

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YILDIRIM KAYNAKLI ELEKTROMANYETİK DALGALARIN ALT
İYONKÜREYİ ISITMA VE İYONLAŞTIRMA SÜREÇLERİ

DOKTORA TEZİ

Ramazan ATICI

(08114201)

Anabilim Dalı: Fizik

Programı: Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Esat GÜZEL

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 06 Ağustos 2013

AĞUSTOS-2013

T.C
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YILDIRIM KAYNAKLI ELEKTROMANYETİK DALGALARIN ALT
İYONKÜREYİ ISITMA VE İYONLAŞTIRMA SÜREÇLERİ

DOKTORA TEZİ

Ramazan ATICI

(08114201)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 06 Ağustos 2013

Tezin Savunulduğu Tarih : 26 Ağustos 2013

Tez Danışmanı : Yrd. Doç Dr. Esat GÜZEL (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Abdulkadir YILDIZ (K.S.Ü)

Doç. Dr. Fatih KÜLAHCI (F.Ü)

Doç Dr. Mustafa TÜRK (F.Ü)

Yrd. Doç Dr. Murat CANYILMAZ (F.Ü)

AĞUSTOS-2013

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının hazırlanmasında maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemeyen değerli danışmanım Yrd. Doç. Dr. Esat GÜZEL'e özellikle teşekkürü bir borç bilirim. Katkılarından dolayı hocam Yrd. Doç. Dr. Murat CANYILMAZ'a, tezin sayısal hesaplamalarını yapmakta yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Cevad SELAM'a, oda arkadaşım Arş. Gör. Dr. Selçuk SAĞIR'a, diğer mesai arkadaşlarıma ve yardımı olan herkese teşekkürlerimi sunarım.

Bu günlere gelmemde her türlü yardımı koşulsuz olarak sunan değerli anneme ve babama ve tez çalışmalarımda yoğun iş stresini benimle beraber yaşayan sevgili eşime ve kızıma ayrıca teşekkür ederim.

Ramazan ATICI

AĞUSTOS-2013

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	IV
SUMMARY	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	VI
TABLolar LİSTESİ	X
SEMBOLLER LİSTESİ	XI
KISALTMALAR LİSTESİ	XV
1. GİRİŞ.....	1
2. ALT İYONKÜRENİN GECE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ	5
3. YILDIRIMLAR VE YILDIRIM KAYNAKLI ELEKTRİK ALANLAR	10
3.1. Yıldırımlar ve Oluşum Süreçleri.....	10
3.2. Yıldırım Kaynaklı Elektrik Alanlar	13
3.2.1. EMP Kaynaklı Elektrik Alanlar	14
3.2.2. QE Elektrik Alanlar.....	16
3.2.3. EMP ve QE Alanların Alt İyonküre Üzerindeki Etkileri	18
4. YILDIRIM KAYNAKLI ELEKTROMANYETİK DALGALARIN ALT İYONKÜREDE YAYILIMI.....	23
5. MATERYAL METOT.....	28
5.1. Yıldırım EMP Alan Kaynaklı Isınma Modeli.....	29
5.2. Yıldırım EMP Alan Kaynaklı İyonlaşma Modelleri.....	32
6. BULGULAR VE TARTIŞMA	38
6.1. Alt İyonküredeki Elektron Sıcaklığının EM Dalga Modlarına Göre Değişimi	40
6.2. Alt İyonküredeki Elektron Yoğunluğunun EM Dalga Modlarına Göre Değişimi ...	47
6.2.1. Model 1	48
6.2.2. Model 2	51
6.2.3. Model 3	54

6.2.4. İyonlaşma Modellerinin Karşılaştırılması	65
7. SONUÇLAR.....	71
8. ÖNERİLER.....	73
KAYNAKLAR.....	74
ÖZGEÇMİŞ	80

ÖZET

Bu tezde, bulut-yer arası yıldırım boşalmalarının dönüş darbesinden yayınlanan VLF (Very Low Frequency) bandındaki elektromanyetik (EM) ışımanın, gece alt iyonküreyi ısıtması ve iyonlaştırması araştırılmıştır. Bu amaçla, alt iyonküredeki elektronların sıcaklıkları Maxwellian dağılımı kullanılarak elde edilen elektron enerji denge denklemi aracılığıyla hesaplanmıştır. Hesaplamalarda Yer'in manyetik alanının etkisi de kullanılmış ve manyetik alanın yıldırım kaynaklı EM dalgayı farklı modlara ayırdığı görülmüştür. Tüm bu EM dalga modlarının alt iyonküre elektron sıcaklığını elektrik alan ile orantılı olarak önemli derecede arttırdığı görülmüştür. Elektron sıcaklığının 10 V/m lik elektrik alan değerinde tüm modlar için yaklaşık 9000 °K ile 11000 °K'e kadar yükseldiği görülmüştür. Bu sıcaklıklara yaklaşık olarak 85-90 km yükseklikte ulaşılmıştır. Elektrik alanın artması ile maksimum sıcaklık değerine ulaşılan yüksekliğin de yukarı doğru kaydığı görülmüştür. EM dalganın sağa (R-right) kutuplanmış modunun diğer dalga modları gibi 95-100 km yükseklikte etkisini yitirmeyip iyonkürede ilerlemesine devam ettiği görülmüştür.

Yıldırım etkili iyonlaşma alt iyonkürenin basit dört bileşenli bir modeli kullanılarak hesaplandı. Ancak bu modele daha önceki çalışmalarda ihmal edilen iki-cisim bağlanma reaksiyonu ve özellikle 72 km yükseklikten sonra etkili olan aktif türlerin birleşmeli ayrışma reaksiyonları dâhil edildi. Hesaplamalar sonucunda elektron yoğunluğu üzerinde üç cisim bağlanma sürecinin 50-72 km arasında, birleşmeli ayrışma sürecinin yaklaşık 72-85 km arasında ve iki cisim bağlanma sürecinin yaklaşık 85-95 km arasında etkili olduğu görüldü. Aktif türlerden ayrışmanın uygulanan elektrik alan değerine çok fazla bağlı olmadığı görüldü. Buna karşın, elektronların iki-cisim bağlanmasının uygulanan elektrik alan değerlerine keskin bir bağlılığın olduğu görüldü. Ayrıca bu çalışmada kullanılan elektrik alan değerleri için, EM dalganın alt iyonküre ile etkileşme süresi boyunca çok sayıda iyonlaşmanın olmasından dolayı, elektron yoğunluğunun tedirgin olmuş değerinin tedirgin olmamış durumdakinden yaklaşık 5,5 kata kadar daha fazla olduğu bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yıldırım, Alt iyonküre, EM dalgalar, Isınma ve İyonlaşma

SUMMARY

Heating and Ionization Processes to Lower Ionosphere by Lightning Induced Electromagnetic Waves

In this thesis, it is investigated heating and ionization of the nighttime lower ionosphere by electromagnetic radiation in the VLF (Very Low Frequency) band that transmitted by cloud-to-ground (CG) lightning return stroke. For this purpose, temperature of electrons in the lower ionosphere is calculated by electron energy balance equation that obtained by using Maxwellian distribution. The effect of the Earth's magnetic field is also used in calculations and seen that the magnetic field allocated the lightning-induced EM wave to different modes. It is observed that all these EM wave modes increase significantly to electron temperature of lower ionosphere in proportion to the electrical field. In the 10 V/m of the electrical field for all modes, it is seen that electron temperature increased about by 9000-11000 °K. These temperatures reached an altitude of about 85-90 km. With the increase of the electric field, it is seen that the altitude where reached maximum temperature values shifted upward. The Right-Handed mode of EM wave seen continued to progress without lose the effect to 95-100 km altitude as other modes.

Lightning induced ionization is calculated by using a simple four-component model of lower ionosphere. However, two-body attachment reaction which neglected in previous studies and associative detachment of active species reaction which effected especially above 72 km altitude are included to this model. In the result of calculations, three-body attachment process between the 50-72 km altitude, associative detachment process between about 72-85 km altitude and two-body attachment process between about 85-95 km altitude on the electron density were observed to be effective. It seen that attachment of active species not depend very much on the value of applied electric field. In contrast, it observed that two-body attachment of electrons depend sharply on values of applied electric field. Moreover, for the values of electric field used in this study, because of to be much ionization by interaction time with lower ionosphere of EM wave, it is found that perturbed value of electron density greater than by 5.5 times from its not perturbed value.

Key Words: Lightning, Lower Ionosphere, EM Waves, Heating and Ionization

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 1.1. İyonküre elektron yoğunluğunun ve nötr atmosfer sıcaklığının yükseklik ile değişimi (Cummer, 1997).....	2
Şekil 2.1. Alt iyonküredeki hava yarılama elektrik alanı, yıldırım kaynaklı VLF radyo frekansının frekansının ve etkin elektron-nötr çarpışma frekansının yükseklikle değişimi.....	8
Şekil 2.2. Alt iyonküredeki elektron üç cisim bağlanma ve ayrışma frekanslarının yükseklikle değişimi (Glukhov vd., 1992; Rodriguez ve İnan, 1994).....	9
Şekil 3.1. (a) Bulut boşalmalarının türleri: (i) bulutiçi (IC); (ii) hava boşalmaları (CA); (iii) bulutlararası (CC). (b) CG boşalmalarının türleri: (i) aşağı yönlü -CG; (ii) aşağı yönlü +CG; (iii) yukarı yönlü -CG; (iv) yukarı yönlü +CG boşalmaları (Cooray ve Fernando, 2010).....	11
Şekil 3.2. Yıldırım oluşum aşamalarının gösterimi (Uman, 1987).....	12
Şekil 3.3. Alt İyonküre elektron yoğunluğu ve VLF radyo dalga yayılımı üzerinde etkili olan yıldırım kaynaklı süreçlerin gösterimi (Canyılmaz, 2008).....	19
Şekil 3.4. Işık sütunları, püskürmeler ve ışık yayılımlarının genel gösterimi (Canyılmaz, 2008).....	21
Şekil 4.1. Yer'in manyetik alanının (B) ve dalganın yayılma doğrultusunun (k) geometrisi (Aydoğdu ve Özcan, 2000).....	24
Şekil 6.1. 21 Haziran 2000 tarihi YZ 2400 için elektron ve nötr yoğunlukların yüksekliğe göre değişimi (Hedin, 1991).....	38
Şekil 6.2. Şekil 6.1. ile aynı koşullar için MSISE-90 modeli ile elde edilen alt iyonkürenin nötr sıcaklığının yükseklikle değişimi (Hedin, 1991).....	39
Şekil 6.3. Yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının kutuplanmış L ve R-Modlarının neden olduğu alt iyonküre elektron sıcaklığındaki tedirginliğin yükseklik ile değişimi	40

Şekil 6.4. O ve X-Modu dalgaların neden olduğu alt iyonküre elektron sıcaklığındaki tedirginliğin yükseklik ile değişimi	41
Şekil 6.5. VLF radyo dalgasının 10 V/m lik elektrik alan değeri için O ve X modlarının elektron sıcaklığı ve çarpışma frekansı üzerindeki etkisi. X ve Z daha önce ifade edilen normalize frekanslardır ve Z_0 Z'nin tedirgin olmamış değeridir (İnan vd., 1991).....	42
Şekil 6.6. 5 km yükseklikteki bir yatay boşalmadan yayılan EM darbe tarafından D-bölgesinin ısınması ve iyonlaşması. Sol panelde 300 K'e normalize edilmiş elektron sıcaklığı ve sağ paneldeki ikincil iyonlaşma elektron yoğunluğunun gece (a), (b), (c) ve gündüz (d) değerleri ve farklı elektrik alan yoğunlukları için yüksekliğin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir (Rodriguez vd., 1992).....	43
Şekil 6.7. Yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının farklı modlarının toplanması ile alt iyonkürenin elektron sıcaklığındaki tedirginliğin yükseklik ile değişimi	44
Şekil 6.8.Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının L ve R modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi	48
Şekil 6.9. Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının O ve X modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi	49
Şekil 6.10. Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının L ve R, O ve X modlarının toplamalarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi	50
Şekil 6.11. Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının L ve R modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi	51
Şekil 6.12. Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının O ve X modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi	52
Şekil 6.13.Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının L+ R ve O+X durumlarında elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi	53
Şekil 6.14. Yıldırım VLF radyo dalgasının L ve R modlarının aktif türlerden ayrışmanın modele dâhil edildiği durumda elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi	54
Şekil 6.15. Yıldırım VLF radyo dalgasının O ve X modlarının aktif türlerden ayrışmanın modele dâhil edildiği durumda elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi	55
Şekil 6.16. Yıldırım VLF radyo dalgasının L+R ve O+X durumunda alt iyonkürenin aktif türlerden ayrışmanın modele dâhil edildiği durumda elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi	56

- Şekil 6.17. Elektronların iki cisim bağlanması dahil edildiği durumda yıldırım VLF radyo dalgasının L ve R modlarının alt iyonkürenin elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi..... 58
- Şekil 6.18. Elektronların iki cisim bağlanması dahil edildiği durumda yıldırım VLF radyo dalgasının O ve X modlarının alt iyonkürenin elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi..... 59
- Şekil 6.19. Elektronların iki cisim bağlanması dâhil edildiğinde EM dalganın L+R ve O+X durumunda alt iyonkürenin tedirgin olmuş elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi..... 60
- Şekil 6.20. Elektron ayrışma ve bağlanma frekanslarının EM dalganın L ve R modlarına göre yükseklikle değişimi. Burada v_d Denklem (5.41) vasıtasıyla elde edilmiştir. v_a elektronun iki ve üç cisim bağlanma kayıplarının toplamını gösterir 61
- Şekil 6.21. Model 3 ün yardımıyla elde ettiğimiz yıldırım VLF radyo dalgasının L ve R modlarından dolayı meydana gelen elektron yoğunluğunun yüksekliğe göre değişimi..... 62
- Şekil 6.22. Model 3 ün yardımıyla elde ettiğimiz yıldırım VLF radyo dalgasının O ve X modlarından dolayı meydana gelen elektron yoğunluğunun yüksekliğe göre değişimi..... 63
- Şekil 6.23. Yıldırım VLF radyo dalgasının L- R ve O-X modlarından toplanması ile meydana gelen Model 3' ün yardımıyla elde edilen elektron yoğunluğunun yüksekliğe göre değişimi 64
- Şekil 6.24. Yıldırımdan yayınlanan VLF radyo dalgasının L ve R modları tarafından M1, M2 ve M3 modelleri ile elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklik ile değişimi..... 65
- Şekil 6.25. Yıldırımdan yayınlanan VLF radyo dalgasının O ve X modları tarafından M1, M2 ve M3 modelleri ile elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklik ile değişimi..... 66
- Şekil 6.26. Yıldırımdan yayınlanan VLF radyo dalgasının modlarının L+R ve O+X şeklinde olması durumunda M1, M2 ve M3 modelleri ile elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklik ile değişimi..... 67
- Şekil 6.27. a) Seyrek gece koşulları altında 25 V/m lik elektrik alan değerli tek bir yıldırım boşalması tarafından üretilen elektron yoğunluk değişimleri. b) Aynı koşullar altında birbirini takip eden 8, 14, 20 yıldırım boşalması tarafından üretilen elektron yoğunluk değişimi (Taranenko, 1993)..... 68

Şekil 6.28. Yıldırımdan yayınlanan VLF EM dalgasının alt iyonküre elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi. a) elektron yoğunluğunun mutlak artışı, b) elektron yoğunluğunun normalize edilmiş durumdaki değişimi (Barrington-Leigh, 2000)..... 69

TABLolar LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 5.1. D bölgesi reaksiyon katsayıları ve frekansları (Rodriguez ve İnan, 1994).	36
Tablo 6.1. Manyetik alanın yokluğunda ($B=0$) yıldırım kaynaklı elektromanyetik dalganın farklı modlarının E_{100} değerlerinin elektron sıcaklığı üzerindeki etkisinin maksimuma ulaştığı yükseklik ve bu yükseklikteki sıcaklık değeri	46
Tablo 6.2. Manyetik alanın varlığında yıldırım kaynaklı EM dalganın farklı modlarının E_{100} değerlerinin elektron sıcaklığı üzerindeki etkisinin maksimuma ulaştığı yükseklik ve bu yükseklikteki sıcaklık değeri	46

SEMBOLLER LİSTESİ

A	: Pozitif iyonların küme iyonlarına dönüşüm oranı
a₁, a₂, a₃	: Katsayılar
B	: Yer'in manyetik alan
B₀	: Yer'in manyetik alanın büyüklüğü
B₁	: Dalganın manyetik alanı
b₁, b₂, b₃, b₄	:Katsayılar
B_x	: Manyetik alanın x-bileşeni
B_y	: Manyetik alanın y-bileşeni
B_z	: Manyetik alanın z-bileşeni
c	: Işık hızı
D	: Yıldırım kanalından olan uzaklık
d	: Denklinasyon açısıdır
e	: Elektronun yükü
E	: Radyo dalgasının elektrik alanı
E_k	: Hava yarıma elektrik alanı
f	: Dalganın frekansı
H	: Heaviside fonksiyonu
I	: İnklinasyon açısıdır
i	: Dönüş darbesinin akımı
i₀	: Taban durumu akımı
J	: Akım yoğunluğu
k_B	: Boltzman sabiti
κ	: EM dalganın sönüm katsayısı
L	: Kayıp katsayısı

L_{es}	: Esnek çarpışalar sonucu meydana gelen kayıp
$L_{dön}$	: Dönem uyarılmaları sonucu meydana gelen kayıp
L_{tit}	: Titreşim uyarılmaları sonucu meydana gelen kayıp
L_{uy}	: Oksijen atomunun elektronik uyarılması sonucu meydana gelen kayıp
L_{iy}	: Oksijen atomunun ince yapı uyarılması sonucu meydana gelen kayıp
M_{Qv}	: Yük momenti
M	: Kırılma indisinin reel kısmının katsayısı
m_e	: Elektronun kütlesi
N	: Kırılma indisinin sanal kısmının katsayısı
n	: Ortamın kırma indisi
n_L	: L-modu dalganın kırılma indisi
n_O	: O-modu dalganın kırılma indisi
n_R	: R-modu dalganın kırılma indisi
n_X	: X-modu dalganın kırılma indisi
N_{ac}	: Aktif türlerin yoğunluklarının toplamı
N_e	: Elektron yoğunluğu
N_{e0}	: Tedirgin olmamış elektron yoğunluğu
N^+	: Birincil pozitif iyonların sayısal yoğunluğu
N^-	: Birincil negatif iyonların sayısal yoğunluğu
N_x^+	: Pozitif küme iyonları veya proton hidratların sayısal yoğunluklarını
N_{N_2}	: Azot molekülünün yoğunluğu
N_{O_2}	: Oksijen molekülünün yoğunluğu
N_O	: Oksijen atomunun yoğunluğu
N_N	: Azot atomunun yoğunluğu
N_0	: Deniz seviyesindeki nötr yoğunluk
N_T	: Toplam nötr yoğunluk

S	: EM dalganın enerji akısı
T_e	: Elektron sıcaklığı
T_n	: Nötr sıcaklık
U	: Isınma katsayısı
v	: Yıldırım kanalında akan yükün hızı
V_e	: Elektronun hızı
X, Y, Z	: Normalize frekanslar
Q_z	: Tedirgin olmuş yük miktarı
Q	: CG yıldırım boşalmasında bırakılan yük miktarı
Q_0	: Dış kararlı iyonlaştırıcı kaynak
z_d	: Yıldırım kanalının uzunluğu
β	: Elektron yoğunluğunun netliğini tanımlayan parametre
λ	: Negatif iyonların elektron yoğunluğuna oranı
ω_p	: Plazma frekansı
ϵ_0	: Boş uzayın elektriksel geçirgenliği
μ	: Kırma indisinin reel kısmı
χ	: Kırma indisinin sanal kısmı
ω	: Dalganın açısal frekansı
ω_{ce}	: Elektronun dönme frekansı
ν_{en}	: Elektron-nötr çarpışma frekansı
μ_e	: Elektronun mobilitesi
σ	: Alt iyonkürenin iletkenliği
ν_a	: Elektron bağlanma toplam frekansı
ν_{a2}	: Elektron iki cisim bağlanma frekansı
ν_{a3}	: Elektron üç cisim bağlanma frekansı
ν_d	: Elektron ayrışma frekansı

ν_i	: Elektron iyonlaşma frekansı
γ	: Lorentz çarpanı
δ	: Dirac delta fonksiyonu
ρ	: Yük yoğunluğu
Φ	: Elektriksel potansiyel
τ_r	: Dielektrik gevşeme süresi
μ_0	: Manyetik geçirgenlik
α_d	: Pozitif iyonların elektronlar ile yeniden birleşme katsayısı
α_d^c	: Pozitif küme iyonlarının elektronlar ile yeniden birleşme katsayısı
α_i	: Negatif iyonlarla pozitif iyonların birleşme katsayısı

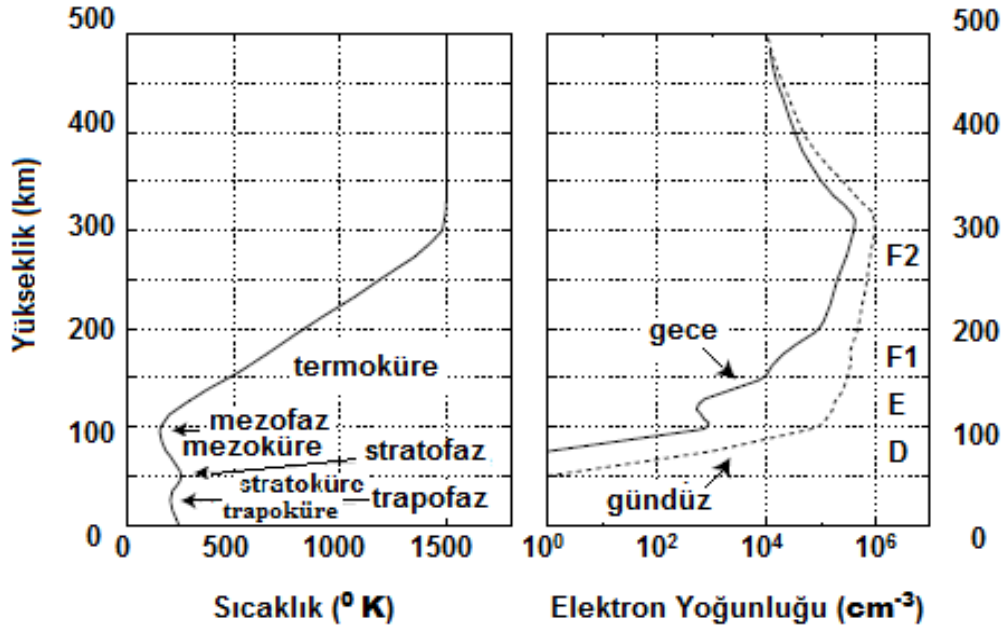
KISALTMALAR LİSTESİ

EM	: Elektromanyetik
VLF	: Çok Düşük Frekans (Very Low Frequency)
ELF	: Aşırı Düşük Frekans (Extreme Low Frequency)
CG	: Bulut-yer-arası boşalma (Cloud-to-Ground)
CC	: Bulut-Bulut arası boşalma (Cloud-to-Cloud)
IC	: Bulut-içi boşalma (Intra-Cloud)
CA	: Bulut- Hava arası boşalma (Cloud-to-Air)
SE	: Statik Elektrik (Static Electric)
QE	: Hemen Hemen Statik Elektrik (Quasi- Electrostatics)
EMP	: Elektromanyetik Puls
UV	: Ultraviyole
TLEs	: Geçici Işık Saçan Olaylar (Transient Luminous Events)
LEP	: Yıldırım etkili elektron yağışı (Lightning Induced Electron Precipitation)
ERP	: Etkin ışıma gücü (Effective Radiation Power)

1. GİRİŞ

Nötr atmosfer, yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık değişimine göre farklı bölgelere ayrılmıştır. Yeryüzüne yakın kısım tropoküre olarak adlandırılır. Sıcaklık yükseklikle azalarak ~12 km'de yaklaşık -70 °C olur. Tropoküredeki soğumanın sebebi enerji kaynağının yeryüzü olmasıdır. Çünkü yeryüzü Güneş'ten gelen radyasyonun çoğunu emer. Böylece ısı, alt atmosferdeki kütlelere ısıma ve taşıma yoluyla iletilir ve daha sonra yukarı doğru rastgele karışarak yayılır. Sıcaklık stratoküre boyunca artarak ~50 km civarında bir maksimuma ulaşır. Buradaki ısınmanın temel kaynağı Güneş'ten gelen mor ötesi ışınların (~200–300 nm) atmosferdeki ozon tarafından emilmesidir. Bu yükseklikten itibaren sıcaklık mezoküre boyunca azalarak ~85 km'de -90 °C değerini alır. Mezoküredeki bu soğuma, karmaşık fotokimyasal ve ısınım süreçleri ile ifade edilir. 90 km'nin üstü termoküre olarak bilinir ve sıcaklık yükseklikle birlikte düzenli olarak artar. Termoküredeki sıcaklığın kaynağı, Güneş'ten gelen mor ötesi ışınlar tarafından atmosferdeki bileşenlerin fotoayırışması ve fotoiyonlaşmasıdır (Canyılmaz, 2008).

İyonküre, değişik iyonlaşma süreçlerinin etkisiyle önemli sayıda serbest elektron ve iyonun var olduğu bir atmosfer bölgesi olarak tanımlanmıştır. Şekil 1.1 gündüz ve gece için iyonküredeki serbest elektronların ve nötr atmosferdeki sıcaklığın yükseklik ile değişimini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi iyonküre; D, E, F1 ve F2 bölgeleri olarak adlandırılan bölgelere ayrılmıştır. Güneş ışımalarının farklı dalga boyları gündüz ve gece iyonküresi arasındaki önemli farkları açıklayan gün boyunca serbest elektronların çoğunun kaynağıdır. Enerjili elektron yağışı, meteorolojik iyonlaşma ve kozmik ışınlar gibi güneşsiz iyonlaşma kaynakları gece serbest elektron yoğunluğunun devamını sağlar (Hargreaves, 1992).



Şekil 1.1. İyonküre elektron yoğunluğunun ve nötr atmosfer sıcaklığının yükseklik ile değişimi (Cummer, 1997).

Yaklaşık 50-100 km'lik yükseklikteki D ve E bölgesi alt iyonküre olarak adlandırılır. İyonkürenin alt kısmını içerir. Alt iyonküre, mezokürenin ve alt termokürenin çok küçük bir parçasıdır. İyonkürenin bu bölgesi yeryüzüne en yakın bölge olmasına karşın, iyonkürenin az bilinen ve daha az anlaşılan bölgesidir. Bunun nedenlerinden biri, uydular için çok düşük, balonlar için çok yüksek bir bölge olduğu için D bölgesi ya uydular tarafından ya da balonlar tarafından yapılan ölçümler içine girmez, sadece roket ölçümleri ve değişik radyo-fiziksel yöntemler kullanılarak yer temelli derinlik ölçümleri içine girer. İkinci neden, D bölgesinin karmaşıklığı, geceleri özellikle daha düşük yüksekliklerde negatif iyonların önemli rolü ve yaklaşık 85 km' den aşağıda su küme iyonlarının baskın rolünü içeren iyon kimyasında ikincil bileşenlerin oldukça baskın olmasıdır. İyonkürenin alt sınırı, bağlanma süreçleri nedeniyle iyonların tümü negatif iyonlar formunda olduğu için, serbest elektronların daha az bulunduğu yüksekliktir. Üçüncü neden, daha üst yüksekliklere kıyasla alt iyonkürenin aşırı değişkenliğinden, kısmen son derece değişken Güneş'ten gelen X-ışını enerjisinin ve özellikle enerjisi 10-20 keV'tan büyük elektronlar gibi yüksek enerjili parçacıkların birikiminden kaynaklanmaktadır. Dördüncü neden, düzenli nötr atmosfer süreçlerinin etkisinin ihmal

edilmesine karşın, alt iyonkürenin üst yüksekliklerinde Güneş ve manyetoküre enerji süreçleri iyonkürede baskındır. Alt iyonkürenin alt yüksekliklerindeki bölgelerde düzenli küçük Güneş enerji etkisi var olmasına karşın, bu bölgeler nötr atmosfer dinamikleri ve kimyası aracılığıyla hareket ettirilir. Bazen Güneş etkisi ile meydana gelen ışık titreşimleri veya jeomanyetik fırtına etkileri gibi Güneş kaynaklı enerji süreçleri baskındır. Ancak kış anomalisi gibi diğer durumlarda atmosferdeki dinamik süreçler baskındır (Cummer, 1997).

D bölgesindeki karmaşık yapının diğer bir nedeni de yıldırımlardır. Yıldırımlar, fırtına bulutlarında oluşan elektriksel boşalmalardır. Birkaç Hz'den onlarca MHz'lik frekanslara sahip çok geniş bir spektrumda elektromanyetik (EM) enerji yayınlarlar. Bununla beraber bu enerjinin çoğu ışıma akımının zaman ölçekleri ve mekânsal ölçütlerinden dolayı Çok Düşük Frekans (VLF-Very Low Frequency, 3-30 kHz) ve Aşırı Düşük Frekans (ELF-Extreme Low Frequency, 3-3000 Hz) bandında yayınlanır (Cummer, 1997). Yeryüzü ve D-bölgesi bu frekanslarda uzun mesafe yayılımına izin veren Yer-iyonküre dalga kılavuzu olarak bilinen eş merkezli küresel bir dalga kılavuzunu oluşturur. Yer-iyonküre dalga kılavuzunda yayılan VLF dalgalarının alan kuvvetleri ve fazları D-bölgesindeki serbest elektronların sayısal yoğunluğundaki nispeten küçük (~%10) dalgalanmalara duyarlıdır. Aynı zamanda D-bölgesi elektronlarının sıcaklığındaki değişimler elektronlar ve nötr parçacıklar arasındaki çarpışmaların frekanslarını ve böylece D-bölgesinde dalgaların emilme oranını değiştirerek VLF dalgalarının yayılımını etkiler (Rodriguez, 1994). Tek bir yıldırım boşalması ile ilişkili hâlâ sonuçları tam olarak anlaşılamayan çok sayıda birbirinden farklı süreç vardır. Bu çalışmanın amacı için en önemli süreç bulut içindeki yükü ve Yer'i elektriksel olarak bağlayan normal olarak 1 km'den daha uzun iletken bir kanaldan sonra meydana gelen bulut-yer arası (CG-Cloud-to-Ground) yıldırım boşalmasının dönüş darbesidir. Bir bulut-yer arası dönen yıldırım darbesi tarafından yayılan EM güç ortalama 20 GW' dır ve ~ 100 µs de sonlanır. Bu kadar büyük bir güce sahip bir yıldırım boşalması alt iyonküreyi doğrudan ısıtır ve iyonlaştırır. Yıldırım boşalmaları sonucu meydana gelen elektromanyetik ışıma elektron sıcaklığı, iyonlaşma frekansı, bağlanma frekansı ve elektronların etkin çarpışma frekansında değişim üretir (Taranenko vd., 1993a,b).

Yıldırım kaynaklı EM darbelerin alt iyonküre üzerindeki etkisini araştırmak için son 25 yılda çok sayıda model geliştirilmiştir. İnan vd. (1991) yıldırım kaynaklı EM darbeler tarafından bir Maxwellian enerji dağılımı ile alt iyonküre elektronlarının

ısınımasını tahmin ettiler. Aynı modeli kullanan Rodriguez vd. (1992) iyonkürenin D-bölgesinde elektronlar tarafından ısıtılmış bölgenin yatay boyutunu hesapladılar. Aynı zamanda, ısınmanın nispeten küçük elektrik alan değerlerinde (1 V/m) meydana gelmesine rağmen, iyonlaşmanın belirli elektrik alan değerlerinden (15 V/m) büyük alanlar için gerçekleşebileceğini tahmin ettiler. Ayrıca, birbirini takip eden yıldırım boşalmalarının fırtına bulutunun yukarısında iyonlaşmada birikmeye sebep olabileceğini önerdiler. Daha sonra ısınmış elektronlar tarafından indüklenen iyonlaşma ve optik yayılımlar dahil olmak üzere bir boyutlu tam kinetik model geliştirildi ve daha önce önerilen iyonlaşmada birikmenin doğruluğu desteklendi (Taranenko vd., 1993a,b). İki boyutlu simülasyon ile Rowland vd. (1995) yıldırım EM darbesinin mekânsal ve zamansal gelişimini hesapladı. Alt iyonkürede EM darbenin yansıma yüksekliğini ve emilimini arttıran elektron yoğunluğunun etkili bir şekilde yükseltildiğini gösterdi. İlk üç boyutlu model Cho ve Rycroft (2001) ve Nagano vd. (2003) tarafından sunuldu. Son olarak Marshall vd. (2008, 2010, 2012) yatay yıldırım boşalmalarının ve Yer'in manyetik alanının dip açısının etkilerini hesaplamak için Kartezyen koordinatlarda üç boyutlu bir model kullandılar. Bu çalışmaların çoğunda Yer'in manyetik alanın etkisi yoğun ısınma koşullarında bile elektronların etkin çarpışma frekansı, elektron dönme frekansından çok daha büyük olduğu göz önüne alındığı için ihmal edilmiştir (İnan vd., 1991). Bununla birlikte, manyetik alanın dâhil edildiği durumda ortamda ilerleyen EM dalganın, çarpışmaları önemli derecede yükseltmesi ile etkileşme bölgesinin altındaki alan çizgisi boyunca manyetize olmuş iyonkürede yayılan ısıklık (whistler) modu dalga olabileceği önerilmiştir (Nagano vd., 2003).

Bu tez çalışmasında, daha önce yer temelli yüksek güçlü yüksek frekanslı (HF) vericiler vasıtasıyla alt iyonkürenin ısıtılması ile alakalı olarak yapılmış olan çalışmadaki yöntem gece yıldırım kanalından yayınlanan VLF EM dalgalar aracılığıyla bu bölgenin ısınmasını ve iyonlaşmasını hesaplamak için kullanıldı (Canyılmaz vd., 2013). Bu doğrultuda ikinci bölümde yıldırımların en fazla etkili olduğu alt iyonkürenin gece elektriksel özelliklerini incelendi. Üçüncü bölümde yıldırım ve yıldırım kaynaklı elektrik alanları ve bu alanların alt iyonküre üzerindeki etkileri hakkında daha geniş bir bilgi sunuldu. Dördüncü bölümde yıldırım kaynaklı EM dalgalardan ve bu EM dalgaların alt iyonküredeki yayılımından, beşinci bölümde materyal ve metottan, altıncı bölümde bulgular ve tartışmalardan, yedinci bölümde sonuçlardan ve sekizinci bölümde önerilerden bahsedilmiştir.

2. ALT İYONKÜRENİN GECE ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

Alt iyonkürenin bir kısmını oluşturan D-bölgesi, çarpışmanın baskın olduğu nötr atmosferden plazma özellikleri ile özdeşleşmiş olan iyonküreye karmaşık bir geçiş bölgesi olarak ele alınabilir (Kero, 2008). D-bölgesi daha çok nötr türlerin büyük sayısal yoğunluğunun, karmaşık iyon-değiş tokuşunun ve elektron bağlanma-ayırışma reaksiyonlarının olduğu bölgedir. Elektron bağlanma ve ayırışma süreçlerinin önemi D-bölgesinin en ayırt edici özelliğidir (Whitten and Poppoff, 1971). Gece elektron yoğunluğu nötr yoğunluğun 70 km'de sadece 10^{-16} ve 90 km'de 10^{-10} katıdır. Ayrıca elektronlar normal olarak 300 °K den daha düşük sıcaklıklarda nötrler ile termal dengededirler ve etkin elektron-nötr çarpışma frekansı elektron dönme frekansına oranla büyüktür. Bu yüzden bu bölge soğuk, çarpışmalı ve az iyonlaşmış bir plazma olarak tanımlanabilir (Barrington-Leigh, 2000).

Gece alt iyonkürede birim hacimdeki elektron yoğunluğu (N_e) yüksekliğin fonksiyonu olarak m^{-3} biriminde

$$N_e(z) = 1.43 \times 10^{13} e^{[(-0.15h') + (\beta - 0.15)(z - h')]} \quad (2.1)$$

ifadesi ile verilir. Burada z yükseklik, h' km cinsinden referans yüksekliği ve β km^{-1} olarak verilen yüksekliğe bağlı elektron yoğunluğu eğrisinin netliğini tanımlayan bir parametredir (Wait and Spies, 1964). Gece koşulları için $\beta = 0.5$ km^{-1} dir ve $h' = 85$ veya 87 km olarak alınır (İnan vd., 1992; Poulsen vd., 1993; Rodriguez vd., 1994). Elektron plazma frekansı ise

$$\omega_p = \sqrt{\frac{N_e e^2}{m_e \epsilon_0}} \quad (2.2)$$

ile verilir. Burada e ve m_e sırasıyla elektronun yükü ve kütlesi, ϵ_0 boş uzayın elektriksel geçirgenliğidir.

Düzlem bir EM dalga için kırılma indisi (n) Apleton-Hartree formülü ile verilir (Ratcliffe, 1959):

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y^2 \sin^2 \theta}{2(1 - X - iZ)} \pm \sqrt{\frac{Y^4 \sin^4 \theta}{4(1 - X - iZ)^2} + Y^2 \cos^2 \theta}} \quad (2.3)$$

Burada denklemin paydasındaki (+) işareti ordinari dalga modunu (O-modu) ve (-) işareti ekstraordinari dalga modunu (X-modu) gösterir. θ , $\mathbf{k}$ ilerleme vektörü ile Yer'in manyetik alanı $\mathbf{B}$ arasındaki açıdır. X , Y ve Z normalize frekansları, $X = \omega_p^2/\omega^2$, $Y = \omega_c/\omega$ ve $Z = \nu_{en}/\omega$ şeklinde tanımlanırlar. Burada $\omega = 2\pi f$, $\omega_c = e\mathbf{B}/m_e$ ve ν_{en} sırasıyla düzlem VLF EM dalganın frekansını, elektronun dönme frekansını ve elektron-nötr çarpışma frekansını gösterir.

Fırtına bulutu yük yapılandırması ile atmosfer içerisine bulut merkezli üç farklı elektrik alan üretim mekanizması vardır.

Bunlardan ilki, iletim yoluyla meydana gelen yük ayrılmasının sonucu olarak yüklenen fırtına bulutu ~ 100 s'lik zaman diliminde meydana gelir. Bu durum, bulut içinde iki farklı yük merkezinin oluşmasına neden olur ve böylece statik elektrik alan (SE) bulut içinde üretilir.

İkincisi, elektrik akımlarındaki ani ve büyük değişimler tüm yönlerde EM alanların (EMP-Elektromanyetik Puls) yayınlanmasına neden olabilirler. Böyle EM alanlar bu tez çalışmasında temel alınan CG yıldırım boşalmasının dönüş darbesinden sonra meydana gelir.

Son olarak, dönüş darbesi aracılığıyla Yer'e akan sürekli akımlar $\sim 0.5-100$ ms zaman ölçeklerinde yükün yeniden yapılanmasına sebep olurlar ve bu hemen-hemen statik elektrik (QE-Quasi-Elektrik Alan) alanların oluşmasına sebebiyet verir (Barrington-Leigh, 2000).

Atmosferik iletkenlik, fırtına bulutlarında bu yük yapılandırmasından dolayı oluşan elektrik alanların üst yüksekliklere nüfuz edip edemeyeceğini belirler. Fırtına bulutlarının yapılandırmasının değişmesinden dolayı oluşan elektrik alanlar tropokürenin çok daha yukarısındaki yüksekliklere etki etmezler. Çünkü atmosferik iletkenlik bu alanları perdeler.

Bununla beraber, bulut içerisindeki yük kısmen nötrleştirildiğinde veya dönüş darbesi ve onları takip eden sürekli akımlar tarafından yeniden yapılandırıldığında, oluşan QE alanlar daha üst bölgelere nüfuz ederler. Bu yeniden yapılanma tropokürede elektrik alanların azalmasına neden olsa bile üst atmosferde elektrik alanda bir artışa sebep olur. Örneğin, büyük bir pozitif CG dönüş darbesi 1 ms'de Yer'e 100 Coulomb'dan daha fazla pozitif yük boşaltabilir. Bu olay fırtına bulutu içinde eş büyüklükte negatif yükün yer değiştirmesine eşittir. Bu yeni yük yapılanması eğer yük ~ 1 ms'den daha hızlı meydana gelirse elektrik alanların (QE) 85-90 km'ye kadar 10 ms'den daha az bir sürede meydana gelirse 70 km'ye kadar nüfuz etmesine olanak tanır. Hatta daha küçük zaman dilimlerinde meydana gelen EM dalgalar daha üst yüksekliklere kadar nüfuz edebilirler. Yukarıda ifade edildiği gibi yıldırımdan yayınlanan EMP büyük oranda D-bölgesinden yansıtılır. Fakat sonlu iletkenlikten dolayı bu alanların yansıma yüksekliğinin yukarısına nüfuz etmesi elektron yoğunluğunun ısınması ile sonuçlanır (Barrington-Leigh, 2000).

Burada önemli bir karmaşa, iletkenliğin kendisinin de uygulanan elektrik alan ile değişebilir olmasından kaynaklanmaktadır. Sadece elektronlardan dolayı iletkenlik

$$\sigma = |e|N_e\mu_e \quad (2.4)$$

ile ifade edilir. Burada elektronun mobilitesi

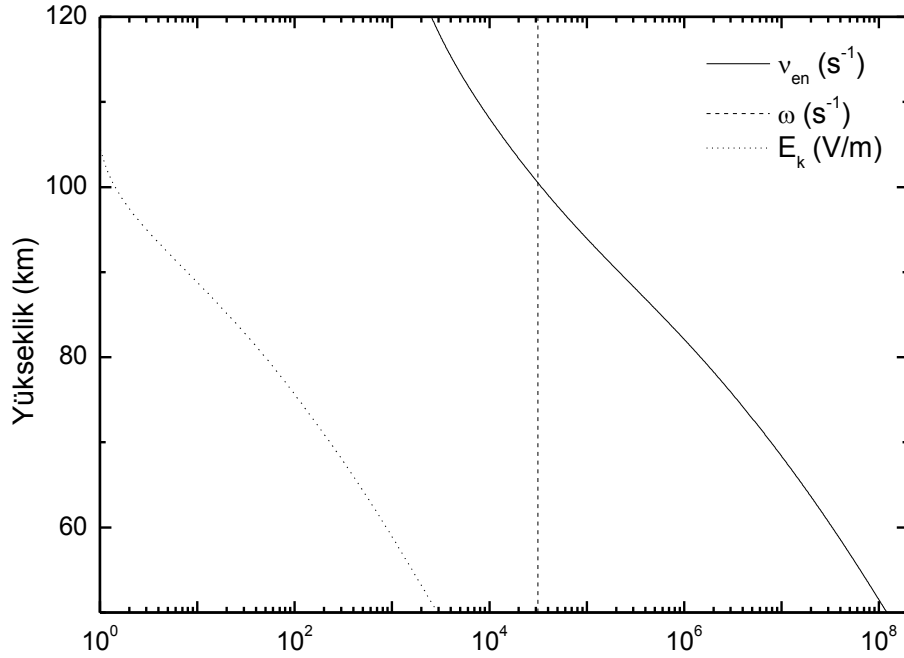
$$\mu_e = e v_{en}^{-1} m_e^{-1} \quad (2.5)$$

şeklinde elektrik alanın azalan bir fonksiyonudur. Elektrik alanın uygulanması elektronları ısıtır. Bu ısınma

$$E_k = \frac{N_T}{N_0} 3.2 \times 10^6 \sqrt{1 + \omega^2 / v_{en}^2} \quad (2.6)$$

şeklinde verilen uygun hava yarıma elektrik alan değeri için etkin çarpışma frekansını (v_{en}) artırır (Papadopoulos vd.,1993). Daha sonra bu çarpışma frekansının artan değeri elektron mobilitesinin ve böylece de iletkenliğin azalmasına sebep olur. Böylece geçici elektrik alanların daha üst yüksekliklere nüfuz etmesine olanak tanır (Barrington-Leigh, 2000). Şekil 2.1 burada ifade edilen parametrelerden 5 kHz olarak alınan VLF radyo

frekansının, elektron-nötr çarpışma frekansının ve hava yarıma elektrik alanının yükseklikle değişimini gösterir.



Şekil 2.1. Alt iyonküredeki hava yarıma elektrik alanı, yıldırım kaynaklı VLF radyo frekansının frekansının ve etkin elektron-nötr çarpışma frekansının yükseklikle değişimi

Ayrıca, hızlandırılmış elektronlar ile çarpışan nötrlerin iyonlaşması ve nötrlere elektron bağlanma frekansının artması sonucunda, elektrik alan elektron yoğunluğunda da değişimlere sebep olur. Yıldırım kaynaklı EMP elektrik alanı hava yarıma elektrik alanından büyük olursa elektron yoğunluğu artar ve iletkenliğin artmasına böylelikle ısınma etkisinin azalmasına yol açar.

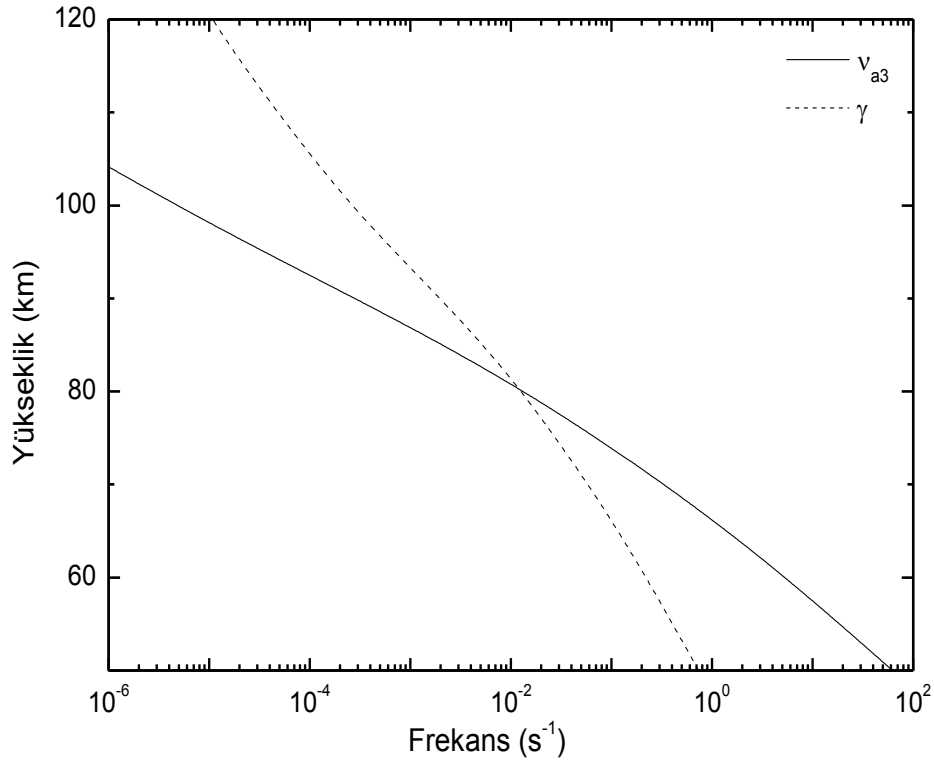
Nispeten yüksek elektrik alan etkisi altında iki-cisim bağlanma reaksiyonu serbest elektronların kaybı için baskın mekanizmadır ve aşağıdaki gibi verilir (Barrington-Leigh, 2000):



Ortam elektrik alan değerlerinde ise ya O₂ ve N₂'ye ya da iki tane O₂ molekülüne elektronların üç cisim bağlanması, baskın kayıp sürecidir ve



reaksiyonu ile verilir (Glukhov vd., 1992). Burada A bir molekül ve B bir molekül ya da atomdur. Bu süreç bağlanmanın sebep olduğu elektron kaybından dolayı negatif yüklerin mobilitesini ve böylece plazmanın iletkenliğini ani bir şekilde azaltır. Bu şekildeki üç cisim bağlanma süreci iyonkürede, gaz boşalmalarında ve plazmalarda meydana gelen olayları önemli derecede etkiler (Aleksandrov, 1988). Şekil 2.2 üç cisim bağlanma ve çarpışmalı ayrışma frekansının yükseklikle değişimini gösterir.



Şekil 2.2. Alt iyonküredeki elektron üç cisim bağlanma ve ayrışma frekanslarının yükseklikle değişimi (Glukhov vd., 1992; Rodriguez ve İnan, 1994).

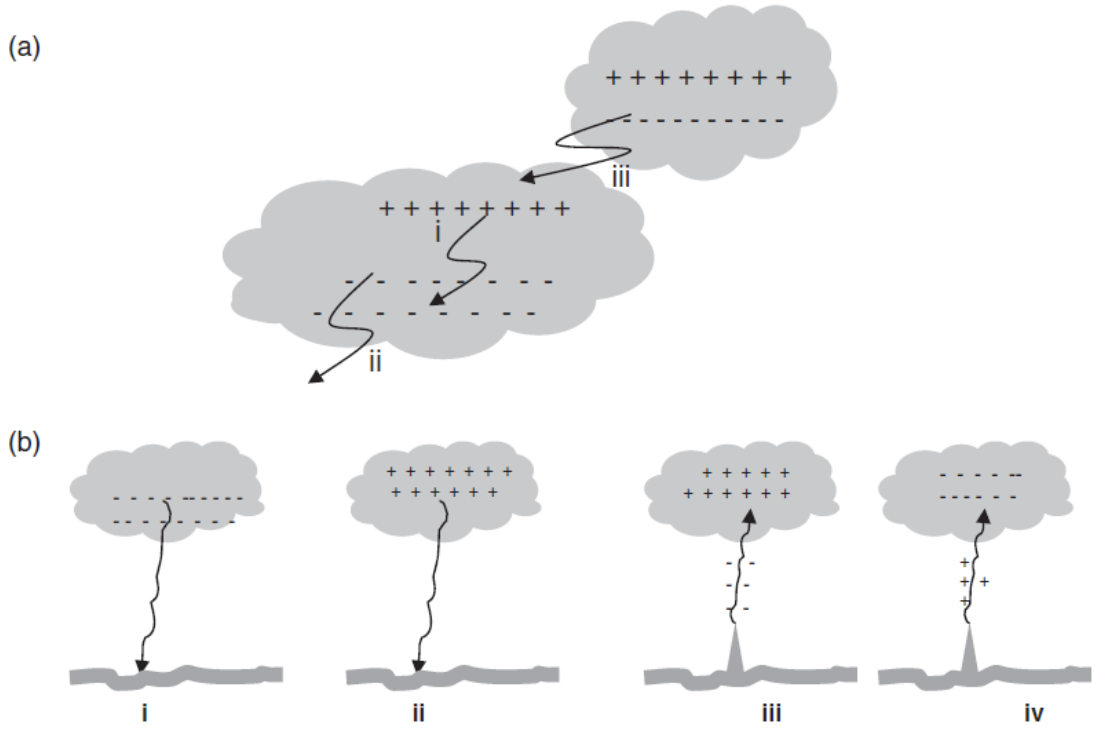
Ortamda herhangi bir tedirgin edici kuvvet olmadığı durumda yaklaşık 80 km yüksekliğe kadar bağlanma baskın iken, 80 km'nin yukarısında ayrışma baskındır. Alt iyonkürede sözü edilen elektron kayıp süreçlerinin yanı sıra yıldırım kaynaklı elektrik alanlardan sonra serbest elektronların artmasına sebep olan elektron ayrışma (γ) süreçleri de göz önüne alınmalıdır. İyonkürede ayrışma süreçleri Güneş'ten gelen ultraviyole (UV) ışınlarının etkisiyle oluşan “fotoayrışma”, moleküllerin birbirleri ile çarpışmalarından meydana gelen “çarpışmalı ayrışma” ve negatif moleküller ile azot ve oksijen gibi atomların birleşmesi sonucu oluşan “birleşmeli ayrışma” süreçleridir (Gurevich, 1978).

3. YILDIRIMLAR VE YILDIRIM KAYNAKLI ELEKTRİK ALANLAR

3.1. Yıldırımlar ve Oluşum Süreçleri

Yıldırım, atmosfer içerisinde yayılan geçici, yüksek akımlı elektrik boşalmasıdır. Bu boşalmanın oluşması için, bulut kümesi içerisinde bulunan zıt yüklerin meydana getirdiği elektriksel potansiyelin yük boşalmasına (havanın delinmesine) sebep olacak kadar büyük olması gerekir. Bu şekilde bir yük boşalmasını sağlayan bulutlar, genellikle fırtına bulutları olarak isimlendirilirler (Uman, 1969). Fırtına bulutları tarafından oluşturulan yıldırımlar temelde bulut-yer arası (CG) ve bulut-içi (IC-Intra-Cloud) olmak üzere ikiye ayrılır. Fakat bunların yanı sıra yıldırım, iki bulut arasında (CC- Cloud to Cloud) veya bulut-hava (CA-Cloud to Air) arasında da meydana gelebilir (Uman, 1969). Çeşitli uydulardan alınan verilere göre küresel olarak yaklaşık her bir saniyede 44 yıldırım boşalması meydana gelmektedir. Bunların üçte biri CG boşalmalarıdır (Thomas, 2005). Ayrıca, verilen herhangi bir anda aktif olan 2000 yıldırımlı fırtına vardır (Chambers, 1967). Bulut-yer arasında meydana gelen yıldırımın dönüş darbesinden yayınlanan EM güç, ortalama 20 GW'dır ve yaklaşık 100 μ s' de sonlanır (Taranenko, 1994).

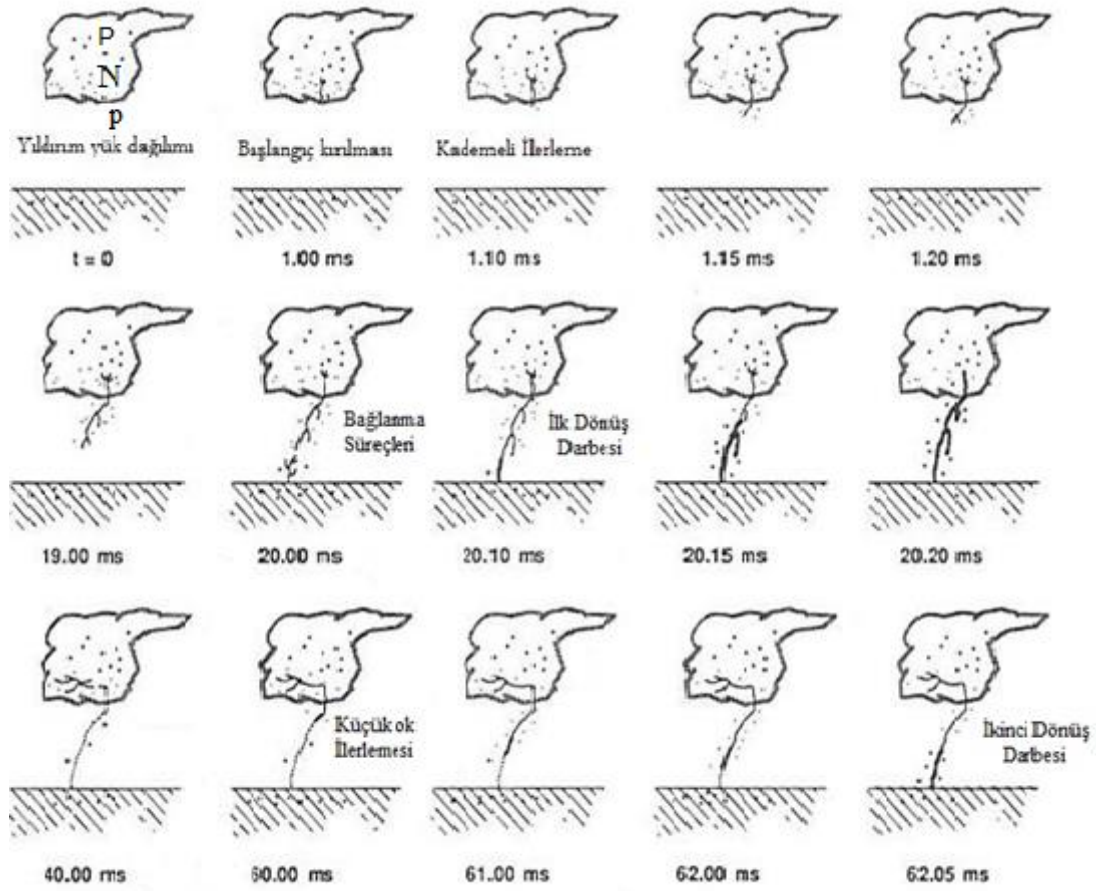
Bulut-yer arası boşalmalar, bulut-içi boşalmalardan daha etkili olduğu ve gözle daha kolay görüldüğü için, bilimsel araştırmacıların daha çok dikkatini çekmiştir. Bulut-yer arası boşalmalar taşıdıkları yükün kutbuna göre isimlendirilirler. Taşıdıkları yüklere göre, pozitif (+) CG veya negatif (-) CG olarak isimlendirilirler. Doğada, CG boşalmalarının yaklaşık % 90' ını oluşturan -CG boşalmaları daha yaygın oluşur (Rakov ve Uman, 2003). Yıldırım boşalmalarının farklı türleri Şekil 3.1a' da ve CG yıldırım boşalmasının başladığı noktaya ve taşıdığı yüke bağlı olarak da Şekil 3.1b'de gösterilmiştir. Bir CG boşalması Şekil 3.1b'de gösterildiği gibi dörde ayrılır. Bunlar aşağı yönlü - CG boşalması, aşağı yönlü +CG boşalması, yukarı yönlü -CG boşalması ve yukarı yönlü +CG boşalmasıdır (Cooray ve Fernando, 2010).



Şekil 0.1. (a) Bulut boşalmalarının türleri: (i) bulutiçi (IC); (ii) hava boşalmaları (CA); (iii) bulutlararası (CC). (b) CG boşalmalarının türleri: (i) aşağı yönlü -CG; (ii) aşağı yönlü +CG; (iii) yukarı yönlü -CG; (iv) yukarı yönlü +CG boşalmaları (Cooray ve Fernando, 2010).

Şekil 3.2’de CG yıldırım boşalmalarının meydana gelme aşamaları gösterilmiştir. Normal bir -CG boşalması, buluttan yere doğru ilerlemenin gelişimini tetikleyen ana negatif yük merkezinden bir “başlangıç kırılması” ile fırtına bulutu içinde başlar. Daha sonra negatif yükler “kademeli ilerleme” aşamasından geçerek bulut ile yer arasında iletken bir yol oluşturmak için yaklaşık 2×10^5 m/s lik bir hızla aşağı doğru yayılırlar (Rakov ve Uman, 2003). Normal atmosferik basınç ve sıcaklıkta havanın delinmesi için gerekli olan elektrik alanı yaklaşık 3×10^6 V/m’dir. Bu alan azalan basınç ile azalır (Cooray ve Fernando, 2010).

30 kA’lık bir tepe akımına neden olan bir kademeli ilerlemenin birim uzunluktaki yük yoğunluğu yaklaşık 0.001 Coulomb/m dir. Fırtına bulutu içerisinde ana pozitif (P), ana negatif (N) ve ikincil pozitif (p) yük kutupları bulunur. Kademeli ilerlemenin fırtına bulutunun içinde bulunan N ve p bölgeleri arasında yerel bir elektrik yarılmaları ile başladığı düşünülmektedir (Uman, 1969). Bu yarıma öncelikle fırtına bulutu içinde bulunan buz ve su parçacıklarına bağlanmış olan elektrik yüklerini hareketli hale getirecektir. Kademeli ilerleme yere doğru ilerlediği yolu üzerinde birkaç dal oluşmasına neden olabilir. Kademeli



Şekil 0.2. Yıldırım oluşum aşamalarının gösterimi (Uman, 1987).

ilerleme yere yaklaştıkça, yer seviyesindeki elektrik alan sürekli olarak artar. Kademeli ilerleme yaklaşık birkaç yüz metre veya daha düşük bir yüksekliğe indiği zaman, yerdeki elektrik alan elektrik boşalmalarının başladığı bir seviyeye ulaşır. Bu durumdaki oluşuma “bağlantı ilerlemesi” denir. Bağlantı ilerlemesi aşağıya gelen kademeli ilerlemeye yönelir. Normal olarak aşağı ve yukarı doğru yayılan ilerlemeler yerin onlarca metre yukarısında birleşirler ve böylece ilk “dönüş darbesi” başlatılır. Bu dönüş darbesi ortalama 20-40 kA’lık bir tepe akımı ile yaklaşık 70 μ s içinde ilerleme kanalını nötrleştirir. Dönüş darbesi ile ilişkili akım birkaç yüz mikro saniyede sonlanma eğiliminde olduğu halde, bazı durumlarda dönüş darbesi akımı bu süre içinde sonlanmayabilir ve onlarca milisaniyeden yüzlerce milisaniyeye kadar düşük bir seviyede akmaya devam edebilir. Böyle uzun süreli akımlara “sürekli akımlar” denir. İlk dönüş darbesinden sonra yıldırım sonlanabilir, ancak ilk ilerleme kanalını takip eden onlarca ms sonra meydana gelen yaklaşık 10^7 m/s’lik daha büyük bir hızla “ok ilerlemesi” denen ikinci bir ilerleme oluşabilir. Bu ilerleme yere

yaklařtıķķa 10-15 kA'lık maksimum değerli akımlara sahip olabilen ikinci bir dönüş darbesi meydana getirir. Bu süreç devam edebilir ve çok sayıda birbirini takip eden darbelerle sebep olabilir (Cooray ve Fernando, 2010).

+CG boşalmaları ortalama olarak –CG boşalmaları ile aynı tepe akımına sahip olmalarına rağmen birçok farklı özellikleri de vardır (Rakov ve Uman, 2003). +CG boşalmalar, genellikle uzun süreli (10-100 ms) akımlardan ve bulut-içi yük aktivitesini takip eden dönüş darbelerinden oluşur. Ayrıca, +CG boşalmaları genellikle dağıtılmış yükün büyük miktarlarda depolanma ihtimaline olanak tanıyan onlarca kilometre boyutlu uzun yatay kanallardan oluşur. Sonuç olarak, ilk +CG darbesi için pozitif ilerleme, ya ilk – CG darbeleri gibi kademeli olarak ya da –CG ok ilerlemesi gibi sürekli olarak yayılabilir.

Yerküre atmosferinde yıldırımın en yaygın türü olan bulut-içi boşalmalar bulut-yer arasında oluşan boşalmalara benzer bir yol ile meydana gelir. Bulut içi boşalmalar elektrik alanların en büyük olduğu negatif yük merkezinin alt ve üst sınırlarında başlar (Rakov ve Uman, 2003). Bu başlama buluttaki negatif ve pozitif yük bölgeleri arasında köprü kuran negatif bir ilerleme ile özdeşleşmiş aktif bir aşama ile devam eder. Bu aktif aşama boyunca negatif ilerleme 10-100 s süren akımlar ile ve yaklaşık 10^5 m/s'lik hızla yayılan bir CG boşalmasıdaki kademeli ilerlemeye benzerdir ve elektrik alanda meydana gelen değişimlerle ilişkilidir. Bu aktif aşamanın sonunda negatif ve pozitif bölgeler arasında kopukluk gözlenir. Bu süreci takip eden son aşama, küçük elektrik alan değişimleri ve düşük akımlar ile tanımlanır. Bu aşama muhtemelen bulut içinde uzak yerlerden boşalma başlangıç noktasını yeniden doldurmak için negatif yüke fırsat verir (Thomas, 2005). Bu şekilde meydana gelen yük boşalmaları alt iyonkürede ısınma ve iyonlaşmaya sebep olurlar.

3.2. Yıldırım Kaynaklı Elektrik Alanlar

Günümüze kadar yapılan çalışmalardan, ısınma ve iyonlaşmanın hesaplanması için temel teşkil eden yıldırım kaynaklı alanların üç farklı türünün olduğu bilinmektedir. İlki fırtına bulutunun oluşumu süresince yükün yavaşça birikmesi neticesinde fırtına bulutunun içerisinde ve hemen yukarısında oluşan ES alanlar. İkincisi bir CG boşalmasının dönüş darbesi tarafından yayınlanan EMP alanlarıdır. Sonuncusu ise yıldırım boşalmasının tüm süreci boyunca akımlar tarafından yükün yeniden düzenlenmesi sonucunda meydana gelen

QE alanlardır. Bu alanların tümünün elektriksel enerjisi ortam elektronlarına aktarılabilir ve böylece uyarmaya, iyonlaşmaya ve hava-yarılımları sonucunda oluşan “geçici ışık saçan olaylar” (TLEs-Transient Luminous Events) olarak anılan optik yayımlara neden olurlar. Bu süreçler birkaç eV’luk enerjilere erişen termal elektronlar ve/veya MeV seviyesinde yüksek enerjili kaçak elektronlar (runaway electrons) ile ilişkilidir (Mika, 2007).

Buluttaki başlangıç yükleri saniyeler veya daha uzun zaman ölçeklerinde toplanırlar. Bundan dolayı, sadece bulut içinde veya yakınında güçlü alanlar var olduğu için atmosferik iletkenlik bu yükleri perdeler. EMP 0,1 ms den daha kısa bir zaman ölçeğine sahiptir ve iletkenlik EMP alanları iyonküreye ulaşınca kadar bu alanları etkilemek için yeterli büyüklükte değildir. QE alanlar ms zaman ölçeğinde değişir. Böylece bu QE alanlar atmosfer tarafından zayıf bir şekilde perdelenir (Rowland, 1998).

3.2.1. EMP Kaynaklı Elektrik Alanlar

Bir yıldırım boşalmasında maksimum akım normal olarak $\sim 50 \mu s$ ’den $\sim 100 \mu s$ ’ye kadar süren dönüş darbesi süresince akar (Uman, 2001). +CG boşalmalarının yaklaşık %5’i 250 kA’ den daha güçlü akımlar taşır. Hızlıca değişen dönüş darbesi akımı, tepe değeri akımına orantılı bir güce sahip ve onun spektral kapsamı 10 kHz’den aşağıda VLF bölgesinde olan bir EM darbe yayınlar. Yukarıda ifade edildiği gibi EMP süresi dielektrik gevşeme zamanından kısa olduğu için EMP alanları atmosferik iletkenlik tarafından perdelenmezler. Böylece bu alanlar alt iyonkürrede serbest elektronları hızlandırarak ve elektronlara enerji aktararak nötrler ile çarpışmalar aracılığıyla optik yayımlara ve elektron sıcaklığında ve yoğunluğunda değişimlere neden olurlar (Mika, 2007).

Yıldırım etkili EMP elektrik alanlarının önemli özelliklerinden bazıları Fernsler ve Rowland (1996) tarafından matematiksel olarak formüle edilmiştir. Bir yıldırım dönüş darbesi sabit bir çizgisel yük ve v hızında dikey z -ekseni boyunca akan akım olarak modellenmiştir (silindirik koordinatlar kullanılarak):

$$i(\rho, z, t) = vQ_z(\rho, z, t) = i_0\delta(\rho)H(z)H\left(t - \frac{z}{v}\right). \quad (3.1)$$

Burada i dönüş darbesinin akımı, Q_z tedirgin olmuş yük miktarı, δ Dirac delta fonksiyonu (sıfır yarıçapta sonsuz ince bir kanaldaki akımın yerini tayin etmek için dâhil edilmiştir) ve H Heaviside fonksiyonudur ve t zamandır. Yüğü korumak için ek bir yük orjine yerleştirilmiştir:

$$Q(\rho, z, t) = -i_0 H(t) \delta(\rho) \delta(z). \quad (3.2)$$

Yıldırım dönüş darbesi ışık hızının yarısına yakın bir hızda yayılırsa, yani $v = c/2$, o zaman yıldırımın 10 km uzunluğundaki kanalı geçme süresi 70 μs olacaktır. Bu süre dönüş darbesi tarafından yayınlanan EM darbenin süresini tanımlayacaktır.

(3.1) ve (3.2) denklemleri vektör ve skaler potansiyeller için çözülebilir. Fırtına bulutundan yeterince uzak mesafelerde (uzak alan) enine olan elektrik alan küresel koordinatlar kullanılarak (Le Vine and Willett, 1992);

$$E_\theta = \frac{B_0 i_0}{r c} \frac{\sin \theta}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} \quad (3.3)$$

şeklinde ifade edilir. Burada akımın zamanla değişimi sabit kabul edilmiştir. Böylece elektrik alan, puls süresince sabit genliğe sahip olur. Alan artık standart bir dipolünkine eşit değildir. Aynı zamanda görüntü akımları ve yükleri de dâhil edilmelidir. Yer mükemmel bir iletken olarak kabul edildiğinde bir $-CG$ boşalması için dönüş darbesi yukarı doğru olur. Bu durumda görüntü toprak alanı, denklem (3.3)'te $I_0 \rightarrow -I_0$ ve $\theta \rightarrow \theta - \pi$ değerleri alınarak elde edilir. Kaynak ve görüntü alanlarının toplamlarından toplam ışım alanı

$$E_\theta = \frac{2B_0 i_0 \sin \theta}{r c \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \cos^2 \theta\right)} \quad (3.4)$$

Olarak verilir elde edilir (Rowland, 1998). Burada $r = z/\cos \theta$ alındığında

$$E_\theta = \frac{B_0 i_0 \sin 2\theta}{z c \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \cos^2 \theta\right)} \quad (3.5)$$

ifadesi elde edilir. Elektrik alan, h yüksekliğine kadar

$$\theta_{\max} = \frac{1}{2} \cos^{-1} \left[\frac{(v/c)^2}{2-(v/c)^2} \right] \quad (3.6)$$

değerini aldığında, tepe değerine ulaşır. Eğer $v = 0$ ise normal bir dipol için $\theta = 45^\circ$ olur. v arttıkça θ azalacaktır. Örneğin, $\frac{v}{c} = 0.7$ olursa $\theta \sim 36^\circ$ olur. Böylece verilen dikey bir yıldırım boşalması için EMP yıldırım kanalı etrafında bulunan bir dairede maksimum olacaktır. Dairenin yarıçapı kabaca h 'a eşit olacaktır. Oysa relativistik etkiler yarıçapı azaltmaya eğimli olacaktır. Maksimum elektrik alan

$$E_{\max}(h) = 30 \frac{(v/c) \gamma i_0}{h} \quad (3.7)$$

olacaktır. Burada E V/m, i_0 kA ve h km cinsindendir (Rowland, 1998).

3.2.2. QE Elektrik Alanlar

Bir dielektrik olarak alınabilen atmosfer ortamında elektrik alanın gevşemesi, dielektrik gevşeme süresi (τ_r) $\tau_r = \epsilon_0/\sigma(z)$ ifadesi ile karakterize edilir. Burada ϵ_0 boş uzayın dielektrik sabiti ve $\sigma(z)$ yükseklikle artan iletkenliktir. Normal gevşeme süreleri 60 km'de ~ 0.1 s, 70 km de ~ 4 ms 80 km'de ~ 15 μ s ve 90 km'de ~ 0.2 μ s olur. Bir başka deyişle fırtına bulutunda yük birikme süresi onlarca saniyelik zaman ölçeklerinde meydana gelir. Bu süreler üst atmosferdeki elektrik alan gevşeme süreleri ile karşılaştırıldığında büyüktür. Böylece ortam uzay yükünün yeniden düzenlenmesi, fırtına bulutu SE alanlarının etkilerinden daha üst yüksekliklerde perdelenebilir. Güçlü alanlar sadece bulutun üste yakın kısmında veya bulutun aşağısında ve içinde var olabilirler (Fernsler ve Rowland, 1996).

Işık sütunlarının meydana geldiği fırtına bulutunun yukarısındaki üst atmosferde güçlü QE alan, normal olarak bir CG yıldırım boşalması bulut içindeki yük merkezini aniden nötrleştirdiği zaman bulutun yukarısında zıt işaretli kalan yükten daha üst yüksekliklerde oluşur (Pasko vd., 1997). Bu türün en büyük elektrik alanları +CG boşalması tarafından üretilir. Her bir yükseklikte yaklaşık olarak yerel gevşeme zamanına eşit bir zaman için devam eden bu geçici alanlar ortam elektronlarını ısıtabilirler. Aynı zamanda, bu alanlar muhtemelen üst atmosferde optik emisyonlara, hava yarılmasına ve elektron yoğunluğu değişimlerine yol açabilirler. Boşalmanın ardından atmosferdeki yükün

yeniden düzenlenmesi üst yüksekliklerdeki elektrik alanları zayıflatmaya başlar. Bu QE alan mekanizması, yaygın olarak ışık sütunu üretimi için en muhtemel mekanizma olarak düşünülür (Mika, 2007).

Yıldırım dönüş darbesi ile ilişkili akım, ana fırtına bulutu içinde veya bulut ve toprak arasında yük farklılıkları oluşturarak artacaktır. Eğer akım yeterince uzun süre devam ederse ve yeterince büyük olursa QE alan EMP den kaynaklanan alandan daha güçlü olur. Perdelemenin yokluğunda dikey bir akımdan gelen QE alan

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi \quad (3.8)$$

olur. Burada koyu harf niceliğin vektör olduğunu ifade eder. Φ elektriksel potansiyeli

$$\Phi = i_0 t \left[\frac{1}{\sqrt{\rho^2 + (z - z_d)^2}} + \frac{1}{\rho^2 + z^2} \right] \quad (3.9)$$

ile verilir. Burada z_d boşalmanın uzunluğudur ve $z_d \ll r = \sqrt{\rho^2 + z^2}$, $Q(t) = i_0 t$ olarak alınırsa, denklem (3.9)

$$\Phi = \frac{Q(t)z_d}{r^3} \cos\theta \quad (3.10)$$

ifadesine indirgenir. EM alanın uzak alan çözümleri

$$E_\rho = \frac{2Q(t)z_d}{r^3} \cos\theta \quad (3.11)$$

ve

$$E_\theta = \frac{Q(t)z_d}{r^3} \sin\theta \quad (3.12)$$

olur.

Dikey bir boşalma için EMP, QE alanının en güçlü olduğu bir boşalmanın yukarısında en zayıftır. Yer'in yük katkısı bu alan şiddetini ikiye katlar. Böylece EMP için

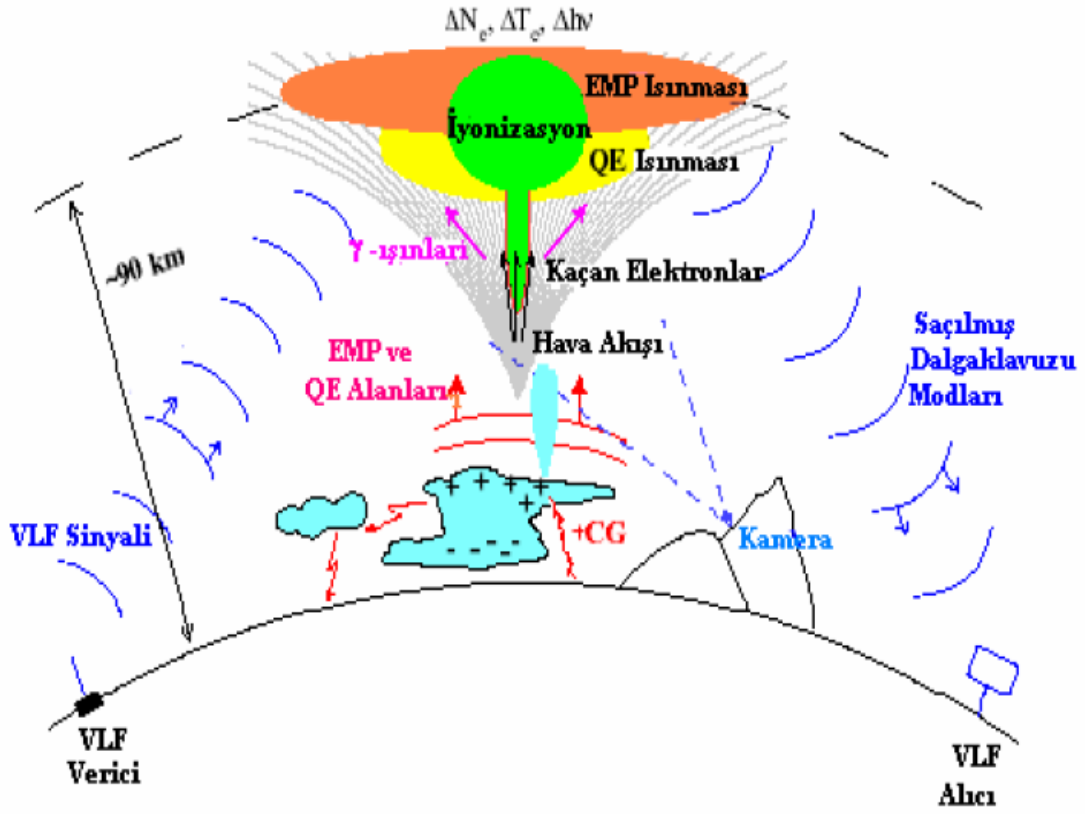
alan şiddeti v_{i0}/c ile tanımlanır. Oysa QE alan için yük momenti (M_{QV}) olarak bilinen $Q \cdot z_d$ ile tanımlanır. Bu son terim TLEs incelemesinde çok önemlidir (Mika, 2007).

-CG boşalması ile yıldırım buluttan toprağa etkili bir şekilde negatif yük taşır ve pozitif yük rezervi yukarı doğru bir elektrik alan üreterek zamanla bulutun yukarısındaki elektrik alan üzerinde daha büyük bir etkiye sahip olacaktır. Bu alan atmosferde ortam elektronlarının buluta doğru hareket etmesine sebep olur. +CG çakması durumunda negatif yük rezervi mantık olarak perdelenmemiş olur ve dikey olarak yukarıyı işaret eden yük rezervinin yukarısında geçici bir elektrik alan oluşturur. Bu durumda atmosferik elektronlar yukarı doğru hızlandırılacaklardır. Yıldırım boşalmasından kaynaklanan hem EMP hem de QE alanlar TLEs oluşumunda önemlidirler. Dairesel ışık sütunlarının üretiminden öncelikli olarak EMP sorumludur ve QE alanlar ışık sütunları ve ışık yayılımları için ana faktör olurlar (Mika, 2007).

Atmosferdeki gaz boşalmaları incelendiği zaman, kV/m birimindeki $E_k(z) = 3200 N_T(z)/N_0$ hava-yarılma elektrik alanı önemli bir değişkendir. Burada, $N_T(z)$, z yüksekliğindeki ve N_0 onun taban durumundaki nötr yoğunluk değeridir (Pasko vd., 1997). E_k yarılma alanı nötr yoğunluğa bağlı olarak yükseklik ile üstel bir şekilde azalır. Ayrıca, moleküler oksijene elektronların ayrışmalı bağlanma oranı (v_a) ve iyonlaşma oranı (v_i) her ikisi de elektrik alan kuvvetine bağlıdır. Bu kuvvet $E < E_k$ ve $v_i < v_a$ için net elektron yoğunluk azalmalarına sebep olan moleküler oksijene elektron bağlanmasının baskın olmasına, $E > E_k$ için $v_i > v_a$ olur ise tersine bir işlem gerçekleşmesine yol açar. Böylece elektron yoğunluk artışları sonucunda iyonlaşma baskın olur (Mika, 2007).

3.2.3. EMP ve QE Alanların Alt İyonküre Üzerindeki Etkileri

Elektrik alan, elektronu hızlandırarak nötr bileşenler ile çarpışmalara sebep olur ve bu yolla üst atmosfere bağlanır. Düşük enerjilerde elektron-nötr çarpışmaları esnektir. Birkaç eV'luk enerjiye sahip elektronlar nötr bileşenler üzerinde titreşim ve dönme uyarmalarına sebep olabilirler. Serbest elektron daha yüksek hızlara ivmelendirildiği zaman sahip olduğu kinetik enerji, elektron geçişlerine ve böylece ışık yayılımlarına ve daha yüksek enerjilerde sınır elektronların iyonlaşmasına yol açabilir. Bu şekilde hem EMP hem de QE alanların alt iyonküre ile etkileşmesi Şekil 3.3'te verilmiştir.



Şekil 0.3. Alt İyonküre elektron yoğunluğu ve VLF radyo dalgı yayılımı üzerinde etkili olan yıldırım kaynaklı süreçlerin gösterimi (Canyılmaz, 2008).

Eğer elektrik alan, elektronun çarpışmalar arasında kaybettiğinden daha fazla enerji kazandıracak kadar güçlü olursa, o zaman elektronun hızı artmaya devam eder ve “kaçış” meydana gelir (Mika,2007). Bu elektrik alanlar alt iyonkürede iyonlaşma, ısınma, bağlanma, ayrışma ve uyarılmalara sebep olurlar. Isınmayı açıklamak için iki süreç önerilmiştir. Her ikisi de hızlandırılmış elektronlar ve nötrler arasındaki çarpışmaları kapsar. Birinci süreç, enerjisi birkaç eV seviyesinde olan düşük enerjili elektronların enerjisini, nötrleri çarpışma yoluyla uyarmak veya iyonlaştırmak için gerekli enerjilere yükseltmektir. İkinci süreç, kaçak sistemindeki yüksek enerjili elektronlar ile başlar ve elektronu MeV’luk enerjilere hızlandırır. Eğer bu elektron bir nötr ile çarpışarak daha fazla kaçak elektron üretirse, o zaman ortamdaki kaçakların sayısı artabilir ve yarıma mümkün hale gelir (Rowland, 1998).

Fırtına bulutları alt atmosferden iyonküreye enerji aktarımında önemli bir rol oynar. Her bir bulut-yer arası yıldırım boşalması birkaç milisaniye süresince ~300 Coulomb mertebesinde bir yükü yere aktarır (Volland, 1984). Bu yük milisaniye zaman dilimlerinde

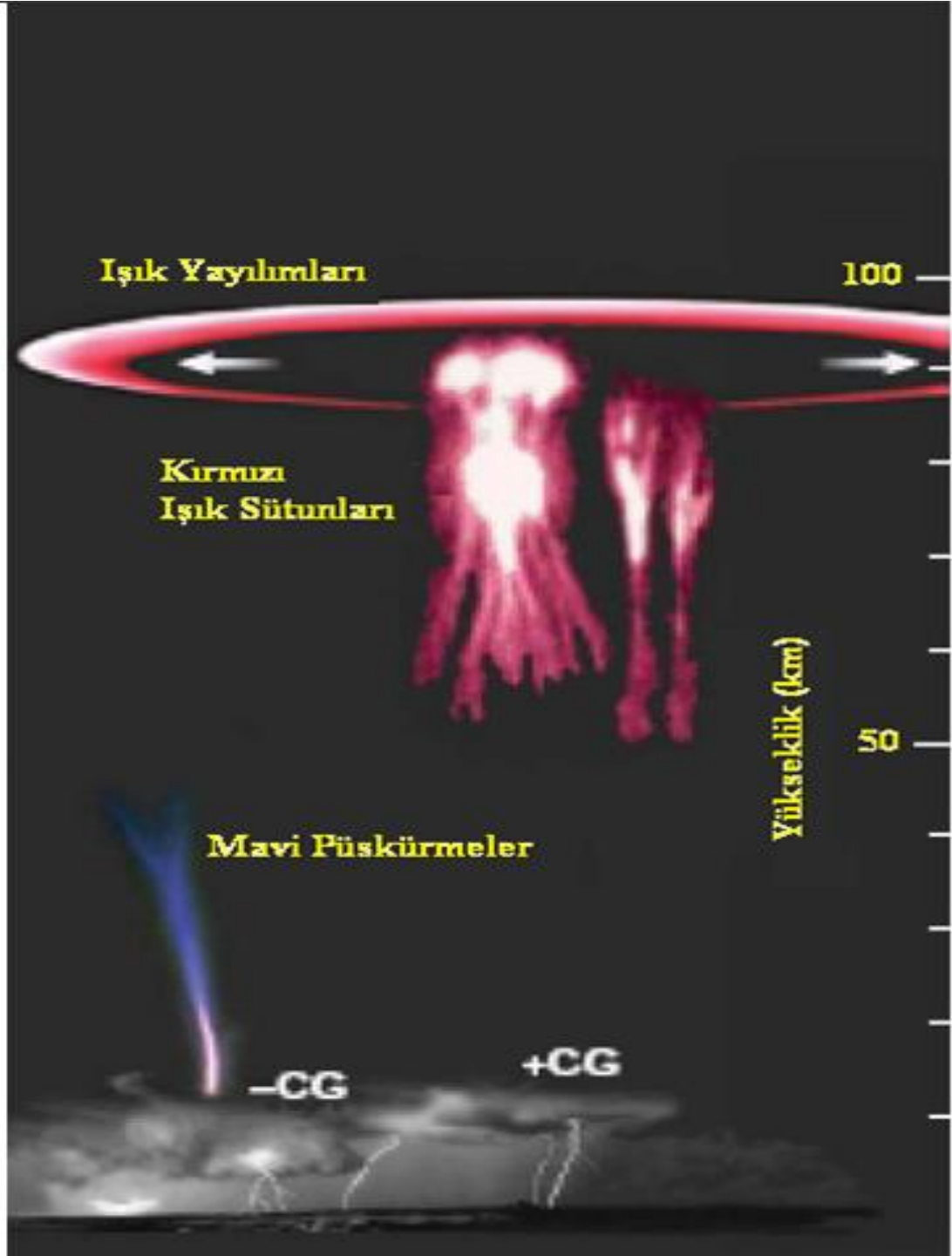
mezoküre ve alt iyonkürede büyük QE alanların oluşumuna yol açar. Yıldırım akımı tarafından üretilen ~ 20 GW'lık güçlü yoğun EMP ile birlikte bu alanlar ortam elektronlarının ısınmasından, iyonlaşmasından ve optik yayılım üreten kaçak elektronlarının hızlandırılmasından dolayı alt iyonkürede önemli tedirginliklere neden olurlar (Bychkov vd., 2010; İnan vd., 1996; Pasko, 1996, Roussel-Dupre vd., 1994). Bu elektrik alanlar yaklaşık yirmi yıldan beri üzerinde yoğun çalışmaların yapıldığı TLEs olarak anılan ve iyonkürenin alt kısmını içine alan mezoküre-alt-termoküre (MLT-Mezosphere-Lower Thermosphere) bölgesinde meydana gelen optik yayılımlara sebep olurlar. Bunlar Şekil 3.4'te gösterildiği gibi ışık sütunları (sprites), ışık yayılımları (elves), püskürmeler (jets), dairesel ışık kuşaklarıdır (halos).

Işık sütunları yoğun bir yıldırım boşalmasını takip eden gök gürültülü fırtınaların yukarısında üst atmosferde $\sim 60-95$ km'ye kadar değişen yüksekliklerde meydana gelen, 100 km çapa kadar yanal alanlara 30 km ye kadar dikey alanlara sahip olur. Bu olay $\sim 10-100$ ms zaman aralığında aşağı ve yukarı doğru $\sim 10^7$ m/s lik bir hızla yayılan bir elektrik olayıdır (Allgood, 2008). Bu olay mezokürede bir optik parlama olarak görünür. Işık sütunları çoğunlukla +CG darbesinden kaynaklanır (Stanley vd., 2000; Williams, 2001). Aynı zamanda bazı ışık sütunu gözlemleri onların -CG darbeleriyle de bağlantılı olduğunu göstermiştir (Barrington-Leigh ve Inan, 1999). Işık sütunları CG darbeleri tarafından üretilen büyük QE alanlar aracılığıyla meydana getirilirler (Iwasaki vd., 2001). Işık sütunları nitrojenin iyonlaşmasından dolayı üst kısmında kırmızı renkte (ilk pozitif emisyon) ve alt kısmında mavi renkte olma eğilimindedir. Simülasyon çalışmaları ışık sütunlarının gelişimine izin veren koşulların, sadece gece meydana geldiğini göstermiştir (Allgood, 2008).

TLEs' lerin diğer türü disk olarak tanımlanan ışık yayılımlarıdır. Bunlar 200-260 km yanal uzantıları ile 75-105 km arasında değişen yüksekliklerde görünür. Bu ışık yayılımlarının EMP alanlarından dolayı ortam elektronlarının ısınması vasıtasıyla üretilmiş olduğuna inanılır. Bu optik olay yıldırım boşalmasından sonra $\sim 100-200$ μ s içinde başlama eğiliminde olup, sadece ~ 1 ms veya daha az bir sürede sonlanır (Allgood, 2008; Barrington-Leigh ve Inan, 1999).

TLEs'lerin üçüncü farklı türü “mavi koniksel küre” olarak tanımlanan mavi püskürmelerdir. Işık sütunlarına zıt olarak, bu olaylar daha düşük hızlarda fırtına

bulutlarından yukarı doğru yayılır (Pasko, 2003). Mavi püskürmelerin yanal uzantılarının 35-40 km arasında değiştiği görülür (Pasko, 2003; Pasko ve Stenbaek-Nielsen, 2002).



Şekil 0.4. Işık sütunları, püskürmeler ve ışık yayılımlarının genel gösterimi (Canyılmaz, 2008).

Aynı zamanda ~40 km çaplı ve ~90 km’lik yüksekliklerde değişen devasa püskürmeler de keşfedilmiştir (Allgood, 2008).

TLE'lerin en son türü, aslında ışık yayılımları ile karıştırılabilen, dairesel ışık kuşakları olarak bilinir. Bunların, ışık yayılımlarının üretimi ile ilişkili olan EMP alanları ile değil QE alanları tarafından üretilmiş olduğu görülür. Işık sütunu dairesel ışık kuşakları, ışık kuşaklarının oluşumundan önce meydana gelir ve ışık sütunlarının dikey uzantısında bir parıltı olarak görülür. Dairesel ışık kuşakları 100 km çaptan daha az yanal uzantılara sahip olabilir ve sadece ~1 ms lik bir ömre sahiptir (Allgood, 2008; Bering vd., 2002).

Yukarıda sözü edilen olayların mevcut üretim modelleri yıldırım boşalmalarının sebep olduğu EMP veya QE fırtına bulutu elektrik alanları tarafından ortamdaki elektronlarının ısıtılmasına ve kaçak elektron hızlanma süreçlerine dayalıdır (Inan vd., 1991; Pasko vd., 1996; Pasko vd., 1997; Rodriguez vd., 1992, Roussel-Dupré ve Gurevich, 1996; Rowland vd., 1995; Taranenko vd., 1993a,b).

Yıldırım boşalmalarının yoğun bir şekilde oluşturduğu ısıklı modu dalgalar, Yer'in radyasyon kuşağında bulunan yüksek enerjili elektronları tuzaklayarak atmosfere elektron yağışını sağlar. Bu şekilde meydana gelen plazma homojensizlikleri iyonküredeki yıldırım-etkili tedirginliklerin diğer sınıfını gösterir ve yıldırım etkili elektron yağışı (LEP- **L**ightning induced **E**lectron **P**recipitation) olayları olarak isimlendirilir (Bychkov vd., 2010). Bu sınıfın tropoküre-manyetoküre ilişkisini çoğu kez yer temelli gözlemler, balon ölçümleri, roket deneyleri ve uydu gözlemleri doğrulamıştır. Teorik olarak, eğim-açısı saçılmasının ve manyetoküredeki tuzaklanmış ısıklı dalgaları tarafından radyasyon kuşağından parçacık yağışının mekanizması da iyice araştırılmıştır (Bychkov vd., 2010; Chang ve Inan, 1985). LEP olayları ile yıldırımlar arasındaki ilişki ve LEP olaylarının geçici karakteristiklerinin belirlenerek bu karakteristiklerin kendi aralarında herhangi bir ilişkinin olup olmadığı ayrıca araştırılmıştır. Buna ek olarak LEP olayları ile jeomanyetik indeksler arasındaki ilişki de incelenmiştir (Canyılmaz, 2008).

4. YILDIRIM KAYNAKLI ELEKTROMANYETİK DALGALARIN ALT İYONKÜREDE YAYILIMI

Elektromanyetik dalgalar elektrik ve manyetik alan bileşenlerine sahip olan ve ışık hızı ile yayılan enine dalgalardır. Dalgaların titreşen elektrik ve manyetik alan vektörleri dalganın yayılma doğrultusuna diktir. Elektromanyetik frekans spektrumu geniş bir aralığı kapsar. Bu spektrum içerisinde yıldırım dönüş darbesinden yayınlanan VLF bandındaki elektromanyetik dalgalar da bulunur. Bu dalgaların yayılması Denklem (4.1)-(4.4)'de verilen Maxwell denklemleri ile temsil edilir:

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (4.1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4.2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (4.3)$$

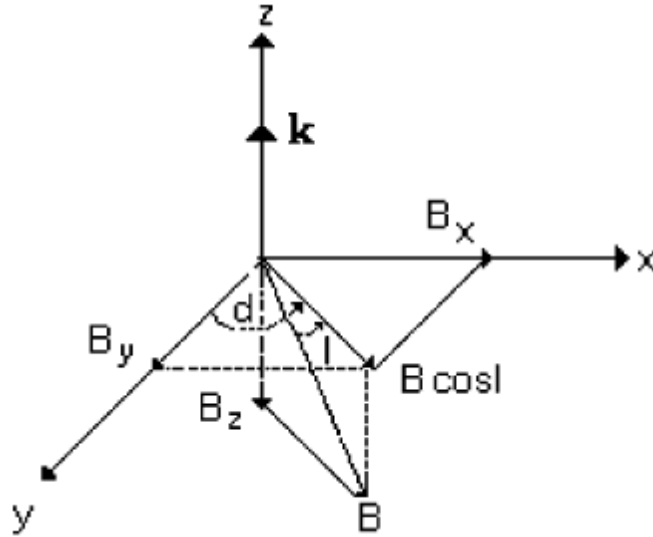
$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (4.4)$$

Burada $\mathbf{E}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{J}$, ϵ_0 ve μ_0 sırasıyla dalganın elektrik alanını, Yer'in manyetik alanını, akım yoğunluğunu, boşluğun elektriksel ve manyetik geçirgenliğini gösterir.

Yıldırım, doğal bir EM dalga üretme kaynağıdır ve ışımasının güç spektrum yoğunluğunun çoğu ELF ve VLF bantlarında bulunur. Yer ve iyonkürenin alt sınırı arasında oluştuğu kabul edilen dalga kılavuzu içinde, yıldırımın sebep olduğu ELF/VLF dalgaları ortalama 1-10 ms süre ile yayılır. Yıldırımın sebep olduğu bu dalga katari “sferik” veya “atmosferik” olarak adlandırılır. Yer-iyonküre dalga kılavuzu içinde etkili bir şekilde yayılan atmosferik VLF ışıması yıldırım dönüş darbesi akımının dikey bileşeni tarafından kontrol edilir. Böylece gözlenen çoğu atmosferiğin CG yıldırım boşalmaları ile üretildiği düşünülür. Güçlü bir yıldırım boşalması için dikey elektrik alan, boşalmanın gerçekleştiği yerin 1000 km yukarısında bile 1 V/m ye kadar büyük değerlere sahip olabilir ve atmosferikler birkaç yüz kilometre uzaklıktan algılanabilirler (McCormick, 2010).

Yıldırımların sebep olduğu ELF/VLF bandındaki EMP alanları alt iyonküre ile etkileşerek ortamın ısıtılmasını ve ortamdaki nötr bileşenlerin iyonlaştırılmasını sağlar. Alt iyonküre nötr yoğunluğun en yüksek olduğu iyonküre tabakasıdır. Bu bölgede nötr bileşenlere ilaveten çeşitli iyonlaştırıcı kaynaklara bağlı olarak serbest elektronlar ve iyonlar da mevcuttur. Bu kaynaklardan biri de yerküre üzerinde saniyede ortalama 44 defa meydana gelen yıldırım boşalmalarıdır. Yıldırımdan yayınlanan EMP alanları dönüş darbesinden dışarı doğru radyal olarak yayılır. EMP alt iyonküreye girdiğinde yayıldığı ortam boş uzaya göre daha fazla çarpışmaların olduğu manyetize bir plazma ortamıdır. Alt iyonküredeki yayılım, alt atmosferdeki yayılmaya ek olarak dalga Emilimi ve yansıma olaylarından dolayı daha karmaşıktır (Thomas, 2005).

Bu konu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalarda Yer'in manyetik alanının etkisi ya ihmal edilmiştir ya da manyetik alan tek bir bileşenli kabul edilmiştir (İnan vd., 1991; Rodriguez vd., 1992). Bu çalışmada Yer'in manyetik alanının gerçek geometrisi için yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının alt iyonküre ile etkileşmesi incelenmiştir. Bu amaçla Yer'in manyetik alanının gerçek geometrisi Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Yer'in manyetik alanının (**B**) ve dalganın yayılma doğrultusunun (**k**) geometrisi (Aydoğdu ve Özcan, 2000).

Bir EMP kaynaklı VLF dalgası alt iyonkürede yayılırken davranışındaki değişim boş uzay geçirgenliğinin (bir skaler) plazma geçirgenliğine (bir vektör) dönüşümü ve (4.1)-(4.4) Maxwell denklemleri ile hesaplanır (Yeşil ve Güzel, 2003).

Plazma geçirgenliğini elde etmek amacıyla manyetize olmuş soğuk ve çarpışmalı elektron plazması yaklaşımını kabul edildi (iyonların etkileri büyük kütlelerinden dolayı ihmal edildi). Lorentz denklemi elektrik ve manyetik alanların bir fonksiyonu olarak yükün akışını tanımlar ve az iyonlaşmış bir ortam için

$$m_e \frac{d\mathbf{V}_e}{dt} = -e(\mathbf{E} + \mathbf{V}_e \times (\mathbf{B} + \mathbf{B}_1)) - m_e \mathbf{V}_e v_{en} \quad (4.5)$$

şeklinde tanımlanır. Burada m_e elektronun kütlesi, e elektronun yükü, $\mathbf{E}$ dalganın elektrik alanı, $\mathbf{B}$ Yer'in manyetik alanı, $\mathbf{B}_1$ dalganın manyetik alanı, $\mathbf{V}_e$ elektronun hızı, v_{en} ise elektron-nötr çarpışma frekansıdır ve sadece elektron-nötr çarpışmaları hesaba katılmıştır. Denklemden de görüleceği gibi soğuk plazma yaklaşımı yapıldığından kuvvet denklemine basınç etkisi dahil edilmemiştir. Ayrıca, yıldırım EMP'unun en güçlüleri için bile $\mathbf{B}_1 \ll \mathbf{B}$ olduğundan dalganın manyetik alanı ihmal edilir (Newsome, 2010). Elektron-nötr çarpışma frekansı alt iyonkürenin temel nötr bileşenleri olan N_2 , O_2 ve O yoğunluklarına bağlı olarak

$$v_{en} = 1.7 \times 10^{-17} N_{N_2} T_e + 3.8 \times 10^{-16} N_{O_2} \sqrt{T_e} + 1.4 \times 10^{-16} N_O \sqrt{T_e} \quad (4.6)$$

şeklinde verilir (Dalgarno vd., 1967). T_e , N_{N_2} , N_{O_2} ve N_O , sırasıyla, elektronun sıcaklığı, azot molekülü, oksijen molekülü ve oksijen atomunun yoğunluklarıdır. Nötr bileşenler m^{-3} ve elektron sıcaklığı $^{\circ}K$ birimindedir.

VLF dalgasının $+z$ doğrultusunda ilerlediği varsayıldığında Yer'in manyetik alan bileşenlerinin, $B_x = B \cos I \sin d$, $B_y = B \cos I \cos d$ ve $B_z = -B \sin I$ alınarak, $\mathbf{B} = \hat{x}B_x + \hat{y}B_y + \hat{z}B_z$ olduğu kabul edilir. Burada I inklinasyon ve d denklinasyon açısıdır. Bu şartlar altında (4.5) denklemi çözülerek iyonkürede dikey olarak yayılan VLF dalgasının ayrılım bağıntısı ve kırılma indisi iyonküre parametreleri cinsinden elde edilir.

Daha önce ifade edildiği gibi iyonküre çift kırıcı bir ortamdır (Davies, 1965). Böyle bir ortam olmasından dolayı gelen EM dalga ortamın kırma indisine ve Yer'in manyetik alanına bağlı olarak farklı modlara ayrılır. Dalga $+z$ doğrultusunda ilerlerken (4.5) nolu denklemin çözümünden iki farklı sonuç elde edilir. Bunlar plazma salınımları ve kutuplanmış dalgalardır. Kutuplanmış dalgalar sağa (Right-handed, R) ve sola (Left-handed, L) olmak üzere ikiye ayrılırlar. VLF dalgası $+z$ doğrultusunda ilerlemesine rağmen

jeomanyetik alanın geometrisinden dolayı $\mathbf{y}$ (veya $\mathbf{x}$) doğrultusunda yayılan dalgalar da vardır. Bunlar ordinari (O-modu) ve ekstraordinari (X-modu) dalgalarıdır (Aydoğdu vd., 2004). Ordinari ve ekstraordinari dalga modları $\mathbf{B}$ manyetik alanına dik olarak yayılan EM dalgalarıdır. O-modu için dalğanın elektrik alanı $\mathbf{E}$ 'in manyetik alanına paraleldir ($\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$). Aksine X-modu için dalğanın elektrik alanı $\mathbf{E}$ 'in manyetik alanına diktir ($\mathbf{E} \perp \mathbf{B}$). Burada Ordinari dalga enine bir dalga iken ekstraordinari dalga iki bileşenli elektrik alanına sahip kısmen boyuna ($\mathbf{E}_x \parallel \mathbf{k}$) ve kısmen enine ($\mathbf{E}_y \perp \mathbf{k}$) dalgadır. Ordinari dalga lineer olarak kutuplanmıştır. Ekstraordinari dalğanın elektrik alanının iki bileşeni arasında 90° lik faz farkı bulunur ve büyüklükleri eşit değildir. Sonuç olarak, dalga yayıldıkça, elektrik alan vektörünün ucu her dalga periyodunda elips çizer ve buna eliptik olarak kutuplanma denir.

L ve R modu dalgalar manyetik alan boyunca yayılan enine elektromanyetik dalgalarıdır. $\mathbf{k}$ yayılma vektörüne dik olan dalğanın elektrik alanı eşit genliğe sahip olan iki ortogonal bileşene sahiptir. Fakat aralarında 90° lik faz farkı vardır. Sonuç olarak dalga $\mathbf{B}$ manyetik alan boyunca yayıldıkça $\mathbf{E}$ elektrik alan vektörü $\mathbf{B}$ etrafında döner ve onun ucu her dalga periyodunda bir daire çizer. Böylece L ve R modu dalgalar dairesel olarak kutuplanırlar (Schunk ve Nagy, 2004).

Bir EM dalga soğuk bir plazmada yayıldığı zaman bir akım indüklenir ve daha sonra tedirgin olmuş plazma EM dalgaları etkiler (Schunk and Nagy, 2004). Şekil 4.1'de verilen geometriye göre yıldırım kaynaklı EM dalga alt iyonküreye girdiğinde yukarıda bahsedilen dört farklı moda ayrılır. Bu modların her birinin kırılma indisi farklıdır ve bu yüzden VLF bandındaki EM dalgayı farklı bir şekilde etkilerler. Bu farklı modların kırılma indisleri aşağıdaki gibi ifade edilirler:

$$n_R^2 = 1 - \frac{X(1-Y\sin I)}{(1-Y\sin I)^2 + Z^2} + iZ \frac{X}{(1-Y\sin I)^2 + Z^2} \quad (4.7)$$

$$n_L^2 = 1 - \frac{X(1+Y\sin I)}{(1+Y\sin I)^2 + Z^2} + i \frac{XZ}{(1+Y\sin I)^2 + Z^2} \quad (4.8)$$

$$n_0^2 = 1 - \frac{X}{1+Z^2} + iZ \frac{X}{1+Z^2} \quad (4.9)$$

$$n_x^2 = 1 - \frac{X[(1-X)(1-X-Y^2\cos^2 I \cos^2 d) + Z^2]}{[1-X-Y^2\cos^2 I \cos^2 d - Z^2]^2 + Z^2[2-X]^2} + iZ \frac{X[(1-X)^2 + Z^2 + Y^2\cos^2 I \cos^2 d]}{[1-X-Y^2\cos^2 I \cos^2 d - Z^2]^2 + Z^2[2-X]^2} \quad (4.10)$$

Bu şekilde elde edilen kırılma indisleri yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının ilerlemesini ve sönümünü belirlemek için kullanılır.

5. MATERYAL METOT

Daha önce de ifade edildiği üzere yıldırımlar yerküre atmosferinde etkili olan kuvvetlerden biridir. Bu kuvvet Dünya'nın atmosferi üzerinde çok çeşitli etkilere sahiptir. Bunların başında yıldırım sırasında ve sonrasında ortamın ısınması ve ortamda bulunan nötr moleküllerin iyonlaşması gelmektedir. Yıldırım kaynaklı elektrik alanlar, iyonküreye kadar ulaşarak burada serbest halde bulunan elektronları ısıtarak ve molekülleri ve atomları iyonlaştırarak radyo dalgalarının ilerlemesini etkilerler.

Bu bölümde, yıldırım kaynaklı EM dalgaların alt iyonküreyi ısıtması ve iyonlaştırması araştırılmıştır. Bunun için, daha önce bu konu hakkında yapılan çalışmalar analiz edildiğinde yıldırım kaynaklı ısınma için genel olarak elektronların Maxwell dağılımı kullanılarak elde edilen enerji denge denkleminin kullanıldığı görülmüştür (İnan vd., 1991; Rodriguez vd., 1992). Bununla beraber bu konu hakkında yapılan çalışmalarda genel olarak manyetik alanın ihmal edildiği görülmüştür. Manyetik alanın ihmal edilmediği çalışmalarda ise hesaplamalar Yer'in manyetik alanının gerçek geometrisi yerine genelde tek boyutlu geometrisine göre gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bu tez çalışmasında daha önceki çalışmalarda ihmal edilen manyetik alanın gerçek geometrisi hesaba dâhil edilerek alt iyonkürenin yıldırım kaynaklı elektromanyetik dalgalar tarafından ısıtılması ve iyonlaştırılması incelenmiştir. Bölüm 5.1'de yıldırım kaynaklı ısınmayı hesaplamak için kullandığımız temel denklemler yer almaktadır.

Yıldırım dönüş darbesinden yayınlanan VLF radyo dalgaları aracılığıyla meydana gelen iyonlaşma alt iyonkürenin dört bileşenli bir modeli kullanılarak incelenmiştir (Glukhov vd., 1992). Isınmada olduğu gibi iyonlaşmada da daha önceki çalışmalarda ihmal edilen etkilerden bazıları bu tez çalışmasında modele dâhil edilmiştir. Bu şekilde daha önce bu konu hakkında yapılan çalışmalarda ihmal edilen elektronların iki-cisim bağlanması ve özellikle ~72 km'den sonra etkili olan aktif türlerden elektron ayrışması bu modele dâhil edilmiştir ve bunlar Bölüm 5.2'de gösterilmiştir.

5.1. Yıldırım EMP Alan Kaynaklı Isınma Modeli

Yıldırım kaynaklı EMP alanı iyonkürenin D-bölgesine girdikten sonra, taşıdığı yüksek enerjiyi burada serbest halde bulunan elektronlara aktarır. Böylece elektronların kinetik enerjileri dolayısı ile de sıcaklıkları artar. Elektron sıcaklığının artması EMP dalgasının gücünün emildiğine işaret eder. Burada hızlanan elektronlar ortamda bulunan diğer parçacıklar ile çarpışırlar. Elektron çarpışmalarının gerçekleştiği durumda kırılma indisi $n^2 = (\mu + i\chi)^2 = M + iN$ şeklinde kompleks bir ifade halini alır. Burada μ dalganın ilerleyişini temsil eden kırılma indisinin reel kısmıdır ve χ dalganın sönümünü ifade eden sanal kısmıdır. Kırılma indisinin sanal kısmı

$$\chi^2 = \frac{1}{2}[(M^2 + N^2)^{1/2} - M] \quad (5.1)$$

şeklinde tanımlanır (Güzel vd., 2011). Burada M ve N denklem (4.7-4.10)'da verilen farklı dalga modlarının kırılma indislerinin reel ve sanal kısımlarının katsayılarıdır. Sönümün fiziksel anlamı, dalga enerjisinin bir kısmının plazma içerisinde emilmesidir. Bu enerji gerçekte elektronlar ve nötr parçacıklar arasında bölüşülmüştür, fakat büyük kütle farkından dolayı elektronlar enerjinin yaklaşık tümünü alır. Elektron gazı için ideal gaz yaklaşımı kullanılarak, emilime bağlı elektron sıcaklık değişimi aşağıda verilen doğrusal olmayan diferansiyel denklem ile tanımlanır (Belova vd., 1995; Kero vd., 2000; Rietveld vd., 1986).

$$\frac{dT_e}{dt} = \frac{2}{3k_B N_e} (U - L). \quad (5.2)$$

Burada, k_B Boltzman sabitini, U ısınmayı ve L ise N_2 ve O_2 temel bileşenlerin elektronlar ile esnek çarpışmaları, dönme ve titreşim uyarılmalarından ve O atomunun elektronik ve ince yapı uyarılmasından kaynaklanan elektron enerji kayıplarının toplamını tanımlar (Rodriguez, 1994, Schunk ve Nagy, 2004).

Yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının alt iyonküre arasından geçerken ortamda elektronlara aktardığı enerji

$$U = 2 \kappa S \quad (5.3)$$

ifadesi ile verilir. Burada, $\kappa = \omega\chi/c$ şeklinde verilen EM dalganın emilim katsayısıdır. Burada, ω dalganın frekansını, χ kırılma indisinin sanal kısmını ve c ışığın boşluktaki hızını gösterir. Yıldırım EMP dalgasının enerji akısının yükseklikle değişimi ise

$$\frac{dS}{dz} = -2 \frac{\omega\chi}{c} S \quad (5.4)$$

şeklinde verilir (Belova vd., 1995). Buradan;

$$S(z) = \frac{ERP}{4\pi z^2} \exp\left(-2 \frac{\omega}{c} \int_0^z \chi(z') dz'\right) \quad (5.5)$$

ifadesi elde edilir. Burada ERP (Effective Radiation Power) kaynağın (yıldırım kanalının) etkin ışıma gücü ve z km cinsinden referans yüksekliğidir. Yıldırım kanalından yayınlanan EMP alanlarının etkin ışıma gücü, dalganın **E** elektrik alanı cinsinden aşağıdaki gibi verilir (Richards, 2008)

$$ERP = \frac{(E D)^2}{30} \quad (5.6)$$

Burada E dalganın elektrik alanının V/m cinsinden büyüklüğü, D yıldırım kanalından olan uzaklıktır. Bu uzaklık genellikle 100 km olarak alınır (Inan vd., 1991).

Elektronlar yıldırım kaynaklı EM dalgadan kazandığı enerjiyi ortamda bulunan nötr parçacıklar ile çarpışarak kaybeder. Bu enerji kayıp mekanizmaları yukarıda ifade edildiği gibi elektronların N_2 ve O_2 ile esnek çarpışmaları, dönme ve titreşim uyarılmalarını ve O atomunun ince yapı ve elektronik uyarılmalarını içerir. Tüm bu kayıpların toplamı aşağıdaki denklem ile verilir (Rodriguez, 1994, Schunk ve Nagy, 2004):

$$L_{Top} = \sum_{i=1}^3 L_i(e, N_2) + \sum_{i=1}^3 L_i(e, O_2) + \sum_{j=1}^2 L_i(e, O) \quad (5.7)$$

Burada $i=1,2$ ve 3 sırasıyla elektronların azot ve oksijen molekülleri ile esnek çarpışmalar, dönme ve titreşim uyarılmaları vasıtasıyla kaybettiği enerjiyi ifade eder. $j=1$ ve 2 oksijen atomunun ince yapı ve elektronik uyarılmalar aracılığıyla oluşan kayıpları ifade eder. Bu kayıpların genel ifadeleri aşağıdaki gibidir (Rodriguez, 1994, Schunk ve Nagy, 2004).

$$L_{es}(e, N_2) = 1.89 \times 10^{-44} N_e N_{N_2} (1 - 1.21 \times 10^{-4} T_e) T_e (T_e - T_n) \quad (5.8)$$

$$L_{es}(e, O_2) = 1.29 \times 10^{-43} N_e N_{O_2} \left(1 + 3.6 \times 10^{-2} T_e^{\frac{1}{2}} \right) T_e^{1/2} (T_e - T_n) \quad (5.9)$$

$$L_{don}(e, N_2) = 4.65 \times 10^{-39} N_e N_{N_2} \left(\frac{T_e - T_n}{T_e^{1/2}} \right) \quad (5.10)$$

$$L_{don}(e, O_2) = 1.11 \times 10^{-38} N_e N_{O_2} \left(\frac{T_e - T_n}{T_e^{1/2}} \right) \quad (5.11)$$

$$L_{tit}(e, N_2) = 4.79 \times 10^{-37} N_e N_{N_2} \exp \left(f_1 \frac{T_e - 2000}{2000 T_e} \right) \left[\exp \left(-g \frac{T_e - T_n}{T_e T_n} \right) - 1 \right] \quad (5.12)$$

$$f_1 = 1.06 \times 10^4 + 7.51 \times 10^3 \tanh[11 \times 10^{-4} (T_e - 1800)] \quad (5.13)$$

$$g = 3300 + 1.233(T_e - 1000) - 2.056 \times 10^{-4} (T_e - 1000)(T_e - 4000) \quad (5.14)$$

$$L_{tit}(e, O_2) = 8.32 \times 10^{-38} N_e N_{NO_2} \exp \left(f_2 \frac{T_e - 700}{700 T_e} \right) \left[\exp \left(-2770 \frac{T_e - T_n}{T_e T_n} \right) - 1 \right] \quad (5.15)$$

$$f_2 = 3300 - 839 \sin[1.91 \times 10^{-5} (T_e - 2700)] \quad (5.16)$$

$$L_{uy}(e, O) = 2.52 \times 10^{-37} N_e N_O \exp \left(f_3 \frac{T_e - 3000}{3000 T_e} \right) \left[\exp \left(-22713 \frac{T_e - T_n}{T_e T_n} \right) - 1 \right] \quad (5.17)$$

$$f_3 = 2.4 \times 10^4 + 0.3(T_e - 1500) - 1.947 \times 10^{-5} (T_e - 1500)(T_e - 4000) \quad (5.18)$$

$$L_{iy}(e, O) = N_e N_O D^{-1} (S_{10} \{1 - \exp[-98.9(T_e^{-1} - T_n^{-1})]\} + S_{20} \{1 - \exp[-326.6(T_e^{-1} - T_n^{-1})]\} + S_{21} \{1 - \exp[-227.(T_e^{-1} - T_n^{-1})]\}) \quad (5.19)$$

burada

$$S_{20} = 1.9056 \times 10^{-36} (\text{Jm}^3 \text{s}^{-1}) \quad (5.20)$$

$$S_{21} = 2.9808 \times 10^{-36} (\text{Jm}^3 \text{s}^{-1}) \quad (5.21)$$

$$S_{10} = 13.1984 \times 10^{-41} T_e^{0.6} \exp(-227.7 T_n^{-1}) (\text{Jm}^3 \text{s}^{-1}) \quad (5.22)$$

$$D = 5 + \exp(-326.6 T_n^{-1}) + 3 \exp(-227.7 T_n^{-1}) \quad (5.23)$$

şeklinde verilir.

Denklem (5.2) kararlı durum için çözüldüğünde

$$U(T_e) - L(T_e) = 0 \quad (5.24)$$

ifadesi elde edilir. Yıldırım kaynaklı ısınmayı hesaplamak için Denklem (5.23) 0.1 km'lik adımlarla her bir yükseklik için iterasyon yapılarak çözdürülmüş ve elde edilen sonuçlar ve yorumları Bölüm 6'da sunulmuştur.

5.2. Yıldırım EMP Alan Kaynaklı İyonlaşma Modelleri

İyonküre nötr yüklü kısmen iyonlaşmış bir akışkandır. Atmosferik atomlar ve moleküller kısa dalga boylu solar ışıma veya enerjili elektron yağışı tarafından iyonlaştırılabilirler.



Burada, e^* enerjili bir elektronu temsil eder. Bu süreçler iyonkürenin yapısını tanımlayan reaksiyon serileri için başlangıç noktasıdır. İyonküreyi incelemek için iyon kimyasında önemli olan reaksiyonların birkaç türü dikkate alınmalıdır. Örneğin, farklı iyonlar nötr moleküller ile yük değişimi yaparak temel nötr atmosfer bileşenlerinden üretilirler:



Ayrıca negatif iyonlar, nötr bileşenlere elektronun bağlanması yoluyla da oluşabilirler:



Elektronlar ya fotoayırışma ya da çarpışmalı ayırışma vasıtasıyla negatif iyonlardan salınabilirler:

$$Z^- + h\nu \rightarrow Z + e \quad (5.29)$$

$$Z^- + M \rightarrow Z + M + e \quad (5.30)$$

Pozitif ve negatif yüklü parçacıklar yeniden birleşebilirler:

$$X^+ + e \rightarrow X \text{ (nötr üretimi)} \quad (5.31)$$

$$X^+ + Y^- \rightarrow X+Y \text{ (nötr üretimi)} \quad (5.32)$$

İyonların oluşumunu anlamak kısa dalga boylarındaki solar ışımanın spektral dağılımının, solar ve galaktik kozmik ışınların yapısının, atmosferin kimyasal karışımının, basıncının, sıcaklığının ve taşıma gibi fiziksel karakteristiklerinin bilgisini gerektirir. Ayrıca, güneş (solar) aktivite değişimleri de göz önüne alınmalıdır (Brasseur ve Solomon, 2009).

Bölüm 3'te ifade edildiği üzere iyonküreyi elektron yoğunluğunun yükseklik değişimine dayanarak çok sayıda karakteristik tabakalara ayırmak olağandır. D, E ve F1 tabakalarında, elektron yoğunluğu güneşin gelme açısı maksimum olduğunda (yerel öğle) en büyüktür. Gece elektronlar D-bölgesinde ~80 km'ye kadar neredeyse tamamen gözden kaybolur ve E- ve F1-bölgelerinde 100 kata kadar azalır. Bu tabakalarda, iyonların yaşam süresi taşıma zaman ölçeğine nazaran kısadır. Bu yüzden yüklü parçacık yoğunlukları üretim ve kayıp arasındaki bir denge ilişkisiyle belirlenir (Brasseur ve Solomon, 2009).

Bu çalışmada ilgilendiğimiz iyonkürenin D-bölgesindeki fiziksel ve kimyasal süreçler karmaşıktır ve hala gündüze kıyasla sakin gece koşullarında bile tam anlaşılmış değildir. Bu alandaki bilgi eksikliğimizin temel sebepleri:

- Bu yüksekliklerde elektron yoğunluğunun ($< 10^4 \text{ cm}^{-3}$) belirlenmesi için deneysel tekniklerin karmaşıklığı, azlığı ve pahalı olması,
- Negatif, pozitif ve küme iyonlarının çok sayıda farklı türünün varoluşu,
- Sayısal yoğunlukları pratik olarak bilinmeyen ikincil nötr bileşenlerin (O, O₃, NO, H₂O) rolü,
- Yukarıda söz edilen türler arasındaki çok sayıda kimyasal reaksiyonların mekanizmalarının tam olarak bilinmemesi,

şeklinde gösterilebilir. Gece alt iyonküresinin temel özelliği, pozitif ve negatif iyonların farklı türlerinin ve pozitif küme iyonlarının varlığından dolayı iyon kimyasının çok karmaşık olmasıdır.

EM alanlar tarafından elektronların ısıtılması alt iyonkürenin kimyasal dengesinin önemli değişimlerine sebep olur (Pasko vd., 1998). Bu etkinin basit analitik tahminleri alt iyonkürede elektron dengesini kontrol eden baskın süreçlerin elektron bağlanması, elektron ayrışması ve küme iyonları ile ayrışmalı yeniden birleşmenin olduğu kabul edilerek yapılır (Glukhov vd., 1992; Rodriguez ve İnan, 1994). Kararlı durumda ve elektron bağlanmasının ayrışma üzerine baskın olduğu kabul edilerek Tomko vd., (1980) tarafından verilen T_e elektron sıcaklığına bağlı olan elektron yoğunluğu değişimi

$$N_e(T_e) = N_{e0} \sqrt{\frac{T_e}{T_n}} e^{700 \left(\frac{T_n - T_e}{T_n T_e} \right)} \quad (5.33)$$

şeklinde ifade edilir. Burada N_{e0} tedirgin olmamış elektron yoğunluğu, T_n ve T_e sırasıyla nötr ve elektron sıcaklığıdır. Pasko vd., (1998) tarafından kullanılan bu model bizim çalışmamızda yıldırım kaynaklı EM dalgalar tarafından ısınma sonucunda meydana gelen elektron yoğunluk değişiminin hesaplanmasında **Model 1** olarak tanımlandı.

Model 1 yıldırım kaynaklı ısınmadan dolayı elektron yoğunluğundaki değişimler için fiziksel olarak bir anlayış kazandırmasına rağmen, modelde kabul edilen varsayım alt iyonkürenin EM dalgalara tepkisini belirlemede eksik kalır. Ayrıca yıldırım kaynaklı elektrik alanlar tarafından hızlandırılmış elektronlar, nötrleri iyonlaştırarak ve iki-üç cisim elektron bağlanmasında değişiklikler meydana getirerek elektron yoğunluğunda (N_e) değişimlere sebep olur. Bu şekilde üç cisim bağlanmasının dâhil edildiği alt iyonkürenin dört bileşenli modeli Rodriguez ve İnan (1994) tarafından kullanılmıştır. Bu model bu tez çalışmasında **Model 2** olarak tanımlanmıştır. Model 2 özellikle sadece elektron yoğunluğunun ayrıntılı davranışı ile ilgilenildiğinde kullanışlı olacaktır. Basitlik için bir boyutlu modeli düşünülmüş ve tüm fiziksel niceliklerin sadece yüksekliğe bağlı olduğunu kabul edilmiştir (Rodriguez ve İnan, 1994).

Model 2'ye göre, parçacıkların yukarıda adı geçen türleri arasındaki ilk kimyasal süreçleri aşağıdaki denklemler ile verilir (Glukhov vd., 1992):

$$\frac{dN_e}{dt} = Q_0 + v_d N^- - v_a N_e - \alpha_d N_e N^+ - \alpha_d^c N_e N_x^+ \quad (5.34)$$

$$\frac{dN^-}{dt} = v_a N_e - v_d N^- - \alpha_i N^- (N^+ + N_x^+) \quad (5.35)$$

$$\frac{dN^+}{dt} = Q_0 - A N^+ - \alpha_d N_e N^+ - \alpha_i N^- N^+ \quad (5.36)$$

$$\frac{dN_x^+}{dt} = -\alpha_d^c N_e N_x^+ + B N^+ - \alpha_i N^- N_x^+ \quad (5.37)$$

Burada N_e , N^+ , N^- ve N_x^+ sırasıyla elektronların, birincil pozitif iyonların (NO^+ ve O_2^+), negatif iyonların (O_2^- , CO_3^- , NO_2^- , NO_3^-) ve pozitif küme iyonları veya proton hidratların ($H^+(H_2O)_n$) sayısal yoğunluklarını gösterir. Q_0 kararlı dış iyonlaştırıcı bir kaynak, α_d ve α_d^c sırasıyla birincil pozitif iyonların ve su küme iyonlarının elektron ile yeniden birleşmesinin etkin katsayılarıdır. α_i negatif iyonlarla pozitif iyonların tüm türleri için etkin olağan nötrleşme katsayısıdır. v_a etkin elektron bağlanma frekansıdır. A birincil pozitif iyonların (özellikle NO^+) su küme iyonlarına dönüşmesinin etkin frekansı ve v_d etkin çarpışmalı elektron ayrışma frekansıdır. Reaksiyon frekansları, katsayılar ve onların T_e ve T_n elektron ve nötr sıcaklıklara bağımlılığı Tablo 5.1’de gösterilmiştir.

(5.32)-(5.35) denklemlerinin kararlı durumu için yük nötrlüğünü ($N_e + N^- = N^+ + N_x^+$) şeklinde kabul ederek denklem (5.33)’ten N^+ ve N_x^+ elenip N^- ’nin N_e ’ye oranı bulunur ve

$$\lambda \equiv \frac{N^-}{N_e} = \frac{\sqrt{\left(1 + \frac{v_d}{\alpha_i N_e}\right)^2 + 4\alpha_i v_a N_e} - \left(1 + \frac{v_d}{\alpha_i N_e}\right)}{2} \quad (5.38)$$

olur. Bu ifade denklem (5.34)’te kullanılırsa

$$\frac{N^+}{N_x^+} = \frac{\alpha_d^c + \lambda \alpha_i}{A} N_e \quad (5.39)$$

ifadesi elde edilir.

Tablo 5.1. D bölgesi reaksiyon katsayıları ve frekansları (Rodriguez ve İnan, 1994).

Katsayılar ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
$\alpha_d = 3 \times 10^{-13}$ (Glukhov vd., 1992)
$\alpha_d^c = 3 \times 10^{-12} (T_n / T_e)^{0.08}$
$\alpha_i = 1 \times 10^{-13}$
Frekanslar (s^{-1})
$v_a = v_{a3} = 10^{-43} N_{N_2} N_{O_2} + k_{O_2} (N_{O_2})^2$
$k_{O_2} = K T_e^{-0.65} \exp \left[-\frac{a_1}{T_e} - \left(\frac{a_2}{T_e} \right)^2 - \left(\frac{a_3}{T_e} \right)^3 \right]$
$K = 1.1617 \times 10^{-39} - 3.4665 \times 10^{-42} T_n + 3.2825 \times 10^{-45} T_n^2$
$a_1 = 781.93 - 3.2964 T_n$
$a_2 = -191.59 + 3.7646 T_n - 4.5446 \times 10^{-3} T_n^2$
$a_3 = -76.834 + 1.2277 \times 10^{-2} T_n - 7.6427 \times 10^{-3} T_n^2 + 1.7856 \times 10^{-5} T_n^3$
$A = 10^{-43} N_T^2, N_T = N_{N_2} + N_{O_2}$ toplam nötr yoğunluk
$v_d = 3 \times 10^{-23} N_T$

Yüksek elektrik alanlarda iki cisim reaksiyonları elektronların kaybindan sorumlu olan baskın mekanizmadır. Durum böyle olunca Model 2'ye iki cisim bağlanmasının dâhil edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Çünkü yıldırımlar, yüksek elektrik alanların oluşmasına sebep olurlar. Ayrıca son yıllarda yapılan çalışmalarda bu etkinin modele dâhil edilmesinin gerekliliğine vurgu yapılmıştır (Haldoupis vd., 2009). Bu sebeple yıldırım VLF EM dalgası tarafından alt iyonküredeki iyonlaşmanın tam olarak hesaplanması için Model 2'ye dâhil edilen iki cisim bağlanma ifadesi aşağıdaki gibi verilmiştir:

$$v_{a2} = \begin{cases} 0 & , EN_0/N_T < 316200 \\ \frac{N_T}{N_0} 10^P, & EN_0/N_T \geq 316200 \end{cases} \quad (5.40)$$

Burada

$$P = \sum_{i=0}^4 b_i [\log_{10}(E N_0/N_T)]^i \quad (5.41)$$

ve $b_0 = -3567.0$, $b_1 = 1992.68$, $b_2 = -416.601$, $b_3 = 38.7290$ ve $b_4 = -1.35113$ olarak verilmektedir (Barrington-Leigh, 2000).

Ayrıca, Model 2' de kullanılan ayrışma oranı Bölüm 2' de ifade edildiği gibi aktif türlerden dolayı meydana gelen ayrışmayı içermez. Bundan dolayı, bu çalışmada elektron ayrışma frekansı aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$v_d \cong (8.6 \times 10^{-16} e^{-6000/T_n} N_T + 2.5 \times 10^{-16} N_{ac}) s^{-1} \quad (5.42)$$

Bölüm 2'de ifade edildiği üzere ilk terim O_2 tarafından çarpışmalı ayrışmayı tanımlar, oysa ikincisi $N_{ac} = N_O + N_N$ aktif türler tarafından bağlanmalı ayrışmayı temsil eder (Gurevich, 1978; Lehtinen ve İnan, 2007). Bu çalışmada alt iyonkürede bu ayrışma reaksiyonu

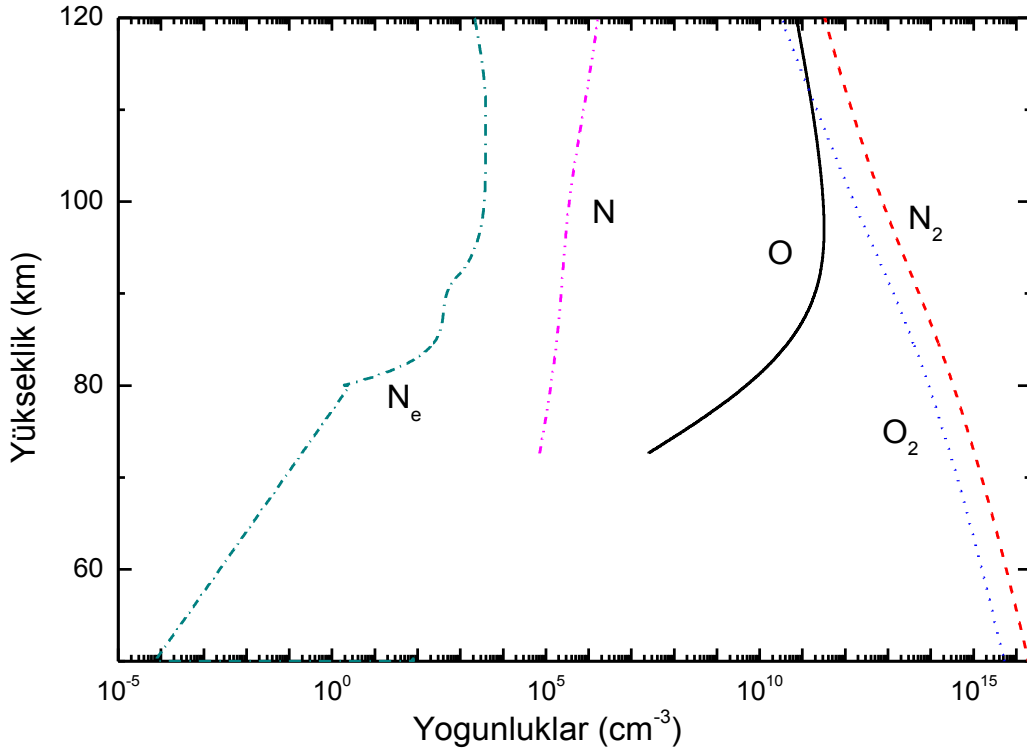


şeklinde verilir. Burada, M_{ac} , O veya N atomunu temsil eder.

Model 2' ye iki cisim bağlanmasının ve aktif türlerden dolayı meydana gelen elektron ayrışmasının dâhil edilmesi ile elde edilen yeni model bu çalışmada **Model 3** olarak adlandırıldı. Model 1, 2 ve 3 kullanılarak yıldırımın alt iyonküreyi iyonlaştırması hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar ve yorumları bulgular ve tartışma bölümünde verilmiştir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Az iyonlaşmış doğal bir plazma olarak kabul edilen alt iyonküredeki yıldırım kaynaklı tedirginlikleri belirleyen en önemli parametreler, parçacık (elektron ve nötr) yoğunlukları ve ortamda etkili olan elektrik alanların büyüklükleridir. Bu yüzden alt iyonküredeki elektron sıcaklığının ve yoğunluğunun hesaplanmasından önce buradaki parçacık yoğunluklarının bilinmesi gerekir. Şekil 6.1 Yerel Zaman (YZ) 2400 için nötr yoğunlukların ve elektron yoğunluğunun yüksekliğe bağlı değişimini göstermektedir.

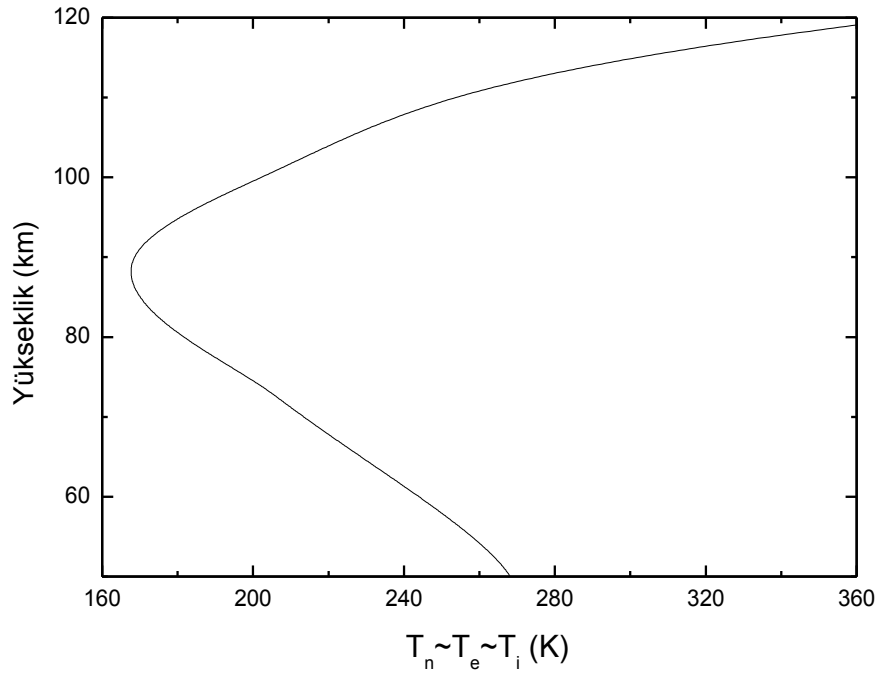


Şekil 6.1. 21 Haziran 2000 tarihi YZ 2400 için elektron ve nötr yoğunlukların yüksekliğe göre değişimi (Hedin, 1991).

Hesaplamalarda kullanılan nötr yoğunluk ve sıcaklık değerleri MSISE-90 (Mass Spectrometer-Incoherent-Scatter) modelinin web adresinden Elazığ ili (38° 41' K ve 39° 13' D) için elde edilmiştir (http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/msis_vitmo.html). Gece alt iyonkürede elektron yoğunluğu 50-80 km arasında IRI-2007 (International Reference Ionosphere-2007) modeli ile elde edilemediğinden Denklem (2.1) kullanılarak elde edilmiştir. 80-120 km arasında ise IRI-2007 modelinin internet derleyicisi kullanılarak nötr

yoğunlukların elde edildiği aynı koşullar, güneş lekesi sayısının (R) 147 olduğu durum için elde edilmiştir (http://ccmc.gsfc.nasa.gov/modelweb/models/iri_vitmo.php). MSISE-90 modeline göre nötr yoğunlukların değişimi incelendiğinde atmosferin temel bileşenlerinden N_2 ve O_2 moleküllerinin yoğunluğunun yükseklikle doğrusal olarak azaldığı görülmektedir. Model hesaplarına göre O ve N atomu 72,6 km'den sonra görülmektedir. Bu modele göre bu yüksekliğin aşağısında oksijen ve azot atomu mevcut değildir. Elektron yoğunluğunun değişimi incelendiğinde, 50-80 km arasında doğrusal olarak arttığı görülmektedir. 80-120 km arasındaki yüksekliklerde elektron yoğunluğu artmaya devam etmekte ancak belli bir yükseklikten sonra neredeyse sabit kalmaktadır. IRI-2007 modeline göre D bölgesi 80 km'nin aşağısında gece gözden kaybolur. Ancak yüksek enerjili kozmik ışınlar gece D bölgesi ve daha alt yüksekliklere kadar nüfuz ettiği için D bölgesinde EM dalgaların ilerleyişini etkileyecek miktarda elektronun oluşmasına sebep olacaktır (Brosseur ve Solomon, 2009).

Şekil 6.2 MSISE-90 atmosferik modele göre elde edilen ve hesaplamalarda kullanılan nötr sıcaklık değerlerini gösterir.



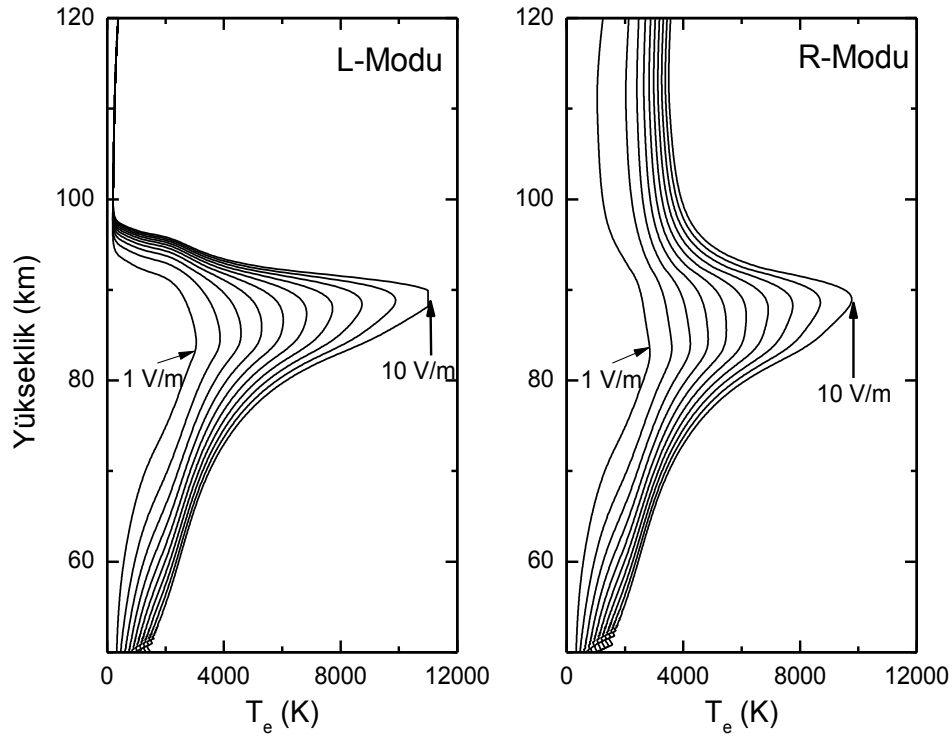
Şekil 6.2. Şekil 6.1. ile aynı koşullar için MSISE-90 modeli ile elde edilen alt iyonkürenin nötr sıcaklığının yükseklikle değişimi (Hedin, 1991).

Özellikle burada kullanılan hesaplama modellerine (MSISE-90, IRI-2012) göre bu tez çalışmasında alt iyonkürede sakin koşullarda elektron, nötr ve iyon sıcaklıklarının yaklaşık olarak birbirine eşit olduğu kabul edilmektedir. Bununla beraber yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgalarının aşağıda gösterileceği gibi elektron sıcaklığını ortalama ortam sıcaklığının 50-60 katına kadar arttıracakı tespit edildi. Ancak bu artış uzun süreli bir artış değildir ve elektron sıcaklığı yaklaşık olarak 10 μ s içinde taban durumuna geri döner (İnan vd., 1991).

6.1. Alt İyonküredeki Elektron Sıcaklığının EM Dalga Modlarına Göre Değişimi

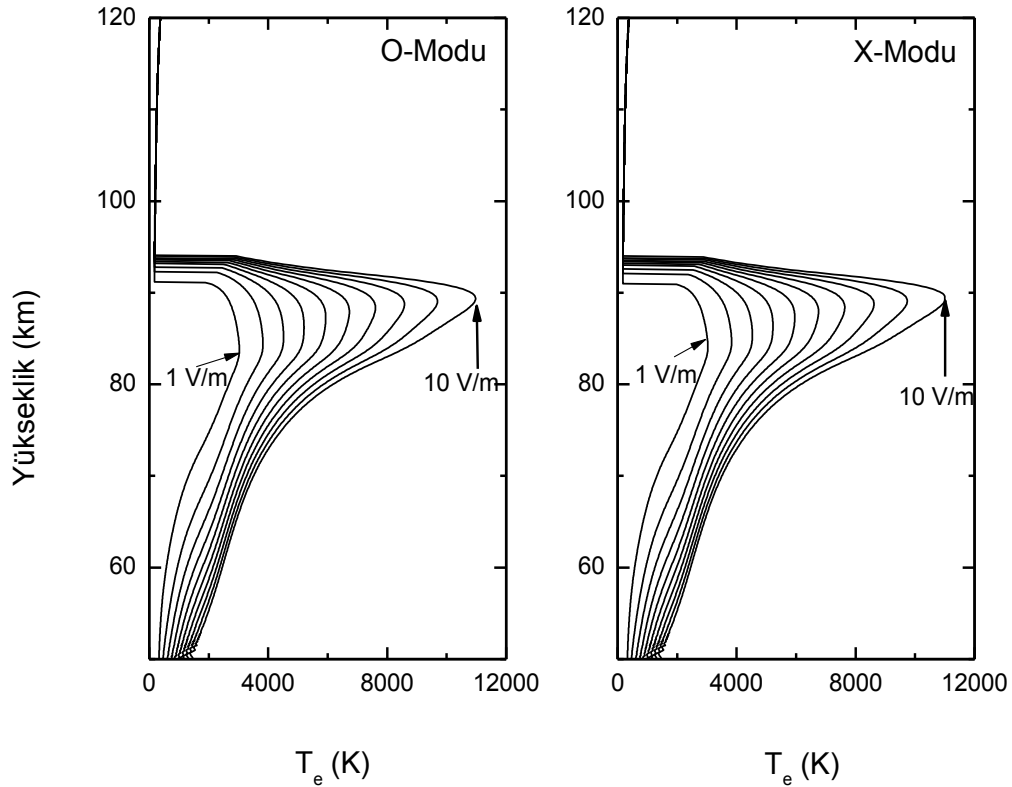
Yıldırım kaynaklı elektrik alanlardan biri olan EMP alanlarının ortamdaki elektronları ısıtması (5.1)-(5.23) denklemlerinin aracılığıyla hesaplandı.

Şekil 6.3 100 km'ye normalize edilmiş CG yıldırım boşalmalarından VLF bandında yayınlanan 5 kHz'lik EM dalganın L ve R-Modunun elektrik alanının (E_{100}) alt iyonküre elektron sıcaklığı üzerindeki etkisini göstermektedir.



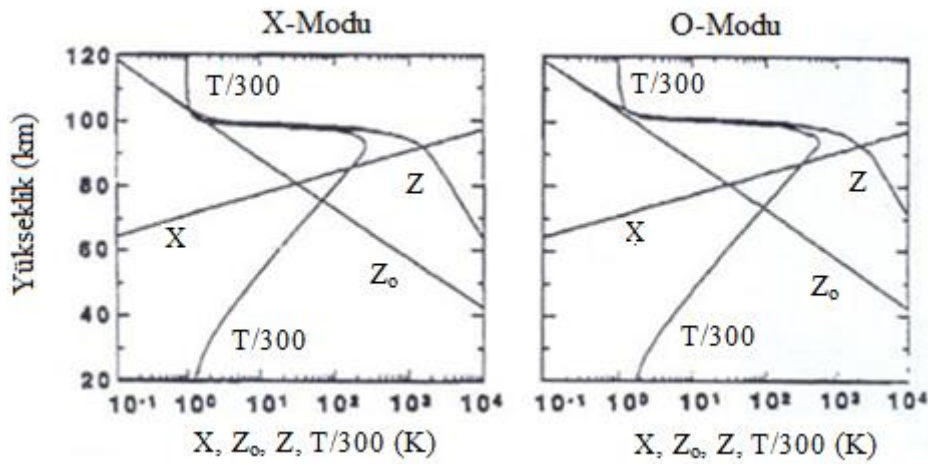
Şekil 6.3. Yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının kutuplanmış L ve R-Modlarının neden olduğu alt iyonküre elektron sıcaklığındaki tedirginliğin yükseklik ile değişimi

Şekil 6,3'ten de görüleceği üzere E_{100} değerleri 1 V/m'lik artışlar ile arttırıldığında en düşük sıcaklık değişimi 1 V/m için, en yüksek sıcaklık değişimi 10 V/m için hesaplanmaktadır. E_{100} değerleri düzenli arttırıldığında sıcaklık değerlerinin de belirli bir yüksekliğe kadar düzenli olarak arttığı görülmektedir. Ayrıca, EM dalganın L-Modu 1 V/m lik E_{100} değerinde ortamı taban durumunun yaklaşık olarak 10 katına kadar ısıtır. Buna karşın, 10 V/m lik E_{100} değerinde ortam taban durumunun yaklaşık 60-65 katına kadar ısınır. Sıcaklık yaklaşık olarak 85-90 km arasındaki yüksekliklerde maksimum değerine ulaşır. EM dalganın R-modu E_{100} ün 1 V/m lik değerinde elektron sıcaklığını ortam sıcaklığının 10 katına kadar arttırırken, E_{100} ün 10 V/m lik değerinde yaklaşık 45-50 katına kadar arttırmaktadır. Burada önemli farklılık dalganın bu modunun diğer mod gibi hemen taban duruma dönmeyip iyonküre arasından ilerlemesine devam etmesidir. L ve R-Modu dalgaları karşılaştırıldığında eşit E_{100} değerlerinde L-Modu dalganın ortamı R-Moduna göre daha fazla ısıttığı görülmektedir. Buna karşın L-Modu dalganın etkisi 95-100 km'nin yukarısında gözden kaybolurken R-Modu dalga iyonküre içinde ilerlemesine devam etmektedir. Şekil 6.4 EM dalganın O ve X-Modunun elektron sıcaklığı üzerindeki etkisini göstermektedir.



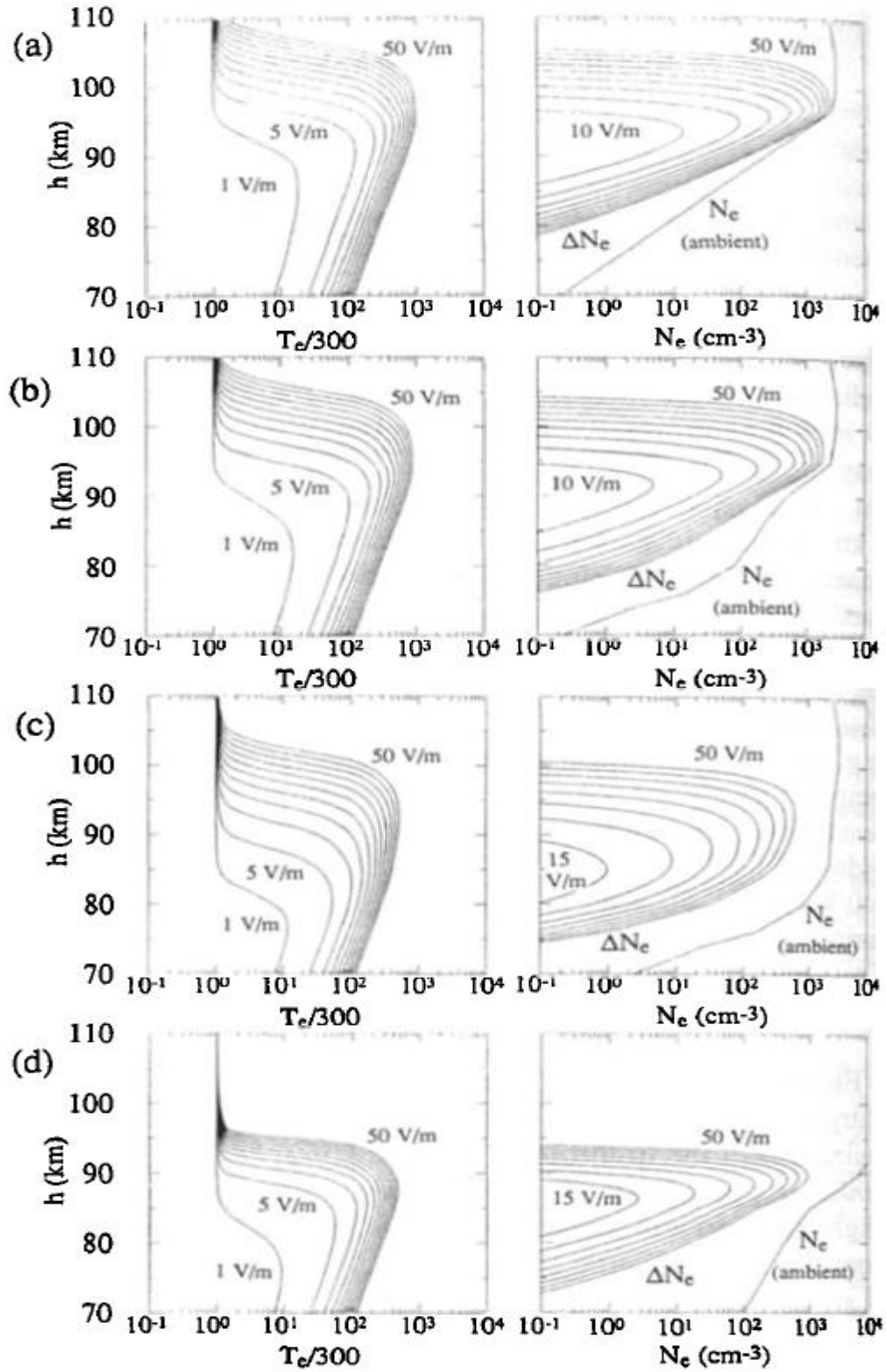
Şekil 6.4. O ve X-Modu dalgaların neden olduğu alt iyonküre elektron sıcaklığındaki tedirginliğin yükseklik ile değişimi

Manyetik alandan etkilenmeyen dalga modu olan EM dalganın O-Modu elektron sıcaklığını E_{100} ün 1 V/m lik değerinde ortam sıcaklığının 10 katına kadar, 10 V/m lik E_{100} değerinde ise yaklaşık olarak 55-60 katına kadar arttırmaktadır. Yaklaşık olarak 90-95 km lik yükseklikte bu modun etkisi ortadan kalkmaktadır. X-Modu EM dalga diğer modlar gibi ortamı 1 V/m lik E_{100} değerinde yaklaşık 10 kata kadar, 10 V/m lik E_{100} değerinde yaklaşık 60 kata kadar ısıtmaktadır. X-Modu dalga yaklaşık olarak 90-95 km civarında gözden kaybolur ve sıcaklık ortam değerine geri döner. O ve X-Modu dalgaları karşılaştırdığımızda iki mod için sıcaklık artışının neredeyse aynı olduğu görülür. Ancak sıcaklığın tepe değerine ulaştığı yüksekliklerde sıcaklık, O-Modu dalga için X-Modu dalgadan yaklaşık olarak 20-30 K derece daha büyüktür. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde bu iki mod arasında fazla fark olmadığı görülecektir. Bu durum bu çalışmada elde edilen sonuçları desteklemektedir. Şekil 6.5'te İnan vd. (1991) tarafından gerçekleştirilen hesaplamaların sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 6.5. VLF radyo dalgasının 10 V/m lik elektrik alan değeri için O ve X modlarının elektron sıcaklığı ve çarpışma frekansı üzerindeki etkisi. X ve Z daha önce ifade edilen normalize frekanslardır ve Z₀ Z'nin tedirgin olmamış değeridir (İnan vd., 1991).

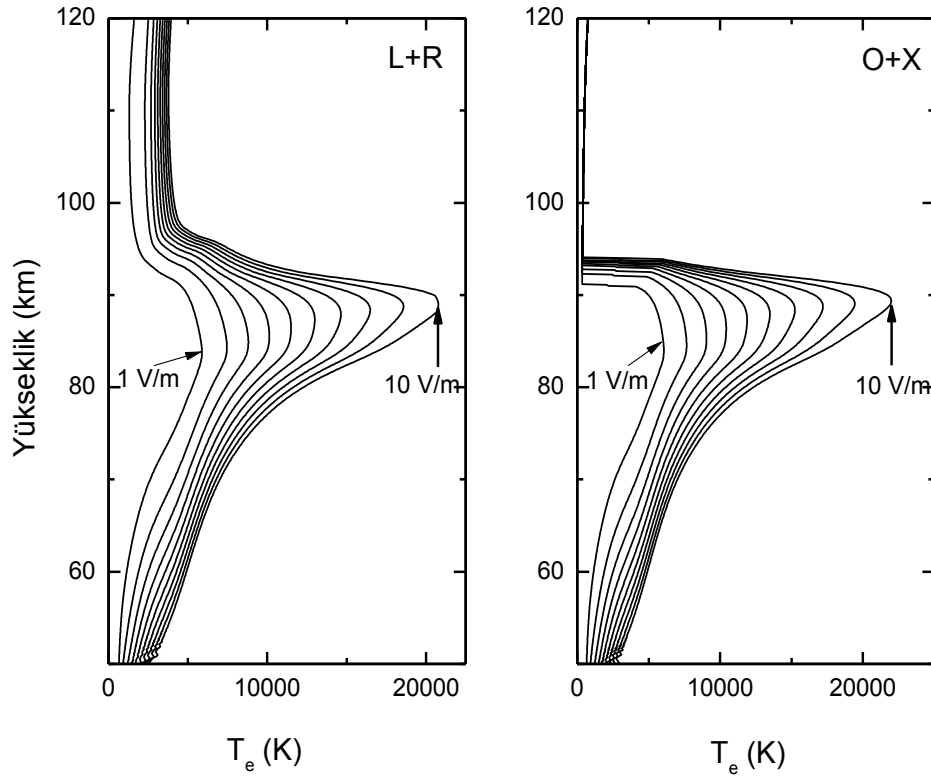
Şekil 6.5 incelendiğinde yıldırım EMP nun 10 V/m lik elektrik alan değeri için hem O hem de X modunun elektron sıcaklığını nispeten yüksek kabul edilen taban durum sıcaklığının yaklaşık 150-200 katına kadar arttırıldığını görülebilir. Bu tez çalışması ile Şekil 6.5'te gösterilen çalışma arasındaki farklılık bunların çalışmalarında kullandıkları elektron ve nötr yoğunlukların ve nötr sıcaklıkların farklı olmasına ve onların EM dalganın emilen gücünü hem O hem de X modu dalga için birlikte toplayarak elde etmelerine bağlıdır.



Şekil 6.6. 5 km yükseklikteki bir yatay boşalmadan yayılan EM darbe tarafından D-bölgesinin ısınması ve iyonlaşması. Sol panelde 300 K'e normalize edilmiş elektron sıcaklığı ve sağ paneldeki ikincil iyonlaşma elektron yoğunluğunun gece (a), (b), (c) ve gündüz (d) değerleri ve farklı elektrik alan yoğunlukları için yüksekliğin bir fonksiyonu olarak çizilmiştir (Rodriguez vd., 1992).

Bu durum İnan vd.(1991) ile aynı modeli kullanan Rodriguez vd.(1992)'nin çalışmasında daha net bir şekilde görülmektedir. Şekil 6.6 EMP kaynaklı sıcaklık ve yoğunluk değişimlerini gösterir. Rodriguez vd.(1992), maksimum iyonlaşma bölgesinin artan alan gücü ile yukarıya hareket ettiğini bulmuşlardır. Nispeten zayıf ($E_{100} = 1 \text{ V/m}$) darbelerin elektron sıcaklığını onluk bir çarpına kadar arttırdığını, oysa sadece güçlü ($E_{100} \geq 20 \text{ V/m}$) darbelerin ikincil iyonlaşmalar üretebildiğini bulmuşlardır. Elektron yoğunluğunun sıcaklık artışı ile yakından ilişkili olduğu şekilden görülmektedir. Gece alt iyonkürenin sıcaklık hesaplamalarında kullanılan taban durumu elektron yoğunluklarından “c” ile gösterilenin bu tez çalışmasında kullanılanlar ile benzer sonuçlar verdiği görülmektedir (Rodriguez vd., 1992).

Yıldırım EM alanı iyonküreye ulaşıncaya kadar tek bir dalga olarak ele alınır. Ancak iyonküre çift kırıcı bir ortam gibi davrandığı için, EM dalga iyonküre içine girdiğinde dört farklı moda ayrılır. Bu nedenle yıldırım kaynaklı ısınmanın etkisinin tam olarak bilinmesi için tüm bu modların etkilerinin dalganın kutuplanmasına bağlı olarak toplaması gereklidir.



Şekil 6.7. Yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının farklı modlarının toplanması ile alt iyonkürenin elektron sıcaklığındaki tedirginliğin yükseklik ile değişimi

Daha önceki çalışmalarda olduğu gibi elektron sıcaklığı bu farklı modların etkileri toplanarak birlikte hesaplanmıştır (İnan vd., 1991). Dalga $+z$ -yönünde ilerlerken oluşan sağa ve sola (R ve L Modu) kutuplanmış dalgaların ve O ve X modlarının birlikte ortama etkileri Şekil 6.7’te gösterilmiştir. Şekilden görüleceği üzere elektron sıcaklığı E_{100} ün 1 V/m lik değerinde ortam sıcaklığının yaklaşık 20-25 katına kadar, E_{100} ün 10 V/m lik değerinde ortam sıcaklığının yaklaşık 100-110 katına kadar artar. Şekilde aynı zamanda O ve X-Modu dalgaların birlikte elektron sıcaklığı üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi elektron sıcaklığı E_{100} ün 1 V/m’lik değerinde ortam sıcaklığının yaklaşık 20-25 katına kadar ve 10 V/m’de yaklaşık 120-130 katına kadar artar. Bu artış Rodriguez vd. (1992) nin Şekil 6.6’da “c” ile gösterdikleri elektron yükseklik değişimini kullanarak yaptıkları hesaplamalardan elde edilenler ile örtüşmektedir.

Uygulanan bir manyetik alanın varlığında iyonlaşmış bir ortamda ilerleyen bir dalga iki karakteristik dalgaya ayrılır (Ratcliffe, 1959). Bu durumun tam tersi durumda yani, manyetik alanın yokluğunda ($B=0$) plazma içinde ilerleyen dalga farklı modlara ayrılmayabilir. Bu tez çalışmasında bu hipotezi doğrulayacak sonuçlar elde edilmiştir. Yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının alt iyonküre elektron sıcaklığı üzerindeki etkisinin tüm dalga modları için aynı olduğu görüldü. Bu çalışmada kullanılan modelde manyetik alanın ihmal edildiği koşullarda elde edilen elektron sıcaklık değerlerinin tüm modlar için maksimuma ulaştığı sıcaklık ve bu sıcaklığa ulaştığı yükseklik Tablo 6.1’de gösterilmiştir.

Tablo 6.1. Manyetik alanın yokluğunda ($B=0$) yıldırım kaynaklı elektromanyetik dalganın farklı modlarının E_{100} değerlerinin elektron sıcaklığı üzerindeki etkisinin maksimuma ulaştığı yükseklik ve bu yükseklikteki sıcaklık değeri

	L-Modu		R-Modu		O-Modu		X-Modu	
E_{100} (V/m)	h (km)	T_e (°K)	h (km)	T_e (°K)	h (km)	T_e (°K)	h (km)	T_e (°K)
1	83,8	3029,603	83,8	3029,603	83,8	3029,603	83,8	3029,603
2	84,5	3823,912	84,5	3823,912	84,5	3823,912	84,5	3823,912
3	85,1	4516,833	85,1	4516,833	85,1	4516,833	85,1	4516,833
4	86,1	5204,56	86,1	5204,56	86,1	5204,56	86,1	5204,56
5	87,3	5933,835	87,3	5933,835	87,3	5933,835	87,3	5933,835
6	87,9	6728,044	87,9	6728,044	87,9	6728,044	87,9	6728,044
7	88,4	7603,388	88,4	7603,388	88,4	7603,388	88,4	7603,388
8	88,7	8582,081	88,7	8582,081	88,7	8582,081	88,7	8582,081
9	89,1	9692,491	89,1	9692,491	89,1	9692,491	89,1	9692,491
10	89,4	10972,59	89,4	10972,59	89,4	10972,59	89,4	10972,59

Manyetik alanın olması durumunda ortam çift kırıcı hale gelir ve dalga ilerlemesine bağlı olarak farklı modlara ayrılır (Davies,1965). Tablo 6.2’den açık bir şekilde görüldüğü üzere bu konu hakkında daha önce yapılan bazı çalışmalarda ihmal edilen manyetik alanın etkisinin hesaplamaya dâhil edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

Tablo 6.2. Manyetik alanın varlığında yıldırım kaynaklı EM dalganın farklı modlarının E_{100} değerlerinin elektron sıcaklığı üzerindeki etkisinin maksimuma ulaştığı yükseklik ve bu yükseklikteki sıcaklık değeri

	L-Modu		R-Modu		O-Modu		X-Modu	
E_{100} (V/m)	h (km)	T_e (°K)	h (km)	T_e (°K)	h (km)	T_e (°K)	h (km)	T_e (°K)
1	84,2	3052,843	83,1	2853,85	83,8	3029,603	84,1	3033,448
2	84,8	3871,573	83,6	3605,421	84,5	3823,912	84,8	3830,751
3	85,1	4589,671	84,1	4239,263	85,1	4516,833	85,5	4528,296
4	86,0	5298,153	84,6	4851,202	86,1	5204,56	86,5	5221,424
5	86,5	6035,943	85,6	5475,571	87,3	5933,835	87,3	5955,29
6	87,3	6835,602	87,1	6154,843	87,9	6728,044	87,9	6753,762
7	87,9	7725,578	87,8	6911,283	88,4	7603,388	88,4	7634,167
8	88,4	8731,793	88,2	7751,39	88,7	8582,081	88,8	8618,587
9	88,8	9886,346	88,6	8696,031	89,1	9692,491	89,1	9735,805
10	89,2	11186,78	88,9	9771,864	89,4	10972,59	89,4	11027,81

Manyetik alanın dâhil edildiği ve edilmediği koşullarda elde edilen sonuçların verildiği Tablo 6.1 ve 6.2 karşılaştırıldığında, manyetik alanın ortamı çift kırıcı hale getirdiği net bir şekilde görülmektedir (Davies, 1965). Manyetik alanın sıfır olduğu durumda dalga modlarının elektron sıcaklığı üzerindeki etkisinin aynı olduğu görülmektedir. Manyetik alan dâhil edildiğinde ise EM dalganın farklı modlarının elektron sıcaklığı üzerindeki etkisinin birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Bu durum manyetize olmamış plazmalarda EM dalganın tek bir modunun olmasına karşılık, manyetize bir plazmada EM dalgaların, manyetik alanla ilişkili yayılma doğrultusuna ve dalga kutuplanmasına bağlı olarak çoklu yayılma modlarının ortaya çıkacağını ifade eder (İnan ve Golkowski, 2010).

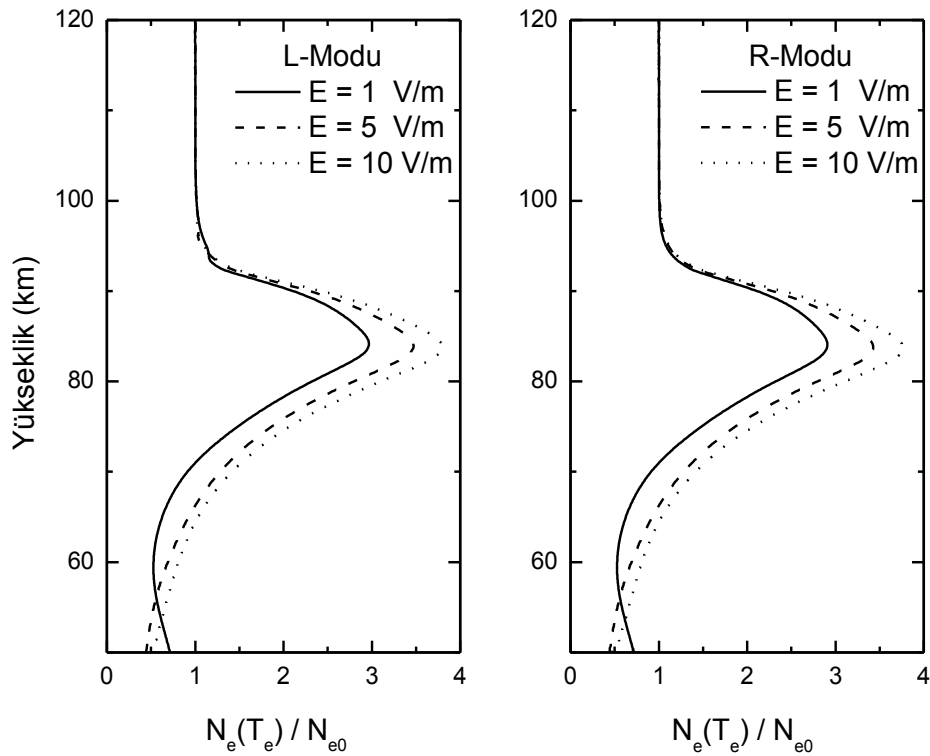
6.2. Alt İyonküredeki Elektron Yoğunluğunun EM Dalga Modlarına Göre Değişimi

Bu çalışmada, yıldırım tarafından oluşturulan VLF bandındaki EM dalga bir verici istasyonundan yayınlanıyormuş gibi düşünüldüğünden sürekli bir dalga olarak ele alınmıştır. Bundan dolayı daha önceki çalışmalarda yıldırımdan yayınlanan EM dalganın alt iyonküre elektron yoğunluğunda değişime sebep olması için elektrik alan değerinin 15 V/m'den büyük olması öngörüsü geçerli olmayabilir (Rodriguez vd., 1992). Ayrıca, 15 V/m'den düşük elektrik alan değerlerine sahip yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgalarının az da olsa bir iyonlaşmaya sebep olacağı bilinmektedir (İnan vd., 1991). Elektron yoğunluğunun gevşeme süresinin 10-100 s arasında olduğu D bölgesinde, yıldırım kaynaklı elektrik alan iyonlaşma devrinin yaklaşık 6 μ s olduğu alt iyonküre ile etkileşme süre içinde çok sayıda iyonlaşma üreterek elektron yoğunluğunun değişmesine sebep olacaktır (Rodriguez vd., 1992; Taranenko vd., 1993a,b). Bu tez çalışmasında yıldırım VLF radyo dalgasının 1-10 V/m arasındaki elektrik alan değerlerini kullandığımızdan nispeten düşük iyonlaşma olmasına karşın, etkileşme süresi içinde çok sayıda iyonlaşmanın meydana gelmesinden dolayı elektron yoğunluğundaki artış önemli değerlere ulaşabilir. Bu bağlamda, yıldırım kaynaklı VLF EM dalgaların alt iyonküreyi iyonlaştırması (5.32)-(5.36) denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan elektron sıcaklıkları bir önceki bölümde kullanılan sıcaklık modeli ile elde edilmiştir. Buna göre, bu çalışmada Model 1, 2 ve 3 olarak adlandırdığımız üç farklı model

ile yıldırım kaynaklı elektron yoğunluk değişimini inceledik. Bu modellere göre elektron yoğunluğunun incelenmesi aşağıda ayrı ayrı sunulmuştur.

6.2.1. Model 1

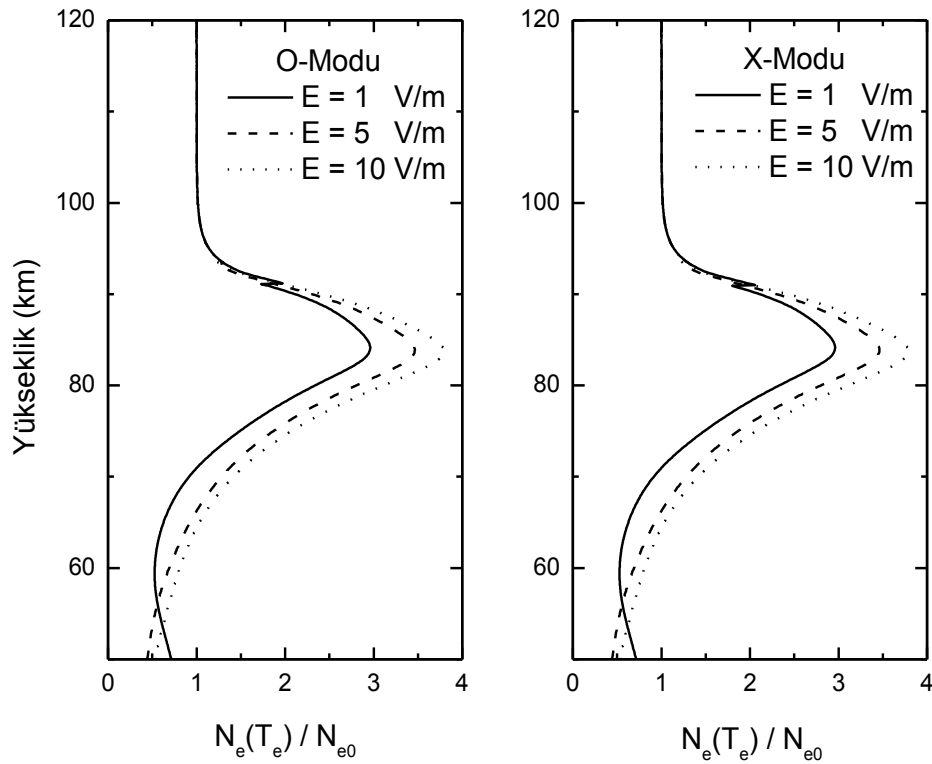
Model 1'e göre elektron yoğunluğunun değişimi Tomko vd.(1980) tarafından elde edilen olarak Denklem (5.32) ile hesaplanmıştır. Şekil 6.8 VLF radyo dalgasının L ve R modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisini göstermektedir. Bu şekildeki $N_e(T_e)$ elektron yoğunluğunun yıldırım kaynaklı EM dalgalar ile tedirgin olmuş durumunu, N_{e0} ise elektron yoğunluğunun tedirgin olmamış durumunu ifade eder. Şekil 6.8 incelendiğinde her iki mod için de yaklaşık 50-71 km arasında uygulanan elektrik alanın elektron yoğunluğunda bir azalmaya sebep olduğu görülmektedir. Bu azalma EM dalganın her iki modu için de E_{100} 'ün 1 V/m'lik değerinde 71 km'ye kadar, 5 V/m'lik değerinde 66,3 km'ye kadar ve 10 V/m'lik değerinde 64,5 km'ye kadar sürmektedir.



Şekil 6.8.Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının L ve R modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi

Elektrik alan değerin dolayısıyla elektron sıcaklığının artması ile elektron yoğunluğunun azalmaya devam ettiği yükseklik aşağıya doğru çekilmektedir. Elektron yoğunluğundaki bu azalma Model 1'e göre alt yüksekliklerde (50-72km) elektronların bağlanmasının baskın olmasından kaynaklanmaktadır (Pasko vd., 1998). Elektron yoğunluk azalmasının sona erdiği yüksekliklerden sonra, elektron yoğunluğu elektrik alanın değerine bağlı olarak artmaya başlamaktadır. E_{100} 'ün 1 V/m'lik değerinde 84,2 km, 5 V/m'lik değerinde 84,2 km ve 10 V/m'lik değerinde 83,8 km yükseklikte elektron yoğunluğundaki artış en büyük değerine ulaşmaktadır. Elektron yoğunluğundaki artış yaklaşık olarak 95 km yüksekliğe kadar devam eder. Daha sonra elektron yoğunluğu taban durum değerine döner.

Şekil 6.9 yıldırım kaynaklı EM dalganın O ve X modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisini göstermektedir.

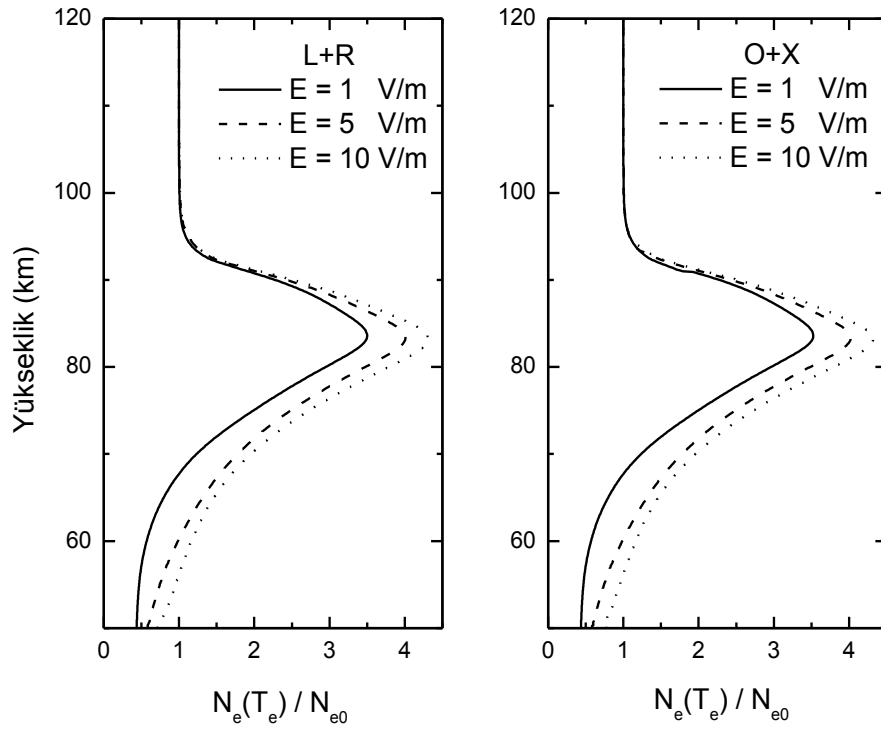


Şekil 6.9. Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının O ve X modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi

O ve X modlarının etkisi L ve R modlarındaki ile neredeyse aynıdır. Yine alt yüksekliklerde elektron yoğunluğundaki bir azalma meydana gelmektedir. Yaklaşık olarak

70 km yükseklikten sonra elektron yoğunluğu artmaya başlamaktadır. Bu artış yaklaşık olarak 95 km'ye kadar devam etmektedir.

CG dönüş darbesinden yayınlanan VLF radyo dalgasının kutuplanmaya bağlı olarak farklı modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi birlikte ele alındığında meydana gelen değişim Şekil 6.10'da verilmiştir. Şekil incelendiğinde bu modlar ayrı olarak ele alındığında olduğu gibi alt yüksekliklerde (50-70 km) elektron yoğunluğunda bir azalma meydana gelmektedir. Bu azalma E_{100} 'ün 1 V/m'lik değerinde 67,8 km yüksekliğe kadar, 5 V/m'lik değerinde 60,3 km'ye kadar ve 10 V/m'lik değerinde 56,3 km'ye kadar devam etmektedir. Ayrıca, elektron yoğunluğu üzerinde her modun etkisi ayrı ayrı ele alındığında 50 km ile 55 km arasındaki yüksekliklerde E_{100} 'ün 1 V/m'lik değerinin 5 V/m ve 10 V/m'ye kıyasla daha fazla artışa sebep olurken, modların etkisi birlikte ele alındığında bu durum ortadan kalkmaktadır.



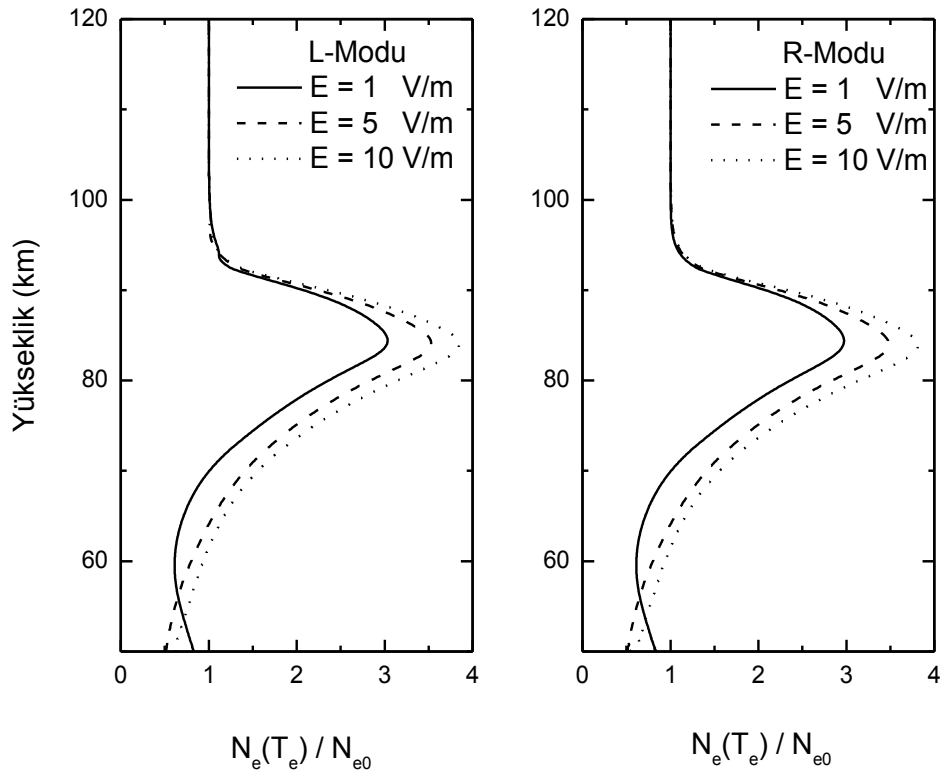
Şekil 6.10. Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının L ve R, O ve X modlarının toplamalarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi

Model 1'e göre, tüm modlar için elektron yoğunluğundaki maksimum artış ortam değerinin yaklaşık 3-4 katı kadar olmaktadır. Modların etkisi toplanarak incelendiğinde ise elektron yoğunluğundaki artış ortam değerinin yaklaşık 4,5 katına kadar çıkmaktadır.

6.2.2. Model 2

Daha önce ifade edildiği gibi, Model 1 yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının alt iyonküre elektron yoğunluğu üzerindeki etkisini tam olarak belirlemek için yeterli değildir. Bu nedenle çalışmamızda Rodriguez ve İnan (1994) tarafından kullanılan modele parametrelerinde herhangi bir değişiklik yapmadan Tablo 5.1’de verilen değerleri kullanarak elde ettiğimiz sonuçları Model 2 olarak sunduk. Model 2’de sadece bizim ısınma modelimizden elde ettiğimiz sıcaklık değerlerini ve (6.33)-(6.36) denklemlerini kullanarak yapılan hesaplamalar Şekil 6.11-6.13’de gösterilmiştir.

Şekil 6.11 yıldırım kaynaklı VLF EM dalganın L ve R modlarının alt iyonküre elektron yoğunluğu üzerindeki etkisini göstermektedir.

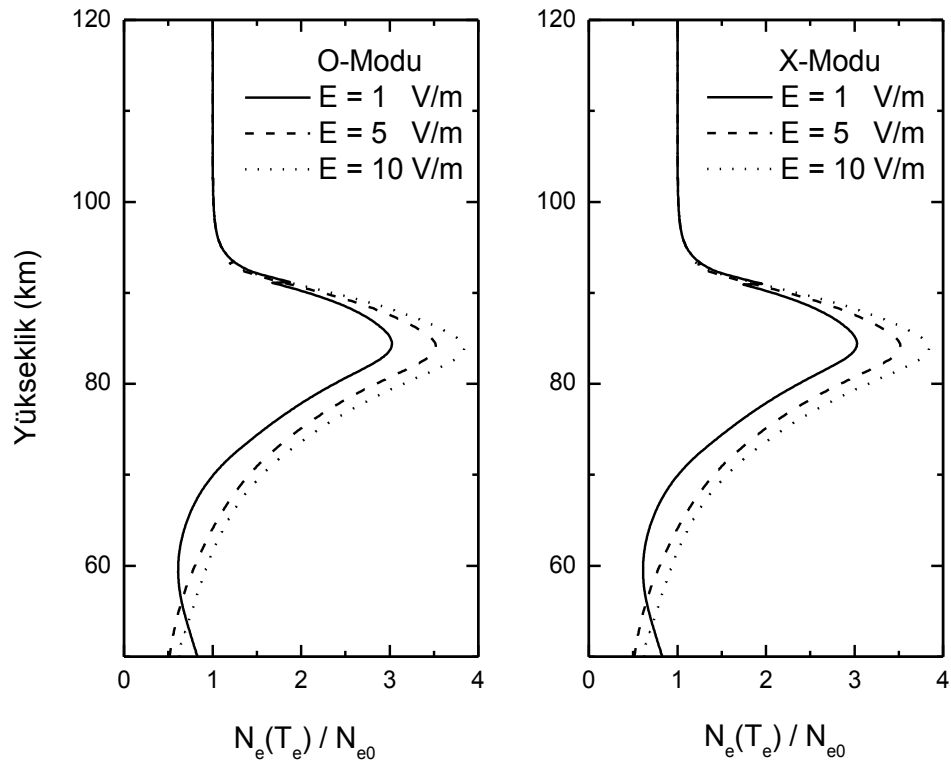


Şekil 6.11. Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının L ve R modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi

Şekil 6.11 incelendiğinde alt yüksekliklerde elektron yoğunluğunda Model 1’de olduğu gibi azalmanın meydana geldiği görülmektedir. EM dalganın her iki modu için de E_{100} ’ün 1 V/m’lik değerinde 70 km’ye kadar, 5 V/m’lik değerinde 64,1 km’ye kadar ve 10 V/m’lik değerinde 61,6 km’ye kadar bu azalma devam etmektedir. Bu yüksekliklerden sonra

elektron yoğunluğu artan E_{100} değeri ile artmaktadır. Bu artış E_{100} 'ün 1 V/m'lik değerinde 84,4 km, 5 V/m'lik değerinde 84,1 km ve 10 V/m'lik değerinde 84,1 km yükseklikte en büyük değerine ulaşmaktadır. Elektron yoğunluğundaki artış yaklaşık olarak 95-100 km yüksekliğe kadar devam eder. Daha sonra elektron yoğunluğu taban durum değerine döner.

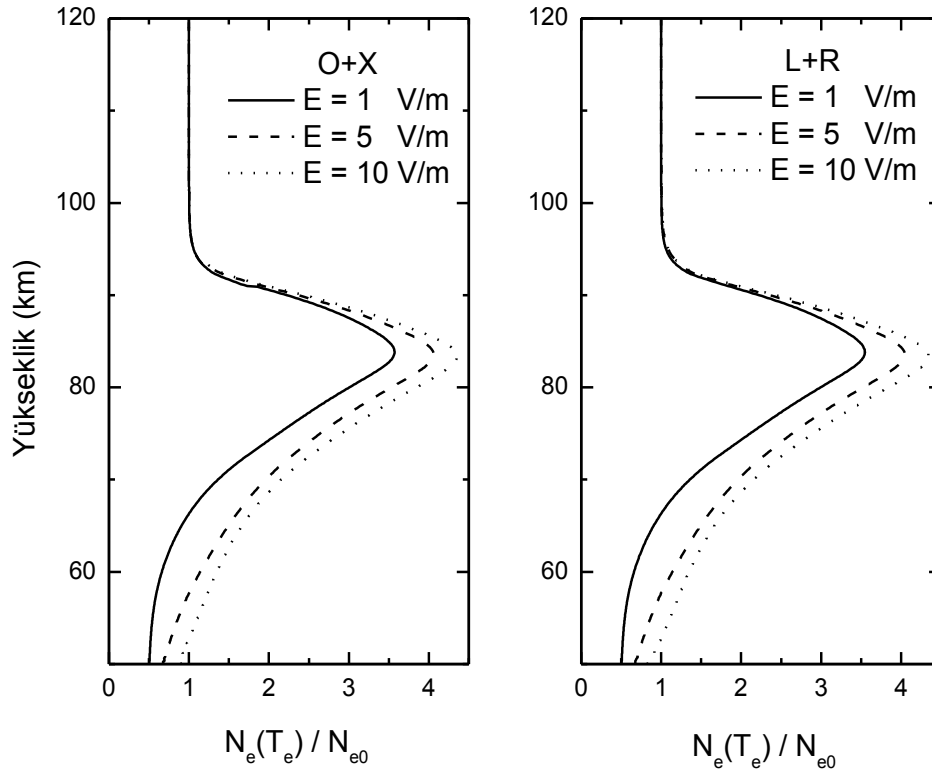
Yıldırım kaynaklı EM dalganın O ve X modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.12. Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının O ve X modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi

Bu modların elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi L ve R modlarındaki ile neredeyse aynıdır. EM dalganın her iki modu için de E_{100} 'ün 1 V/m lik değerinde 69,9 km'ye kadar, 5 V/m'lik değerinde 64,1 km'ye kadar ve 10 V/m'lik değerinde 61,6 km'ye kadar elektron yoğunluğundaki azalma devam etmektedir. Bu yüksekliklerin yukarısında yaklaşık 95 km'ye kadar elektron yoğunluğunda artış olmaktadır. Artışın maksimum olduğu yükseklikler 1, 5 ve 10 V/m lik elektrik alan değerleri için sırasıyla 84,4 km, 84 km ve 84 km'dir.

Model 2’de L ve R modlarının ve O ve X modlarının toplanması durumunda elektron yoğunluğundaki değişim Şekil 6.13’de gösterilmiştir. Şekil 6.13’ten görüleceği üzere elektron sıcaklığının artması ile ortam elektrik alan değerlerinde alt yüksekliklerde etkili olan üç cisim bağlanma sürecinin etkisinin azaldığı görülmektedir. EM dalganın modlarının toplanması ile elektron yoğunluğu, elektrik alanın 1 V/m lik değerinde L+R durumu için 66,4 km’ye, O+X durumunda 66,3 km’ye kadar, 5 V/m lik değerde iki durum için de 57,7 km’ye kadar ve 10 V/m lik durumda 52,8 km’ye kadar azalmaktadır. Bu yüksekliklerden yukarıda yaklaşık 95 km’ye kadar elektron yoğunluğu artmaktadır. Elektron yoğunluğundaki artışın maksimum olduğu yükseklik elektrik alanın 1, 5 ve 10 V/m lik değerleri için her iki durumda da sırasıyla 83,8, 83,5 ve 83,3 km dir. Bu yüksekliklerdeki yoğunluk değerleri ortam yoğunluk değerlerinin 3,5-4,5 katı arasındadır.



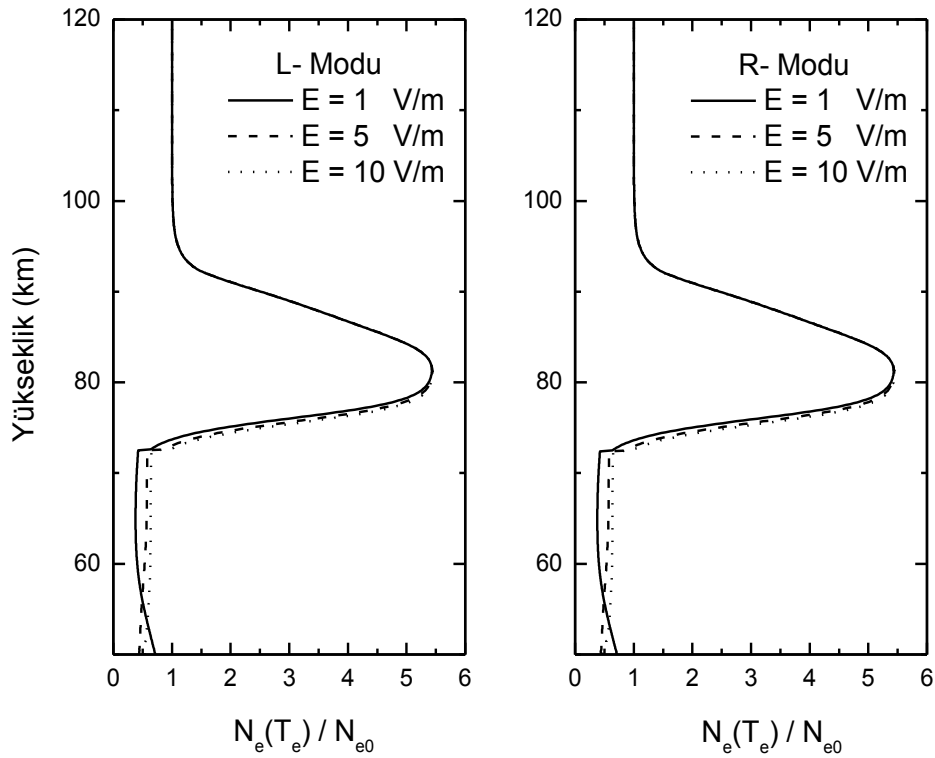
Şekil 6.13.Yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının L+ R ve O+X durumlarında elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi

Model 1 ve Model 2’nin birinci durumu karşılaştırdığımızda her iki model için de düşük sıcaklıklarda elektronların üç cisim bağlanmasını etkili olduğu görülmektedir. aynı zamanda Model 2’de ayrışma frekansının dahil edilmesinden dolayı elektron yoğunluğundaki artışın Model 1’e göre daha fazla olduğu görülmektedir.

6.2.3. Model 3

Model 2'ye her ne kadar elektron ayrışmalarının dâhil edilmesine rağmen, bu modele özellikle 72.6 km'den sonra etkili olan aktif türlerden dolayı meydana gelen ayrışma ve nispeten yüksek elektrik alanlarda etkili olan elektron iki cisim bağlanmasının dâhil edilmemesinden dolayı alt iyonkürede yıldırım kaynaklı EMP alanlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi tam olarak belirlenmez. Bu tez çalışmasında Model 2'ye aktif türlerin ayrışmasının ve iki cisim bağlanmasının dâhil edilmesi ile elde edilen model Model 3 olarak adlandırıldı.

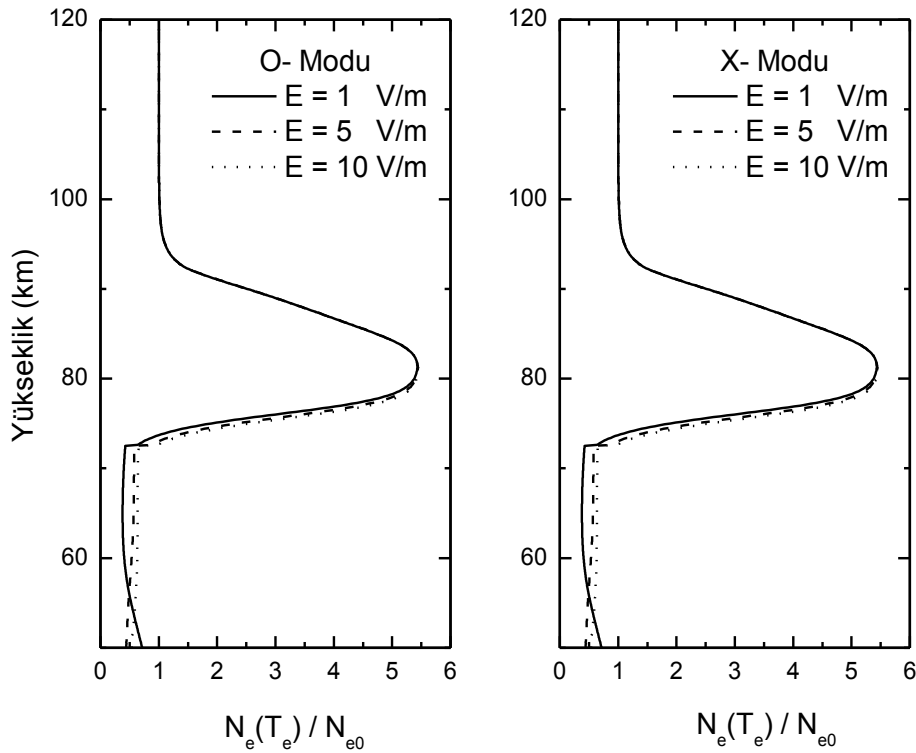
Model 2'ye dâhil edilen bu yeni parametrelerin etkilerini daha net bir şekilde görmek için her bir parametre modele ayrı ayrı dâhil edilmiştir. Buna göre ilk önce aktif türlerden dolayı meydana gelen ayrışma (Denklem (5.41)) modele dâhil edilmiş iki cisim bağlanması (Denklem (5.39)) dâhil edilmemiştir. Bu şekilde elde edilen sonuçlar Şekil 6.14-6.16'da gösterilmiştir. Şekil 6.14 yıldırım VLF radyo dalgasının L ve R modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisini gösterir.



Şekil 6.14. Yıldırım VLF radyo dalgasının L ve R modlarının aktif türlerden ayrışmanın modele dâhil edildiği durumda elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi

Şekil 6.14'ten görüldüğü gibi aktif türler olarak adlandırılan oksijen (O) ve azot (N) atomlarından elektron ayrışmasının hesaplamaya dâhil edilmesiyle elektron yoğunluğundaki artış belirgin bir hal almaktadır. Önceki iki durumda (Model 1 ve Model 2) olduğu gibi alt yüksekliklerde elektron bağlanması elektron ayrışması üzerinde baskındır. Yaklaşık olarak aktif türlerin ortamda görünmeye başladığı yüksekliğe kadar elektron yoğunluğunda bir azalma söz konusudur. Bu yükseklikten sonra elektron yoğunluğu hızlıca artmaktadır. Elektron yoğunluğundaki artış her iki mod için de yaklaşık olarak 81-82 km civarında tepe değerine ulaşır. Bu yüksekliklerdeki artış tedirgin olmamış durumun yaklaşık olarak 5,5 katına kadar ulaşır.

CG yıldırım boşalmasından yayınlanan EMP'un alt iyonküreye ulaştıktan sonra oluşan diğer modların (O ve X modu) elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi ise Şekil 6.15'te gösterilmiştir.

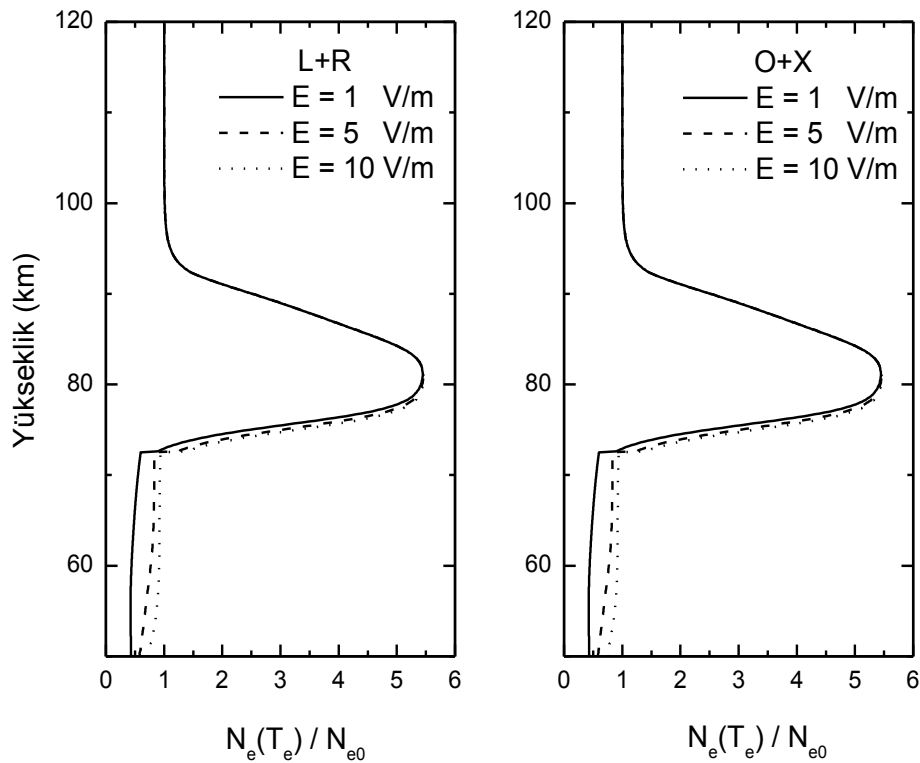


Şekil 6.15. Yıldırım VLF radyo dalgasının O ve X modlarının aktif türlerden ayrışmanın modele dâhil edildiği durumda elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi

Şekil 6.15 incelendiğinde, yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının L ve Rmodlarında olduğu gibi 50-72.6 km arasında elektron bağlanmasının etkili olduğu görülmektedir. Bağlanmadan dolayı meydana gelen elektron kaybı, oksijen ve azot atomlarının bağlanmalı

ayırışmasından dolayı azalmaktadır. Daha sonra elektron yoğunluğu keskin bir şekilde artmaktadır. Oluşan bu birleşmeli ayırışma elektron yoğunluğunu ortam değerinin 5-5,5 katına kadar artmasına sebep olmaktadır. Elektron yoğunluğundaki artış yaklaşık 80-82 km arasında tepe değerine ulaşmaktadır. Daha sonra azalarak yaklaşık 95 km civarında taban durumuna geri dönmektedir.

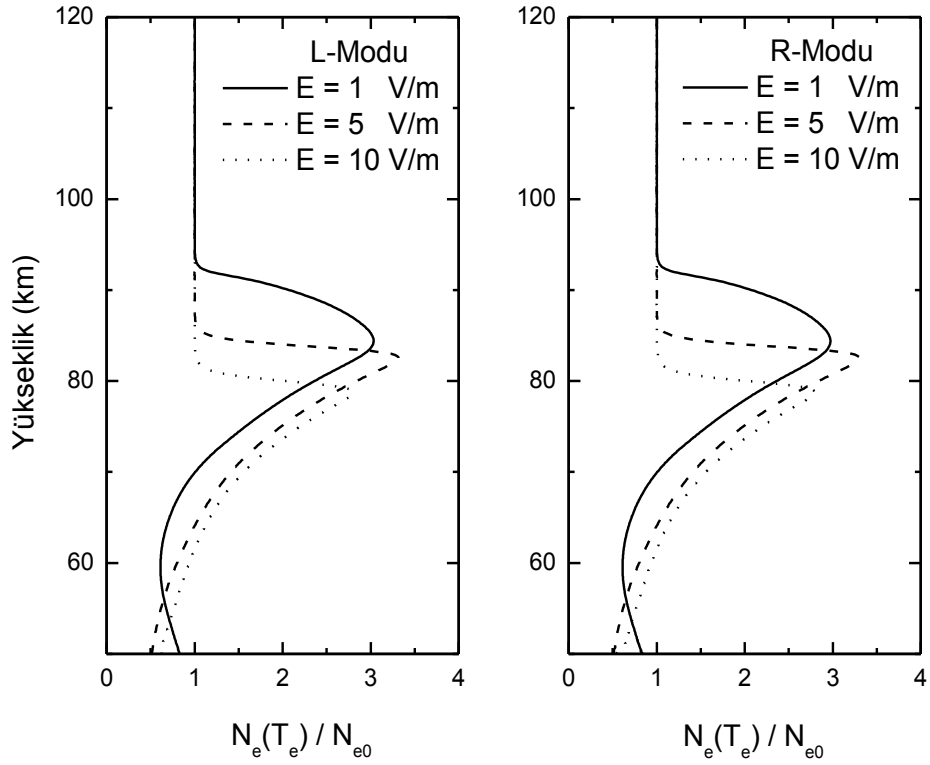
Elektron ayırışma frekansına oksijen ve azot moleküllerinden dolayı meydana gelen ayırışma dâhil edildiği durumda yıldırım kaynaklı VLF EM dalgasının farklı modlarının toplaması sonucunda elektron yoğunluğunda meydana gelen değişim Şekil 6.16'da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere elektron yoğunluğundaki değişimin özellikle 72,6 km'ye kadar yıldırım VLF EM dalgasının elektrik alanına bağımlılığı daha belirgin bir şekildedir. EM dalganın L ve R modlarının ve O ve X modlarının toplanması ile elde edilen sonuçlarda da alt yüksekliklerde bağlanma daha baskındır.



Şekil 6.16. Yıldırım VLF radyo dalgasının L+R ve O+X durumunda alt iyonkürenin aktif türlerden ayırışmanın modele dâhil edildiği durumda elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin yükseklikle değişimi

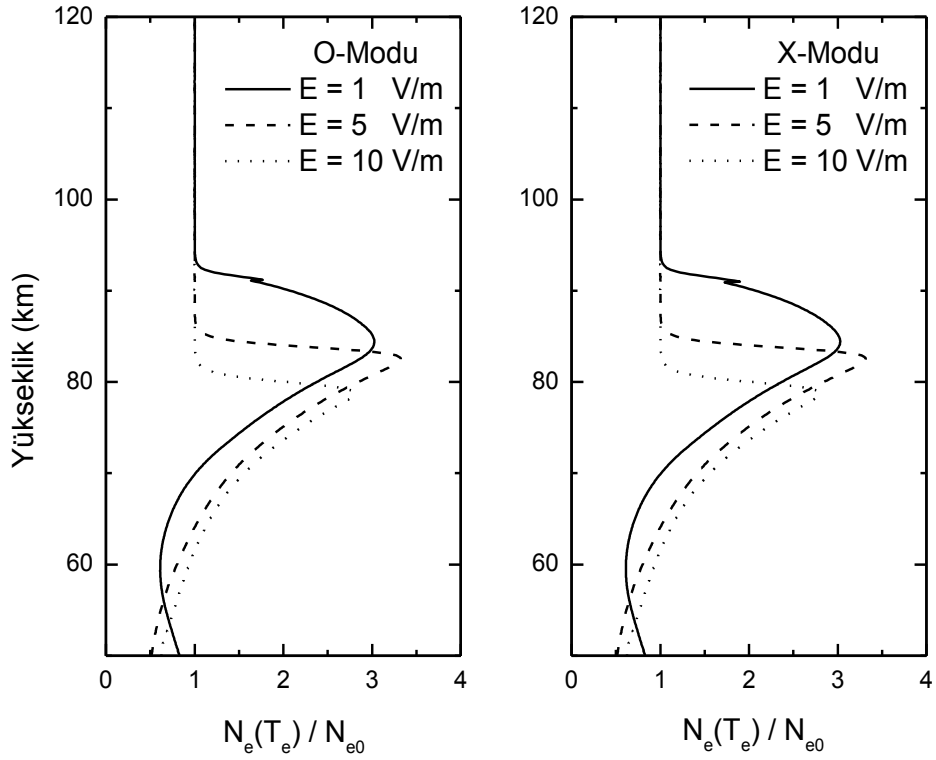
Düşük elektron sıcaklığındaki bağlanma daha yüksek iken yüksek elektron sıcaklığındaki bağlanma daha düşüktür. Elde edilen bu sonuç daha önce ifade edildiği üzere ortam sıcaklık değerlerinde elektronun üç cisim bağlanmasının baskın olmasından kaynaklanmaktadır. Bu durum üç cisim bağlanmasının (Tablo 5.1'e bakınız) düşük sıcaklıklarda daha etkili olduğunu gösterir. Ayrıca, O ve N atomlarından elektron ayrışmasından dolayı meydana gelen elektron yoğunluğundaki artışların yıldırım VLF radyo dalgasının tüm modları için neredeyse aynı olduğu görülmektedir. Bu durum Denklem (5.42)'den de görüleceği üzere, bu tez çalışmasında kullanılan aktif türlerden dolayı meydana gelen ayrışmanın bağlanmadan daha düşük bir elektrik alan eşiğine sahip olmasından kaynaklanabilir (Marshall, 2012). Ayrıca bu durum O_2^- nin oldukça düşük elektron ilgisi (0.43 eV) ile yakından ilişkilidir (Lehtinen ve İnan, 2007).

Nispeten yüksek elektrik alan değerlerinde EM dalga yayınlayan yıldırım boşalmalarının alt iyonküre elektron yoğunluğu üzerindeki etkisinin tam olarak tahmin edilebilmesi için iki cisim bağlanma reaksiyonlarının da hesaplamaya dâhil edilmesi gerekliliği yukarıda ifade edilmişti. Bu doğrultuda Denklem (5.39) ile verilen iki cisim bağlanma ifadesi modele dâhil edilip denklem (5.41) ile verilen aktif türlerden ayrışma ifadesinin modele dâhil edilmemesi durumunda işlemler yapılmış ve sonuçlar Şekil 6.17-6.19'da gösterilmiştir. Şekil 6.17 EM dalganın L ve R modlarının iki cisim bağlanmasının dâhil edildiği durum için elektron yoğunluğu üzerindeki etkisini göstermektedir.



Şekil 6.17. Elektronların iki cisim bağlanması dahil edildiği durumda yıldırım VLF radyo dalgasının L ve R modlarının alt iyonkürenin elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi

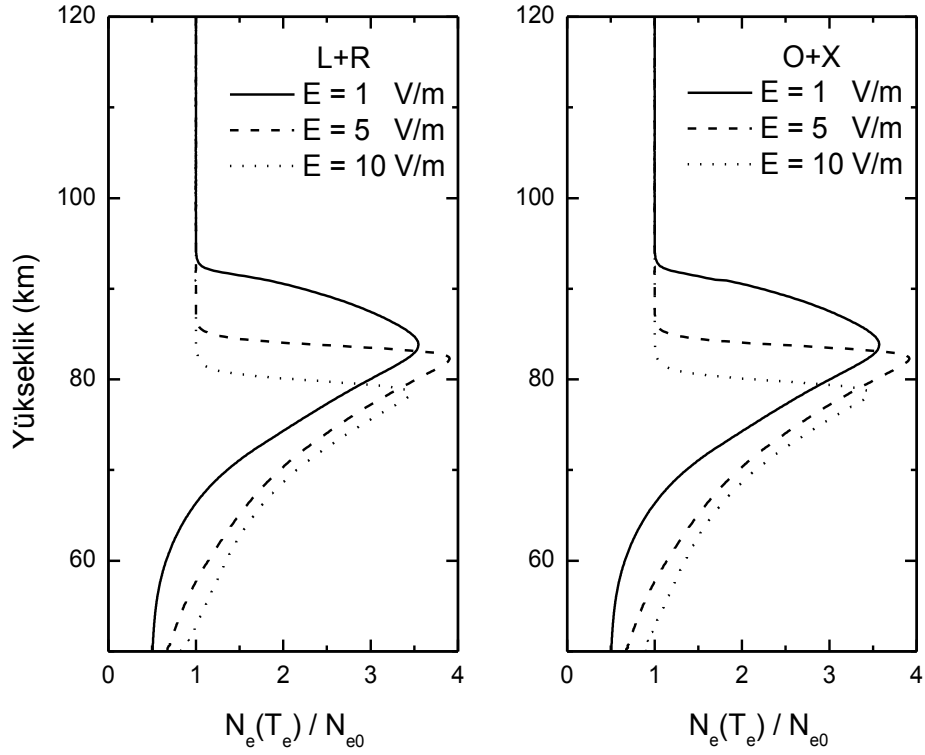
Şekil 6.17’den, yıldırım EM dalgasının L ve R modlarının Model 1, Model 2 ve Model 3’ün bundan önce ele alınan diğer durumunda olduğu gibi yaklaşık 50-66 km arasında elektrik alanın şiddetine bağlı olarak elektron yoğunluğunun azalmasına yol açtığı görülmektedir. Alt yüksekliklerde üç cisim bağlanmasının baskın olmasının sonucu olarak bu durum gerçekleşmiştir. Bu yüksekliklerin yukarısında elektron yoğunluğunda bir artış meydana gelmektedir. Bu artış VLF radyo dalgasının L ve R modları için 1 V/m lik elektrik alan değerinde 84.4 km’de, 5 V/m lik değerinde 82.6 km’de ve 10 V/m lik değerinde 78.7 km’de en büyük değerine ulaşmaktadır. Elektrik alan değerinin artması ile elektron yoğunluğunun maksimuma ulaştığı yükseklik aşağı doğru çekilmektedir. Burada elektronların iki cisim bağlanmasının etkisi net bir şekilde görülmektedir. Özellikle artan E_{100} ile birlikte elektron yoğunluk artışının daha hızlı bir şekilde taban durumuna dönmesi bu bağlanmanın etkisini göstermektedir. İki cisim bağlanma frekansının Model 2’ye dâhil edildiği durum için EM dalgaının O ve X-modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi Şekil 6.18’de gösterilmiştir.



Şekil 6.18. Elektronların iki cisim bağlanması dahil edildiği durumda yıldırım VLF radyo dalgasının O ve X modlarının alt iyonkürenin elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi

Yıldırım EM dalgasının O ve X modları sıcaklığa bağlı olan üç cisim bağlanmasından dolayı yaklaşık 50-67 km arasında elektron yoğunluğunun azalmasına yol açar. Daha sonra yükseklikle elektron yoğunluğu tüm E_{100} değerleri için artmaya başlar. Bu artış elektrik alanın 1 V/m lik değerinde 84,4 km'ye, 5 V/m lik değerinde 82,6 km'ye ve 10 V/m lik değerinde 78,7 km yükseklikte en büyük değerine ulaşmaktadır. Bu yüksekliklerden sonra elektrik alanın şiddeti ile ters orantılı olarak 85-95 km arasında taban durumuna geri döner.

Model 1, Model 2 ve Model3'ün bundan önce ele alınan durumu için yapıldığı gibi EM dalgaının L ile R ve O ile X modları toplandığında elektron yoğunluğundaki değişim Şekil 6.19'da gösterilmiştir.

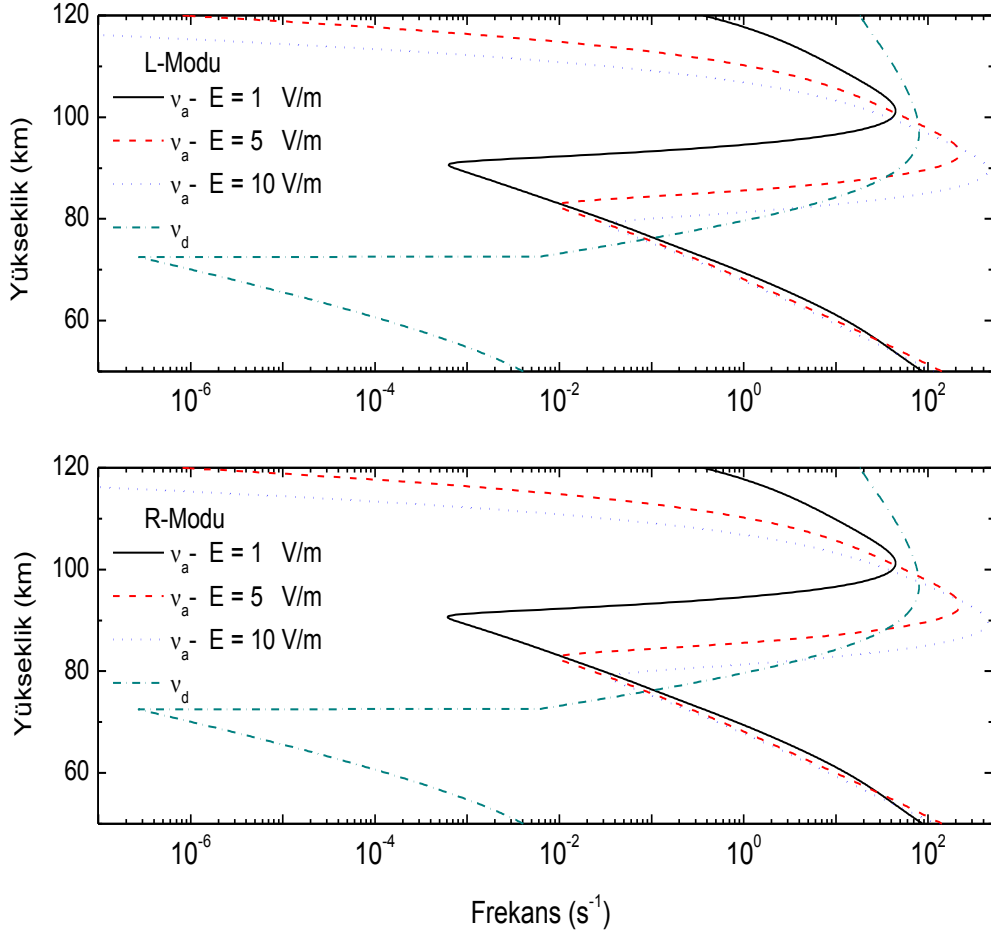


Şekil 6.19. Elektronların iki cisim bağlanması dâhil edildiğinde EM dalganın L+R ve O+X durumunda alt iyonkürenin tedirgin olmuş elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi

Model 3'te sadece elektron iki cisim bağlanmasının dâhil edildiği koşullarda yıldırım EM dalgasının L-R ve O-X modlarının etkilerinin birlikte ele alındığı durumda elektron yoğunluğunun alt yüksekliklerde azalmakta olduğu görülmektedir. Elektron yoğunluğundaki azalma elektrik alan değeri ile ters orantılıdır. En büyük azalma E_{100} 'ün 1 V/m lik değerinde olurken, en düşük azalma 10 V/m lik değerinde olmaktadır. Elektron yoğunluğu E_{100} 'ün 1 V/m lik değerinde 66,4 km'ye, 5 V/m'de 57,7 km'ye ve 10 V/m'de 52,8 km'ye kadar azalmaya devam etmektedir. Bu yüksekliklerden sonra elektron yoğunluğu artmaya başlamaktadır. Bu artış her iki durum için de elektrik alanın 1 V/m lik değerinde 83,8 km'de, 5 V/m lik değerinde 82,3 km'de ve 10 V/m lik değerinde 78,4 km'de tepe değerine ulaşır. Elektron yoğunluğu bu yükseklikten sonra iki cisim bağlanmasının sıklığına bağlı olarak azalmaya başlamaktadır.

İki cisim bağlanma süreci nispeten yüksek elektrik alanlarında baskın mekanizma olduğundan dolayı yüksek elektrik alan değerlerinde elektron yoğunluğundaki azalma daha fazla olmaktadır. Bu tez çalışmasında Model 2'ye ilk defa dâhil edilen iki cisim bağlanma

ve aktif türlerden dolayı var olan ayrışma frekansının ve düşük sıcaklıklarda etkili olan üç cisim bağlanma frekansının yıldırım EM darbesinin L ve R modlarına bağlı olarak değişimi Şekil 6.20’ de gösterilmiştir.

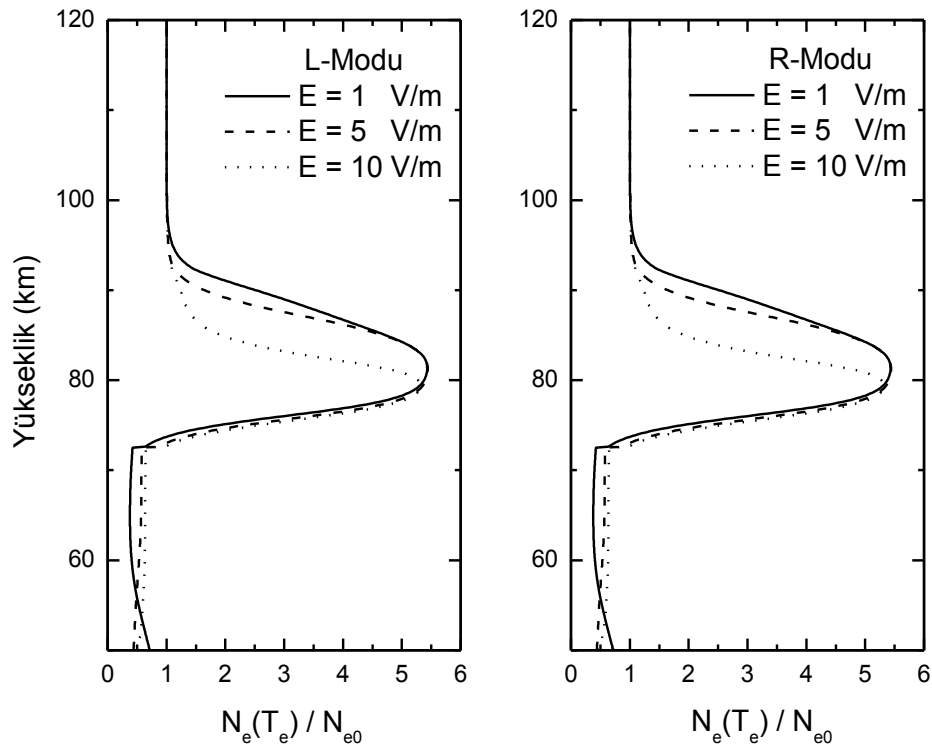


Şekil 6.20. Elektron ayrışma ve bağlanma frekanslarının EM dalganın L ve R modlarına göre yükseklikle değişimi. Burada v_d Denklem (5.41) vasıtasıyla elde edilmiştir. v_a elektronun iki ve üç cisim bağlanma kayıplarının toplamını gösterir

Şekil 6.20 incelendiğinde elektron bağlanma frekansının elektrik alan değeri ile ters orantılı olarak yükseklikle lineer olarak azaldığı görülmektedir. Azalmanın gerçekleştiği yüksekliklerde üç cisim bağlanmasının baskın olduğu görülmektedir (Rodriguez ve İnan, 1994). Daha sonra ise bağlanma frekansının hızla arttığı göze çarpmaktadır. Bu artış elektronların iki cisim bağlanmasından kaynaklanmaktadır. Elektrik alanın değeri arttıkça bağlanma frekansının artmaya başladığı yükseklik aşağı doğru kaymaktadır. Bu şekilde davranış, yukarıda modele iki cisim bağlanma frekansının dâhil edilmesi ile elde edilen sonuçlarda elektron yoğunluğundaki azalmanın sebebini göstermektedir. Elektron ayrışma

frekansı ise yine yükseklikle lineer olarak azalmaktadır. Bu azalma aktif türlerin ortamda görünmeye başladığı yüksekliğe kadar devam etmektedir. Bu yükseklikten sonra ayrışma frekansı hızla artmaktadır. Ayrışma frekansındaki bu ani artış modele aktif türlerden dolayı ayrışmanın dâhil edildiği durumda elektron yoğunluğundaki ani artışı açıklamaktadır.

Bu parametre analizinden sonra modele hem elektronların iki cisim bağlanma hem de aktif türlerden dolayı meydana gelen ayrışma reaksiyonlarını dâhil ederek elde ettiğimiz sonuçlar aşağıda gösterilmiştir. Şekil 6.21 EM dalganın L ve R modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisini gösterir. Şekilden görüleceği üzere EM dalganın her iki modu için de O ve N atomlarının gece alt iyonkürsünde görünmeye başladığı yüksekliğe kadar elektron yoğunluğunda bir azalma söz konusudur.

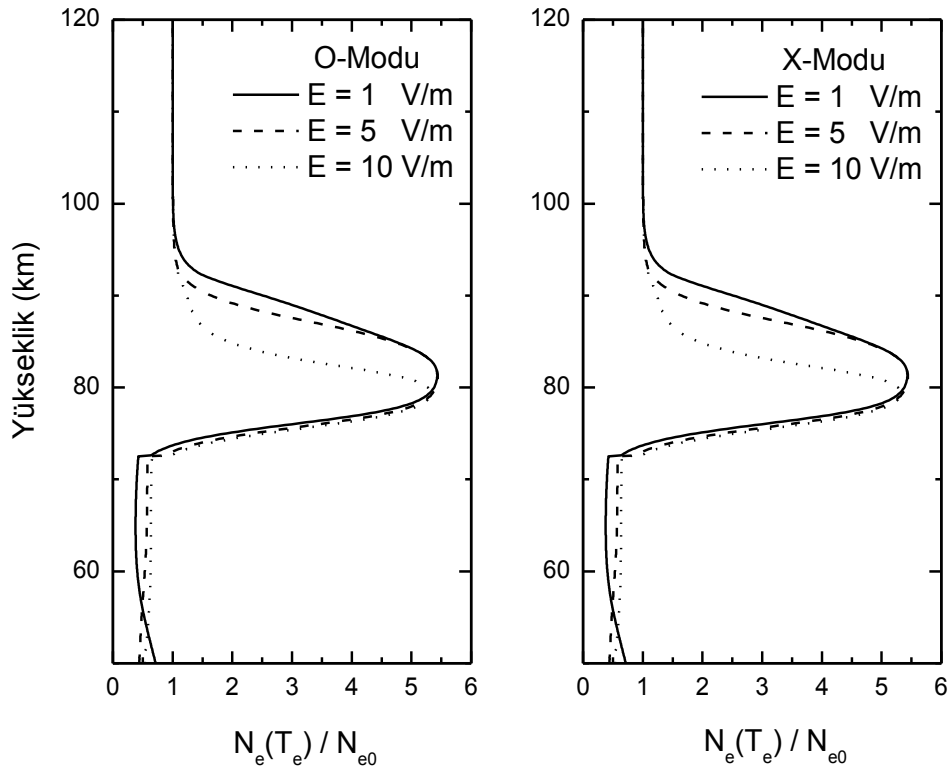


Şekil 6.21. Model 3 ün yardımıyla elde ettiğimiz yıldırım VLF radyo dalgasının L ve R modlarından dolayı meydana gelen elektron yoğunluğunun yüksekliğe göre değişimi

Bu durum daha önce ifade edildiği üzere elektronların üç cisim bağlanmasının bu yüksekliklerde baskın kayıp mekanizması olmasından kaynaklanmaktadır. Bu yükseklikten sonra elektron yoğunluğu 80-85 km civarında ortam değerinin yaklaşık 5,5 katına kadar artmaktadır. Böylece yaklaşık olarak 72-85 km arasında elektron ayrışmasının bağlanma

üzerine baskın olduğunu söyleyebiliriz. Elektron yoğunluğu tepe değerine ulaştıktan sonra özellikle elektronun iki cisim bağlanmasının etkin olmaya başlamasından dolayı EM dalganın elektrik alan değerlerine bağlı olarak elektron yoğunluğunda bir azalma meydana gelmektedir. Böylece yaklaşık 85-95 km arasında elektron bağlanma sürecinin ayrışma üzerine baskın olduğu söylenebilir.

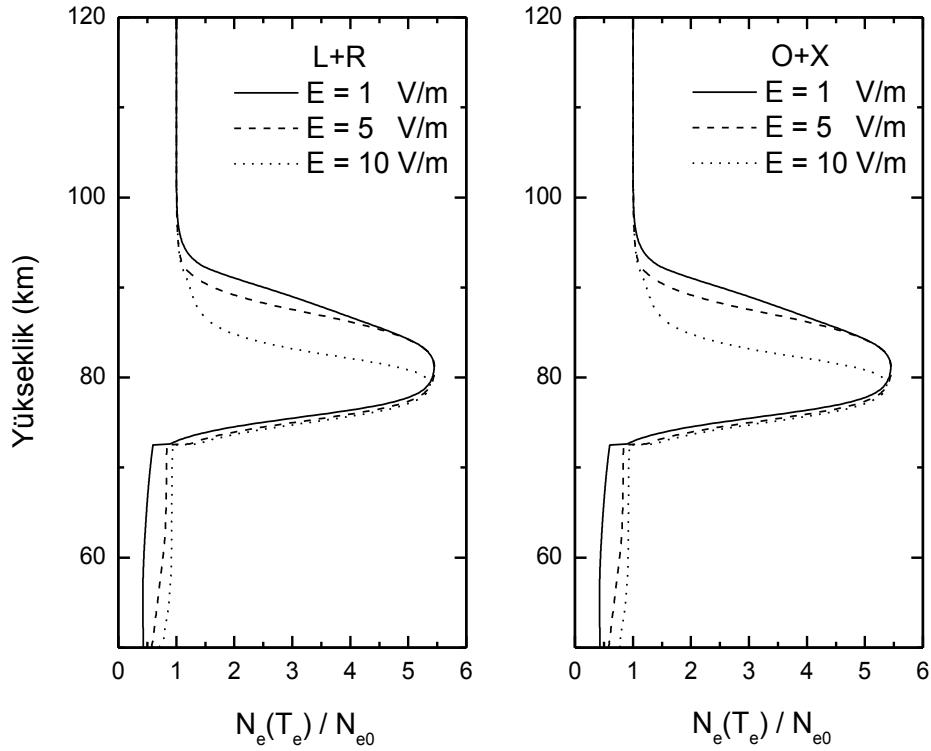
Yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının O ve X modlarının Model 3'e göre elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi Şekil 6.22'de gösterilmiştir.



Şekil 6.22. Model 3 ün yardımıyla elde ettiğimiz yıldırım VLF radyo dalgasının O ve X modlarından dolayı meydana gelen elektron yoğunluğunun yüksekliğe göre değişimi

EM dalganın bu modları yardımıyla elde edilen elektron yoğunluk değişimlerinin L ve R modlarındaki ile neredeyse aynı olduğu şekilden görülmektedir. Buna göre üç cisim bağlanma sürecinin etkinliğinden dolayı yaklaşık 72,6 km'ye kadar elektron yoğunluğunda bir azalma söz konusudur. Bu yükseklikten sonra ayrışma baskın olduğundan elektron yoğunluğunda bir artış meydana geldiği görülmektedir. Elektron yoğunluğu tepe değerine ulaştıktan sonra iki cisim bağlanma sürecinin etkin olmaya başlaması ile elektron yoğunluğundaki değişim ters yönlü olmaya başlar ve elektron yoğunluğu azalarak yaklaşık 90-95 km yükseklikte taban durumuna geri döner.

Daha önceki modellerle karşılaştırma açısından EM dalga modlarının birlikte ele alındığı durum şekli 6.23’de gösterilmiştir.

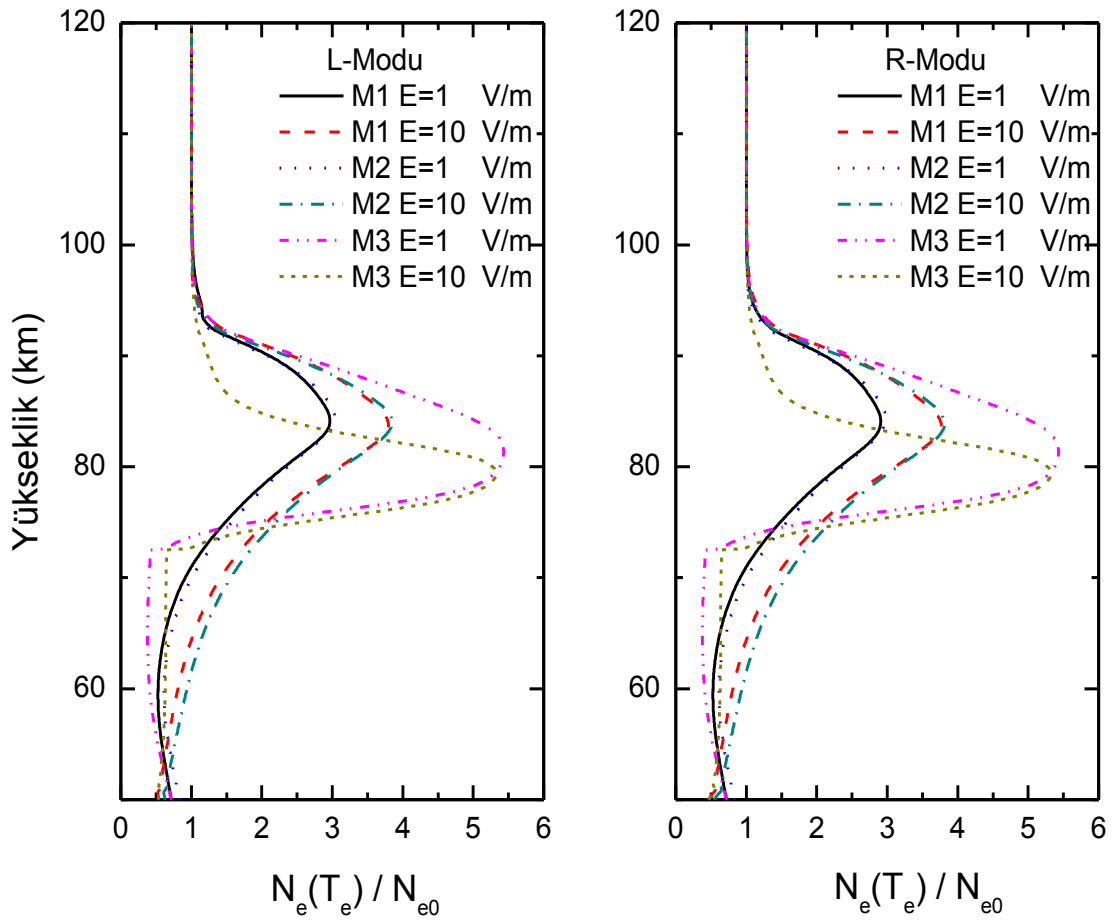


Şekil 6.23. Yıldırım VLF radyo dalgasının L- R ve O-X modlarından toplanması ile meydana gelen Model 3’ ün yardımıyla elde edilen elektron yoğunluğunun yüksekliğe göre değişimi

Şekil 6.23 incelendiğinde alt yüksekliklerde bağlanmanın etkin olduğu görülmektedir. Üç cisim bağlanmasının etkisi yaklaşık olarak 73 km’den sonra yerini aktif türlerden dolayı meydana gelen ayrışmaya bırakmaktadır. Böylece elektron yoğunluğu artmaya başlamış ve yaklaşık olarak 80 km civarında tepe değerine ulaşmıştır. Bu yükseklikten sonra elektron yoğunluğunda bir azalma söz konusudur. Bu, iki cisim bağlanma frekansının ayrışma frekansını geçmesi anlamına gelir. Elektron yoğunluğu büyük elektrik alan değerinde daha düşük yüksekliklerde küçük elektrik alan değerinde daha üst yüksekliklerde taban durumuna geri döner. Bu durum elektrik alan şiddeti ile iki cisim bağlanma frekansının doğru orantılı olmasından kaynaklanır.

6.2.4. İyonlaşma Modellerinin Karşılaştırılması

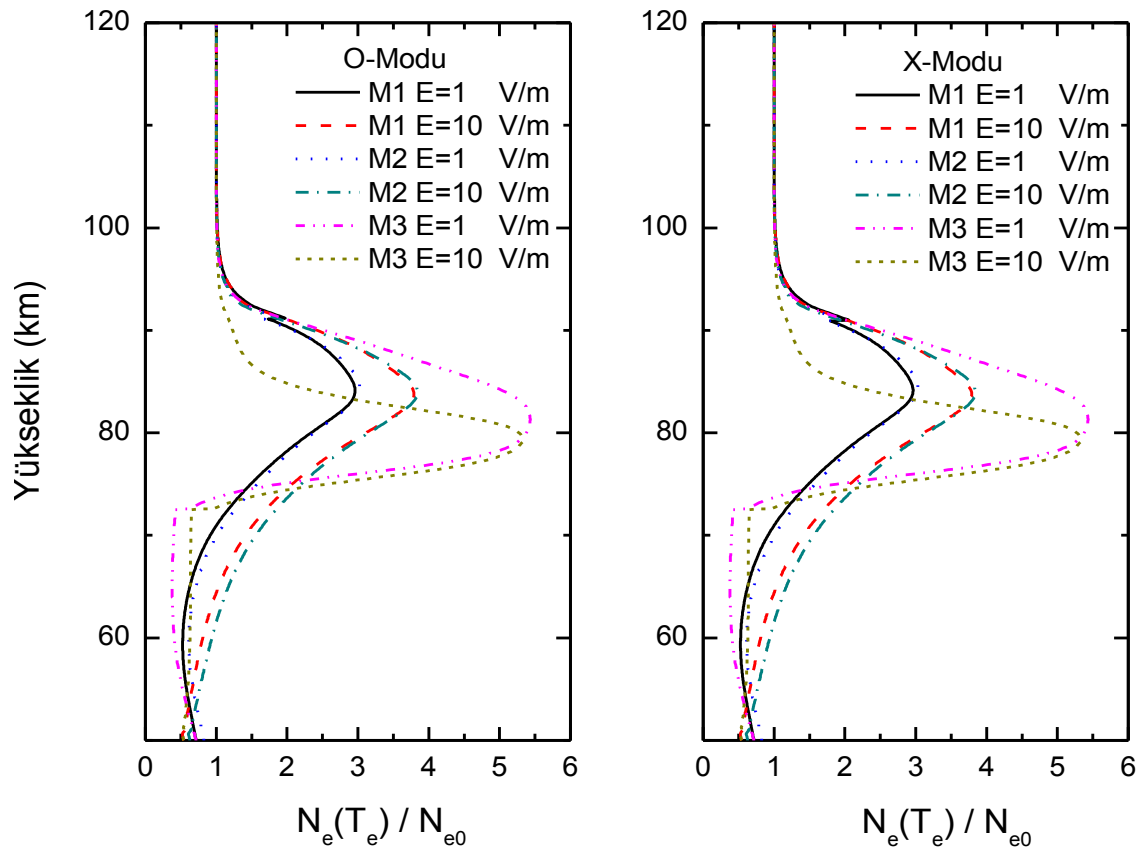
Yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgaları tarafından alt iyonkürenin iyonlaşmasının araştırıldığı bu bölümde hesaplamalarda kullanılan üç model karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmalar Şekil 6.24-6.26'da gösterilmiştir. Şekil 6.23 CG yıldırım boşalmasının dönüş darbesinden yayınlana VLF radyo dalgasının L ve R modlarının Model 1 (M1), Model 2 (M2) ve Model 3 (M3) kullanılarak elde edilen elektron yoğunluk değişimlerini gösterir.



Şekil 6.24. Yıldırımdan yayınlanan VLF radyo dalgasının L ve R modları tarafından M1, M2 ve M3 modelleri ile elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklik ile değişimi

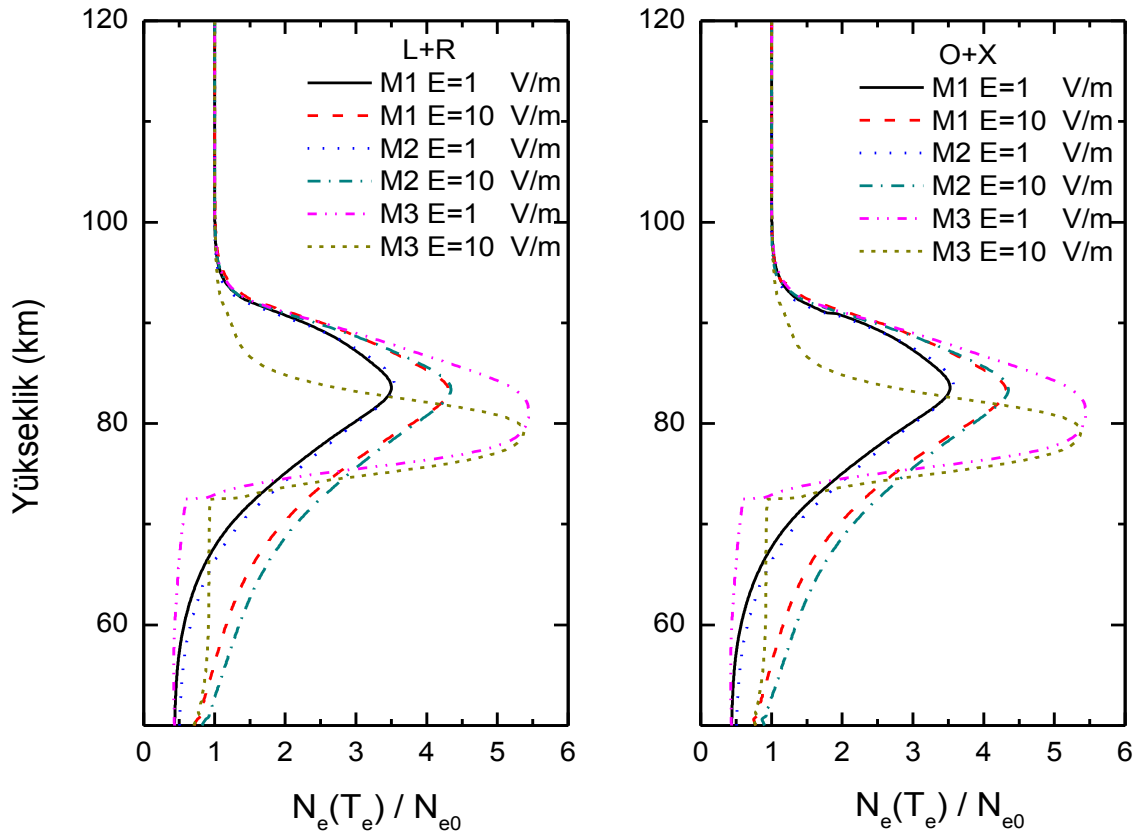
EM dalganın kutuplanmış modlarının (L ve R modu) üç modelin hepsinde de alt yüksekliklerde elektron yoğunluğunda azalmalara yol açtığı görülmektedir. Bu azalma 50-55 km arasında üç model için de neredeyse aynı büyüklüktedir. 55-73 km arasında ise M1 ve M3 için azalma yaklaşık aynı mertebededir. Bu modellerden M2 ile hesaplanan elektron

yoğunluğu ortam değerlerine diğerlerinden daha alt yüksekliklerde ulaşır. M1 ve M2’de elektron bağlanması ayrışma üzerine baskın olduğundan elektron yoğunluğundaki artış M3’e göre daha azdır. M1 ve M2 karşılaştırıldığında ise elektron yoğunluğundaki artışın M2’de daha fazla olduğu görülmektedir. Bu M2’ye bağlanmanın yanında ayrışmanın da dâhil edilmesinden kaynaklanmaktadır. M1 ve M2 için elektron yoğunluğundaki artış yaklaşık olarak 83 km civarında tepe değerine ulaşmaktadır. İlk iki modelde de elektron yoğunluğunda elektrik alan değerine bağlı olarak meydana gelen değişim çok farklı değildir. 1 V/m ile 10 V/m arasında çok az bir fark vardır. Buna karşın bu çalışmada M2’ye iki cisim bağlanmasının ve aktif türlerden dolayı meydana gelen ayrışmanın dâhil edilmesi elde edilen M3 ile yapılan hesaplamalarda özellikle iki cisim bağlanmasının elektrik alan değerine çok hassas bir bağlılığının olduğu göze çarpmaktadır. Aynı zamanda aktif türlerden ayrışmanın elektron yoğunluğunu M1 ve M2’ye kıyasla belirgin bir şekilde artırdığı görülmektedir.



Şekil 6.25. Yıldırımdan yayınlanan VLF radyo dalgasının O ve X modları tarafından M1, M2 ve M3 modelleri ile elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklik ile değişimi

Bu tez çalışmasında kullanılan tüm iyonlaşma modellerine göre EM dalganın ordinari ve ekstraordinari modlarının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi Şekil 6.25'te gösterilmiştir. Şekil 6.25 incelendiğinde EM dalganın sağa ve sola kutuplanmış modlarında olduğu gibi alt yüksekliklerde üç model için de bağlanmanın baskın olmasından dolayı elektron yoğunluğunda azalma olduğu görülmektedir. Bu azalma yaklaşık 73 km'ye kadar devam eder. Daha sonra elektron yoğunluğu artmaya başlar ve ortalama 80-85 km yükseklikte maksimum değerine ulaşır. Artışın en fazla olduğu durum M3 durumudur. Bu artış daha önceki çalışmalarda ihmal edilen aktif türlerden dolayı ayrışmanın bu tez çalışmasında hesaba dâhil edilmesinden kaynaklanmaktadır. L+R ve O+X durumları için alt iyonkürenin gece yıldırım boşalmalarından yayınlanan EMP alanı aracılığıyla elektron yoğunluğunda meydana gelen değişim Şekil 6.26'te gösterilmiştir.

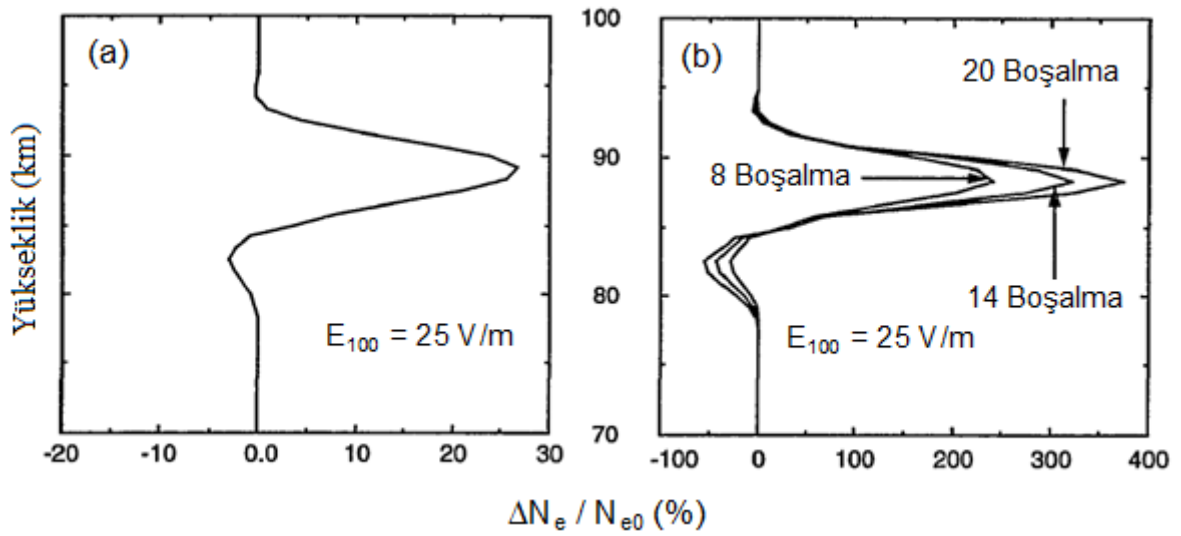


Şekil 6.26. Yıldırımdan yayınlanan VLF radyo dalgasının modlarının L+R ve O+X şeklinde olması durumunda M1, M2 ve M3 modelleri ile elde edilen elektron yoğunluğunun yükseklik ile değişimi

Şekil 6.26'dan görüleceği üzere diğer durumlarda olduğu gibi alt yüksekliklerde elektron üç cisim bağlanması daha baskındır. Bu üç iyonlaşma modeli içinde üç cisim

bağlanmasının daha fazla baskın olduğu model M3'tür. M3 için bağlanma yaklaşık 73 km'ye kadar baskın olmaya devam etmektedir. Bu yükseklikten sonra aktif türlerin ayrışmasından dolayı elektron yoğunluğunda bir artış meydana gelmektedir. Bu artış daha önceki çalışmalarda önerilen "ışık sütunlarının yaygın üst bölgelerinde gece VLF yansıma yüksekliğinin aşağısında ve elektron yoğunluk artışlarının gevşeme süresinin 10-100 s arasında olduğu 70-75 km yükseklikte önemli iyonlaşma artışlarının olabileceği"(Barrington-Leigh, 2000) hipotezini desteklemektedir.

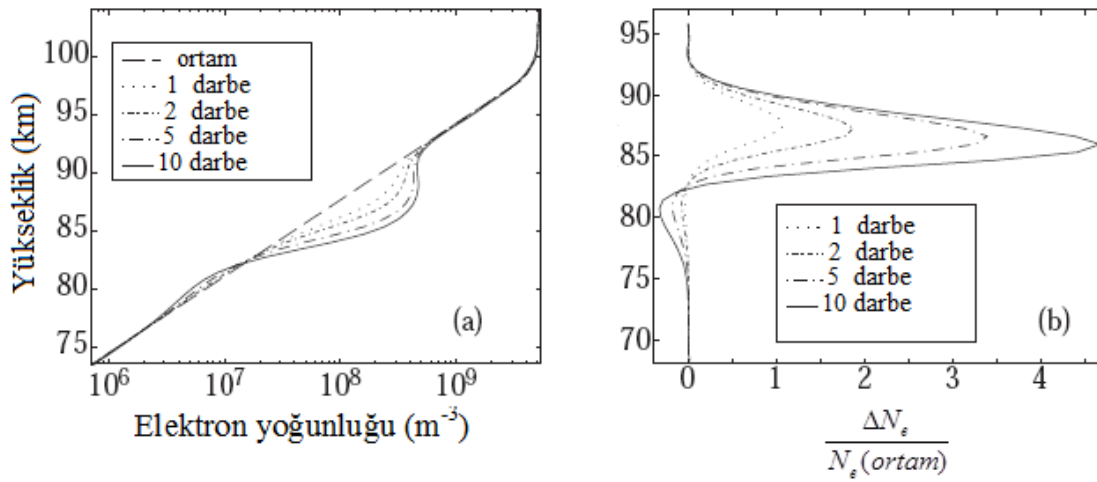
Elde edilen bu sonuçları literatür çalışmaları ile karşılaştırdığımızda bizim çalışmamızda yaptığımız kabullere dayanarak elde ettiğimiz elektron yoğunluk artışlarının yıldırım darbe sayısının arttırılması ile elde edilenler ile benzer olduğu görülmektedir (Barrington-Leigh, 2000; Taranenko, 1993). Şekil 6.27 yıldırım kaynaklı tek bir boşalma (a) ve çok sayıda birbirini takip eden boşalma (b) için alt iyonkürenin elektron yoğunluğundaki değişimi gösterir.



Şekil 6.27. a) Seyrek gece koşulları altında 25 V/m lik elektrik alan değerli tek bir yıldırım boşalması tarafından üretilen elektron yoğunluk değişimleri. b) Aynı koşullar altında birbirini takip eden 8, 14, 20 yıldırım boşalması tarafından üretilen elektron yoğunluk değişimi (Taranenko, 1993).

Şekil 6.27'de 100 μs süreli 25 V/m lik elektrik alan değerine sahip olan tek bir yıldırım boşalması ile birbirini takip eden 8, 14 ve 20 yıldırım boşalmasının elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi gösterilmiştir. Yaklaşık 80-85 km arasında yıldırımın elektron yoğunluğunda bir azalmaya, 85-90 km arasında ise bir artışa sebep olacağı görülmektedir. Ayrıca elektron yoğunluğundaki değişim boşalma sayısı ile doğru orantılıdır. Bu değişim

daha önce ifade edildiği gibi elektron yoğunluk gevşeme süresinin 10-100 s arasında olduğu alt iyonkürede, fırtına bulutlarından yayınlanan ardışık boşalmalar arasındaki zaman dilimi 1 s'den daha az olduğu dikkate alındığı durumlarda bu darbeler tarafından meydana getirilen iyonlaşmanın birikeceğini göstermektedir (İnan vd., 1991; Marshall vd, 2008; Taranenko vd., 1993). Elektron yoğunluğundaki temel artışın EM pulsun aşağı doğru yansıtılan ilk yarısının yukarı doğru ilerleyen ikinci yarısı ile yapıcı girişim yapması sırasında meydana geldiği tahmin edilmiştir (Taranenko, 1993). Şekil 6.28'de elektron yoğunluğunun yıldırım darbe sayısına olan bağıllığı gösterilmiştir.



Şekil 6.28. Yıldırımdan yayınlanan VLF EM dalgasının alt iyonküre elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi. a) elektron yoğunluğunun mutlak artışı, b) elektron yoğunluğunun normalize edilmiş durumdaki değişimi (Barrington-Leigh, 2000).

Şekil 6.28'den görüldüğü gibi CG yıldırım boşalmasının darbe sayısı arttıkça hem bağlanma hem de ayrışma daha belirgin bir hal alır. Bu durum bizim çalışmamızda yıldırım darbesinin alt iyonküre ile etkileşme süresi boyunca meydana gelen iyonlaşma ile oluşan yoğunluk değişimine benzerdir. Bununla beraber bizim elektron yoğunluğunda artış elde ettiğimiz yüksekliklerde daha önce yapılmış her iki çalışmada da azalmanın olduğu görülmektedir. Bu durum, daha önceki çalışmalarda bu tez çalışmasında hesaplamaya dâhil ettiğimiz aktif türlerden dolayı meydana gelen ayrışmanın hesaplamalarda göz önüne alınmamasından kaynaklanabilir.

Şekil 6.6'da verilen yıldırım EMP tarafından elektron yoğunluğunda meydana gelen değişim sadece 15 V/m den büyük elektrik alan değerleri için görülmektedir. Bu değişim elektrik alanının artması ile artmakta ve elektron yoğunluğunun maksimum değere

ulaştığı yükseklik yukarı doğru kaydırılmaktadır. Taban durumu elektron yoğunluğuna bağlı olarak önemli derecede farklılık göstermektedir. Bu model nispeten kaba bir model olduğundan elektron yoğunluğundaki değişimin net olarak belirlenmesi zordur.

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında yıldırım kaynaklı EMP elektrik alanlarının alt iyonküre elektron sıcaklığı ve yoğunluğu üzerindeki etkisi incelendi. Yıldırım EMP tarafından alt iyonkürenin ısıtılması ile ilgili daha önce yapılan çalışmalarda ihmal edilen veya tek bir yönde olduğu kabul edilen Yer'in manyetik alanının özellikle kutuplanmış dalgalar üzerine çok etkili olduğu görüldü. Yer'in manyetik alanının varlığında yıldırım VLF EM dalgasının dört farklı modunun alt iyonküredeki elektron sıcaklığı üzerindeki etkileri incelendiğinde ortamın ısınmasından dolayı meydana gelen doğrusal olmayan değişimler göze çarpmaktadır. Bu değişimden dolayı tüm modlar için elektron sıcaklığının maksimuma ulaştığı yükseklik artan E_{100} değeri ile yukarı doğru kayar. Sözü edilen bu kaymalar Tablo 6.1 ve 6.2'den kolayca görülebilir. Ayrıca manyetik alanın varlığında özellikle R-modu dalganın diğer dalga modları gibi 90-95 km yükseklikte sönümlenmeyip yukarı doğru ilerlediği görüldü. Bu durum daha önceki çalışmalarda önerildiği gibi R modu dalganın yıldırım kaynaklı ısıklık modu dalga olabileceğini gösterir (İnan ve Golkowski, 2010; Nagano vd., 2003).

Yıldırım kaynaklı EMP elektrik alanlarının elektron sıcaklığı dolayısıyla ortamın ısınmasında önemli etkilere sahip olduğu görüldü. EM dalganın her modu için elektron sıcaklığının önemli derece arttırıldığı gözlemlendi. Tüm modlar için elektron sıcaklığındaki bu artış yıldırım VLF EM dalgasının elektrik alanı dolayısıyla yıldırım kanalının ışıma gücü ile doğru orantılıdır. Bu konu hakkında daha önce yapılan çalışmalarda yıldırım kaynaklı EM dalganın O ve X modlarının hesaplamalarda kullanıldığı görüldü. Bu tez çalışmasında EM dalganın tüm modlarının etkisi incelenmiştir. Buna bağlı olarak daha sonra bu konu hakkında yapılacak çalışmalarda yıldırım kaynaklı EM dalganın alt iyonküre üzerindeki etkisinin tam olarak belirlenebilmesi için L ve R modlarının da göz önüne alınması gerektiği görülmüştür.

Yıldırım kaynaklı EMP elektrik alanlarının alt iyonkürenin elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi üç farklı model yardımıyla hesaplanmıştır. M1, M2 ve M3 kullanılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında elektron yoğunluğundaki en fazla artışın M3 yardımıyla elde edildiği görüldü. M3, M1 ve M2'de ihmal edilen elektronların iki cisim bağlanma ve aktif türlerden (O ve N atomu) elektron ayrışması süreçlerini göz önünde

bulundurmasından dolayı farklı sonuçlar vermiştir. Yapılan hesaplamalarda burada kullandığımız yıldırım kaynaklı elektrik alan değerleri için elektron üç cisim bağlanmasının 50-73 km arasında, aktif türlerden birleşmeli ayrışmanın yaklaşık 73-85 km arasında ve elektronların iki cisim bağlanmasının ise 85-95 km arasında etkili olduğu görülmüştür. Ayrıca yıldırım kanalının ışıma gücünün elektron yoğunluğu üzerindeki etkisi M1 ve M2’de daha büyük iken M3’te daha küçüktür. Bu durum aktif türlerden ayrışmanın yıldırım ışıma gücüne bağlılığının çok az olduğunu gösterir. Ayrışmanın, O_2^- ‘nin çok hassas bir elektron ilgisinden dolayı, yıldırım kaynaklı EM dalganın burada ele alınan elektrik alan değerlerinde tüm modlar için neredeyse aynı mertebede olduğu görülmüştür. Buna karşın elektronların iki cisim bağlanmasının elektrik alana keskin bir şekilde bağlı olduğu görüldü.

Ayrıca, bu çalışmada yukarıda ifade edilen süreçlerin hesaplamalara katılması sonucunda yoğunluk değişimlerinin daha önce ifade edildiği üzere sadece elektrik alan şiddeti 15 V/m’den büyük olan yıldırım boşalmaları için gerçekleşeceği öngörüsünün geçerli olmayabileceği görüldü. Bu çalışmada, yıldırım kanalı bir verici gibi modellendiğinden gönderilen VLF EM dalga, daha önce ifade edildiği üzere yıldırım EMP nun alt iyonküre ile etkileşme süresi ($\sim 100-150 \mu s$) içinde çok sayıda iyonlaşma meydana getirebilir. Bu durum daha önceki çalışmalarda önerildiği üzere iyonlaşmada bir birikmenin olmasına ve dolayısıyla nispeten düşük elektrik alan değerlerinde bile gözle görülebilir bir yoğunluk değişimine yol açabilir. Bu tez çalışmasında yıldırım kaynaklı VLF radyo dalgasının 1-10 V/m arasındaki elektrik alan değerlerini kullandığımızdan nispeten düşük iyonlaşma olmasına karşın birikmeden dolayı elektron yoğunluğunun önemli değerlere ulaşabileceği görülmüştür.

Aynı zamanda, daha önce yapılan çalışmalarda iyonlaşmanın meydana gelmesi için yıldırım VLF radyo dalgası tarafından hızlandırılan elektronların N_2 molekülünün iyonlaştırılması için gerekli olan 35 eV’luk enerjilere sahip olması gerektiği vurgulanmıştır. Ancak bu tez çalışmasında hesaba dâhil edilen aktif türlerden dolayı meydana gelen birleşmeli ayrışma için gerekli enerjinin çok da yüksek olmasına gerek olmadığı görüldü. Dolayısıyla, yıldırım kaynaklı EM dalgalar tarafından elektron yoğunluğunda oluşturulan tedirginliğin daha doğru bir şekilde belirlenebilmesi için bu tez çalışmasında göz önüne aldığımız etkilerin de bundan sonraki çalışmalarda ele alınması gerekliliği ortaya çıkmaktadır.

8. ÖNERİLER

- Yıldırımdan yayınlanan EMP elektrik alanlarının alt iyonküre ile etkileşmesi hakkında yapılan bu çalışmada CG yıldırım boşalmaları kullanılmıştır. Ancak model bundan sonraki çalışmalarda, yıldırım boşalmalarının diğer türlerinden kaynaklanan EM alanlar için de uygulanabilir.
- Bu çalışmada yıldırım dönüş darbesinden yayınlanan VLF radyo dalgasının elektrik alanının 1-10 V/m arasında alındı. Gelecek çalışmalarda bu model daha yüksek elektrik alan değerleri için genişletilebilir.
- Yıldırım elektrik alanlarının ortalama değerleri kullanılarak çalışılan bu tez çalışmasında; elektrik alan etkili iyonlaşma frekansının (ν_i) etkisi, burada ilgilenilen yüksekliklerde önemli olmadığından modele dâhil edilmemiştir. Bu etki gelecekte nispeten yüksek elektrik alanlar kullanılarak bu modele dâhil edilebilir.
- Bu tez çalışmasında ele alınan aktif türlerden dolayı ayrışma TLEs'lerin oluşum mekanizmalarını açıklamak için daha sonra yapılacak çalışmalarda kullanılabilir.



KAYNAKLAR

- Aleksandrov, N.**, 1988. Three-body electron attachment to a molecule, *Soviet Phys. Uspekhi*, 31(2), 101.
- Allgood, M.**, 2008. Finite Element Analysis of the Mesosphere's Electromagnetic Response to Large Scale Lightning Associated with Sprites and other Transient Luminous Events, *Master of Science*, Auburn University, Auburn, Alabama.
- Aydoğdu, M. ve Özcan, O.**, 2000. The possible effects of the magnetic declination on the wave polarisation coefficients at the cutoff point, *J. Electromag. Waves App.*, 14 (9), 1289-1290.
- Aydoğdu, M. Yeşil, A. ve Güzel, E.**, 2004. The Group Refractive Indices of HF Waves in the Ionosphere and Departure from the Magnitude without Collisions, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 66, 343-348.
- Barrington-Leigh, C.P.**, 2000. Fast photometric imaging of high altitude optical flashes above thunderstorms, *PhD thesis*, Stanford University, Stanford, California.
- Barrington-Leigh, C. ve İnan, U.S.**, 1999. Elves triggered by positive and negative lightning discharges, *Geophys. Res. Lett.*, 26 (6), 683-686.
- Belova, E., Pashin, A. ve Lyatsky, W.**, 1995. Passage of a powerful HF radio wave through the lower ionosphere as a function of initial electron density profiles, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 57 (3), 265-272.
- Bering, E., Benbrook, J., Garrett, J., Paredes, A., Wescott, E., Moudry, D., Sentman, D., Stenbaek-Nielsen, H. ve Lyons, W.**, 2002. Sprite and elve electrodynamics, *Adv. Space Res.*, 30 (11), 2585-2595.
- Brasseur, G.P. ve Solomon S.**, 2005. Aeronomy of the middle atmosphere: Chemistry and physics of the stratosphere and mesosphere, Springer, Netherlands.
- Bychkov, V., Golubkov, G. ve Nikitin, A.**, 2010. The atmosphere and ionosphere: dynamics, processes and monitoring. Springer Verlag.
- Canyılmaz, M.**, 2008. VLF yayılımını kullanarak yıldırımın alt iyonküre üzerine etkilerinin araştırılması , *Doktora Tezi*, F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

- Canyılmaz, M., Atıcı, R., Güzel, E.,** 2013. The Effect of Earth's Magnetic Field on the HF Radio Wave Modes at the Heated Subionosphere, *Acta Phys. Pol. A*, 123, 786-790.
- Chambers, J.A.,** 1967. Atmospheric Electricity, Pergamon, London.
- Chang, H. ve İnan, U.S.,** 1985. Lightning-induced electron precipitation from the magnetosphere, *J. Geophys. Res*, 90, 1531-1541.
- Cho, M. ve Rycroft, M.J.,** 2001. Non-uniform ionisation of the upper atmosphere due to the electromagnetic pulse from a horizontal lightning discharge, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, **63**(6): 559-580.
- Cooray, V. ve Fernando, M.,** 2010. Lightning parameters of engineering interest, Lightning Protection, The Institute of Engineering and Technology, London, 46-96.
- Cummer, S.A.,** 1997. Lightning and ionospheric remote sensing using VLF/ELF radio atmospherics, *PhD thesis*, Stanford University, Stanford, California.
- Dalgarno, A., McElroy, M.B. ve Walker, J.C.G.,** 1967. The diurnal variation of ionospheric temperatures, *Planetary Space Sci.*, 15 (2), 331-345.
- Davies, K.,** 1965. Ionospheric Radio Propagation, NBS Monograph 80, Government Printing Office, US.
- Fernsler, R. ve Rowland, H.,** 1996. Models of lightning-produced sprites and elves, *J. Geophys. Res: Atmos.*, (1984–2012), 101(D23), 29653-29662
- Glukhov, V., Pasko, V. ve İnan, U.S.,** 1992. Relaxation of transient lower ionospheric disturbances caused by lightning-whistler-induced electron precipitation bursts, *J. Geoph. Res.*, **97**, 16.
- Gurevich, A.V.,** 1978. Nonlinear phenomena in the ionosphere, Springer-Verlag, New York.
- Güzel, E., Atıcı, R. ve Canyılmaz, M.,** 2011. Dikey Yayılan HF Radyo Dalgasının Farklı Modlarının Alt iyonkürede Elektron Sıcaklığına Etkisi, *E- J. New World Sci. Academy*, 6, 3, 69–79.

- Haldoupis, C., Mika, Á. ve Shalimov, S.,** 2009. Modeling the relaxation of early VLF perturbations associated with transient luminous events, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, (1978–2012), 114(A10).
- Hargreaves, J.K.,** 1992. The solar-terrestrial environment. Cambridge University Press, U.K.
- Hedin, A.E.,** 1991. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere, *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 96(A2), 1159-1172.
- İnan, U.S., Bell, T. ve Rodriguez, J.,** 1991. Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning, *Geophys. Res. Lett.*, **18**, 705-708.
- İnan, U.S., Sampson, W.A. ve Taranenko, Y.N.,** 1996. Space-time structure of optical flashes and ionization changes produced by lightning-EMP, *Geophys. Res. Lett.*, 23 (2), 133-136.
- İnan, U.S. ve Golkowski, M.,** 2010. Principles of plasma physics for engineers and scientists, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Iwasaki, N., Hayashida, T. ve Hayakawa, M.,** 2001. Disturbances in Association with Sprites and Elves. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (5), 935-938.
- Kero, A., Bösinger, T., Pollari, P., Turunen, E. ve Rietveld, M.,** 2000. First EISCAT measurement of electron-gas temperature in the artificially heated D-region ionosphere, *Ann. Geophys.*, 18, 1210-1215.
- Kero, A.,** 2008. Ionospheric D-region Studies by Means of Active Heating Experiments and Modelling, Oulu University Press, Oulu.
- Le Vine, D. ve Willett, J.,** 1992. Comment on the transmission-line model for computing radiation from lightning, *J. Geophys. Res.*, 97(D2), 2601-2610.
- Lehtinen, N.G. ve İnan, U.S.,** 2007. Possible persistent ionization caused by giant blue jets, *Geophys. Res. Lett.*, 34(8), L08804.
- Marshall, R. A., İnan, U.S. ve Chevalier, T.W.,** 2008. Early VLF perturbations caused by lightning EMP-driven dissociative attachment, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L21807.
- Marshall, R.A., İnan, U.S. ve Glukhov, V.S.,** 2010. Elves and associated electron density changes due to cloud-to-ground and in-cloud lightning discharges, *J. Geophys. Res.*, 115, A00E17.

- Marshall, R.A.**, 2012. An improved model of the lightning electromagnetic field interaction with the D-region ionosphere, *J. Geophys. Res: Space Phys.*, (1978–2012), 117(A3).
- McCormick, R.J.**, 2010. VLF Remote Sensing-A new computational model, *PhD Thesis*, University of Otago, Dunedin, New Zealand.
- Mika, A.**, 2007. Very Low Frequency EM Wave Studies of Transient Luminous Events in the Lower Ionosphere, *PhD Thesis*, University of Crete, Heraklion.
- Nagano, I., Yagitani, S., Miyamura, K. ve Makino. S.**, 2003. Full-wave analysis of elves created by lightning-generated electromagnetic pulses, *J. Atmos. Sol-Terr. Phy.*, 65(5), 615-25.
- Newsome, R.T.**, 2010. Ground-Based Photometric Imaging of Lightning Emp-Induced Transient Luminous Events, *PhD Thesis*, Stanford University, Stanford, California.
- Papadopoulos, K., Milikh, G., Gurevich, A., Drobot, A. ve Shanny, R.**, 1993. Ionization rates for atmospheric and ionospheric breakdown, *J. Geophys. Res: Space Phys.* (1978–2012), 98(A10), 17593-17596.
- Pasko, V.P.**, 1996. Dynamic coupling of quasi-electrostatic thundercloud fields to the mesosphere and lower ionosphere: Sprites and jets, *PhD Thesis*, Stanford University, Stanford, California.
- Pasko, V., İnan, U.S., Bell, T., Taranenko, Y.**, 1997. Sprites produced by quasi-electrostatic heating and ionization in the lower ionosphere, *J. Geophys. Res.*, **102**, 4529.
- Pasko, V., Inan, U.S., Bell, T.**, 1996. Sprites as luminous columns of ionization produced by quasi-electrostatic thundercloud fields, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 649-652.
- Pasko V.P., Inan U.S. ve Bell T.F.**, 1998. Ionospheric effects due to electrostatic thundercloud fields, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 60(7), 863-70.
- Pasko, V.P. ve Stenbaek-Nielsen, H.C.**, 2002. Diffuse and streamer regions of sprites, *Geophys. Res. Lett.*, 29 (10), 82-81.
- Pasko, V.P.**, 2003. Electric jets, *Nature*, 423 (6943), 927-929.
- Rakov, V.A. ve Uman, M.A.**, 2003. Lightning: Physics and Affects, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

- Ratcliffe, J.A.**, 1959. The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere, Wiley Online Library, Cambridge University Press, UK.
- Rietveld, M., Kopka, H. ve Stubbe, P.**, 1986. D region characteristics deduced from pulsed ionospheric heating under auroral electrojet conditions, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 48 (4), 311-326.
- Rodriguez, J.V., İnan, U.S. ve Bell, T.F.**, 1992. D region disturbances caused by electromagnetic pulses from lightning, *Geophy. Res.Lett.*, **19**, 2067-2070.
- Rodriguez, J.V.**, 1994. Modification of the Earth's Ionosphere by Very-Low-Frequency Transmitters, *PhD Thesis*, Stanford University, Stanford, California.
- Rodriguez, J.V. ve Inan, U.S.**, 1994. Electron density changes in the nighttime D region due to heating by very-low-frequency transmitters, *Geophy. Res.Lett.*, 21(2), 93-6.
- Roussel-Dupre, R., Gurevich, A., Tunnell, T. ve Milikh, G.**, 1994. Kinetic theory of runaway air breakdown, *Phys. Rev.*, E 49 (3), 2257.
- Roussel-Dupré, R. ve Gurevich, A.**, 1996. On runaway breakdown and upward propagating discharges. J. Geophys. Res.-Part A-Space Phys.-Printed Edition 101 (2), 2297-2312.
- Rowland, H., Fernsler, R., Huba, J. ve Bernhardt, P.**, 1995. Lightning driven EMP in the upper atmosphere, *Geophy. Res.Lett.*, **22**, 361-364.
- Rowland, H.L.**, 1998. Theories and simulations of elves, sprites and blue jets, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 60 (7-9), 831-844.
- Schunk, R.W. ve Nagy, A.F.**, 2004. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Stanley, M., Brook, M., Krehbiel, P. ve Cummer, S.A.**, 2000. Detection of daytime sprites via a unique sprite ELF signature, *Geophys. Res. Lett.*, 27 (6), 871-874.
- Taranenko, Y.N.**, 1993. Interaction with the Lower Ionosphere of Electromagnetic Pulses from Lightning: Heating, Attachment, Ionization, and Optical Emissions, *PhD Thesis*, Stanford University, Stanford, California.
- Taranenko, Y.N., İnan, U. ve Bell, T.**, 1993a. The interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning: excitation of optical emissions, *Geophy. Res.Lett.*, **20**, 2675-2678.

- Taranenko, Y.N., İnan, U.S. ve Bell, T.F.,** 1993b. Interaction with the lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning - heating, attachment, and ionization, *Geophy. Res.Lett.*,, **20**, 1539-1542.
- Thomas, J.N.,** 2005. Lightning-driven electric and magnetic fields measured in the stratosphere: Implications for sprites, *PhD Thesis*, University of Washington, United States.
- Tomko, A., Ferraro, A., Lee, H. ve Mitra, A.,** 1980. A theoretical model of D-region ion chemistry modifications during high power radio wave heating, *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.*, 42(3), 275-85.
- Uman, M.A.,** 1969. Lightning, McGraw-Hill Book Co., Inc., New York.
- Uman, M. A.,** 1987. The Lightning Discharge, International Geophysics Series, Academic Press, Orlando, Florida.
- Yeşil, A. ve Güzel, E.,** 2003. İzotropik Olmayan Plazmanın Dielektrik Özellikleri, Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları, 4, 37-43.
- Wait, J.R. ve Spies, K.P.,** 1964. Characteristics of the Earth-ionosphere waveguide for VLF radio waves, US Dept. of Commerce, National Bureau of Standards: for sale by the Supt. of Doc., US Govt. Print. Off., Washington.
- Whitten, R.C., Poppoff, I.G.,** 1971. Fundamentals of aeronomy, John Wiley & Sons, New York, USA.
- Williams, E.R.,** 2001. Sprites, elves, and glow discharge tubes, *Phys. Today*, 54, 41.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler:

Adı Soyadı : Ramazan ATICI

Doğum Yeri ve Tarihi : Erzincan, 1980

İletişim Adresi : Muş Alparslan Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü

Tel: 0 (436) 213 0013

E-posta: r.atici@alparslan.edu.tr

Eğitim:

Lisans (B.Sc.) 2000-2004 : Celal Bayar Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü

Yüksek Lisans* (M.Sc.) 2004-2007 : Celal Bayar Üniversitesi, Fen-Bilimleri Enstitüsü, Manisa

Doktora(Ph.D)** 2008-2013 : Fırat Üniversitesi, Fen-Bilimleri Enstitüsü, Elazığ

*** Yüksek Lisans Tez konusu :** Nükleer Seviye Yoğunluğunun Makroskobik Model Yardımıyla Hesaplanması

**** Doktora Tez Konusu :** Yıldırımın Kaynaklı Elektromanyetik Dalgaların Alt İyonküreyi Isıtma ve İyonlaştırma Süreçleri