece x bileşenine, ikinci terim ise hem x hem de y bileşenine sahiptir. Diğer bir

anlatımla, E 'nin x bileşeni D 'nin hem x hem de y bileşenine bağlıdır. Böylece manyetik alanın bulunduğu plazma ortamı, manyetik alan boyunca ilerleyen lineer bir şekilde kutuplanan dalgayı desteklemez [6]. Bu nedenle dairesel kutuplanmış dalga formundaki çözümler göz önüne alınarak, elektrik alan bileşenleri için aşağıdaki ifade yazılabilir [22].

$$\frac{E_y}{E_x} = \mp i \quad (2.34)$$

Bu ifadede i 'nin önündeki $+$ işaret sağa kutuplanmayı, $-$ işaret sola kutuplanmayı gösterir [21, 23]. Herhangi bir kutuplanma türü çözüm olur. Örneğin sağa kutuplanmış dalga için (2.32) denklemiyle verilen ifadede (2.34) denklemindeki E_y 'yi yerine yazarsak,

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} + \mu_0 \omega^2 (\epsilon_{11} + i \epsilon_{12}) E_x = 0 \quad (2.35)$$

olur. Aynı şekilde (2.34) denklemindeki E_x (2.33) denklemde yerine yazılırsa,

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} + \mu_0 \omega^2 \left(\frac{\epsilon_{21}}{i} + \epsilon_{22} \right) E_y = 0 \quad (2.36)$$

şeklinde olur. Bu ifadelerde (2.19) ve (2.20) denklemleriyle verilen $\epsilon_{11} = \epsilon_{22}$ ve $\epsilon_{12} = -\epsilon_{21}$ ifadeleri yerine yazılırsa, E_x ve E_y için aşağıdaki dalga denklemleri elde edilir.

$$\frac{d^2 E_x}{dz^2} + \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega_{ce} + \omega)} \right) E_x = 0 \quad (2.37)$$

$$\frac{d^2 E_y}{dz^2} + \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega_{ce} + \omega)} \right) E_y = 0 \quad (2.38)$$

c ışık hızı olmak üzere $\mu_0 \epsilon_0 = 1/c^2$ dir. Yukarıdaki her iki denklemin sol tarafındaki ikinci

terim, $\frac{\omega^2}{c^2} \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega_{ce} + \omega)} \right)$ şeklinde olur. İyonküre plazmasında $\omega = \omega_{pe}$ olan dalga için

yansıma noktasına kadar bu terim pozitif olacaktır. Bu terimin pozitif olması durumunda (2.37) ve (2.38) denklemleri ile verilen her iki ifadenin çözümü,

$$E_{x,y} = E_{0x,0y} \cos \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega_{ce} + \omega)} \right)} z \quad (2.39)$$

şeklinde elde edilir. Buradaki E_x ve E_y bileşenlerinin toplamı, toplam elektrik alanını verecektir. Buna göre,

$$E = \sqrt{2} E_0 \cos \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \left(1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega_{ce} + \omega)} \right)} z \quad (2.40)$$

olacaktır.

Buraya kadar olan tüm işlemler yukarı (+z) yönde ilerleyen dalga için yapıldı. Aşağı (-z) yönde ilerleyen yani $e^{i(-k \cdot z - \omega t)}$ şeklinde değişim gösteren dalga çözümü için de analitik olarak aynı sonuçlar elde edilir.

3. İYONKÜRE PLAZMASINDA YAYILAN HF ELEKTROMANYETİK DALGANIN ALAN ŞİDDETİ

Radyo dalgaları, iyonküre plazması içerisinde ilerlerken sahip oldukları dalga frekansına, plazma ortamındaki elektronların salınım frekansına ve ortamın kırılma indisine bağlı olarak değişik davranışlar gösterirler. Bu davranışlara bağlı olarak dalga kırılır, yansır veya ortam tarafından soğurularak zayıflatılırlar [9-11]. Radyo dalgasının sönümü, iyonküredeki elektron ve iyonların hareketlerinden dolayı diğer parçacıklarla çarpışmaları sonucu ortaya çıkar [24-29]. Fakat bu çalışmada yüksek frekanslı radyo dalgası çalışılacağından, daha önce belirtildiği gibi yüklü parçacıklardan sadece elektronun hareketi göz önüne alınacaktır.

İyonkürenin soğurucu özelliği, ortamın kırılma indisinin sanal kısmına bağlıdır. Çünkü çarpışma terimi, kırılma indisinin sanal kısmının meydana gelmesine sebep olur [12]. Kırılma indisinin reel kısmı faz hızına etki eder ve sanal kısmı ise dalganın uzaysal zayıflamasıyla ilişkilidir [30].

Önceki bölümde iyonküre plazmasında ilerleyen radyo dalgasının elektrik alanı bileşenlerine bağlı olarak incelenmişti. Bu bölümde ise toplam elektrik alan şiddetindeki sönüm miktarı analitik olarak incelenecektir. Yukarıdaki bilgiler doğrultusunda sönüm ifadesinin elde edilebilmesi için, elektrik alan şiddetinin ortamın kırılma indisine bağlı olarak ifade edilmesi gerekir. Dalganın elektrik alan şiddeti,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\mp \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad (3.1)$$

denklemini ile ifade edilir ve bu ifadedeki $\mathbf{k}$ dalga vektörü, n kırılma indisi cinsinden,

$$\mathbf{k} = \frac{\omega}{c} \mathbf{n} \quad (3.2)$$

olarak yazılırsa (3.1) denklemini,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i \left(\mp \frac{\omega}{c} \mathbf{n} \cdot \mathbf{r} - \omega t \right)} \quad (3.3)$$

şeklini alır. İyonküre plazması içerisindeki kırılma indisi ise,

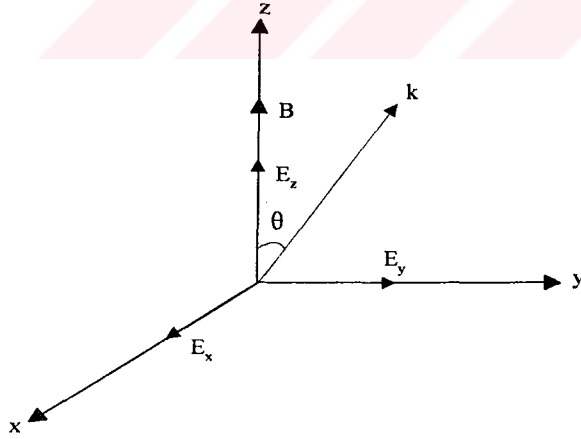
$$n = \mu + i\chi \quad (3.4)$$

şeklinde tanımlanır [12, 24]. Bu ifadedeki μ kırılma indisinin reel kısmını ve χ ise kırılma indisinin sanal kısmını göstermektedir. Buna göre (3.4) denklemiyle verilen kırılma indisi ifadesi (3.3) denkleminde yerine yazılırsa elektrik alan şiddeti,

$$\mathbf{E} = E_0 e^{i\left(\mp \frac{\omega}{c} \mu r - \omega t\right)} e^{-\frac{\omega}{c} \chi r} \quad (3.5)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadede elektrik alan şiddetindeki sönümü veren kısım eşitliğin sağ tarafındaki χ 'a bağlı ikinci üstel terimdir.

Bu bölümde, Şekil 3.1'deki geometriye göre dalganın $\theta = 0$ olduğu dikey yayılımındaki ve θ 'ya bağlı eğik yayılımındaki sönüm ifadeleri analitik olarak elde edilecektir. Şekildeki x, y ve z eksenleri daha önce belirtildiği gibi sırasıyla coğrafik doğuyu, kuzeyi ve düşey doğrultuda yukarı yönü göstermektedir.



Şekil 3.1. Elektromanyetik dalganın ilerleme doğrultusu ve manyetik alan geometrisi.

3.1. Elektromanyetik Dalganın Dikey ($\theta = 0$) Yayılımındaki Sönüm

Yukarıda (3.5) denklemiyle verilen elektrik alan şiddeti ifadesi içerisindeki sönüm miktarının analitik hesabının yapılabilmesi, ortamın kırılma indisinin bilinmesi ile mümkündür. Kırılma indisi ifadesine bağlı olarak elektromanyetik dalganın davranışını belirleyen ayrılma bağıntısını tanımlamadan önce ortamın elektriksel iletkenlik ifadesinin elde edilmesi gerekir. İyonküre plazmasının elektriksel iletkenliği daha önce elde edilen (2.12) ifadesiyle verilmiştir.

3.1.1. Dalganın Kırılma İndisi

Elektromanyetik dalganın herhangi bir ortamdaki davranışını belirleyen temel nicelik ortamın kırılma indisi n dir. Ortamın kırılma indisi elektromanyetik dalganın davranışını belirleyen Maxwell denklemleri kullanılarak ifade edilen dalganın ayrılma bağıntısından elde edilecektir. Maxwell denklemleri,

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (3.6)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (3.7)$$

şeklinde yazılarak (3.6) denkleminin rotasyonu,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (3.8)$$

olur. İletkenlik tensörü ifadesine bağlı olarak $\mathbf{J}$ akım yoğunluğunun değeri (3.7) denklemi içerisinde yerine yazılır ve bu ifade (3.8) denkleminde kullanılırsa,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = \mu_0 \epsilon_0 \omega^2 \left[\mathbf{I} + \frac{i\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right] \cdot \mathbf{E} \quad (3.9)$$

ifadesi elde edilir. Burada $\mathbf{I}$ birim tensördür. Elektrik alan $e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$ şeklinde değiştiğinden $\nabla = i\mathbf{k}$ olarak alınabilir. Bu durumda (3.9) denklemindeki eşitliğin sol tarafı,

$$\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} = k^2 \mathbf{E} - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}) \quad (3.10)$$

olarak ifade edilir. (3.10) denklemindeki eşitlik kullanılarak (3.9) denklemi yeniden düzenlenirse,

$$k^2 \mathbf{E} - \mathbf{k}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{E}) = \frac{\omega^2}{c^2} \left[\mathbf{I} + \frac{i\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right] \cdot \mathbf{E} \quad (3.11)$$

elde edilir. Buradaki $\mathbf{k}$ dalga vektörü yerine (3.2) denklemiyle verilen ifade kullanılarak, (3.11) denklemi kırılma indisi cinsinden aşağıdaki gibi olur.

$$n^2 \mathbf{E} - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) = \left[\mathbf{I} + \frac{i\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right] \cdot \mathbf{E} \quad (3.12)$$

Bu ifade elektromanyetik dalganın ayrılım bağıntısı olarak bilinir. Şekil 3.1’de $\theta = 0$ için $\mathbf{k} = \hat{z}k$ ve buna bağlı olarak $\mathbf{n} = \hat{z}n$ olduğu görülmektedir. Bu geometriye göre (3.12) denklemindeki eşitliğin sol tarafı,

$$n^2 \mathbf{E} - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) = \hat{x} n^2 E_x + \hat{y} n^2 E_y \quad (3.13)$$

olarak elde edilir. Bu ifade (3.12) denkleminde yerine yazılarak ve eşitliğin her iki tarafını matris formunda yazarak gerekli işlemler yapılırsa, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xy} & M_{xz} \\ M_{yx} & M_{yy} & M_{yz} \\ M_{zx} & M_{zy} & M_{zz} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0 \quad (3.14)$$

Bu ifadedeki,

$$M_{xx} = M_{yy} = n^2 - 1 - \frac{i\sigma_1}{\epsilon_0\omega} \quad (3.15)$$

$$M_{xy} = -M_{yx} = -\frac{i\sigma_2}{\epsilon_0\omega} \quad (3.16)$$

$$M_{zz} = -1 - \frac{i\sigma_0}{\epsilon_0\omega} \quad (3.17)$$

$$M_{xz} = M_{yz} = M_{zx} = M_{zy} = 0 \quad (3.18)$$

dır. (3.14) ifadesindeki katsayılar determinantı sıfıra eşitlenirse,

$$\left(-1 - \frac{i\sigma_0}{\epsilon_0\omega} \right) \left(n^2 - 1 - \frac{i\sigma_1}{\epsilon_0\omega} - \frac{\sigma_2}{\epsilon_0\omega} \right) \left(n^2 - 1 - \frac{i\sigma_1}{\epsilon_0\omega} + \frac{\sigma_2}{\epsilon_0\omega} \right) = 0 \quad (3.19)$$

bağıntısı elde edilir. Buradan sağa ve sola kutuplanmış iki dalgayı içerir. n^2 , reel ve sanal kısımlarına ayrılmış olarak sağa kutuplanan dalga için,

$$n_1^2 = G + iH \quad (3.20)$$

ve sola kutuplanan dalga için,

$$n_2^2 = K + iN \quad (3.21)$$

şeklinde elde edilir. Buradaki,

$$G = 1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\omega} \left[\frac{(\omega + \omega_{ce})(\omega_{ce}^2 + v_e^2 - \omega^2) - 2\omega v_e^2}{(\omega_{ce}^2 + v_e^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_e^2} \right]$$

$$H = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega} \left[\frac{2\omega v_e(\omega + \omega_{ce}) + v_e(\omega_{ce}^2 + v_e^2 - \omega^2)}{(\omega_{ce}^2 + v_e^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_e^2} \right]$$

$$K = 1 + \frac{\omega_{pe}^2}{\omega} \left[\frac{(\omega - \omega_{ce})(\omega_{ce}^2 + v_e^2 - \omega^2) - 2\omega v_e^2}{(\omega_{ce}^2 + v_e^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_e^2} \right]$$

$$N = \frac{\omega_{pe}^2}{\omega} \left[\frac{2\omega v_e(\omega - \omega_{ce}) + v_e(\omega_{ce}^2 + v_e^2 - \omega^2)}{(\omega_{ce}^2 + v_e^2 - \omega^2)^2 + 4\omega^2 v_e^2} \right]$$

şeklindedir.

İyonküreden geri yansıyan yani $-\hat{z}$ yönünde ilerleyen dalga için de analitik çözümler yapıldığında, kırılma indisi için yukarıda elde edilen ifadeler elde edilmektedir.

Yukarıdaki G, H, K ve N katsayılarına bağlı olarak elde edilen kırılma indislerinin kareleri, dalganın dikey yayılımındaki sönüm teriminin elde edilmesinde kullanılacaktır.

3.1.2. Elektrik Alan Şiddetindeki Sönüm

(3.5) denklemi ile verilen elektrik alan şiddeti ifadesindeki sönüm teriminin iyonküre plazması parametreleri cinsinden elde edilmesi, χ 'ın çözümüyle olacaktır. Buna göre (3.4) denkleminin karesi,

$$n^2 = \mu^2 - \chi^2 + 2i\mu\chi \quad (3.22)$$

(3.20) ifadesi ile karşılaştırılırsa,

$$\mu^2 - \chi^2 = G \quad (3.23)$$

ve

$$2\mu\chi = H \quad (3.24)$$

olduğu görülür. Bu iki denklemden,

$$4\chi^4 + 4\chi^2 G - H^2 = 0 \quad (3.25)$$

elde edilir. Bu ifadenin χ^2 cinsinden iki tane kökü,

$$\chi_{1,2}^2 = \frac{-G \mp \sqrt{G^2 + H^2}}{2} \quad (3.26)$$

şeklinde olup χ için,

$$\chi_{1,2} = \left[\frac{\mp (G^2 + H^2)^{1/2} - G}{2} \right]^{1/2} \quad (3.27)$$

ifadesi elde edilir. Aynı şekilde (3.21) denklemleriyle verilen kırılma indisinin ikinci kökü için,

$$\chi_{1,2} = \left[\frac{\mp (K^2 + N^2)^{1/2} - K}{2} \right]^{1/2} \quad (3.28)$$

şeklinde elde edilir.

(3.27) ve (3.28) denklemleriyle verilen ifadelerde, parantez içerisindeki ilk terimin önündeki + işaret χ 'ın birinci kökü için, - işaret ise χ 'ın ikinci kökü içindir.

İyonküre plazması parametrelerine bağlı olarak elde edilen χ ifadesi, (3.20) denklemleriyle verilen kırılma indisi de göz önüne alınarak, (3.5) ifadesinde yerine yazılırsa,

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i \left(\mp \frac{\omega}{c} \mu z - \omega t \right)} e^{-\frac{\omega}{c} \left[\frac{\mp (G^2 + H^2)^{1/2} - G}{2} \right]^{1/2} z} \quad (3.29)$$

elde edilir. Bu eşitlikteki ilk üstel ifadenin önündeki + işaret yukarı (+ $\hat{z}$) doğru ilerleyen dalgayı, - işaret ise yansıdıktan sonra aşağı (- $\hat{z}$) doğru ilerleyen dalgayı gösterir.

3.2. Elektromanyetik Dalganın Eğik Yayılımındaki Sönüm

Elektromanyetik dalganın eğik yayılımı, dünyanın herhangi bir coğrafik koordinatından belli bir açıyla gönderilen elektromanyetik dalganın başka bir koordinattan alınması anlamına gelir. Eğik yayılan dalganın geometrisi Şekil 3.1'de verilmiştir. Bu kısımda da eğik gönderilen

bir dalganın iyonküre plazması içerisindeki sönümünü bulmak için yine ortamın elektriksel iletkenliğinin bilinmesi gerekir. Daha sonra iletkenliğe ve θ açısına bağlı olarak ortamın kırılma indisi ve kırılma indisinden hareketle dalganın sönüm terimi ifadesi elde edilecektir. Yukarıda yapılan çalışmalarda hem yukarı yönde hem de yansdıktan sonra aşağı yönde ilerleyen elektromanyetik dalga için analitik olarak aynı ifadelerin elde edilmesinden dolayı, bu kısımda sadece yukarı yönde ilerleyen dalganın çalışılması yeterli olacaktır. Dalganın yayılım doğrultusu ortamın elektriksel iletkenliğini değiştirmeyeceğinden, daha önce (2.12) denklemiyle verilen iletkenlik ifadesi burada da kullanılacaktır.

3.2.1. Dalganın Kırılma İndisi

Elektromanyetik dalganın ilerleme açısına bağlı olarak kırılma indisi de değişir [15]. Bu nedenle bu kısımda kırılma indisi ifadesi θ açısına bağlı olarak elde edilecektir.

Şekil 3.1’de verilen geometriye göre, dalganın eğik yayılımı için dalga vektörünün,

$$\mathbf{k} = \hat{y}k\sin\theta + \hat{z}k\cos\theta \quad (3.30)$$

olduğu görülmektedir. Bu geometriye göre (3.12) denkleminin sol tarafı,

$$\begin{aligned} n^2 \mathbf{E} - \mathbf{n}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) = & \hat{x} n^2 E_x \\ & + \hat{y} \left(n^2 \cos^2 \theta E_y - n^2 \sin \theta \cos \theta E_z \right) \\ & - \hat{z} \left(n^2 \sin \theta \cos \theta E_y - n^2 \sin^2 \theta E_z \right) \end{aligned} \quad (3.31)$$

olur. Bu ifade dalganın ayrılım bağıntısında yerine yazılarak, (3.12) bağıntısı aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\begin{bmatrix} n^2 - S & iD & 0 \\ -iD & n^2 \cos^2 \theta - S & -n^2 \sin \theta \cos \theta \\ 0 & -n^2 \sin \theta \cos \theta & n^2 \sin^2 \theta - P \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = 0 \quad (3.32)$$

Bu ifadedeki,

$$P = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega(\omega + iv_e)}, \quad R = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega[(\omega + iv_e) - \omega_{ce}]}, \quad L = 1 - \frac{\omega_{pe}^2}{\omega[(\omega + iv_e) + \omega_{ce}]},$$

$$S = \frac{1}{2}(R + L) = 1 - \frac{\omega_{pe}^2 (\omega + i\nu_e)}{\omega \left[(\omega + i\nu_e)^2 - \omega_{ce}^2 \right]} \quad \text{ve} \quad D = \frac{1}{2}(R - L) = - \frac{\omega_{pe}^2 \omega_{ce}}{\omega \left[(\omega + i\nu_e)^2 - \omega_{ce}^2 \right]}$$

dir. (3.32) denklemindeki katsayılar determinantı alınırsa kırılma indisi için,

$$A n^4 - B n^2 + C = 0 \quad (3.33)$$

elde edilir. Burada,

$$A = P \cos^2 \theta + S \sin^2 \theta$$

$$B = P S (1 + \cos^2 \theta) + R L \sin^2 \theta$$

$$C = P R L$$

dir. (3.33) denklemine göre,

$$n_{1,2}^2 = \frac{B}{2A} \mp \frac{F}{2A} \quad (3.34)$$

olur. Burada,

$$F = (B^2 - 4AC)^{1/2}$$

dir. (3.34) nolu denklemin (+) kökü reel ve sanal kısmına ayrılmış olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$n^2 \cong \alpha + i\beta \quad (3.35)$$

Buradaki,

$$\alpha = \frac{T U + V Y}{U^2 + Y^2}, \quad \beta = \frac{U V - T Y}{U^2 + Y^2}$$

ve bu ifadelerdeki,

$$T = \omega^5 - \omega^3 \left(3v_e + 2\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2 \right) + \omega\omega_{pe}^2 \left(2v_e^2 + \omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2 \cos^2 \theta \right)$$

$$U = \omega^5 - \omega^3 \left(3v_e^2 + \omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2 \right) + \omega\omega_{pe}^2 \left(v_e^2 + \omega_{ce}^2 \cos^2 \theta \right)$$

$$V = 3v_e\omega^4 - v_e\omega^2 \left(v_e^2 + 4\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2 \right) + \omega\omega_{pe}^4$$

$$Y = 3v_e\omega^4 - v_e\omega^2 \left(v_e^2 + 2\omega_{pe}^2 + \omega_{ce}^2 \right)$$

dir. Bu parametrelere bağılı olarak (3.35) denklemiyle verilen kırılma indisinin karesi, dalganın eğik yayılımındaki sönüm teriminin elde edilmesinde kullanılacaktır.

3.2.2. Elektrik Alan Şiddetindeki Sönüm

3.1.2 kısmındaki dikey gönderilen elektromanyetik dalganın elektrik alan şiddetindeki sönüm için yapılan teorik tartışma, eğik dalga için de yapılacaktır. $n = \mu + i\chi$ ifadesini ele alarak, χ sönüm terimini elde etmek için bu ifadenin her iki tarafının karesi alınıp (3.35) ifadesi ile karşılaştırılırsa,

$$\mu^2 - \chi^2 = \alpha \quad (3.36)$$

ve

$$2\mu\chi = \beta \quad (3.37)$$

elde edilir. Bu iki denklemden,

$$4\chi^4 + 4\chi^2\alpha - \beta^2 = 0 \quad (3.38)$$

ifadesi elde edilir. Bu ifadenin χ^2 cinsinden iki tane kökü,

$$\chi_{1,2}^2 = \frac{-\alpha \mp \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}}{2} \quad (3.39)$$

şeklinde olup χ için,

$$\chi_{1,2} = \left[\frac{\mp (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2} - \alpha}{2} \right]^{1/2} \quad (3.40)$$

ifadesi elde edilir.

Buna göre (3.35) denkleminde verilen kırılma indisi göz önüne alınıp, α ve β terimleri içerisindeki plazma parametrelerine bağlı olarak elde edilen χ ifadesi de kullanılarak, (3.5) denkleminde verilen elektrik alan şiddeti,

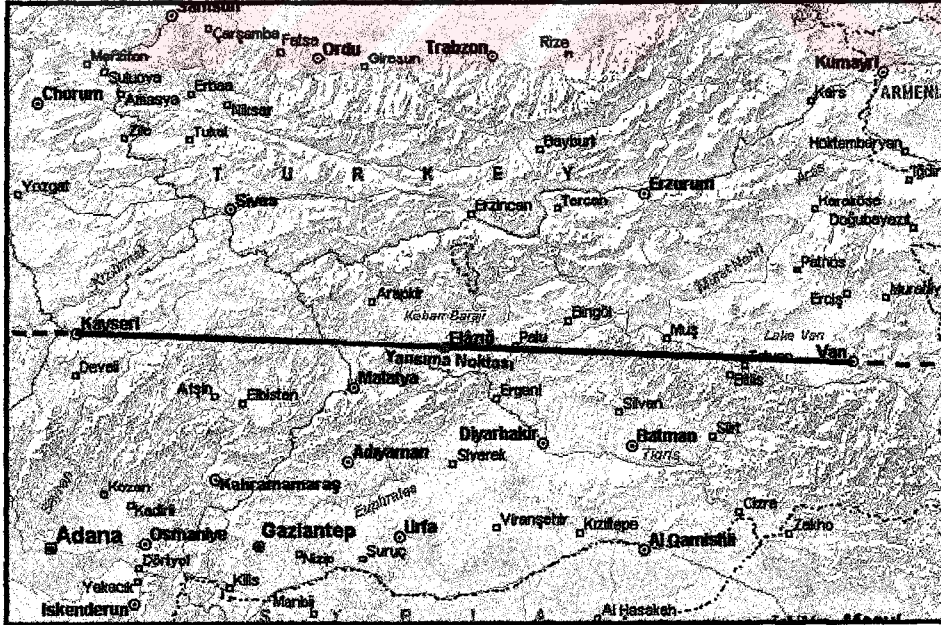
$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i \left(\mp \frac{\omega}{c} \mu z - \omega t \right)} e^{-\frac{\omega}{c} \left[\frac{\pm (\alpha^2 + \beta^2)^{1/2} - \alpha}{2} \right] z} \quad (3.41)$$

şeklinde elde edilir.

4. MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada iyonküre plazması içerisinde ilerleyen yüksek frekanslı elektromanyetik dalganın elektrik alanı ve elektrik alan şiddetindeki sönüm analitik olarak incelenmiştir. Yüksek frekans bandındaki haberleşmelerde dalga iyonkürenin F bölgesinden yansır. Bu nedenle sayısal hesap ve incelemeler 120 km nin üst kısmı için yapılacaktır. İyon hareketlerinin tamamıyla ihmal edildiği yüksek frekanslı dalga için yapılan sayısal hesaplamalar, Güneş lekesinin minimum ($R \leq 10$) olduğu günler için, $38^{\circ} 41'$ D ve $39^{\circ} 14'$ K coğrafik koordinatında yapılacaktır. Verilen coğrafik koordinatdaki dikey ve eğik dalga yolu Şekil 4.1 ile verilmiştir. Dolayısıyla HF dalganın orta enlemlerde F bölgesindeki yayılımı çalışılacaktır. Bu çalışmadaki nümerik incelemeler dört grupta toplanabilir.

Birinci kısımda (2.40) denklemiyle verilen iyonküre içerisinde dikey yayılan HF radyo dalgasının ortamın parametrelerine bağlı olarak davranışı incelenecektir. Dalganın 120 km deki iyonküreye giriş genliği $(\sqrt{2}E_0)$, 1 olarak alınacaktır. Kosinüs fonksiyonu ile ifade edilen dalganın genlik değeri iyonküredeki başlangıç yüksekliğinden itibaren iterasyon metodu ile her 1 km için hesaplanması uygun olacaktır [31]. Hesaplamalar, dalganın yansıma noktasına ve yansıdıktan sonra da başlangıç noktasına kadar devam edecektir. Dalganın yansıma noktası kırılma indisinin sıfır olduğu noktadır. Bu noktada yansıyacak sağa kutuplu dalganın frekansı,



Şekil 4.1. Çalışılan koordinatlarda yansıyan elektromanyetik dalga yolu.

(3.20) denkleminde yaklaşık olarak aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\omega \cong \omega_{pe} + \frac{\omega_{ce}}{2} \quad (4.1)$$

İkinci kısımda (3.29) denklemiyle verilen dikey yayılan HF radyo dalgasının elektrik alan şiddetindeki sönüm incelenecektir. Şekil 4.2 ile verilen dalga geometrisine göre dalganın yansıma noktası (4.1) denklemiyle verilen ifade kullanılarak tespit edilecektir. İyonkürenin 120 km sinin üstündeki yüksekliklerde çalışılacaktır. Dalganın iyonküreye giriş genliği 1 alınarak, şiddetteki azalma tayin edilecektir. Nümerik hesaplamalar iterasyon metoduyla her 1 km de yapılacaktır [31]. Bu hesaplamaların yapılabilmesi için, ω_{ce} ve ω_{pe} gibi iyonküre parametrelerinin yanında sönüme sebep olan elektron çarpışma frekansının da bilinmesi gerekir. İyonküredeki elektron çarpışma frekansı, elektron-iyon (ν_{ei}) ve elektron-nötr parçacık (ν_{en}) çarpışma frekanslarının toplamına eşittir [32]. Yani,

$$\nu_e = \nu_{ei} + \nu_{en} \quad (4.2)$$

şeklindedir. Çalışılan iyonküre bölgesinde ν_{en} çarpışma frekansı, ν_{ei} çarpışma frekansına göre çok küçüktür. Bu frekanslar aşağıdaki ifadeler ile verilir [16, 33].

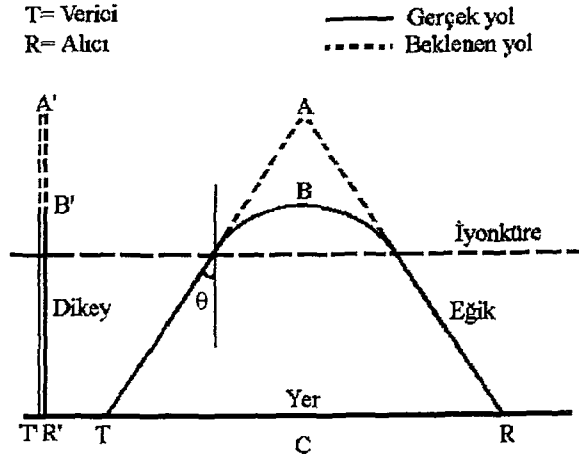
$$\nu_{ei} = 3.62 \times 10^{-6} N_i T_e^{-3/2} \ln \Lambda \quad (4.3)$$

$$\nu_{en} = 5.4 \times 10^{-16} N_n T_e^{1/2} \quad (4.4)$$

Bu ifadelerdeki N_i iyon yoğunluğu, N_n nötr parçacık yoğunluğu, T_e elektron sıcaklığı ve Λ ise Coulomb kesilim frekansı olup,

$$\Lambda = 1.23 \times 10^7 N_e^{-1/2} T_e^{3/2} \quad (4.5)$$

şeklinde ifade edilir.

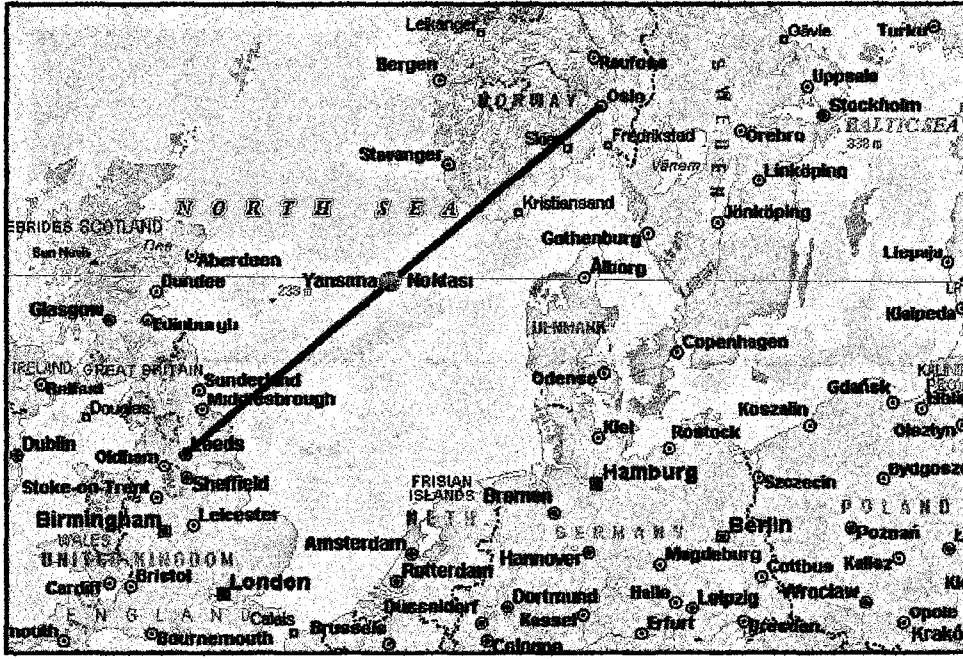


Şekil 4.2. İyonküreye dikey ve eğik gönderilen ve yansıtılarak alınan radyo dalgasının izlediği yol [12].

Üçüncü kısımda (3.41) denkleminle verilen eğik yayılan HF dalganın elektrik alan şiddetindeki sönüm incelenecektir. Şekil 4.2’de verilen eğik yayılan dalga yolunun geometrisine göre dalga, kırılma indisinin sıfır olduğu noktadan yansıtılacaktır.

Dördüncü kısımda Şekil 4.3’de gösterilen ($53^{\circ} 50' K$, $1^{\circ} 35' B$) koordinatındaki Leeds (İngiltere) ile ($59^{\circ} 55' K$, $10^{\circ} 45' D$) koordinatındaki Oslo (Norveç) arasında yapılan radyo yayınından ölçülen elektrik alan şiddeti sonuçları tartışılacaktır. Şekilden de görüldüğü gibi tartışma, ($57^{\circ} 1' K$, $4^{\circ} 4' D$) koordinatındaki yansıma noktasına göre yapılacaktır. Elde edilen veriler International Telecommunication Union (ITU)-R HF alan şiddeti ölçüm sistemi ile ölçülmüştür. Bu ölçümler Güneş’in sakin olduğu ($R \approx 30$), 1998 yılı için sürekli alınan verilerdir. Veriler değerlendirilirken saatlik ortalama alınacaktır. Çalışılan frekanslar ITU’nun belirlediği frekanslardır ve buradaki incelemeler HF radyo dalgasının yüksek enlemlerde F bölgesindeki yayılımı olarak isimlendirilebilir.

Analitik çözümlerden elde edilen elektrik alan şiddetinin nümerik sonuçlarının yükseklik, günlük, mevsimsel ve frekansla değişimleri incelenecektir. Ölçüm sonucu elde edilen veriler uluslar arası zaman olarak ölçülmüş, fakat yansıma noktasındaki koordinatta yerel zaman ile saat dilimi farkı yoktur. Bu nedenle incelemeler yerel zamana göre değerlendirilecektir. Değişim karakteristiği bakımından elektrik alan şiddetindeki teorik elde edilen sonuçlar ile ölçüm sonucu elde edilen veriler karşılaştırılacaktır.



Şekil 4.3. Leeds (İngiltere)-Oslo (Norveç) arasındaki elektromanyetik dalga yolu.

Tüm hesaplamalar için gerekli olan iyonküre parametreleri International Reference Ionosphere (IRI) Modeli kullanılarak elde edilecektir. IRI, elektron yoğunluğu, elektron ve iyon sıcaklığı ile iyon bileşenleri gibi iyonkürenin önemli parametrelerinin değerlerinin elde edildiği kullanılabilir standart bir modeldir. IRI teorik bir model değildir. 1959 yılından sonra Yer'deki iyonsondalar ve uydularla yapılan bütün ölçümler kullanılarak elde edilmiş bir modeldir. Dünyada iyonküre ile yapılan birçok araştırma da IRI kullanılmaktadır. IRI bilgisayar programı ile yılın herhangi gün ve saatinde, istenilen coğrafik koordinat için 80-1000 km arasındaki herhangi bir yükseklikte Güneş lekesine bağlı olarak iyonküre parametrelerini hesaplamak mümkündür [34]. Bir çok bilim adamı, ölçüm sonucu elde edilen iyonküre parametreleriyle IRI'dan elde edilen sonuçları karşılaştırarak, IRI'nın güvenilir bir model olduğunu bir kez daha göstermişlerdir [26, 35-37].

5. SAYISAL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmadaki bütün sayısal hesaplamalar, daha önce Şekil 4.1 ile verilen ($38^{\circ} 41' K$, $39^{\circ} 14' D$) coğrafik koordinatında, Güneş lekесinin minimum ($R \approx 10$) olduğu günler için yapıldı. Hesaplamalar, HF elektromanyetik dalganın iyonküre içerisindeki davranışı ile dikey ve eğik yayılan dalganın elektrik alan şiddetindeki sönüm için yapıldı. Yapılan tüm hesaplamalar iyonkürde 120 km nin üstündeki yüksekliklerde yapıldı. Bu hesaplamalar değişik frekanslarda, farklı günler için gece ve gündüz saatlerinde yapılarak, yükseklik, günlük, mevsimsel ve frekansa bağlı değişimler incelendi. Bu hesaplamalar için gerekli iyonküre parametreleri IRI Modelinden elde edildi.

Elde edilen teorik sonuçlar Şekil 4.3 ile verilen Leeds ($53^{\circ} 50' K$, $1^{\circ} 35' B$) ile Oslo ($59^{\circ} 55' K$, $10^{\circ} 45' D$) arasında yapılan radyo yayınından ölçülen elektrik alan şiddeti sonuçları ile karşılaştırılarak tartışıldı. Elde edilen veriler ITU-R HF alan şiddeti ölçüm sistemi ile ölçülmüştür.

5.1. Dikey Yayılan HF Elektromanyetik Dalganın İyonküre İçerisindeki Davranışı

HF elektromanyetik dalganın iyonküre plazması içerisindeki yapısı, bu ortamdaki parametrelere bağlıdır. Dalga yapısının iyonküre plazması parametrelerine bağlı olarak incelenmesi denklem (2.40) kullanılarak hesaplandı. Hesaplamalar 3 MHz, 4 MHz ve 5 MHz frekanslı dalgalar için 21 Haziran ve 21 Aralık günlerinde saat 12.00 YZ ve saat 24.00 YZ için yapıldı.

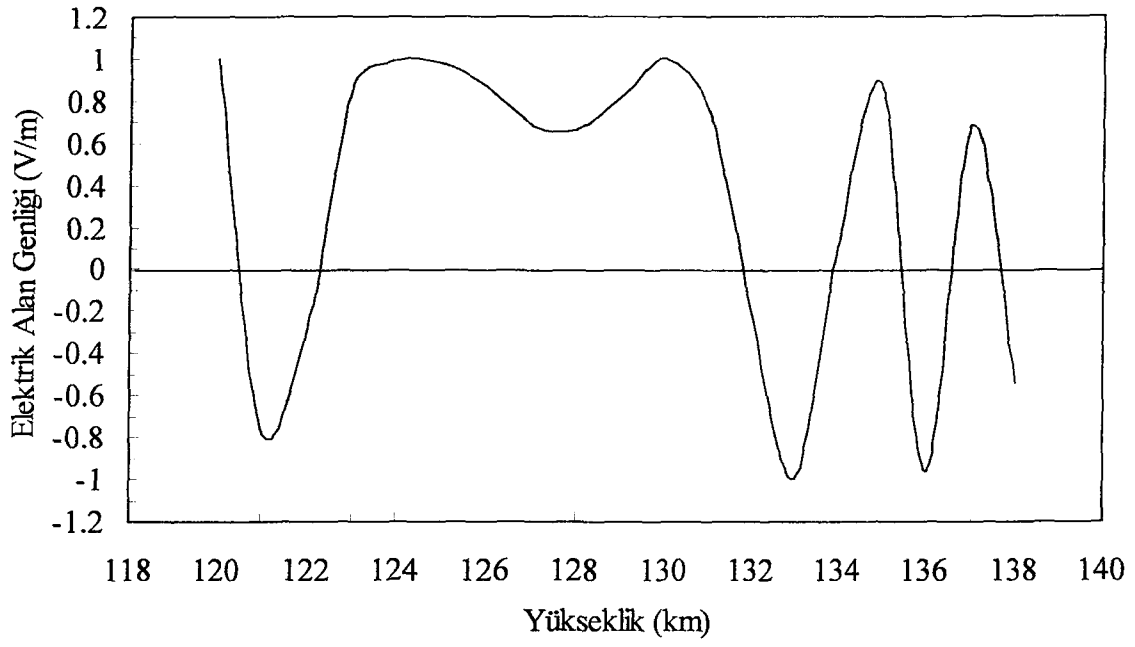
Dalganın yansıma yüksekliğini belirlemek amacıyla 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri Tablo 5.1'de verilmiştir. Tablodan görüleceği gibi 120 km de iyonkürden yansıyan dalganın frekansı 3 MHz den daha büyüktür. Bu nedenle, saat 12.00 YZ'da 3 MHz frekanslı dalga 120 km nin altında yansıdığından dalganın yayılımı bu bölgeler için incelenememiştir. Ancak 4 MHz ve 5 MHz frekanslı dalgaların yayılımı incelenebilmiştir.

4MHz frekanslı dalganın iyonküre plazması içerisindeki yayılımı sırasında genliğindeki değişim Şekil 5.1 ile verilmiştir. Tablo 5.1'den dalganın 138 km den yansıdığı görülmektedir. Ayrıca tepe yüksekliğinin ($h_m F2$) de yaklaşık 260 km olduğu ve bu yükseklikte yaklaşık 6.608 MHz lik frekansa kadar olan dalgaların iyonkürden yansıtacağı görülmektedir. Tablo incelendiğinde, elektron plazma frekansı değerine bağlı olarak, herhangi bir frekansın iyonkürenin hangi yüksekliğinden yansıtacağı da anlaşılabilir. 5 MHz frekanslı dalganın iyonkürdeki yayılımı Şekil 5.2 ile verilmiştir. Her iki frekanstaki yayılım için genlik sabit olmasına rağmen, yüksekliğe bağlı olarak genliğin farklı değerler aldığı görülmektedir. Tablo

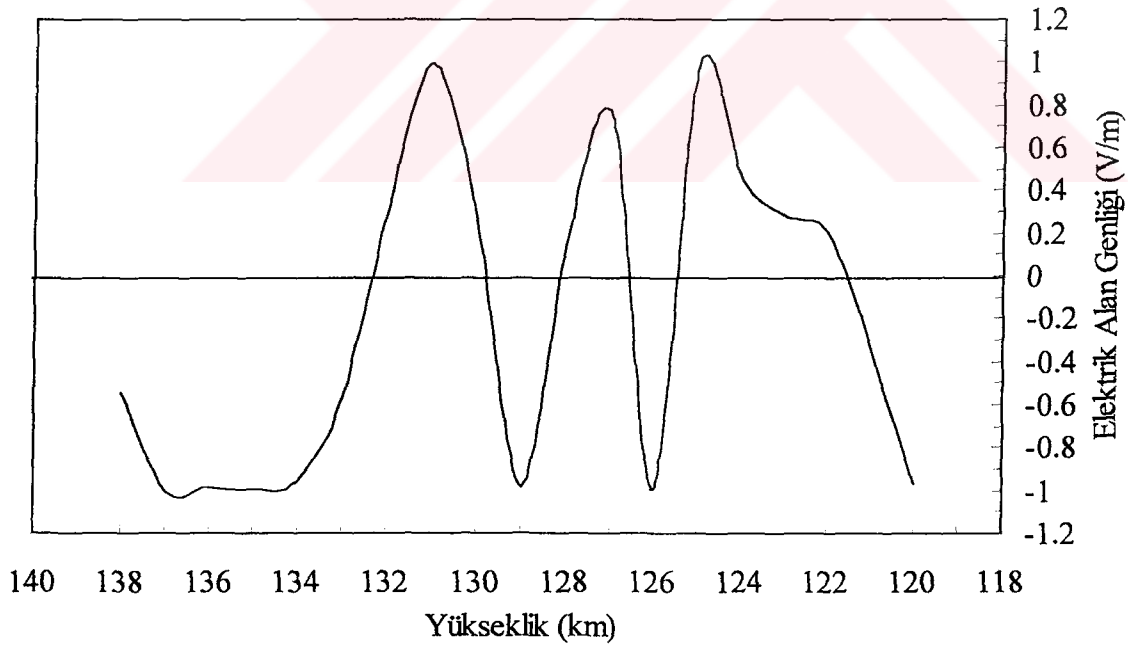
5.1'den 5 MHz lik dalganın 192 km den yansıdığı görülmektedir. (2.40) ifadesine göre elektrik alan genliğinin, plazma titreşim frekansı ve elektron siklotron frekansına bağlı olduğu görülmektedir. Her iki parametre de yükseklikle değiştiklerinden, genlik değeri de farklı yüksekliklerde farklı davranışlar göstermektedir.

Tablo 5.1. 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki iyonkütle parametrelerinin yükseklikle değişimleri.

h (km)	N_e (el./m ³)	ω_{ce} (rad/s)	ω_{pe} (rad/s)	f (MHz)	v_e (s ⁻¹)
120	1.303E+11	7.745E+06	2.037E+07	3.858	6.411E+03
130	1.385E+11	7.707E+06	2.099E+07	3.954	3.025E+03
140	1.442E+11	7.669E+06	2.142E+07	4.019	1.767E+03
150	1.510E+11	7.632E+06	2.192E+07	4.096	1.184E+03
160	1.592E+11	7.595E+06	2.251E+07	4.187	8.646E+02
170	1.702E+11	7.558E+06	2.327E+07	4.305	6.702E+02
180	1.888E+11	7.521E+06	2.451E+07	4.499	5.478E+02
190	2.333E+11	7.485E+06	2.724E+07	4.931	4.846E+02
200	2.744E+11	7.449E+06	2.955E+07	5.295	4.348E+02
210	3.333E+11	7.413E+06	3.257E+07	5.773	4.102E+02
220	3.825E+11	7.377E+06	3.489E+07	6.140	3.897E+02
230	4.185E+11	7.342E+06	3.649E+07	6.392	3.725E+02
240	4.406E+11	7.307E+06	3.774E+07	6.588	3.539E+02
250	4.504E+11	7.272E+06	3.786E+07	6.604	3.327E+02
260	4.514E+11	7.237E+06	3.790E+07	6.608	3.107E+02
270	4.472E+11	7.202E+06	3.772E+07	6.576	2.890E+02
280	4.385E+11	7.168E+06	3.735E+07	6.515	2.680E+02
290	4.258E+11	7.134E+06	3.681E+07	6.426	2.480E+02
300	4.097E+11	7.100E+06	3.611E+07	6.312	2.316E+02
310	3.909E+11	7.066E+06	3.527E+07	6.175	2.211E+02
320	3.701E+11	7.033E+06	3.432E+07	6.022	2.135E+02
330	3.481E+11	7.000E+06	3.328E+07	5.853	2.064E+02
340	3.254E+11	6.967E+06	3.218E+07	5.676	1.992E+02
350	3.026E+11	6.934E+06	3.103E+07	5.490	1.919E+02
360	2.801E+11	6.901E+06	2.985E+07	5.300	1.846E+02
370	2.583E+11	6.869E+06	2.867E+07	5.109	1.771E+02
380	2.376E+11	6.837E+06	2.750E+07	4.920	1.692E+02
390	2.180E+11	6.805E+06	2.634E+07	4.733	1.602E+02
400	1.997E+11	6.773E+06	2.521E+07	4.551	1.492E+02

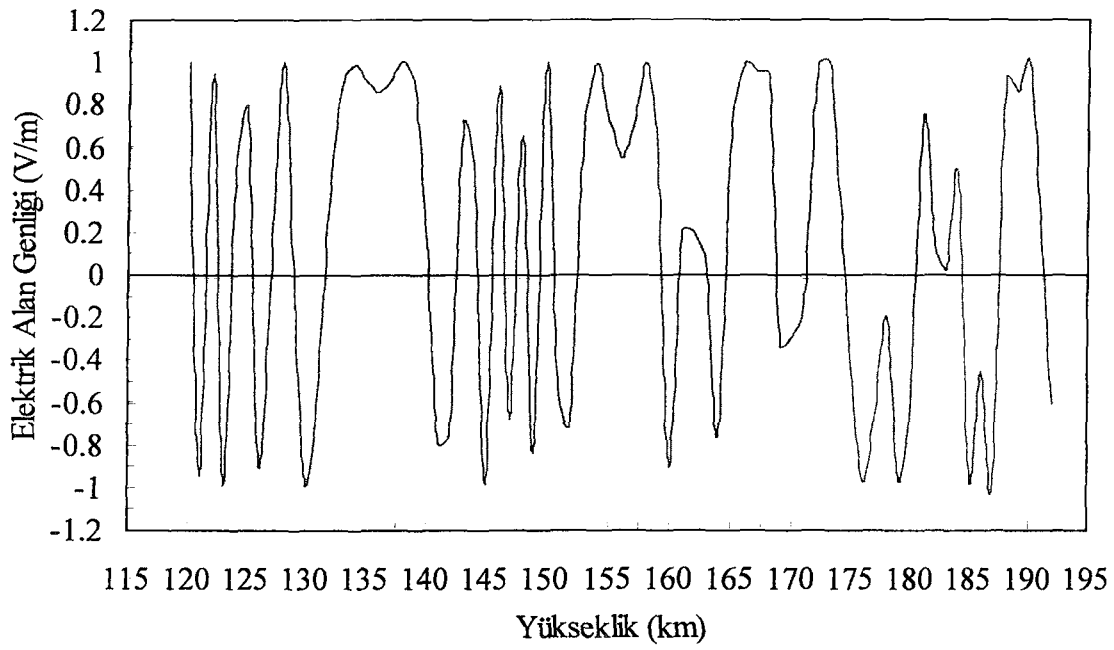


a

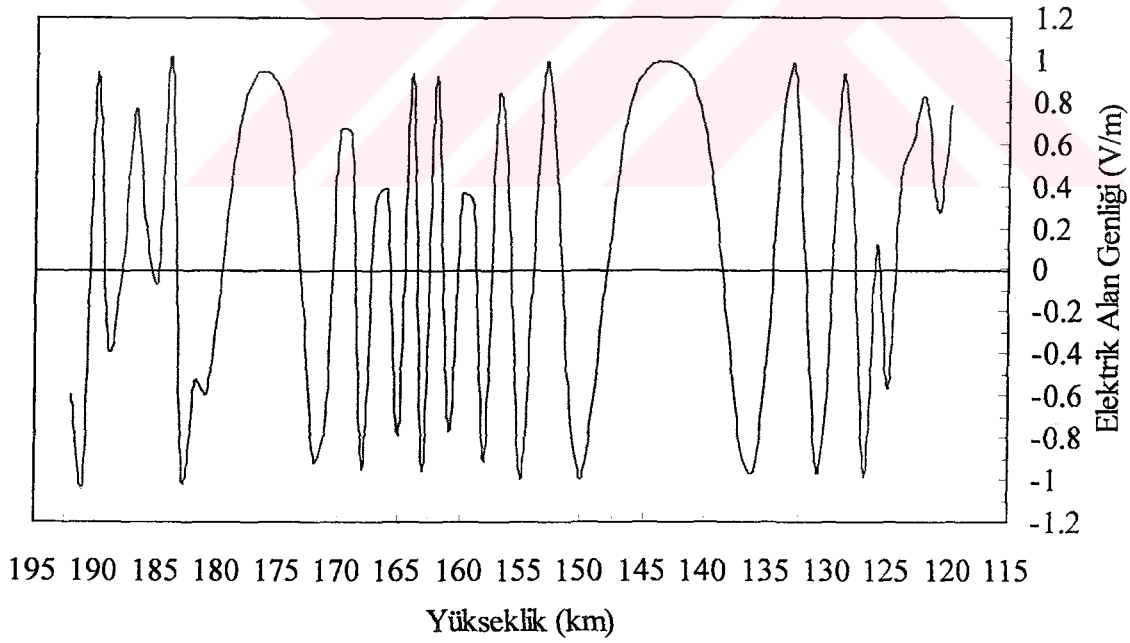


b

Şekil 5.1. 4 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b: Yansıdıktan sonra).



a



b

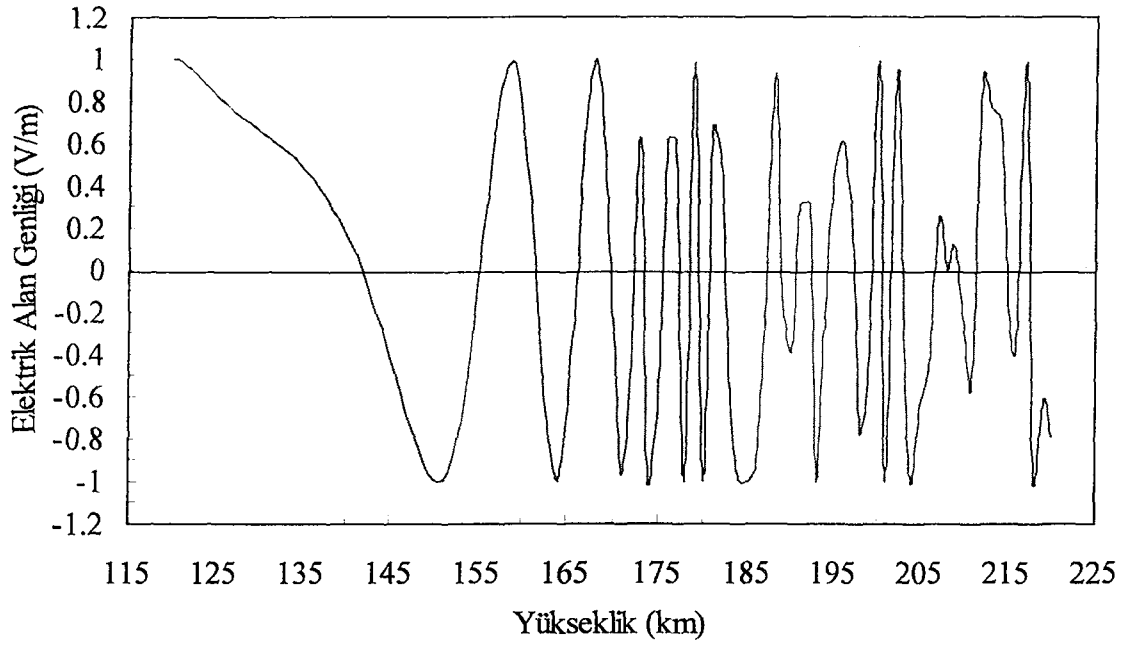
Şekil 5.2. 5 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b: Yansıdıktan sonra).

21 Haziran saat 24.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri Tablo 5.2 ile verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi yazın saat 24.00 YZ'da, iyonküreden ancak yaklaşık 5.367 MHz e kadar olan dalgalar yansıtılabilir. Bu saatteki F2 tepe yüksekliği de yaklaşık olarak 310 km civarındadır. Daha yüksek frekanstaki dalgaların gündüz saatlerinde yansıyor gece saatlerinde yansımaması, plazmadaki elektron yoğunluğunun ve dolayısıyla titreşim frekansının gece saatlerinde daha düşük olmasından kaynaklanmaktadır (Tablo 5.1 ve Tablo 5.2).

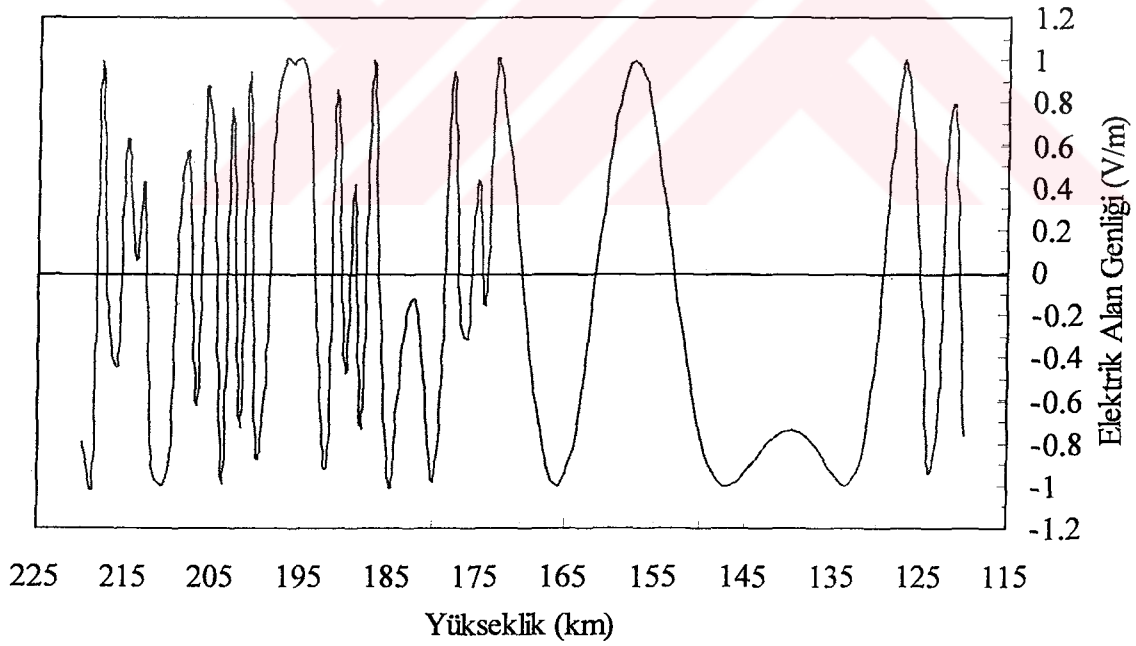
3 MHz, 4 MHz ve 5 MHz frekanslı dalgaların iyonküre plazması içerisindeki yayılımı sırasında genliklerindeki değişimler sırasıyla Şekil 5.3, Şekil 5.4 ve Şekil 5.5 ile verilmiştir. 3 MHz lik dalganın yaklaşık 220 km den, 4 MHz lik dalganın yaklaşık 241 km den ve 5 MHz lik dalganın ise yaklaşık 269 km den yansıdığı görülmektedir.

Tablo 5.2. 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri.

h (km)	N_e (el./m ³)	ω_{ce} (rad/s)	ω_{pe} (rad/s)	f (MHz)	v_e (s ⁻¹)
120	9.084E+08	7.745E+06	1.700E+06	0.886	5.443E+03
130	4.135E+08	7.707E+06	1.147E+06	0.795	2.359E+03
140	3.410E+08	7.669E+06	1.042E+06	0.776	1.234E+03
150	4.933E+08	7.637E+06	1.253E+06	0.807	7.539E+02
160	8.652E+08	7.595E+06	1.659E+06	0.868	4.969E+02
170	1.424E+09	7.558E+06	2.129E+06	0.940	3.458E+02
180	9.480E+09	7.521E+06	5.492E+06	1.472	2.738E+02
190	2.094E+10	7.485E+06	8.162E+06	1.894	2.415E+02
200	3.239E+10	7.449E+06	1.015E+07	2.208	2.267E+02
210	4.732E+10	7.413E+06	1.227E+07	2.542	2.313E+02
220	4.427E+10	7.377E+06	1.537E+07	3.033	2.711E+02
230	1.076E+11	7.342E+06	1.850E+07	3.528	3.277E+02
240	1.448E+11	7.307E+06	2.146E+07	3.997	3.923E+02
250	1.826E+11	7.272E+06	2.410E+07	4.414	4.574E+02
260	2.173E+11	7.237E+06	2.630E+07	4.761	5.143E+02
270	2.461E+11	7.202E+06	2.798E+07	5.026	5.573E+02
280	2.670E+11	7.168E+06	2.915E+07	5.209	5.845E+02
290	2.799E+11	7.134E+06	2.984E+07	5.317	5.953E+02
300	2.857E+11	7.100E+06	3.015E+07	5.363	5.973E+02
310	2.864E+11	7.066E+06	3.019E+07	5.367	5.997E+02
320	2.838E+11	7.033E+06	3.005E+07	5.342	6.012E+02
330	2.793E+11	7.000E+06	2.976E+07	5.293	5.973E+02
340	2.703E+11	6.967E+06	2.933E+07	5.222	5.894E+02
350	2.602E+11	6.934E+06	2.877E+07	5.130	5.770E+02
360	2.483E+11	6.901E+06	2.811E+07	5.023	5.608E+02
370	2.353E+11	6.869E+06	2.736E+07	4.901	5.376E+02
380	2.215E+11	6.837E+06	2.655E+07	4.769	5.022E+02
390	2.073E+11	6.805E+06	2.569E+07	4.630	4.659E+02
400	1.931E+11	6.773E+06	2.479E+07	4.484	4.311E+02

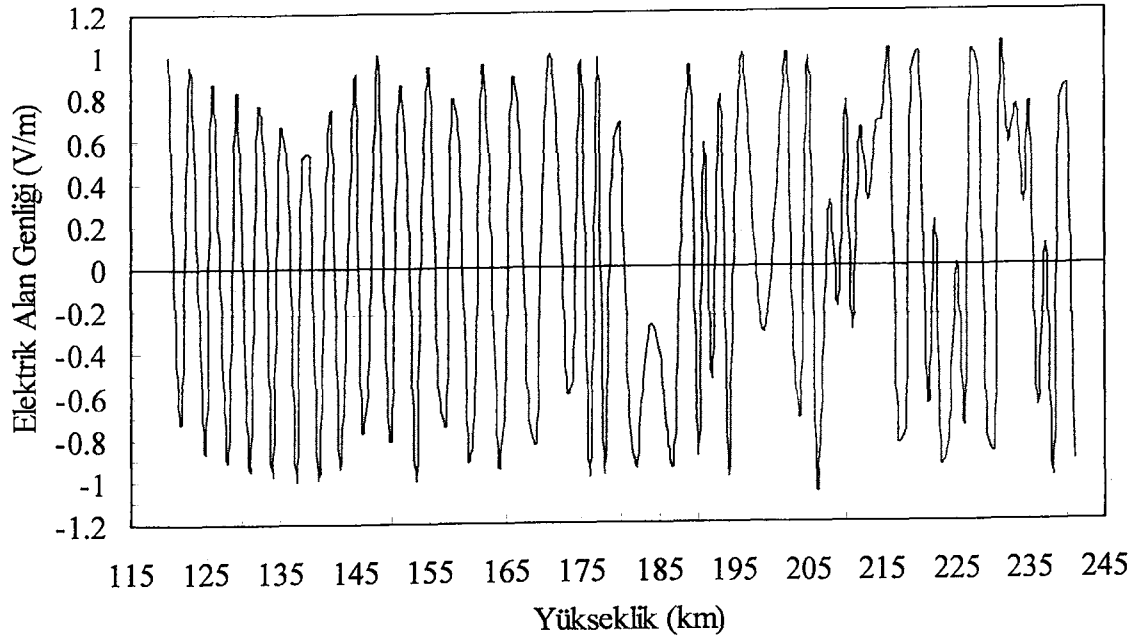


a

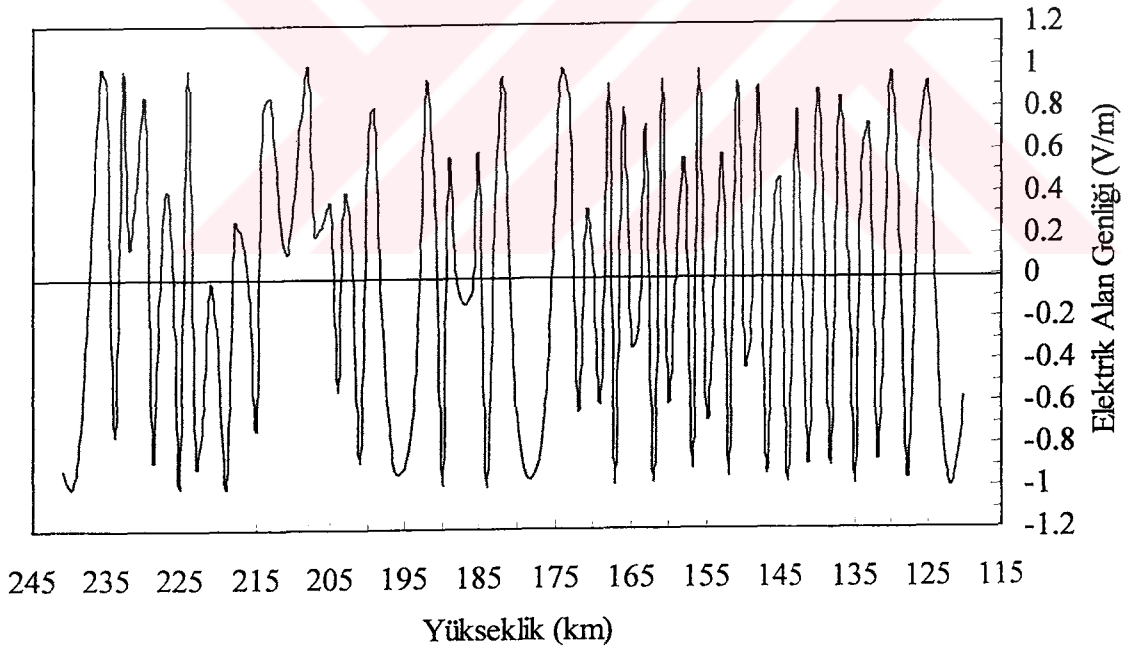


b

Şekil 5.3. 3 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b: Yansıdıktan sonra).

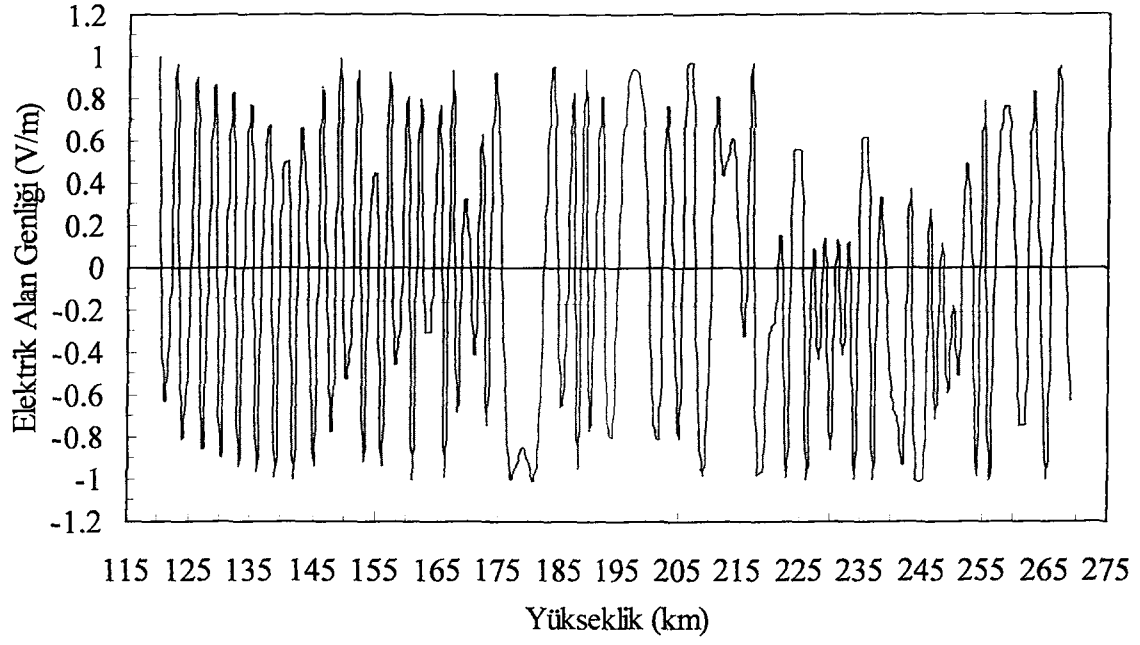


a

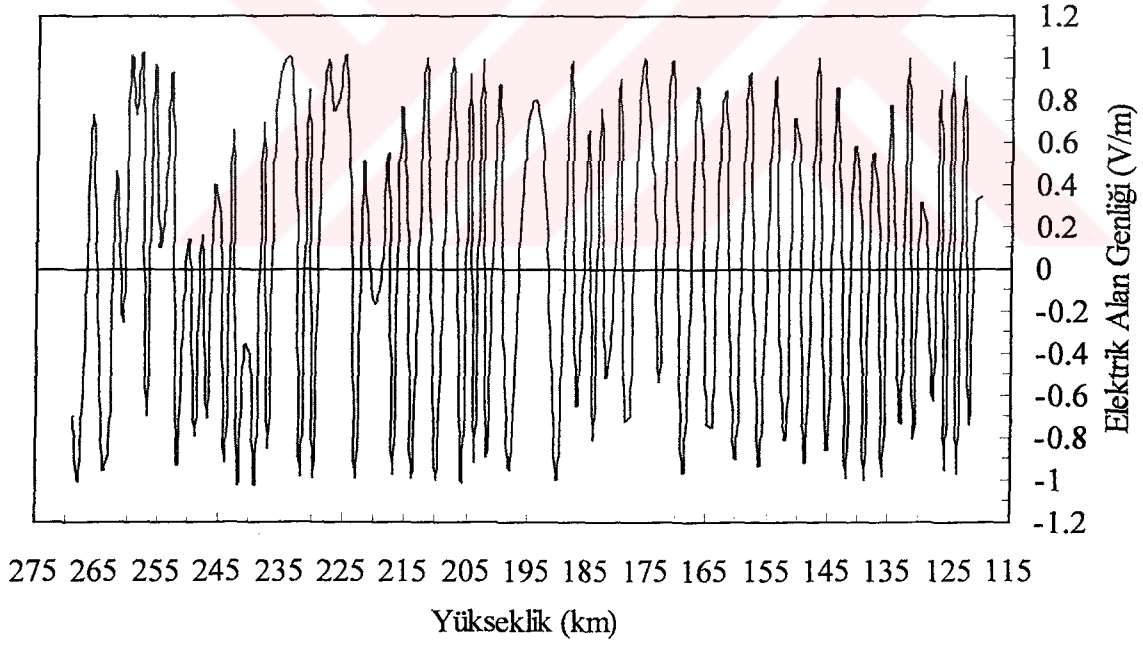


b

Şekil 5.4. 4 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b: Yansıdıktan sonra).



a



b

Şekil 5.5. 5 MHz frekanslı dalganın 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b: Yansdıktan sonra).

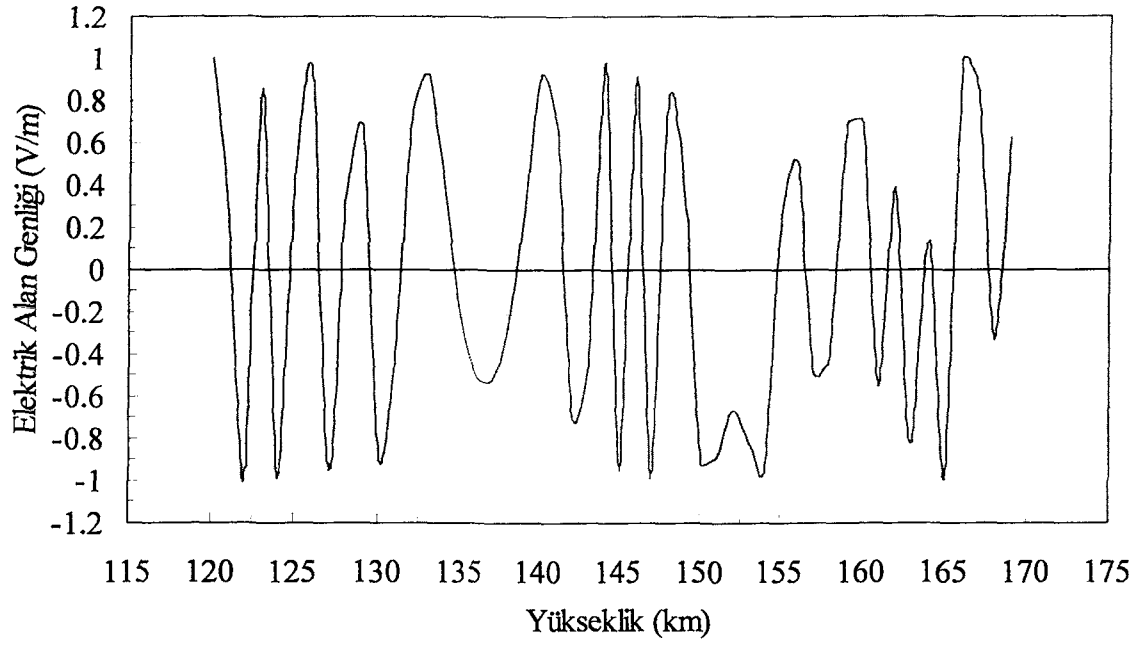
Şekillerden görüldüğü gibi her üç frekanstaki dalganın gündüz saatlerine göre daha yukarı bölgelerden yansıması, iyonkürenin gece yukarı bölgelere taşındığını göstermektedir. Ayrıca her üç frekanstaki yayılım için genlik sabit olmasına rağmen, yükseklikle değişen iyonküre parametrelerine bağlı olarak genliğin farklı değerler aldığı görülmektedir.

21 Aralık saat 12.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimi Tablo 5.3 ile verilmiştir. Tabloya göre iyonküreden ancak yaklaşık 6.523 MHz e kadar olan dalgaların yansıdığı ve tepe yüksekliğinin de yaklaşık 220 km civarında olduğu görülmektedir. Tablodan görüleceği gibi 120 km den yansıyan dalganın frekansı 3 MHz den büyüktür. Bu nedenle, 3 MHz lik dalga 120 km nin altında yansıdığından dalganın yayılımı incelenememiştir.

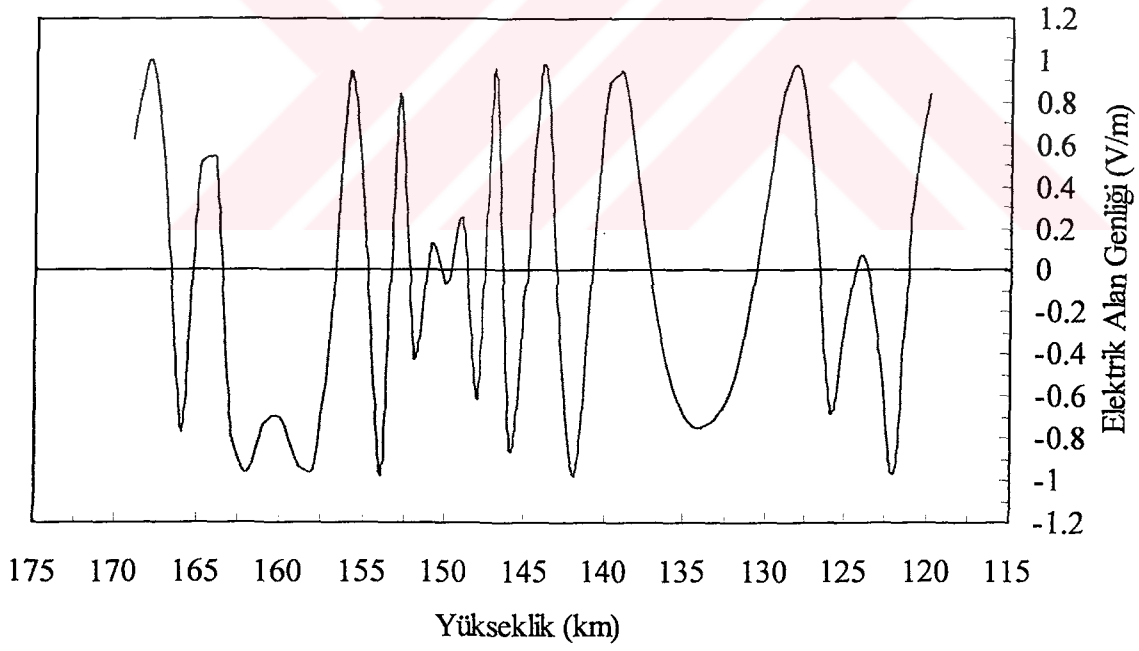
4 MHz ve 5 MHz frekanslara sahip dalgaların iyonküre plazması içerisindeki yayılımı sırasında genliklerindeki değişimler sırasıyla Şekil 5.6 ve Şekil 5.7 ile verilmiştir.

Tablo 5.3. 21 Aralık saat 12.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri.

h (km)	N_e (el./m ³)	ω_{ce} (rad/s)	ω_{pe} (rad/s)	f (MHz)	v_e (s ⁻¹)
120	8.883E+10	7.745E+06	1.681E+07	3.291	6.096E+03
130	1.003E+11	7.707E+06	1.786E+07	3.455	2.862E+03
140	1.059E+11	7.669E+06	1.835E+07	3.530	1.659E+03
150	1.128E+11	7.632E+06	1.894E+07	3.621	1.104E+03
160	1.225E+11	7.595E+06	1.974E+07	3.746	8.049E+02
170	1.570E+11	7.558E+06	2.235E+07	4.158	6.595E+02
180	2.435E+11	7.521E+06	2.784E+07	5.029	6.090E+02
190	3.272E+11	7.485E+06	3.227E+07	5.731	5.732E+02
200	3.908E+11	7.449E+06	3.526E+07	6.204	5.296E+02
210	4.264E+11	7.413E+06	3.684E+07	6.453	4.774E+02
220	4.371E+11	7.377E+06	3.730E+07	6.523	4.258E+02
230	4.355E+11	7.342E+06	3.723E+07	6.509	3.814E+02
240	4.295E+11	7.307E+06	3.697E+07	6.465	3.433E+02
250	4.196E+11	7.272E+06	3.654E+07	6.394	3.092E+02
260	4.062E+11	7.237E+06	3.595E+07	6.297	2.781E+02
270	3.899E+11	7.202E+06	3.522E+07	6.178	2.497E+02
280	3.714E+11	7.168E+06	3.438E+07	6.042	2.237E+02
290	3.514E+11	7.134E+06	3.344E+07	5.890	2.003E+02
300	3.302E+11	7.100E+06	3.242E+07	5.724	1.834E+02
310	3.087E+11	7.066E+06	3.134E+07	5.550	1.648E+02
320	2.871E+11	7.033E+06	3.023E+07	5.371	1.516E+02
330	2.659E+11	7.000E+06	2.909E+07	5.187	1.395E+02
340	2.454E+11	6.967E+06	2.795E+07	5.002	1.282E+02
350	2.259E+11	6.934E+06	2.681E+07	4.818	1.178E+02
360	2.074E+11	6.901E+06	2.569E+07	4.637	1.081E+02
370	1.902E+11	6.869E+06	2.460E+07	4.461	9.906E+01
380	1.743E+11	6.837E+06	2.355E+07	4.292	9.085E+01
390	1.596E+11	6.805E+06	2.253E+07	4.127	8.322E+01
400	1.461E+11	6.773E+06	2.156E+07	3.970	7.615E+01

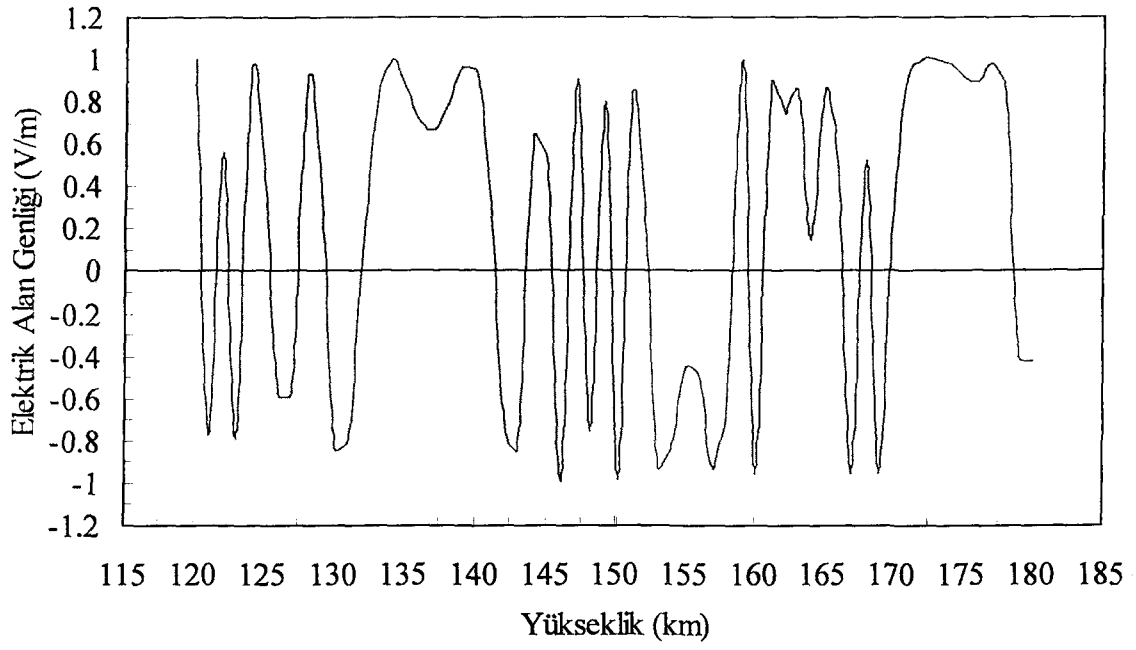


a

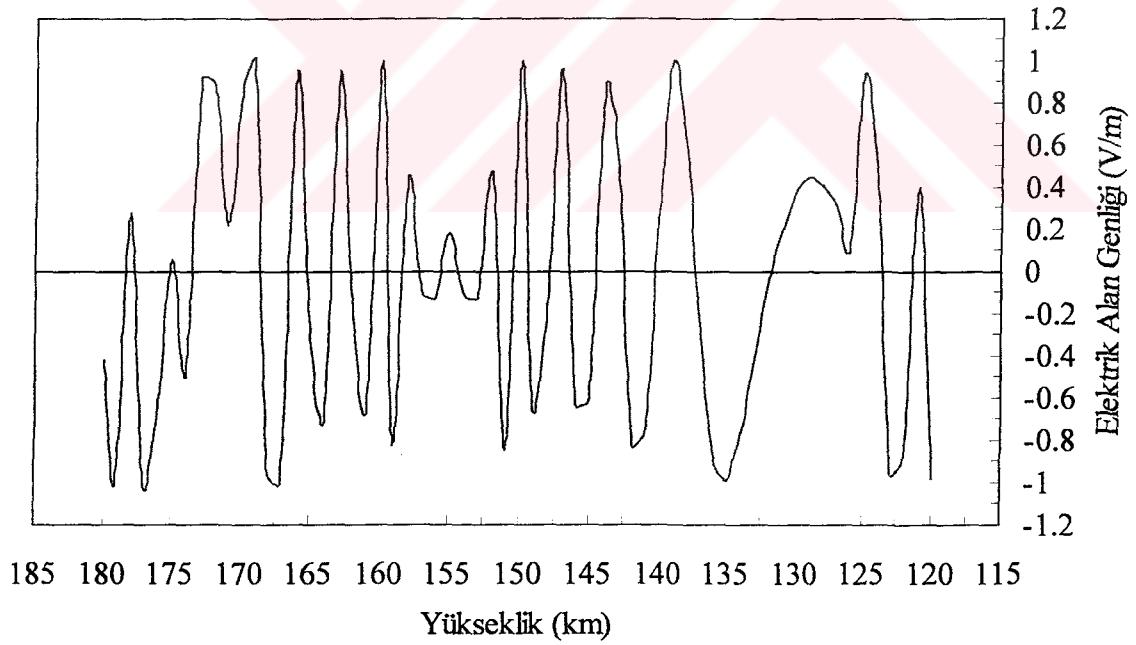


b

Şekil 5.6. 4 MHz frekanslı dalganın 21 Aralık saat 12.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b: Yansıdıktan sonra).



a



b

Şekil 5.7. 5 MHz frekanslı dalganın 21 Aralık saat 12.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b: Yansıdıktan sonra).

4 MHz lik dalga yazın saat 12.00 YZ'da 138 km den yansırken, kışın 169 km den yansımaktadır. 5 MHz lik dalganın ise yazın aynı saatte 192 km den yansımaya karşın, kışın 180 km den yansıdığı görülmektedir.

5 MHz lik dalganın yazıya göre daha düşük yükseklikten yansması, Tablo 5.1 ve Tablo 5.3'ten de görüleceği gibi F bölgesindeki elektron yoğunluğunun kışın yazdan daha büyük olduğundan kaynaklanmaktadır. Bu durum iyonkürede anormallik olarak adlandırılır [38].

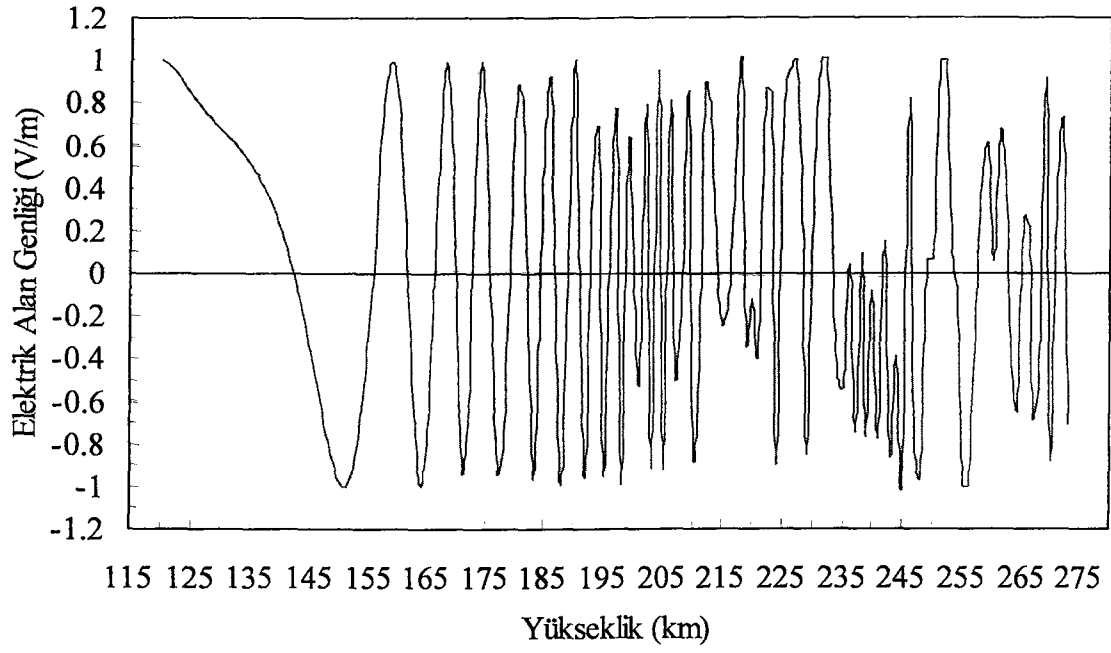
21 Aralık saat 24.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri Tablo 5.4'de verilmiştir. Tabloya bakıldığında tepe yüksekliğinin yaklaşık 320 km civarında olduğu ve bu yükseklikten yansıyacak dalga frekansının en fazla 3.445 MHz olduğu görülmektedir. Bu durum karşısında kışın gece saatlerinde çalışılan frekanslardan sadece 3 MHz lik dalganın yansıdığı görülmektedir. 3 MHz lik dalganın iyonküre plazması içerisindeki yayılımında genliğinin yükseklikle değişimi Şekil 5.8 de verilmiştir.

Yazın ve kışın, gündüz ve gece saatlerindeki verilerin alınmasında kullanılan (2.40) denklemindeki ifadeye bakıldığında dalga genliğinin her yükseklikte farklı değerler alması ve genlikteki düzensiz davranışın yükseklikle değişen iyonküre parametrelerinden kaynaklandığı açıkça görülebilir. Buna göre, sabit frekansta yükseklikle değişen elektron yoğunluğu ve Yer'in manyetik alanı dalga genliğini değiştirecektir (Tablo 5.1-Tablo 5.4).

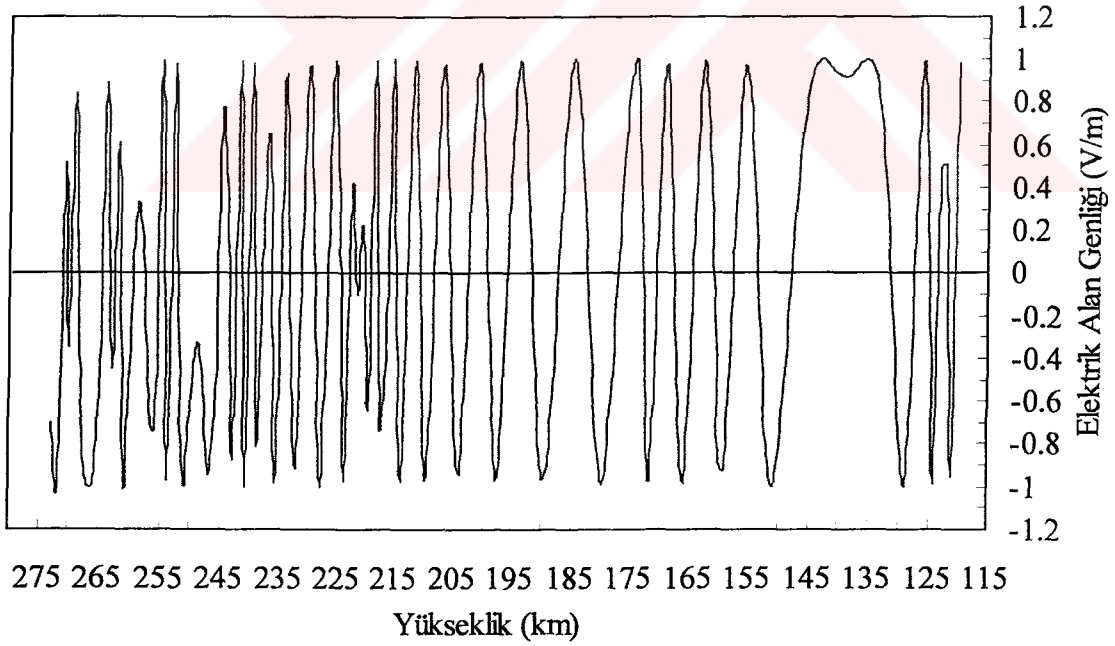
Bu sonuç iyonkürenin düzensiz yapısından kaynaklanmaktadır. Aynı sonuçlar orta enlemlerdeki Beveridge (37.3° S, 144.6° E) istasyonunda HF bandı için yapılan ölçümlerde de elde edilmiştir [39]. İyonküreye dikey gönderilen ve E ve F bölgelerinden yansıdıktan sonra geri alınarak ölçülen dalga genliklerindeki düzensizliklerin, iyonküredeki düzensiz yapıdan kaynaklandığı ortaya çıkmaktadır. Fejer de [40] aynı sonuçları deneysel olarak elde etmiş ve bunun sebebinin kısmen atmosferik gürültülerden kaynaklandığını belirtmiştir. Abraham ve arkadaşları [41], bu düzensizliğin iyonküredeki bölgeler arasındaki basınç farkından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Unwin ve Knox [42] ise iyonküredeki elektrik alandaki düzensizliklerin plazmanın kararsızlığından ve dolayısıyla iyonlaşmadaki düzensizlikten meydana geldiğini ileri sürmüşlerdir. Thrane'e [43] göre HF bandında yapılan yayında dalga genliğindeki uzaysal düzensizliğin nedeni, elektron yoğunluğunun yükseklikle değişiminin bir sonucudur. Ayrıca iyonküre tabakalarındaki ani karışıklıklarında dalga genliğini etkilediğini savunmuştur. Bunun yanı sıra Al'pert [44], alan genliğinin oldukça duyarlı olduğunu ve iyonküresel parametrelerdeki küçük değişimlere bağlı olduğunu teorik olarak göstermiştir. Budden [45] ise ortamın manyetik alan yönünün ve elektron yoğunluğundaki değişimin etkili olduğunu vurgulamıştır. Dyson ve Bennett [46] de dikey yolla radyo yayılımı çalışmalarında Yer'in manyetik alanının etkisinin önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Tablo 5.4. 21 Aralık saat 24.00 YZ'daki iyonkütre parametrelerinin yükseklikle değişimleri.

h (km)	N_e (el./m ³)	ω_{ce} (rad/s)	ω_{pe} (rad/s)	f (MHz)	v_e (s ⁻¹)
120	9.155E+08	7.745E+06	1.707E+06	0.888	5.379E+03
130	4.094E+08	7.707E+06	1.141E+06	0.794	2.263E+03
140	3.327E+08	7.669E+06	1.029E+06	0.774	1.183E+03
150	4.800E+08	7.632E+06	1.236E+06	0.804	7.209E+02
160	8.502E+08	7.595E+06	1.645E+06	0.866	4.733E+02
170	1.411E+09	7.558E+06	2.119E+06	0.938	3.293E+02
180	2.026E+09	7.521E+06	2.539E+06	1.002	2.412E+02
190	2.658E+09	7.485E+06	2.909E+06	1.058	1.834E+02
200	3.573E+09	7.449E+06	3.372E+06	1.129	1.445E+02
210	4.993E+09	7.413E+06	3.986E+06	1.224	1.190E+02
220	7.580E+09	7.377E+06	4.911E+06	1.368	1.048E+02
230	1.409E+10	7.342E+06	6.697E+06	1.650	1.074E+02
240	2.456E+10	7.307E+06	8.841E+06	1.988	1.240E+02
250	3.828E+10	7.272E+06	1.104E+07	2.335	1.506E+02
260	5.398E+10	7.237E+06	1.311E+07	2.662	1.828E+02
270	6.974E+10	7.202E+06	1.490E+07	2.944	2.148E+02
280	8.354E+10	7.168E+06	1.630E+07	3.164	2.414E+02
290	9.392E+10	7.134E+06	1.729E+07	3.319	2.592E+02
300	1.003E+11	7.100E+06	1.787E+07	3.409	2.678E+02
310	1.031E+11	7.066E+06	1.811E+07	3.444	2.684E+02
320	1.034E+11	7.033E+06	1.813E+07	3.445	2.635E+02
330	1.025E+11	7.000E+06	1.806E+07	3.431	2.564E+02
340	1.006E+11	6.967E+06	1.789E+07	3.401	2.480E+02
350	9.798E+10	6.934E+06	1.766E+07	3.362	2.377E+02
360	9.465E+10	6.901E+06	1.735E+07	3.310	2.266E+02
370	9.077E+10	6.869E+06	1.700E+07	3.252	2.144E+02
380	8.649E+10	6.837E+06	1.659E+07	3.184	2.016E+02
390	8.193E+10	6.805E+06	1.615E+07	3.111	1.887E+02
400	7.724E+10	6.773E+06	1.568E+07	3.034	1.758E+02



a



b

Şekil 5.8. 3 MHz frekanslı dalganın 21 Aralık saat 24.00 YZ'daki yayılımı (a: Yansıma noktasına kadar, b: Yansıdıktan sonra).

5.2. Dikey Yayılan HF Elektromanyetik Dalganın İyonküre İçerisindeki Sönümü

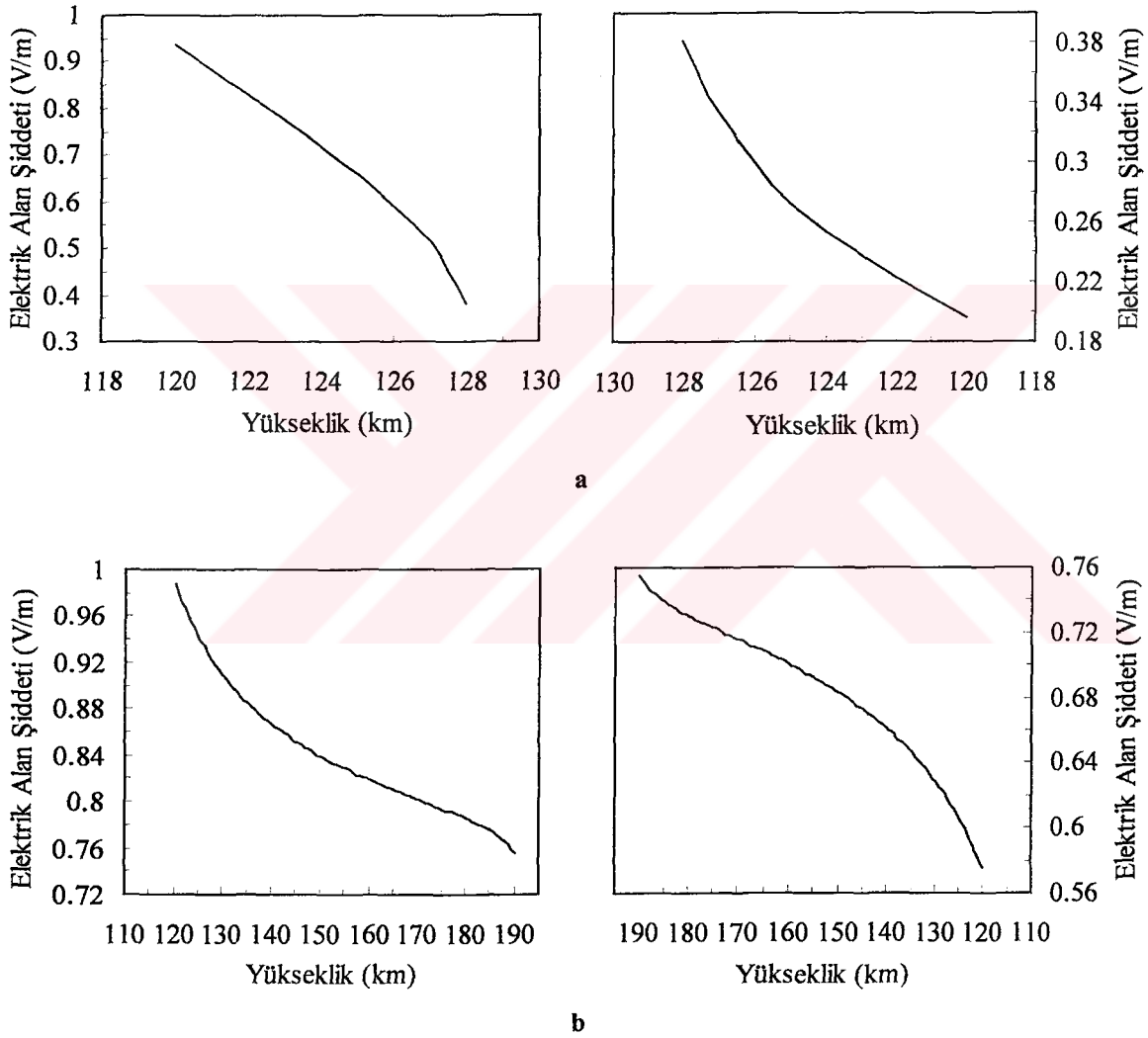
Dikey yayılan HF elektromanyetik dalganın elektrik alan şiddetinin sayısal hesaplamaları, denklem (3.29) ile verilen ifade kullanılarak yapıldı. Hesaplamalarda iyonküreye giren dalganın elektrik alan şiddeti 1 olarak alındı. İyonküre parametrelerine bağlı olarak denklem (3.29)'daki eşitliğin sağ tarafındaki ikinci üstel terim, teorik olarak dalganın şiddetini azaltacaktır. Bu azalmalar sayısal olarak incelendi. Bu kısımda 3 MHz, 4 MHz ve 5 MHz frekanslı dalgaların elektrik alan şiddetlerinin iyonküre içerisindeki yükseklik, günlük, mevsimsel ve frekansa bağlı değişimleri incelendi.

5.2.1. Elektrik Alan Şiddetinin Yükseklikle Değişimi

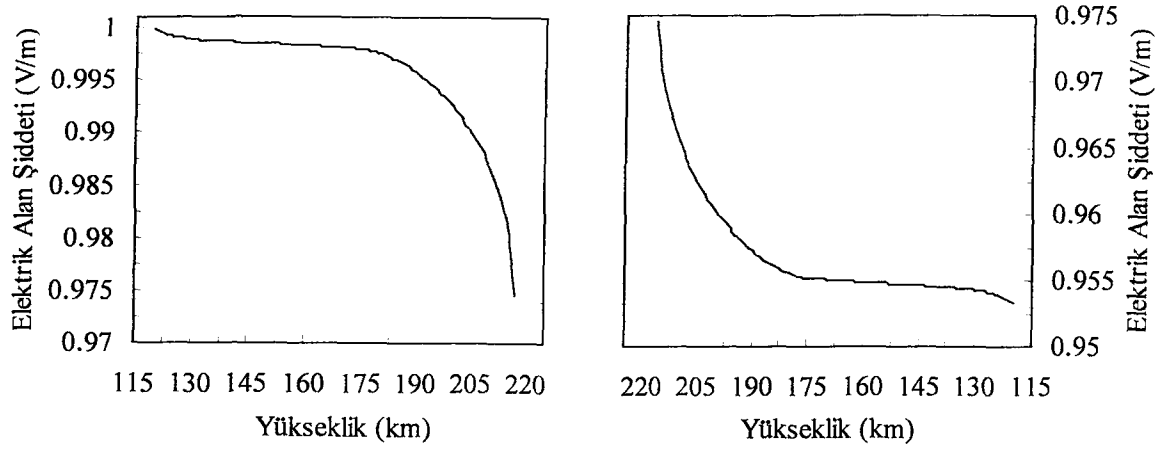
21 Haziran saat 12.00 YZ'da dikey yayılan HF elektromanyetik dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi Şekil 5.9 ile verilmiştir. Sayısal incelemeler iyonkürenin 120 km'inden itibaren yapıldı. Tablo 5.1'den görüleceği gibi bu saatte 3 MHz frekanslı dalga 120 km'nin altında yansıdığından bu frekansa sahip dalga incelenmemiştir. 4 MHz frekanslı dalga 138 km'den yansıyacaktır (Tablo 5.1). Elektrik alan şiddeti yansıma noktasına kadar yaklaşık %62, yansıdıktan sonra geri döndüğünde de yaklaşık %19 olmak üzere toplam %81 civarında sönüme uğramıştır. Dalganın hem yukarıya doğru hem de yansıdıktan sonra aşağıya doğru ilerlemesinde, 120 km ile 130 km arası dalgadaki zayıflamanın yükseklikle hemen hemen aynı oranda değiştiği görülmektedir. 5 MHz frekansa sahip dalga 192 km'den yansımış, bu noktaya kadar yaklaşık %25 oranında zayıflamıştır. Yansıdıktan sonra ise %18'ine yakını kaybederek yaklaşık %43'lük bir sönüme uğramıştır. Bu dalganın 150 km'nin altındaki yüksekliklerde daha fazla sönüme uğradığı göze çarpmaktadır. Her iki frekanstaki dalga karşılaştırıldığında, daha büyük frekanslı dalgalardeki sönümün daha az olduğu görülmektedir. Bu durum Tablo 5.1'den de görüldüğü gibi gündüz saatlerinde daha alt yüksekliklerdeki elektron yoğunluğunun daha az olmasına rağmen iyon yoğunluğunun ve dolayısıyla elektron çarpışma frekansının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır [35, 40, 47].

21 Haziran saat 24.00 YZ için elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi Şekil 5.10'da görüldüğü gibidir. 3 MHz'lik dalganın yayılımı incelendiğinde 220 km'den yansıdığı, yansıma noktasına kadar yaklaşık %2.5 ve yansıdıktan sonrada hemen hemen aynı oranda zayıflayarak toplam %4.7 oranında zayıfladığı görülmektedir. 4 MHz frekanslı dalgaya bakıldığında 241 km'den yansıdığı ve yansıma noktasına kadar yaklaşık %3.7, yansıdıktan sonra ise yaklaşık %3 zayıflayarak toplam %6.7 oranında zayıfladığı görülmektedir. 5 MHz'lik dalga incelendiğinde, 269 km'den yansıdığı ve yansıma noktasına kadar yaklaşık %10, yansıdıktan sonra ise yaklaşık %5.3 zayıflayarak toplam %15.3'lük bir kayba uğramıştır. Her üç frekansta da 120 km ile 190 km arasındaki sönüm oranının diğer yüksekliklere oranla daha az

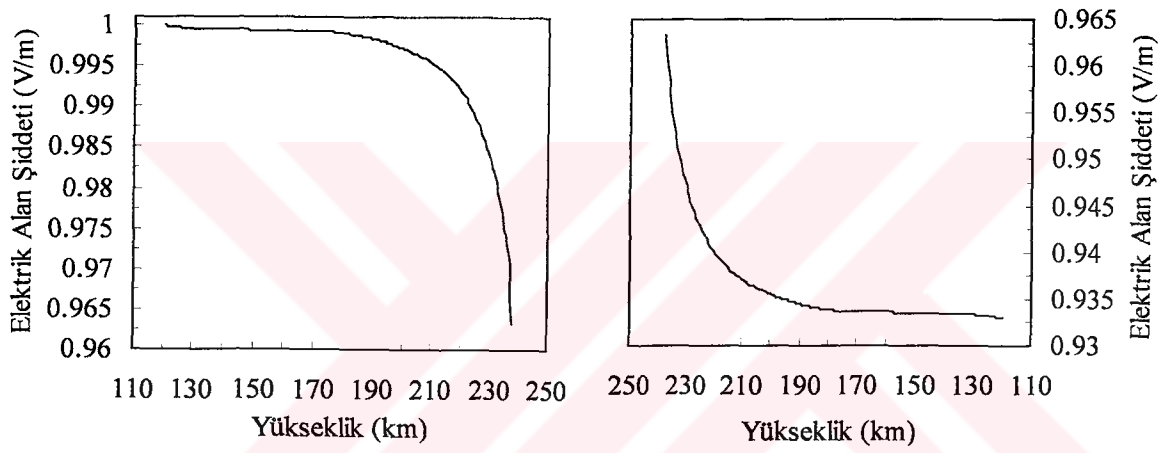
olduğu görülmektedir. Bu sonuç iyonkürenin gece saatlerinde daha üst bölgelere taşınmasından, dolayısıyla elektron yoğunluğunun bu saatlerde üst bölgelerde daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır (Tablo 5.2). Ayrıca her iki frekansta da dalganın aldığı yollar gündüz saatlerine göre daha fazla olmasına rağmen, sönümün çok daha az olduğu görülmektedir. Bu da gece saatlerindeki radyo yayınının daha verimli olduğunun bir göstergesidir [48].



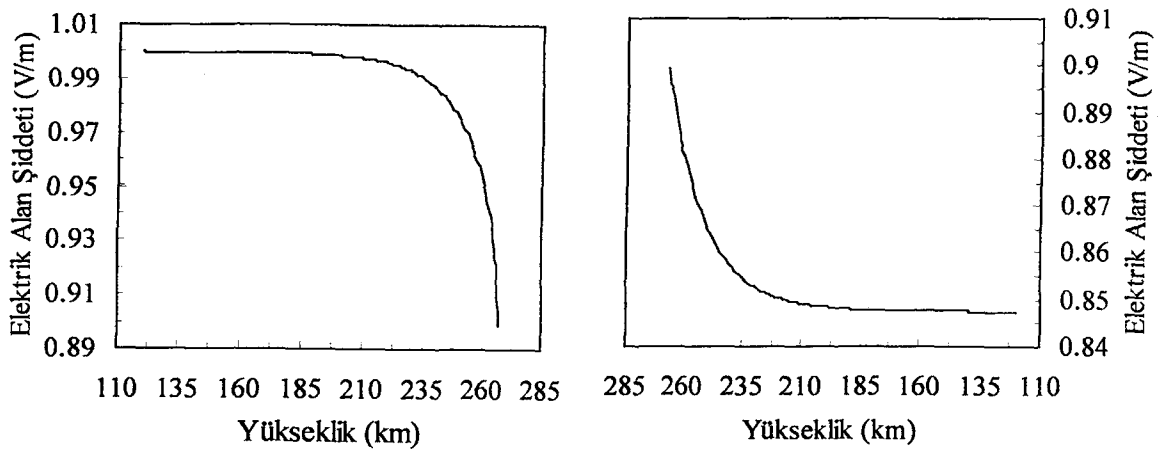
Şekil 5.9. 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 4 MHz, b: 5 MHz).



a



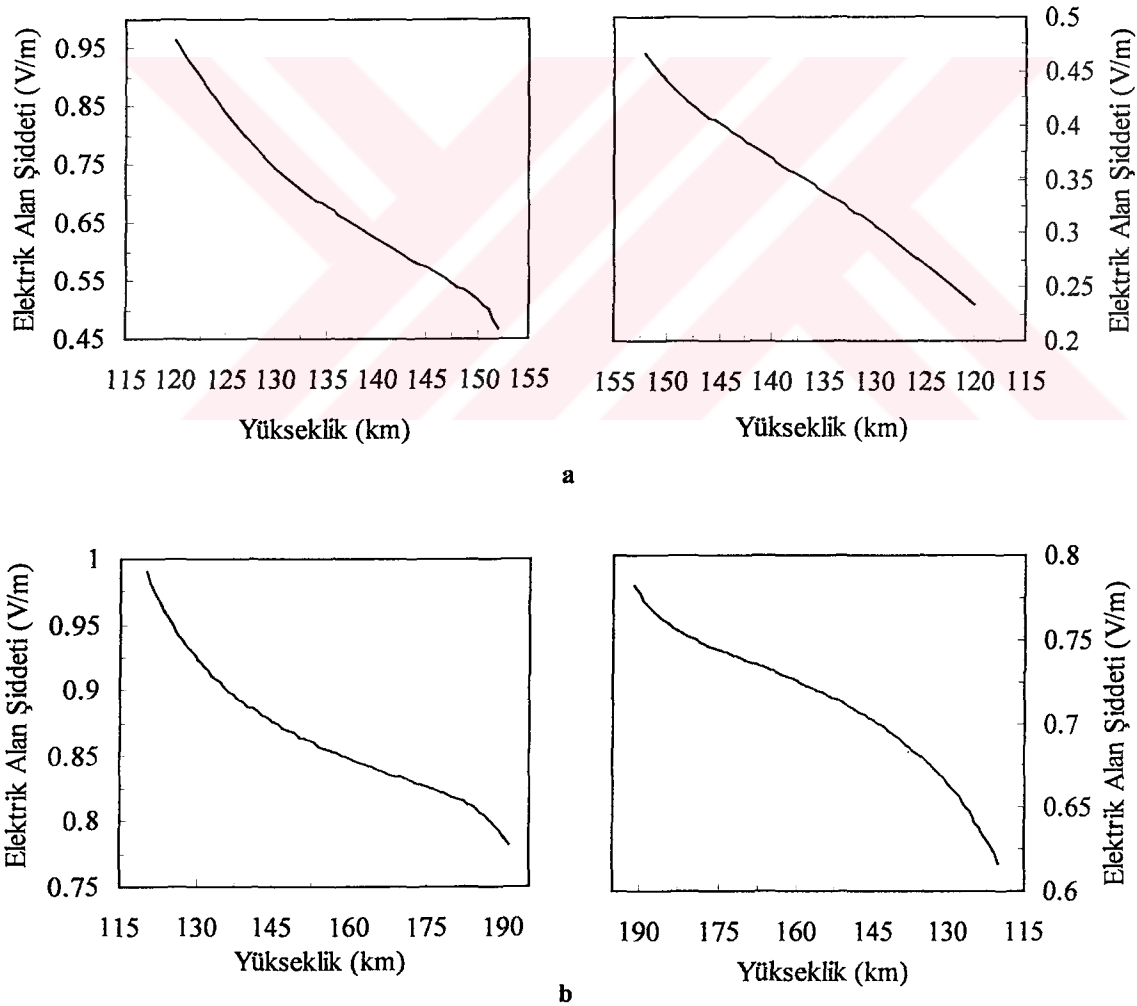
b



c

Şekil 5.10. 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki dalgaın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değışimi (a: 3 MHz, b: 4 MHz, c: 5 MHz).

23 Eylül (ekinoks) saat 12.00 YZ'da dikey yayılan HF elektromanyetik dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi Şekil 5.11 ile verilmiştir. Bu gün ve saat için Tablo 5.5'den de görüleceği gibi 3 MHz'lik dalga 120 km'nin altında yansıdığından, sadece 4 MHz ve 5 MHz frekanslı dalgalar incelenmiştir. 4 MHz frekanslı dalga 158 km'den yansımıştır. Elektrik alan şiddeti yansıma noktasına kadar yaklaşık %54, yansıdıktan sonra geri döndüğünde de yaklaşık %23 olmak üzere toplam %77 civarında zayıflamıştır. 5 MHz frekanslı dalga 193 km'den yansımış, bu noktaya kadar şiddetinin yaklaşık %22'sini kaybetmiş, yansıdıktan sonra ise yaklaşık %17 oranında zayıflayarak toplam %39 civarında bir sönüme uğramıştır. 4 MHz'lik dalgadaki sönüm yükseklikle aynı oranda değişirken, 5 MHz'lik dalga 120 km ile 150 km arasında diğer yüksekliklere göre daha fazla zayıflamıştır. Tablodaki sonuçlar incelendiğinde düşük yüksekliklerdeki elektron çarpışma frekansının büyük olması, iyonkürenin alt bölgelerindeki sönümün daha fazla olduğunu göstermektedir. Her iki dalga karşılaştırıldığında, daha küçük frekanstaki dalganın sönümünün daha fazla olduğu görülmektedir.

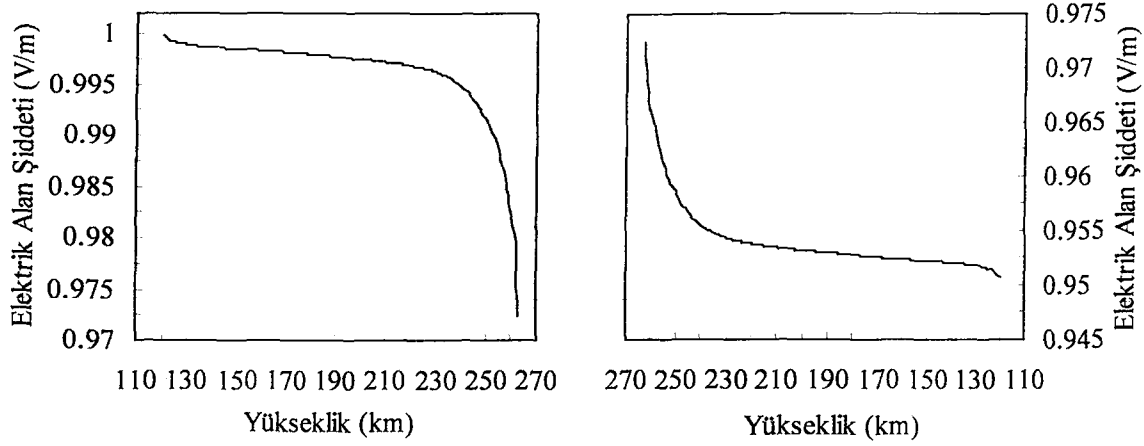


Şekil 5.11. 23 Eylül saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 4 MHz, b: 5 MHz).

Tablo 5.5. 23 Eylül (ekinoks) saat 12.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri.

h (km)	N_e (el./m ³)	ω_{ce} (rad/s)	ω_{pe} (rad/s)	f (MHz)	v_e (s ⁻¹)
120	1.171E+11	7.745E+06	1.930E+07	3.688	6.339E+03
130	1.248E+11	7.707E+06	1.993E+07	3.785	2.976E+03
140	1.301E+11	7.669E+06	2.035E+07	3.849	1.730E+03
150	1.366E+11	7.632E+06	2.085E+07	3.925	1.155E+03
160	1.449E+11	7.595E+06	2.148E+07	4.023	8.411E+02
170	1.569E+11	7.558E+06	2.235E+07	4.158	6.520E+02
180	1.872E+11	7.521E+06	2.440E+07	4.182	5.446E+02
190	2.306E+11	7.485E+06	2.709E+07	4.907	4.802E+02
200	2.993E+11	7.449E+06	3.086E+07	5.504	4.524E+02
210	3.680E+11	7.413E+06	3.422E+07	6.036	4.333E+02
220	4.233E+11	7.377E+06	3.670E+07	6.428	4.204E+02
230	4.608E+11	7.342E+06	3.829E+07	6.678	4.142E+02
240	4.806E+11	7.307E+06	3.911E+07	6.806	4.075E+02
250	4.862E+11	7.272E+06	3.933E+07	6.838	3.973E+02
260	4.840E+11	7.237E+06	3.924E+07	6.821	3.859E+02
270	4.767E+11	7.202E+06	3.895E+07	6.772	3.740E+02
280	4.649E+11	7.168E+06	3.846E+07	6.691	3.609E+02
290	4.490E+11	7.134E+06	3.780E+07	6.583	3.462E+02
300	4.300E+11	7.100E+06	3.699E+07	6.452	3.274E+02
310	4.085E+11	7.066E+06	3.605E+07	6.300	3.034E+02
320	3.852E+11	7.033E+06	3.501E+07	6.131	2.775E+02
330	3.610E+11	7.000E+06	3.389E+07	5.950	2.521E+02
340	3.364E+11	6.967E+06	3.272E+07	5.762	2.281E+02
350	3.119E+11	6.934E+06	3.150E+07	5.565	2.055E+02
360	2.880E+11	6.901E+06	3.027E+07	5.366	1.847E+02
370	2.651E+11	6.869E+06	2.904E+07	5.168	1.657E+02
380	2.434E+11	6.837E+06	2.783E+07	4.973	1.484E+02
390	2.230E+11	6.805E+06	2.664E+07	4.781	1.329E+02
400	2.041E+11	6.773E+06	2.548E+07	4.594	1.192E+02

Ekinoksta saat 24.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi Şekil 5.12 ile verilmiştir. Bu saatte çalışılan frekanslardan sadece 3 MHz lik dalga iyonküreden yansır. Bu durum Tablo 5.6'dan da görülebilir. 3 MHz frekanslı dalganın yayılımı incelendiğinde 266 km den yansıdığı, yansıma noktasına kadar yaklaşık %2.8 yansıdıktan sonrada hemen hemen aynı oranda zayıflayarak toplam %5 oranında zayıfladığı görülmektedir. Burada bu dalganın 240 km ye kadar daha az zayıfladığı, 240 km den sonra sönümün artması iyonkürenin gece saatlerinde daha üst bölgelere çıktığının bir göstergesidir. Ayrıca burada da dalganın aldığı yol gündüz saatlerine göre daha fazla olmasına rağmen, sönümün çok daha az olduğu görülmektedir.

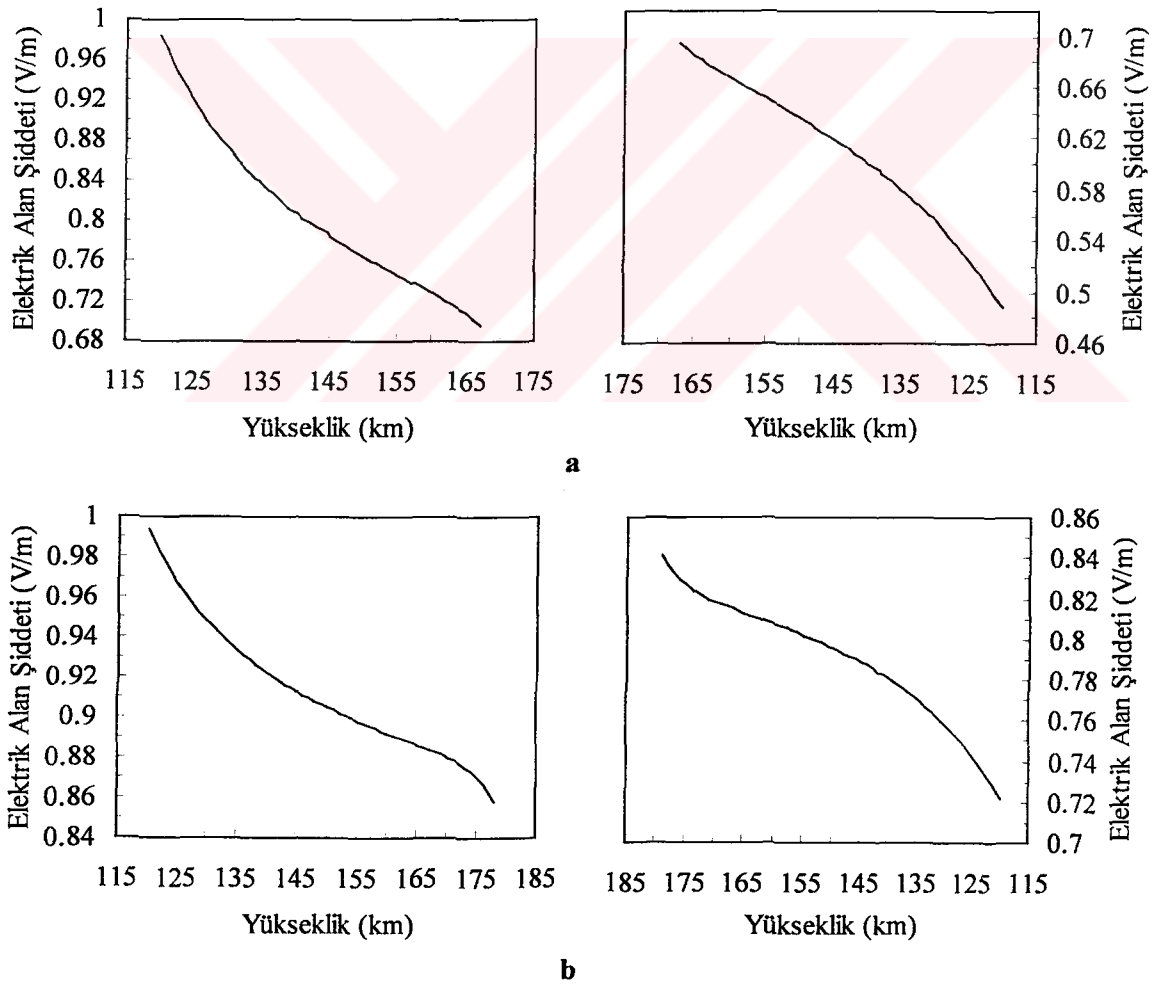


Şekil 5.12. 23 Eylül saat 24.00 YZ'daki 3 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi.

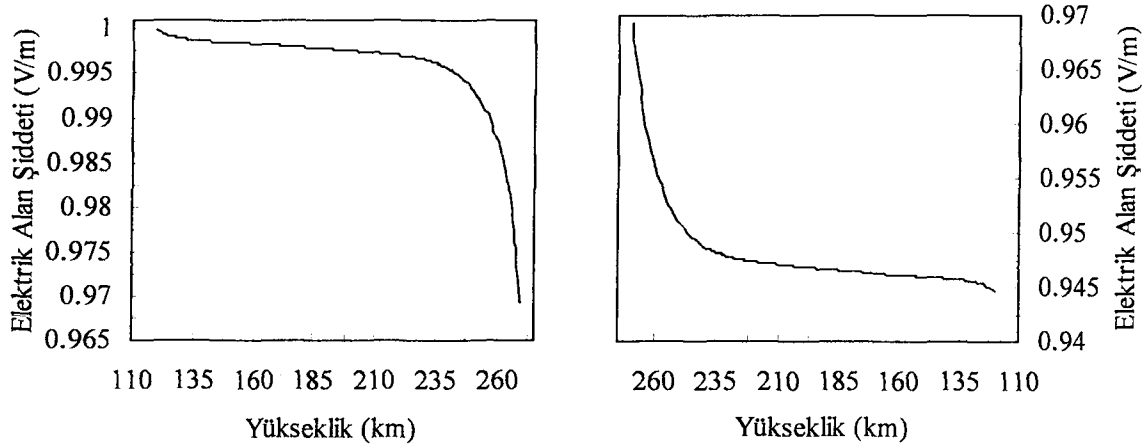
Tablo 5.6. 23 Eylül (ekinoks) saat 24.00 YZ'daki iyonküre parametrelerinin yükseklikle değişimleri.

h (km)	N_e (el./m ³)	ω_{ce} (rad/s)	ω_{pe} (rad/s)	f (MHz)	v_e (s ⁻¹)
120	9.019E+08	7.745E+06	1.694E+06	0.885	5.474E+03
130	4.044E+08	7.707E+06	1.134E+06	0.793	2.334E+03
140	3.294E+08	7.669E+06	1.024E+06	0.773	1.219E+03
150	4.755E+08	7.632E+06	1.230E+06	0.803	7.434E+02
160	8.408E+08	7.595E+06	1.636E+06	0.864	4.871E+02
170	1.394E+09	7.558E+06	2.106E+06	0.936	3.373E+02
180	2.067E+09	7.521E+06	2.564E+06	1.006	2.467E+02
190	2.859E+09	7.485E+06	3.016E+06	1.075	1.875E+02
200	4.055E+09	7.449E+06	3.588E+06	1.163	1.481E+02
210	5.923E+09	7.413E+06	4.342E+06	1.280	1.225E+02
220	9.262E+09	7.377E+06	5.429E+06	1.451	1.100E+02
230	1.657E+10	7.342E+06	7.262E+06	1.740	1.137E+02
240	2.822E+10	7.307E+06	9.476E+06	2.089	1.328E+02
250	4.372E+10	7.272E+06	1.180E+07	2.456	1.641E+02
260	6.219E+10	7.237E+06	1.407E+07	2.815	2.044E+02
270	8.192E+10	7.202E+06	1.615E+07	3.143	2.481E+02
280	1.009E+11	7.168E+06	1.791E+07	3.420	2.902E+02
290	1.171E+11	7.134E+06	1.930E+07	3.639	3.249E+02
300	1.293E+11	7.100E+06	2.028E+07	3.792	3.502E+02
310	1.370E+11	7.066E+06	2.088E+07	3.885	3.640E+02
320	1.487E+11	7.033E+06	2.116E+07	3.927	3.688E+02
330	1.414E+11	7.000E+06	2.121E+07	3.932	3.659E+02
340	1.404E+11	6.967E+06	2.114E+07	3.919	3.600E+02
350	1.380E+11	6.934E+06	2.096E+07	3.887	3.504E+02
360	1.343E+11	6.901E+06	2.068E+07	3.840	3.375E+02
370	1.298E+11	6.869E+06	2.032E+07	3.780	3.233E+02
380	1.244E+11	6.837E+06	1.990E+07	3.711	3.069E+02
390	1.184E+11	6.805E+06	1.941E+07	3.620	2.889E+02
400	1.120E+11	6.773E+06	1.887E+07	3.542	2.695E+02

21 Aralık saat 12.00 YZ'da dikey yayılan 4 MHz ve 5 MHz frekanslı dalgaların elektrik alan şiddetlerinin yükseklikle değişimi Şekil 5.13'de verilmiştir. Bu saatte, 3 MHz frekanslı dalga 120 km nin altında yansımaktadır (Tablo 5.3). 4 MHz frekanslı dalganın 169 km den yansıdığı ve dalga yolu boyunca toplam zayıflamasının yaklaşık %51 olduğu, 5 MHz frekanslı dalganın 180 km den yansıdığı ve dalga yolu boyunca toplam zayıflamasının yaklaşık %28 olduğu görülmektedir. Hem 4 MHz hem de 5 MHz frekanslı dalganın 120 km ile 140 km arasında diğer yüksekliklere oranla daha fazla zayıfladığı görülmektedir. Bu durum Tablo 5.3'den görüleceği gibi gündüz saatlerinde daha düşük yüksekliklerdeki elektron yoğunluğu daha az olmasına rağmen, elektron çarpışma frekansının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır [35, 40, 47]. Frekans arttıkça daha üst bölgelerden yansıma olmasına rağmen, zayıflamanın azaldığı görülmektedir. Kışın çalışılan frekansların yansıma noktaları, yaz mevsimindeki yansıma noktalarına göre daha yüksektir. Bu sonuç Osepion ve Smirnova'nın [49] belirttiği sonuçlarla uyum içerisindedir.



Şekil 5.13. 21 Aralık saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 4 MHz, b: 5 MHz).

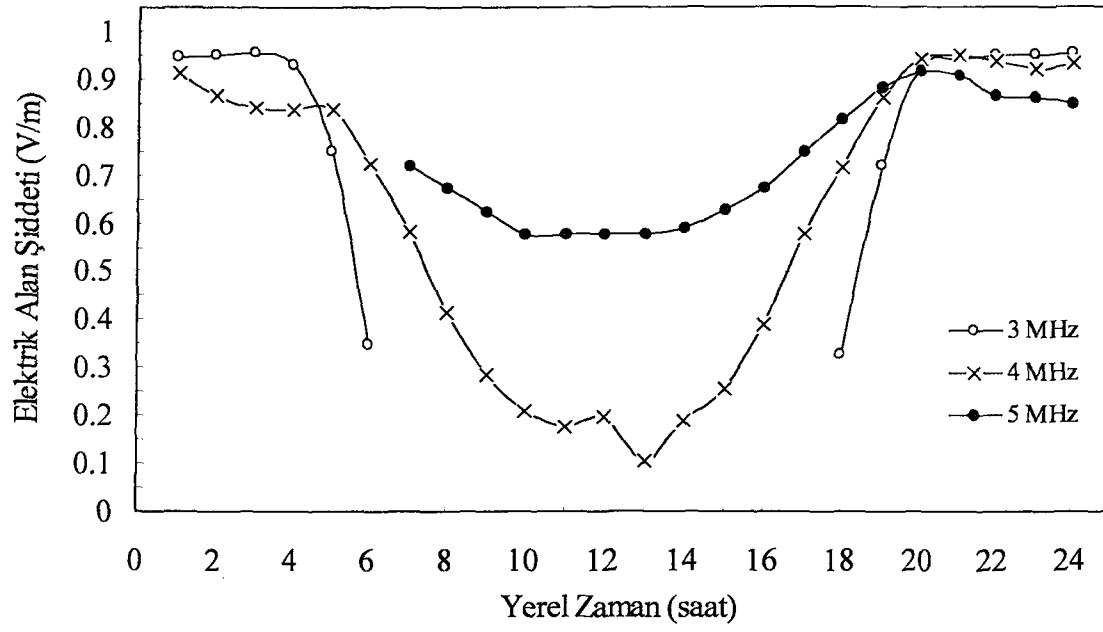


Şekil 5.14. 21 Aralık saat 24.00 YZ'daki 3 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi.

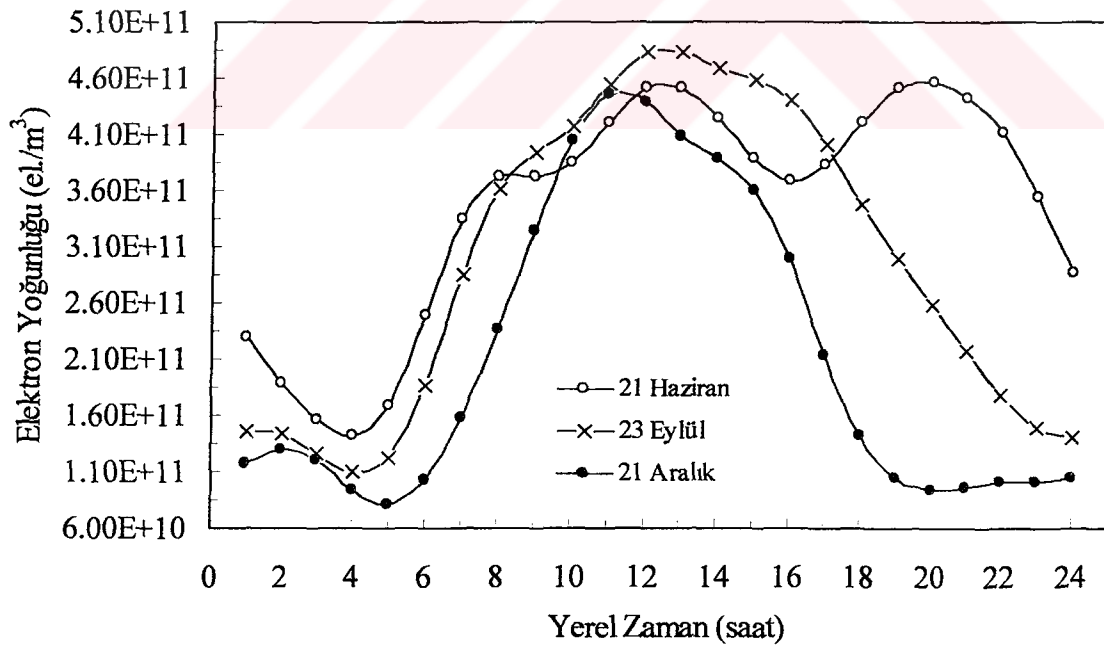
21 Aralık saat 24.00 YZ'da çalışılan frekanslardan sadece 3 MHz frekanslı dalga iyonküreden yansımaktadır (Tablo 5.4). Bu dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi Şekil 5.14'deki gibidir. 3 MHz lik dalga 273 km den yansımış ve dalga yolu boyunca toplam %5.5 civarında zayıfladığı görülmüştür. İyonkürenin gece saatlerinde daha üst yüksekliklere taşınmasından dolayı dalga 240 km den sonra çok daha fazla zayıflamaktadır.

5.2.2. Elektrik Alan Şiddetinin Günlük ve Frekansla Değişimi

3 MHz, 4 MHz ve 5 MHz frekanslı HF elektromanyetik dalgaların 21 Hazirandaki günlük ve frekansla değişimi Şekil 5.15'deki gibidir. Buna göre 3 MHz frekanslı dalganın saat 06.00 YZ ile 18.00 YZ arasında 120 km nin altında yansımamasından dolayı bu saatler arasında hesaplama yapılmamıştır. 5 MHz lik dalganın saat 24.00 YZ ile saat 07.00 YZ arasında yansımadağı görülmektedir. Elektrik alan şiddetindeki sönüm elektron yoğunluğu ve dolayısıyla elektron çarpışma frekansı ile ilişkili olduğundan sönümdeki günlük değişim, Şekil 5.16 ile verilen tepe yüksekliğindeki elektron yoğunluğunun günlük değişimine benzer değişimler göstermektedir. Friedrich ve Torkar [50] da ölçtükleri elektron yoğunluğu ile soğurulmayı karşılaştırarak, yoğunluğun artmasıyla dalga sönümünün artacağını ortaya koymuşlardır. Ayrıca her üç frekansa bakıldığında, daha önce tespit edildiği gibi daha büyük frekanslar daha üst bölgelerden yansımaya veya dalga yolunun daha uzun olmasına rağmen, elektrik alan şiddetindeki zayıflama daha azdır. Bu da iyonküreden yansiyacak şekilde artan frekansa karşı sönümün daha az olduğunu göstermektedir. Ayrıca her üç frekanstaki dalganın yayılımında, gün ortasındaki saatlerde toplam sönümün maksimum, gece saatlerindeki sönümün ise minimum olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar International Radio Consultative Committee (CCIR) tarafından [48] da verilmiştir.



Şekil 5.15. 21 Haziranda dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.



Şekil 5.16 $h_m F2$ yüksekliğindeki elektron yoğunluğunun günlük ve mevsimsel değişimleri.

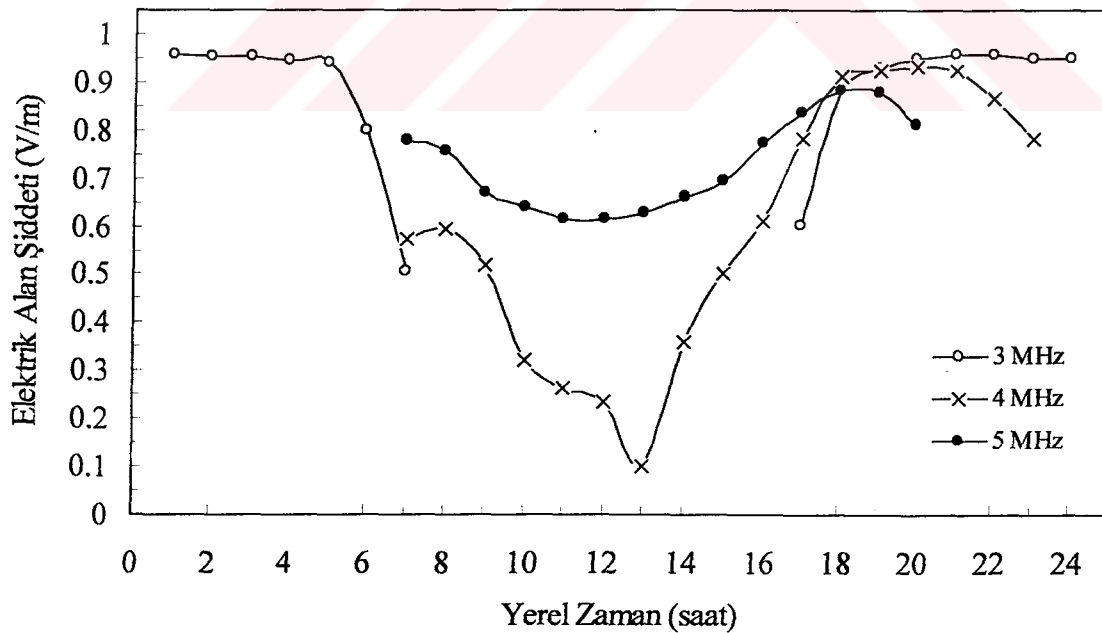
Tablo 5.7. 3, 4 ve 5 MHz frekanslı dalgaların iyonküreden yansıma noktalarının günlük ve mevsimsel değişimleri.

	21 Haziran			23 Eylül			21 Aralık		
YZ	Yansıma noktası (km)			Yansıma noktası (km)			Yansıma noktası (km)		
(saat)	3 MHz	4 MHz	5 MHz	3 MHz	4 MHz	5 MHz	3 MHz	4 MHz	5 MHz
01.00	229	253	**	266	**	**	255	**	**
02.00	242	272	**	269	**	**	243	**	**
03.00	252	295	**	272	**	**	245	**	**
04.00	245	**	**	267	**	**	260	**	**
05.00	207	241	**	239	**	**	271	**	**
06.00	158	195	**	192	**	**	245	**	**
07.00	*	177	199	148	176	201	203	234	**
08.00	*	166	193	*	160	178	162	182	**
09.00	*	159	194	*	152	175	134	159	175
10.00	*	150	196	*	154	180	*	155	167
11.00	*	141	194	*	156	187	*	160	172
12.00	*	138	192	*	158	193	*	169	180
13.00	*	141	192	*	162	193	*	172	184
14.00	*	151	196	*	166	191	*	171	184
15.00	*	166	203	*	166	187	135	169	183
16.00	*	181	209	*	171	186	157	174	193
17.00	*	193	212	154	176	192	174	195	**
18.00	154	195	213	175	190	209	198	**	**
19.00	184	202	218	194	213	237	225	**	**
20.00	198	214	231	215	236	272	250	**	**
21.00	209	223	242	238	262	**	268	**	**
22.00	214	231	249	255	287	**	279	**	**
23.00	216	235	256	264	313	**	282	**	**
24.00	220	241	269	266	**	**	273	**	**

* : Dalga 120. km nin altında yansımaktadır.

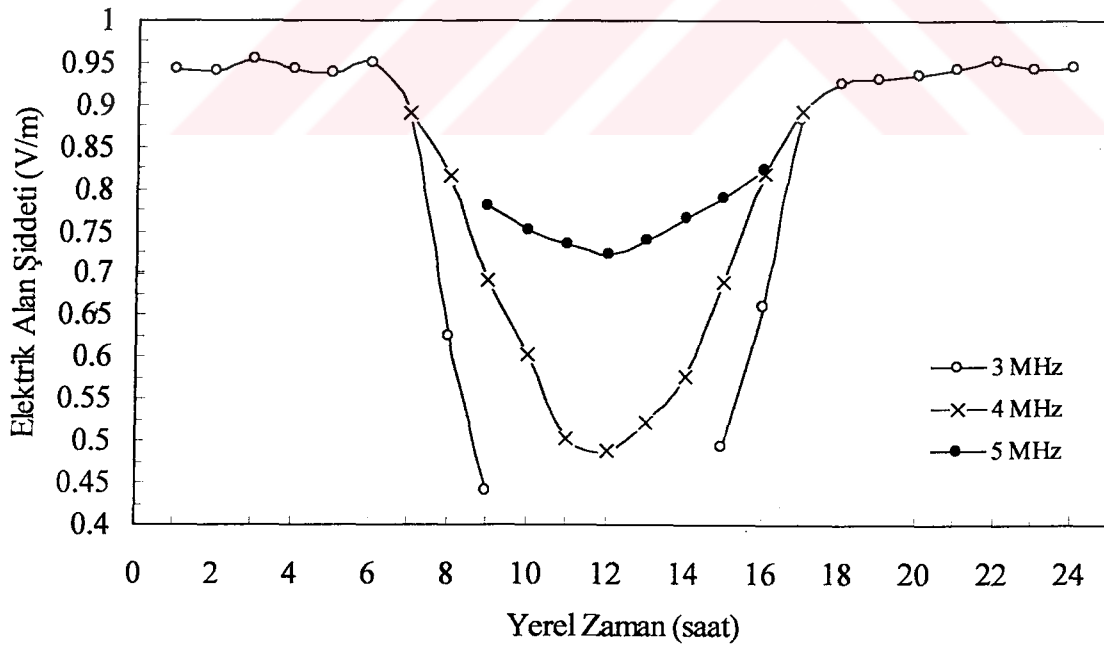
** : Dalga iyonküreyi geçip gitmektedir.

Dalgaların 23 Eylül'deki günlük ve frekansla değişimleri ise Şekil 5.17 ile verilmiştir. 3 MHz frekanslı dalganın saat 07.00 YZ ile saat 17.00 YZ arasında 120 km nin altında yansıdığı görülmektedir. 4 MHz lik dikey ilerleyen dalga ile saat 23.00 YZ ile saat 07.00 YZ arasında ve 5 MHz lik dikey ilerleyen dalga ile saat 20.00 YZ ile saat 07.00 YZ arasında iyonküreden haberleşme yapılamadığı görülmektedir. Frekans büyüdükçe gece saatlerindeki haberleşme kesilecektir. Gündüz saatlerinde yapılan yayında ise frekansa bağlı olarak elektrik alan şiddetinin değiştiği ve dalganın frekansı arttıkça sönümün azaldığı görülmektedir. Benzer sonuçlar Singer ve arkadaşları [51] tarafından da hem deneysel hem de teorik olarak elde edilmiştir. Daha büyük frekanslı dalgalar iyonkürenin daha üst bölgelerinden yansımaya rağmen, dalgadaki zayıflamanın daha az olduğu burada da görülmektedir. Her üç frekansta da gündüz saatlerindeki sönümün gece saatlerindeki sönümünden daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca gün batımından sonra daha yüksek frekanslı dalga şiddetlerinin daha küçük olduğu, bu saatlerde iyonküredeki yoğunluğun azaldığı ve dalganın bir kısmının yansımaya iyonküreyi geçtiğini göstermektedir. Ekinokstaki değerler 21 Hazirandaki değişimler ile karşılaştırıldığında, genel olarak yaz aylarındaki sönümün daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.17. 23 Eylülde dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.

HF elektromanyetik dalganın 21 Aralıkta günlük değişimi, Şekil 5.18'deki gibidir. Kışın da dalganın frekansı büyüdükçe sönümün azaldığı yani elektrik alan şiddetindeki zayıflamanın daha az olduğu görülmektedir. 3 MHz frekanslı dalga ile günün tüm saatlerinde yayın yapılırken, 4 MHz frekanslı dalga ile saat 07.00 YZ ile saat 17.00 YZ arası ve 5 MHz frekanslı dalga ile saat 09.00 YZ ile saat 16.00 YZ arasında sadece 7 saat yayın yapılabilmektedir. Burada dikkati çeken 3 MHz frekanslı dalganın gece 01.00 YZ ile saat 03.00 YZ arasında iyonkürenin daha alt bölgelerinden yansımış olmasıdır (Tablo 5.7). Bu durum kış anormalliği ile izah edilir [52]. Aydoğdu [53] da bu saatlerde elektriksel akı yönünün kuzey yarımküreye doğru olmasından dolayı, elektron yoğunluğunun da artacağını ifade etmiştir. Kışın bu saatlerde elektron yoğunluğunun artması, bu bölgedeki plazma frekansını artıracak ve böylece iyonküre plazmasından daha büyük frekanslı dalgalar yansıyabilecektir. İncelenen her üç günde de gündüz saatlerindeki sönümün daha fazla artması Şekil 5.16 ile verilen elektron yoğunluğunun bu saatlerde daha fazla olmasından kaynaklanır. Nishino ve arkadaşları [54] gündüz saatlerindeki sönüm artışını, elektron sıcaklığının artmasından kaynaklanan elektron çarpışma frekansının artışıyla ilişkilendirmişlerdir.



Şekil 5.18. 21 Aralıkta dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.

5.2.3. Elektrik Alan Şiddetinin Mevsimsel Değişimi

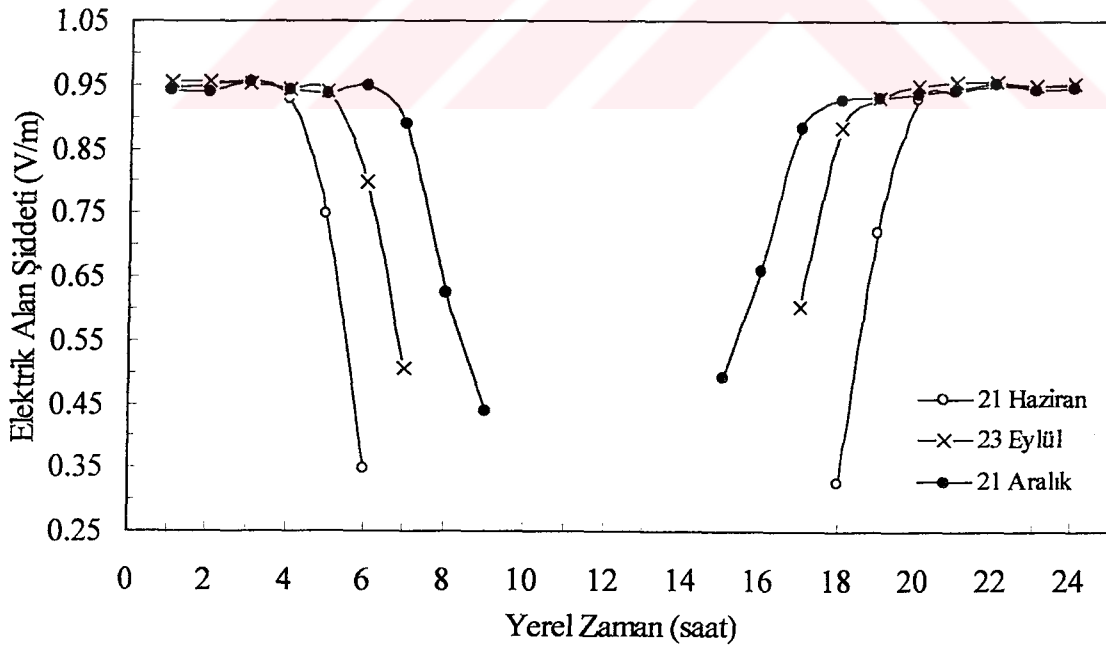
Bu kısımda belirtilen frekanslardaki dikey yayılan dalga şiddetinin mevsimsel değişimleri incelendi.

3 MHz frekanslı dalganın mevsimsel değişimi Şekil 5.19 ile verilmiştir. Yazdan kışa doğru gidildikçe elektrik alan şiddetindeki sönümün azaldığı görülmektedir. Bu dalga, her üç mevsimde de öğlen saatlerindeki elektron yoğunluğunun artmasından dolayı 120 km nin altında yansımıştır.

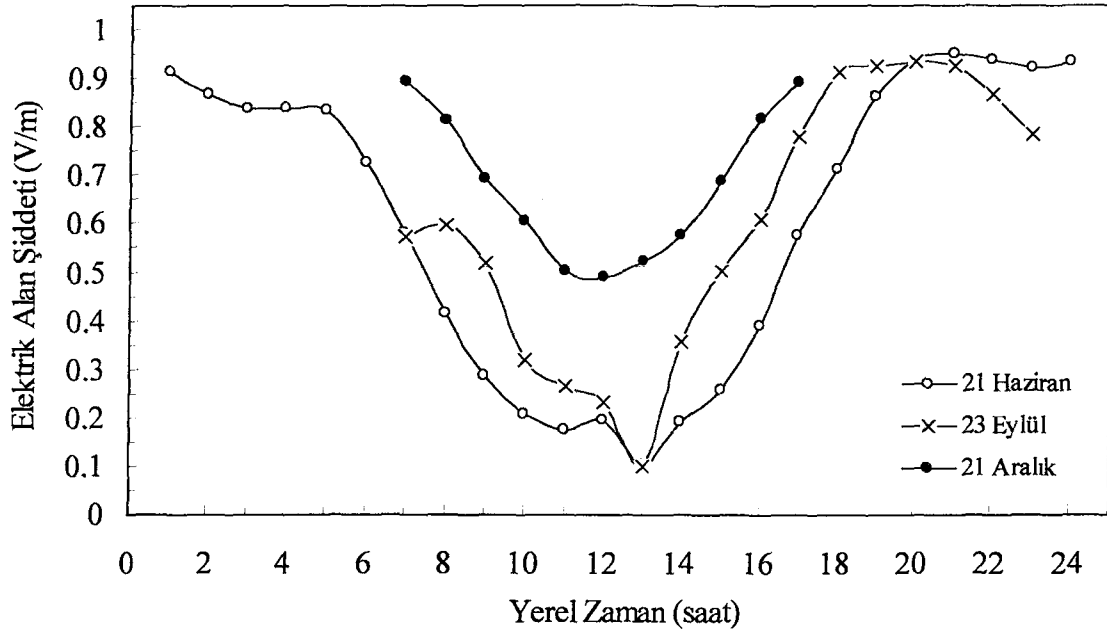
Şekil 5.20'deki 4 MHz frekanslı dalganın mevsimsel değişimi incelendiğinde elektrik alan şiddetindeki sönümün yazın kıştan daha fazla olduğu görülmektedir. Bu dalga ekinoksta ve kışın gece saatlerinde iyonküreden yansımamaktadır. Ayrıca yazdan kışa doğru gidildikçe günlük haberleşme süresi de azalmaktadır.

5 MHz frekanslı dalganın mevsimsel değişiminin verildiği Şekil 5.21'de, 3MHz ve 4 MHz frekanslardaki değişimlere benzer değişimler görülmektedir. Yazın, kıştan daha uzun süre haberleşme sağlanmaktadır. 21 Aralıkta sadece 7 saat haberleşme sağlanabilmektedir.

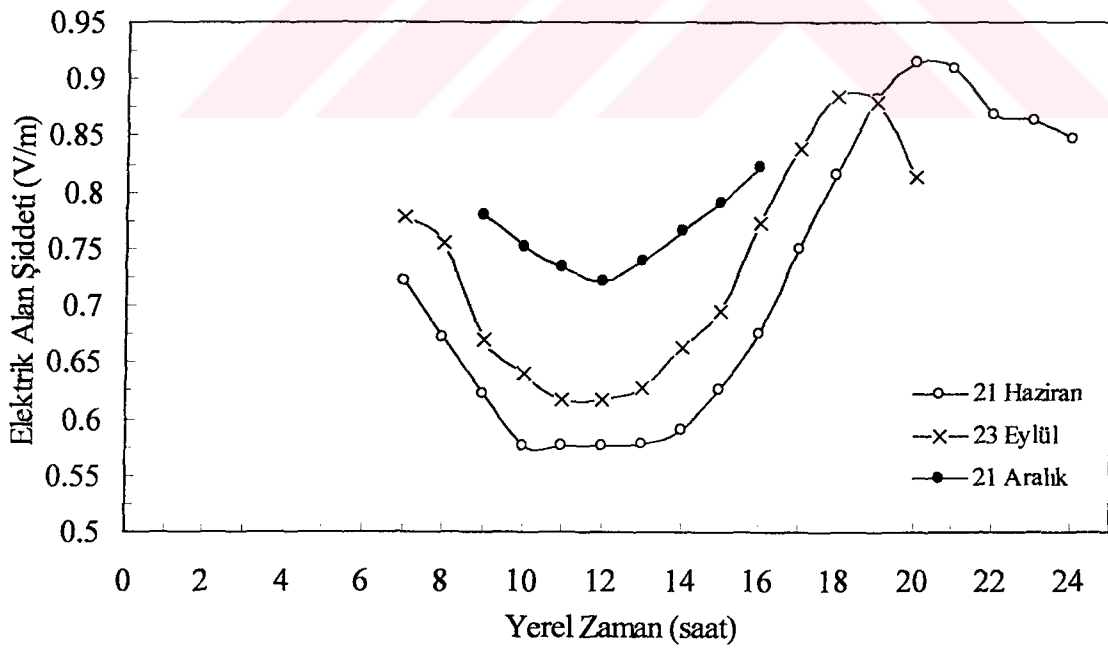
4 MHz ve 5 MHz frekanslı dalgalar incelendiğinde, yazın ve ekinokstaki dalga şiddetlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum gece saatlerinde iyonkürenin zayıflamasından dolayı, dalganın bir kısmının iyonküreden geçerek gittiğinin göstergesidir.



Şekil 5.19. 3 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.



Şekil 5.20. 4 MHz frekanslı dalgaın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değışimi.



Şekil 5.21. 5 MHz frekanslı dalgaın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değışimi.

5.3. Eğik Yayılan HF Elektromanyetik Dalganın İyonküre İçerisindeki Sönümü

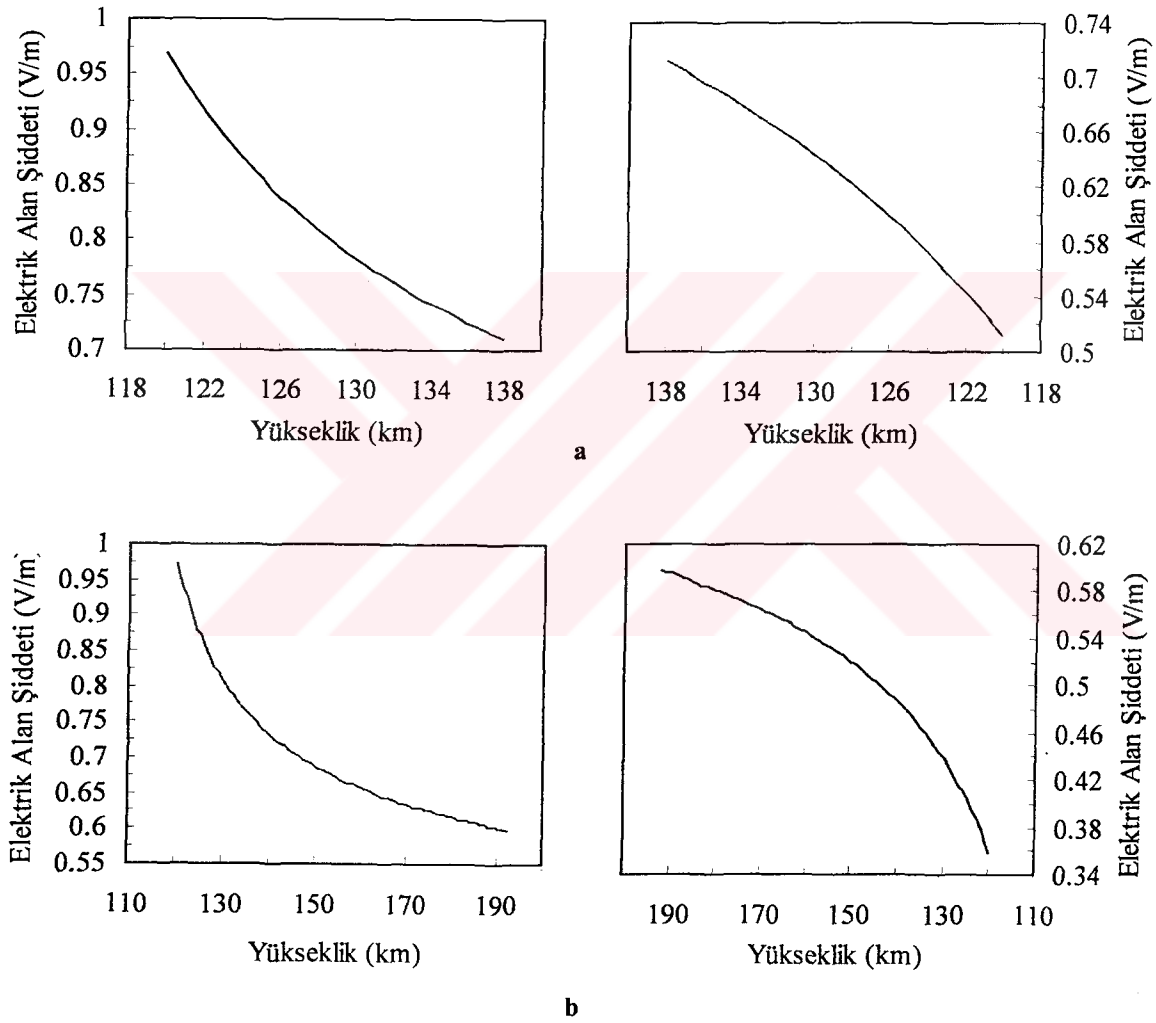
Eğik yayılan HF elektromanyetik dalganın elektrik alan şiddetinin nümerik hesaplamaları, denklem (3.41) ile verilen ifade kullanılarak yapıldı. Hesaplamalarda iyonküreye giren dalganın elektrik alan şiddeti 1 olarak alındı. İyonküre parametrelerine ve iyonkürenin normali ile yaptığı açı olan θ 'ya bağlı olarak denklem (3.41)'daki eşitliğin sağ tarafındaki ikinci üstel terim, teorik olarak dalganın şiddetini azaltacaktır. Bu azalmalar nümerik olarak da incelendi. İncelemeler sadece $\theta = 60^\circ$ için yapıldı. Bu kısımda 6 MHz, 8 MHz ve 10 MHz frekanslı dalgaların elektrik alan şiddetlerinin iyonküre içerisindeki yükseklik, günlük, mevsimsel ve frekansa bağlı değişimleri incelendi.

5.3.1. Elektrik Alan Şiddetinin Yükseklikle Değişimi

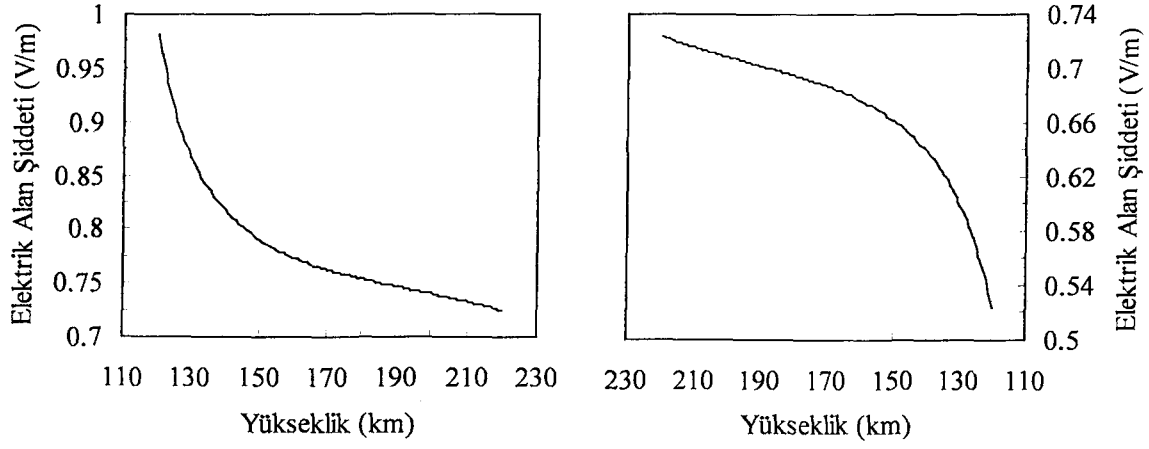
Güneş lekесinin minimum olduğu 21 Haziran saat 12.00 YZ'da eğik yayılan HF elektromanyetik dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi Şekil 5.22 ile verilmiştir. Sayısal incelemeler 120 km den itibaren yapıldığından, bu yüksekliğin altında yansıyan 6 MHz frekanslı dalga incelenememiştir. 8 MHz frekanslı dalga 138 km den yansımıştır. Elektrik alan şiddeti yansıma noktasına kadar yaklaşık %29, yansdıktan sonra geri döndüğünde de yaklaşık %20 olmak üzere toplam %49 civarında sönüme uğramıştır. Dalga, 120 km ile 138 km arasındaki her noktada hemen hemen aynı oranda zayıflamıştır. 10 MHz frekansa sahip dalga 192 km den yansımış, bu noktaya kadar %40 oranında zayıflamıştır. Yansdıktan sonra ise %25'lik bir kısmını kaybederek, hemen hemen %65 oranında bir sönüme uğramıştır. Bu dalganın 150 km nin altındaki yüksekliklerde daha fazla sönüme uğradığı göze çarpmaktadır. Bu durum için dikey yayılımda belirtilen sebepler, eğik yayılım için de geçerlidir [35, 40, 47]. Dikey yayılan dalgalar için daha küçük frekanslı dalganın daha fazla sönüdüğü tartışılmıştır. Burada bunun tersi bir durum görülmektedir. 8 MHz lik dalganın daha az sönüme uğraması, 120 km nin üzerindeki iyonküre içerisinde aldığı yolun kısa olmasından kaynaklanmaktadır.

21 Haziran saat 24.00 YZ'da alınan sonuçlar Şekil 5.23'de verildiği gibidir. Bu saatte çalışılan her üç frekans da iyonküreden yansımaktadır. 6 MHz lik dalganın yayılımı incelendiğinde 220 km den yansdığı, yansıma noktasına kadar yaklaşık %28, yansdıktan sonra da yaklaşık %20 zayıflayarak toplam %48 oranında zayıfladığı görülmektedir. 8 MHz frekanslı dalga 241 km den yansdığı, yansıma noktasına kadar yaklaşık %29 ve yansdıktan sonra da %21 oranında zayıflayarak toplam %50 oranında sönüme uğramıştır. 10 MHz lik dalga ise 269 km den yansımış, yansıma noktasına kadar yaklaşık %33, yansdıktan sonra da yaklaşık %22'lik bir kayba uğrayarak toplam %55 civarında bir sönüme uğramıştır. Bu saatte daha büyük frekanslar daha fazla sönüme uğramıştır. Gönderilen frekansların büyük olması ve gece elektron

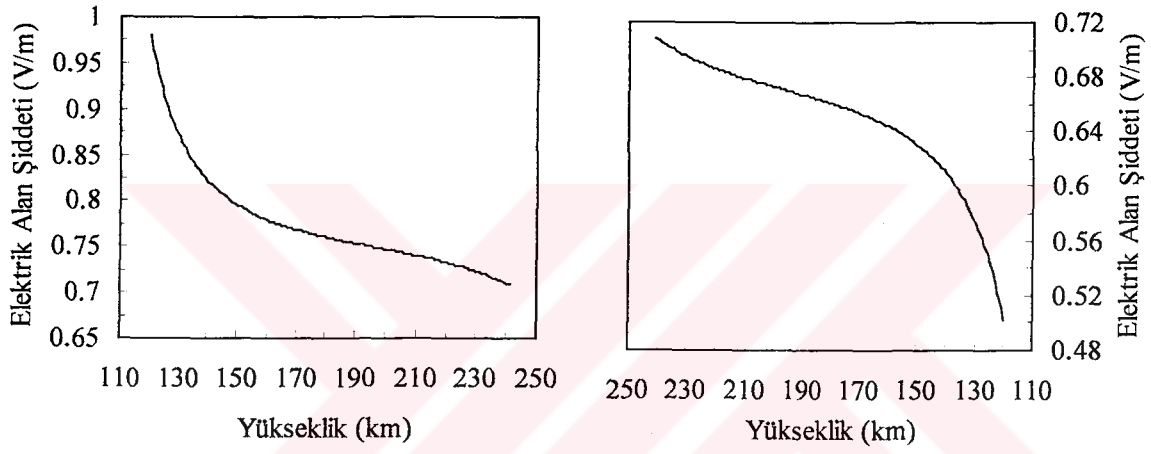
yoğunluğunun düşük oluşu, dalganın bir kısmının yansımadan iyonküreyi geçmesine sebep olmaktadır. Ayrıca 8 MHz ve 10 MHz frekanslı dalgaların aldığı yollar gündüz saatlerine göre daha fazla olmasına rağmen, sönümün daha az olduğu görülmektedir [48].



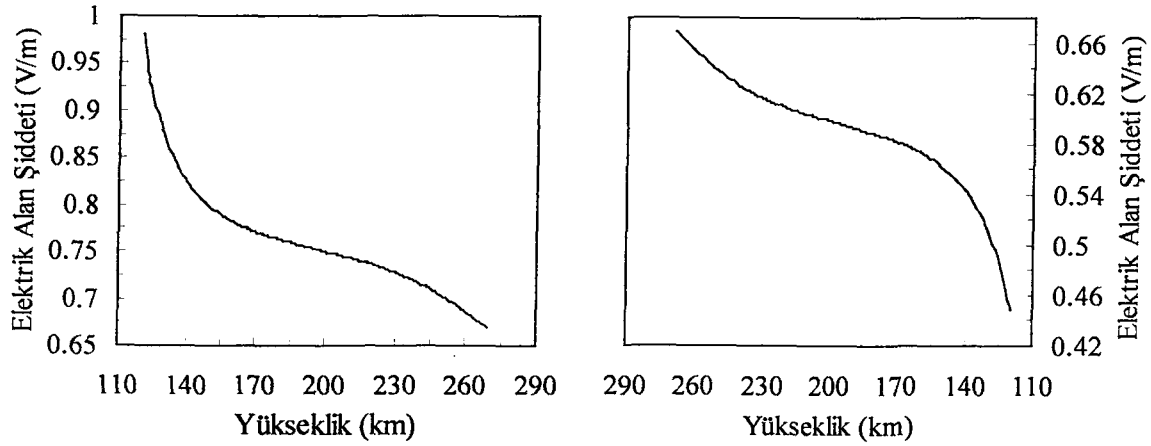
Şekil 5.22. 21 Haziran saat 12.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 8 MHz, b: 10 MHz)



a



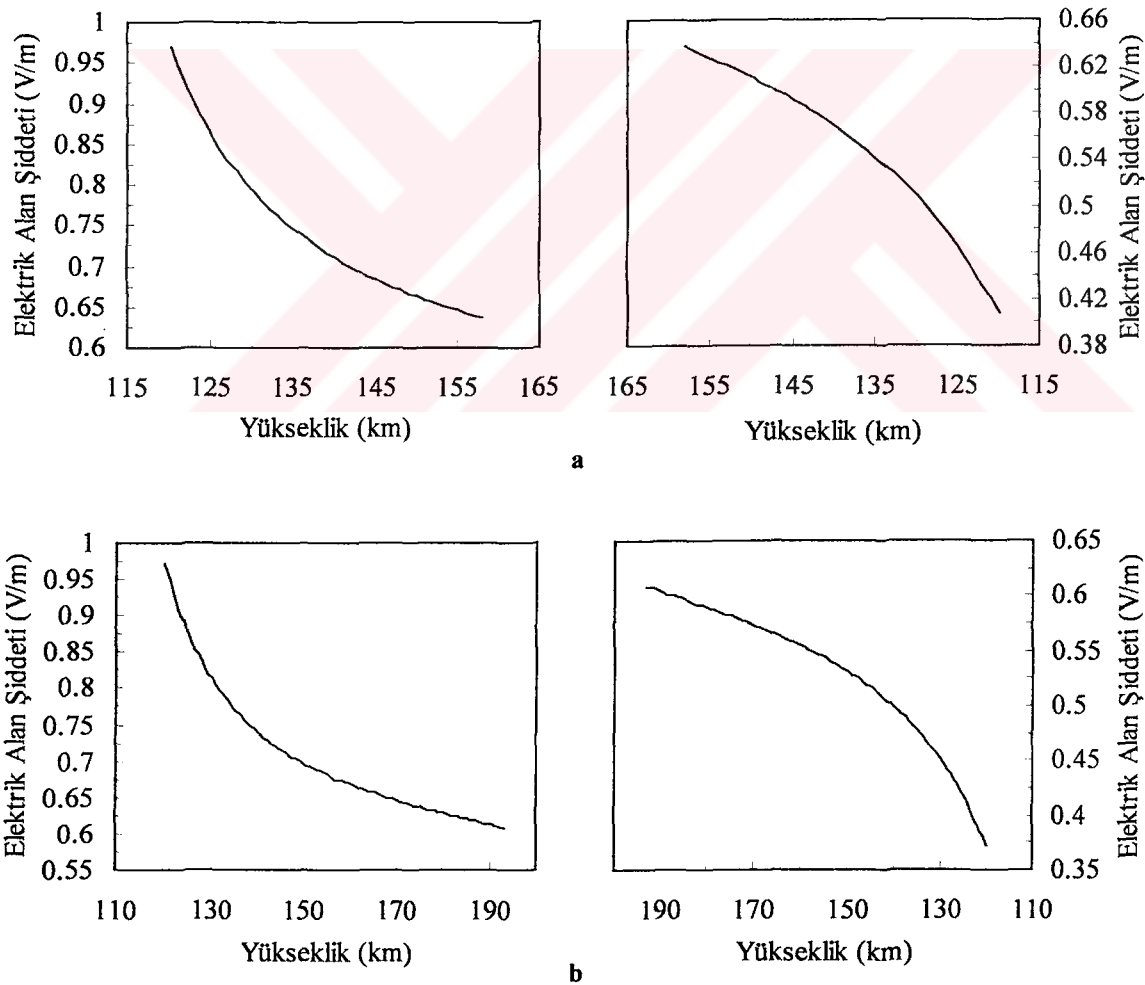
b



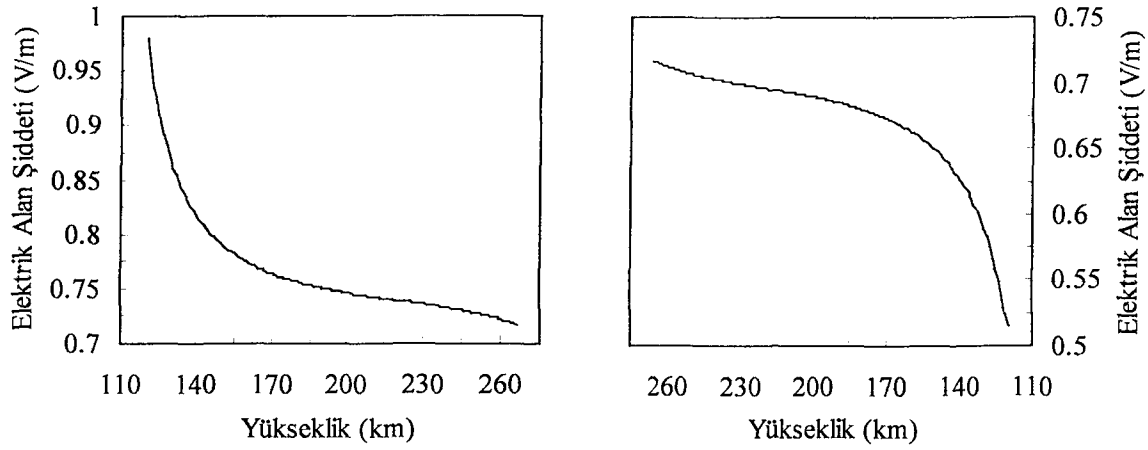
c

Şekil 5.23. 21 Haziran saat 24.00 YZ'daki dalğanın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 6 MHz, b: 8 MHz, c: 10 MHz).

23 Eylül (ekinoks) saat 12.00 YZ'da eğik yayılan HF elektromanyetik dalgaının elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi Şekil 5.24'de verilmiştir. Bu saatte 6 MHz frekanslı dalga 120 km nin altında yansıdığından bu frekansa sahip dalga incelenememiştir. 8 MHz frekanslı dalga 158 km den yansımıştır. Elektrik alan şiddeti yansıma noktasına kadar yaklaşık %36, yansıdıktan sonra geri döndüğünde de yaklaşık %24 olmak üzere toplam %60 civarında zayıflamıştır. 10 MHz frekansa sahip dalga 193 km den yansımış, bu noktaya kadar şiddetinin yaklaşık %39'unu kaybetmiş, yansıdıktan sonra ise yaklaşık %24 oranında zayıflayarak, yaklaşık %63'lük bir sönüme uğramıştır. Her iki frekansın iyonkürenin alt yüksekliklerindeki sönümleri diğer yüksekliklere göre daha fazladır. Daha önce dikey yayılım için incelenen sonuçlarda da görüldüğü gibi, düşük yüksekliklerdeki elektron çarpışma frekansının büyük olması gündüz saatlerinde iyonkürenin alt bölgelerindeki sönümün daha fazla olduğunu göstermektedir.



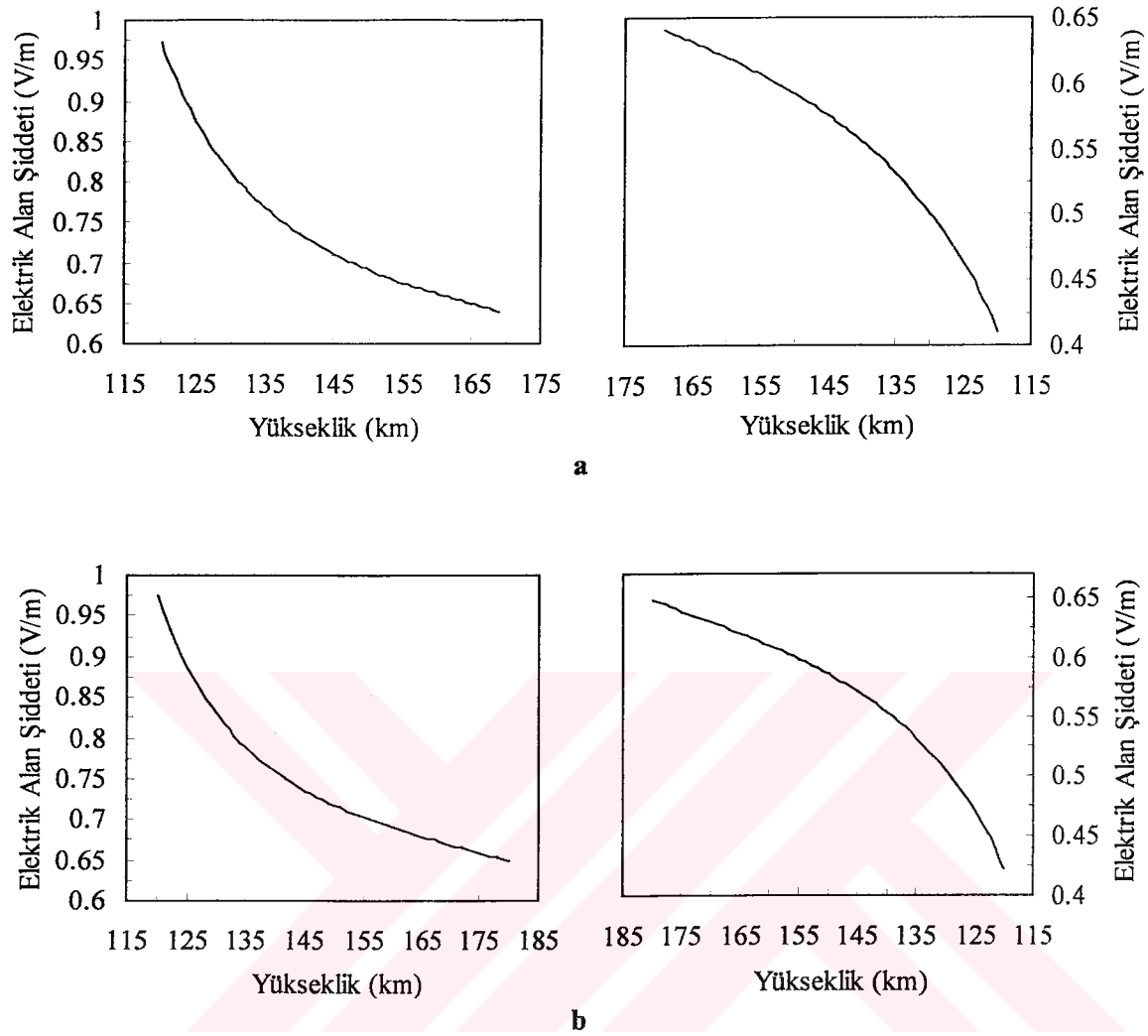
Şekil 5.24. 23 Eylül saat 12.00 YZ'daki dalgaının elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 8 MHz, b: 10 MHz).



Şekil 5.25. 23 Eylül saat 24.00 YZ'da 6 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi.

23 Eylül (ekinoks) saat 24.00 YZ'daki dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi Şekil 5.25'de görüldüğü gibidir. Bu saatte iyonküreden sadece 6 MHz frekansa sahip dalga yansımıştır. 6 MHz frekanslı dalganın yayılımı incelendiğinde 266 km den yansıdığı, yansıma noktasına kadar yaklaşık %28 ve yansıdıktan sonra da yaklaşık %20 zayıflayarak toplam %48 oranında zayıfladığı görülmektedir. Düşük yüksekliklerdeki sönümün daha fazla olması, gece saatlerinde elektron yoğunluğunun azalması ve bu dalganın bir kısmının iyonküreyi geçmesiyle izah edilebilir.

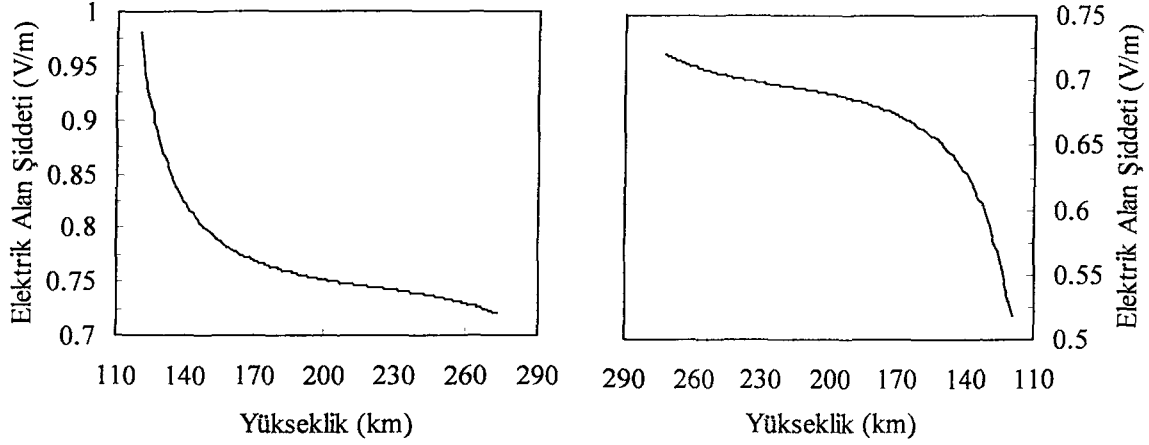
21 Aralıkta gündüz saat 12.00 YZ'da eğik yayılan 8 MHz ve 10 MHz frekanslara sahip elektromanyetik dalgaların elektrik alan şiddetlerinin yükseklikle değişimleri Şekil 5.26 ile verilmiştir. Bu saatte 6 MHz frekanslı dalga 120 km nin altında yansımıştır. 8 MHz frekanslı dalganın 169 km den yansıdığı ve dalga yolu boyunca toplam zayıflamasının yaklaşık %59 olduğu, 10 MHz frekanslı dalganın 180 km den yansıdığı ve dalga yolu boyunca toplam zayıflamasının hemen hemen 8 MHz lik dalgadaki sönüme eşit olduğu görülmektedir. Bu iki dalganın 120 km ile 150 km arasında diğer yüksekliklere oranla daha fazla zayıfladığı görülmektedir. Yine bu durum daha önce belirtildiği gibi gündüz saatlerinde daha düşük yüksekliklerdeki elektron yoğunluğu daha az olmasına rağmen, elektron çarpışma frekansının daha fazla olmasından kaynaklanmaktadır [35, 40, 47]. Her iki frekansa bakıldığında, frekans arttıkça daha üst bölgelerden yansıma olmasına rağmen zayıflama hemen hemen eşittir.



Şekil 5.26. 21 Aralık saat 12.00 YZ’da dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi (a: 8 MHz, b: 10 MHz).

21 Aralık saat 24.00 YZ’da $\theta = 60^\circ$ ile çalışılan frekanslardan sadece 6 MHz frekanslı dalga iyonküreden yansımaktadır. Bu dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi Şekil 5.27’deki gibidir. 6 MHz lik dalga 273 km den yansımış ve dalga yolu boyunca toplam %48 civarında zayıfladığı görülmüştür. Bu saatte dikey olarak ilerleyen dalgalardan yaklaşık 3.45 MHz e kadar olan frekanslar iyonküreden yansırken (Tablo 5.4), açı değerine ve frekansa bağlı olarak eğik ilerleyen daha büyük frekanslı dalgalar iyonküreden yansımaktadırlar [55].

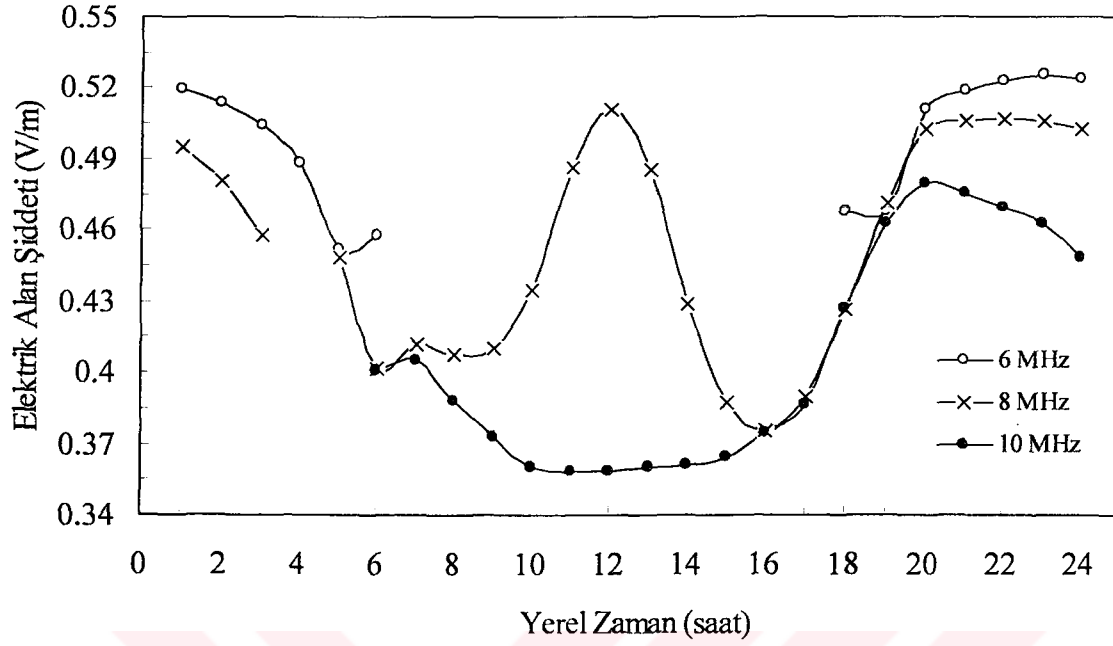
Genel olarak eğik ilerleyen dalgalar, dikey ilerleyen dalgalardan daha fazla sönmeye uğramaktadırlar. Bunun en temel sebebi iyonküre içerisindeki dalga yolunun daha uzun olmasıdır.



Şekil 5.27. 21 Aralık saat 24.00 YZ'da 6 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin yükseklikle değişimi.

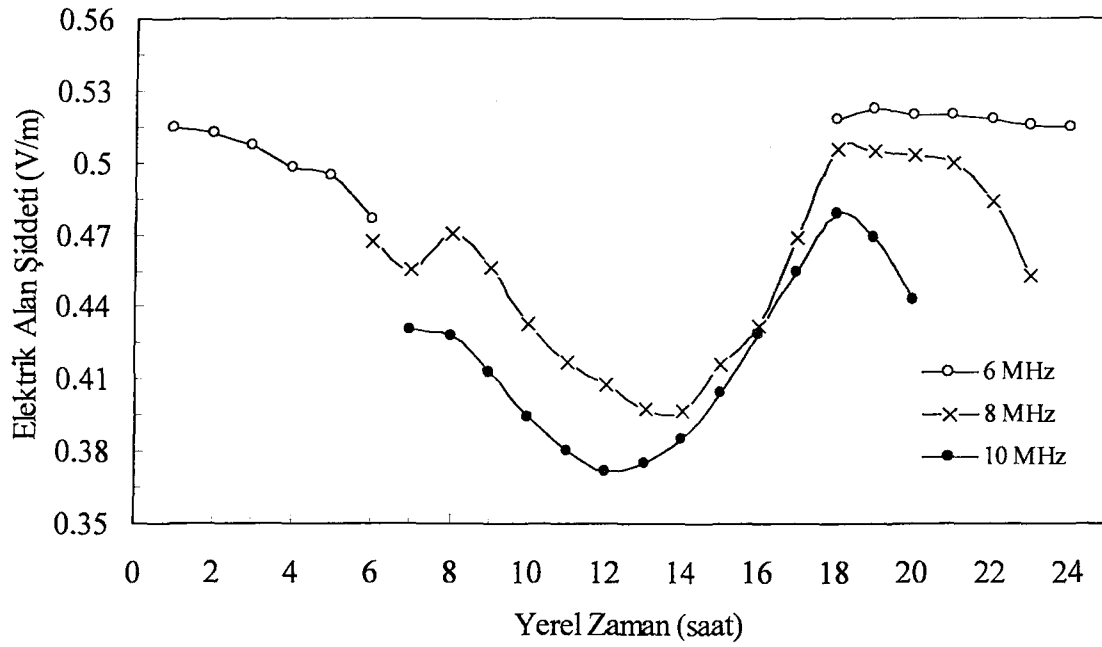
5.3.2. Elektrik Alan Şiddetinin Günlük ve Frekansla Değişimi

6 MHz, 8 MHz ve 10 MHz frekanslı HF elektromanyetik dalgaların 21 Hazirandaki günlük ve frekansla değişimleri Şekil 5.28 ile verilmiştir. Şekle göre 6 MHz frekanslı dalganın saat 05.00 YZ ile 19.00 YZ arasında 120 km nin altında yansımamasından dolayı bu saatler arasında çalışılamamıştır. 8 MHz lik dalga öğle saatlerinde daha düşük yüksekliklerde yansıdığı için bu saatlerde daha az sönüme uğramıştır. 10 MHz lik dalganın ise saat 24.00 YZ ile saat 06.00 YZ arasında yansımadağı görülmektedir. 10 MHz lik dalganın elektrik alan şiddetindeki günlük değişim Şekil 5.16 ile verilen tepe yüksekliğindeki elektron yoğunluğunun günlük değişimine benzer değişimler göstermektedir [50]. 10 MHz lik dalganın yayılımında öğlen saatlerindeki toplam sönümün maksimum, gece saatlerindeki sönümün ise minimum olduğu görülmektedir. Benzer sonuçlar CCIR tarafından [48] da verilmiştir. Gece saatlerinde daha büyük frekanslı dalgaların elektrik alan şiddetlerinin daha düşük olması bu saatlerde dalganın bir kısmının iyonküreyi geçerek gittiğini göstermektedir.



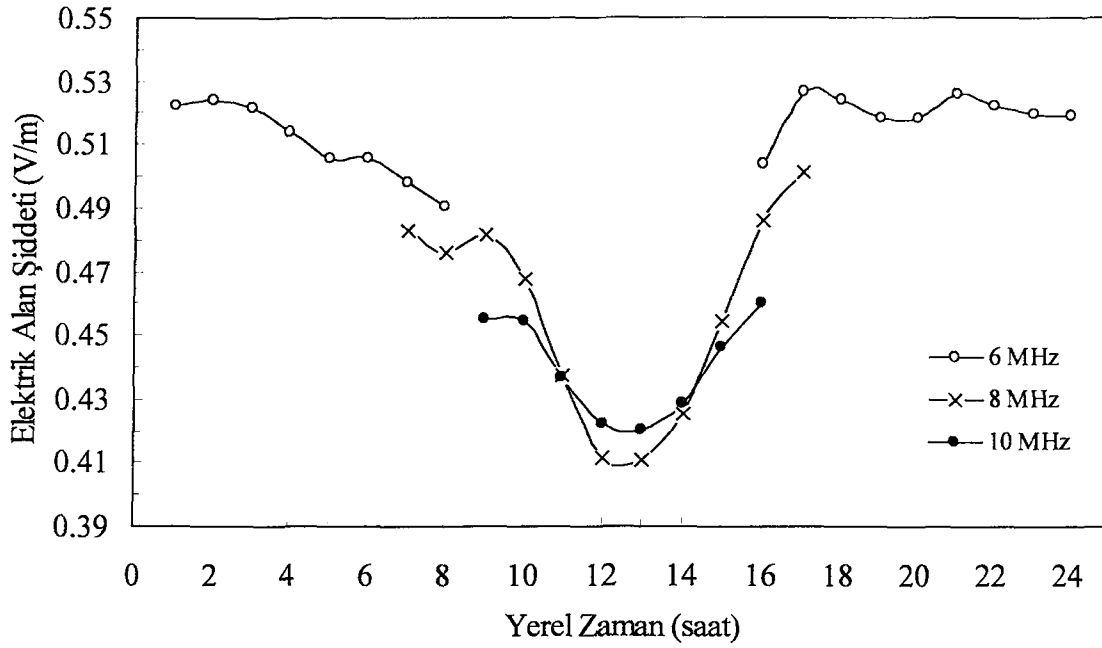
Şekil 5.28. 21 Haziranda dalgaın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.

Dalgaların 23 Eylül'deki günlük ve frekansla değişimleri Şekil 5.29'daki gibidir. 6 MHz frekanslı dalga saat 06.00 YZ ile 18.00 YZ aarasında 120 km nin altında yansımaktadır. 8 MHz lik dalga ile saat 23.00 YZ ile saat 06.00 YZ arasında ve 10 MHz lik dalga ile saat 20.00 YZ ile saat 07.00 YZ arasında iyonküreden haberleşme yapılamadığı görülmektedir. Ayrıca frekans büyüdükçe, gün batımından sonraki saatlerde elektron yoğunluğunun azalmasından dolayı dalgaların bir kısmı iyonküreyi geçeceğinden şiddet azalmıştır. Daha büyük frekanslı dalga iyonkürenin daha üst bölgesinden yansıdığından, frekansa bağlı olarak dalgadaki zayıflama daha fazladır. Her üç frekansta da gündüz saatlerindeki sönümün gece saatlerindeki sönümden daha fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca 21 Hazirandaki değişimler ile karşılaştırıldığında genel olarak yaz aylarındaki sönümün daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil 5.29. 23 Eylülde dalgaın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.

HF elektromanyetik dalgaın 21 Aralıktaki günlük değişimi Şekil 5.30'da gösterildiği gibidir. Kışın öğle saatlerinde dalgaın frekansı büyüdükçe sönümün azaldığı yani elektrik alan şiddetindeki zayıflamanın daha az olduğu görülmektedir. Bu saatlerin dışındaki saatlerde dalgaın bir kısmı iyonküreyi geçerek gitmektedir. 8 MHz ve 10 MHz lik dalgaların gece saatlerinde yansımaması bunun bir göstergesidir. 6 MHz frekanslı dalga saat 08.00 ile saat 16.00 YZ arasında 120 km nin altında yansımıştır. 8 MHz frekanslı dalga ile saat 07.00 YZ ile saat 17.00 YZ arası yayın yapılabilen ve 10 MHz frekanslı dalga ile saat 09.00 YZ ile saat 16.00 YZ arasında sadece 7 saat yayın yapılabilen bir durum söz konusudur. Burada dikkati çeken 6 MHz frekanslı dalgaın gece 24.00 YZ ile saat 03.00 YZ arasında iyonküreden daha alt yüksekliklerden yansımış olması ve bu saatlerde dalgaın elektrik alan şiddetinin maksimum olmasıdır. Kışın bu saatlerde elektron yoğunluğunun artması, bu bölgedeki plazma frekansını artıracak ve böylece dalga daha alt yüksekliklerden yansıyacaktır. Kışın bu saatlerde yoğunluğun artması daha önce belirtildiği gibi kış anormalliği olarak isimlendirilir. İncelenen her üç günde de gündüz saatlerindeki sönümün daha fazla artması elektron yoğunluğunun bu saatlerde daha fazla olmasından kaynaklanır. Nishino ve arkadaşları [54] gündüz saatlerindeki sönüm artışını, elektron sıcaklığının artmasından kaynaklanan elektron çarpışma frekansının artışıyla ilişkilendirmişlerdir.



Şekil 5.30. 21 Aralıkta dalganın elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.

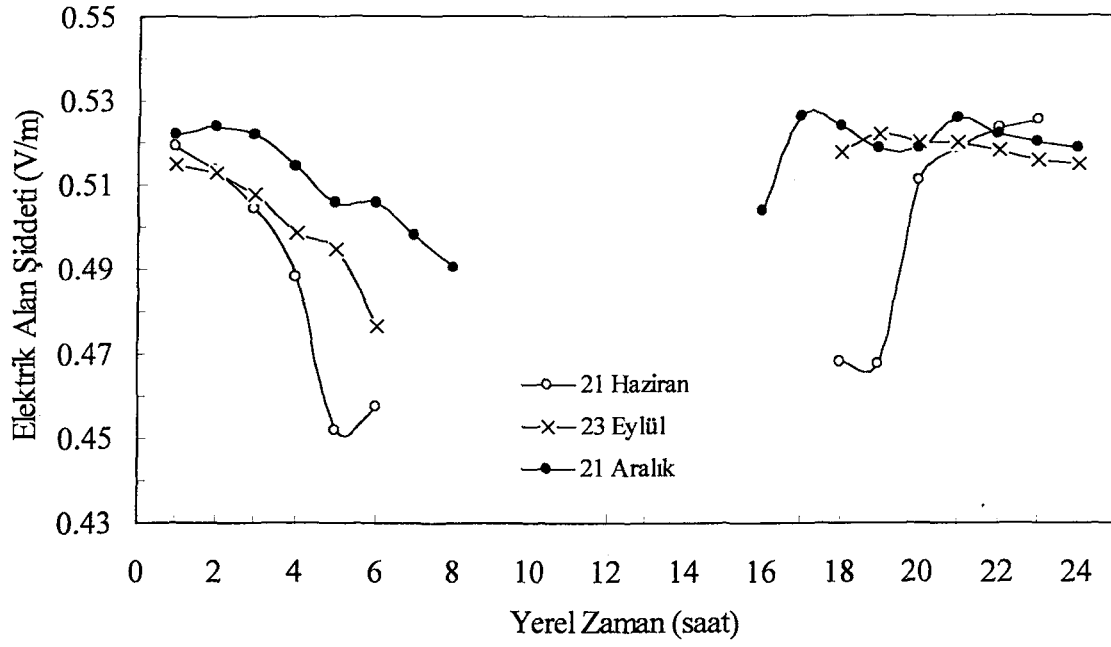
5.3.3. Elektrik Alan Şiddetinin Mevsimsel Değişimi

Bu kısımda belirtilen frekanslardaki eğik yayılan dalga şiddetinin mevsimsel değişimleri incelendi.

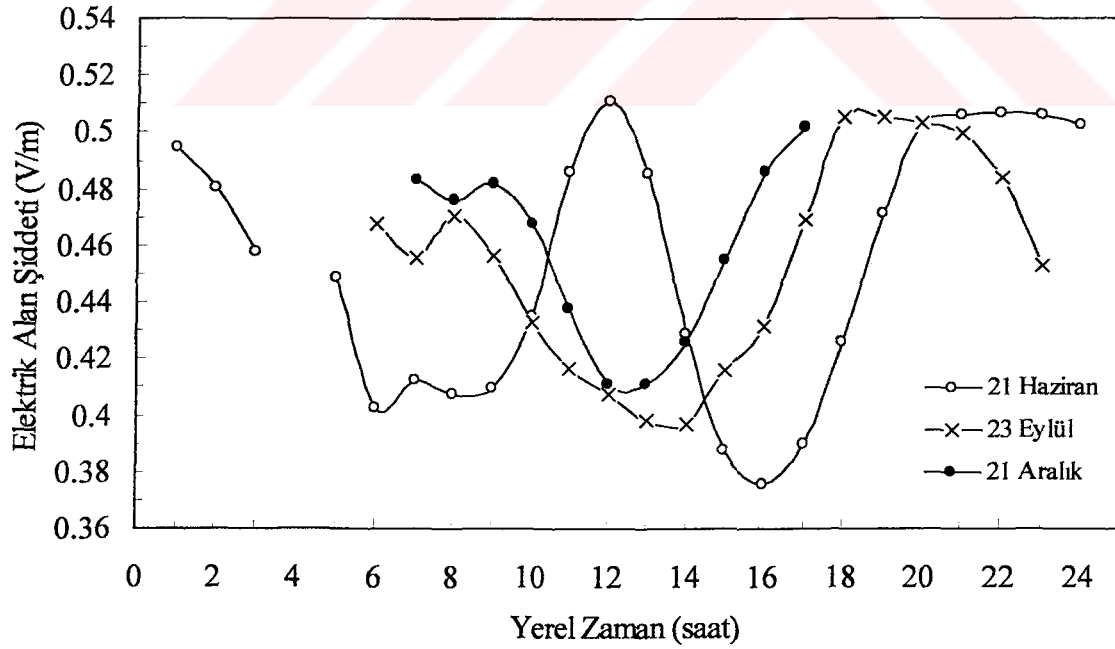
Şekil 5.31'de 6 MHz frekanslı dalganın mevsimsel değişimi verilmiştir. Yazdan kışa doğru gidildikçe elektrik alan şiddetindeki sönümün azaldığı görülmektedir. Öğle saatlerinde elektron yoğunluğunun artmasından dolayı 120 km nin altında yansımıştır. Ayrıca yazdan kışa doğru gidildikçe bu dalga ile yapılan günlük yayın süresi de azalmaktadır.

8 MHz frekanslı dalganın günlük ve mevsimsel değişimi Şekil 5.32'deki gibidir. Bu frekansta da dalganın elektrik alan şiddetindeki sönümün yazın kıştan daha fazla olduğu görülmektedir. Öğle saatlerindeki anormallik, dalganın alt yüksekliklerden yansımamasından kaynaklanmaktadır. Bu dalganın yazın ve ekinoksta gece saatlerinde iyonküreden yansımadağı görülmektedir. Ayrıca yazdan kışa doğru gidildikçe günlük haberleşme süresi bu frekansta da azalmaktadır.

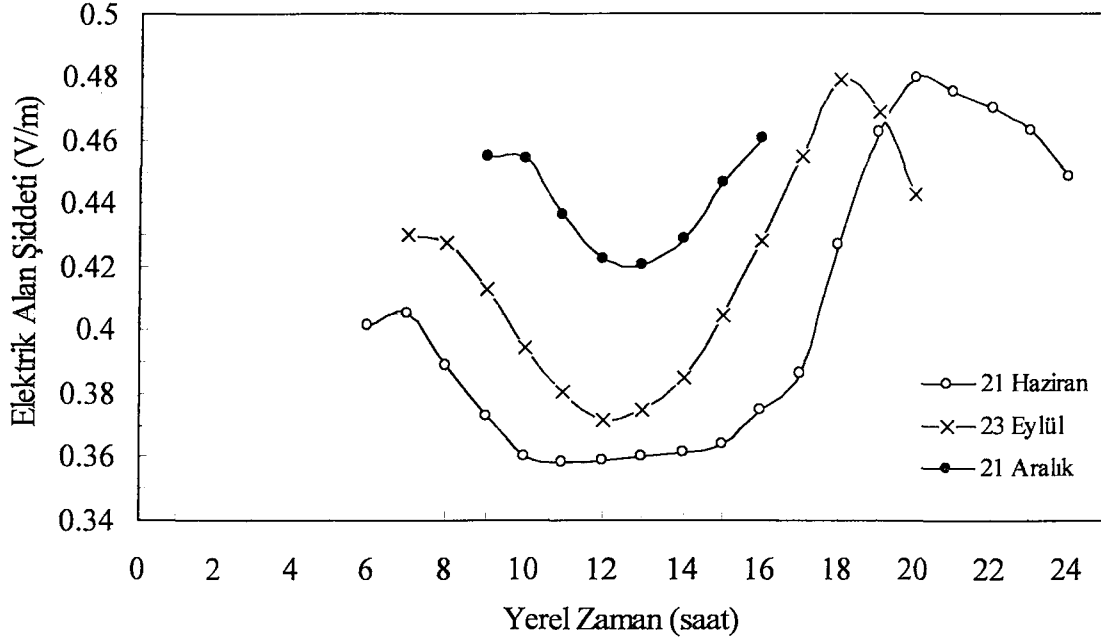
10 MHz frekanslı dalganın günlük ve mevsimsel değişimi ise Şekil 5.33 ile verilmiştir. 6 MHz ve 8 MHz frekanslı dalgalarındaki değişimler bu frekansta da görülmektedir. Yazın, kıştan daha uzun süre haberleşme sağlanmaktadır. Kışın 21 Aralıkta sadece 7 saat haberleşme sağlanabilmektedir.



Şekil 5.31. 6 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.



Şekil 5.32. 8 MHz frekanslı dalganın elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.



Şekil 5.33. 10 MHz frekanslı dalgaının elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.

5.4. Eğik Yayılan HF Elektromanyetik Dalga İçin Yapılan Ölçümler

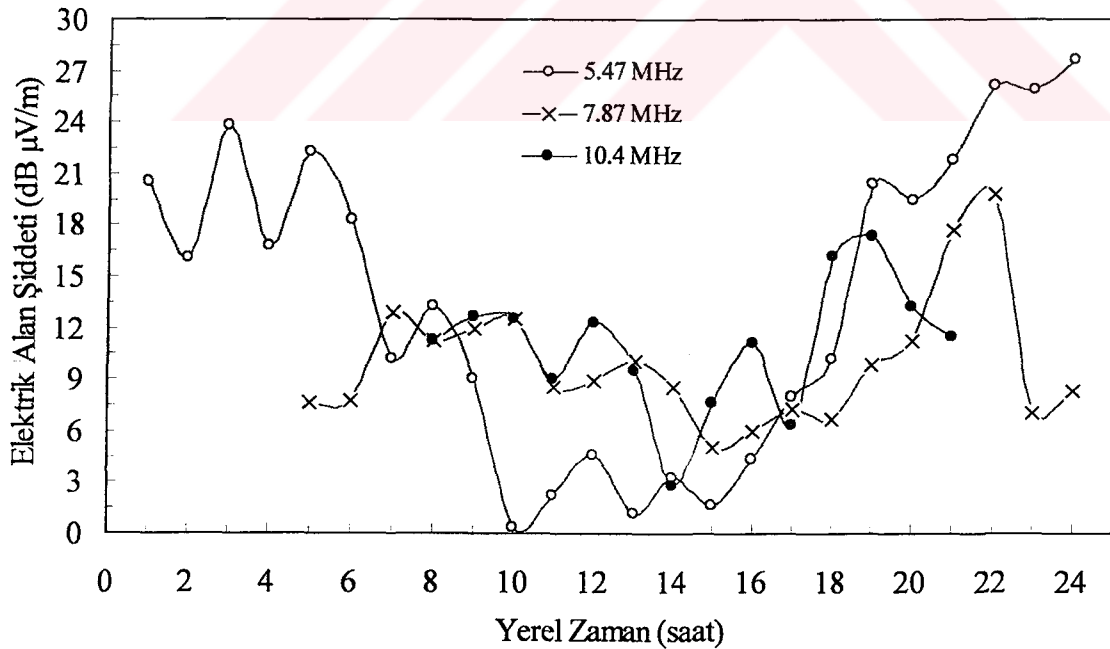
HF bandının kullanım alanlarından daha verimli olarak yararlanabilmek için, uluslar arası düzeyde araştırmalar yapılmaktadır. Bu araştırma gruplarının en önemlilerinden biri International Telecommunication Union (ITU) dır. Bu bölümde bu kurumun yaptığı ölçümler değerlendirilerek, ölçüm sonuçları ile hesaplamalardan bulunan teorik sonuçlar karşılaştırılacaktır. Bu amaçla Leeds (İngiltere) ($53^{\circ} 50' K$, $1^{\circ} 35' B$) ile Oslo (Norveç) ($59^{\circ} 55' K$, $10^{\circ} 45' D$) arasında yapılan radyo yayınından (Şekil 4.3) elde edilen veriler değerlendirilmiştir. Ölçümler, ITU-R HF alan şiddeti ölçüm sistemi ile Güneş lekесinin minimum ($R \leq 30$) olduğu 1998 yılında bir saniye aralıklarla yapılmıştır. Elde edilen verilerin saatlik ortalamaları alınarak, değerlendirmeler sadece 5.47 MHz, 7.87 MHz ve 10.4 MHz frekansları için yapıldı.

5.4.1. Elektrik Alan Şiddetinin Günlük ve Frekansla Değişimi

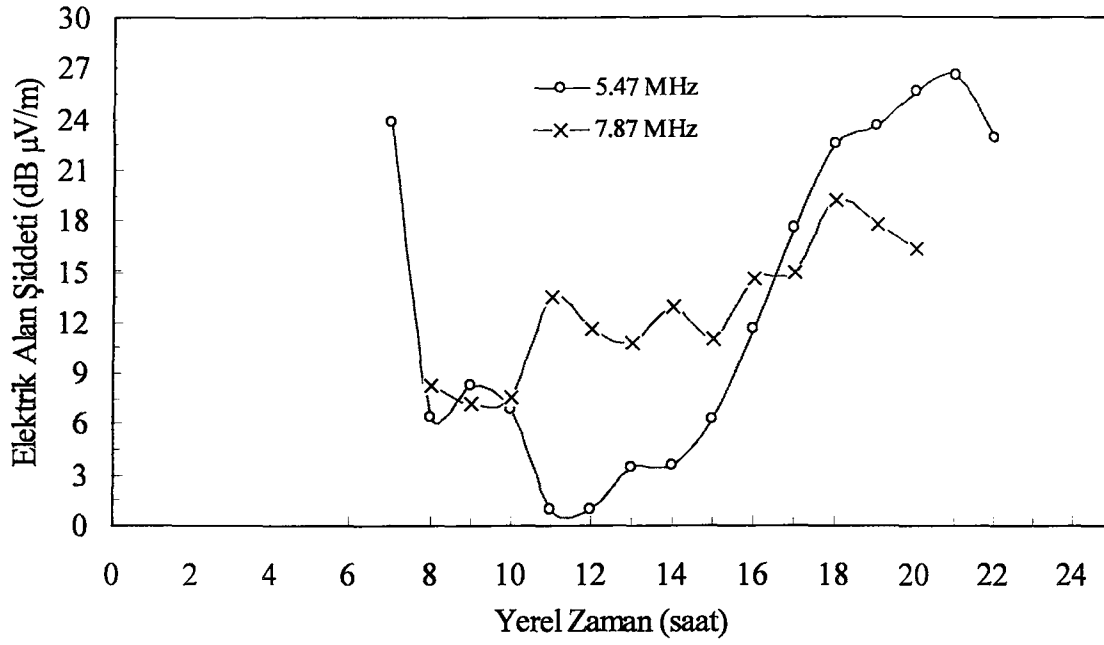
5.47 MHz, 7.87 MHz ve 10.4 MHz frekanslı HF elektromanyetik dalgaların 21 Hazirandaki günlük ve frekansla değişimi Şekil 5.34'de verilmiştir. 5.47 MHz lik dalga için gün boyu veri alınmışken, 7.87 MHz lik dalga için saat 24.00-05.00 YZ arasında, 10.4 MHz lik dalga için ise saat 21.00-08.00 YZ arasında veri alınamamıştır. Gündüz saatlerinde genel olarak daha büyük frekanslı dalgalar daha az sönüme uğrarken, gece saatlerinde bunun tersi olmuştur.

Gece daha da azalan yoğunluktan dolayı dalganın bir kısmı yansırken, bir kısmı da yansımaya iyonküreden geçmiştir. Bunun sonucu olarak büyük frekanslı dalgaların şiddeti gece saatlerinde daha da azalmıştır. Bu durum dalganın bir kısmının iyonküreyi geçtiğinin bir göstergesidir. Yapılan ölçümlerden elde edilen verilerin değişim eğrileri, teorik olarak hesaplanan değişim eğrileri (Şekil 5.28) ile benzerlik göstermektedir. Ayrıca ölçümlerin alındığı zaman aralığında Güneş lekesinin biraz daha büyük olması, sönümün daha fazla olmasına neden olmuştur [51, 56].

23 Eylülde yapılan ölçümlerden elde edilen değerlerin değişimleri Şekil 5.35’de verilmiştir. Bu periyottaki ölçümlerden 10.4 MHz frekanslı dalga için veri alınamamıştır. Dalgaların günlük ve frekansla değişimleri, teorik olarak elde edilen sonuçlarla (Şekil 5.29) benzerlik göstermektedir. 5.47 MHz lik dalga için saat 07.00-22.00 YZ arasında, 7.87 MHz lik dalga için ise saat 08.00-20.00 YZ arasında veri alınabilmektedir. Gündüz saatlerinde daha büyük frekanslı dalga daha az sönüme uğrarken, gün batımından sonra yüksek frekanslı dalganın alan şiddeti, düşük frekanslı dalganın alan şiddetine göre daha küçük ölçülmüştür. Bunun nedeni olarak, yüksek frekanslı dalganın büyük bir kısmının yansımaya uğramadan iyonküreyi geçtiğini söylemek mümkündür.

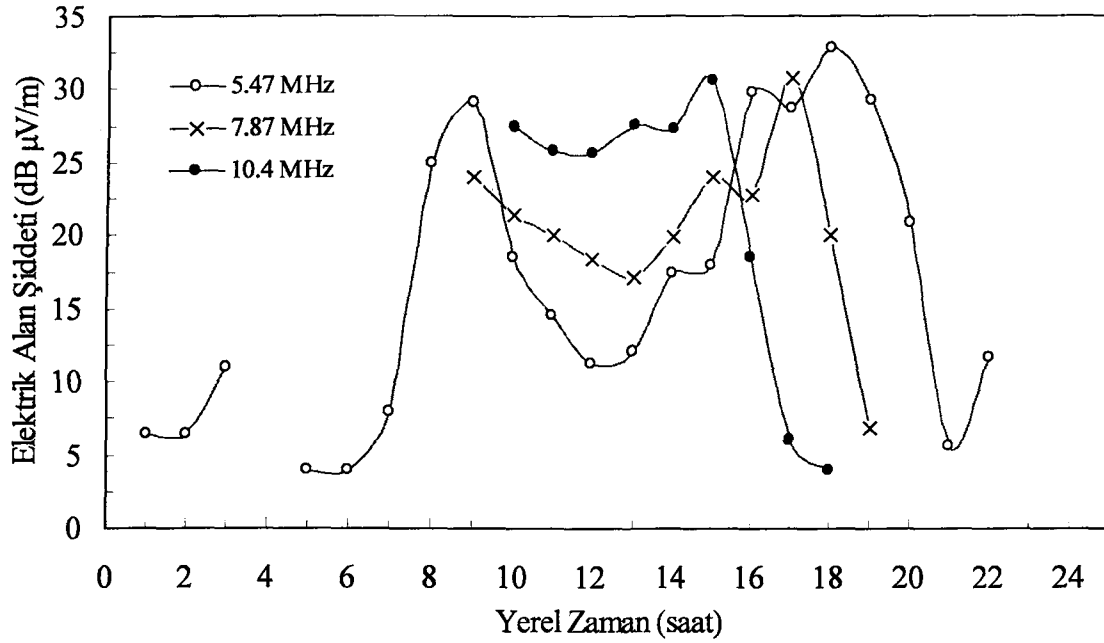


Şekil 5.34. 21 Haziranda ölçülen elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.



Şekil 5.35. 23 Eylülde ölçülen elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.

21 Aralıkta yapılan ölçümlerin günlük değişimi Şekil 5.36'da verilmiştir. Görüleceği gibi, diğer mevsimlere göre dalga şiddetleri daha az soğurulmuştur. 5.47 MHz frekanslı dalga ile yapılan ölçüm sadece saat 03.00-05.00 YZ arası ile saat 22.00-24.00 YZ arası kesintiye uğramıştır. Bu frekansta gece saatlerinde saat 01.00 YZ ile saat 03.00 YZ arası yayın yapılabilmiş olması daha önce bahsettiğimiz kış anormalliği ile izah edilebilir. 7.87 MHz frekanslı dalga için saat 09.00-19.00 YZ arası, 10.4 MHz frekanslı dalga için ise saat 10.00-18.00 YZ arası veri alınabilmektedir. Bu mevsimde dalgaların gündüz saatlerindeki değişimleri, teorik olarak elde edilen sonuçlarla (Şekil 5.30) uyum gösterirken, gece saatlerinde uyum görülmemektedir. Gün batımından sonra, her üç frekanstaki ölçüm sonucu elde edilen dalga şiddetindeki azalmalar, daha önce belirtilen sebeplerden dolayı dalganın bir kısmının iyonküreyi geçmesi ile izah edilebilir. Ayrıca bunun bir sonucu olarak gündüz saatlerinde daha yüksek frekanslı dalgalar daha az soğurulurken, gece saatlerinde tam tersi görülmektedir.



Şekil 5.36. 21 Aralıkta ölçülen elektrik alan şiddetinin günlük ve frekansla değişimi.

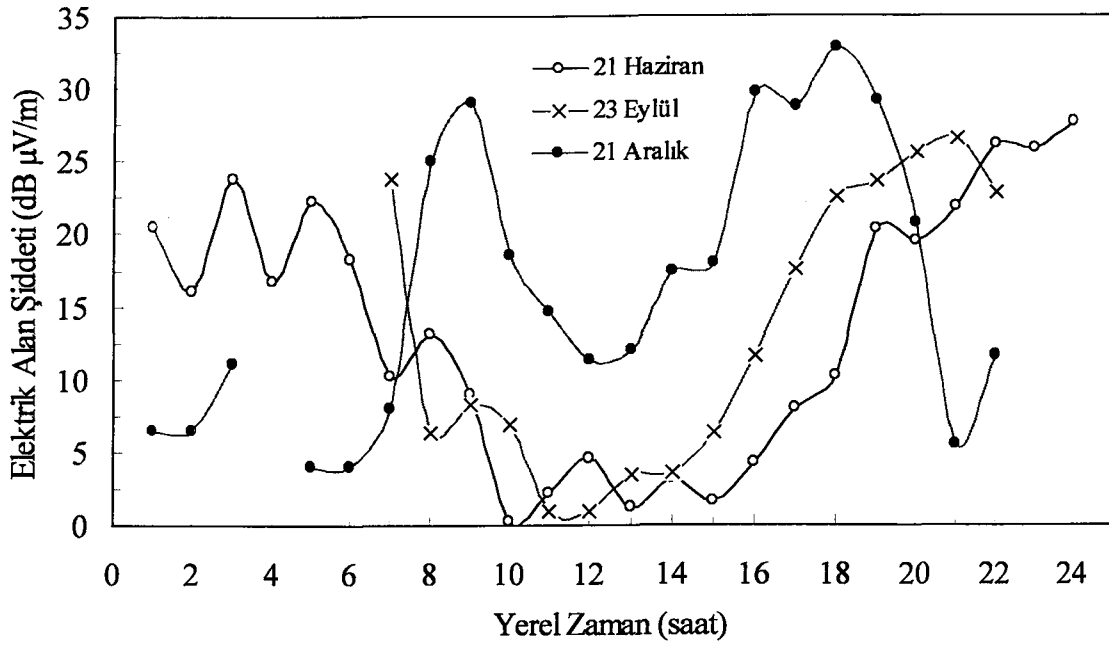
5.4.2. Elektrik Alan Şiddetinin Mevsimsel Değişimi

Bu kısımda ölçülen elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimleri incelendi.

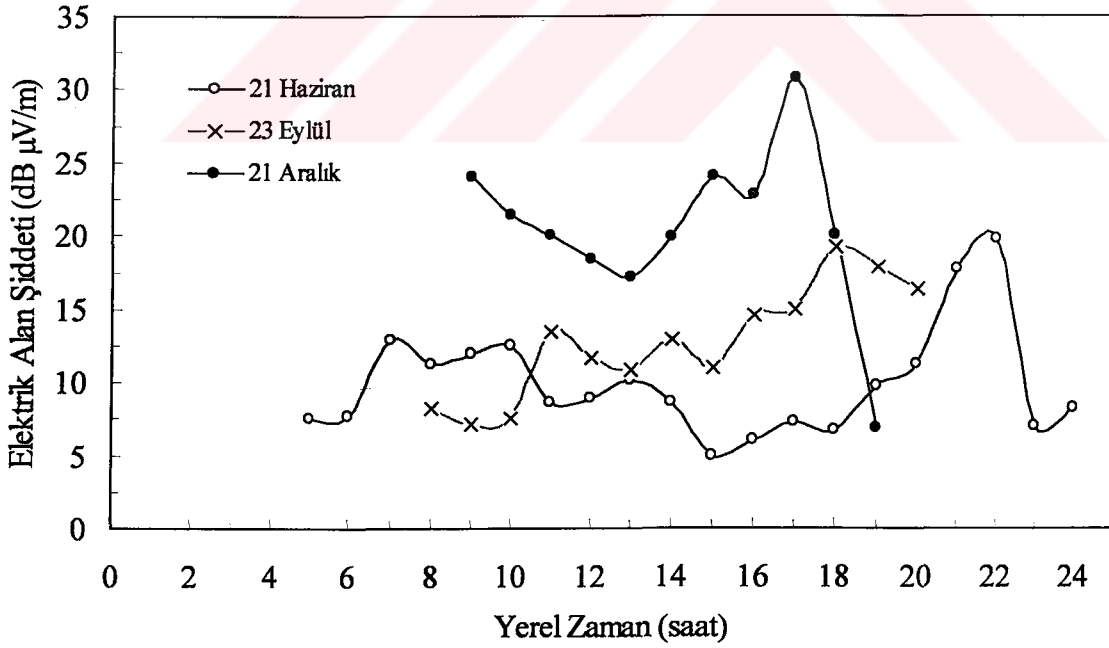
Şekil 5.37 ile verilen 5.47 MHz frekanslı dalganın mevsimsel değişimine bakıldığında, gündüz saatlerinde yazın elektrik alan şiddetindeki sönüm daha fazla iken, kışın daha azdır. Gece saatlerinde ise bu durumun tersi görülmektedir. Gündüz saatlerinde teorik olarak elde edilen sonuçlara (Şekil 5.31) benzer sonuçlar elde edilirken, kışın gece saatlerinde aynı durum söz konusu değildir. Ayrıca, ekinoksta 5.47 MHz ile yapılan ölçüm süresinin kışa göre daha kısa olması dikkat çekmektedir.

7.87 MHz frekanslı dalganın günlük ve mevsimsel değişimi Şekil 5.38'de verilmiştir. Bu frekansta da dalganın elektrik alan şiddetindeki sönümün yazın kışa göre daha fazla olduğu görülmektedir. Bu dalga gece saatlerinde iyonküreden yansımamış ve yazdan kışa doğru gidildikçe günlük ölçüm süresi azalmıştır. Kışın gün batımından sonra, şiddetteki azalmalar bu frekansta da görülmektedir. Mevsimsel değişim eğrisi, teorik olarak elde edilen sonuçlar (Şekil 5.32) ile benzerlik göstermektedir.

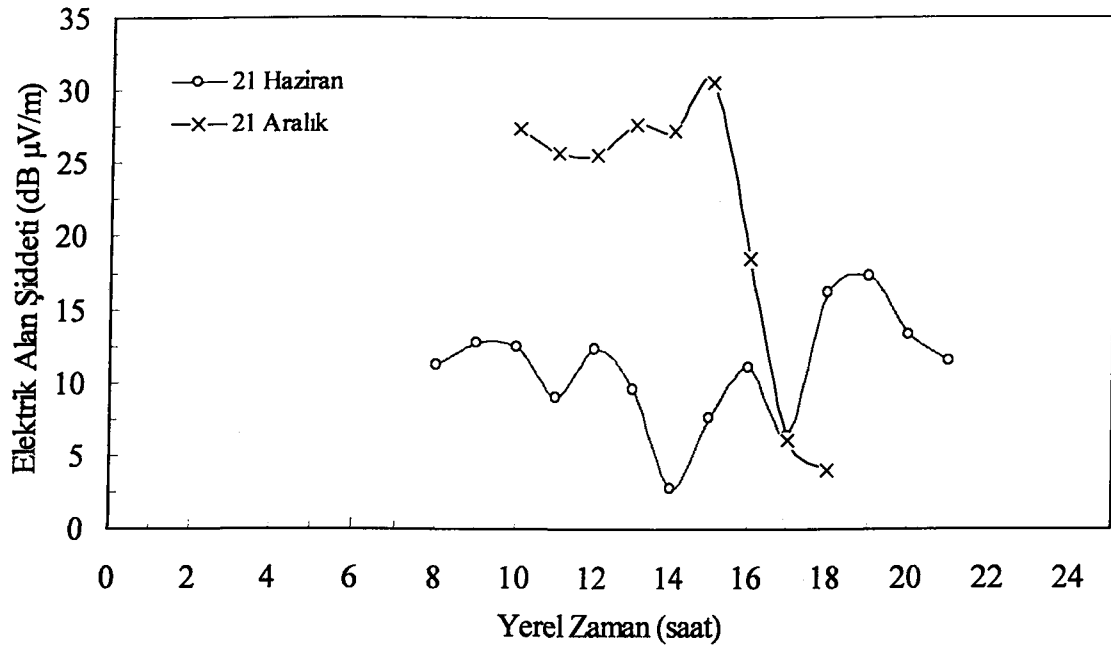
10.4 MHz frekanslı dalganın günlük ve mevsimsel değişimi ise Şekil 5.36'daki gibidir. 5.47 MHz ve 7.87 MHz frekanslı dalgalarındaki değişimler bu frekansta da görülmektedir. 10.4 MHz frekanslı dalga ile ekinoksta ölçüm alınamamıştır. Yazın, kıştan daha uzun süre haberleşme sağlanmaktadır. 21 Aralıkta sadece 8 saat ölçüm alınabilmiştir. Teorik olarak ta (Şekil 5.33) bu sonuçlara yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 5.37. 5.47 MHz lik dalga için ölçülen elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.



Şekil 5.38. 7.87 MHz lik dalga için ölçülen elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.



Şekil 5.39. 10.4 MHz lik dalga için ölçülen elektrik alan şiddetinin mevsimsel değişimi.

6. SONUÇLAR

HF elektromanyetik dalganın iyonküreden yansıması, ortamın parametreleriyle ilgilidir. Dalganın iyonküre içerisindeki yayılımında etkili olacak olayları izah etmek oldukça güçtür. Çünkü bu iletken bölge içerisindeki herhangi bir yerin özellikleri her an değişmektedir. Ancak bu çalışmada dalganın F bölgesindeki yayılımı için yapılan analitik çalışmaların ve nümerik incelemelerin neticesinde çıkarılan genel sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- İyonküre plazmasından yansıyan dalgaların yansıma özellikleri o andaki iyonküre parametrelerine bağlıdır.
- İyonkürede ilerleyen dalgaların genliği iyonküresel karışıklıklardan ve her noktadaki parametrelerin farklı olmasından dolayı bozuluma uğrar. Her noktada genlik değeri farklıdır.
- Gece saatlerinde F2 tepesi daha yükseklerle çıktığından, dalganın yansıma yüksekliği de daha büyük olmaktadır.
- Çalışılan koordinatta kışın gece saatlerinde HF bandındaki frekansların çok az bir kısmı iyonküreden yansıyabilmektedir.
- HF bandındaki dalgaların iyonküre içerisinde yükseklikle zayıflamaları, gündüz saatlerinde alt yüksekliklerde, gece saatlerinde ise üst yüksekliklerde daha fazladır.
- Frekans arttıkça iyonküreden yansıyabilen dalgaların zayıflaması azalmaktadır.
- Dalganın gündüz saatlerindeki sönümü, gece saatlerindeki sönümünden daha fazladır.
- HF dalganın elektrik alan şiddetindeki sönüm, yazdan kışa doğru gidildikçe azalmaktadır.
- Aynı frekanstaki dalganın yaz aylarındaki günlük kullanılabilir süresi kış aylarına göre daha fazladır.
- Genel olarak eğik ilerleyen dalgalar, dikey ilerleyen dalgalarından daha fazla sönüme uğramaktadırlar. Bunun en temel sebebi, iyonküre içerisindeki dalga yolunun daha uzun olmasıdır.
- Hem deneysel sonuçlar, hem de literatür bilgileri elde ettiğimiz teoriyi desteklemektedir.

Genel olarak bu sonuçların eldesi birçok soruyu da beraberinde getirmektedir. Bu sorulara cevap bulabilmek için bu çalışmaların daha özele indirilmesi gerekmektedir. Buna göre ileride yapılacak çalışmalar aşağıdaki gibi planlanmaktadır.

- Yerin manyetik alanının dalga yayılımına ve sönümüne etkisinin incelenmesi.
- Elektromanyetik dalganın yayılımı üzerine sıcaklığın etkisinin incelenmesi.

- İyonkürenin 120 km nin altındaki bölgesinin HF radyo dalgaları üzerindeki etkisi.
- Herhangi bir bölge üzerinde uzak mesafe haberleşmeleri için kullanılabilir frekans haritasının oluşturulması.



KAYNAKLAR

1. Rishbeth, H., 1973, Physics and chemistry of the ionosphere, Contemp Physics, 14,229-237.
2. Kelley, M.C., 1989, *The Earth's Ionosphere (Plasma Physics and Electrodynamics)*. Academic Press, San Diego, 487p.
3. Suchy, K., 2000, Theory of high-frequency (HF) radio waves in the second half of the 20th century, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 62, 1683-1687.
4. Dudeney, J.R. and Kressman, R.I., 1986, Empirical models of the electron concentration of the ionosphere and their value for radio communications purposes, Radio Science, 21, No.3, 319-330.
5. Haşımoğlu, S., 1999, HF bandında gök dalgası yayılımı, Yüksek Mühendislik Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 110s.
6. İnan, U.S. and İnan, A.S., 2000, *Electromagnetic Waves*. Prentice Hall Inc., New Jersey, 507p.
7. Djuth, F.T., Gonzales, C.A. and Ierkic, H.M., 1986, Temporal evaluation of the HF-enhanced plasma line in the Arecibo F region, Journal of Geophysical Research, 91, No.A:11, 12089-12107.
8. Thompson, R., 1997, Introduction to HF radio propagation, IPS Radio & Space Services, Sydney-Australia.
9. Cross, R., 1988, *An Introduction to Alfvén Waves*. Printed in Great Britain by J.W. Arrowsmith Ltd., Bristol, 215p.
10. Lysak, R.L., 1990, Electrodynamic coupling of the magnetosphere and ionosphere, Space Science Review, 52, No.33, 1-68.
11. Lysak, R.L., 1999, Propagation of Alfvén waves through the ionosphere: Dependence on ionospheric parameters, Journal of Geophysical Research, 104, No.10, 1-17.
12. Davies, K., 1965, *Ionospheric Radio Propagation*. U.S. Government Printing Office, Washington, 159-173p.

13. Chessell, C.I., 1971, The numerical calculation of reflection and transmission coefficients for thin highly ionised layers including the effect of the Earth's magnetic field, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 33, 1515-1532.
14. Park, C.G. and Dejnekarintra, M., 1973, Penetration of thundercloud electric field in to the ionosphere and magnetosphere(1. middle and subauroral latitudes), *Journal of Geophysical Research*, 78, No.28, 6623-6633.
15. Whitten, R.C. and Poppoff, J.G., 1971, *Fundamentals of Aeronomy*. John Wiley & Sons Inc., New York, 446p.
16. Rishbeth, H. and Garriott, O.K., 1969, *Introduction to Ionospheric Physics*. Academic Press, New York, 331p.
17. Booker, H.G., 1984, *Cold Plasma Waves*. Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht-Netherlands, 349p.
18. Dendy, R.O., 1990, *Plasma Dynamics*. Clarendon Press, Oxford, 161p.
19. Chen, F.F., 1984, *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Plenum Press, New York, 421p.
20. Al'pert, Y.L., 1980, On elements of the dielectric tensor, the refractive indices n_{12} and attenuation factor κ_{12} of a magnetically active collisional plasma, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 42, 217-226.
21. Sturrock, P.A., 1994, *Plasma Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, 335p.
22. Denisse, J.F. and Delcroix, J.L., 1963, *Plasma Waves*. Interscience Publishers, New York, 143p.
23. Swanson, D.G., 1989, *Plasma Waves*. Academic Press, San Diego, 422p.
24. Ratcliffe, J.A., 1959, *The Magneto-ionic Theory and Its Applications to the Ionosphere*. Cambridge University Press, London, 206p.
25. Budden, K.G., 1985, *The Propagation of Radio Waves*. Cambridge University Press, London, 327p.

26. Oyinloye, J.O., 1988, Equatorial HF radio wave absorption measurements and the IRI, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 50, 519-522.
27. Lastovicka, J., Boska, J. and Buresova, D., 1993, Digital measurements of LF radio wave absorption in the lower ionosphere and inferred gravity wave activity, *Annales Geophysicae*, 11, 937-946.
28. Belova, E.G., Pashin, A.B. and Lyatsky, W.B., 1995, Passage of a powerful HF radio wave through the lower ionosphere as a function of initial electron density profiles, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 37, 265-272.
29. Mishin, E.V. and Atamaniuk, B., 1995, Radio wave turbulent absorption due to electron beam injection in the ionosphere, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 57, 193-199.
30. Özcan, O., Aydoğdu, M., Yeşil, A. and Güzel, E., 1996, The damping of the radio waves in the ionospheric plasma over Elazığ, *F.Ü. Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8(2), 113-123.
31. Cho, M. and Rycroft, M.J., 1998, Computer simulation of the electric field structure and optical emission from cloud-top to the ionosphere, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60, 871-888.
32. Takeda, M. and Araki, T., 1985, Electric conductivity of the ionosphere and nocturnal currents, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 47, No.6, 601-609.
33. Tanenbaum, B.S., 1967, *Plasma Physics*. McGraw-Hill Book Company, New York, 361p.
34. Ünal, İ., 1997, Elektron sıcaklığının iyonküre plazmasının elektrik iletkenliğine etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 55s.
35. Ferguson, B.G. and McNamara, L.F., 1986, Calculation of HF absorption using the International Reference Ionosphere, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 48, No.1, 41-49.
36. Adeniyi, J.O. and Radicella, S.M., 1998, Diurnal variation of ionospheric profile parameters B_0 and B_1 for an equatorial station at low solar activity, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 60, No.3, 381-385.

37. Özcan, O. and Ünal, İ., 2001, Comparison of total electron content predicted by IRI with that measured over Ankara, Indian Journal of Radio & Space Physics, 30, 172-175.
38. Aydoğdu, M., 1981, Ariel 4 uydusuyla elde edilen elektron yoğunluğu verilerinin 70°-80° D ve 60°-70° B boylamları arasında incelenmesi, Fırat Üniversitesi Veteriner Fakültesi Dergisi, 6, No.1-2, 151-164.
39. Scali, J.L. and Dyson, P.L., 1992, Amplitude statistics of signal reflected from the ionosphere, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 54, No.3/4, 265-276.
40. Fejer, J.A., 1955, The interaction of pulsed radio waves in the ionosphere, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 7, 322-332.
41. Abraham, S., Dhaka, S.K., Praveen, K.D., Nath, N., Nagpal, O.P. and Baluja, K.L., 1998, Planetary wave effect on ionospheric absorption, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 60, No.4, 441-453.
42. Unwin, K.S. and Knox, F.B., 1971, Radio aurora and electric fields, Radio Science, 6, No.12, 1061-1077.
43. Thrane, E.V., 1986, Propagation II. Problems in HF propagation, Agard Lecture Series, No.145, Propagation Impact on Modern HF Communications System Design, France, (11-1)-(11-17).
44. Al'pert, Y.L., 1963, *Radio Wave Propagation and The Ionosphere*. Consultants Bureau Enterprises, New York, 394p.
45. Budden, K.G., 1980, The theory of radio windows in the ionosphere and magnetosphere, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 42, 287-298.
46. Dyson, P.L. and Bennett, J.A., 1988, A model of the vertical distribution of the electron concentration in the ionosphere and its application to oblique propagation studies, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, 50, No.3, 251-262.
47. Kopka, H. And Möller, H.G., 1969, Calculation of the field strength of a radio transmission for given electron density and collision frequency profiles, AGARD Conference Proceedings (Oblique Ionospheric Radio Wave Propagation at Frequencies Near The Lowest Usable High Frequency), Technivision Services Slough, England, 209-218.

48. International Radio Consultative Committee (CCIR), 1969, *Broadcasting in Band 7 (HF) in The Tropical Zone*. Published by The International Telecommunication Union, Geneva, 109p.
49. Osepian, A. and Smirnova, N., 1997, Modelling of absorption layer during auroral absorption events, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59, No.8, 951-960.
50. Friedrich, M. and Torkar, K.M., 1983, High-latitude plasma densities and their relation to riometer absorption, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 45, No.2/3, 127-135.
51. Singer, W., Taubenheim, J. and Bremer, J., 1980, A test of IRI lower ionosphere models by comparison with radio propagation data, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 42, 241-248.
52. Schwentek, H., 1969, Diurnal and seasonal variation of absorption in the ionosphere determined from field strength recording at 2.6 Mc/s, AGARD Conference Proceedings (Oblique Ionospheric Radio Wave Propagation at Frequencies Near The Lowest Usable High Frequency), Technivision Services Slough, England, 35-38.
53. Aydoğdu, M., 1986, İyonkürenin F2-bölgesindeki ekvator anomalisi üzerine bir çalışma, C.Ü. Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi, 4, 9-22.
54. Nishino, M., Yamagishi, H., Stauning, P., Rosenberg, T.J. and Holtet, J.A., 1997, Location, spatial scale and motion of radio wave absorption in the cusp-latitude ionosphere observed by imaging riometers, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 59, No.8, 903-924.
55. Ueda, H.O., Omura, Y. And Matsumoto, H., 1998, Computer simulations for direct conversion of the HF electromagnetic wave in to the upper hybrid wave in ionospheric heating experiments, *Annales Geophysicae*. 16, 1251-1258.
56. Morgan, A.D., 1969, Magneto-ionic effects in polarisation and absorption, AGARD Conference Proceedings (Oblique Ionospheric Radio Wave Propagation at Frequencies Near The Lowest Usable High Frequency), Technivision Services Slough, England, 113-125.

ÖZGEÇMİŞ

İbrahim ÜNAL

Fırat Üniversitesi
Fen Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü
23169, Elazığ

Tel : (424) 237 0000 / 6013
e-posta: iunal@firat.edu.tr

- 1972 Elazığ'ın Ağın ilçesinde doğdu.
- 1985–1988 Malatya Lisesi Fen Bölümünde orta öğrenimini tamamladı.
- 1990–1994 Fırat Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünden mezun oldu.
- 1995–1996 M.E.B. bünyesinde fizik öğretmeni olarak görev yaptı.
- 1995–1997 Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında “Elektron Sıcaklığının İyonkürenin Elektrik İletkenliğine Etkisi” konusunda yaptığı tez çalışması ile Yüksek Lisans derecesini aldı.
- 1996–... Fırat Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik bölümünde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.
- 1997–... Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Anabilim Dalında doktora programına kayıtlıdır.

**T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**