T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VLF YAYILIMINI KULLANARAK YILDIRIMIN ALT İYONKÜRE ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Murat CANYILMAZ

Tez Yöneticisi
Yrd. Doç. Dr. Esat GÜZEL

DOKTORA TEZİ
FİZİK ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2008

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

VLF YAYILIMINI KULLANARAK YILDIRIMIN ALT İYONKÜRE ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Murat CANYILMAZ

Doktora Tezi

Fizik Anabilim Dalı

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

Danışman:

Üye:

Üye:

Üye:

Üye:

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun …../…../…….tarih ve ……..sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

"VLF Yayılımını Kullanarak Yıldırımın Alt İyonküre Üzerine Etkilerinin Araştırılması" isimli doktora tezimin hazırlanmasının her aşamasında ilgi ve yardımlarını esirgemeyen bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Yrd.Doç.Dr. Esat GÜZEL beye sonsuz teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamın deneysel kısmında 104E005 nolu "Very Low Frequency Remote Sensing of the Lower Ionosphere" isimli TÜBİTAK ve NSF tarafından desteklenen proje kapsamında kurulan VLF Alıcı Sisteminin dataları kullanılmıştır. Sistemin kurulmasında ve data analizi için genel programların sağlanmasında yardım ve desteklerini gördüğüm Stanford Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Star Laboratuarı koordinatörü Prof.Dr. Umran Savaş İNAN beye ve Star Laboratuarında çalışan akademisyenlere teşekkür ederim.

Çalışmalarımın her aşamasında başta yüksek lisans hocam Prof.Dr. Mehmet AYDOĞDU beye, anabilim dalı başkanımız Prof.Dr. Osman ÖZCAN beye ve gösterdikleri hoşgörü, yardım ve anlayıştan dolayı tüm Fizik Bölümü elemanlarının her birine ayrı ayrı teşekkür eder, sevgi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca benimle birlikte tez çalışmalarım süresi boyunca maddi ve manevi sıkıntı çeken sevgili eşim Nuran ve kızlarım Asena İrem ile Remziye İpek'e ve bütün aile fertlerime minnet ve sevgi duygularımı sunarım.

Murat CANYILMAZ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER..... **I**
ŞEKİLLER LİSTESİ..... **III**
TABLOLAR LİSTESİ..... **VI**
SİMGELER LİSTESİ..... **VII**
KISALTMALAR..... **VIII**
ÖZET ……...…**IX**
ABSTRACT…….……..**X**

1. GİRİŞ …….....1

2. YER-İYONKÜRE DALGA KILAVUZU.....6

3. İYONKÜRENİN D BÖLGESİ….....11
3.1. 100 Km'nin Altındaki Nötr ve İyonlaşmış Atmosfer..... 11
3.2. D Bölgesinin Kırılma İndisi.....17

4. MANYETOKÜRE….....**23**
4.1. Jeomanyetik Alan….....24
4.2. Radyasyon Kuşakları 25

5. YILDIRIM VE ALTİYONKÜREDE OLUŞAN YILDIRIM ETKİLİ OLAYLAR.....29
5.1. Alt iyonkürede Geçici Işık Saçan Olaylar.....32
5.1.1. Püskürmeler (Jets).....34
5.1.2. Işık Sütunları (Sprites).....34
5.1.3. Işık Yayılımları (Elves).....35
5.1.4. Dairesel Işık Kuşakları (Halos).....36
5.2. Yıldırım-Etkili VLF Sinyal Tedirginlikleri.....37
5.2.1. Erken/Hızlı VLF Olayları.....37
5.2.2. Yıldırım-Etkili Elektron Yağışı Olayları (LEP).....39

Sayfa

6. VLF UYGULAMA SİSTEMLERİ……..…….....45

6.1. VLF Alıcı Sistemi…….....45

6.1.1. VLF Anteni.....45

6.1.2. Ön-Yükseltici.....47

6.1.3. Hat Alıcısı.....48

6.1.4. GPS Anteni.....50

6.1.5. Bilgisayar ve Program.....50

6.2. VLF Vericileri…….....52

6.3. Yıldırım Algılama Sistemi….....53

6.4. Analiz Programları…….....54

7. BULGULAR VE TARTIŞMA……..…….....56

7.1. LEP Olayları ile Yıldırımlar Arasındaki İlişkinin İncelenmesi.....61

7.1.1. Temmuz İstatistiği.....61

7.1.2. Ağustos İstatistiği.....63

7.1.3. Eylül İstatistiği.....64

7.1.4. Analizlerin Değerlendirilmesi.....66

7.2. LEP Olaylarının Geçici Karakteristiklerinin İncelenmesi.....70

7.2.1. Gecikme Zamanı (Δt).....70

7.2.2. Oluşum Süresi (t_d).....71

7.2.3. Oluşum Şiddetindeki Değişim Miktarı (ΔA).....72

7.2.4. Geri Dönüş Zamanı (t_r).....73

7.2.5. Geçici Karakteristikler Arasındaki İlişki.....74

7.3. LEP Olayları ile Jeomanyetik İndeksler Arasındaki İlişki.....75

7.3.1. Kp İndeksi ile Lep Olayları Arasındaki İlişki.....75

7.3.2. Dst İndeksi ile Lep Olayları Arasındaki İlişki.....80

8. SONUÇLAR 84

KAYNAKLAR.....86

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. İyonoküre elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi ..…..…… ……3

Şekil 1.2. İyonkürenin D bölgesindeki N_e değişimini ve VLF yayılımını etkileyen karışıklıkların gösterimi [41]…….…...……..……...5

Şekil 2.1. VLF sinyal yayılımı [26]…….…… ……10

Şekil 3.1. 100 km'nin altındaki atmosferin ısıl yapısı [3]……...…… ……12

Şekil 3.2. Nötr yoğunlukların yükseklikle değişimi [3]……..…… ……12

Şekil 3.3. Elektron ve iyon yoğunluklarının yükseklikle değişişimleri [3]……..……14

Şekil 3.4. Elektron-nötr çarpışma frekansının yükseklikle değişimi [3]……..……15

Şekil 3.5. Gece ve gündüz orta enlem D bölgesi elektron yoğunluğunun değişimi [42]…….16

Şekil 3.6. Gece iyonküresinde VLF yansıma yüksekliğinin frekansla değişimi[44]…...……...22

Şekil 4.1. Manyetokürenin şematik gösterimi [70]…… ……..…23

Şekil 4.2. Yer'in dahili ve harici radyasyon kuşaklarının grafiksel gösterimi [70]…….…..…26

Şekil 4.3. Sabit bir manyetik alandaki elektronun hareketi …… ……27

Şekil 4.4. Pozitif yüklü parçacığın davranışı …… ……..……28

Şekil 5.1. Yıldırım oluşumunun aşamalarının gösterimi [84]…… ……..…30

Şekil 5.2. Yıldırım fotoğrafları. (a) Bulutiçi Yıldırım (b) Bulut-Yer Arası Yıldırım [85]…...…31

Şekil 5.3. Yıldırım çeşitlerinin şematik gösterimi ……..…… ……31

Şekil 5.4. Negatif ve pozitif CG yıldırımlarının şematik gösterimi [42]……. ……32

Şekil 5.5. Işık sütunlarının, ışık yayılımlarının ve püskürmelerin şematik gösterimi [95]…....33

Şekil 5.6. (a) Avustralya'da kaydedilen mavi püskürme (b) Arecibo Gözlemevinde kaydedilen alt iyonküre ile yıldırım bulutu arasındaki bağlantıyı saptayan ilk büyük mavi püskürme [42]**.**… ……...……...……..……...34

Şekil 5.7. Eurosprite 2005 araştırması boyunca 29 Temmuz (üst) ve 26 Eylül (alt) 2005 tarihlerinde Pic du Midi tarafından yakalanan havuç biçimli ışık sütunlarının görüntüleri…… ……...……..……..……...35

Şekil 5.8. 4 Temmuz 2005 yılında Yucca Ridge Field istasyonunda saniyede 3600 çözünürlük kullanılarak kaydedilen ışık yayılımının yüksek hızlı zamanla çekilmiş görüntüleri [42]. ……....……..……..……...36

Şekil 5.9. New Mexico'daki Langmuir laboratuarı tarafından 2004 ve 2005 yılları boyunca kaydedilen ve ışık sütunlarına eşlik eden dairesel ışık kuşaklarının renkli görüntüleri [42].……...…..……...……..……...36

Şekil 5.10. Erken/hızlı olayın genel gösterimi…….. ……...…..……...……...38

Sayfa

Şekil 5.11. LEP olayının genel gösterimi. **……**…..……..……...…..……...40
Şekil 5.12. Kanallanmış ve Kanallanmamış ıslık dalga yayılım yolları……...42
Şekil 5.13. Dalga-parçacık etkileşimi …… ……44
Şekil 6.1. VLF alıcı sistemi blok diyagramı ……...…… ……45
Şekil 6.2. VLF iki kanal dikey manyetik halka anten konfigürasyonu … ……..…46
Şekil 6.3. Fen-Edebiyat Fakültesi çatısına kurulan VLF alıcı sisteminin anteni ……..…46
Şekil 6.4. Ön-yükselticinin blok diyagramı ……...……...…… ……47
Şekil 6.5. Ön-yükselticinin görünüşü …… ……..……48
Şekil 6.6. Hat alıcısının görünüşü ……..…… ……48
Şekil 6.7. Hat alıcısı blok diyagramı …… ……..……49
Şekil 6.8. GPS anteni ve M12 zamanlayıcı kartı …… ……50
Şekil 6.9. Stanford DAQ programı …… ……51
Şekil 6.10. Elektromanyetik dalga laboratuarındaki VLF alıcı sisteminin genel görünümü…...52
Şekil 6.11. İngiltere Anthorn'da bulunan 19.6 kHz frekanslı VLF vericisinin fotoğrafı[125]....53
Şekil 7.1. VLF vericileri ve alıcısının harita üzerinde gösterimi …… ……...……56
Şekil 7.2. VLF vericilerinden alınan sinyallerin 07.07.2005 tarihindeki günlük değişimleri ….57
Şekil 7.3. 29/07/2005 tarihinde 00:00–02:15 UT zaman aralığında Meteorage tarafından tespit edilen yıldırımların yerel dağılımları ve sinyal yolları . …….……..……...…58
Şekil 7.4. 29/07/2005 tarihinde 00:00–02:15 UT zaman aralığında oluşan pozitif ve negatif yıldırımların akım şiddetlerine bağlı dağılımları…….……..……...…58
Şekil 7.5. 29/07/2005 tarihinde 00.00-02.15 UT zaman aralığında HWU sinyalinin değişimi ve bu sinyalinde gözlenen LEP olayları ……..……..……...59
Şekil 7.6. 29/07/2005 tarihinde 01:32–01:43 UT zaman aralığında HWU ve HWV sinyallerinin değişimi ve HWU sinyalinde gözlenen LEP olayları…….....60
Şekil 7.7. 10/08/2005 tarihinde 21:01:21 UT zamanında HWU sinyalinde tespit edilen bir LEP olayı ve bu olaya sebep olan yıldırım darbesi ……..…….....60
Şekil 7.8. 10/08/2005 tarihinde 21:01:21 UT zamanında HWU sinyalinde tespit edilen LEP olayına sebep olan yıldırımın yeri ve sinyal yolları ……..…….....61
Şekil 7.9. 2005 yılı Temmuz ayında (a) sinyal alınan zaman aralıklarında oluşan yıldırımların (b) sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları …….……...62
Şekil 7.10. 2005 yılı Ağustos ayında (a) sinyal alınan zaman aralıklarında oluşan yıldırımların (b) sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları …….……...64

Sayfa

Şekil 7.11. 2005 yılı Eylül ayında (a) sinyal alınan zaman aralıklarında oluşan yıldırımların (b) sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları ……..……...65

Şekil 7.12. 2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül aylarında sürekli sinyal alınan günlerde oluşan **(a)**yıldırımların **(b)** sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları…...68

Şekil 7.13. Meteorage tarafından tespit edilen yıldırımların yerel dağılımları ve sinyal yolları **(a)**30/07/2005 **(b)** 02/09/2005……...…...69

Şekil 7.14. Dört faklı sinyal üzerinde yıldırım boşalmalarına bağlı olarak tespit edilen LEP olay sayılarının gecikme zamanına göre dağılımları ……..……..……...70

Şekil 7.15. Dört faklı sinyal üzerinde tespit edilen LEP olay sayılarının oluşum zamanına göre dağılımları ……..……..……...71

Şekil 7.16. Dört faklı sinyal üzerinde tespit edilen LEP olay sayılarının oluşum şiddetindeki değişim miktarına göre dağılımları ……...……...…….……...72

Şekil 7.17. Dört faklı sinyal üzerinde tespit edilen LEP olay sayılarının geri dönüş zamanlarına bağlı dağılımları ……..……..……...73

Şekil 7.18. 2005 yılı Temmuz ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Kp arasındaki değişim ……..……..……...78

Şekil 7.19. 2005 yılı Ağustos ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Kp arasındaki değişim ……..……..……...78

Şekil 7.20. 2005 yılı Eylül ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Kp arasındaki değişim.……..……..……...79

Şekil 7.21. 2005 yılı Temmuz ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Dst arasındaki değişim ……..……..……...82

Şekil 7.22. 2005 yılı Ağustos ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Dst arasındaki değişim ……..……..……...82

Şekil 7.23. 2005 yılı Eylül ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Dst arasındaki değişim.……..……..……...83

TABLOLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Gece D bölgesi parametreleri [42]…….....17
Tablo 5.1. LEP olayını tanımlayan karakteristiklerin değişim aralıkları [113]……..... 41
Tablo 6.1. Sistemde Kayıtlı Vericiler…….. 53
Tablo 7.1. Vericilerin frekans,çağrı kodu, yerleşim yerleri ve alıcıya olan mesafeleri…..……..57
Tablo 7.2. K indeksi ile maksimum dalgalanmalar arasındaki dönüşüm tablosu ……...76
Tablo 7.3. Kp ile ap arasındaki dönüşüm tablosu …….....76
Tablo 7.4. 2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül aylarına ait günlük ortalama Kp ve Ap değerleri.77
Tablo 7.5. Dst indeksinin sınıflandırılması…….…....80
Tablo 7.6. 2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül aylarına ait günlük ortalama Dst değerleri.....81

SİMGELER LİSTESİ

N_e : Elektron yoğunluğu

δ : Deri kalınlığı

ω : Dalganın açısal frekansı

f : Dalganın frekans

σ : İletkenlik

ε : Dielektrik katsayısı

ω_p : Plazma salınım frekansı

ω_c : Dönme frekansı

m : Kütle

q : Elektrostatik yük

B : Elektromanyetik dalganın manyetik alanı

B_o : Dünya'nın manyetik alanı

E : Elektrik alan şiddeti

H : Manyetik alan şiddeti

k : Dalga vektörü

μ : Manyetik geçirgenlik

γ : Yayılım sabiti

λ : Dalga boyu

c : Işık hızı

J : Akım yoğunluğu

h : Yükseklik

n : Kırılma indisi

α_{eq} : Ekvatoral eğim açısı

α_{lc} : Kayıp koni açısı

∇ : Dell operatörü

R_E : Dünya'nın yarıçapı

KISALTMALAR

VLF	: Çok düşük frekans
ELF	: Aşırı düşük frekans
LF	: Düşük frekans
E/F	: Erken/Hızlı
LEP	: Yıldırım-etkili elektron yağışı
TE	: Enine elektrik
TM	: Enine manyetik
IRI	: International Reference Ionosphere
IC	: Bulut içi yük boşalması
CC	: Bulutlar arası yük boşalması
CG	: Bulut Yer arası yük boşalması
TLEs	: Geçici ışık saçan olaylar
CCD	: Çok hızlı yüksek hızlı kamera
GPS	: Küresel konum sistemi
RFI	: Radyo frekans girişimi
AM	: Genlik modülasyonu
FM	: Frekans modülasyonu
UT	: Evrensel zaman
ADC	: Analog dijital kart
FPGA	: Programlanabilir giriş düzenleyicisi
MSK	: Minimum-kaymalı sayısal modlama
TOA	: Varış zamanı metodu
DF	: Yön bulma metodu
METEORAGE	: Fransa ulusal yıldırım algılama sistemi

ÖZET

Doktora Tezi

VLF YAYILIMINI KULLANARAK YILDIRIMIN ALT İYONKÜRE ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Murat CANYILMAZ

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Fizik Anabilim Dalı

2008, Sayfa: 99

Bu tez çalışmasında, 2005 yılının Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarına ait VLF sinyallerinin darband analizleri yapılmıştır. Avrupa'da bulunan HWU, HWV, ICV ve SIC verici istasyonlarından gönderilen VLF sinyalleri, TÜBİTAK (Proje No: 104E005) ile NSF tarafından desteklenen proje kapsamında, Fırat Üniversitesinde kurulan VLF alıcı sistem ile sinyallerin kaydı yapılmaktadır. Elde edilen verilerin analizleri, LEP olayları ile yıldırımlar arasındaki ilişkinin incelenmesi, LEP olaylarının geçici karakteristiklerinin belirlenmesi ve bu karakteristiklerin kendi aralarındaki ilişkilerinin tespit edilmesi ve LEP olayları ile jeomanyetik indeksler arasındaki ilişkilerin araştırılması amacıyla yapılmıştır.

Yıldırım verilerinin hiç bulunmadığı zaman aralıklarında tespit edilen LEP olaylarının sebebi yıldırım kayıt sisteminin çalışmamasından veya LEP olayını oluşturan diğer mekanizmalardan kaynaklanmaktadır. Yıldırım verisi tam olan ve sürekli sinyal alınan günlerde tespit edilen LEP olay sayıları karşılaştırıldığında aralarında doğru orantılı bir ilişki olduğu saptanmıştır.

LEP olayına ait geçici karakteristikler incelenerek aralarında herhangi bir ilişki olmadığı ve her LEP olayının diğerinden bağımsız olduğu tespit edilmiştir.

Genellikle, yıldırım sayısının maksimum olduğu günlerde LEP olayı sayısındaki artış ile Kp indeksi arasında doğru orantılı ilişki olduğu ve Dst indeksinin düşük olduğu günlerde LEP olay sayısında bir artış olmadığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: VLF, LEP, Yıldırım, İyonküre, Kp, Dst

ABSTRACT

PhD Thesis

THE INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF LIGHTNING ON THE SUBIONOSPHERE BY USING VLF PROPAGATION

Murat CANYILMAZ

Firat University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Physics

2008, Page : 99

In this thesis, narrowband analysis of VLF signals of July, August and September, 2005 have been done. The VLF signals of HWU, HWV, ICV and SIC transmitters at Europe are recorded by the VLF Receiver System at Firat University which is supported by TUBITAK (Project No:104E005) and NSF. The obtained data have been analyzed for the investigation of the relation between LEP events and lightning, geomagnetic indices and also determination of the temporal characteristics of LEP events and the relationship between them.

The reason for the LEP events established at the no-lightning data time interval is breakdown of the Lightning Record System or other mechanisms at the existence of LEP event. The days of full time lightning data and the LEP events determinate on the continuously recorded signals have been compared and assigned directly proportional.

Temporal characteristics of LEP events have been investigated. There is no relation between them and each LEP event is unconnected from other.

Generally, a directly proportional relation between increase of the number of the LEP events at maximum lightning days and Kp indice and also no increment at the number of the LEP events at low Dst indice days have been obtained.

Keywords: VLF, LEP, Lightning, Ionosphere, Kp , Dst

1. GİRİŞ

Elektromanyetik dalgalar ile ilgili çalışmalar 1901 yılında Guglielmo Marconi tarafından aralarında 3500 km mesafe olan Poldhu, Cornwall ile St. Johns, Newfounland arasında yapılan ilk başarılı Atlantik aşırı radyo iletimi ile başlamış ve fiziksel süreçler hakkında birçok spekülasyonlar doğurmuştur [1]. Oliver Heaviside, Arthur E. Kennelly ve Oliver Lodge gibi jeomanyetikçiler birbirlerinden bağımsız olarak 1902 yılında yaptıkları çalışmalar sonucunda üst atmosferde bir elektriksel iletken tabakanın varlığını ileri sürmüşlerdir [2]. Aynı yıl Oliver Lodge iletkenliğin, Güneş'ten gelen mor ötesi yayılımın nötr bileşenleri iyonlaştırmasına bağlı olduğunu belirtmiştir. Ayrıca Lodge bu iletken tabakanın iyi bir yansıtıcı olduğu kadar zayıflamaya da sebep olduğunu ifade etmiştir. Bu ilk araştırmalara rağmen, iyonkürenin varlığının bilim adamları ve mühendislerin oluşturduğu topluluk tarafından kabul edilmesi yaklaşık 20 yıl sürmüştür [3].

Marconi'nin gözlemlerini açıklayabilmek için yapılan ilk çalışmalar, Yer atmosferinde yayılan bir sinyal için gözlenen sinyal şiddetlerini de hesaba katarak Maxwell denklemlerini çözmekti. Bu problem, Rayleigh ve Poincare gibi bilim adamlarını da kapsayan birçok teorik fizikçiyi de cezbetmişti [4]. Küresel koordinatlarda, iletken bir kürenin yüzeyinde yayılan radyasyon probleminin çözümünü doğru hesaplamak için Birinci Dünya Savaşına kadarki yıllar boyunca birçok çalışmalar yapılmıştır [3].

Bilimsel tartışmanın son yirmi yılında, Watson 1918 ve 1919 yıllarındaki önemli birkaç makalesinde sinyallerin saçılarak yayılmasının Marconi'nin ilk buluşundaki uzak mesafe haberleşmelerinde gözlenen sinyal şiddetleri ile açıklanamayacağını belirtmiştir. Bunun yerine, üst atmosferde eş merkezli bir iletken tabaka kullanarak yapılacak hesaplamalar ile gözlenen sinyal şiddetlerinin karşılaştırılarak tahmin edilebileceği sonucuna varmıştır. Watson tarafından 1919'da önerilen yüksek-iletkenlikli üst sınır koşulları alt iyonküreden yansıyan radyo dalgaları için hatalı sonuçlar vermiştir [5–8].

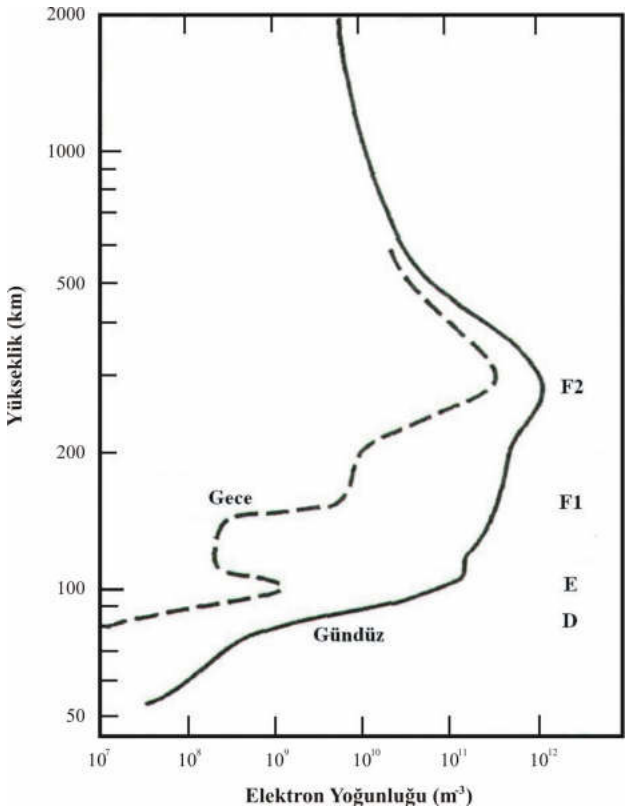
Teorikçiler yayılım teorisinin matematiği ile uğraşırken, Marconi'nin şirketi ve diğerleri uzun mesafe telsiz haberleşme vericilerinin işletim ve üretimi için çalışmaktaydılar. Ticari amaçlı ve savaş gemileri haberleşmeleri için sayısız verici antenleri üretilmiştir. Ticari amaçlar için üretilen yüksek-güçlü radyo istasyonlarının gelişimi Birinci Dünya savaşının başlamasıyla kesilmiştir. Daha sonra ticari amaçlar için kullanılmak üzere ABD ve Avrupa'da güçlü radyo istasyonları askeri imkânlarla geliştirilmiştir [9]. Bu yıllar boyunca yayılma teorisinin kusurlarından haberdar olan birçok haberleşme mühendisi üst atmosferde iletken tabakaların

varlığı hakkında teoriler oluşturmuşlardır. İyonküreden yansımaya dayanan dalga girişim gözlemleri, Poulsen vericilerinin telsiz telgraf için kullanılmasıyla olmuştur [10].

I. Dünya savaşından sonra yüksek frekanslarda devamlı-dalga iletimine izin veren vakum tüp amplifikatörünün icadıyla birlikte mühendislerin ve bilim adamlarının dikkati uzun dalga haberleşmelerinden orta ve kısa dalga haberleşmelerine döndü. Yüksek frekanslar, daha fazla bilgi taşıma kapasiteleri, küçük boyutlara sahip olmaları ve gönderici antenlerin verimliliğinin artması ile çekici olmuşlardı. 1925 yılında Atlantik'in her iki tarafındaki mühendisler ve bilim adamları orta ve kısa dalgalar kullanarak iyonkürenin varlığını gösterebilecekleri deneyleri yapmayı amaç edinmişlerdi. Teori ve deneyler üzerinde birçok çalışma yapılmasına rağmen, İngiltere'de E.V. Appleton ve onun arkadaşlarının çalışmaları ile iyonlaşmış tabakanın kırılma indisinin manyeto-iyonik formüllerini deneysel sonuçlarla ispatlamışlardır. Bu teoriyi 1920'den sonra geliştirmişlerdir. Appleton 1927–1930 yılları arasında elektron yoğunluğuna göre iyonkürenin D, E ve F tabakalarını tanımlamıştır. E tabakası Kennelly-Heaviside tabakası olarak bilinir. Çünkü 1902 yılında ilk onlar tarafından hipotez olarak tanımlanmıştır [11–15].

II. Dünya Savaşına kadar VLF (çok düşük frekans) haberleşmelerinin çalışma alanları, doğru frekans standardının gelişimi, gemicilikte VLF'de şebeke işletimi ve askeri haberleşmeler için yeni ve güçlü VLF vericileri üretimi ile artmıştır [16,17]. Aynı zamanda, Yer'in yüzeyi ve D bölgesi arasındaki dalga kılavuzunda yapılan yayılımla ilgili teoriler birçok modun toplamı veya Yer yüzeyinde ve alt iyonkürede sınır şartlarını sağlayan Maxwell denklemlerinin çözümü şeklinde geliştirilmiştir [5,7,8]. Yeni VLF uygulamalarının desteklenmesinde alt iyonküre VLF dalga yayılımının kullanılmasına ve nicel analizlere izin veren ve bu teorilere dayanan ileri elektromanyetik kodlar geliştirilmiştir [18]. VLF/LF iyonküresel sondalar D bölgesinin yapısı hakkında detaylı bilgi sağlamışlardır [19,20].

İyonküre D, E, F bölgeleri olarak isimlendirilen ve elektriksel olarak nötr olan iyonlaşmış tabakalardan oluşur. Bu tabakalar, farklı yüksekliklerde farklı oranlardaki bağlanma ve tekrar birleşme süreçleri sonucunda ortaya çıkar. Bu süreçlerin etkisi Güneş ve Güneş kaynaklı olmayan ışınımlara bağlı olarak gece ve gündüz değişiklik gösterir. Elektron yoğunluğu iyonküre yapısını belirleyen önemli bir parametredir. Şekil 1.1'de gündüz ve gece için iyonküredeki elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi verilmiştir. D tabakası, 70–90 km yükseklik arasındadır ve buradaki iyonlaşmanın ana kaynağı güçlü X-Işınları ve Lyman-α ışımalarıdır. E bölgesindeki iyonlaşmanın sebebi ise zayıf X-ışınlarıdır ve iyonlaşma yoğunluğu artarak $\sim 10^5$ elektron.cm^{-3} kadar ulaşır. Güneş'ten gelen mor ötesi ışınlar ise F tabakasındaki iyonlaşmayı artırırlar. F tabakasının üstünde ise elektron yoğunluğu manyetoküre sınırlarına kadar sıradan bir şekilde azalır [21,22].



Şekil 1.1. İyonoküre elektron yoğunluğunun yükseklikle değişimi

Çok Düşük Frekanslı (VLF) radyo dalgaları (3–30 kHz) denizcilik (denizaltı) haberleşmeleri, askeri amaçlı haberleşmeler ve uzak mesafe haberleşmelerinde kullanılır. Bu frekansların diğer frekanslardan az kullanılmasının sebebi modülasyonun çok az bilgi taşıyabilmesi ve vericilerinin çok pahalı olmasıdır [23]. VLF dalgaları Yer yüzeyi ile atmosferin iyonlaşmış bölgesinin alt sınırı (alt iyonküre) arasındaki küresel dalga kılavuzunda yayılırlar ve bu bölge Yer-İyonküre Dalga kılavuzu olarak adlandırılır. Herhangi bir noktaya gelen sinyalin genlik ve fazı iyonkürenin elektriksel iletkenliğine bağlıdır. VLF sinyallerinin özellikleri alt iyonkürede oluşan bölgesel karışıklıkların konumlarını ve geçici yapılarını açıklamada kullanılır ve bu teknik VLF Uzaktan Algılama (VLF Remote Sensing) olarak isimlendirilir.

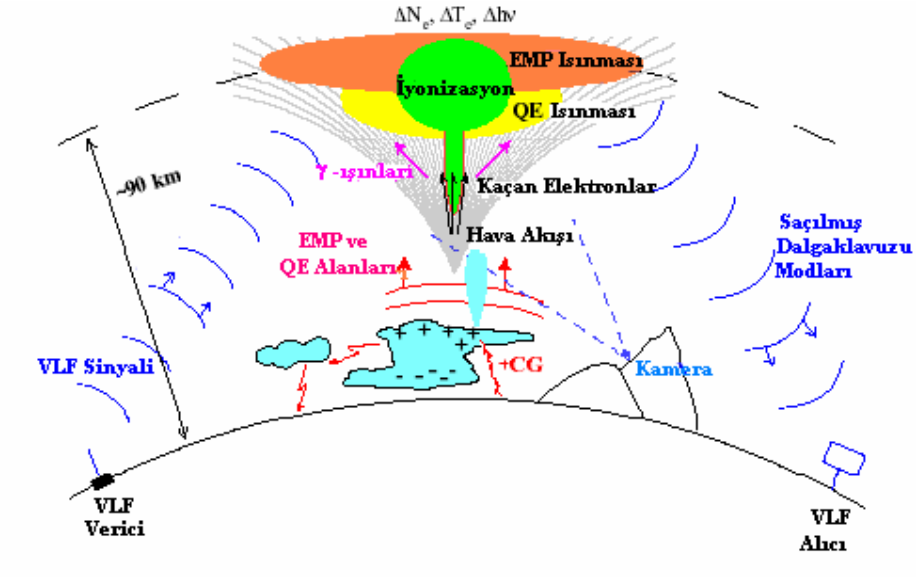
Atmosferdeki VLF deneyleri elektromanyetik dalgaların iyonkürenin D bölgesinden yansımasına dayanır. D bölgesi çok düşük frekanstaki radyo dalgaları için iyi bir yansıtıcıdır. Yer'in yüzeyi ve D bölgesinin küresel dalga kılavuzu şekli bu frekanslarda uzun mesafe yayılımına izin verir. D bölgesinde VLF dalgalarının yansıması elektron yoğunluğuna bağlıdır. Ayrıca F bölgesinin altında yapılan radyo dalga yayılımı için elektron yoğunluğunun yanı sıra elektron-nötr çarpışma frekansları da önemlidir [24]. İyonkürede elektron yoğunluğunu en fazla etkileyen süreç iyonlaşmadır. İyonlaşma zamanın, yüksekliğin, solar aktivite seviyesinin ve diğer faktörlerin bir fonksiyonudur.

Gece süresince D bölgesindeki düşük elektron yoğunluğundan dolayı bu tabakanın radar ve iyon sondalarla incelenmesi mümkün değildir. Çok düşük frekanslı dalgalar ise D bölgesindeki geçici iyonküresel karışıkları uzaktan algılamak için kullanılan çok güçlü bir yöntemdir. VLF teknikleri kullanılarak D bölgesindeki süreçleri kapsayan birçok çalışma yapılmıştır. Bunlar; güneş patlamaları, meteor yağmurları, nükleer patlamalar, uzaysal gamma ışın patlamaları, Yer'in radyasyon kuşaklarındaki yüksek enerjili elektronların orta enlemlerden iyonküreye gece girişi, Auroral bölgelerdeki enerjili elektronları iyonküreye girişi, yıldırımların VLF yayılımına etkileridir [25–29].

Alt iyonkürede iletkenlik değişimlerinin doğrudan ve dolaylı sebebi yük boşalmaları sonucunda yayılan elektromanyetik dalgalardır [30]. Ortalama olarak Yer atmosferinde ~1800 yıldırımlı fırtına olduğu, saniyede toplam ~37 adet boşalma üretildiği ve bir yıldırım boşalmasının yaklaşık 10^6 J elektromanyetik enerji yaydığı düşünülürse iyonkürede yıldırıma bağlı oluşan etkilerin araştırılmasının ne kadar önemli olduğu anlaşılır [31–33].

Yıldırımın sebep olduğu elektromanyetik darbeler tarafından yayılan enerji ELF/VLF bandındadır [34]. Bu darbeler VLF radyo atmosferikleri veya "sferics" olarak bilinirler ve birkaç milisaniye zamanda oluşarak çok uzak mesafelerde yayılabilirler. Bunların ölçülen özellikleri, yıldırım akımları ve yayılım boyunca iyonküre özellikleri hakkında bilgi sağlamada kullanılırlar [35]. Yıldırımlı fırtınaların sebebi ile ortaya çıkan bu etkiler ortamdaki elektronların birkaç yüz milisaniye süresince ısınmaları, ~85 km yükseklikte 10–100 sn süren iyonlaşma değişimleri ve elektron sıcaklığındaki değişimler olarak tanımlanabilinir [30, 36–40]. Bu karışıklar genellikle VLF sinyalinin genliğinde ve fazında ani değişimlerle ve tekrar sinyalin eski haline gelmesi için bir geri dönüşüm süresiyle tespit edilirler. Şekil 1.2'de iyonkürenin D bölgesindeki N_e değişimini ve VLF yayılımını etkileyen karışıklıklar şematik olarak gösterilmiştir.

İki tane yıldırım etkili VLF olayı tanımlanmıştır. Bunlar, Erken/Hızlı (Early/Fast) ve LEP (Lightning-induced Electron Precipitation) olaylarıdır. Erken/Hızlı VLF olayları, alt iyonküredeki iletkenlik üzerinde bir yıldırım boşalmasının *doğrudan* etkisi sonucunda oluşur. LEP olayı ise yıldırımın alt iyonküredeki iletkenlik üzerinde *dolaylı* etkisi sonucunda ortaya çıkar. Yıldırım boşalması sonucunda ortaya çıkan elektromanyetik ışıma manyetoküreye yayılır ve tuzaklanan enerjili elektronlarla etkileşerek bunların alt iyonküreye yağmasına sebep olur ve burada ikinci bir iyonlaşma meydana getirir.



Şekil 1.2. İyonkürenin D bölgesindeki N_e değişimini ve VLF yayılımını etkileyen karışıklıkların gösterimi [41]

Bu tezde, Avrupa sektörü üzerinde bulunan HWU, HWV, ICV ve SIC verici istasyonlarından gönderilen ve TÜBİTAK ile NSF tarafından desteklenen proje kapsamında Fırat Üniversitesinde kurulan VLF alıcı sistemi ile kaydı yapılan VLF sinyalleri üzerinde oluşan LEP olayları ile yıldırımlar arasındaki ilişki ve LEP olaylarının geçici karakteristiklerinin belirlenerek bu karakteristiklerin kendi aralarında herhangi bir ilişkinin olup olmadığı araştırılmıştır. Ayrıca LEP olayları ile jeomanyetik indeksler arasındaki ilişki de incelenmiştir.

2. YER-İYONKÜRE DALGA KILAVUZU

VLF yayılımında, Yer'in yüzeyi ve iyonkürenin alt bölgesi iyi birer elektriksel iletken gibi davranırlar. Yer-iyonküre dalga kılavuzunun genişliği iletken yeryüzü ve D bölgesinin alt yüksekliği arasındaki bölge olarak tanımlanır ve elektromanyetik dalganın frekansına ve D-bölgesi elektron yoğunluğunun günlük değişimine bağlı olarak değişir. Yer-İyonküre dalga kılavuzunda yayılan VLF dalgalarının zayıflaması çok küçüktür. Yaklaşık olarak 2–3 dB/Mm civarındadır [42]. Yer yüzeyinin deri kalınlığı $\left(\delta \approx 1/\sqrt{\omega}\right)$ 10 kHz'de deniz suyu için ~2,5 m. (ε_r = 81, σ = 4 S/m) ve toprak için ~500 m. (ε_r = 3, $\sigma = 10^{-4}$ S/m) dir [43]. Deri kalınlığı 30 km'den az olduğu zaman denizaltı iletişimi gibi yeryüzünde yapılan yayınlar daha rahat yapılır. Yer-iyonküre dalga kılavuzunun üst sınırı alt iyonküre olarak kabul edilir. Burası, iyon ve nötr moleküllerin hareketlerinin genellikle ihmal edildiği zayıf iyonlaşmış bir gaz ortamıdır ve elektronların nötr hava molekülleri ile çarpışmalarının oranı, elektron ve nötr sıcaklıklarla ifade edilirler [44]. "Manyetoiyonik" teori bu bölgedeki düzenli düzlem dalga yayılımı için kırılma indisini, vektör manyetik alanı, dalga frekansı, yerel plazma frekansı ($\omega_p = \frac{N_e q_e^2}{m_e \varepsilon_0}$), elektron dönme frekansı ($\omega_c = \frac{q_e |B|}{m}$) ve elektron-nötr çarpışma frekansı (υ_e) ile tanımlar. Çünkü çarpışma frekansı, plazma ve dönme frekansından çok büyüktür ve dolayısıyla Yer yüzeyindeki belli bir uzaklıktan gelen değişik VLF dalgaları için kırılma indisi yaklaşık olarak tektir. D bölgesinin alt kısmında kırılma indisi, dalga yolu üzerindeki serbest elektron yoğunluğunun (N_e) artışına bağlı olarak hızlı bir şekilde değişir. VLF yayılımı için bu bölge elektron-nötr çarpışmalarına bağlı olarak kayıplı bir ortamdır ve Yer'in manyetik alanı tarafından etkilenen elektron dönme frekansına bağlı olarak izotropik değildir [26].

Yer-iyonküre dalga kılavuzundaki VLF yayılımını tanımlamak için genelde iki metot kullanılır. Işın optik yaklaşımında, verici ve alıcı arasındaki sinyal yayılımı yayılım doğrultusundaki bütün noktalarda sınır şartlarını sağlayan sonsuz sayıdaki ışınların analizleri ile yapılır. Işınlar bir doğru yolu boyunca yayılır ve sınırlardan yansırlar. İlk bileşen vericiden alıcıya doğrudan gider. İkincisi üst sınırdan bir kez, üçüncüsü iki kez ve böyle yansıyan bileşenlerle devam eder. Alıcıdaki elektromanyetik sinyal bütün bu ışınların üst üste binmesi ile elde edilir. Dalga kılavuzu eksenine bağlı olarak artan açıyla birlikte yayılan bu ışınlar, artan yayılım yolu uzunluğuna ve kayıplı yansımaların çokluğuna bağlı olarak sinyal zayıflamasında artışa sebep olurlar. Işın optik yaklaşımı, daha uzak mesafelerdeki (> 500 km) sinyal karakteristiklerini tanımlamak için uygun değildir. Çünkü aşırı derecede fazla olan farklı ışın

yollarını hesaba katmak gerekir. Ayrıca bu metot alan yoğunluğunun yol boyunca birçok noktada hesaplanmasının gerektiği durumlar için kullanışlı değildir [45].

Dalga kılavuzundaki sinyal yayılımındaki ikinci metot ise dalga kılavuzu mod teorisidir. Bu teoride, dalga kılavuzunda herhangi bir noktadaki alan farklı dalga kılavuzu modlarının toplamıyla tanımlanır [6]. Mükemmel iletim duvarlarına sahip paralel-plakalı dalga kılavuzunun x ekseni doğrultusu boyunca yayılan bir dalga için Maxwell denklemlerinin çözümleri üç kategoriye ayrılır. Bunlar, enine elektrik (TE) dalgalar $(E_x = 0, H_x \neq 0)$, enine manyetik (TM) dalgalar $(E_x \neq 0, H_x = 0)$ ve enine elektromanyetik (TEM) dalgalardır $(E_x = 0, H_x = 0)$. Yayılım x doğrultusu boyunca olduğu için bütün alan bileşenleri $\mathbf{e}^{-\gamma x}$ ile değişir. Burada γ yayılım sabitidir. Alan genlikleri sadece z'in bir fonksiyonudur ve dalga kılavuzu sınırlarına dik doğrultuda alınabilir. y doğrultusundaki iletken plakaların genişliği sonsuz alınabilir. Elektrik ve manyetik alan bileşenleri dalga denkleminden bulunur.

$$\frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial \mathbf{z}^2} = -\mathbf{a}^2 \mathbf{M} \tag{2.1}$$

Burada, **M** elektrik **(E)** veya manyetik alan **(H)** tanımlar ve $a^2 = \gamma^2 + \omega^2 \mu\varepsilon$ dir. Sınır şartları uygulanırsa, dalga kılavuzunun üst ve alt tabakalarındaki yüzeysel elektrik ve normal manyetik alan bileşenlerinin yok olması **a** üstünde bir kısıtlama oluşturur.

$$a = \frac{m\pi}{h} \tag{2.2}$$

Bunun anlamı, sınır şartları sadece a'nın kesin değerleri için olabilir. Burada h dalga kılavuzunun etkili yüksekliğini belirtir. Her m tamsayısı bir alan yapılandırmasını tanımlar ve mod olarak isimlendirilir. Yayılan dalgalar için γ karmaşık olmalıdır. Aksi halde mesafe ile üstel olarak azalan alan genliği elde ederiz ve dalga yok olur. Denklem 2.2 kullanılarak γ aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\gamma = \sqrt{a^2 - \omega^2 \mu\varepsilon} = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{h}\right)^2 - \omega^2 \mu\varepsilon} \tag{2.3}$$

Bu ifade TE ve TM modlarının her ikisi için eşit olarak geçerlidir. Modların her biri için bir kesim frekansı $(fc_m = mc/2h)$ vardır ve TM_m ve TE_m modları için ortaktır. Kesim frekansının

üstündeki frekanslara sahip dalgalar m modunda yayılabilirler, fakat kesim frekansının altındakilerin genliği ise mesafe ile üstel olarak azalarak yok olurlar. Gerçekte TM_0 olan TEM modunun bir kesim frekansı (fc_m=0) yoktur ve herhangi bir frekanstaki dalgalar bu modda yayılabilirler. Herhangi bir dalga frekansı için, dalga kılavuzu geometrisi dalga enerjisinin yayılabileceği sonlu sayıda mod seçer. Örneğin, h=85 km olan bir dalga kılavuzu ve 3 kHz için sadece iki mod yayılabilir. Bunlar TM_0 ve TE_1, TM_1 modları ve kesim frekansları 0 ve 1.76 kHz'dir. TE_2 ve TM_2 modlarının kesim frekansları 3.53 kHz'dir. 30 kHz'lik dalga için 18 yayılım modu vardır [46].

Yer-iyonküre dalga kılavuzu, Yer'in eğriliğine, mükemmel iletken olmayan alt ve üst sınırlara ve Yer'in manyetik alanından kaynaklanan iyonküre plazmasında oluşan izotropik (yön bağımsız) olmamaya bağlı olarak, ideal paralel-plakalı dalga kılavuzundan ayrılır. İzotropik olmayan mod dönüşümün oluşması ile birlikte bir gelen dalganın polarizasyonu (kutuplanma) iyonküredeki yansımayı değiştirir. Örneğin, paralel veya dik polarizasyonlu bir doğrusal polarize olmuş dalga paralel ve dik polarizasyon bileşenlerin her ikisine de sahip eliptik polarize olmuş hale dönüşür. Bunun anlamı, saf TE ve TM modlarının Yer-iyonküre dalga kılavuzunda gerçekte bulunamayacağıdır. Dalga kılavuzundaki herhangi bir noktadaki alan QTM (yarı-TM) ve QTE (yarı-TE) modlarının toplamı olacaktır. Örneğin, QTM modu TM moduna benzer, fakat küçük bir eksen manyetik alan bileşenine ve fazladan küçük enine elektrik ve manyetik bileşenlerine sahiptir. İzotropik olmamanın etkisi özellikle gece boyunca önemlidir. Çünkü VLF dalgaları daha büyük yüksekliklerden yansır ve iyonküre iletkenliği bu yüksekliklerde daha fazla izotropik olmamaktadır.

VLF yayılım teorisinde genellikle amaç dalga kılavuzunda herhangi bir noktadaki elektromanyetik alanı hesaplamaktır. Bu ise mümkün olan bütün dalga kılavuzu modlarının toplanması ile yapılabilir. Örneğin, bir kaynaktan çok uzakta ($d >> \lambda$) z_r yükseklikteki bir alıcıdaki elektrik alan yerden z_s yükseklikte bulunan salınım yapan vektör elektrik dipolü $P(t) = P_0 e^{i\omega t}$ gibi modellenir ve aşağıdaki gibi ifade edilir [5].

$$E = \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \frac{i\omega\tilde{c}F}{\sqrt{d}} \sum_m e^{ikS_m d} \Gamma_m(z_s) \Gamma_m(z_r) \Lambda_m P_0 \qquad (2.4)$$

Burada ω dalganın açısal frekansı, k= ω/c kompleks dalga numarası ve $\tilde{c} = -\frac{e^{i\pi/4}\mu_0\omega}{h\sqrt{2\pi k}}$ dır. h ise gece iyonküresinin referans yüksekliğidir. F, skaler yayılma/odaklanma faktörüdür ve $F = \sqrt{(d/R_E)/\sin(d/R_E)}$ olarak tanımlanır. R_E Yer'in yarıçapı ve d yol uzunluğudur. $S_m = \sin\theta_m$

, m^{th} modunun θ_m öz açıları oranının açısının sinüsüdür ve kS_m kompleks yatay dalga sayısıdır. $\Gamma_m(z)$ yükseklik-kazanç fonksiyonlarının 3x3 diyagonal tensörüdür ve bir mod için yüksekliğin fonksiyonu olarak üç elektrik alan bileşeninin davranışlarını tanımlar. Bir dipolün herhangi bir dalga kılavuzu moduna olan etkisi kendi yönelmesine bağlıdır ve 3x3 tensör olan uyarma fonksiyonu Λ_m ile tanımlanır. Λ_m^{ij} bileşeni, j doğrultusunda yönelmiş bir dipolün elektrik alan bileşeni E_i nin uyarma faktörüdür. Maxwell denklemlerinin yardımıyla denklem 2.4'teki ifade manyetik alan içinde elde edilebilir.

Denklem 2.4 kullanılarak dalga kılavuzundaki herhangi bir noktadaki elektrik alanını hesaplamak için θ_m oranının açılarının bilinmesi gerekir. Bunlar, düzlemsel faz ön uyumluluk durumundan bulunabilir. Alt ve üst sınırlardan yansıyan düzlemsel dalga gelen düzlemsel dalganın fazında olmalıdır. Yer-iyonküre dalga kılavuzundaki bu durum mod denklemi olarak adlandırılır ve dalga kılavuzu mod teorisinin ana denklemidir [5].

$$R_I(\theta)R_G(\theta)\exp(-2ikh\sin\theta) = I \tag{2.5}$$

Burada I 2x2 birim matrisini, $R_I(\theta)$ ve $R_G(\theta)$ sırasıyla iyonküre ve yeryüzü için yansıma katsayı matrisleridir. Denklem 2.5'in θ_m üzerinde düşünülen frekans için dalga kılavuzu modlarını tanımlar. Yer-iyonküre dalga kılavuzunun üst sınırının izotropik olmamasına bağlı olarak iyonküredeki R_I yansıma katsayısı dalga kılavuzu modları arasındaki dönüşümü açıklamak için 2x2 matris olarak ifade edilebilir.

$$R_I(\theta) = \begin{bmatrix} {}_{II}R_{II}(\theta) & {}_{II}R_{\perp}(\theta) \\ {}_{\perp}R_{II}(\theta) & {}_{\perp}R_{\perp}(\theta) \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

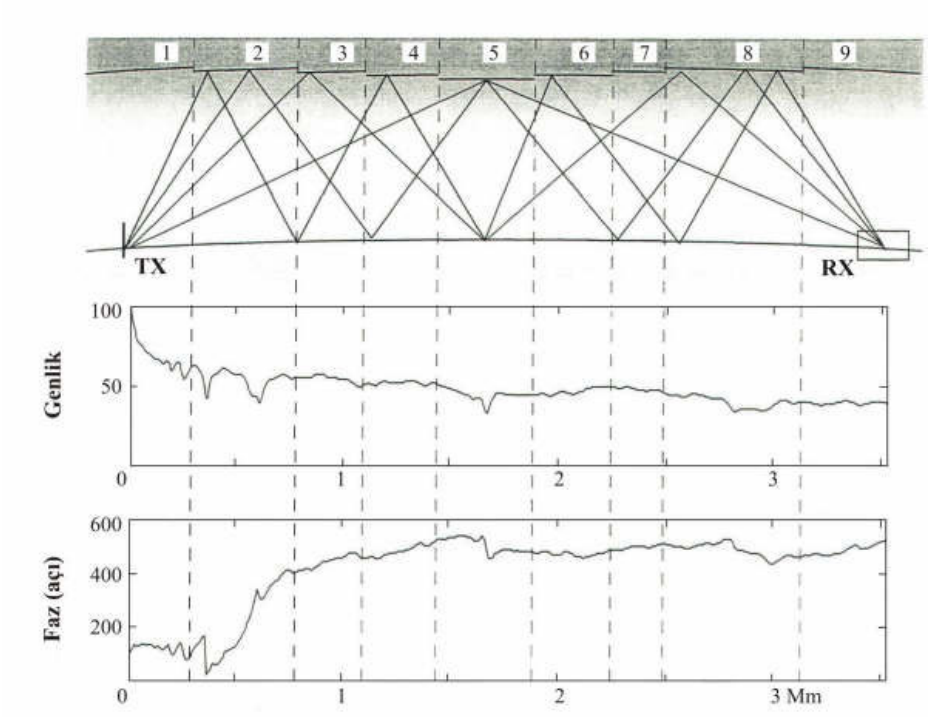
Burada, sol altsimge gelen dalganın ve sağ altsimge ise yansıyan dalganın kutuplanmasını belirtir. R_G yansıma katsayısı da 2x2 matris olarak yazılabilir, fakat çapraz terimler sıfır olmalıdır. Çünkü Yer'in yüzeyi izotropiktir.

$$R_I(\theta) = \begin{bmatrix} {}_{II}\overline{R}_{II}(\theta) & 0 \\ 0 & {}_{\perp}\overline{R}_{\perp}(\theta) \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

Yayılım yolu boyunca herhangi bir noktadaki toplam alan bütün modların süper pozisyonundan elde edilir. Bu da dalga kılavuzu boyunca karmaşık bir alan sağlar ve farklı modlar arasında hem yıkıcı hem de yapıcı girişimler mümkün olabilir. Genellikle yüksek değerli

dalga kılavuzu modları artan yansıma sayısına bağlı olarak büyük zayıflama oranına sahiptirler. Tek dalga kılavuzu modun analitik çözümleri uzak mesafelerde (≥ 6000 km, deniz tabanlı) VLF verici sinyallerin yayılımının değişimlerinin anlamlarını açıklamada kullanılır. Fakat daha kısa mesafelerde (<3000 km, toprak tabanlı) bu çözümler kullanılmaz [47,48].

Yer-iyonküre dalga kılavuzundaki VLF yayılımının bir sayısal hesaplama örneği Şekil 2.1'de verilmiştir. En üstteki şekilde farklı iyonküre iletkenlik değişimleri ile bölgelere ayrılmış yayılım yolları gösterilmiştir. Işın optik yaklaşımı kullanılmış ve sadece dört ışın yolu gösterilmiştir. Alttaki iki şekilde ise verici ve alıcı arasındaki mesafenin fonksiyonu olarak çizilmiş VLF sinyalinin genlik ve fazını göstermektedir. Sinyal genliği alıcı noktasında yer seviyesindeki dik manyetik veya elektrik alanın genliğine karşılık gelmektedir. Şekil 2.1'de çizilmiş olan sinyal fazı açı cinsinden modellenmiş alanın fazını ve vericilerin merkez frekansında aynı uzaklıkta boş uzayda yayılan sinyal fazı arasındaki farklılığı belirtir. Yayılım yolu boyunca birkaç noktada genlik keskin bir şekilde azalır ve fazda da benzer şekilde keskin değişimler görülür. Bu genliklerin azalmasına ve faz kaymalarına çeşitli yayılım modlarının üst üste binmesi durumundaki yıkıcı engellemeler sebep olmaktadır. Çünkü her mod farklı fazda ve zayıflama sabitinde yayılır. Çok uzak mesafelerde bir mod (genel olarak en düşük zayıflama oranına sahip olan) şiddet olarak baskın olmaya başlar. Diğer modların engellemeleri de şiddette azalmaya sebep olur ve genel olarak genlik azalmalarının derinliği küçülmeye başlar.



Şekil 2.1. VLF sinyal yayılımı [26]

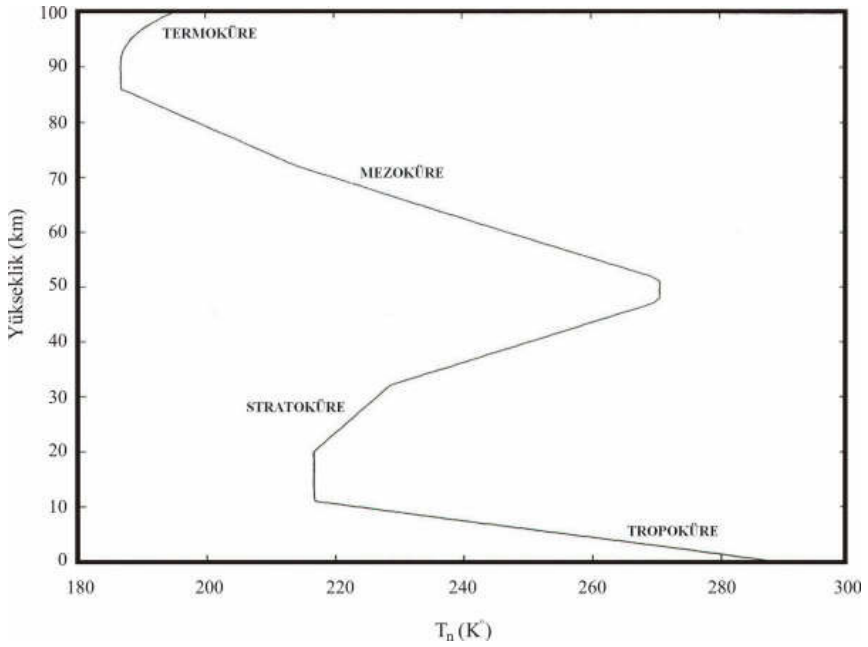
3. İYONKÜRENİN D BÖLGESİ

İyonkürenin 50–100 km arasında zayıf iyonlaşmış bölgesi D bölgesi olarak bilinir. Bununla birlikte radyo dalgaları D bölgesinde yayılırken elektronlar ve nötrler arasındaki çarpışma frekanslarına bağlı olarak soğurulurlar. 100 kHz'in altındaki frekanslarda yansıma etkileri de önemlidir.

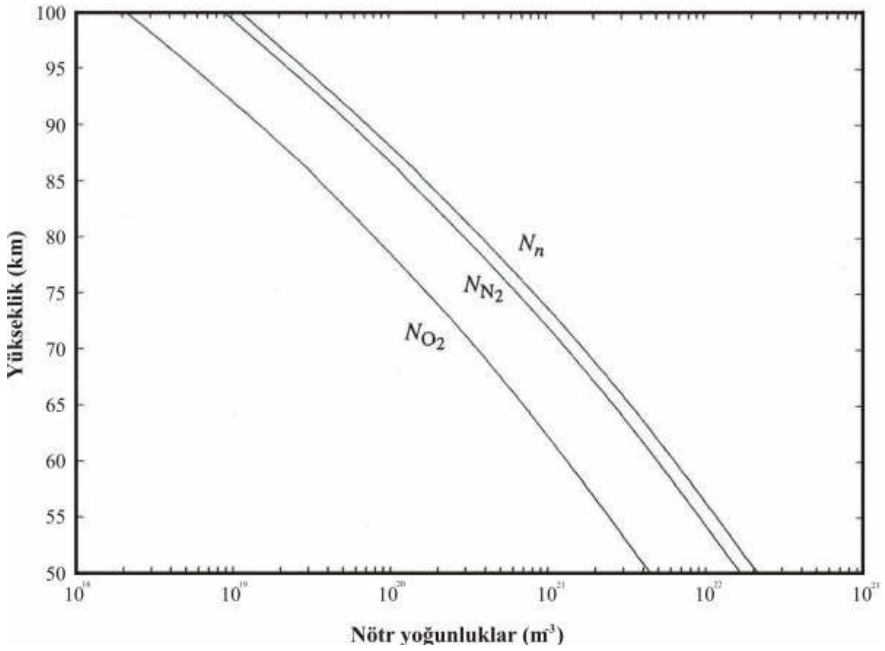
3.1. 100 Km'nin Altındaki Nötr ve İyonlaşmış Atmosfer

Nötr atmosfer yüksekliğe bağlı olarak sıcaklık değişimi temel alınarak bölgelere ayrılmıştır. Yer yüzeyine yakın kısım tropoküre olarak adlandırılır. Sıcaklık yükseklikle azalarak ~12 km'de yaklaşık -70^0C olur. Tropoküredeki soğumanın sebebi enerji kaynağının Yer yüzeyi olmasıdır. Çünkü yeryüzü Güneş'ten gelen radyasyonun çoğunu emer. Böylece ısı, alt atmosferdeki kütlelere ışıma ve taşıma yoluyla iletilir ve daha sonra yukarı doğru rasgele 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 -90^0C değerini alır. Mezoküredeki bu soğuma, karmaşık fotokimyasal ve ışınım süreçleri ile ifade edilirler. 90 km'nin üstü termoküre olarak bilinir ve sıcaklık yükseklikle birlikte düzenli olarak artar [49–51]. Termoküredeki sıcaklığın kaynağı Güneş'ten gelen mor ötesi yayılım tarafından atmosferdeki bileşenlerin foto ayrışması ve foto iyonlaşmasıdır. Şekil 3.1'de ilk 100 km yükseklik için atmosferik bölgelerdeki nötr sıcaklığın yükseklikle değişimi gösterilmiştir.

Nötr parçacıkların bağıl oranlarına göre atmosfer iki bölgeye ayrılır. 100 km'nin altında gazların bağıl oranları hava akımları tarafından oluşturulan karışıma bağlı olarak sabit kalır. Bu bileşim %78 Azot (N_2) ve %21'i Oksijen (O_2) dir. Moleküler difüzyonun düzensiz difüzyonlardan daha hızlı olduğu ~100 km'nin üstünde bileşenler ayrı ayrı dengededir. Bu denge, yerçekiminin aşağı doğru kuvveti ve aşağıdaki büyük yoğunlukların sebep olduğu yukarı doğru basınç kuvveti arasındaki dengeyle tanımlanabilir [51]. Şekil 3.2'de nötr yoğunlukların yükseklikle değişimi gösterilmiştir.



Şekil 3.1. 100 km'nin altındaki atmosferin ısıl yapısı [3]



Şekil 3.2. Nötr yoğunlukların yükseklikle değişimi [3]

Mezoküre ile Tropoküre arasındaki bölgenin balonlar, uçaklar ve uydulardan uzun süreli gözlemler yapılamamaktadır. Genel olarak, bu bölgenin ölçümleri küçük bölgelerde birkaç dakikalık ölçümler sağlayan sesli roket ölçümleriyle yapılabilir [52]. Bununla birlikte, Mezoküre'nin uzaktan algılanması ~100 kHz'in altındaki frekanslarda mümkündür. Çünkü iyonlaşmanın küçük bir bileşenin varlığı bu bölgeyi bu frekanslarda elektromanyetik dalgalar için iyi bir yansıtıcı yapar. Bu tür uzaktan algılamalar iyonkürenin alt kısmını incelemek için güçlü bir tanımlama aracı olabilir.

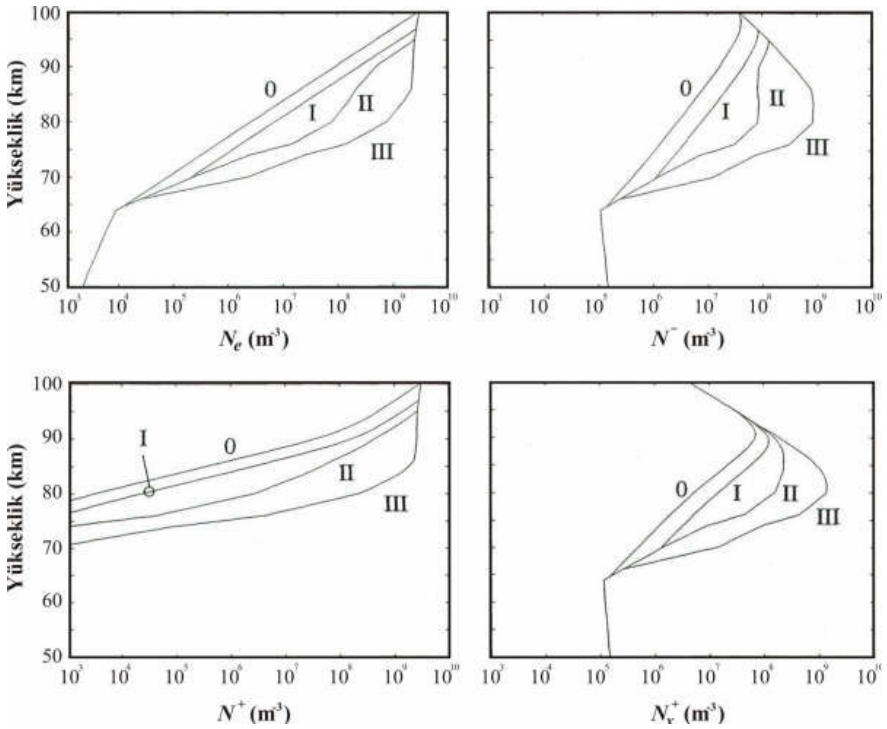
Mezoküre (50–90 km), iyonkürenin en alt bölgesi olarak düşünülen zayıf-iyonlaşmış D bölgesi olarak tanımlanabilir. E bölgesi 90 ile 160 km arasında, F bölgesi ise 160 km üzerinde yer alır. D bölgesinin standart bir tanımına göre bu bölge 1 ile 1000 MHz arasındaki radyo dalgalarının zayıflamasının çoğundan sorumludur. Bu tanımlama, D bölgesinin radyo yayılımı üzerindeki önemli etkisini ve düşük frekanslarda bu bölgenin yansıma özelliklerinin deneysel ve teorik çalışmalar üzerindeki önemini açıkça belirtir

Gündüz D bölgesindeki serbest elektronların en önemli kaynağı Güneş'ten gelen mor ötesi Lyman α yayılımı (1215,7 $\overset{0}{A}$ dalga boylu) ile nitrik oksidin (NO) iyonlaşmasıdır [48]. Diğer önemli kaynak ise 1027–1118 $\overset{0}{A}$ dalga boyu arasındaki mor ötesi yayılımı ile uyarılmış oksijen (O_2) moleküllerinin iyonlaşmasıdır. Güneş'ten gelen X ışınları 90 km'nin üzerinde önemli rol oynar. Gece ise NO^+ D bölgesinde baskın temel pozitif iyondur [53]. Orta enlemdeki gece D bölgesi, Ekzoküre'den (atmosferin 500–700 km üstü) saçılan hidrojen Lyman α yayılımı ve Yer'in radyasyon kuşaklarından çökelen enerjili elektronların (>40 keV) sabit akısı tarafından oluşturulur [53–55]. Galaktik kozmik ışınlar ($>10^9$ eV protonlar) hem gündüz hem de gece sırasında 50 km'nin altındaki bölge için en önemli kaynaklardır [51].

D bölgesindeki elektronların yoğunluğunun ölçülmesinde, roketten yayılan iki yüksek frekanslı sinyalin diferansiyel fazının yer-tabanlı ölçümleri, yüksek frekanslı radyo alıcılarından yayılan sinyallerin kısmi yansımaları ve örnek elektron yoğunluğu eğrileri kullanarak D bölgesinden alt iyonküre VLF dalgalarının yansımasında alınan verilerin işlenmesi gibi birkaç teknik geliştirilmiştir [56–58]. VLF tekniği zor bir veri yorumlama işlemi gerektirir. Fakat alt iyonküre VLF sinyallerinin sürekli faz gözlemleri D bölgesinin elektron yoğunluğunun günlük değişimini en iyi şekilde gösterme imkânı sağlar. Tüm bu metotlar kullanılarak yapılan gözlemler D bölgesinde hem gündüz hem de gece elektron yoğunluğunun oldukça değişken olduğunu ortaya çıkarılmıştır [54]. Gece D bölgesindeki elektron yoğunluğundaki bu değişkenlik dört farklı model kullanılarak Şekil 3.3'te gösterilmiştir. 0 ve I değişimleri, Wait ifadesi olarak bilinen elektron yoğunluğunun üstel artışının kullanıldığı temele dayanır [24].

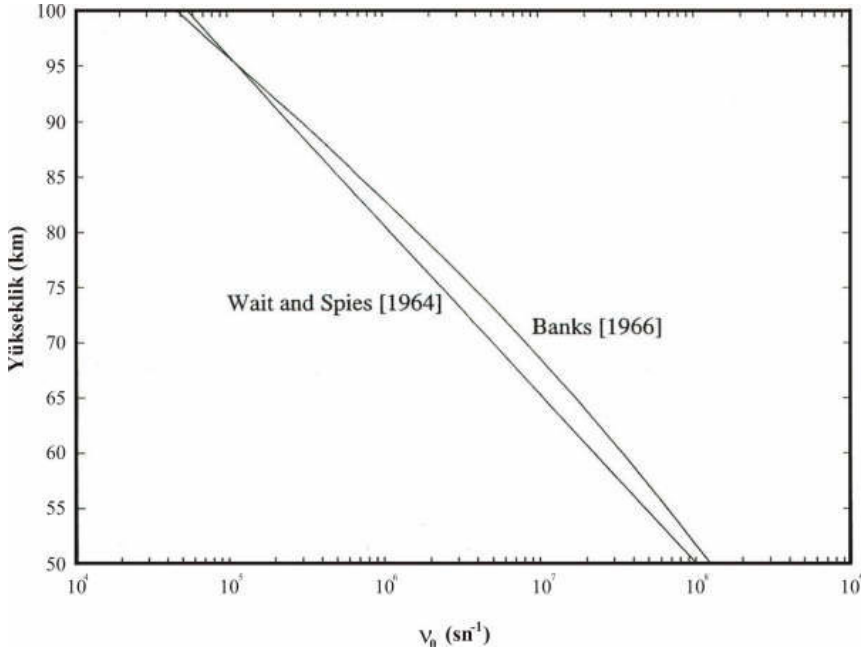
$$N_e(z) = 1.43\times10^7 \exp(-0.15h')\exp[(\beta-0.15)(z-h')] \quad (3.1)$$

Burada, h' km olarak referans yüksekliği ve β eğrinin keskinliğini tanımlayan ve km^{-1} biriminde ölçülen bir parametredir. β ve h' her ikisi de Güneş'ten gelen zenith açısı ile değişir. h' sırasıyla $h' = 87$ km ve $h' = 85$ km ve gece için $\beta = 0{,}5$ km^{-1} dir [24,59,60]. 84 km < h' < 87 km ve β = 0,5 km^{-1} değerleri ile denklem 3.1 kullanılarak yapılan model tahminleri Yer-iyonküre dalga kılavuzundaki gece VLF yayılımının gözlemleri ile iyi bir şekilde uyuştuğunu gösterir [61]. II eğrisi, Yer-iyonküre dalga kılavuzundaki VLF sinyallerinin yayılımı üzerindeki yıldırım-etkili elektron yağışının etkilerinin araştırıldığı çalışmalarda kullanılmıştır [3, 48, 62, 63]. III eğrisi, 70 ve 90 km 'ler arasında yoğunluğun II eğrisinden 10 kat daha fazla olduğunu gösterir. IRI (International Reference Ionosphere) 0, I, II ve III eğrilerini sırasıyla 100 km, 97 km, 90 km ve 95 km 'nin üzerinde kabul etmiştir [64]. Elektron yoğunluğu N_e; temel pozitif iyonların (yani, NO^+ ve O_2^+) yoğunlukları N^+; negatif iyonlar (yani, O_2^-, CO_3^-, NO_2^-, NO_3^-) yoğunlukları N^- ve pozitif su kümelerinin ya da proton hidratlarının ($H^+(H_2O)_n$) yoğunlukları N_x^+ ile gösterilmiştir.



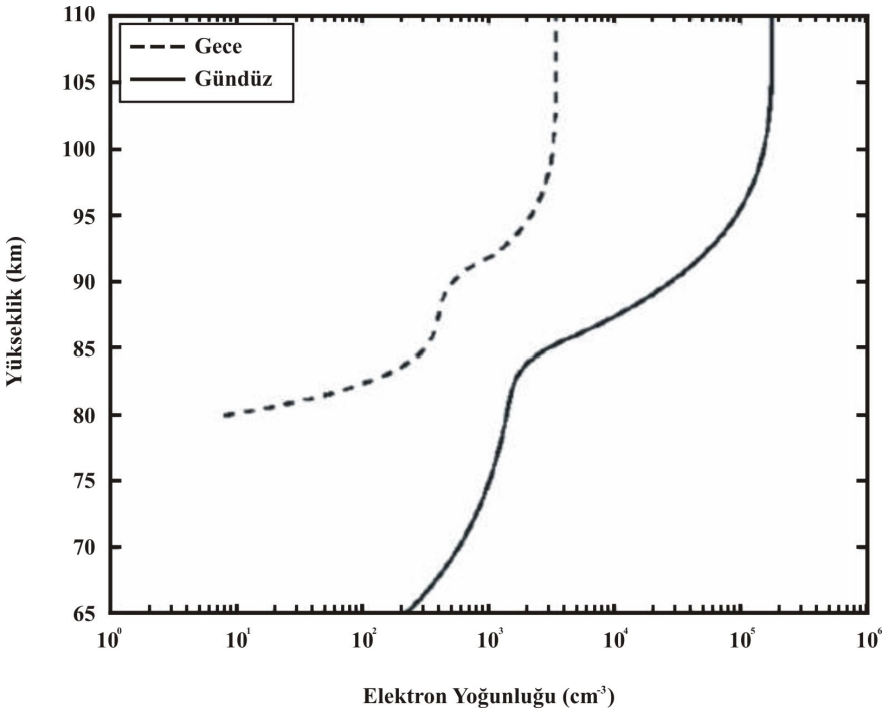
Şekil 3.3. Elektron ve iyon yoğunluklarının yükseklikle değişimleri [3].

İki farklı elektron-nötr çarpışma frekansı eğrileri Şekil 3.4 ‘ te gösterilmiştir. Basit üstel ifade, ses roketlerinden ve kısmi yansıma verilerinden elde edilen deneysel eğrileri tanımlamak için 1964 yılında Wait ve Spies tarafından ileri sürülen bir yaklaşımdır [57,58]. Bu yaklaşımda çarpışma frekansı elektron enerjisinden bağımsız farz edilir ve kırılma indisinde “etkin” çarpışma frekansı (υ_{eff}) olarak kullanılır [12,65]. Yükseklikle çok az bir şekilde değişen ve 1966 yılında Banks tarafından ileri sürülen bu ikinci ifade, oksijen ve nitrojendeki elektronların ortalama momentum-transfer çarpışma frekanslarının (υ_{av}) toplamıdır. Momentum-transfer frekansları laboratuarlarda ölçülen momentum-transfer kesit alanlarından elde edilmiştir ve çoğunlukla aeronomik çalışmalarda kullanılır[66].



Şekil 3.4. Elektron-nötr çarpışma frekansının yükseklikle değişimi [3]

D bölgesinin kimyası çok karmaşıktır ve hala tam olarak anlaşılamamıştır. Temel nötr bileşenler N_2 ve O_2 dışında O, O_3, NO, NO_2, CO_2, H_2O gibi küçük bileşenler ve meteroidlerden kaynaklanan Mg, Si, Na, Fe gibi bileşenler önemli rol oynarlar. Elektronlar ve pozitif iyonlar foto iyonlaşma ile negatif iyonlar ise elektronların nötrlerle bağlanması ile üretilir. ~70 km’nin altında baskın iyonlar, H_3O^+, H_5O^+ gibi sulu moleküler iyonlar ve $H^+(H_2O)_n$ ağır iyon gruplarıdır. Pozitif moleküler iyonların elektronlarla yüksek birleşme oranlarına bağlı olarak gece D bölgesi elektron yoğunluğu keskin bir şekilde kısalır ve D bölgesi Güneş’in batışından itibaren ~80 km’nin altında fiilen kaybolur. Bu etki, gündüz ve gece D bölgesi elektron yoğunlukları değişimleri Şekil 3.5’te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Gece ve gündüz orta enlem D bölgesi elektron yoğunluğunun değişimi [42]

D bölgesinde serbest elektronların kayıplarına yol açan en önemli süreçler ayrışarak tekrar birleşme ve üç-kısımlı bağlanma reaksiyonlarıdır. Ayrışarak tekrar birleşme sürecinde, bir elektron moleküler iyon tarafından yakalanır ve daha sonra bileşenlerine ayrılır.

$$XY^+ + e \rightarrow X + Y \tag{3.2}$$

Bu süreç için reaksiyon katsayısı ~10^{-7} cm^3s^{-1} dir. Bu süreçte yer alan pozitif iyonlar N_2^+, O_2^+ ve NO^+ dır. D bölgesindeki yüksek nötr yoğunluklarına bağlı olarak üç-kısımlı çarpışmaları kapsayan bağlanma süreçleri negatif iyonların üretiminde etkili olan serbest elektronların kayıplarına katkıda bulunur. O_2'yi içeren bu tip reaksiyonlardan en önemlisi aşağıda verilmiştir.

$$e + O_2 + M \rightarrow O_2^- + M \tag{3.3}$$

Burada M, enerji ve momentumu korumak için reaksiyonda gerekli olan O_2 gibi bir nötr bileşeni tanımlar. O_2^- iyonu ise O^-, O_3^- ve NO_2^- gibi negatif iyonların üretiminde ortaya çıkan diğer bileşenlerle reaksiyona girer.

Tablo 3.1. Gece D bölgesi parametreleri [42]

D-Bölgesi Parametreleri	60 km	70 km	80 km	90 km
Nötr yoğunluk, n_n [cm^{-3}]	$7.53x10^{15}$	$1.96x10^{15}$	$2.84x10^{14}$	$3.93x10^{13}$
Sıcaklık [^0K]	245	173	168	176
Plazma yoğunluğu, N_e [cm^{-3}]	< 0.1	< 1	50	$5x10^2$
Plazma frekansı, ω_p [$rads^{-1}$]	$1.8x10^4$	$5.6x10^4$	$4.0x10^5$	$1.3x10^6$
İyon-nötr çarpışma frekansı, υ_{in} [s^{-1}]	$3.64x10^6$	$9.46x10^5$	$1.37x10^5$	$1.89x10^4$
Elektron-nötr çarpışma frekansı, υ_{en} [s^{-1}]	$6.36x10^7$	$1.39x10^7$	$1.99x10^6$	$2.79x10^5$
Manyetik alan [G]	0.436	0.434	0.432	0.430
Elektron dönme frekansı [$rads^{-1}$]	$7.68x10^6$	$7.64x10^6$	$7.61x10^6$	$7.57x10^6$
Elektriksel İletkenlik [S/m]	$4.4x10^{-11}$	$2.0x10^{-9}$	$1.4x10^{-7}$	$5.0x10^{-5}$
Temel pozitif iyonlar	$H^+(H_2O)_n$	$H^+(H_2O)_n$	$H^+(H_2O)_n$, NO^+ , O_2^+	NO^+ , O_2^+
Temel negatif iyonlar	HCO_3^-, NO_3^-, CO_3^-, CO_4^-, O_2^-	HCO_3^-, NO_3^-, CO_3^- CO_4^-, O_2^-	HCO_3^-, O_2^-	

3.2. D Bölgesinin Kırma İndisi

Bir iyonlaşmış gaz ya da plazmadaki radyo dalgasının yayılım teorileri, dış bir etki ile yüklenmiş elektrik ve manyetik alanlar altındaki plazma bileşenlerinin hareketini ve plazma bileşenleri konusunda farklı yaklaşımları ele alır. Bu teorilerin amaçlarından birisi bir kırılma indisi türetmek veya daha genel anlamıyla plazma için bir elektriksel geçirgenlik matrisi oluşturmaktır. En basit teori, elektronlar ve iyonların sıfır sıcaklıkta kabul edildiği tam iyonlaşmış çarpışmasız "soğuk plazma" olarak tanımlanır. Burada ısıl çalkantılar ihmal edilir ve yalnızca bir elektromanyetik dalganın etkisi altındaki iyonlar ve elektronların hareketi düşünülür. Soğuk plazma teorisi, çok bileşenli bir plazmadaki küçük genlikli zaman uyumlu tedirginliklerin kestiriminde oldukça güçlü bir teoridir [67]. Günümüzdeki çalışmalarda, D bölgesindeki plazma, iyon ve nötr moleküllerin hareketsiz olduğu ve elektronların ise nötr sıcaklık ve elektronların sıcaklığının bir fonksiyonu olarak durgun parçacıklarla çarpıştığı zayıf iyonlaşmış bir Lorentzian gazı olarak tanımlanabilir. Bir Lorentzian gazı içindeki bir elektromanyetik dalganın yayılımını tanımlayan teori "Manyetoiyonik" teori olarak ta bilinir [12,65]. Matematiksel olarak manyeto-iyonik teori, soğuk plazma teorisi ile hemen hemen benzerdir ve teorik olarak birbirlerinden zor ayrılır. Manyeto-iyonik teori, çoğu elektron çarpışmalarının nötr parçacıklarla meydana geldiği ve baskın iyon türlerinin çok ağır ve hareketsiz olduğu iyonkürenin E ve az iyonlaşmış D bölgesi için uygundur.

Bir manyetik zayıf iyonlaşmış plazma içindeki radyo dalgası için kırılma indisinin basit hali, elektronun hareketsiz nötr parçacıklarla yaptığı çarpışmaların ortalama frekansı, elektronun kütlesi ve hızı ile orantılı sürtünme kuvveti ile birlikte sabit bir manyetik alan (Yer'in manyetik

alanı) varlığında ve elektrik alanının etkisi altında ortalama elektron için hareket denklemlerinin çözümünü kapsar. Elektromanyetik dalgaların yayılımı tanımlayan iki Maxwell denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega \mathbf{B} \tag{3.4}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathrm{J} - i\omega \varepsilon_0 \mathbf{E} \right) \tag{3.5}$$

Burada **E** elektrik alan şiddeti, **B** manyetik alan şiddeti ve **J** ise akım yoğunluğudur. Plazma içindeki yayılım denklemi üstteki ikinci denklemin sağ tarafına boş uzay yer değiştirme akım yoğunluğu $i\omega\varepsilon_0 \mathbf{E}$ ve akım yoğunluğu **J**'nin zaman-uyumlu elektrik alanının etkisi altındaki yüklerin hareketine bağlı olarak yazılmasıyla elde edilir. Lorentz kuvvet denklemi;

$$i\omega \mathbf{m_e} \mathrm{V} = \mathbf{e}\left(\mathrm{E} + \mathrm{V} \times \mathrm{B}_0 \right) - \mathbf{m_e} \nu \mathrm{V} \tag{3.6}$$

şeklinde ifade edilir. Burada **e** ve $\mathbf{m_e}$ sırasıyla elektronun yükü ve kütlesi, **V** ortalama elektron hızı, $\mathbf{B_0}$ Yer'in manyetik alanı (dalganın **B** alanı ihmal edilmiştir) ve ν ortalama momentum-transfer çarpışma frekansıdır. Bu denklemde $\mathbf{J} = N_e e\mathbf{V} = \sigma \cdot \mathbf{E}$ yazılırsa σ iletkenlik matrisi aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} \tag{3.7}$$

Bir kartezyen koordinat sisteminde iletkenlik matrisinin elemanları;

$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2 (\nu + i\omega)}{(\nu + i\omega)^2 + \omega_{ce}^2} \tag{3.8}$$

$$\sigma_{xy} = -\sigma_{yx} = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2 \omega_{ce}}{(\nu + i\omega)^2 + \omega_{ce}^2} \tag{3.9}$$

$$\sigma_{zz} = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pe}^2}{\nu + i\omega} \tag{3.10}$$

$$\sigma_{xz} = \sigma_{yz} = \sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0 \tag{3.11}$$

tanımlanabilir. Burada $\omega_{pe}\left(=\sqrt{\frac{N_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}\right)$ elektron plazma frekansı ve $\omega_{ce}\left(=\frac{|e|B_0}{m_e}\right)$ elektron siklotron frekansıdır. Yukarıdaki ikinci Maxwell denklemi şimdi tekrar aşağıdaki gibi yazılabilir [68,69].

$$\nabla \times \mathbf{H} = i\omega\varepsilon_0\left(I - i\frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}\right)\mathbf{E} = i\omega\varepsilon_0\varepsilon \tag{3.12}$$

Burada I birim matris ve ε plazmanın dielektrik matrisidir ve aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} \tag{3.13}$$

Dielektrik matris, kartezyen koordinatlardaki x, y, z eksenlerinin "temel eksenler" $(x - iy)/\sqrt{2}$, $(x + iy)/\sqrt{2}$, z dönüşümü kullanılarak diyagonal matris şeklinde yazılabilir [43].

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \tag{3.14}$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{xx} - i\varepsilon_{xy}\ , \qquad \varepsilon_2 = \varepsilon_{xx} + i\varepsilon_{xy}\ , \qquad \varepsilon_3 = \varepsilon_{zz} \tag{3.15}$$

Diğer taraftan eğer "temel eksen" koordinatları yukarıdaki gibi Kartezyen koordinatlara dönüştürülürse ve koordinat eksenleri döndürülürse $Y = \omega_{ce}/\omega$ vektörü z ekseniyle θ açısı yaparak x-z düzleminde olur. Böylece dielektrik matrisi aşağıdaki gibi verilir[43].

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(\varepsilon_1+\varepsilon_2)\cos^2\theta+\varepsilon_3\sin^2\theta & \frac{i}{2}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\cos\theta & \left[\frac{1}{2}(\varepsilon_1+\varepsilon_2)-\varepsilon_3\right]\sin\theta\cos\theta \\ -\frac{i}{2}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\cos\theta & \frac{1}{2}(\varepsilon_1+\varepsilon_2) & -\frac{i}{2}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\sin\theta \\ \left[\frac{1}{2}(\varepsilon_1+\varepsilon_2)-\varepsilon_3\right]\sin\theta\cos\theta & \frac{i}{2}(\varepsilon_1-\varepsilon_2)\sin\theta & \frac{1}{2}(\varepsilon_1+\varepsilon_2)\sin^2\theta+\varepsilon_3\cos^2\theta \end{pmatrix} \quad (3.16)$$

Bir homojen plazma için dalga normalinin Y vektörüyle θ açısı yaptığı bir dalganın kırılma indisi (n) Maxwell denklemlerinin çözümünden elde edilir. Elektrik alan bileşenleri E_x, E_y ve E_z arasındaki ilişki yukarıdaki dielektrik matrisi ile bağlantılıdır. Plazmanın diyagonal dielektrik matrisinin elemanları cinsinden genel bir kırılma indisi ifadesi aşağıdaki gibidir [44,67].

$$n^2 = \frac{\varepsilon_1\varepsilon_2\sin^2\theta+\frac{1}{2}\varepsilon_3(\varepsilon_1+\varepsilon_2)(1+\cos^2\theta)+S}{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)\sin^2\theta+2\varepsilon_3\cos^2\theta} \quad (3.16)$$

Burada,

$$S = \pm\left\{\left[\varepsilon_1\varepsilon_2-\frac{1}{2}(\varepsilon_1+\varepsilon_2)\varepsilon_3\right]^2\sin^4\theta+\varepsilon_3^2(\varepsilon_1-\varepsilon_2)^2\cos^2\theta\right\}^{\frac{1}{2}} \quad (3.17)$$

dir. Temel ilişkilerin diyagonal dielektrik matrisinde tanımlandığı kırılma indisinin bu çok yönlü ifadesi her manyetik plazma için geçerlidir.

Bir zayıf iyonlaşmış Lorentzian gazı için kırılma indisi denkleminin çok iyi bilinen alternatif bir şekli ise Manyeto-iyonik teori temellidir ve Appleton Hartree denklemi olarak bilinir [12,65].

$$n^2 = 1-\frac{X}{1-iZ-\frac{Y^2\sin^2\theta}{2(1-X-iZ)}\pm\sqrt{\frac{Y^4\sin^4\theta}{4(1-X-iZ)^2}+Y^2\cos^2\theta}} \quad (3.18)$$

Burada $\mathbf{X}=\frac{\omega_{pe}^2}{\omega^2}$, $\mathbf{Y}=\frac{\omega_{ce}}{\omega}$, $\mathbf{Z}=\frac{\nu}{\omega}$ dir. Denklem (3.18) deki ifade denklem (3.16) deki ifadeye eşit olduğu gösterilebilir.

$$\varepsilon_1 = 1-\frac{X}{1+Y-iZ}, \qquad \varepsilon_2 = 1-\frac{X}{1-Y-iZ}, \qquad \varepsilon_3 = 1-\frac{X}{1-iZ} \quad (3.19)$$

Appleton-Hartree denklemi elektromanyetik dalganın iyonkürede yayılım çalışmalarında geniş ölçüde kullanılır. Her elektromanyetik dalga frekansı için bu denklemin sonucunda iki mod ortaya çıkar. Bunlardan biri paydadaki pozitif diğeri ise negatif işarete karşılık gelir. Çünkü manyetik alanın var olduğu iyonküre ortamı çift kırınımlıdır. Manyetik alanın olmadığı plazmada dalga yayılımının davranışına benzeyen dalga (çoğunlukla paydadaki pozitif işaretli dalga) "ordinari" diğeri ise "ekstraordinari" olarak adlandırılır. Çarpışma terimi Z, kırılma indisinin sanal kısmından sorumludur ve elektron-nötr çarpışmalarına bağlı olarak dalgaya ait enerji kayıplarının sebebidir.

Farklı yüksekliklerden yansıyan iki manyeto-iyonik modun yayılımı dalga frekansına bağlıdır. Yüksek frekanslarda ($f \geq 1$ MHz) iyonküre dielektrik olarak görülür. Manyetik alan ve çarpışma etkilerinin (Y=Z=0) ihmal edildiği en basit durum, ordinari moda karşılık gelir ve kırılma indisi aşağıdaki hale gelir.

$$n^2 = 1 - X = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \tag{3.20}$$

Yatay tabakalı bir iyonkürede dikey etki alanı için yansıma şartı kırılma indisinin sıfır (n=0) olmasıdır. Bunun anlamı $\omega_p^2 = \omega^2$ ve dalga, plazma frekansının kendi frekansına eşit olduğu yükseklikten yansır. Bu da kritik frekans olarak adlandırılır.

VLF'de ise D bölgesindeki çarpışma frekansı dalga frekansından çok çok büyüktür ($\nu_e >> \omega$). Bunun için iyonküre ortamı dielektrikten çok iletken gibi davranır. Bu durumda dalga, dalga boyuna bağlı olarak kısa bir mesafeden yansıyacaktır. Bu durumda bir iletken üzerine gelen dalga durumundaki gibi keskin bir yansıma sınırı olacaktır. Bunun sonucunda VLF dalgaları D bölgesinden yansır ve VLF dalgaları için kırılma indisi aşağıdaki hale gelir.

$$n^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ} \tag{3.21}$$

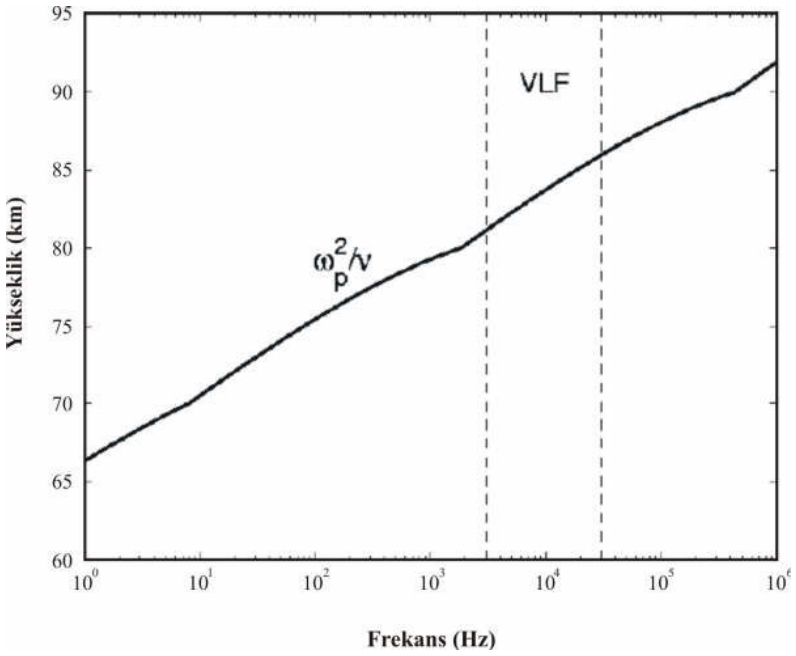
Manyetik alanın etkilerinin ihmal edildiği ve çarpışmaların belirleyici bir rol aldığı durumlarda uygulanır. $Z >> 1$ olduğu durumda denklem aşağıdaki duruma dönüşür.

$$n^2 = 1 - i\frac{X}{Z} \tag{3.22}$$

Son denklem çarpışmalardan dolayı $n^2 = 0$ olduğu yükseklikte bir kesim noktası olmadığını belirtir. Bunun yerine n^2 , 1'den kompleks bir değer olan $1 - i\frac{X}{Z}$'e kadar devam eder. Yansıma 1~X/Z olduğu yükseklikte olur. Bunun için aşağıdan gelen VLF dalgasının X > Z olduğu bölgenin üstüne geçmemelidir [65]. VLF yansıma yüksekliği aşağıdaki bağıntı ile verilir.

$$\frac{X}{Z} \cong 1 \Rightarrow \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \cong 1 \tag{3.23}$$

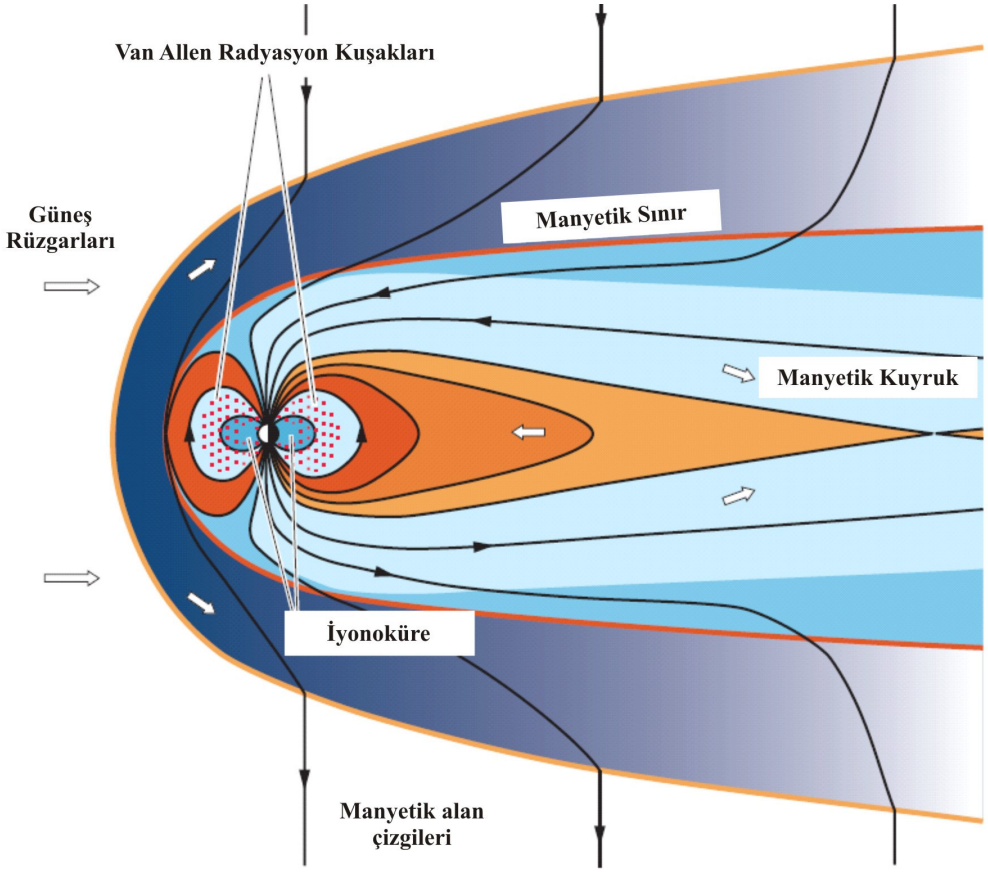
Bu denklem gece iyonküresinde düşük frekanslı dalgaların yansıma yüksekliklerini hesaplamada kullanılır ve bu hesaplamaların değişimi Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Şekilden görüleceği gibi tipik gece iyonküre VLF dalgaları 82–86 km yükseklikler arasından yansır.



Şekil 3.6. Gece iyonküresinde VLF yansıma yüksekliğinin frekansla değişimi. Yansıma $\omega \approx \omega_p^2 / \nu_e$ olduğu yüksekliklerde olur [44].

4. MANYETOKÜRE

Manyetoküre, Yer'in manyetik alanındaki yüklü parçacıkların hareketlerinin kontrol edildiği Yer atmosferinin bir parçasıdır. Ayrıca, manyetoküre plazma davranışlarının öncelikle jeomanyetik alan tarafından kontrol edildiği uzay bölgesi olarak da tanımlanır. Manyetoküre şematik olarak Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Gezegenler arası plazma yokken Yer'in dipol alanı simetrik olarak bütün doğrultularda genişleyecektir. Fakat gerçekte Güneş rüzgârı dipol alanına basınç uygulayarak Güneş tarafında yaklaşık 10 R_E ($1R_E$ = 6370 km) mesafede alanı sıkıştırır (manyetopause olarak bilinen sınırı oluşturur) ve gece tarafında uzun bir kuyruk olarak yayılarak kademeli olarak yaklaşık 60 R_E mesafede gezegenler arası alana karışır [70]. Şekil 4.1'de jeomanyetik alandaki bu bozulma ve siyah oklarla manyetik alan çizgilerinin doğrultuları gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Manyetokürenin şematik gösterimi [70].

Yer'e gelen güneş rüzgârı parçacıklarının sürekli akması sonucunda bu parçacıklar jeomanyetik alan çizgileri ile etkileşime girebilirler ve kuyrukta Güneş bölgesi doğrultusunda gelen plazmayı sıkıştıran güçlü konveksiyon alanları oluşturabilirler [71]. Yer'in yakınındaki plazma jeomanyetik alanda donmuş ise plazma sınırı olarak adlandırılan doğal bir sınır oluşur ve ısı yayan plazma ile Yer plazmasını birbirinden ayırır [70,72]. Plazma sınırını kapsayan plazma kütlesi öncelikle 1 eV küçük enerjili soğuk elektron ve protonlardan oluşur ve plazma sınırının alt kenarında $\sim 10^2$ - 10^4 el/cm^3 konsantrasyonlu yoğunluğa sahiptir. Bu dâhili manyetoküresel bölge dâhili radyasyon kuşağını ve harici radyasyon kuşağının iç kenarını kapsar.

4.1. Jeomanyetik Alan

Manyetoküresel plazma ve dalgaların davranışında oynadığı önemli rolden dolayı Yer'in manyetik alanı manyetoküreyi kapsayan bütün çalışmalar için önemli bir etkendir. Toplam jeomanyetik alan Yer'in içinde üretilen dâhili alan ve Yer dışı kaynaklardan gelen harici alanların birleşimidir. Dâhili alan genellikle Yer'in eriyik çekirdeğindeki yüklü maddelerin hareketiyle tanımlanır. Harici alan ise güneş rüzgârlarına, manyetoküre ve iyonoküredeki çok fazla sayıdaki yüklü parçacıkların hareketine bağlıdır [73]. Jeomanyetik alanı modellemek için çalışmalar dört yüzyıl önce William Gilbert'in De Magnet isimli teziyle başlamış ve günümüze kadar devam etmiştir. Günümüzde yapılan modellemelerdeki doğruluk dâhili alandaki kademeli değişimler ve harici alanın karmaşıklığı ile sınırlandırılmıştır [74]. Genelde Tsyganenko'nun nümerik modeli ve analitik dipol merkezli yaklaşım kullanılır.

Tsyganenko modeli, bir alan çizgisinin her iki yarımkürede Yer iyonküresine 100 km yükseklikte kestiği bölgeleri bulmayı sağlar. Bu her iki yarımküredeki bölgeler jeomanyetik çift olarak tanımlanır.

Dipol merkezli yaklaşım dâhili alan çizgileri boyunca ıslık dalgalarının manyetoküredeki yayılımını modellemek için kullanılır. Bu modelde, jeomanyetik alan Yer'in merkezinde yerleştirilmiş sonsuz küçük bir dipol ve dönme ekseninde 11^0 eğik olarak tanımlanır. Bu model kullanılarak herhangi bir noktadaki alan aşağıdaki ifade ile bulunabilir [70].

$$B = 0.312 \times 10^{-4} \left(\frac{R_E}{r} \right)^3 \left(1 + 3\sin^2 \lambda \right)^{\frac{1}{2}} \quad (T) \qquad (4.1)$$

Burada R_E Yer'in ortalama yarıçapı (6370 km), r Yer'in merkezinden olan uzaklık ve λ manyetik enlem (Jeomanyetik ekvatorda 0^0) dir.

Bir manyetik meridyendeki alan çizgilerini tanımlamak için kullanılan ortak bir parametre ise McIlwain's (1961), yani L dir. Dipol merkezli alan çizgisinin jeomanyetik ekvatoru kestiği noktada Yer'in merkezinden olan uzaklıktır ve Yer'in yarıçapı ile ölçülür. Bir sabit L, eş dipol toroidin veya kabuğun yüzeyindeki noktaların yerlerini tanımlar. L'in değeri L-kabuğu olarak ta bilinir. Manyetoküredeki bir olay yerden gözlemlendiği zaman yer istasyonu için L-kabuğu bilgisi çok önemlidir. Çünkü gözlenen uzayın bölgesini tanımlar.

$$\frac{r}{\cos^2 \lambda} = \frac{R_E}{\cos^2 \lambda_0} \tag{4.2}$$

Yukarıdaki dipole bağıntısından L ile yüzey manyetik enlem λ_0 arasındaki ilişki (λ=0 da $L = r / R_E$) aşağıdaki şekilde türetilebilir.

$$L = \frac{1}{\cos^2 \lambda_0} \tag{4.3}$$

Bir L için ekvatoral manyetik alan B_{eq} ,

$$B_{eq} = 0.312 \times 10^{-4} \, L^{-3} \qquad (T) \tag{4.4}$$

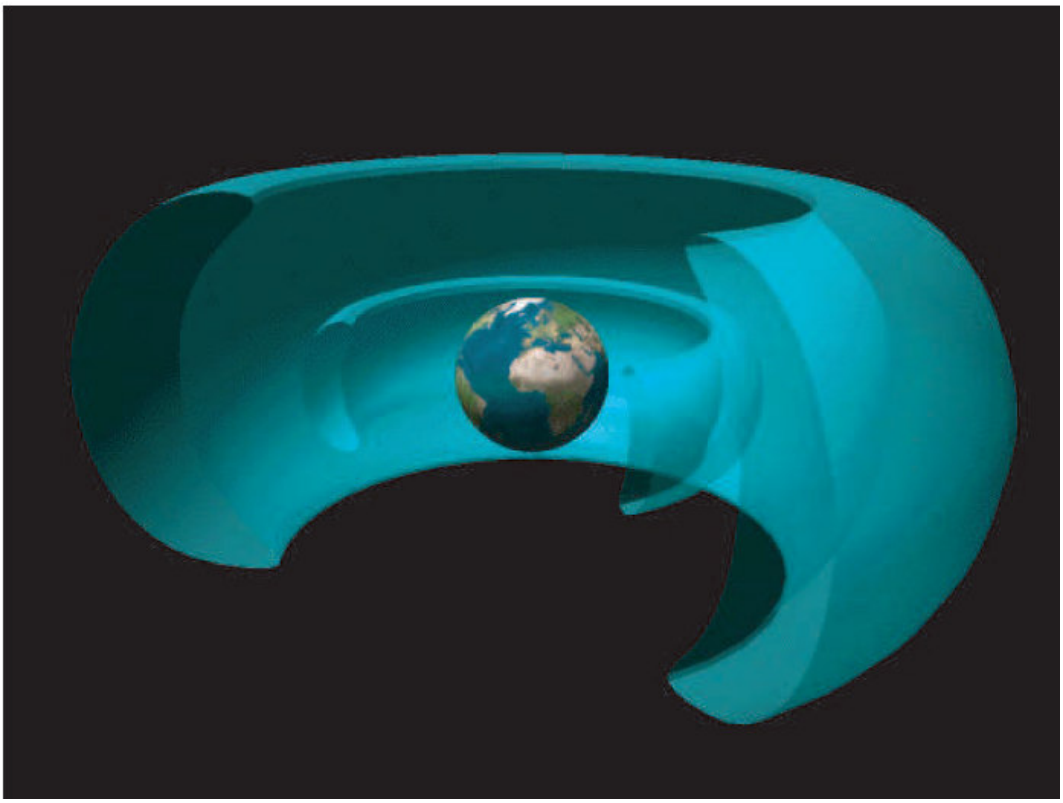
olarak ifade edilir.

Uzay araştırmacılarının genellikle kullandığı düşük-enlem, orta-enlem ve yüksek-enlem sırasıyla $L < 2$, $2 < L < 5$ ve $L > 5$ karşılık gelir.

4.2. Radyasyon Kuşakları

Bilim adamları tarafından 1958 yılında keşfedilen ve bazen Van Allen Kuşakları olarak ta adlandırılan Yer'in Radyasyon Kuşakları jeomanyetik alanda tuzaklanan enerjili elektron ve iyonların bileşiminden oluşur [75]. Plazmaküredeki soğuk plazma radyasyon kuşaklarını oluşturan enerjili parçacıklarından oluşur. Bu enerjili parçacıklar çoğunlukla 100 keV 'dan daha büyük enerjilere sahip elektron ve protonlardan oluşurlar ve jeomanyetik alanda uzun süreli tutulurlar. Böyle tuzaklanmalar kararlı manyetik alanlara ihtiyaç duyarlar ve manyetik sınır civarında güneş rüzgârları tarafından etkilenen manyetik alandaki kararsızlıklar uzun süreli tuzaklanmaları değiştirirler. Güneş rüzgârı ve Yer atmosferinin bu parçacıkların kaynağı olduğu düşünülür. Bu tuzaklanmaların güneş etkili jeomanyetik karışıklıklarda güneşin sakin zamanlarına göre daha yüksek oranda olduğu görülür.

Jeomanyetik alan birkaç gün için sakin kaldığında radyasyon kuşaklarındaki parçacıkların enerji dağılımları ve konum olarak bir denge eğiliminde olurlar [76,77]. Bir bölgesel minimum tarafından bölünmüş dâhili ve harici kuşak tarafından karakterize edilen bu yapı Yuva Bölgesi (slot region) olarak bilinir. Bu denge yapının sebepleri çok az bilinir. Bu denge yapıya değişik kaynaklar ve kayıp süreçleri sebep olabilir. Şekil 4.2'de Yer'in radyasyon kuşakları gösterilmiştir.

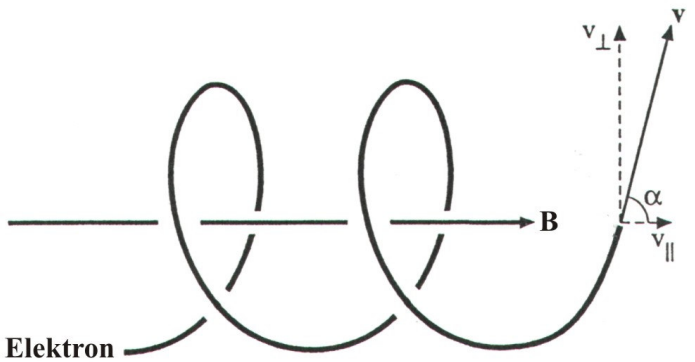


Şekil 4.2. Yer'in dâhili ve harici radyasyon kuşaklarının grafiksel gösterimi [70].

Radyasyon kuşağındaki elektronların enerjileri göreli hızlarına bağlı olarak birkaç keV ile 1 MeV aralığında değişir. Bazı hızların sonucunda da manyetoküresel radyo dalgası tarafından saçılan elektronlar bölgesel bir patlama gibi hareketlerine devam ederler.

Jeomanyetik alanda tuzaklanan bir yüklü parçacık kinetik enerjisi E, (genellikle eV cinsiden tanımlanır), L-kabuğu ve ekvatoral eğim açısı α_{eq} ile tanımlanır. α_{eq} bir parçacığın jeomanyetik ekvatordan geçtiği zaman yaptığı eğim açısıdır. Eğim açısı α, parçacığın tuzaklandığı alan çizgisine ait parçacığın sarmal yörünge açısıdır. $\alpha = 0^0$ ise parçacık alana paralel, $\alpha = 90^0$ ise parçacık alan çizgisine dik bir daire içinde hareket ediyor demektir. Bir sabit manyetik alanın (**B**) referansında dönen bir parçacığın hızı (**V**) alana-paralel bileşeni (v_{II}) ve

alana-dik bileşeni ($v_{\perp}$) olarak ikiye ayrılabilir. **V** ve **B** arasındaki α açısı eğim açısı olarak adlandırılır. Şekil 4.3'te bir elektronun davranışı gösterilmiştir. Pozitif yüklü parçacıklar için dönme zıt yönlüdür.



Şekil 4.3. Sabit bir manyetik alandaki elektronun hareketi

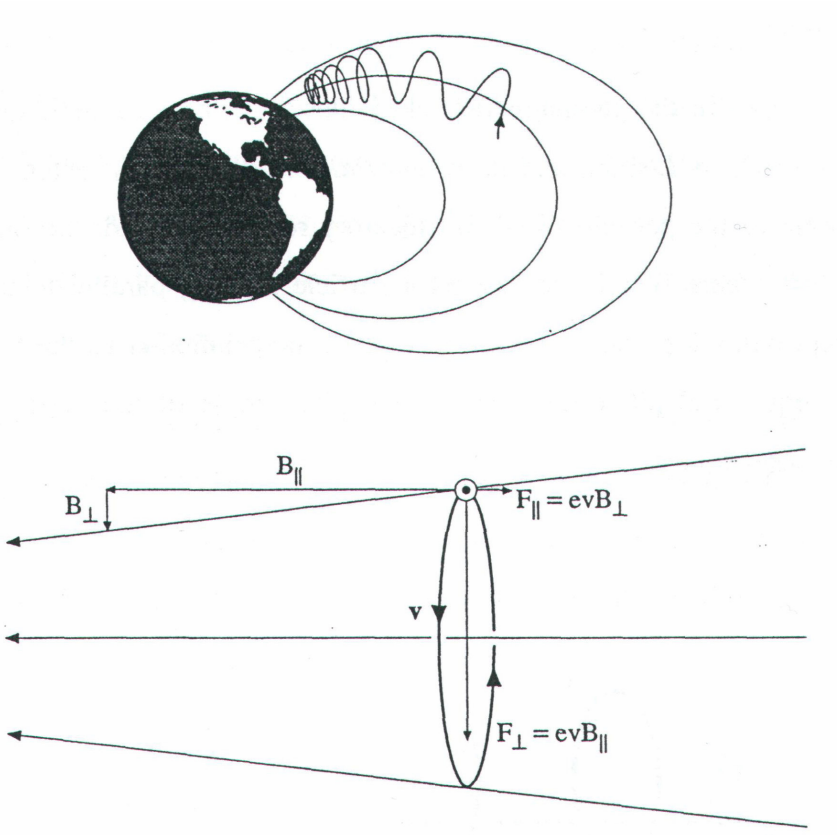
.

Jeomanyetik alanın etkisi altında, radyasyon kuşaklarının yüklü parçacıkları Güney ve Kuzey yarımküreler arasında sıçrayarak sarmal bir hareketle dönerler ve Yer etrafında sürüklenirler. Elektronlar Yer'e yakın olduklarında jeomanyetik alan şiddetindeki artış ile yarımküreler arasında sıçrama hareketi ile tuzaklanırlar. Yakınlaşan manyetik alan çizgileri eğim açılarını 90^0 ye getiren dönen elektronlar üzerinde bir kuvvet oluşturur ve bu elektronları alan çizgileri boyunca ters yönde etkileyerek diğer yarımküreye geri gönderir. Bu süreç aynalama (mirroring) olarak isimlendirilir ve manyetik alan belli bir şiddete ulaştığı zaman oluşur ve bu alan ayna alanı (B_m, mirror field) olarak adlandırılır. Dönüş elektronların ekvatoral eğim açısına dayanır. Bir alan çizgisi üzerinde bir ekvatoral eğim açısı ile birlikte bir parçacık için ayna alanı;

$$B_m = \frac{B_{eq}}{\sin \alpha_{eq}^2} \qquad (4.5)$$

dir. Ayna alanına karşılık gelen Yer yüzeyinden yukarıdaki yükseklik ayna yüksekliği (mirror height, h_m) olarak adlandırılır.

Bir yüklü parçacığın tuzaklanması ise şu şekilde olur. Yakınlaşan manyetik alan çizgileri dönen parçacık üzerinde bir kuvvet uygular ve bu kuvvetle birlikte elektronların aynalanmasına sebep olur ve zıt kutupa geri gönderir. Aynı süreç burada tekrar oluşur. Şekil 4.4'te pozitif yüklü bir parçacığın davranışı gösterilmiştir.



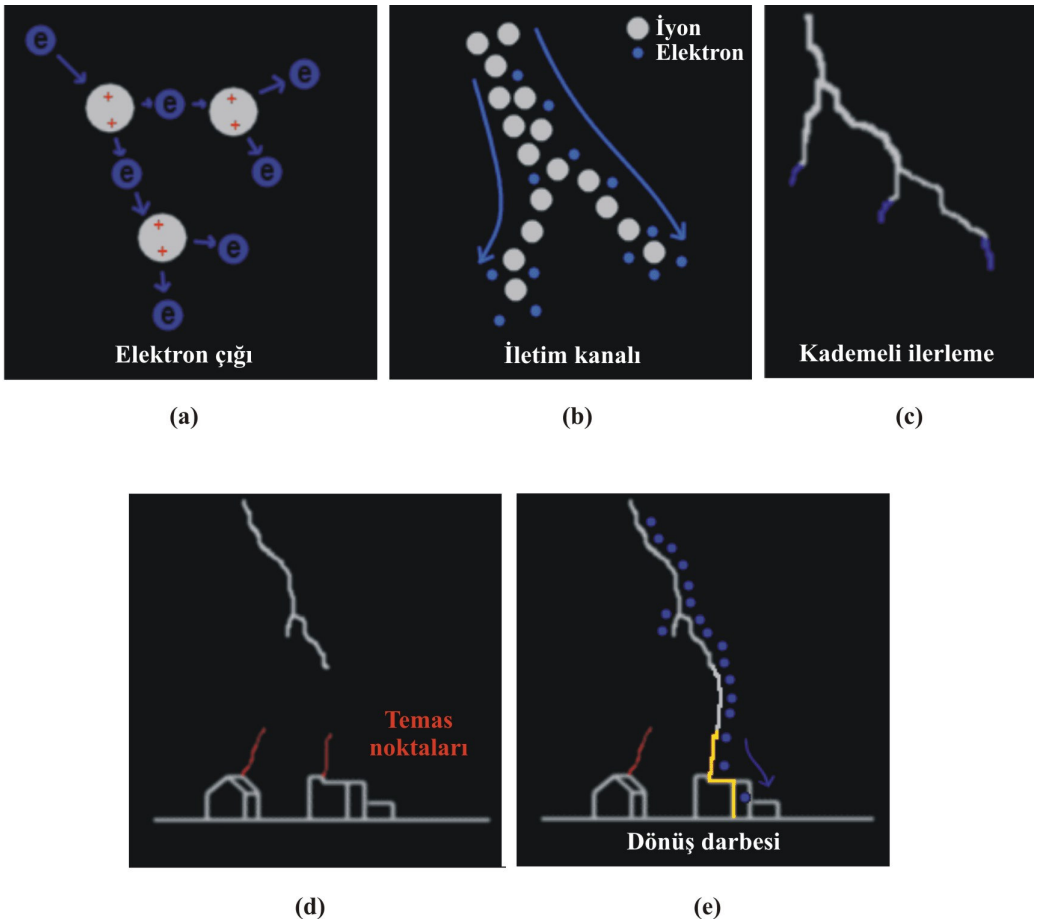
Şekil 4.4. Pozitif yüklü parçacığın davranışı

5. YILDIRIM VE ALT İYONKÜREDE OLUŞAN YILDIRIM ETKİLİ OLAYLAR

Yıldırımlar, geçici yüksek akımlı elektrik boşalmalarıdır ve atmosferde birkaç kilometre boyunca yayılırlar. Yer üzerinde ortalama olarak her saniyede yaklaşık 40 adet yıldırım boşalması oluşur. Bir yıldırım boşalması ELF ve VLF frekanslarında elektromanyetik dalgalar yayar [78]. Bu ELF/VLF dalgaları Yer-iyonküre dalga kılavuzunda yayılırlar [79]. Bir yıldırım boşalması ile yayılan elektromanyetik güç ortalama 20 GW' tır ve ~100 μs sürer. Bu elektriksel boşalmaların insan yaşamı ve küresel atmosferik ortam üzerinde birçok etkisi vardır. En belirgin yıldırım etkileri, güç ve haberleşme sistemlerinde bozulmalara, orman yangınlarına ve bazen de doğrudan yaralanmalara ve ölümlere sebep olmalarıdır. Yıldırım ayrıca atmosferik elektrik akımlarını, manyetoküredeki yüklü parçacık yoğunluğunu ve Yer-iyonküre dalga kılavuzundaki radyo ortamını etkiler [31, 40, 80–82].

Yıldırımlar, atmosferin bazı bölgelerinin yeterince büyük elektrik yüküne ulaşması ve bu yükle bağlantılı elektrik alanının havanın elektriksel delinmesine sebep olması sonucunda oluşurlar [78]. Bir tipik yıldırım yaklaşık yarım saniyelik bir sürede ve birkaç aşamadan oluşur [31]. İlk başlangıç kırılması (preliminary breakdown) bulutun içinde oluşur. Buradaki elektrik alanı belli bir değerden büyük olduğu zaman, serbest elektron bir noktaya doğru hızlanır. Bu noktada moleküller, diğer elektronlarla çarpışacak kadar yeterli kinetik enerjiye sahiptir. Çarpışma sonucu bu diğer elektronlarda hızlanmaya başlar ve elektron çığı (electron avalanche) diye adlandırılan zincirleme reaksiyon başlar. Bu bir elektron saldırısıdır ve artan pozitif yüklü iyonlar bağlı olarak bir iletken yol yapar. Bu gerçek yıldırım boşalmasının öncü işaretidir ve kademeli ilerleme (stepped leader)olarak isimlendirilir. Bu kademeli ilerleme birkaç metrelik adımlarla toprağa doğru ilerler. Her adım boyunca elektron çığları aynı tipte ve yüksek (-) yüklerden uzakta oluşur. Foto iyonlaşma ile üretilen serbest elektronlar çığları başlatır ve ışık yaymaya başlar. Bazı noktalarda birkaç tane çığ oluşur ve birkaç kola ayrılır. Kademeli başlangıç aşağıya doğru yaklaşık 10000 m/s hızla iner ve yük kanal boyunca depo edilir. Başlangıç toprağa yaklaştığı zaman, elektrik alanı artar ve yükün (+) yüklü göğe doğru oluşan ışık sütunları (streamer) burada bulunan nesnelerden (genellikle ağaç, bina gibi uzun yapılar) yukarı doğru atlama oluşur. Bu ışık sütunlarından biri başlangıç adımıyla birleştiği zaman bir kısa devre oluşur ve yük yeni bir kanaldan aşağıya doğru akmaya başlar. İlk olarak kısa devre noktasına yakın yükler harekete başlar, daha sonra kanal içindeki yükler yukarıya doğru harekete geçer. Bu dönüş darbesi (return stroke) olarak adlandırılır. Kanal boşaldığı zaman müteakip boşalmalar eski kanaldan aşağıya doğru hızla hareket ederler. Çünkü kanal hala saniyenin onda biri kadar zaman için iletkendir. Yeni bir dönüş darbesi oluşabilir ve süreç

kanalın en üst tepesinde yani bulutun içinde yeni bir yük boşalımı olana kadar devam eder. Bir tek yıldırımda 20 veya 30 tane kısmi dönüş darbesi olabilir ve bunların hepsi 1 veya 2 saniye toplam zamanda oluşur. İnsan gözü bunları yıldırım titreşimleri olarak görür. Akım, bazen birkaç 10000 A, bazen de 100000 A veya daha fazlaya yükselir. Bu çok büyük akım akışı kanalı ısıtır, patlamaya ve şok dalgasına ve şiddetli ışık patlamasına sebep olur. Biz bunu yıldırım olarak görürüz [83,84]. Şekil 5.1'de bir yıldırım oluşum süreci verilmiştir.



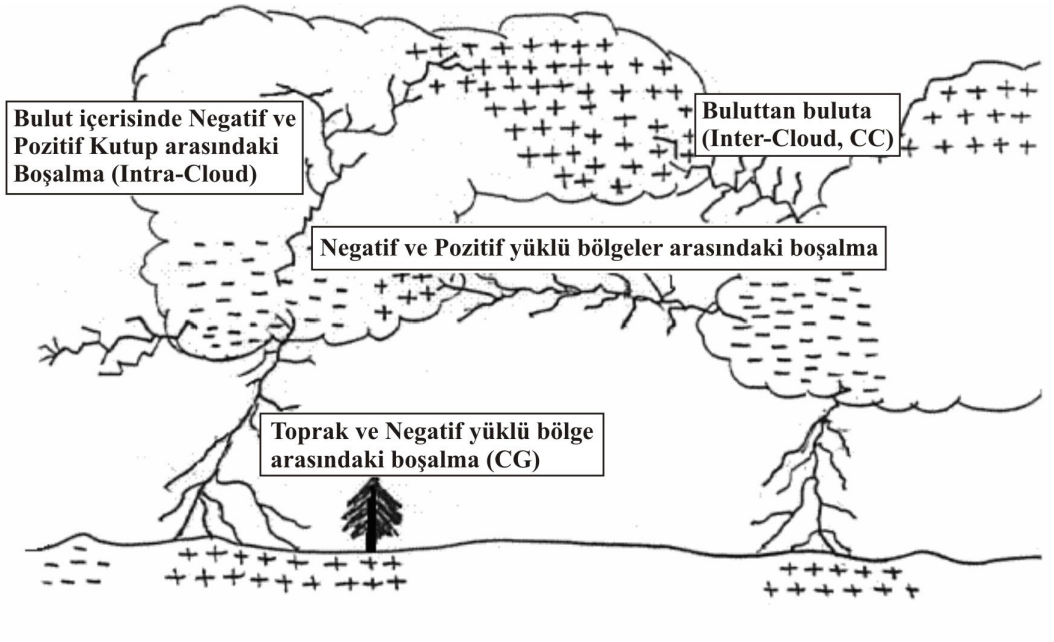
Şekil 5.1. Yıldırım oluşumunun aşamalarının gösterimi [84]

En bilinen yıldırım tipi aynı bulut içinde zıt yüklü iki bölge arasında oluşan Bulutiçi (Intra-Cloud, IC) boşalmalardır. Genellikle dışarıdan titreşim yapan ışık yayılımı şeklinde görülür. Bununla birlikte, yıldırım bulutun sınırları dışına çıkabilir ve bu parlak kanal kilometrelerce uzaktan görülür. İki farklı bulutun zıt yüklü bölgeleri arasında hava boşluğunda köprü kurularak oluşan boşalmalara Bulutlararası (Inter-Cloud, CC) boşalmalar denir. Doğrudan bulut ile yer arasında oluşan boşalmalar ise Bulut-Yer Arası (Cloud-to-Ground, CG) boşalmalarıdır. Sayısız yıldırım isimleri ve şekilleri vardır. Bazıları, alt kategorileri tanımlar,

diğerleri ise optiksel yanılsama, görünüm veya efsanelerden ortaya çıkmıştır. Bu yıldırım çeşitlerinin fotoğrafları ve şematik gösterimi Şekil 5.2 ve 5.3'te verilmiştir.

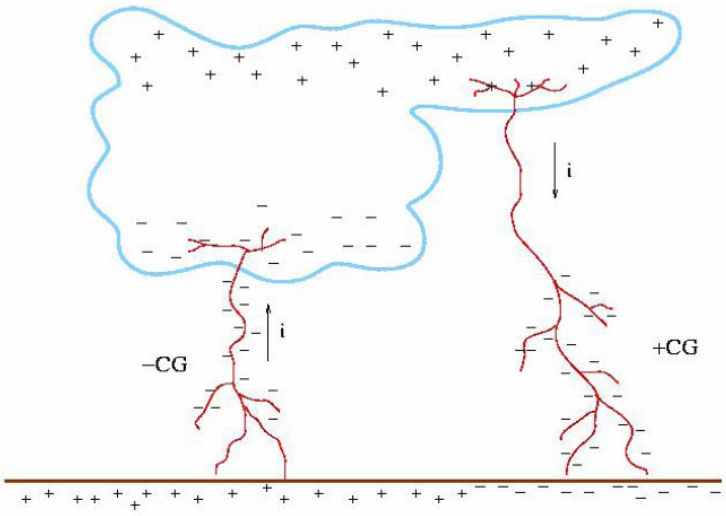


Şekil 5.2. Yıldırım fotoğrafları. **(a)** Bulutiçi Yıldırım **(b)** Bulut-Yer Arası Yıldırım [85]



Şekil 5.3. Yıldırım çeşitlerinin şematik gösterimi

Bulut-Yer arası oluşan yıldırımların % 90'ını buluttan yere doğru negatif yük taşır ve –CG olarak tanımlanır. Geri kalan %10 pozitif Bulut-Yer (+CG) boşalmalarıdır ve fırtına bulutunun pozitif yüklü bölgelerini Yer'den buluta doğru negatif yük taşıyarak nötr hale getirir. –CG boşalmalar +CG boşalmalardan sayıca fazladır. Tepe akımlarının genlikleri pozitif Bulut-Yer arası boşalmalarda daha büyüktür. Genellikle +CG yıldırımlar –CG yıldırımlardan daha büyük yük taşırlar. Şekil 5.4'te –CG ve +CG yıldırımları şematik olarak gösterilmiştir.



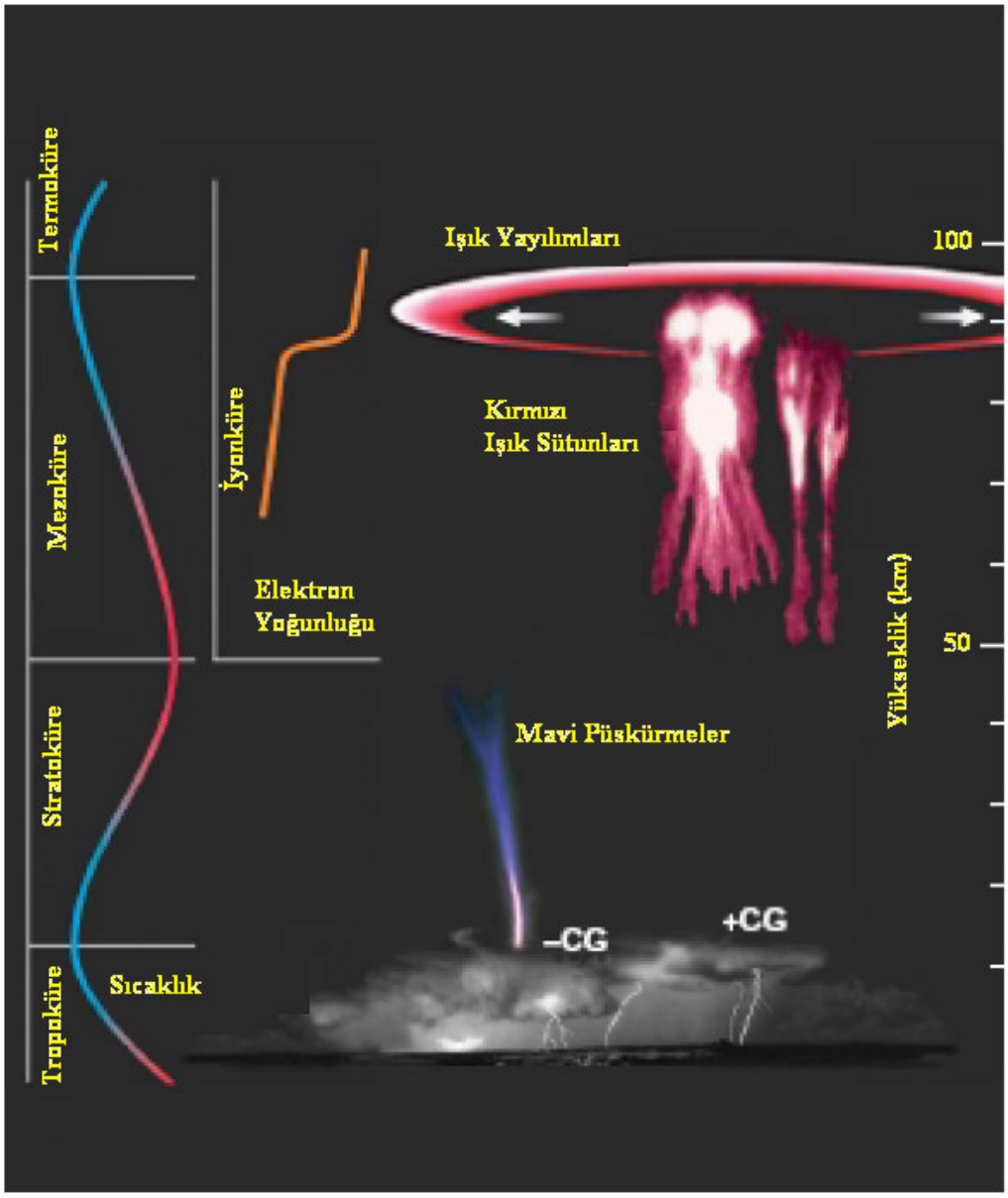
Şekil 5.4. Negatif ve pozitif CG yıldırımlarının şematik gösterimi [42]

Ayrıca yıldırım boşalmaları elektrostatik jeneratörler olarak bilinen rolleri dışında anlık optiksel yayılımlar üreten elektrik alanları ile elektriksel enerjiyi üst atmosferle birleştirirler.

5.1. Alt iyonkürede Geçici Işık Saçan Olaylar

Son yüzyılın yarısından itibaren fırtınaların üzerinde oluşan geçici optiksel parlamalara ait gözlemlere ve bilimsel çalışmalara başlanmıştır. Wilson gözlemlendiği bu boşalmaları "gökyüzüne doğru yeşilimsi rengin pervane biçiminde parlama olarak yayılması" şeklinde tanımlamıştır. Ayrıca pilotlar tarafından gözlemlenen ve rapor edilen birçok parlama olayı vardır [86]. Bu konuda ilk bilimsel çalışmalar 1989 yılında başlamıştır. Günümüzde ışık sütunları olarak bilinen bu olayın ilk görüntüsü 5 Temmuz 1989 yılında Minnesota Üniversitesinde görevli araştırmacılar tarafından O'Brien Gözlemevinde kazara tespit edilmiştir. Düşük-ışık-seviyeli bir kamera test edilirken bulutların üstünden yukarı doğru yaklaşık 30 ms süren ikiz parlamalar kaydedilmiştir [87]. Bu bilimsel keşifle birlikte tropokürede ve üst atmosfer ile alt iyonküre, yaklaşık 100 km'ye kadar olan yükseklik, aralığında oluşan elektriksel olayların yapılarının araştırılmasına ilgi artmıştır. Uydu, uçak, uzay mekiklerinin üzerine monte edilmiş cihazlarla, yeryüzündeki kameralarla ve Uluslararası Uzay İstasyonları tarafından sayısız gözlemler yapılmıştır [88]. Bu optiksel yayılmalar, Geçici Işık Saçan Olaylar (Transient Luminous Events, TLEs) olarak adlandırılmışlardır. Şekillerine, oluşma sürelerine ve oluştukları yüksekliklere bağlı olarak püskürmeler, ışık sütunları ve ışık yayılımları olarak üç ana gruba ayrılmışlardır [42]. Işık sütunlarının, ışık yayılımlarının ve mavi püskürmelerin şematik gösterimi Şekil 5.5'de verilmiştir.

TLEs'lerin özellikleri ve üretim mekanizmaları hakkında yoğun bir şekilde hem deneysel hem de teoriksel çalışmalar yapılmıştır. Öncelikle, TLEs üreten yıldırımlı fırtınalar, Amerika'da çok geniş bir alanda oluşmaktadır ve sayısız gözlemsel araştırmalar yapılmıştır. TLEs'ler ayrıca Japonya'da**,** Avusturalya'da, Afrika'da, Orta ve Güney Amerika'da ve yakın zamanda Avrupa'da gözlemlenmiştir [88–94].



Şekil 5.5. Işık sütunlarının, ışık yayılımlarının ve püskürmelerin şematik gösterimi. Ayrıca şeklin sol tarafında gece elektron yoğunluğu ve sıcaklık değişimleri verilmiştir [95].

5.1.1. Püskürmeler (Jets)

Püskürmeler yıldırım bulutunun aktif kısmının üzerinden yayılan koyu mavi ışığın oluşturduğu koni biçimli ışınlar kümesidir (tam genişliği ~$14^0 \pm 7^0$) ve ~100 kms^{-1} hızla ~40-50 km yüksekliklere doğru yayılırlar [96]. ***Mavi Püskürmeler*** (Blue Jets), yaklaşık 250 ms ile en uzun ömürlü TLEs'lerdir. Gözlemler bunların sadece tropoküredeki yıldırımlara bağlı olmadığını göstermiştir. Oluşumları, kuvvetli dolu aktivitesinin ve aktif olarak negatif bulut-toprak (-CG) boşalmalarının olduğu fırtınalara bağlıdır. Mavi Başlangıçlar (Blue Starters), mavi püskürmelere benzerler. Mavi başlangıçlar, fırtınanın hemen üstünde 17–18 km'den yayılmaya başlayarak maksimum ≈ 25 km yüksekliğe çıkarlar ve ~30–150 kms^{-1} yayılma hızlarına sahiptirler. Mavi başlangıçların spektrumları henüz tam olarak bilinmemektedir. Mavi başlangıçlardaki 427.8 nm yayılım iyonlaşmış nitrojenin ilk negatif grubundan $\left(N_2^+(1NG)\right)$ kaynaklanır. Bu süreç için gerekli eşik enerjisi 18.56 eV' tur [97]. Şekil 5.6'da püskürmelere ait iki adet fotoğraf verilmiştir.



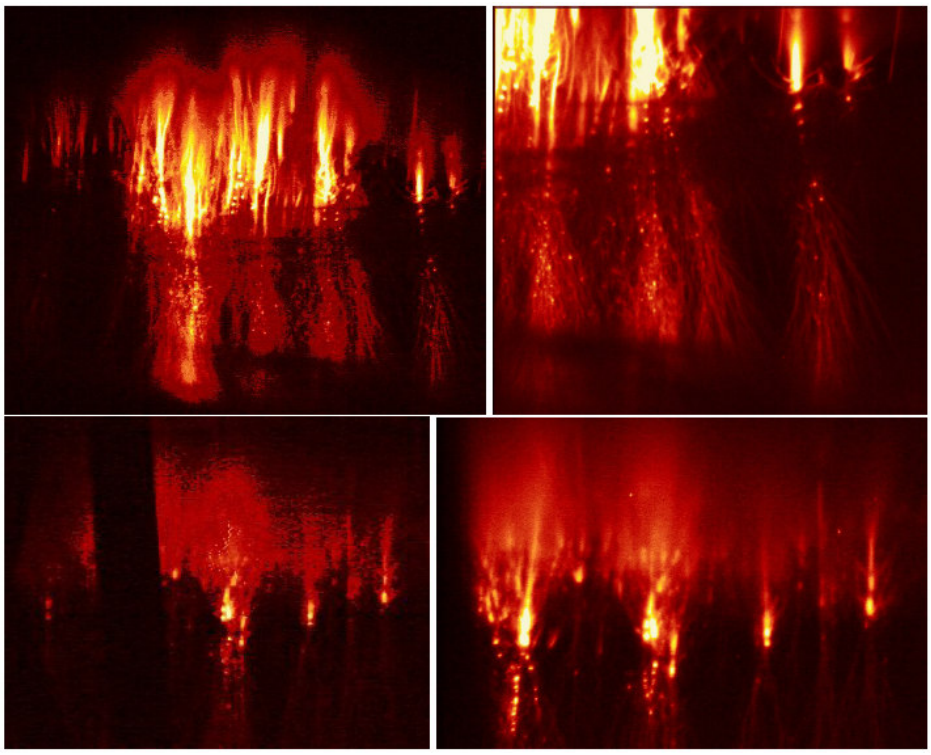
(a) **(b)**

Şekil 5.6. **(a)** Avustralya'da kaydedilen mavi püskürme **(b)** Arecibo Gözlemevinde kaydedilen alt iyonküre ile yıldırım bulutu arasındaki bağlantıyı saptayan ilk büyük mavi püskürme [42].

5.1.2. Işık Sütunları (Sprites)

Işık Sütunları, tek veya demet olarak görülebilir. ~40–95 km aralığındaki yüksekliklerde oluşurlar ve yanal olarak ~25–50 km civarında bir genişliğe sahiptirler. Fotometrik ve yakın zamanda yapılan optiksel gözlemler ışık sütunlarının ilk olarak ~70 km civarında oluşmaya başladığını ve ~10–100 ms zaman aralığında aşağı ve yukarı doğru yayıldığını ortaya koymaktadır. 600–760 nm dalgaboyu aralığındaki moleküler nitrojenin ilk pozitif grup sisteminden $\left(N_2^+(1PG)\right)$ kaynaklanan spektrum ölçümlerine göre baskın olarak kırmızı yayılımlara sahiptirler [89,98]. Işık sütunları, pozitif bulut-toprak (+CG) boşalmalarından

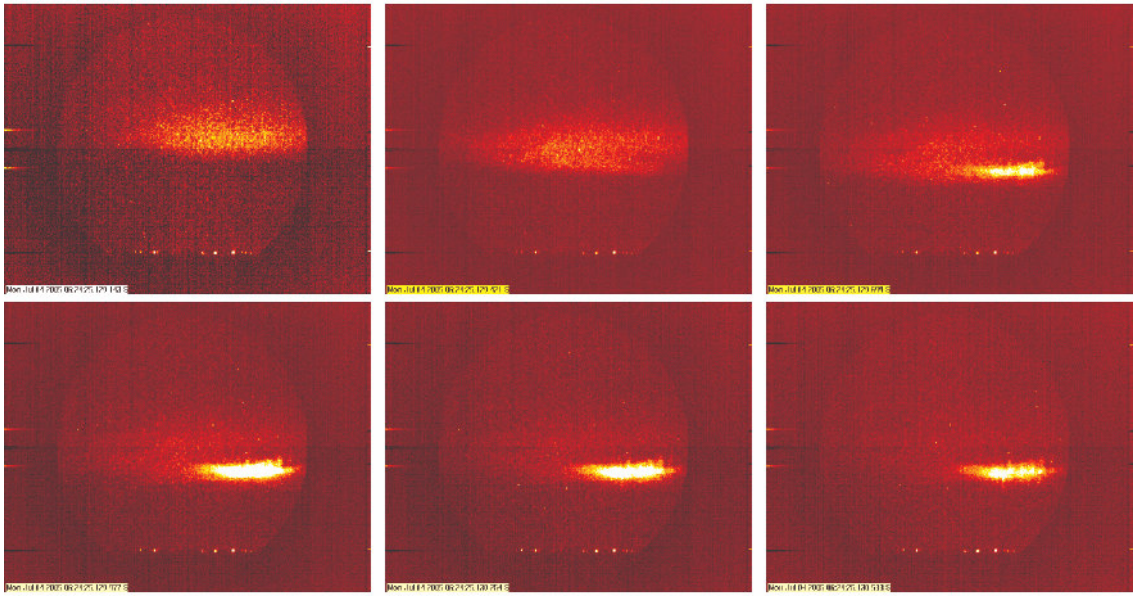
hemen sonra oluşur. Işık sütunları farklı karmaşık biçimler gösterirler. Bunların en çok bilininler Havuç (Carrot), Kolon (Column) ve Denizanası (Jellyfish) olarak adlandırılır. Havuç ve Denizanası şeklindeki ışık sütunlarının yapıları bir ağacın kollarına benzer. Kolon ışık sütunları yaklaşık 1 km veya daha az genişliğe sahip dikey çizgilere benzer yapılardadır. Teleskopik gözlemler sonucunda yanal boyutlarının on metre ile birkaç yüz metre arasında değişen kompleks bir yapıda olduğunu ortaya çıkarmıştır [99]. Şekil 5.7'de ışık sütunlarına ait fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 5.7. Eurosprite 2005 araştırması boyunca 29 Temmuz (üst) ve 26 Eylül (alt) 2005 tarihlerinde Pic du Midi tarafından yakalanan havuç biçimli ışık sütunlarının görüntüleri

5.1.3. Işık Yayılımları (Elves)

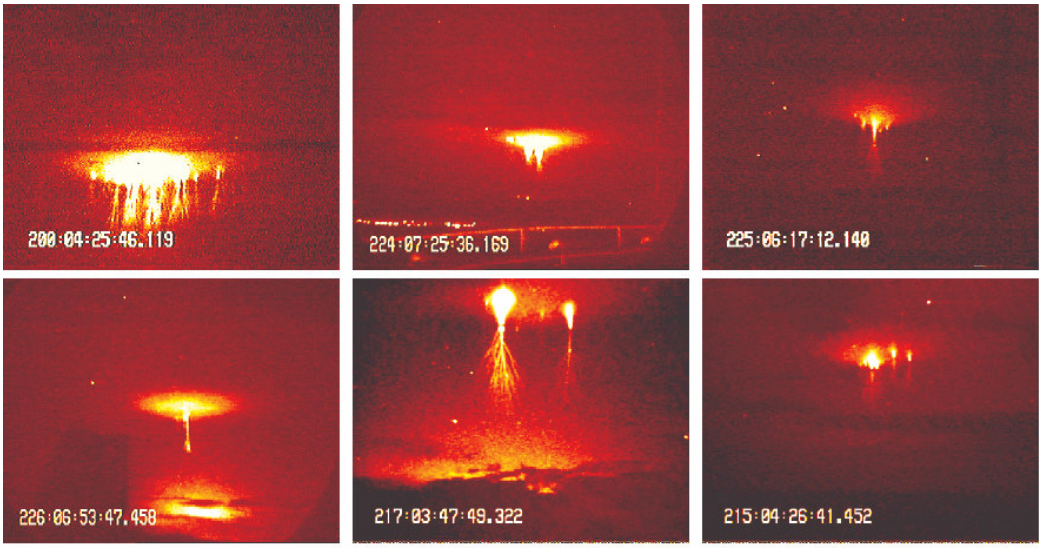
Işık Yayılımları (Emissions of Light and VLF perturbations due to Electromagnetic pulse Sources), ilk olarak Amerika'da Sprites'95 araştırması sırasında çok kanallı yüksek hızlı fotometre ve görüntü kuvvetlendiricili CCD kameralar kullanılarak gözlemlenmiştir [100]. ~75–105 km aralığındaki yüksekliklerde bulut-toprak boşalmalarından (>60 kA) yaklaşık ~350 μs sonra oluşurlar. Parlaklık yatay olarak bir yüzük şeklinde genişler ve yanal genişliği 500 km'ye kadar çıkabilir. 1 ms'den daha az bir ömürleri vardır [101]. Işık yayılımlarının kırmızılığı yine $\left(N_2^+(1PG)\right)$ den kaynaklanır. Şekil 5.8'de ışık yayılımlarına örnek fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 5.8. 4 Temmuz 2005 yılında Yucca Ridge Field istasyonunda saniyede 3600 çözünürlük kullanılarak kaydedilen ışık yayılımının yüksek hızlı zamanla çekilmiş görüntüleri [42].

5.1.4. Dairesel Işık Kuşakları (Halos)

Dairesel Işık Kuşakları ~70–80 km yüksekliklerde ve yatay boyutları ~40–80 km aralığında değişen oval biçimli optiksel parlamalardır. Dairesel Işık Kuşaklarının kendi başlarına veya Işık Sütunlarından hemen önce oluştuğu gözlemlenmiştir. Ömürleri ~5 ms civarındadır [102,103]. Şekil 5.9'da dairesel ışık kuşaklarına ait fotoğraflar verilmiştir.



Şekil 5.9. New Mexico'daki Langmuir laboratuarı tarafından 2004 ve 2005 yılları boyunca kaydedilen ve ışık sütunlarına eşlik eden dairesel ışık kuşaklarının renkli görüntüleri [42].

5.2. Yıldırım-Etkili VLF Sinyal Tedirginlikleri

İki türlü yıldırım-etkili VLF olayları vardır. Bunlar Erken/Hızlı (Early/Fast) ve yıldırım-etkili elektron yağışı (Lightning-induced Electron Precipitation, LEP) dır. Erken/Hızlı VLF olayları yıldırım boşalmalarının alt iyonkürenin iletkenliğini doğrudan etkilemesi sonucunda ortaya çıkar. LEP olayları ise alt iyonküresel iletkenlik değişimlerinin dolaylı olarak etkilenmesidir.

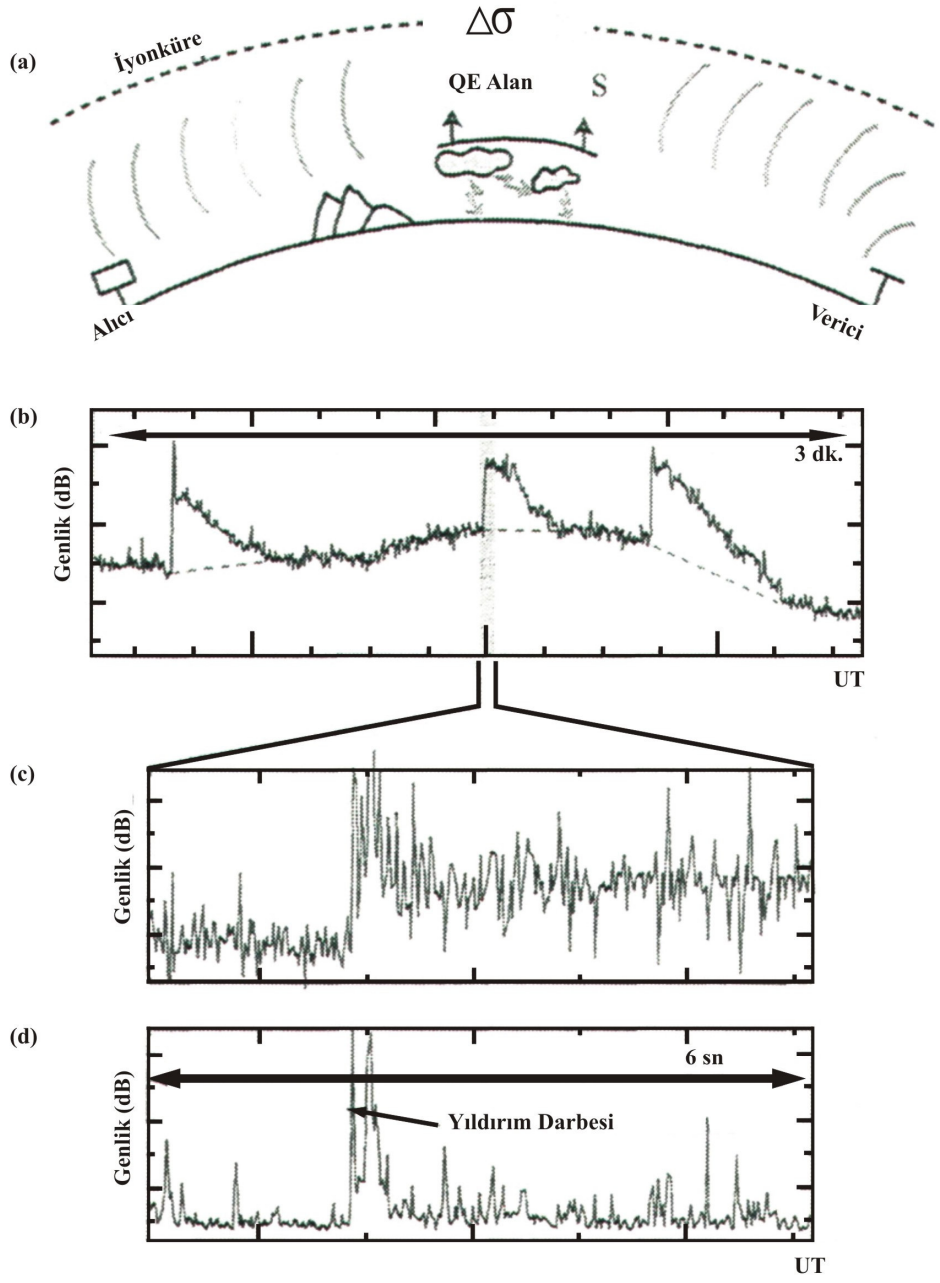
5.2.1. Erken/Hızlı VLF Olayları

Erken/Hızlı VLF olayları neden olan yıldırım boşalmasının ardından yaklaşık 20 ms içinde oluşur ve oldukça yavaş bir geri dönüşüm (onlarca saniye) gösterir [104].

Bu olayların altında yatan fiziksel mekanizma henüz nicel olarak tam anlaşılamamıştır. Hemen hemen elektrostatik (Quasi-electrostatic) fırtına bulutları iyonkürenin D bölgesini ısıtabilirler ve aktif bir yıldırım etkili fırtına boyunca bu bölgenin iletkenliğini geçici olarak değiştirebilirler. Fırtına bulutunun yükündeki yıldırım-etkili değişimler, D bölgesinin yerel ısıtma/soğutma sabit değerlerinin civarında küçük değişimlere sebep olurlar ve bu da alt iyonkürede yayılan VLF sinyallerinin gece yansıma yüksekliğini (~85 km) etkiler. Ayrıca bu olaylar, yıldırım tarafından yayılan elektromanyetik darbeler ile üretilen ikincil iyonlaşma ve Elves olarak bilinen optiksel boşalmalar veya iyonlaşma sütunları olarak bilinen Sprites ile ilişkilidirler [105,106].

Şekil 5.10'da alıcı ile verici arasındaki Yer-İyonküre dalgaklavuzu, üç dakikalık zaman periyodunda oluşan hızlı sinyal değişimi ve üstel olarak eski sinyal seviyesine dönüşümü ve olaya neden olan yıldırım darbesi gösterilmiştir. Bir tipik Erken/Hızlı olayın başlangıcı neden olan yıldırımla eş zamanlı olmalıdır. Erken/Hızlı VLF olayları alıcı ve verici arasındaki sinyalin 50 km yakınında yıldırım boşalmaları olursa gözlenir ve bu karışıklıklar iyonkürede yatay olarak ~100–150 km bir uzunluğa sahiptirler [30,104].

Erken/Hızlı olayların genlik ve faz büyüklüklerinde gözlenen değişimler ilişkili iyonküresel tedirginliğin saçılma özellikleri tarafından belirlenir. Erken/Hızlı VLF olaylarını üreten iyonküresel tedirginliklerin iletkenlik değişimi ve fiziksel doğası tartışmaları sürmesine rağmen tedirginliğin VLF saçılma modeli çoğunlukla olayın yatay boyutu ile tanımlanır[106–108]. Dar tedirginlik genişlikleri (<50 km) için, saçılma modelinin açısal genişliği azalan tedirginlik çapı ile artar ve çap olarak bir dalga boyundan (~15 km) küçük olan tedirginlikler için hemen hemen izotropik olur. Herhangi bir tedirginlik bölgesi için, iyonküresel tedirginlik genişliği saçılma modelinin açısal genişliğinin minimize edildiği zaman oluşur ve ileri yönde odaklanan bir ışın üretir [109].



Şekil 5.10. Erken/hızlı olayın genel gösterimi. **a)** Alıcı ve verici arasındaki yayılım yolu ve olay ile iyonküre etkileşimi **b)** Alıcıya gelen sinyalin 3 dakikalık örneği **c)** Ortadaki olayın büyütülmüş hali **d)** Olayın başlangıcı ile birlikte neden olan yıldırımın gösterimi

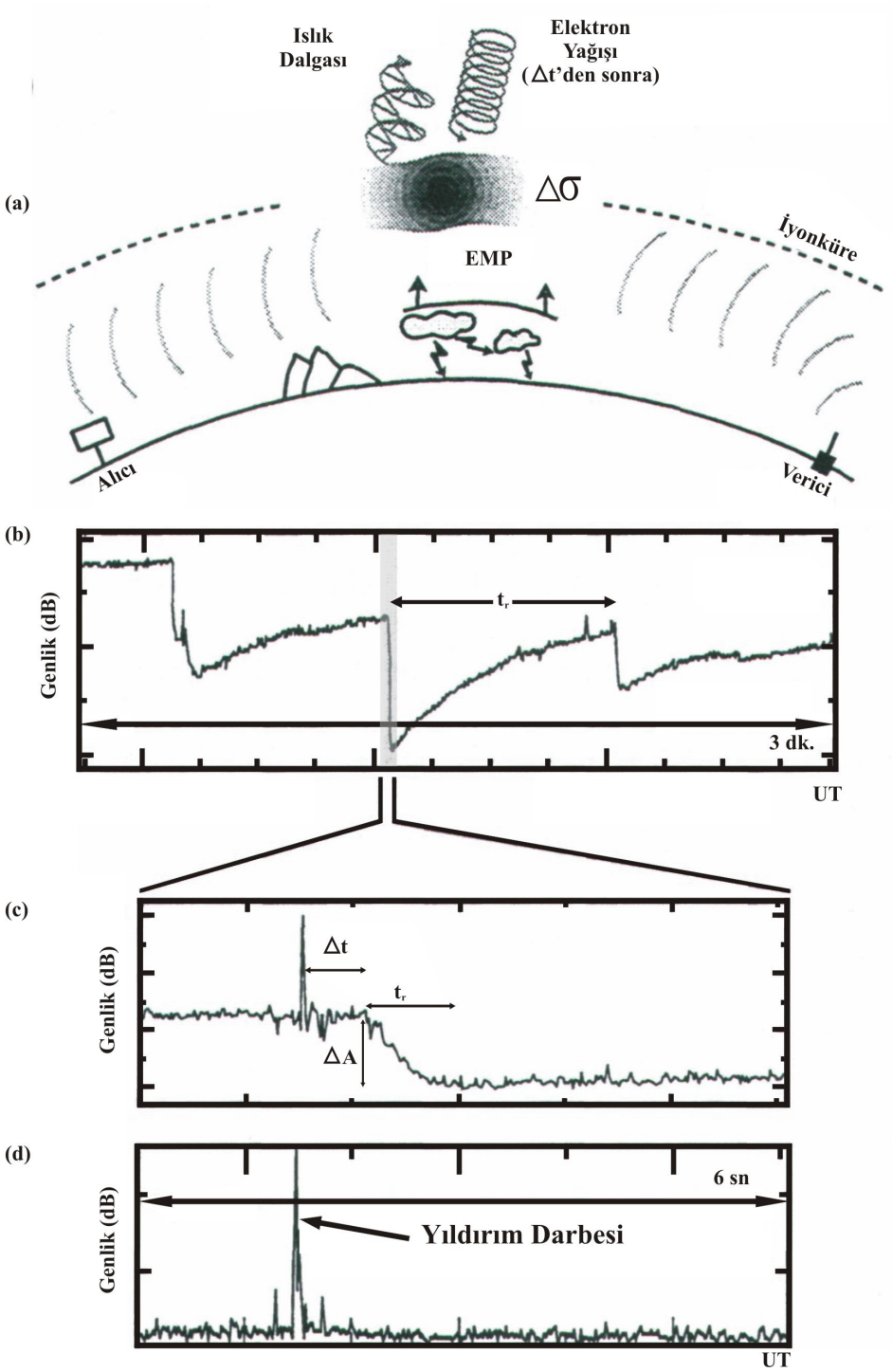
5.2.2. Yıldırım-Etkili Elektron Yağışı Olayları (LEP)

LEP olarak bilinen VLF olayları bir yıldırım boşalmasıyla birlikte bir başlangıç gecikmesi (birkaç yüz milisaniyeden 1 sn), başlama süresi (tipik olarak 0.5–1.5 sn) ve 10–100 sn bir geri dönüşüm periyodu gösterir [82].

Bu tip olay ilk olarak Mike Trimpi tarafından Antarktika'daki VLF verici sinyalleri gözlemleri yapılırken tespit edilmiştir[110]. VLF olayları ile ilgili 1970–1980 yılları arasındaki literatürlerin çoğunda "Trimpi" olayları olarak tanımlanmıştır. VLF verici sinyal tedirginlikleri, saçılan enerjili elektronlar tarafından VLF yansıma yüksekliğindeki ikincil iyonlaşma olarak tanımlanır. Günümüzde uydularla, roketlerle ve alt iyonküresel VLF uzaktan algılama teknikleri ile bu olayları kanıtlayan birçok deneysel sistem vardır [111].

LEP olaylarının fiziksel mekanizması manyetoküresel dalga-parçacık etkileşim sürecini kapsar. Bir yıldırım boşalması ile yayılan enerjinin bir kısmı manyetoküreye kaçar ve burada ıslık (Whistler) dalgaları olarak yayılır. Yer'in radyasyon kuşağındaki tuzaklanmış elektronlarla etkileşir ve eğim açılarını (pitch angle) değiştirir. Kayıp konisine yakın elektronların alt iyonküreye yağmasına sebep olur. Bu yağan yüksek enerjili elektronlar ikincil iyonlaşmaya neden olur[112].

Bu olayları doğrudan oluşan olaylardan ayıran önemli iki fark vardır. Birincisi, neden olan yıldırım boşalması doğrudan tedirginliğe uğramış bölgenin altında olması gerekmez ve bunun yerine daha alt enlemlerdedir. İkincisi ise saçılan bölgelerin büyüklüğü genellikle ~100 km den çok daha büyüktür. LEP tipi VLF olayları için, başlangıç gecikmesi (Δt) ve t_d zamanı ıslık dalgalarının yayıldığı jeomanyetik alan çizgilerinin L kabuğuna bağlıdır. Şekil 5.11'da alıcı ile verici arasındaki Yer-iyonküre dalga kılavuzunda oluşan yıldırım-etkili elektron yağışı, üç dakikalık zaman periyodunda oluşan sinyal değişimi ve üstel olarak eski sinyal seviyesine dönüşümü, olayın geçici karakteristikleri ve olaya neden olan yıldırım darbesi gösterilmiştir.



Şekil 5.11. LEP olayının genel gösterimi. **a)** Alıcı ve verici arasındaki yayılım yolu ve yıldırım-etkili elektron yağışı **b)** Alıcıya gelen sinyalin 3 dakikalık örneği ve t_r geri dönüşüm süresi **c)** Ortadaki olayın büyütülmüş hali ve neden olan yıldırıma bağlı olarak t_d süresi, olayın büyüklüğü ΔA ve başlangıç gecikmesi Δt karakteristikleri ile birlikte bir LEP olayı örneği **d)** Olaya sebep olan yıldırım darbesinin sinyal üzerindeki görünümü.

Bir LEP olayını tanımlayan dört adet geçici karakteristik değer vardır. Bunlar;

1. **Gecikme Zamanı (Δt):** LEP olayına sebep olan yıldırım boşalması ile VLF sinyalinde LEP olayının etkisinin oluşmaya başlaması arasındaki zaman gecikme süresi olarak tanımlanır. Bu süre sırasıyla yıldırım boşalması tarafından üretilen ıslık dalgasının manyeto kürede yayılması, dalganın radyasyon kuşaklarındaki elektronlarla etkileşmesi ve Yer'in manyetik alan çizgilerinden saçılan elektronların iyonküreye yağmaya başlamasına kadar geçen zamandır.
2. **Oluşum Süresi (t_d):** Olayın başlaması ile genlik değişimindeki artışın son bulması arasındaki zaman olarak tanımlanır. Genlikteki artış pozitif veya negatif olabilir. Ayrıca bu zaman iyonküreye ne kadar süreyle elektron yağışı olduğunu gösterir.
3. **Oluşum Şiddetindeki Değişim Miktarı (ΔA):** Meydana gelen LEP olayının sinyal genliğindeki değişim miktarıdır ve dB cinsinden tanımlanır. Pozitif veya negatif yönde değişim olabilir. Onun için mutlak değer olarak tanımlanır.
4. **Geri Dönüş Zamanı (t_r):** Sinyalin tekrar eski haline dönmesi için geçen zaman olarak tanımlanır. İyonkürenin tekrar normal haline dönmesi için geçen süredir.

Tablo 5.1'de LEP olayını tanımlayan bu karakteristiklerin değişim aralıkları verilmiştir.

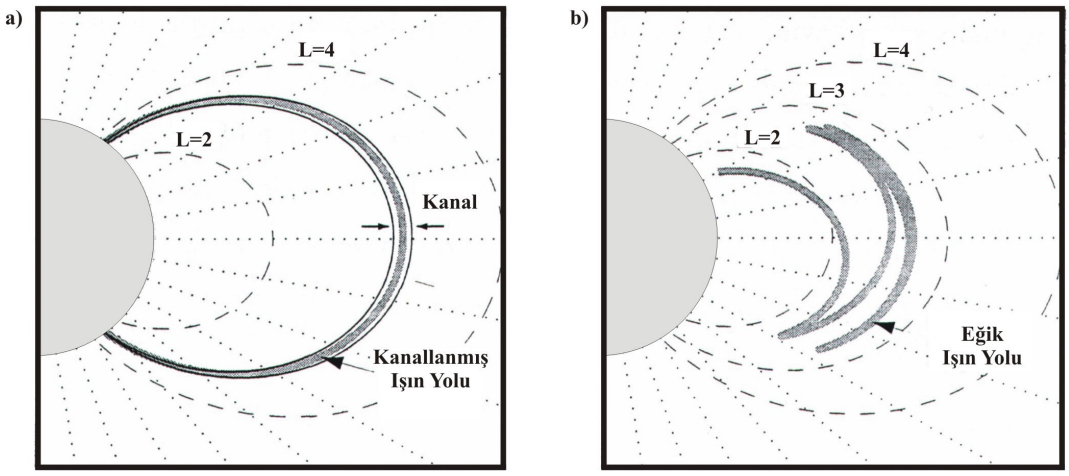
Tablo 5.1. LEP olayını tanımlayan karakteristiklerin değişim aralıkları [113]

LEP Karakteristikleri	Değişim Aralıkları
Gecikme Zamanı	$0.2 \text{ sn} \leq \Delta t \leq 2.5 \text{ sn}$
Oluşum Süresi	$0.5 \text{ sn} \leq t_d \leq 5 \text{ sn}$
Oluşum Şiddetindeki Değişim Miktarı	$0.5 \text{ dB} \leq \lvert\Delta A\rvert \geq 10 \text{ dB}$
Geri Dönüş Zamanı	$10 \text{ sn} \leq t_r \leq 100 \text{ sn}$

Manyetokürenin manyetize olmuş soğuk plazma çevresi, yayılan elektromanyetik modların zengin bir çeşitliliğini destekler. VLF aralığında ve proton (<500 Hz) ile elektron dönme frekansı (plazmakürede >14 kHz) arasında manyetoküresel dalgalar yüksek dağıtıcılıklı sağa eliptik olarak polarize olmuş modlar şeklinde yayılırlar**.** 1925'de T.L. Eckersley ses frekans aralığındaki elektromanyetik sinyallerin bir gözlemini yayınladı ve serbest iyonlarla yüklü bir ortamdan dağılan sinyallere dayandırdı. 1950'lerde, bu "Islıklar" L.R.O. Storey tarafından "yıldırım-oluşumlu darbelerden kaynaklanır ve birkaç Yer yarıçapında mesafelerdeki plazma yoğunlukları boyunca yayılır" olarak tanımlandı. Bu gözlemler ışığında ıslık dalga karakteristikleri iç manyetokürenin elektron yoğunluğu haritasını çıkarmak için kullanıldı [114].

Manyetokürede yayılmadan sonra ıslık dalgalarını yeryüzünden algılayabilmek için bu dalgalar normalle birkaç derecelik açı ile birlikte iyonkürenin üstüne ulaşmalıdır. Böylece toplam iç yansımaya uğramazlar [114]. İyonkürenin üzerinde %10–20 elektron yoğunlukları

artışı ile birlikte alan sıralı yapıların manyetik alan çizgileri boyunca ıslık dalga yayılımına kılavuzluk ettiği varsayılır. Bu yapılar Manyetoküresel kanallar (Magnetospheric ducts) olarak bilinirler ve ekvatorda ≤500 km yatay genişliğe sahip olduğu tahmin edilmiştir [82]. Uydu gözlemleri ile kanalları gözlemek için birçok teşebbüse rağmen bunların nispeten küçük yapıda oluşları gözlenmelerini zorlaştırır ve bugüne kadar sadece bir gözlem yapılmıştır [115]. Şekil 5.12'de kanallanmış (ducted) ve kanallanmamış (nonducted) ıslık dalga yayılım yolları gösterilmiştir.



Şekil 5.12. Kanallanmış ve Kanallanmamış ıslık dalga yayılım yolları. **a)** Bir kanal boyunca yayılan bir ıslık dalgasının örnek ışın yolu **b)** Eğik yayılan kanallanmamış ıslık dalgasının örnek ışın yolu.

Artan plazma yoğunluğunun oluşturduğu kanallar için manyetokürede eğik olarak yayılan ıslık dalgaları manyetoküresel soğuk plazma ve Yer'in manyetik alanı tarafından belirlenir. Genelde bir manyetik alan çizgisi boyunca değildir. 90^0' ye yakın ve ayrıca ışın yönündeki vektöre göre daha büyük açılarda rezonans koni açısı olarak adlandırılan açılara sahip dalga-normal vektörleri ile birlikte oluşur. Büyük dalga-normali açıları ıslık dalga enerjisinin alt iyonküre sınırından yeryüzüne nüfuz etmesine engel olurlar. Bunlar eğik olarak yayılan 'nonducted' ıslıklar olarak adlandırılır ve yaygın olarak uydularla gözlenebilir [116,117].

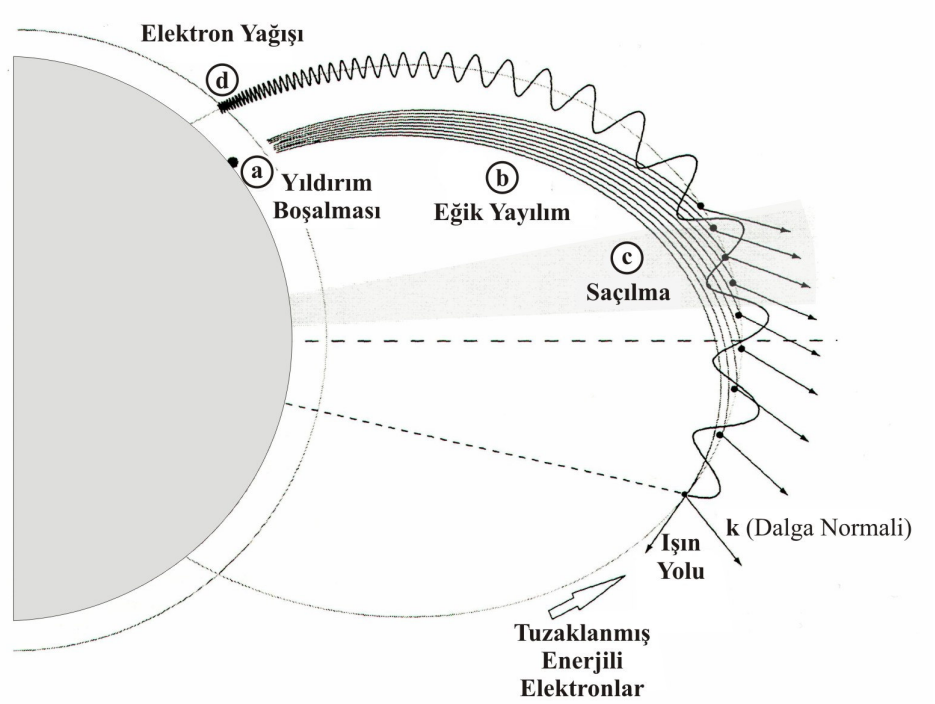
Islık dalgaları manyetokürede yayıldığında radyasyon kuşağındaki manyetik alan boyunca tuzaklanmış yörüngelerde dönen enerjili elektronlarla karşılaşırlar. Bu enerjili elektronların yoğunluğu nispeten küçük olduğu için dalgaların yayılma karakteristikleri üzerindeki etkileri ihmal edilebilir [118]. Ancak, bir ıslık dalgasının Doppler-kaymalı dalga frekansı tuzaklanmış enerjili elektronların dönme frekansına yaklaştığında dalga alanları parçacığı etkileyerek momentumunun değişmesine neden olurlar [119]. Dönme rezonans şartı

$\omega_h / \gamma \cong \omega + k_{II} v_{II}$ olarak tanımlanır. Burada ω ıslık dalga frekansı, k_{II} dalga numarası, v_{II} manyetik alan doğrultusundaki parçacık hızının bileşenidir. Tuzaklanmış elektronun dönme frekansı $\omega_h / \gamma \cong qB/m\gamma$ dir. $\gamma = \left(1 - v^2/c^2\right)^{-1/2}$ ise görelilik faktörüdür.

Dönme yörüngesindeki paralel hızın manyetik alana dik elektron hızına oranı, ani eğim açısını tanımlar. Manyetik alana bağlı olarak $\alpha = \tan^{-1}\left[v_\perp / v_{II}\right]$ dır. Bu eğim açısı, parçacık iki yarım küre arasında kendi yolunda zikzaklı hareket ettiğinde değişir ve jeomanyetik ekvatordan uzak mesafelerde artar. Elektron kutuplara doğru hareket ettiğinde α artar, eğim açısı 90° olana kadar v_{II} azalır ve elektron bir aynanın içinde gibi zıt yönde ileri geri hareket eder [120].

Kayıp koni açısı (α_{lc}) olarak adlandırılan ekvatoral bir eğim açısı ile birlikte elektronlar atmosferik bir moleküle çarpışma ihtimalinin çok yüksek olduğu bir yükseklikten (bu yükseklik tipik olarak ~1000 km) aşağıya doğru inerler. Ekvatoral eğim açısı $\alpha\langle\alpha_{lc} = \sin^{-1}\sqrt{B_{eq}/B_a}$ ile tanımlanır. Burada, B_a ayna yüksekliğinde manyetik alanın büyüklüğüdür ve B_{eq} ekvatoral düzlemde manyetik alanın büyüklüğüdür.

Bir enerjili elektron atmosfere girdiği zaman nötrlerle çarpışarak momentumunu kaybeder ve bölgesel ısınma ile ikincil iyonlaşmaya sebep olur ayrıca ışık ve X-ışını üretir. D bölgesinde ilk olarak 100–200 keV enerji aralığındaki elektronlar tarafından ikincil iyonlaşma oluşur [121]. Şekil 5.13'te dalga-parçacık etkileşimi ve LEP olayının aşamaları gösterilmiştir.

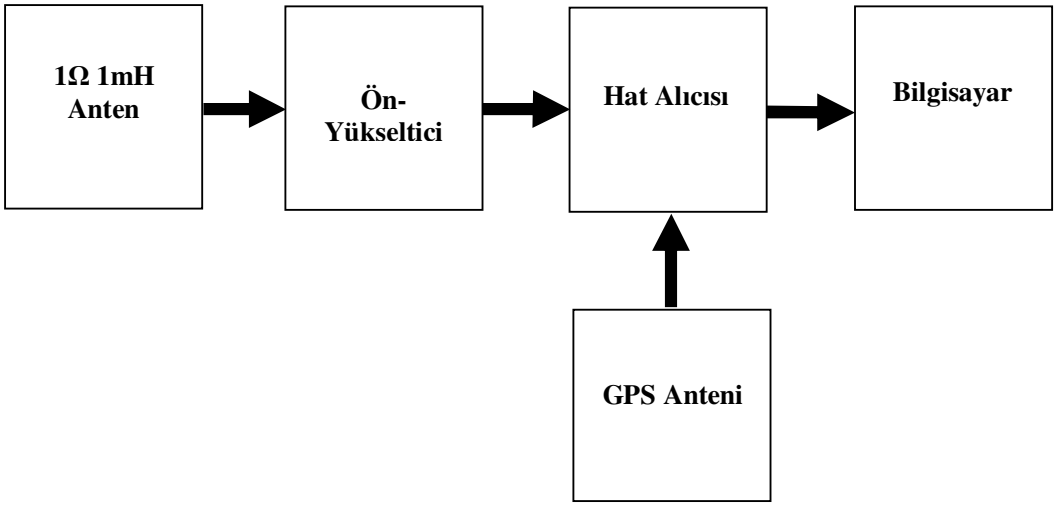


Şekil 5.13. Dalga-parçacık etkileşimi **a)** Bir yıldırım oluşur ve ıslık modundaki dalgalar manyetoküreye girer **b)** Dalga enerjisi Yer'in manyetik alanına bağlı olarak yayılır **c)** Ekvatoral bölge yakınında ıslık tuzaklanmış elektronlarla etkileşir ve bunları eğim açısından saptırarak saçılmalarına sebep olur **d)** Kayıp konisine saçılan bu elektronlar atmosfere yağarak ikincil bir iyonlaşmaya sebep olurlar [122].

6. VLF UYGULAMA SİSTEMLERİ

6.1. VLF Alıcı Sistemi

VLF Alıcı Sistemi Anten, Ön Yükseltici (pre-amplifier), Hat Alıcısı (Line Receiver), Küresel Konum Sistemi (GPS) Anteni ve bilgisayardan oluşmaktadır. Antende elektromanyetik alan değişimlerinden elektriksel sinyaller oluşur. Ön yükseltici sinyali fazla gürültü içermeden yükseltir ve hat alıcısına gönderir. Hat alıcısı sinyali filtreler ve veriyi GPS zaman sinyaliyle senkronize bir şekilde işler ve bunların hepsi bilgisayara gönderilir. Bilgisayardaki yazılım kullanılarak sinyal ve zaman kaydedilir. VLF alıcı sisteminin çalışma prensibini gösteren blok diyagramı Şekil 6.1'de verilmiştir [123].

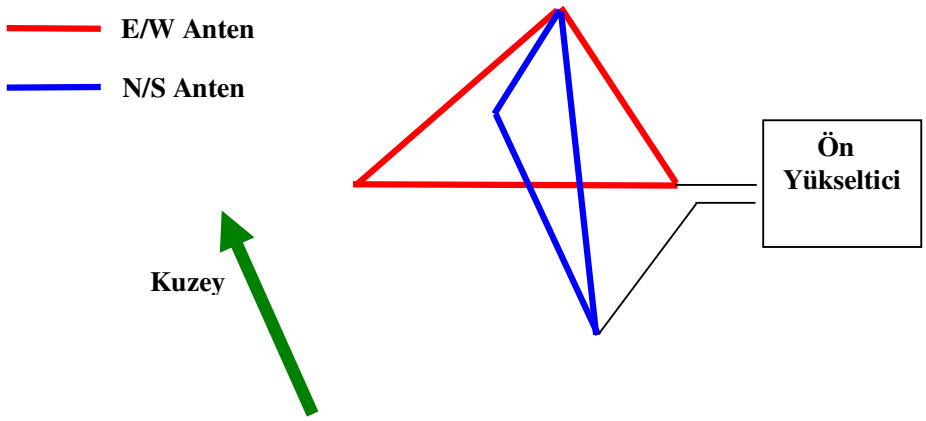


Şekil 6.1. VLF alıcı sistemi blok diyagramı

6.1.1. VLF Anteni

Anteni oluşturan tel bir çevrim oluşturacak şekilde sarılır. Böylece manyetik alan değişimleri antende küçük akımlar oluşturur. Antenler büyük ve küçük yapılabilirler. Büyük antenler daha hassas olacaktır. Antendeki en önemli sınırlama anten kablo direncinin 1 Ω ve indüktansının 1 mH olmasıdır. Çünkü diğer elektronik devreler bu karakteristiğe göre tasarlanmışlardır. Anten kurulumları için en uygun yer elektromanyetik gürültü kaynaklarından uzak sessiz bir yerdir. Bütün yönlerden gelen sinyalleri yakalamak için birbirine dikey olan iki anten kurulması gereklidir. Antenlerden biri gelen sinyalin Kuzey/Güney (N/S) bileşenini diğeri Doğu/Batı (E/W) bileşenini yakalar. Ön-yükseltici ve hat alıcısındaki bütün elektronik devreler bu anten için tasarlanmıştır.

Anten tipi hava çekirdekli manyetik kablo çevrimli antendir. Bu her döngüde bir veya daha fazla sarılmış kablo olduğunu ifade eder. Manyetik alan değişimleri kabloda elektromotor kuvvet ve çevrimlerde akım oluştururlar. Kullanılan anten konfigürasyonu Şekil 6.2'de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.2. VLF iki kanal dikey manyetik halka anten konfigürasyonu

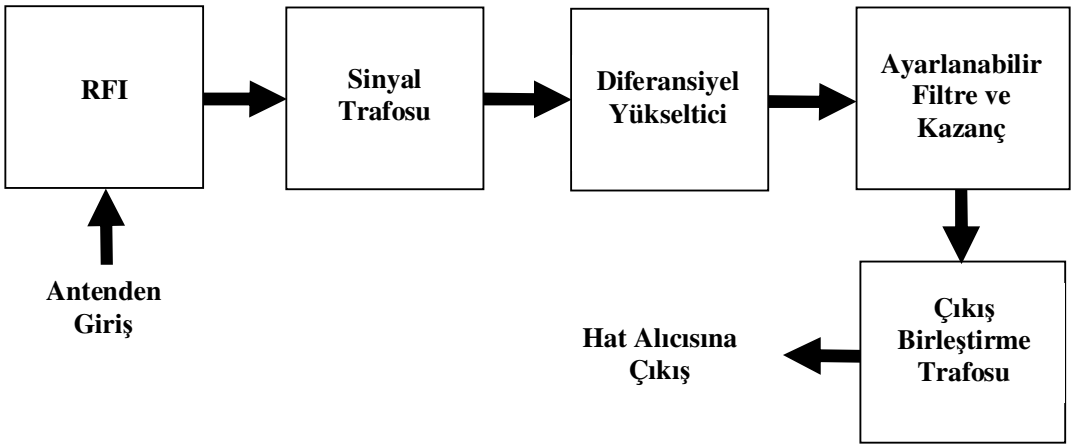
Kare ve ikizkenar üçgen olmak üzere iki anten tipi vardır. Anten seçiminde antenin hassasiyeti, verinin analizi ve çevrenin gürültü oranı gibi faktörler göz önünde bulundurulur. Antenin hassasiyeti anten alanıyla doğru orantılı olarak değişir. Bizim kullandığımız anten 1.69 m^2 , 12 sarımlı ve taban uzunluğu 2.6 m olan ikizkenar üçgen antendir ve Fırat Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi çatısına kurulmuştur ve bu antenin fotoğrafı Şekil 6.3'te verilmiştir.



Şekil 6.3. Fen-Edebiyat Fakültesi çatısına kurulan VLF alıcı sisteminin anteni

6.1.2. Ön Yükseltici

Ön yükseltici antene yakın bir yere yerleştirilmelidir. Böylece küçük sinyallerin uzun kablolar içinde zayıflaması önlenmiş olur. Ön yükselticide, ana yükseltme ayrı transistorlerle oluşturulmuş diferansiyel yükselticiden oluşur. Transistorlu yükselticiden sonra birkaç tane işlemsel yükseltici (Op-amp) sinyali tamponlar ve düşük frekans cevap kesimini ve kazancı ayarlar. Ön yükselticide 9 Khz'e ayarlı bir filtre bulunmaktadır. LC düşük geçirgenli filtreden yapılmış bir bastırma devresi vardır (RFI= Radyo Frekans Girişimi). Bu devre AM-FM (Genlik Modülasyonu-Frekans Modülasyonu) radyo yayını gibi yüksek frekanslı sinyallerin elektronik devreleri etkilemesini önler. Ön-yükseltici ayrıca sistemin frekans cevabını tanımlayan bir kalibrasyon devresi içerir. Bu devre Ön-yükseltici girişine verilen bir test sinyaline çıkışında sistemin frekans cevabını ifade etmek için kullanılır. Ön yükselticinin çalışma prensibini gösteren blok diyagramı Şekil 6.4'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Ön yükselticinin blok diyagramı

Ön yükseltici NIMA-4 diye tanımlanan havadan etkilenmeyecek şekilde yapılmış bir kutunun içine yerleştirilmiştir. Ön yükseltici hat alıcısına içinde dört çift iletken bulunan bir kablo ile bağlıdır. İkisi anten sinyali, biri güç sinyali diğeri ise kalibrasyon sinyalinin iletimi içindir. Ön yükselticinin yerleştirildiği muhafaza kutusunun fotoğrafları Şekil 6.5'te verilmiştir.



(a) **(b)**

Şekil 6.5. Ön yükselticinin görünüşü **(a)** dıştan görünüş **(b)**içinin görünüşü

6.1.3. Hat Alıcısı

Hat Alıcısı ön yükselticiden 30 mt. veya daha fazla uzağa yerleştirilmelidir. Böylece Hat alıcısındaki elektronik devreler antene gelen dalga yayılımlarından etkilenmezler. Hat alıcısı verileri kaydeden bilgisayara yakın bir yere yerleştirilmelidir. Hat alıcısı özel yapılmış bir kutuya yerleştirilmiştir fakat bu kutu dışarıda kullanılmaya müsait değildir. Hat alıcısının bulunduğu kutunun fotoğrafları Şekil 6.6'da verilmiştir. Hat alıcısı birçok işlemi gerçekleştirir. Bunlar, sinyal işleme, sayısal kontrol, GPS yönetimi, Ön-yükselticiye güç sağlanması ve sistem kalibrasyonudur.



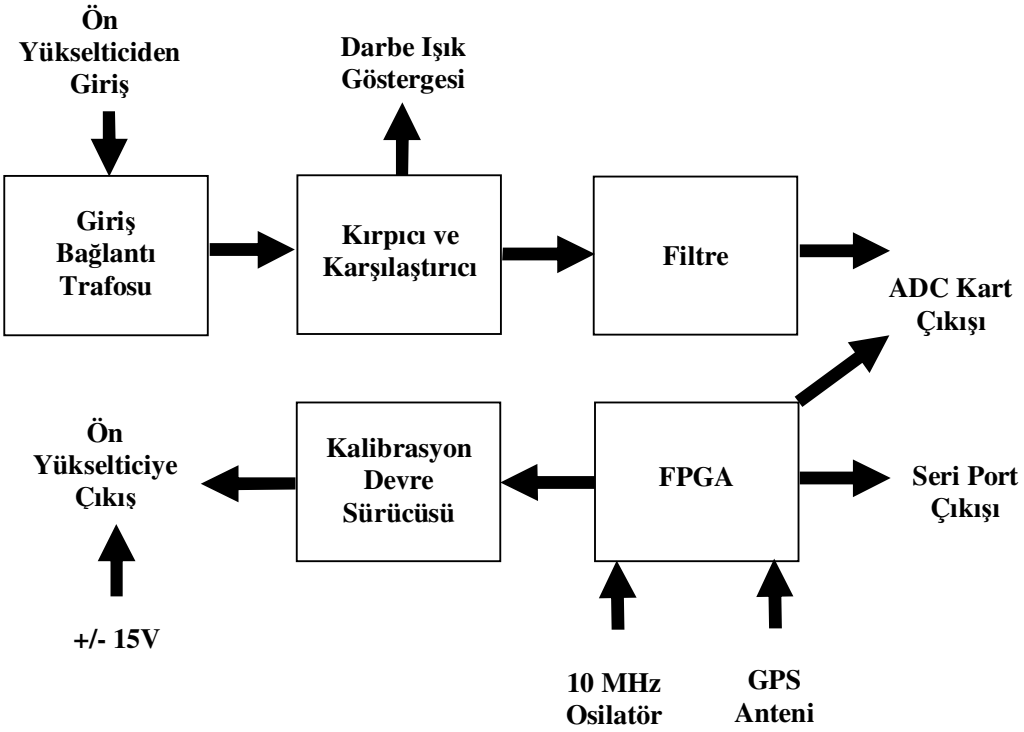
(a) **(b)** **(c)**

Şekil 6.6. Hat alıcısının görünüşü **(a)** önden görünüş **(b)** arkadan görünüş **(c)** içinin görünüşü

Sinyal işlemede, hat alıcısı bir darbe koruma devresine sahiptir. Bu devre çok güçlü sinyaller geldiği zaman sistemi bu sinyallerden korur. Bu devrenin kalibrasyonu doğru yapılarak sadece ani güçlü sinyaller ve elektriksel bir hata olduğu zaman çalışması sağlanmalıdır. Hat alıcısının diğer önemli bir parçası ise filtredir. Birçok VLF uygulamalarında veri 100 KHz'de örneklenir. Bu filtre 40 ve 50 KHz arasında sabit tutulmalıdır.

Hat alıcısından beklenen diğer bir şey ise çok yüksek derecede doğru örnekleme yapabilmesidir. Hat alıcısı bunu GPS bağlantılı sinyal ve kesim-ayarlanabilir osilatör kullanarak yapar. GPS zamanlama sinyali (1 Hz) ve geri besleme devresi kullanılarak 10 MHz zaman mümkün olduğu kadar doğru ayarlanabilir. 100 kHz'lik örnekleme sinyali bu doğru zamandan ayarlanabilir. GPS anteninden gelen sinyal için bir devreye ihtiyaç vardır. Bu devre Motorola tarafından üretilmiş olup ana kart üzerine monte edilmiştir. Hat alıcısındaki alan programlanabilir giriş düzenleyicisi (FPGA) Motorola kartıyla bağlantılıdır ve bu kartı örnekleme zamanını senkronize etmek ve seri porttan bilgisayara giden bütün verilere zaman işareti sağlamak için kullanır.

Hat alıcısının diğer bir görevi de ön yükselticiye güç sağlamaktır. Bu güç hat alıcısına harici bağlanan beslemeden üretilir. Üretilen 15 V gerilim sinyali taşıyan kabloyla ön yükselticiye gönderilir. Sonuç olarak kablo aracılığıyla gönderilen bu gerilim ile ön yükseltici ve kalibrasyon devresi çalıştırılır. Ana karttaki FPGA'da bütün bunları bir transistor sürücü devresi kullanarak kontrol eder. Hat alıcısının çalışma prensibini gösteren blok diyagram Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7. Hat alıcısı blok diyagramı

6.1.4. GPS Anteni

GPS antenini kurmak için sessiz bir yere ihtiyaç yoktur fakat GPS anteninin uydularla iletişim kurması için gökyüzünü açık bir şekilde görebilecek bir yere yerleştirilmelidir. Bu sistemde dışarıda kullanıma ve hat alıcısına uygun dizayn edilmiş VIC-100 modelinde zaman anteni kullanılmıştır.

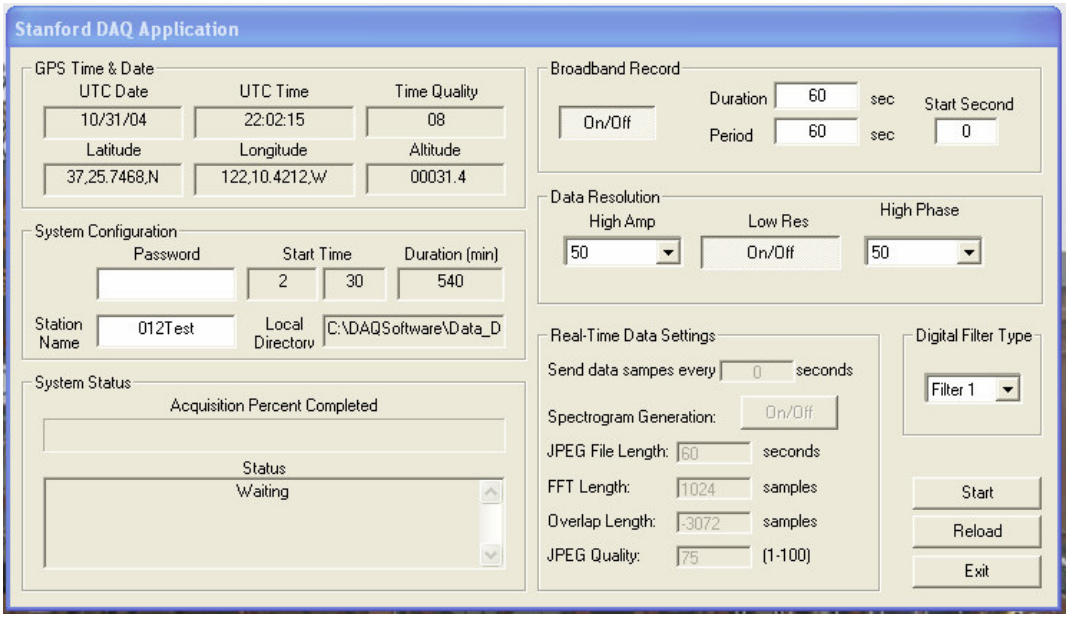
Hat alıcısındaki GPS zamanlayıcı kartı ise Motorola tarafından üretilmiş modeli M12+Zamanlayıcı (Timer) olan elektronik karttır. GPS anteni ve Motorola kartının fotoğrafı Şekil 6.8'de verilmiştir.



Şekil 6.8. GPS Anteni ve M12+Zamanlayıcı Kartı

6.1.5 Bilgisayar ve Program

Veriler bilgisayarın içine yerleştirilen bir Anolog-Dijital (ADC) kartla bilgisayara aktarılır. Bu kart National Instruments firması tarafından üretilmiştir ve bilgisayarın PCI slotuna yerleştirilmiştir. Bilgisayarda Stanford Üniversitesindeki VLF grubu tarafından yazılmış ve Stanford DAQ diye isimlendirilen bir program vardır. Bu programın kontrol panelinin bilgisayardaki görünümü Şekil 6.9'da verilmiştir. Bu program gelen verileri eşzamanlı olarak bilgisayara kaydeder ve bu program verilerin bir bölümünü internet üzerinden Stanford Üniversitesi VLF grubuna gönderir. Veriler MATLAB veri dosyaları olarak kaydedilir. Ayrıca bu veriler bilgisayar hafızasında çok yer kapladığından DVD'ye de kaydedilerek saklanır.



Şekil 6.9. Stanford DAQ Programı

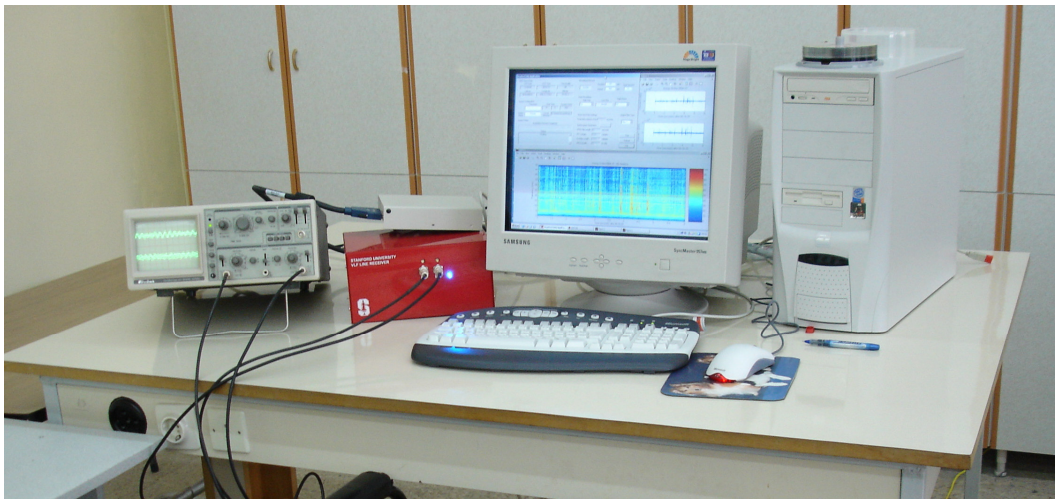
Programda kullanılan zaman evrensel zamandır (UT). Evrensel zaman ile yerel zaman arasında 2 saat zaman farkı vardır. Programın sol üst köşesinde GPS den alınan zaman bilgisi, sistemin bulunduğu yerin enlem ve boylamı, tarih ve hat alıcısının iletişimde olduğu GPS uydu sayısı bilgileri mevcuttur. GPS uydu sayısının daima 5 veya daha fazla olması istenir. Programın sağ üst köşesinde Genişband kaydıyla ilgili kontrol paneli vardır. Genişband kaydı yapmak veya yapmamak ve yapılan kaydın süresi ve sıklığı değiştirilebilir yapıdadır. Sistem Konfigürasyonunda ise sistemin bulunduğu yeri tanımlayan istasyon ismi, verilerin bilgisayarda kaydedildiği yeri gösteren yerel adres ve sistemin kayda başladığı saat ve sistemin kayıt süresi dakika olarak tanımlanmıştır. İstasyon ismi, yerel adres ve Genişband kaydıyla ilgili değişiklikleri şifre kullanarak yapılabilir ama başlangıç zamanıyla ilgili değişiklikleri yapmak için Matlab programını kullanarak giriş yapılmalıdır.

Veriler iki şekilde kaydedilir. Genişband (Broadband) ve Darband (Narrowband). Genişband analizinde kesim frekansları arasındaki bütün frekansların verileri vardır. Genişband kaydında her anten için saniyede 100.000 veri kaydedilir. Bu yüzden genişband veri dosyalarının boyutu büyük olur. Bir dakikalık genişband kaydı yaklaşık 23 MB yer kaplar. Genişband spektrumlarına Matlab programı kullanılarak bakılır.

Darband da ise sadece bir vericiye ait olan veriler kaydedilir ve incelenir. Program Fourier analizi ve demodulasyon kullanarak bir frekanstaki genlik ve faz değişimlerini kaydeder. Her verici için 4 adet veri dosyası vardır. Bunların iki tanesinde genlik, iki tanesinde de faz değişimlerinin kaydı vardır. Genlik ve faz değişimlerinin olduğu veri dosyalarının birinde

saniyede 1 veri diğerinde ise saniyede 50 veri kaydedilir. Sadece darband verileri internet üzerinden Stanford Üniversitesine gönderilir.

Fizik Bölümü Elektromanyetik Dalga Laboratuarında kurulu olan VLF alıcı sistemi her gün saat 13.05 UT'de kayda başlamaktadır ve 15 saat boyunca devam etmektedir. Genişband kaydı da 15 dakikada 1 dakika olarak yapılmaktadır. Elektromanyetik Dalga Laboratuarında Kurulu sistemin fotoğrafı Şekil 6.10'de gösterilmektedir.



Şekil 6.10. Elektromanyetik dalga laboratuarındaki VLF alıcı sisteminin genel görünümü

6.2. VLF Vericileri

Yer-iyonküre dalga kılavuzunda yayılan VLF dalgaları yaklaşık 2–3 dB/Mm lik bir zayıflama oranına sahiptirler. Uzun dalga boylarına sahip olmalarından dolayı Yer ve deniz yüzeyinde kolaylıkla yayılabilirler. Yayılım özeliklerine bağlı olarak 10–50 kHz frekans aralığındaki VLF dalgaları askeri denizaltılar ve gemiler arasındaki iletişim için kullanılırlar. 100 ile 1000 kW arasında bir çıkış gücü elde etmek için metrelerce uzunluğa sahip büyük tek kutuplu antenlere ihtiyaç vardır. Böyle bir antende akım yayılımı bir kısmı dipol gibi davranan diger kısmı ise yer düzleminden yansıyan olmak üzere bir duran dalga şeklindedir [43]. Genellikle çok yüksek kuleler arasına veya Hawaii'deki sönmüş volkanlar ya da Norveç'teki fiyortlar gibi doğal coğrafik oluşumlar etrafında kurulurlar [124].

Bu tezde kullanılan bütün VLF vericileri sürekli faz frekans-kaydırma sayısal modlama olarak ta bilinen minimum-kaymalı sayısal modlama (MSK, minimum-shift keying) modülasyonu kullanmaktadır. Şekil 6.11'de bir VLF vericisinin fotoğrafı örnek olarak verilmiştir.



Şekil 6.11. İngiltere Anthorn'da bulunan 19.6 kHz frekanslı VLF vericisinin fotoğrafı [125]

Darband kaydı için sisteme Matlab programı kullanarak VLF vericilerinin frekansı, çağrı kodu ve hangi kanalın kullanılacağı girilir. Sistemimizde kayıtlı bulunan vericilerin listesi Tablo 6.1'de verilmiştir.

Tablo 6.1: Sistemde Kayıtlı Vericiler

Frekans (Hz)	Çağrı Kodu	Yerleşim	Kanal
18300	HWU	Le Blanc, Fransa	NS-EW
19600	GQ2	Anthorn, İngiltere	NS
20270	İCV	Sardegna, İtalya	EW
20900	HWV	Rosnay, Fransa	NS-EW
21900	JJİ	Ebino, Japonya	EW
22100	GQ1	Anthorn, İngiltere	NS
23400	DHO	Rhauderfehn, Almanya	NS
24000	NAA	Maine, ABD	NS
37500	NRK	İzlanda	NS
45900	SIC	Sicilya, İtalya	EW

6.3. Yıldırım Algılama Sistemleri

Yer tabanlı yıldırım algılama sistemlerinin birçoğu yıldırım boşalmaları ile üretilen radyo dalgalarının kaydı ile çalışır. Radyo dalgaları geniş bir frekans bandında yayılırlar. Yıldırım algılama sensörleri haberleşme ve radyo iletişimi için kullanılan frekans bantlarına engel olmamak için çok düşük frekansta (LF, 30-300 kHz) veya çok yüksek frekansta (VHF,

30-300 MHz) çalışırlar. Düşük frekans sistemleri, CG boşalmalarının dönüş darbelerinden oluşan kuvvetli yayılımı algılarlar. Yüksek frekans sensörleri ise tek bir boşalma sonucu ortaya çıkan hızlı akım değişimlerini tespit ederler.

Yıldırım algılama sistemlerinde yıldırım boşalmalarının yerini ve oluşum zamanlarını tanımlamak için farklı teknikler kullanılır. En yaygın metotlar varış zamanı (TOA, time of arrival) ve yön bulma (DF, direction finding)dır. TOA tekniği için antendeki sinyalin varış zamanının kesin olarak belirlenmesi gerekmektedir. Merkez işlemci farklı sensörler arasında varış zamanlarının farklarını hesaplar. Bir istasyon çifti için zaman farkı yıldırım darbesinin yerinden geçen bir hiperbolü tanımlar. Hiperbollerin kesişmeleri ile elde edilen yerin tam tespiti için dört adet varış ölçümü gereklidir. DF tekniğinde genellikle iki ortagonal manyetik çerçeve antende oluşan sinyallerin oranı kullanılır. Bu oran sadece dalganın azimutuna bağlıdır. Boşalmanın yerini doğru tespit etmek için en azından üç yön ölçümü gereklidir [43].

CG boşalmalarının tepe akımları antenler tarafından kayıt edilen elektromanyetik alanların şiddetlerinden tahmin edilir. Kalibrasyon ise tetiklenen darbelerin tepe akımlarının doğrudan ölçümleri kullanılarak ve bunları yıldırım algılama sensörleri tarafından ölçülen alan şiddetleri ile karşılaştırılarak yapılır. Bu konuda yapılan çalışmalar elektromanyetik alanın tepe şiddeti ile dönüş darbesinin tepe akımı arsında lineer bir ilişki olduğunu göstermiştir [126].

METEORAGE Fransa Ulusal Yıldırım Algılama Sistemidir ve 17IMPACT (Improved Accuracy from Combined Technology) sensör ile Fransa'nın birçok kısmını kaplamaktadır. Bu sensörlerde CG boşalmalarının karakteristiklerini tanımlamak için DF ve TOA teknikleri birleştirilmiştir. Çıkış parametreleri ise 1 msn doğrulukla oluşum zamanı, ortalama 500 m yakınlıkla oluşum yeri, darbe sayısı, elektrik yükü ve tepe akımıdır. Yıldırım algılama verimi ise 5 kA üstünde tepe akımına sahip olaylar için %80–90 aralığındadır ve çok az bölgeye bağlı olarak değişir [127,128].

6.4. Analiz Programları

Hail: Bu program ile istenilen vericilerden gelen sinyallerin günlük değişimleri ekranda görüntülenir ve istenilen noktalar yakınlaştırılarak gerçek olayların tespitinde kullanılır.

Eventdetector: Bir vericiden gelen günlük sinyal üzerinde oluşan VLF olaylarının zamanları ve büyükleri bulunarak bir txt. dosyasına yazılır. Ama bu programla tespit edilen VLF olaylarının hepsi doğru demek değildir. Onun için Hail programı ile her olay için günlük sinyaller tekrar gözle incelenmelidir.

Lgtread: Yıldırım algılama sistemi METEORAGE'den elde edilen yıldırım verileri kullanılarak yıldırımların alıcı ile verici arasındaki yayılım yoluna uzaklığı tespit edilir.

Tempchar: Bulunan bir LEP olayının daha küçük bir ölçeğe aktarılarak geçici karakteristikleri tespit etmekte kullanılır.

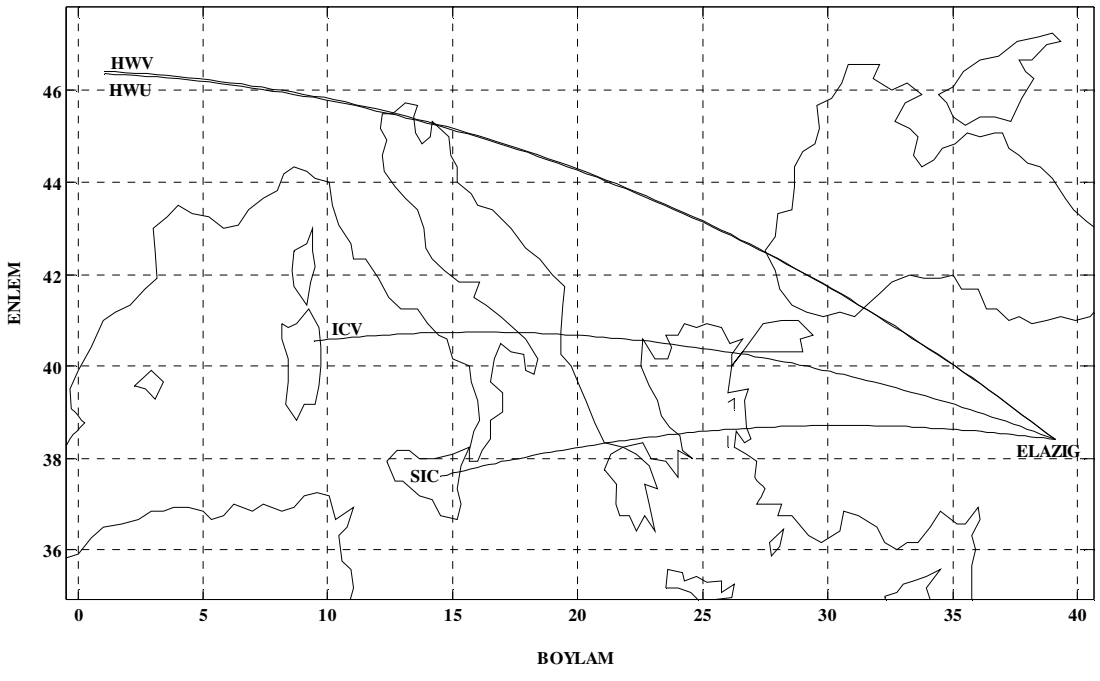
Lightningamp: METEORAGE'den elde edilen yıldırım verilerini şiddetlerine göre sınıflandırmak için kullanılır.

7. BULGULAR VE TARTIŞMA

VLF yayılımını etkileyen faktörler genellikle gece ve gündüz oluşan olaylara bağlı olarak sınıflandırılır. Gündüz saatlerinde VLF yayılımlarını etkileyebilecek faktörler gece boyunca yayılımı etkileyen faktörlerden daha azdır. Gündüz VLF sinyallerinin değişimini ani şekilde etkileyebilecek bir-iki olay vardır. Bunlar yüksek enerjili elektronlar ve protonların yayıldığı kuvvetli Güneş patlamaları ve bu patlamaların sebep olduğu ikincil iyonlaşmalardır. Gece boyunca VLF yayılımını etkileyen faktörler daha fazladır ve VLF yayılımı D bölgesindeki iletkenlik değişimlerinden de etkilenebilir. Bu faktörler yıldırım boşalmaları, Güneş patlamalarının yaydığı enerjili protonlar, termonükleer patlamalar, depremler ve atmosferdeki diğer düzensiz değişmelerdir.

Bu bölümde 2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül aylarındaki 4 VLF verici istasyonundan gelen VLF sinyallerinin incelenmesi ile tespit edilen LEP olaylarının karakteristikleri, oluşmalarına sebep olan yıldırımlar ve jeomanyetik indekslerle olan ilişkileri incelenmiştir.

Şekil 7.1'de bu araştırmada kullanılan 4 VLF verici istasyonu ve alıcı istasyonun yerleri çağrı kodları ile birlikte harita üzerinde gösterilmiştir. Bu dört sinyalin frekansları, çağrı kodları yerleşim yerleri ve alıcıya olan uzaklıkları Tablo 7.1'de verilmiştir.

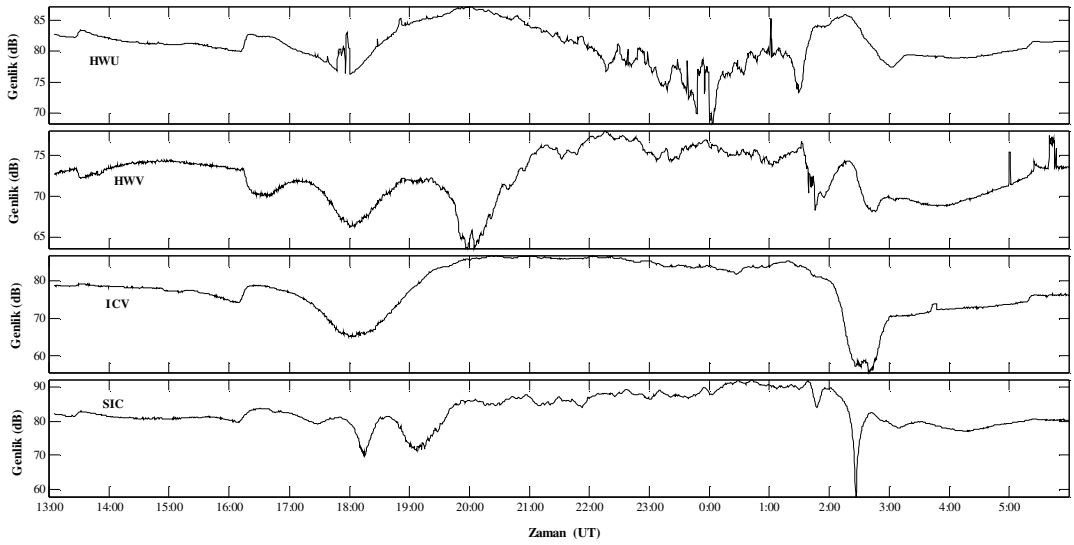


Şekil 7.1. VLF vericileri ve alıcısının harita üzerinde gösterimi

Tablo 7.1. Vericiler ile alıcının frekans, çağrı kodu, yerleşim yerleri ve verici ile alıcı arasındaki mesafeler

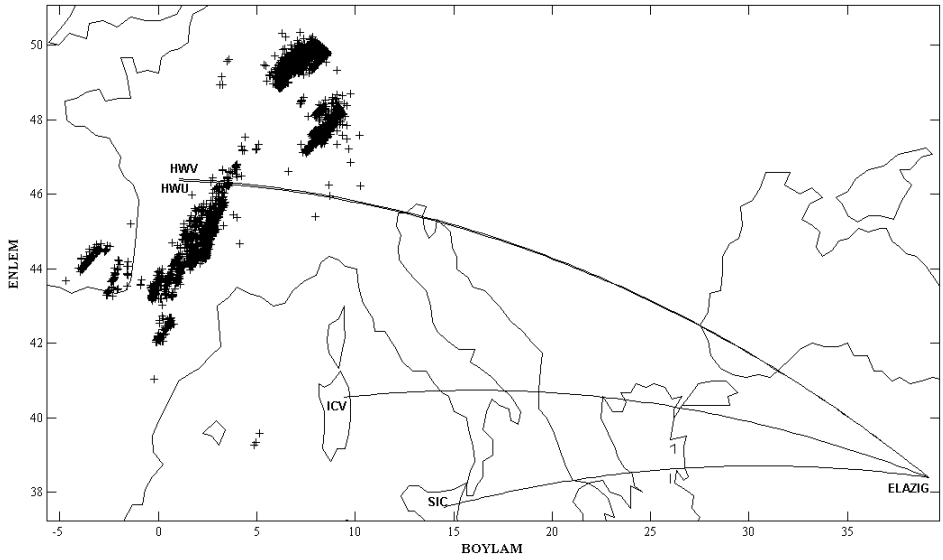
Frekans (Hz)	**Çağrı Kodu**	**Yerleşim**	**Mesafe (km)**
18300	HWU	Le Blanc, Fransa (46^0 37^1 D, 1^0 05^1 K)	3220
20900	HWV	Rosnay, Fransa (46^0 42^1 D, 1^0 05^1 K)	3220
20270	ICV	Sardegna, İtalya (40^0 55^1 D, 9^0 45^1 K)	2550
45900	SIC	Sicilya, İtalya (37^0 06^1 D, 14^0 15^1 K)	2155
Alıcı	FF	Elazığ, Türkiye (38^0 40^1 D, 39^0 12^1 K)	--------

VLF vericilerinden gelen sinyaller her gün alıcı tarafından 13:05 UT den başlayıp ertesi gün saat 06:05 UT'ye 17 saat süreyle kayıt yapılmaktadır. VLF vericilerinden gelen sinyallerin bir günlük değişimi Şekil 7.2'de örnek olarak gösterilmiştir. Her bir vericiye ait sinyal ayrı ayrı incelenerek LEP olayının sebep olduğu değişiklikler tespit edilmektedir.



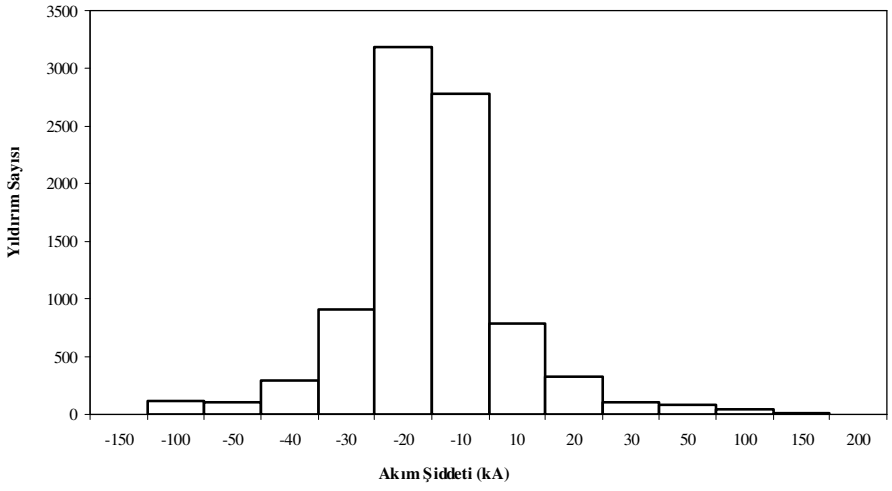
Şekil 7.2. VLF vericilerinden alınan sinyallerin 07/07/2005 tarihindeki günlük değişimleri

Fırat Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesinde kurulu olan VLF alıcı sistemi ile tespit edilen LEP olaylarından bazıları örnek olarak aşağıdaki şekillerde verilmiştir. Sinyallerdeki değişimlerin ve LEP olaylarının sebebi olarak düşünülen yıldırımların 29/07/2005 tarihinde 00:00–02:15 UT zaman aralığında Meteorage tarafından tespit edilen yerel dağılımları ve sinyal yolları Şekil 7.3'de harita üzerinde gösterilmiştir. .



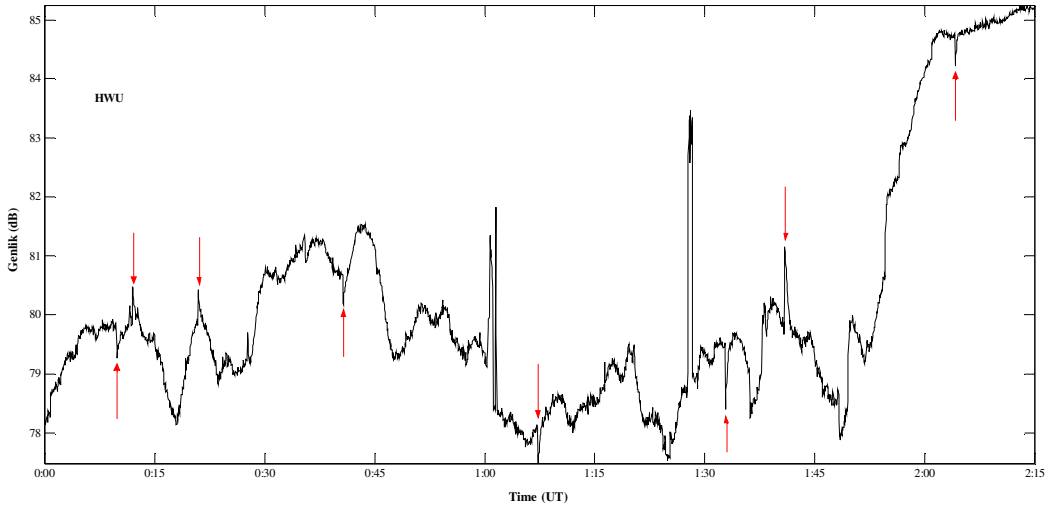
Şekil 7.3. 29/07/2005 tarihinde 00:00–02:15 UT zaman aralığında Meteorage tarafından tespit edilen yıldırımların yerel dağılımları ve sinyal yolları

Bu zaman aralığında Meteorage tarafından toplam 8687 adet yıldırım oluştuğu tespit edilmiştir. Bunların 7338 adeti –CG, 1349 adeti ise +CG dir. Bu yıldırımların akım şiddetlerinin dağılımları Şekil 7.4'de verilmiştir. Oluşan yıldırımların %95'inin büyüklükleri -30 ile 20 kA arasında değişmektedir.



Şekil 7.4. 29/07/2005 tarihinde 00:00–02:15 UT zaman aralığında oluşan pozitif ve negatif yıldırımların akım şiddetlerine bağlı dağılımları

Örnek olarak incelenen bu zaman aralığında oluşan LEP olaylarının HWU sinyalinde oluşturduğu etkiler incelenerek Şekil 7.5'de oklarla gösterilmiştir

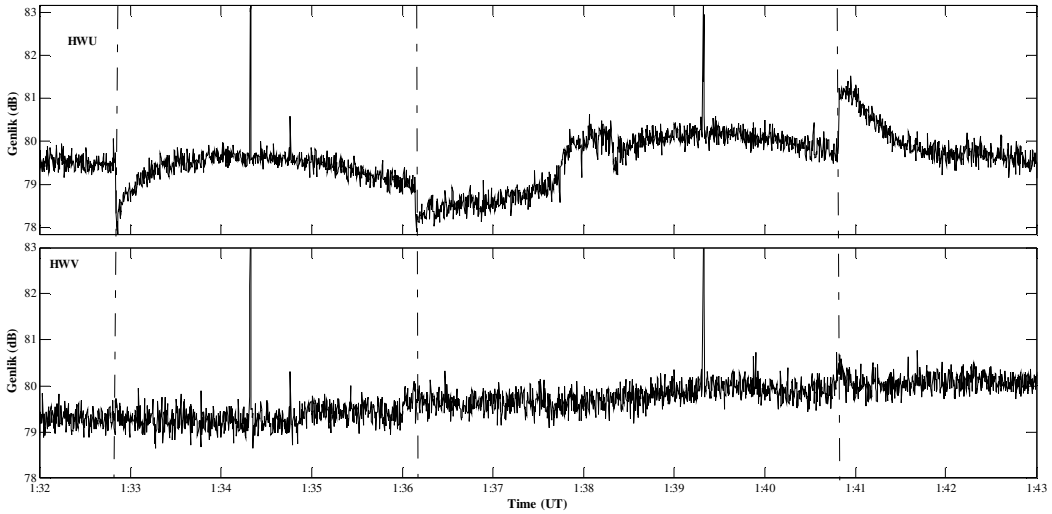


Şekil 7.5. 29/07/2005 tarihinde 00:00–02:15 UT zaman aralığında HWU sinyalinin değişimi ve bu sinyalde gözlenen LEP olayları

Şekilden de görüleceği gibi bu zaman aralığında sekiz adet LEP olayı tespit edilmiştir. Meteorage'den aldığımız yıldırım verileri ile karşılaştırıldığında dört tanesinin oluşumundan önceki 5 saniyelik zamanda yıldırım verisi olmadığı tespit edilmiştir. Üç tanesi –CG yıldırımlarla, bir tanesi ise +CG yıldırım ile ilişkilidir. Bu 4 adet LEP olayının iki tanesi küçük şiddetli iki tanesi ise büyük şiddetli yıldırımlarla ilişkilidir.

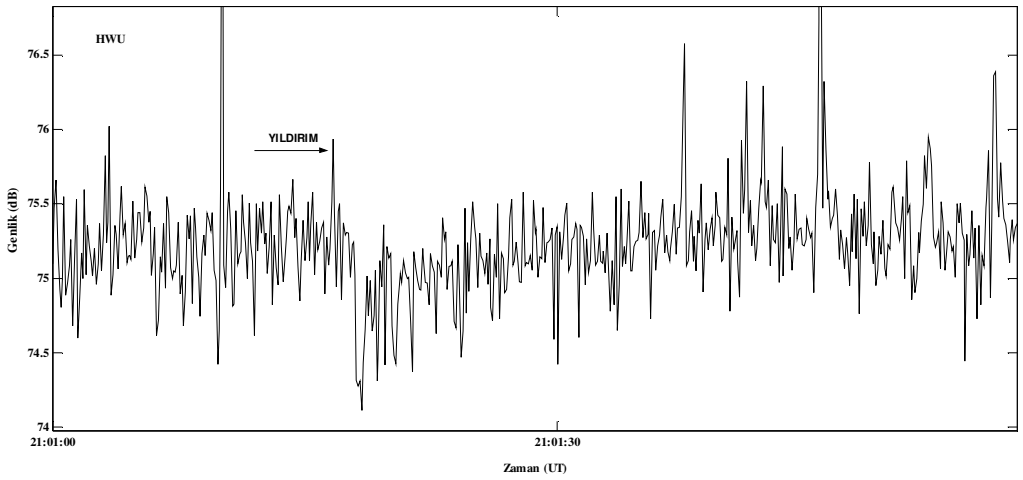
LEP olayının VLF sinyali üzerinde belirlenmesi sinyalin oluşan olaya uzaklığının yanı sıra sinyaldeki gürültüye de bağlı olduğunu ifade etmek gerekir. Birbirine çok yakın iki vericiden gönderilen VLF sinyalleri incelendiğinde fark ortaya çıkmaktadır.

Bu amaçla birbirine çok yakın iki sinyal incelenmiştir. Elde edilen farklar Şekil 7.6'da 11 dakikalık zaman aralığında HWU ve HWV sinyallerinin değişiminde gösterilmektedir. HWU ve HWV sinyal yollarının birbirine yakın olmasına rağmen bu aralıkta 01:32:51, 01:36:09 ve 01:40:49 zamanlarında üç adet LEP olayı HWU sinyalinde çok belirgin ve etkili olarak gözlenirken HWV sinyalinde yok denecek kadar az bir değişim gözlenmektedir. Bunun sebebi ise HWV sinyalindeki gürültünün çok daha yüksek seviyede olmasına veya vericilerin çıkış gücündeki farklılığa bağlı olabilir.



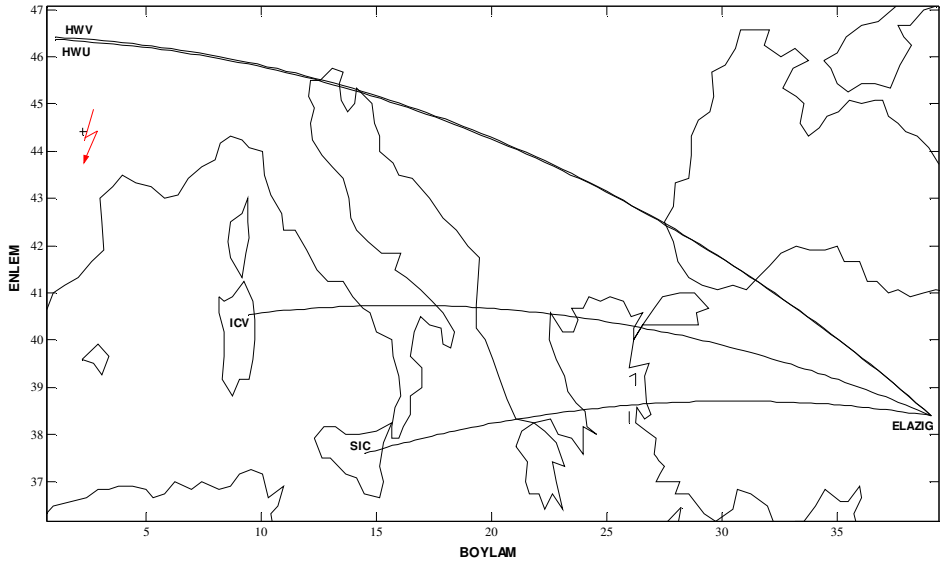
Şekil 7.6. 29/07/2005 tarihinde 01:32–01:43 UT zaman aralığında HWU ve HWV sinyallerinin değişimi ve HWU sinyalinde gözlenen LEP olayları

VLF sinyalindeki LEP olaylarının tespiti amacıyla olayı tek başına küçük zaman aralığında incelediğimizde elde ettiğimiz sonuçlar Şekil 7.7'de verilmiştir. Burada 10/08/2005 tarihinde 21:01:21 UT zamanında HWU sinyalinde tespit edilen bir LEP olayı ve bu olaya sebep olan yıldırım darbesi 1 dakikalık zaman ölçeğinde gösterilmiştir. Bu LEP olayının gecikme zamanı 1.3 sn, oluşum süresi 0.54 sn, oluşum şiddetindeki değişim miktarı 0.95 dB ve geri dönüş zamanı ise 45 sn olarak belirlenmiştir.



Şekil 7.7. 10/08/2005 tarihinde 21:01:21 UT zamanında HWU sinyalinde tespit edilen bir LEP olayı ve bu olaya sebep olan yıldırım darbesi

Şekil 7.8'de incelediğimiz bu LEP olayına sebep olan yıldırımın yeri ve sinyal yolları gösterilmektedir. Yıldırımın yeri 2^0 $26^{'}$ D ve 44^0 $4^{'}$ K koordinatlarında olup, şiddeti 110.2 kA ve HWU sinyaline olan uzaklığı yaklaşık 215 km'dir. Bir yıldırımın oluşturduğu LEP'nin etkisi en fazla en yakın VLF sinyalinde oluşmaktadır.



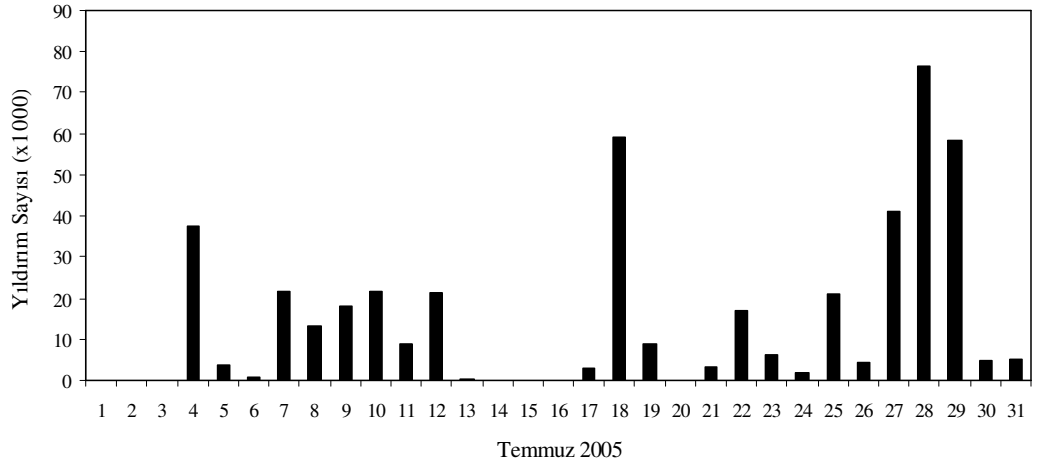
Şekil 7.8. 10/08/2005 tarihinde 21:01:21 UT zamanında HWU sinyalinde tespit edilen LEP olayına sebep olan yıldırımın yeri ve sinyal yolları

7.1. LEP Olayları ile Yıldırımlar Arasındaki İlişkinin İncelenmesi

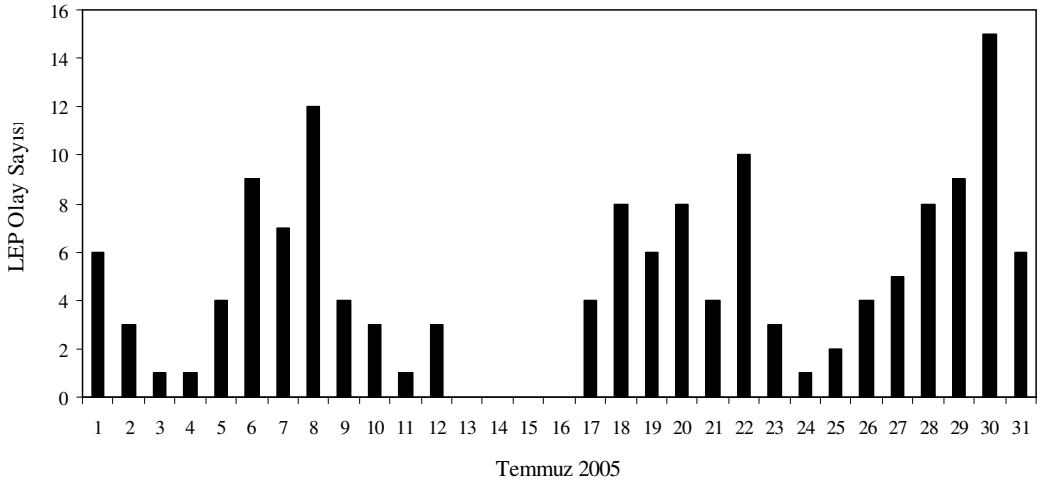
Avrupadaki VLF vericilerinden gelen sinyallerin incelenmesi sonucunda tespit edilen LEP olayları ile Meteorage'den alınan yıldırım verileri arasındaki ilişki 2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül ayları için istatiksel olarak incelenmiştir.

7.1.1. Temmuz İstatistiği

2005 yılı Temmuz ayında VLF alıcı sistemi ile 22 gün sürekli, 5 gün (3–14–17–22–28) kesintili olarak sinyal kaydı yapılabilmiş 4 gün (13–15–16–19) ise hiç sinyal kaydı yapılamamıştır. Meteorage'den alınan yıldırım verileri sinyallerin günlük kaydedildiği zaman aralığına göre düzenlenmiştir. 13:05–24:00/00:00–06:05 UT zaman aralığında 16 gün, 13:05–24:00 UT zaman aralığında 6 gün (4–6–7–17–21–24), 00:00–06:05 UT zaman aralığında 3 gün (5–13–19), daha kısa süreli zaman aralığında 4 gün (1–3–14–20) yıldırım verisi bulunmuş 2 gün (2–15) ise hiç yıldırım verisi bulunamamıştır. Sinyal alınan zaman aralıklarında oluşan yıldırımların sayısı ile sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları Şekil 7.9'da verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 7.9. 2005 yılı Temmuz ayında **(a)** sinyal alınan zaman aralıklarında oluşan yıldırımların **(b)** sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları

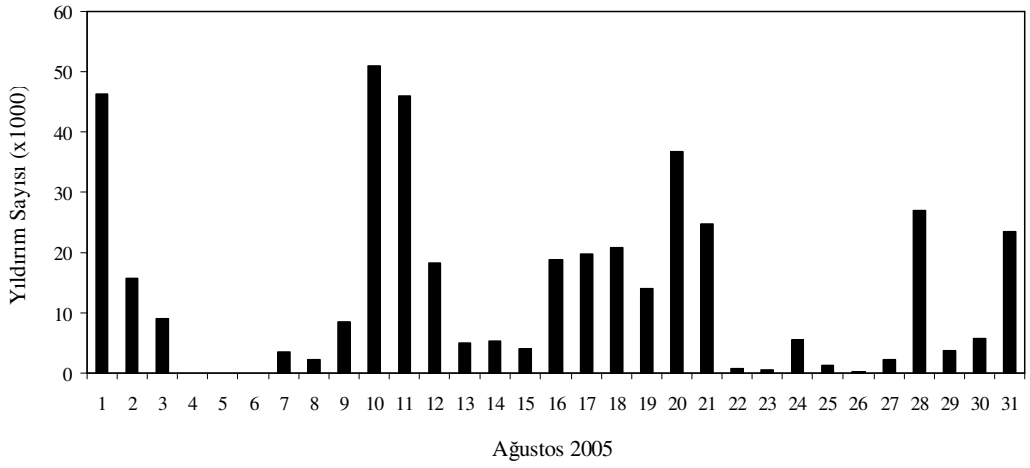
Temmuz ayında HWU sinyalinde 42, HWV sinyalinde 24, ICV sinyalinde 42 ve SIC sinyalinde 39 adet olmak üzere toplam 147 adet LEP olayı gözlemlenmiştir. Bu LEP olaylarının 31(%21,08) tanesinin tespit edildiği zamanlara ait yıldırım verisi bulunmamaktadır. Bill ve Inan 2004 yılında yapmış oldukları çalışmada LEP olayına sebep olan yıldırımların LEP olayının oluşmaya başlamasından yaklaşık 200 msn ile 2.5 sn önceki bir zaman aralığında meydana geldiğini belirtmişlerdir [113]. Bizim tespit ettiğimiz LEP olaylarından 81 (%55,10) tanesinin oluşumundan önceki 5 saniyelik zaman aralığında herhangi bir ilişkili yıldırım verisi bulunmamıştır. 35 (% 23,81) adet LEP olayının ise yıldırımlarla ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

Ancak Agnes ve arkadaşlarının 2004 yılında yapmış oldukları bir çalışmada sinyale ortalama 55 km uzaklıkta ve olayın başlaması ile yıldırım arasındaki zaman farkının 100 msn daha az olduğu olayları Erken/Hızlı veya Erken/Yavaş olarak tanımlamışlardır [129]**.** Bizim de HWU sinyalinde 7(%4,76) adet olay bu sınırlar içindedir. Dolayısı ile Temmuz ayı için yapılan inceleme sonunda yıldırım verilerimizle ilişkili toplam 28 (% 19,04) adet LEP olayı tespit edilmiştir.

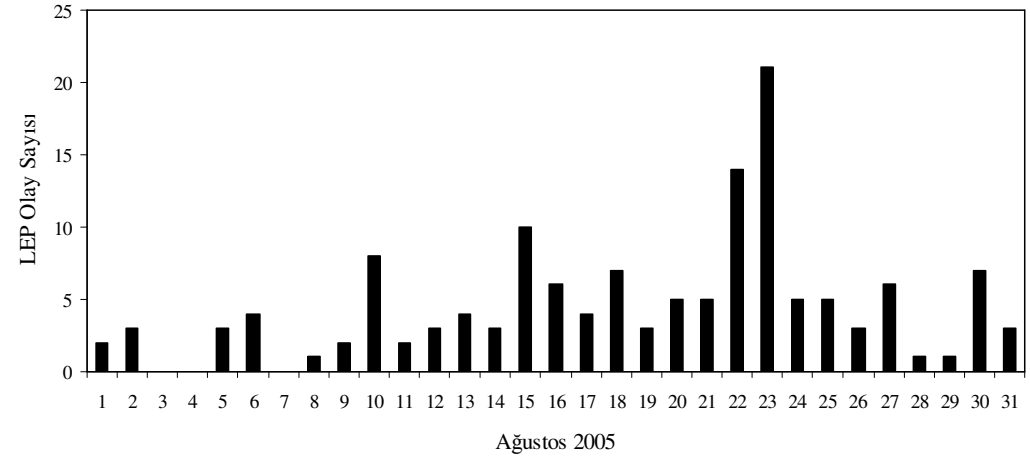
7.1.2. Ağustos İstatistiği

2005 yılı Ağustos ayında VLF alıcı sistemi ile 25 gün sürekli, 3 gün (9–12–30) kesintili olarak sinyal kaydı yapılabilmiş 3 gün (3–4–27) ise hiç sinyal kaydı yapılamamıştır. 13:05–24:00/00:00–06:05 UT zaman aralığında 20 gün, 13:05–24:00 UT zaman aralığında 7 gün (6–8–13–23–25–28–31), 00:00–06:05 UT zaman aralığında 2 gün (3–27), daha kısa süreli zaman aralığında 1 gün (4) yıldırım verisi alınmış 1 gün (5) ise hiç yıldırım verisi alınamamıştır. Sinyal alınan zaman aralıklarında oluşan yıldırımların sayısı ile sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları Şekil 7.10'da verilmiştir.

Ağustos ayında HWU sinyalinde 53, HWV sinyalinde 48, ICV sinyalinde 35 ve SIC sinyalinde 5 adet olmak üzere toplam 141 adet LEP olayı tespit edilmiştir. Bu LEP olaylarının 30(%21,27) tanesinin tespit edildiği zamanlara ait yıldırım verisi bulunmamaktadır. Tespit edilen LEP olaylarından 90 (%63,83) tanesinin oluşumundan önceki 5 saniyelik zaman aralığında ilişkili herhangi bir yıldırım verisi bulunmamaktadır. HWU ve HWV sinyalinde ikişer adet olmak üzere 4(%2,83) adet olay E/F olaylar olarak tanımlanabilir. Dolayısı ile Ağustos ayı için yapılan inceleme sonunda yıldırım verilerimizle ilişkili toplam 17 (% 12,05) adet LEP olayı tespit edilmiştir.



(a)

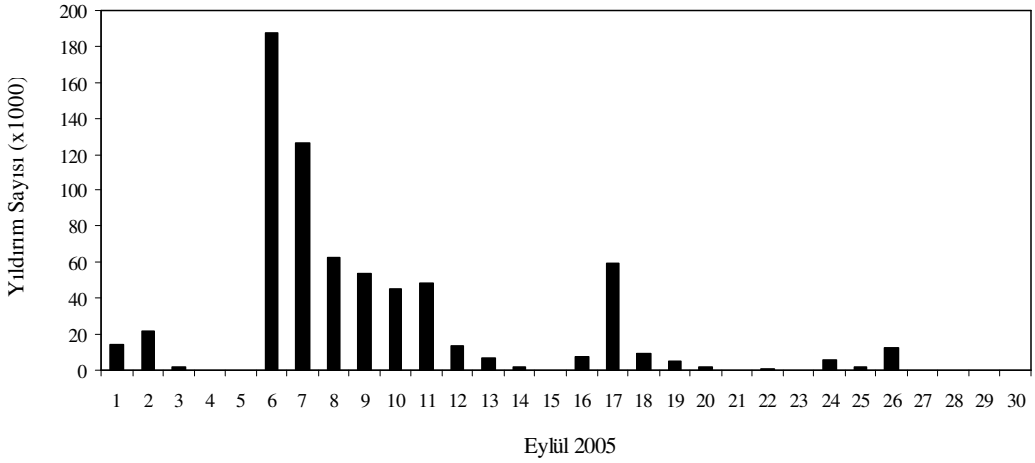


(b)

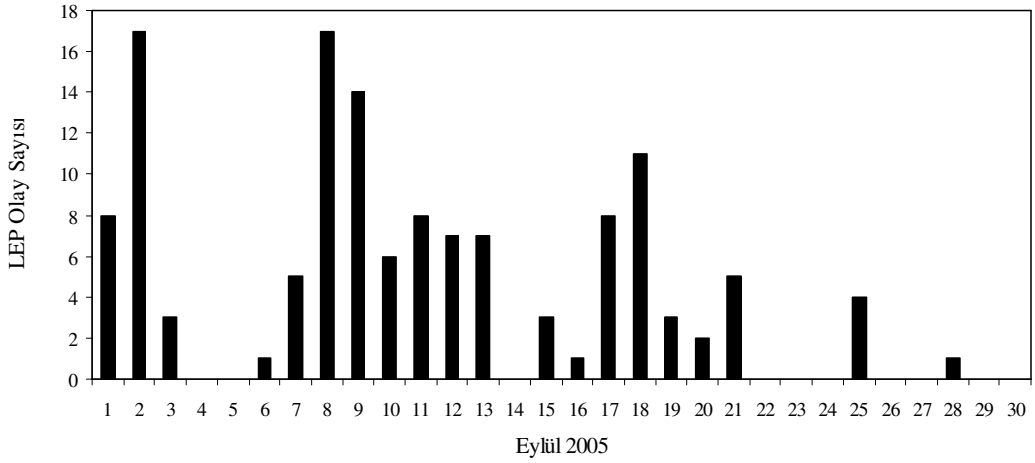
Şekil 7.10. 2005 yılı Ağustos ayında **(a)** sinyal alınan zaman aralıklarında oluşan yıldırımların **(b)** sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları

7.1.3. Eylül İstatistiği

2005 yılı Eylül ayında VLF alıcı sistemi ile 21 gün sürekli, 2 gün (11–12) kesintili olarak sinyal kaydı yapılabilmiş 7 gün (3–4–5–22–23–25–29) ise hiç sinyal kaydı yapılamamıştır. 13:05–24:00/00:00–06:05 UT zaman aralığında 18 gün, 13:05–24:00 UT zaman aralığında 4 gün (6–21–24–26), 00:00–06:05 UT zaman aralığında 5 gün (3–20–22–25–27), daha kısa süreli zaman aralığında 1 gün (28) yıldırım verisi bulunmuş 2 gün (29–30) ise hiç yıldırım verisi bulunamamıştır. Sinyal alınan zaman aralıklarında oluşan yıldırımların sayısı ile sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları Şekil 7.11'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 7.11. 2005 yılı Eylül ayında **(a)** sinyal alınan zaman aralıklarında oluşan yıldırımların **(b)** sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları

Eylül ayında HWU sinyalinde 31, HWV sinyalinde 41, ICV sinyalinde 45 ve SIC sinyalinde 14 adet olmak üzere toplam 131 adet LEP olayı tespit edilmiştir. Bu LEP olaylarının 10(%7,63) tanesinin tespit edildiği zamanlara ait yıldırım verisi bulunmamaktadır. Tespit edilen LEP olaylarından 94 (%71,75) tanesinin oluşumundan önceki 5 saniyelik zaman aralığında herhangi bir ilişkili yıldırım verisi bulunmamaktadır. HWU, HWV ve ICV sinyallerinde birer adet olmak üzere toplam 3(%2,29) adet olay E/F olaylar olarak tanımlanabilir. Dolayısı ile Eylül ayı için yapılan inceleme sonunda yıldırım verilerimizle ilişkili toplam 24 (% 18,32) adet LEP olayı tespit edilmiştir.

7.1.4. Analizlerin Değerlendirilmesi

Bu üç aylık dönemde sinyal kaydı 68 gün tam olarak yapılmış, 24 gün kesintili yapılabilmiş ve 14 gün hiç yapılamamıştır. Sinyallerin kesintili alınmasının veya hiç alınamamasının iki sebebi olabilir. Birincisi Türkiye'de Fırat Üniversitesinde yeni kurulan VLF Alıcı Sistemindeki yazılım ve donanım, ikincisi ise elektrik kesintileri olabilir. Elektrik kesintileri daha sonra kesintisiz güç kaynağı alınarak çözüme kavuşturulmuş fakat yazılım ve donanım kaynaklı sorunlarla halen karşılaşılmaktadır. Çünkü yazılım ve donanım sürekli geliştirilmekte ve güncellenmektedir.

Yıldırım verilerinin hiç bulunmadığı zaman aralıklarında VLF sinyallerinde 71 adet LEP olayı tespit edilmiştir. Bunun sebebi o zaman aralığında yıldırım kayıt sisteminin çalışmaması veya LEP olayını oluşturan diğer mekanizmalar olabilir.

Kuzey yarımkürede oluşan yıldırım boşalmaları güneye giden ıslık dalgaları oluştururlar. Bu tür boşalmaların oluşturduğu güney yönündeki ıslık dalgaları salınım halindeki parçacıkların dönme frekanslarını etkileyerek kuzey yarımküreye yağmalarına sebep olur. Bu elektron yağış türü "doğrudan yağış" olarak adlandırılır. Ayrıca parçacıklar kuzey yarımküredeki ilk aynalama veya geri saçılmadan sonra güneye giden ıslık dalgalarının parçacıkların dönme frekansı ile etkileşimi sonucunda güney yarımküreye de yağabilir. Bu elektron yağışı "aynalanmış (mirrored) yağış olarak adlandırılır [41,119,130,131]. Eğer kayıp konisinin hemen üstündeki elektronlar kayıp konisinin içine zayıf bir şekilde saçılırlarsa bunların hepsi kuzey yarımküredeki atmosfere yağmaz, burada aynalanır, tekrar geri saçılır ve güney yarımküreye dönerek oradaki atmosfere düşerler. Bizim sistemimizle tespit edilen ve yıldırımlarla ilişkili olmayan LEP olayları güney yarımkürede oluşan ve geri saçılmadan dolayı gelen parçacıkların yağışı olabilir.

Meteorage Yıldırım Algılama Sisteminin %90'nın üzerinde yüksek bir algılama hassaslığı olmasına rağmen bizim tespit ettiğimiz LEP olaylarının 265 tanesinin oluşumundan önceki 5 saniyelik zaman aralığında herhangi bir yıldırım tespit edilememiştir. Bunun sebebi yıldırım algılama sisteminin bazı yıldırımları kaçırması olabilir. Ayrıca Meteorage sadece pozitif veya negatif bulut-toprak (CG) arası oluşan yıldırımları kaydetmektedir. Ama yıldırımlar sadece bulut-toprak arası değil bulut içinde ve bulular arasında da (IC) olmaktadır. Dolayısı ile bazı LEP olaylarının kaynağı bu bulut içinde oluşan yıldırımlar olabilir. Henüz bulut içinde oluşan yıldırımların yapısı tam olarak anlaşılamamıştır ve tespiti yapılamaktadır.

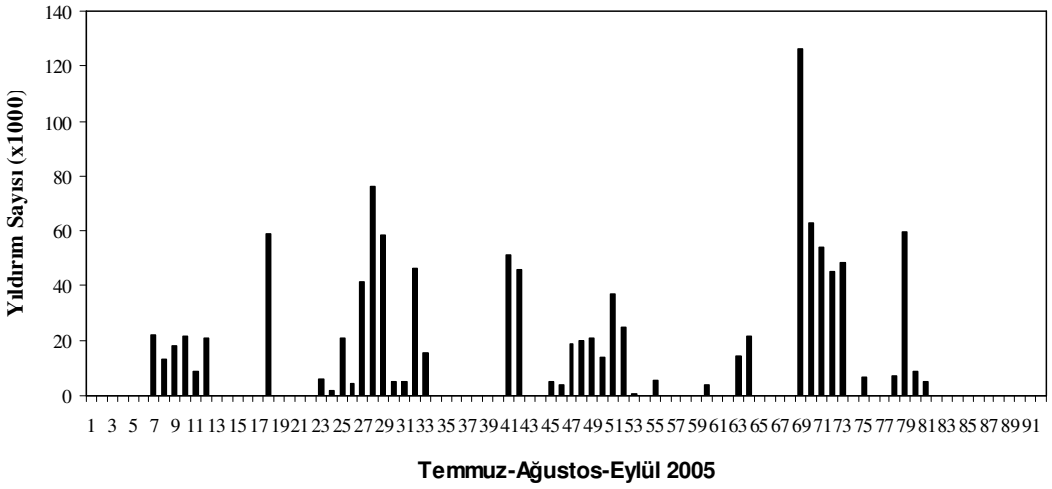
VLF sinyal kayıtları rutin olarak CG ve IC boşalmalardan gelen darbeleri kayıt ederler. Bunların ne tip yıldırım olduğunu ve yerlerinin tespitini bu VLF verilerinden tanımlamanın basit bir yolu yoktur. Fakat daha önce yapılan çalışmalarda LEP olaylarının CG boşalmalarla ilişkili olduğu belirtilmiştir [79].

Düşük şiddetteki yıldırım boşalmalarının da LEP olayları oluşturabileceğini tespit ettik. Kanallanmış ıslıkların ürettiği LEP olayları ile yapılan çalışmalarda manyetoküredeki kanalın olmasının LEP olayının oluşması için gerekli bir şart olduğu belirtilmiştir. Fakat kanallanmamış LEP olayları için böyle bir şart yoktur [79]. Düşük şiddetli yıldırımların sebep olduğu LEP olayları kanallanmamış ıslık dalgaları olabilir.

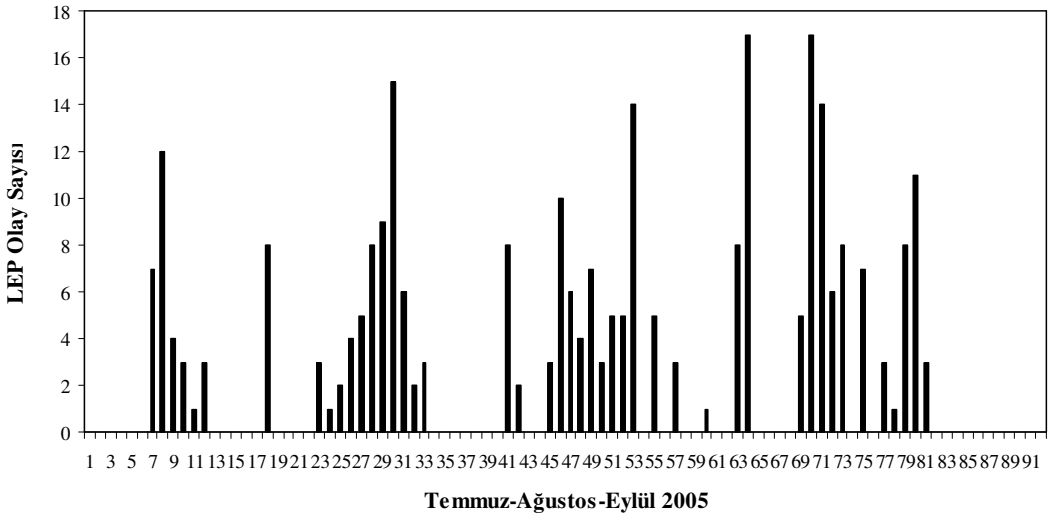
Büyük şiddetli yıldırım boşalmaları daha fazla elektromanyetik ışıma üretirler ve bundan dolayı manyetoküreye daha büyük enerjili dalgalar girerek ıslık olarak yayılabilirler ve elektron yağışına sebep olurlar. Bazı büyük yıldırımlar LEP olayları ile ilişkili olmayabilirler. Bununla birlikte yayılan ıslık dalgasının frekans yapısı gibi faktörler de elektron yağışında etkili olabilir. Islık dalgasının frekans yapısı, saçılan elektronların enerji yapılarını tanımladığından yağan elektronların enerji spektrumlarını ve miktarlarını etkileyebilir [132]. Bu nedenle Meteorage tarafından kayıt edilemeyen yıldırımlarla ilişkili bulunan LEP olaylarının üretimi bu faktörden dolayı olabilir.

Yıldırımların şiddetlerinin işaretleri yük akışının yönünü belirtir. Pozitif (+CG) boşalmalar buluttan yere doğru pozitif yüklerin hareketini, negatif (-CG) boşalmalar ise negatif yüklerin hareketini tanımlar. Hem pozitif hem de negatif boşalmalar elektromanyetik dalgalar oluşturabilirler. Negatif (-CG) boşalmalar daha sık olmasına rağmen pozitif (+CG) boşalmalar daha büyük şiddetlere sahiptirler. Fakat elimizdeki verilerin incelenmesi sonucunda bir negatif boşalmanın da pozitif boşalmaya eşit bir LEP oluşturabileceği tespit edilmiştir.

Şekil 7.12'de bu üç aylık dönemde kesintisiz sinyal alınan günlerde tespit edilen LEP olayları ve Meteorage sisteminden elde edilen tam gün yıldırım verilerinin değişimleri gösterilmiştir. Yıldırım verisi tam olan ve sürekli sinyal alınan günlerde tespit edilen LEP olay sayıları karşılaştırıldığında aralarında doğru yönlü bir ilişki olduğunu söyleyebiliriz. Ancak, örneğin Eylül ayının 2 ve 8 inde sinyallerde toplam 17'şer adet LEP olayı tespit edilmiştir. Aynı günler için tespit edilen yıldırım sayıları ise 21354 ve 62928 dir. Bunun yanı sıra Eylül ayının 9'unda oluşan 53965 yıldırıma karşılık sinyallerde toplam 14 adet LEP olayı tespit edilmiştir. Bu sonuçlar bize her yıldırımın LEP üretmediğini ifade eder. Yukarıda açıkladığımız sebeplerin yanında farklı bölgelerde oluşan farklı türdeki fırtınalardaki yıldırım boşalmalarının yaydığı ıslık dalgaları manyetoküreye değişik noktalardan girerek o bölgede farklı sayıda yıldırım-etkili elektron yağışlarına sebep olabilirler.



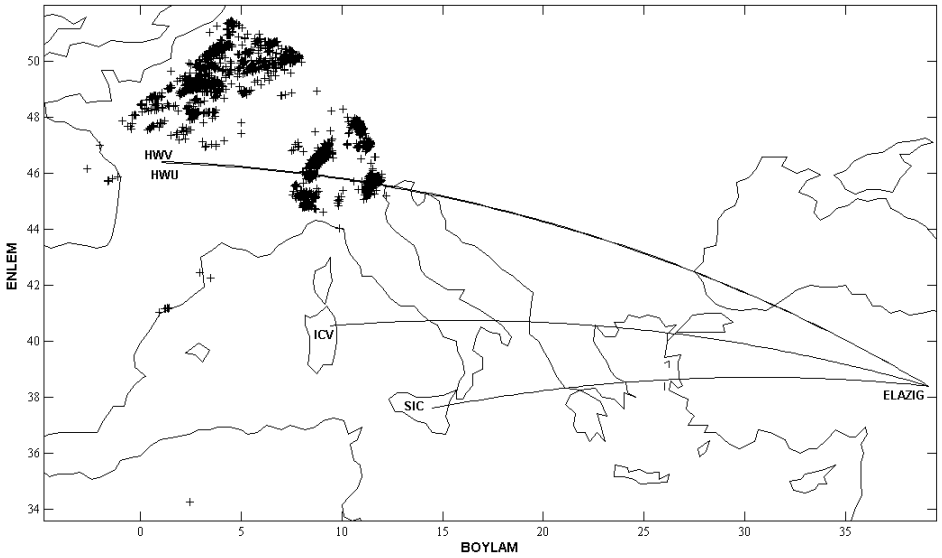
(a)



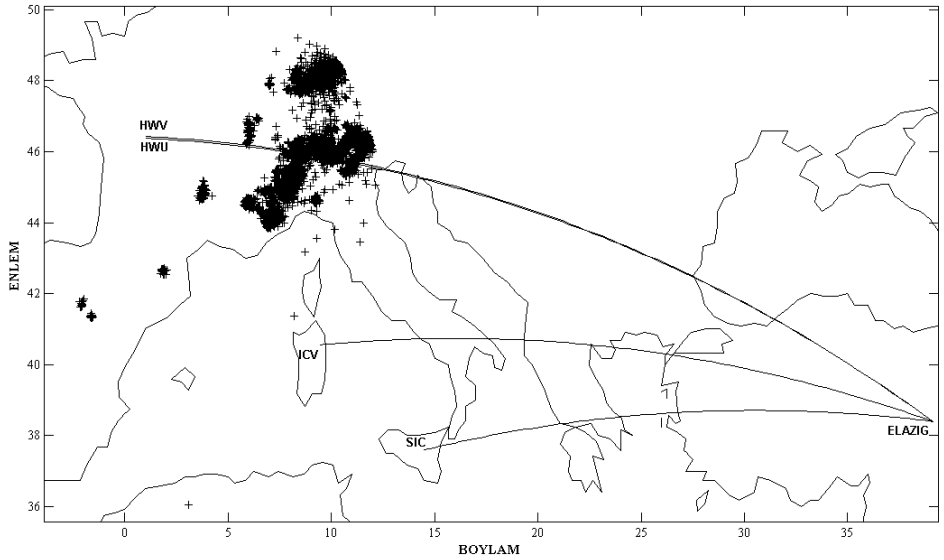
(b)

Şekil 7.12. 2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül aylarında sürekli sinyal alınan günlerde oluşan **(a)**yıldırımların **(b)** sinyallerde tespit edilen LEP olaylarının günlük dağılımları

Şekil 7.13'de iki farklı günde oluşan yıldırımların yerleri gösterilmiştir. Şekil 7.13.a'da 30/07/2005 tarihinde 4774 adet yıldırım boşalmasına karşılık 17 adet LEP olayı tespit edilmiştir. Şekil 7.13.b'de ise 02/09/2005 tarihinde 21354 adet yıldırım boşalmasına karşılık 15 adet LEP olayı belirlenmiştir.



(a)



(b)

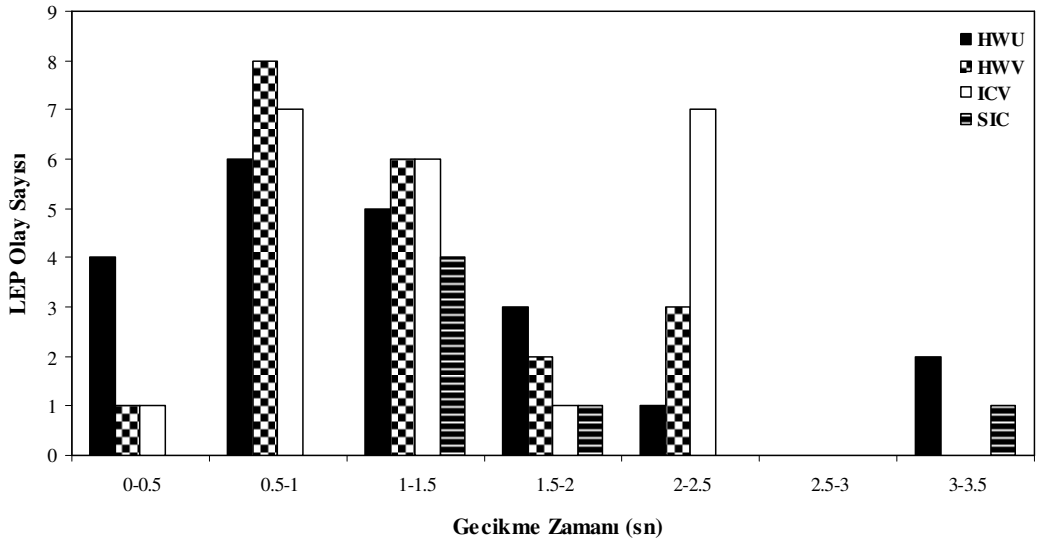
Şekil 7.13. Meteorage tarafından tespit edilen yıldırımların yerel dağılımları ve sinyal yolları **(a)**30/07/2005 **(b)** 02/09/2005

7.2. LEP Olaylarının Geçici Karakteristiklerinin İncelenmesi

Bu bölümde tespit ettiğimiz LEP olaylarının geçici karakteristikleri incelenerek aralarında bir ilişki olup olmadığı araştırılmıştır. Bir LEP olayını tanımlayan dört adet geçici karakteristik değer vardır. Bunlar; yıldırım boşalması ile LEP olayının başlaması arasındaki gecikme zamanı (onset delay,Δt), LEP olayının oluşum süresi (time duration,t_d), LEP olayının oluşum şiddetindeki değişim miktarı (event perturbation magnitude,ΔA) ve sinyalin tekrar eski haline dönmesi için geçen süredir (recovery time,t_r). Bu kavramlar 5. bölümde Şekil 5.11'de şematik olarak gösterilmiştir.

7.2.1. Gecikme Zamanı (Δt)

LEP olayına sebep olan yıldırım boşalması ile VLF sinyalinde LEP olayının etkisinin oluşmaya başlaması arasındaki zaman gecikme süresi olarak tanımlanır. Bu tez çalışmasında Avrupa'daki 4 vericiden alınan üç aylık VLF verilerinin analizi yapılırken toplam 405 adet LEP olayı tespit edilmiş fakat bunların 69 tanesinin Meteorage'den alınan yıldırım verileri ile ilişkili olduğu saptanmıştır. Bu sebeple gecikme zamanı ile ilgili istatistikler sadece yıldırımlarla bağlantılı LEP olayları için incelenmiştir. İncelenen LEP olaylarının 21'i HWU'da , 20'si HWV'de, 22'si ICV'de ve 6 tanesi ise SIC verici sinyalinde tespit edilmiştir. Şekil 7.14'de dört farklı verici sinyali üzerinde yıldırım boşalmalarına bağlı olarak tespit edilen LEP olayı sayılarının gecikme zamanına göre dağılımları gösterilmektedir.

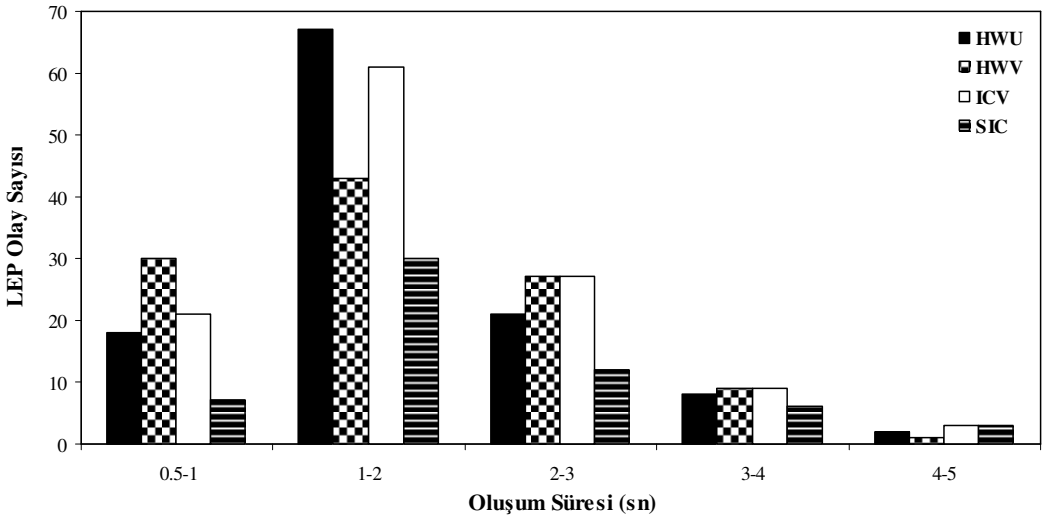


Şekil 7.14. Dört faklı sinyal üzerinde yıldırım boşalmalarına bağlı olarak tespit edilen LEP olay sayılarının gecikme zamanına göre dağılımları

Bu LEP olaylarının gecikme zamanlarının yaklaşık %96'sı 0.25-2.5 sn ve %4'ü de 2.5-3.2 sn aralığında değişmektedir. Bill ve arkadaşları 2004 yılında yapmış oldukları benzer çalışmada gecikme zamanlarının 0.2-2.5 sn aralığında değiştiğini belirtmişlerdir [113]. Farklı olarak bizim çalışmamızda 2.5-3.2 sn aralığında gecikme zamanlarına sahip 3 adet LEP olayı tespit edilmiştir. 3 ve 3.2 sn'lik gecikme zamanlarına sahip LEP olayları Temmuz ayında HWU sinyalinde ayın 8'inde 20:49:58 UT, 29'unda 02:04:09 UT ve diğer 3.2 sn'lik gecikme zamanı SIC sinyalinde ayın 12'sinde 15:44:10 UT'de tespit edilmiştir.

7.2.2. Oluşum Süresi (t_d)

Olayın başlaması ile genlik değişimindeki artışın son bulması arasındaki zaman olarak tanımlanır. Ayrıca t_d oluşum süresi iyonküreye LEP olayı sırasında ne kadar süreyle elektron yağdığını gösterir. Oluşum süresi istatistikleri için sinyallerin üzerindeki 405 adet LEP olayı incelenmiştir. Şekil 7.15'de dört faklı sinyal üzerinde tespit edilen LEP olay sayılarının oluşum zamanına göre dağılımları gösterilmektedir.

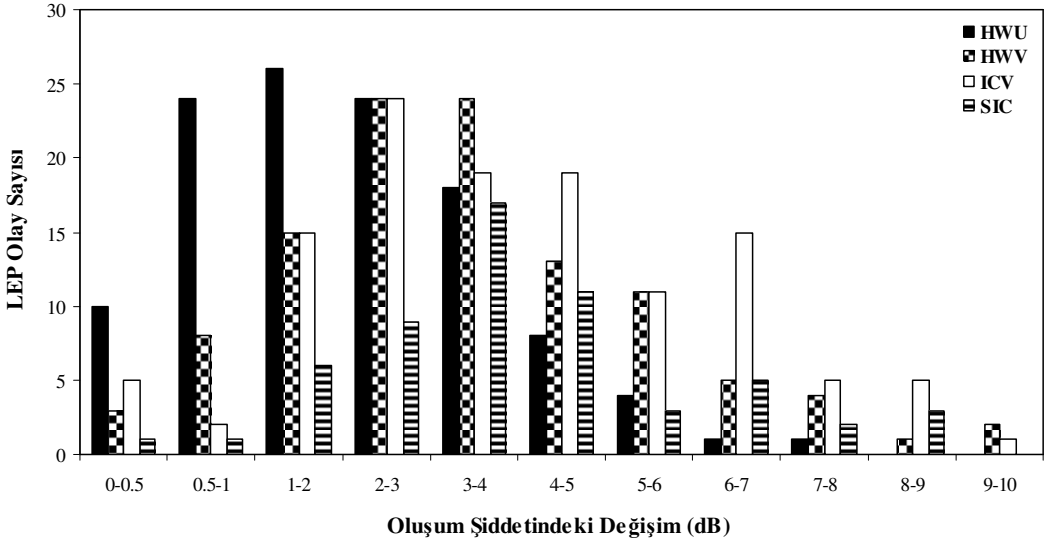


Şekil 7.15. Dört faklı sinyal üzerinde tespit edilen LEP olay sayılarının oluşum zamanına göre dağılımları

LEP olaylarının oluşum zamanlarının yaklaşık %90'ı 0.5-3 sn ve %10'u da 3-5 sn aralığında değişmektedir. Tespit ettiğimiz bu sonuçlar daha önce yapılan çalışmalar ile uyum içerisindedir [113].

7.2.3. Oluşum Şiddetindeki Değişim Miktarı (ΔA)

Meydana gelen LEP olayının sinyal genliğindeki değişim miktarıdır. Şekil 7.16'da dört farklı sinyal üzerinde tespit edilen LEP olay sayılarının oluşum şiddetlerindeki değişime bağlı dağılımları gösterilmektedir. Tespit edilen LEP olaylarının oluşum şiddetindeki değişim miktarlarının %89'u 0.5-7 dB, %6'sı 7-9.587 dB ve %5'i ise 0.175-0.5 dB aralığında değişmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde oluşum şiddetindeki değişim miktarının 0.5-10 dB aralığında değiştiği görülmüştür. Bu çalışmalarda oluşum şiddetindeki değişim miktarı tespit edilirken kullanılan bilgisayar programında 0.5 dB'den küçük LEP olayları ihmal edilmiştir [113]. Bizim çalışmamızda ise bu değişim miktarının 0.5 dB'den küçük olabileceği tespit edilmiştir.



Şekil 7.16. Dört faklı sinyal üzerinde tespit edilen LEP olay sayılarının oluşum şiddetindeki değişim miktarına göre dağılımları

LEP olayının oluşum şiddetindeki değişim miktarına bağlı olarak iyonkürenin 80-85 km aralığındaki yükseklikte LEP olayından kaynaklanan elektron yoğunluğundaki artışı doğrudan bulabiliriz. Bunun için aşağıdaki denklem 7.1 kullanılır.

$$N_{ILDE} = \alpha_{ILDE} . \Delta A \qquad (7.1)$$

Bu denklemde N_{ILDE} düşey elektron yoğunluğundaki artış (ILDE=Integrated Line Density Enhancement) ve α_{ILDE} iyonküredeki elektron yoğunluğundaki artışı belirlemek için kullanılan dönüştürme oranıdır ($\alpha_{ILDE}=4.7\pm2.0x10^{16}$ elektron.m^{-1}/dB) [133]. Bizim çalışmamızda tespit

edilen oluşum şiddetindeki değişim miktarlarının alt ve üst sınırları için elektron yoğunluğundaki artış miktarları hesaplandığında; alt sınır için $0.8225\pm2.0x10^{16}$ elektron.m^{-1}, üst sınır için $45.0589\pm2.0x10^{16}$ elektron.m^{-1} değerleri bulunmuştur.

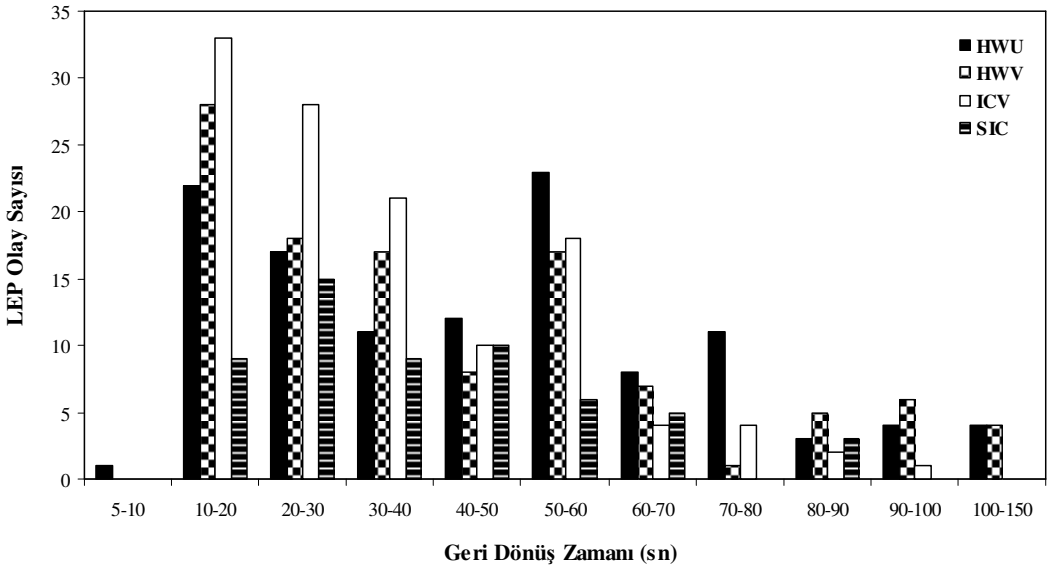
Ayrıca LEP olayının oluşum şiddetindeki değişim miktarına bağlı olarak sinyale dikey şekilde yağan 100–300 keV enerjili elektronların miktarı da hesaplanabilir. Bunun için denklem 7.2 kullanılır.

$$\Gamma = \Psi . \Delta A \qquad (7.2)$$

Bu denklemde Γ elektron yağış miktarı ve Ψ iyonküreye yağan elektronları miktarını belirlemek için kullanılan dönüştürme oranıdır ($\Psi = 1.1\pm0.4x10^{10}$ elektron.m^{-1}/dB)[133]. Bizim çalışmamızda tespit edilen oluşum şiddetindeki değişim miktarlarının alt ve üst sınırları için iyonküreye yağan elektron miktarları hesaplandığında; alt sınır için $0.1925\pm0.4x10^{10}$ elektron.m^{-1}, üst sınır için $10.5457\pm0.4x10^{10}$ elektron.m^{-1} değerleri bulunmuştur.

7.2.4. Geri Dönüş Zamanı (t_r)

Sinyalin tekrar eski haline dönmesi için geçen zaman olarak tanımlanır. Şekil 7.17'de dört farklı verici sinyalleri üzerinde tespit edilen 405 adet LEP olayının geri dönüş zamanlarına bağlı dağılımları gösterilmektedir.



Şekil 7.17. Dört faklı sinyal üzerinde tespit edilen LEP olay sayılarının geri dönüş zamanlarına bağlı dağılımları

Tespit edilen LEP olaylarının geri dönüş zamanlarının yaklaşık %98'i 10–100 sn ve %2'si de 100–150 sn aralığında değişmektedir. Literatürdeki benzer çalışmalar incelendiğinde geri dönüşüm zamanlarının 10–100 sn aralığında değiştiği görülmüştür. Bir olayın geri dönüş zamanı 7.5 saniye olarak bulunmuştur. Bu karakteristik 28/07/2005 tarihinde 21:43:35 UT'de HWU sinyalinde tespit edilen LEP olayına aittir. 8 adet LEP olayının geri dönüş zamanları ise 100–150 sn arasındadır. Bu zamanların 4 tanesi HWU sinyalinde Ağustos ayının 6'sında 01:13:02 UT, 10'unda 21:28:39 UT ve Eylül ayının 21'inde 21:06:34 UT, 23:44:14 UT' de gözlenen LEP olaylarına aittir. Diğer 4 tanesi ise HWV sinyalinde Temmuz ayının 8'inde 05:24:21 UT, 25'inde 04:55:29 UT, 26'sında 04:58:28 UT ve 27'sinde 05:22:43 UT'de tespit edilen LEP olaylarına aittir.

7.2.5. Geçici Karakteristikler Arasındaki İlişki

Bu kısımda yukarıda verilen LEP olaylarına ait geçici karakteristikler arasındaki ilişki (ortak değişim) Korelâsyon yöntemi ile incelenmiştir. X ve Y gibi iki seri arasındaki ilişkinin derecesini oransal olarak veren Korelâsyon Katsayısı ρ ile gösterilir ve şöyle tanımlanır.

$$\rho = \frac{\sum xy}{\sqrt{\sum x^2 \sum y^2}} \tag{7.3}$$

Bir seri ile birden fazla seri arasındaki ilişkinin ölçülmesi istendiğinde Çoklu Korelâsyon Katsayısı kullanılır. X_1 serisi ile X_2, X_3 serileri arasındaki çoklu korelasyon katsayısı Denklem 7.4 ile hesaplanır.

$$\rho_{1.23} = \sqrt{\frac{\rho_{12}^2 + \rho_{13}^2 - 2\rho_{12}\rho_{13}\rho_{23}}{1 - \rho_{23}^2}} \tag{7.4}$$

ρ Korelâsyon katsayısı daima -1 ile +1 arasında değer alır, yani $-1 \leq \rho \leq +1$ dir [134].

Yapılan Korelasyon katsayısı hesaplamaları sonucunda oluşum şiddetindeki değişim miktarı ile oluşum süresi arasındaki Korelasyon katsayısı $\rho_{\Delta A\text{-}td} \approx -0.0434$, oluşum şiddetindeki değişim miktarı ile geri dönüş zamanı arasındaki Korelasyon katsayısı $\rho_{\Delta A\text{-}tr} \approx -0.1408$ ve oluşum süresi ile geri dönüş zamanı arasındaki Korelasyon katsayısı ise $\rho_{td\text{-}tr} \approx 0.0143$ olarak bulunmuştur. Bununla birlikte, gecikme zamanı ile diğer geçici karakteristikler arasındaki Korelasyon katsayıları hesaplandığında sırasıyla $\rho_{\Delta t\text{-}\Delta A} \approx 0.0535$, $\rho_{\Delta t\text{-}td} \approx -0.0524$ ve $\rho_{\Delta t\text{-}tr} \approx -0.0009$ dır.

Yukarıda yapılan basit Korelâsyon hesaplamalarının yanı sıra çoklu Korelâsyon hesaplamaları yapıldığında $\rho_{\Delta A\text{-}tdtr} \approx 0.1463$, $\rho_{\Delta t\text{-}\Delta Atd} \approx 0.0728$, $\rho_{\Delta t\text{-}\Delta Atr} \approx 0.0529$ ve $\rho_{\Delta t\text{-}tdtr} \approx 0.0519$ olarak bulunmuştur.

Bu hesaplamalardan elde edilen sonuçlara göre ρ değerleri sıfıra çok yakın çıktığı için incelenen geçici karakteristikler arasında herhangi bir ilişki olmadığı sonucuna varılmıştır.

7.3. LEP Olayları ile Jeomanyetik İndeksler Arasındaki İlişki

Yer'in günlük manyetik alan değişimleri, Güneş'ten gelen parçacıkların değişimlerinin sebep olduğu akım sistemlerinin sonucunda oluşur. Güneş rüzgârlarının manyetoküre ile etkileşimi, manyetokürenin kendisinin, manyetoküre ile iyonküre arasındaki etkileşimin ve iyonokürenin kendisinin sebep olduğu düzensiz akım sistemleri de Yer'in manyetik alanında değişimler oluştururlar. Manyetik aktivite indeksleri bu düzensiz akım değişimlerinin jeomanyetik alanda sebep oldukları değişimleri tanımlamak için türetilmişlerdir. Bu bölümde LEP olayları ile jeomanyetik indeksler arasındaki ilişkiler incelenmiştir.

7.3.1. Kp İndeksi ile Lep Olayları Arasındaki İlişki

Jeomanyetik tedirginlikler, yeryüzündeki manyetik gözlemevleri tarafından manyetik alan bileşenlerinin kaydı yapılarak incelenir. Yerel tedirginlik seviyeleri, en fazla etkilenen yatay manyetik alan bileşeni için üç saatlik zaman aralıkları boyunca en düşük ve en yüksek değerler arasındaki farkın ölçülmesiyle tanımlanır. Bu fark, daha sonra yerel K indeksine dönüştürülmüş ve ilk olarak 1938 yılında Postdam yakınlarındaki Niemegk manyetik gözlemevi için tanımlanmıştır [135]. K indeksi Yer'in manyetik alanının yatay bileşenindeki tedirginlikleri 0–9 aralığındaki tamsayılarla tanımlar. 5 ve üzerindeki K değerleri jeomanyetik fırtınaları ifade eder. K indeksi üç saatlik zaman aralığı boyunca bir manyetometre ile gözlenen yatay bileşenlerdeki maksimum dalgalanmalardan elde edilir. Maksimum dalgalanmalar (nT) ile K indeksi arasındaki dönüşüm Tablo 7.2'de verilmiştir. Bu dönüşüm istasyondan istasyona değişmesine rağmen K indeksinin uzun vadeli değişim ortalaması oranları dikkate alındığında bütün gözlemevleri için yaklaşık aynı olduğu kabul edilir [136].

J. Bartels 1949 yılında istatistiksel metotlar kullanarak yeni bir küresel manyetik indeks olan Kp'yi tanımladı. Küresel Kp indeksi, seçilen 13 istasyonda ölçülen manyetik alanın iki yatay bileşenindeki tedirginlik seviyelerinin ortalama değerinden elde edilir. Kp "planetarische Kennziffer" (=planetary index) anlamına gelmektedir.

Tablo 7.2. K indeksi ile maksimum dalgalanmalar arasındaki dönüşüm tablosu

K	nT
0	0–5
1	5–10
2	10–20
3	20–40
4	40–70
5	70–120
6	120–200
7	200–330
8	330–500
9	> 500

Kp indeksindeki 0'dan 9'a kadar olan her bir değer üçe ayrılarak toplam 28 değer vardır. Bunlar;

$$0_0\ ,\ 0_+\ ,\ 1_-\ ,\ 1_0\ ,\ 1_+\ ,\ 2_-\ ,\ 2_0\ ,\ 2_+\ ,\ \text{----------}\ ,\ 8_0\ ,\ 8_+\ ,\ 9_-\ ,\ 9_0 \qquad (7.5)$$

dir. Örneğin 5_- $4\frac{2}{3}$, 5_0 5 ve 5_+ ise $5\frac{1}{3}$ demektir [137]. Kp indeksi geçmişe yönelik olarak 1932 yılına kadar hesaplanmış olup bu tarihten günümüze kadar Kp değerleri bilinmektedir.

Kp'den daha lineer bir indeks elde etmek için zaman aralığı üç saat olan ap indeksi türetilmiştir. Ap ise günlük ap değerlerinin ortalamasıdır. Kp ile ap arasındaki dönüşüm Tablo 7.3'te verilmiştir [138**].**

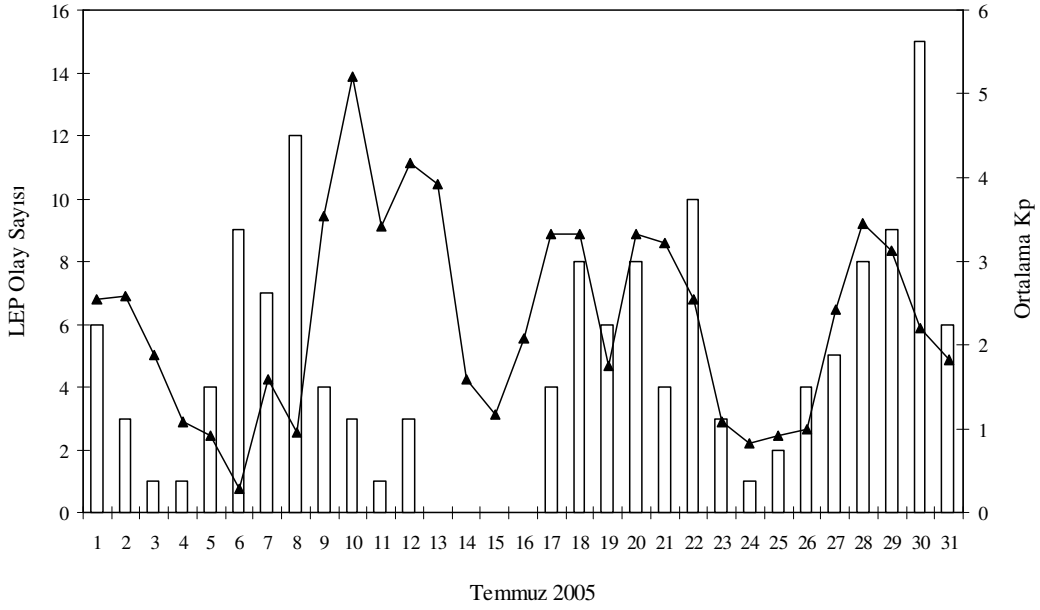
Tablo 7.3. Kp ile ap arasındaki dönüşüm tablosu

Kp	00	0+	1-	10	1+	2-	20	2+	3-	30	3+	4-	40	4+
ap	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
Kp	5-	50	5+	6-	60	6+	7-	70	7+	8-	80	8+	9-	90
ap	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

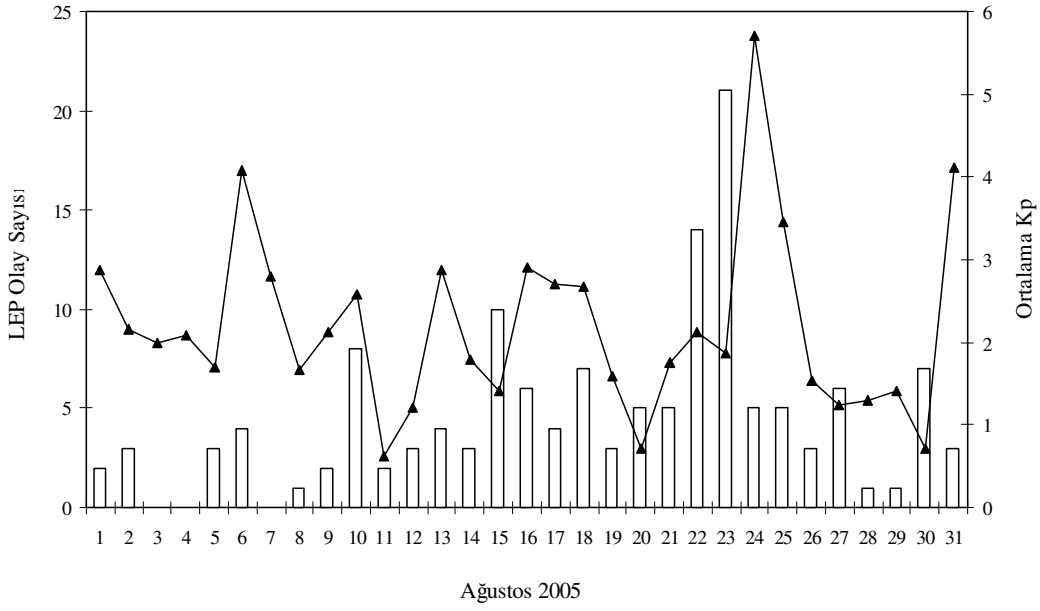
2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül aylarına ait günlük ortalama Kp ve Ap değerleri Tablo 7.4'te verilmiştir. Bu değerler Jeomanyetik Dünya Veri Merkezi'nden elde edilmiştir [139].Ayrıca 2005 yılı Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarına ait LEP olayları ile Kp indeksi arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler sırasıyla Şekil 7.18, Şekil 7.19 ve Şekil 7.20'de gösterilmiştir.

Tablo 7.4. 2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül aylarına ait günlük ortalama Kp ve Ap değerleri

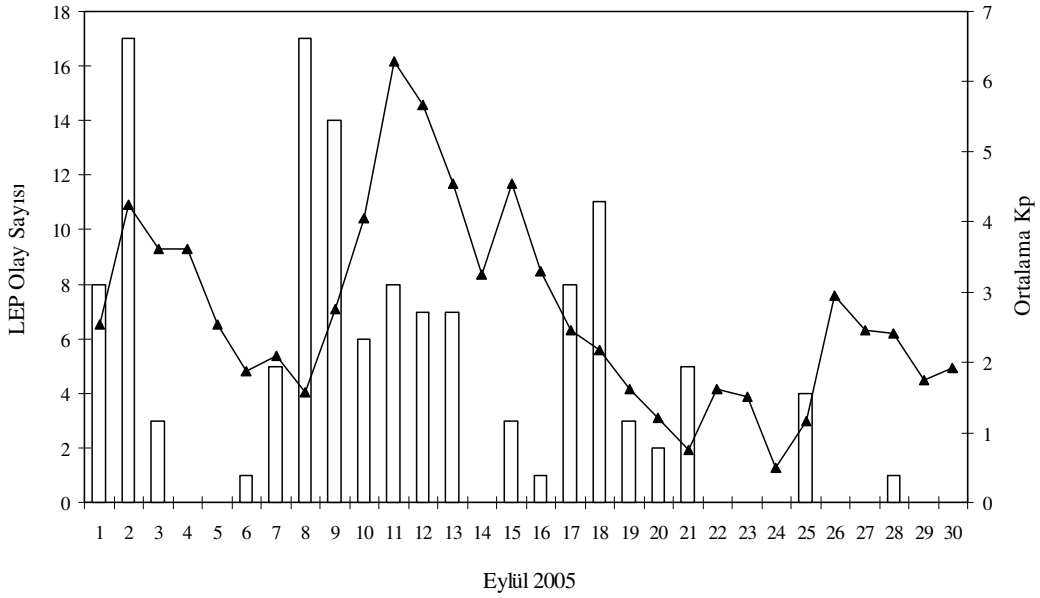
Gün	Ortalama Kp			Ortalama Ap		
	Temmuz	Ağustos	Eylül	Temmuz	Ağustos	Eylül
1	2,542	2,875	2,542	14,500	14,375	13,875
2	2,583	2,166	4,250	12,125	9,000	39,000
3	1,875	2,000	3,625	7,375	8,625	27,125
4	1,083	2,083	3,625	4,250	8,250	23,500
5	0,916	1,708	2,542	3,750	7,750	11,125
6	0,292	4,083	1,875	3,625	28,875	7,500
7	1,583	2,792	2,083	6,250	13,875	10,000
8	0,958	1,666	1,583	3,875	6,500	5,875
9	3,542	2,125	2,750	24,000	8,625	16,875
10	5,208	2,583	4,042	56,875	15,500	33,000
11	3,416	0,625	6,292	21,250	2,750	100,750
12	4,166	1,208	5,666	39,500	5,250	75,125
13	3,916	2,875	4,542	30,625	15,625	43,500
14	1,583	1,792	3,250	6,500	8,125	18,125
15	1,166	1,416	4,542	4,500	6,000	51,500
16	2,083	2,916	3,292	8,250	14,500	18,375
17	3,333	2,708	2,458	21,875	12,625	12,125
18	3,333	2,666	2,166	24,500	12,125	9,500
19	1,750	1,583	1,625	7,250	5,875	6,250
20	3,333	0,708	1,208	19,625	3,000	4,625
21	3,208	1,750	0,750	21,375	9,375	3,000
22	2,542	2,125	1,625	12,125	9,000	6,250
23	1,083	1,875	1,500	4,250	7,125	6,250
24	0,833	5,708	0,500	3,500	101,875	2,500
25	0,916	3,458	1,166	3,750	22,375	5,000
26	1,000	1,542	2,958	4,000	6,375	15,000
27	2,416	1,250	2,458	14,000	5,125	12,000
28	3,458	1,292	2,416	22,750	5,000	10,750
29	3,125	1,416	1,750	16,750	6,625	6,875
30	2,208	0,708	1,916	10,250	3,250	8,500
31	1,833	4,125		7,750	49,125	



Şekil 7.18. 2005 yılı Temmuz ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Kp arasındaki değişim



Şekil 7.19. 2005 yılı Ağustos ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Kp arasındaki değişim



Şekil 7.20. 2005 yılı Eylül ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Kp arasındaki değişim

Carpenter ve Labelle 1982 yılında yayınladıkları bir makalede 1978 yılı Antartika Palmer istasyonun verileriyle yapmış oldukları altı aylık dönemi kapsayan LEP olayı oluşumu ile Kp indeksi arasında Eylül ve Ekim aylarında bir ilişki olduğunu söylemişlerdir. Bunun sebebi ise bu dönemde iki adet çok büyük manyetik fırtınanın bu döneme rast gelmesidir [140]. Daha sonra Leyser ve arkadaşlarının 1984 yılında yine Palmer istasyonuna ait 1983 yılı verileriyle yayınladıkları bir makalede Mart ve Nisan aylarına ait dönemde LEP olayları ile Kp arasında bir korelasyon olduğunu belirtmişlerdir [141**].** Bill ve Inan ise 2004 yılında yapmış oldukları bir çalışmada ise 2001 Mart ayında iki yıldırımlı fırtına oluştuğu günlerde Kp indeksindeki artışla birlikte LEP olayı oluşum sayısının artığını belirtmişlerdir [113].

Bizim incelediğimiz bu üç aylık dönemde bazı günler ortalama Kp indeksi ile LEP olay sayısı arasında bir ilişki olduğu tespit edilmiş, bazı günler ise bir ilişki tespit edilememiştir. Temmuz ayının ilk günlerinde LEP oluşum sayısı ile ortalama Kp arasında ters yönlü zayıf bir ilişki, ayın sonlarındaki günlerde doğru yönlü zayıf bir ilişki tespit edilmiştir. Ağustos ayının genelinde herhangi bir ilişki gözlenmemiştir. Eylül ayının tamamında ise doğrusal zayıf bir ilişki gözlenmiştir. Genellikle yıldırım sayısının maksimum olduğu günlerde LEP sayısındaki artış ile Kp indeksi arasında ilişki olduğu tespit edilmiştir. Aynı değişimler LEP olayları ile Ap indeksi arasında da geçerlidir. Dolayısı ile Avrupa sektöründe tespit edilen LEP olaylarının oluşumu ile Kp indeksi arasında sürekli doğru bir ilişki olduğunu söyleyemeyiz.

7.3.2. Dst İndeksi ile Lep Olayları Arasındaki İlişki

Dst(Disturbance Storm Time), Yer'i kapsayan manyetik fırtınaların seviyesini belirleyen bir jeomanyetik indekstir. Yer üzerinde orta-enlem ve ekvatoral istasyonlardan elde edilen jeomanyetik alanın yatay bileşenin ortalamasıdır. Negatif Dst değerleri devam eden bir manyetik fırtınaya işaret eder. Negatif olarak büyük Dst daha kuvvetli bir manyetik fırtınayı belirtir. Dst indeksindeki negatif sapmalar Yer etrafında ekvatoral düzlemde doğudan batıya doğru ilerleyen halka akımından (ring current) kaynaklanır. Halka akımı, Yer'e yakın bölgedeki proton ve elektronların eğim farkları ve eğrilik sürtünmeleri sonucunda ortaya çıkan bir elektrik akımıdır. Şiddeti ise Güneş'ten gelen rüzgârların durumuna bağlıdır. Güneş rüzgârında doğuya doğru bir elektrik alan olduğu zaman halka akımında önemli bir artış olur ve buna bağlı olarak Dst indeksinde negatif bir değişime sebep olur. Güneş rüzgârlarının durumu ve Güneş rüzgârı ile halka akımı arasındaki bağlantı fonksiyonu bilinirse Dst indeksi tahmin edilebilir. Dst indeksindeki değişimler Tablo 7.5'te verildiği gibi sınıflandırılır [142].

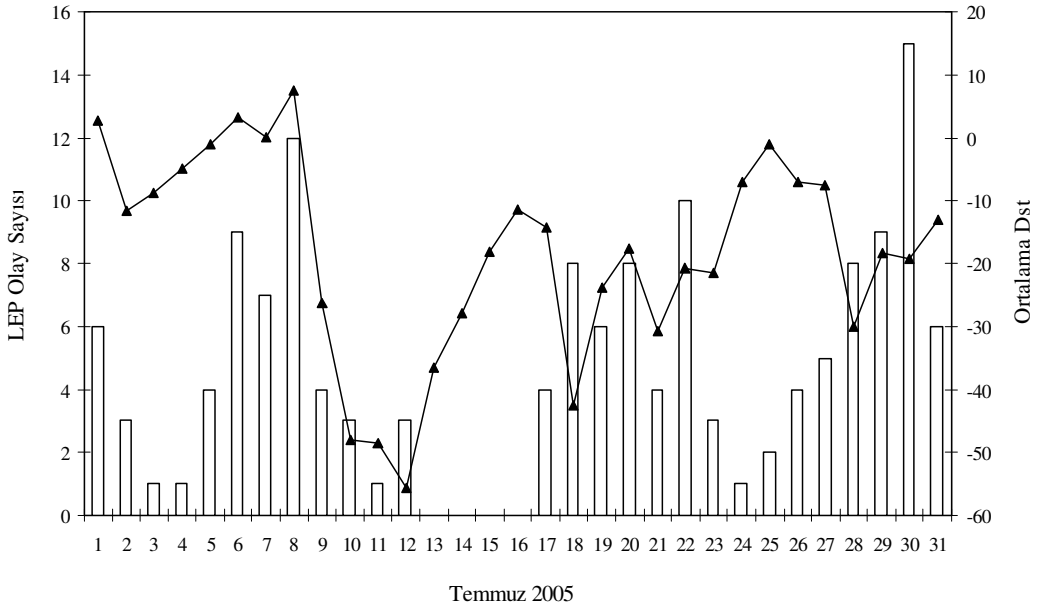
Tablo 7.5. Dst indeksinin sınıflandırılması

Düşük	Dst > -20 nT
Orta	-20 nT > Dst > -50 nT
Yüksek	-50 nT > Dst > -100 nT
Şiddetli	Dst < -100 nT

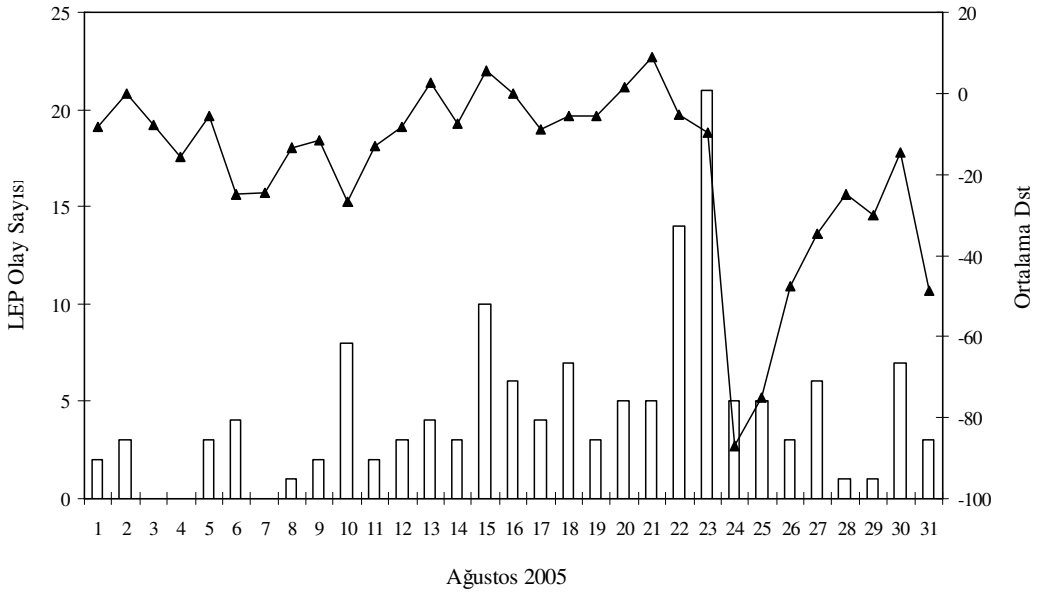
Dst indeksi birer saatlik zaman aralığıyla ölçülür ve ekvator yakınındaki manyetometre istasyonlarından elde edilir. Bu enlemlerde manyetik tedirginliğin H bileşeni üzerinde manyetoküresel halka akımının şiddeti hâkimdir. Dst indeksi ise bu tedirginliğin saatlik ortalamasını doğrudan ölçen bir indekstir. Büyük negatif tedirginlikler halka akımının şiddetindeki belirgin bir artışı ifade eder [143]. 2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül aylarına ait günlük ortalama Dst indeksleri Tablo 7.6'da verilmiştir. Bu değerler Dünya Jeomanyetik Veri Merkezi'nden elde edilmiştir [144]. Ayrıca 2005 yılı Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarına ait LEP olayları ile Dst indeksi arasındaki ilişkiyi gösteren grafikler sırasıyla Şekil 7.21, Şekil 7.22 ve Şekil 7.23'te gösterilmiştir.

Tablo 7.6. 2005 yılı Temmuz-Ağustos-Eylül aylarına ait günlük ortalama Dst değerleri

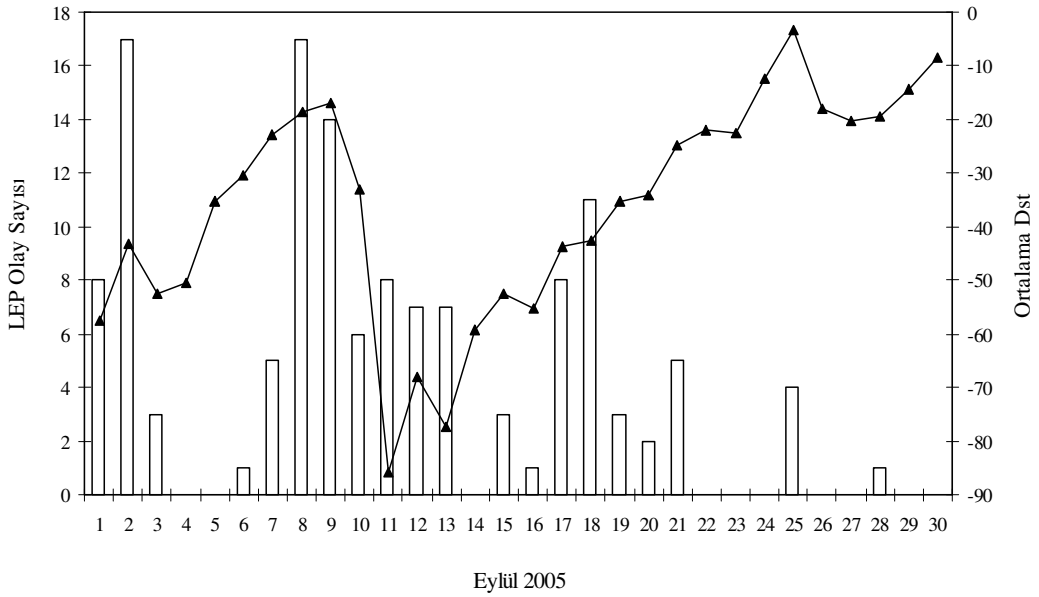
Gün	Ortalama Dst		
	Temmuz	Ağustos	Eylül
1	2,750	-8,292	-57,416
2	-11,500	-0,125	-43,208
3	-8,708	-7,916	-52,375
4	-4,833	-15,750	-50,416
5	-1,042	-5,625	-35,250
6	3,333	-25,000	-30,542
7	0,166	-24,542	-22,750
8	7,583	-13,500	-18,750
9	-26,250	-11,500	-16,916
10	-47,958	-26,750	-33,042
11	-48,416	-13,042	-85,708
12	-55,625	-8,208	-68,083
13	-36,542	2,666	-77,375
14	-27,792	-7,375	-59,166
15	-18,000	5,666	-52,416
16	-11,458	-0,208	-55,292
17	-14,333	-9,083	-43,625
18	-42,583	-5,542	-42,542
19	-23,916	-5,458	-35,250
20	-17,583	1,500	-34,000
21	-30,792	8,875	-24,750
22	-20,708	-5,083	-22,042
23	-21,542	-9,750	-22,666
24	-7,166	-87,125	-12,500
25	-1,000	-74,958	-3,500
26	-7,125	-47,666	-18,083
27	-7,625	-34,792	-20,416
28	-30,000	-25,000	-19,416
29	-18,292	-30,333	-14,250
30	-19,375	-14,458	-8,583
31	-12,958	-48,833	



Şekil 7.21. 2005 yılı Temmuz ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Dst arasındaki değişim



Şekil 7.22. 2005 yılı Ağustos ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Dst arasındaki değişim



Şekil 7.23. 2005 yılı Eylül ayına ait günlük LEP olay sayısı ile ortalama Dst arasındaki değişim

Paul Johnson 2000 yılında yaptığı tezde Haziran 1998 ile Eylül 1999 zaman aralığında Amerika'da olan Hail sistemi ile tespit edilen LEP olayları ile Dst indeksi arasındaki ilişkiyi incelemiştir. Bu döneme ait yapılan inceleme sonucunda Dst indeksinin LEP olay sayısının artışında daha belirleyici olduğunu söylemiştir [26]. Çünkü Dst indeksi manyetoküredeki enerjili parçacıkların sayısındaki artışı ifade eder.

Bu üç aylık dönem incelendiğinde Temmuz ve Eylül aylarında doğru yönlü bir ilişki tespit edilmiştir. Ağustos ayında ise herhangi bir ilişki tespit edilememiştir.

Avrupa sektöründe tespit edilen LEP olaylarının oluşumu ile Dst indeksi arasında bir ilişki olduğunu söyleyebiliriz. Dst indeksi düşük olduğu günlerde LEP olay sayısında bir artış gözlenmemiştir. Bazı günlerde ise Dst indeksinin yüksek olmasına rağmen LEP olay sayısının yüksek olmadığı gözlenmiştir. Bunun birçok sebebi olabilir ama en önemlisi bu dönemlerde yıldırım sayılarının az olmasıdır. Ayrıca bu analizleri etkileyen faktörlerden biri de sistemin bazı günler kesintiye uğraması ve hiç kayıt yapılmamasıdır.

Jeomanyetik indeksler ile LEP olay sayısı arasındaki ilişkinin daha sağlıklı belirlenebilmesi için daha detaylı ve daha uzun süreli araştırma yapmak gerekir.

8. SONUÇLAR

2005 yılı Temmuz, Eylül ve Ağustos aylarında HWU sinyalinde 116, HWV sinyalinde 110, ICV sinyalinde 121 ve SIC sinyalinde 58 adet olmak üzere toplam 405 adet LEP olayı tespit edilmiştir. Bu LEP olaylarından 71 tanesinin tespit edildiği zamanlara ait yıldırım verisi Meteorage kayıtlarında bulunamamıştır. 265 tane LEP olayının oluşumundan önceki 5 saniyelik zaman aralığında olayla ilişkili herhangi bir yıldırım verisi bulunmamaktadır. Bu üç aylık dönemde yıldırım verileri ile ilişkili toplam 69 adet LEP olayı tespit edilmiştir. Ayrıca HWU sinyalinde 10, HWV sinyalinde 3 ve ICV sinyalinde 1 adet olmak üzere toplam 14 adet olay E/F olarak tanımlanmıştır.

Yıldırım verilerinin hiç bulunmadığı zaman aralıklarında tespit edilen LEP olaylarının sebebi yıldırım kayıt sisteminin çalışmamasından veya LEP olayını oluşturan diğer mekanizmalardan kaynaklandığı kanaatindeyiz. Meteorage'den alınan yıldırım verileri ile ilişkili olmayan bu LEP olayları güney yarımkürede oluşan yıldırımların meydana getirdiği ıslık dalgalarının sebep olduğu geri saçılmalardan gelen enerjili parçacıkların yağışı olabilir. Bazı LEP olaylarına ise bulut içinde oluşan yıldırımlar sebep olabilir.

Her büyük şiddetli yıldırımın bir LEP olayı oluşturmadığı ve düşük şiddetli yıldırım boşalmalarının da LEP olayları oluşturabileceği tespit edilmiştir. Ayrıca, negatif bir boşalmanın da pozitif boşalmaya eşit bir LEP olayı oluşturabileceği bulunmuştur.

Yıldırım verisi tam olan ve sürekli sinyal alınan günlerde tespit edilen LEP olay sayıları karşılaştırıldığında aralarında doğru orantılı bir ilişki olduğunu söyleyebiliriz.

LEP olaylarının karakteristiklerinin incelendiği analizlerde, LEP olaylarının gecikme zamanlarının yaklaşık %96'sı 0.25-2.5 sn ve %4'ü de 2.5-3.2 sn zaman aralığında, oluşum zamanlarının yaklaşık %90'ı 0.5-3 sn ve %10'u da 3-5 sn sürelerinde, oluşum şiddetindeki değişim miktarlarının %89'u 0.5-7 dB, %6'sı 7-9.587 dB ve %5'i ise 0.175-0.5 dB büyüklüğünde ve geri dönüş zamanlarının yaklaşık %98'i 10–100 sn ve %2'si de 100-150 sn zaman aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

LEP olaylarına ait geçici karakteristikler arasındaki ilişki de korelasyon yöntemiyle incelenmiştir ve hesaplamalar sonucunda bu karakteristikler arasında herhangi bir bağlantının olmadığı tespit edilmiştir. Bu, her LEP olayının diğerinden bağımsız olduğu anlamına gelir.

LEP olayları jeomanyetik indeksler arasındaki ilişkilerin araştırıldığı üç aylık döneme ait analizlerde; bazı günler ortalama Kp indeksi ile LEP olay sayısı arasında bir ilişki olduğu tespit edilmiş, bazı günler ise bu ilişki tespit edilememiştir. Genellikle yıldırım sayısının

maksimum olduğu günlerde LEP olayı sayısındaki artış ile Kp indeksi arasında doğru orantılı ilişki olduğu tespit edilmiştir.

Avrupa sektöründe tespit edilen LEP olaylarının oluşumu ile Dst indeksi arasında bir ilişki olduğunu saptanmıştır. Dst indeksinin düşük olduğu günlerde LEP olay sayısında bir artış gözlenmemiştir.

İleride Yapılması Planlanan Çalışmalar

VLF sinyallerinin darband veri analizlerinde LEP olaylarını tespit etmek için kullanılan Eventdetector programı sinyallerdeki tüm değişmeleri LEP veya E/F olarak tanımlamaktadır. Bundan dolayı her sinyal daha fazla zaman harcanarak tekrar manuel olarak incelenmek zorunda kalınmaktadır. LEP olaylarını daha doğru ve kısa zamanda belirlemek amacıyla YSA (Yapay Sinir Ağları) ile modellenmesi düşünülmektedir.

Vericilerden aldığımız YSA yöntemi ile tespit edilecek LEP olaylarının Meteorage yıldırım verileri ile bağlantılı olanlarını tespit edecek yeni bir program yazılması gerekmektedir.

Daha uzun süreli veri analizi kullanarak sinyallerdeki LEP olayının sebep olduğu değişimlerden hareketle yıldırım şiddetini ve yerini tespit edebilmek amacıyla program geliştirmek.

Fırat Üniversitesinde kurulu olan VLF alıcı sisteminin donanım ve yazılım olarak geliştirilmesi.

KAYNAKLAR

1. Belrose, J.S., 1995, *"Fessenden and Marconi: Their differing technologies and transatlantic experiments during the first decade of this century"* 100 Years of Radio, Conference Publication 411, IEE, 32–43.

2. Barclay, L.W., 1995, *"Radiowave propagation: The basis of radiocommunication"* 100 Years of Radio, Conference Publication 411, IEE, 89–94.

3. Rodriguez, J.V., 1994, *"Modification of the Earth's ionosphere by Very-Low-Frequency transmitters"* Phd Thesis, Stanford University, Stanford.

4. Waynick, A.H., 1957, *"The present state of knowledge concerning the lower ionosphere"* Proceedings of the IRE, 741-749.

5. Budden, K.G., 1961, *"The wave-guide theory of wave propagation"* Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

6. Budden, K.G., 1962, *"The influence of the Earth's magnetic field on radio propagation by wave-guide modes"* Proc. R. Soc. Lond. A, Vol: 265, 538-553.

7. Wait, J.R., 1962, *"Electromagnetic waves in strafied media"* Pergamon Press, New York.

8. Galejs, J., 1972, *"Terrestrial propagation of long electromagnetic waves"* Pergamon Press, Oxford.

9. Carter, P.S., B everage, H.H., 1962, *"Early history of the antennas ad propagation field until the end of World War, part-I antennas"* Proceedings of the IRE, Vol:50, 679-682.

10. Green, A.L., 1974, *" Early history of the ionosphere"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:36, 2159–2166.

11. Appleton, E.V., 1927, *"The existence of more than one ionised layer in the upper atmosphere"* Nature, Vol:120, No:3018, 330.

12. Appleton, E.V., 1930, *"On some measurements of the equivalent height of the atmospheric ionised layer"* Proc. R. Soc. Lond. A., Vol:126, 542-569.

13. Hulburt, E.O., 1932, *"Ionisation in the upper ionosphere"* Nature, Vol:120, No:3014, 187.

14. Eckersley, T.L., 1925, *"The propagation of radio waves over the Earth"* Nature, Vol:115, No:2892, 496-497.

15. Ratcliffe, J.A., Farmer, F.T., 1935, *"A new test of the magneto-ionic theory"* Nature, 831-832.

16. Watt, A.D., 1967, *"VLF radio engineering"* Pergamon Press, Oxford.

17. Swanson, E.R., 1983, *"Omega"* Proceedings of the IEEE, Vol: 71, No:10, 1140-1155.

18. Ferguson, J.A., 1989, *"Long wave propagation model"* Military Communications Conference, 593-597, Boston.

19. Rasmussen, J.E., Kossey, P.A., Lewis, E.A., 1980, *"Evidence of an ionospheric reflecting layer below the classical D region"* J.Geophysical Research,Vol:85, No:A6, 3037-3044.

20. Kossey, P.A., Turtle, J.P., Pagliarulo, R.P., Klemetti, W.I., Rasmussen, J.E., 1983, *"VLF reflection properties of the normal and disturbed polar ionosphere in northern Greenland"* Radio Science, Vol:18, 907-916.

21. Özcan, O., Ünal, İ., Güzel, E., 2003, "*The integrated layer conductivities of the ionospheric E and F-region*" Balkan Physics Letters, Vol:11, No:3, 138-145.

22. Özcan, O., Aydoğdu, M., 1993, "*Altitudinal variations of the conductivity of the ionospheric plasma over Turkey*" Balkan Physics Letters, Vol:1, No:3, 65-71.

23. Babur Y., 1995, "*Çok düşük frekans bandında atmosferik gürültünün araştırılması"* Y.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.

24. Wait, J.R., 1964, "*The relation between VLF propagation and D-layer characteristics* " I.E.E.E. Transactions on Antennas and Propagation, 239-240.

25. Bracewell, R.N., Straker, T.W., 1949, *"Fidelity of sudden phase anomalies"* The Observatory, Vol:69, No:70, 143-145.

26. Johnson, M.P., 2000, "*VLF Imaging o f Lightning-Induced Ionospheric Disturbances"* Phd Thesis, Stanford University, Stanford.

27. Bostrom, C.O., Williams, D.J., 1998, "*The space environment*" APL Technical Digest, Vol:19, No:1, 43-52.

28. Cummer, S.A., Bell, T.F., Inan, U.S., Chenette, D.L., 1997, *"VLF remote sensing of high energy auroral particle precipitation"* J. Geophys. Research, Vol:102, No:A4, 7477–7484.

29. Inan, U.S., Lehtinen N.G., Lev-Tov S.J., Johson M.P., Bell, T.F., Hurley K., 1999, "*Ionization of lower ionosophere by gamma rays from a magneter: Detection of a low energy (3-10 keV) component"* Geophysical Research Letters, Vol:26, No:22, 3357-3360.

30. Inan, U.S., Slingeland. A., Pasko, V.P., 1996, *"VLF and LF signatures of mesospheric/lower ionospheric response of lightning discharges"* J. Geophysical Research, Vol:101, No:A3, 5219-5218.

31. Uman, M.A., 1987, *"The lightning discharge"* International Geophysics Series, Academic Press, Orlando.

32. Christian, H.J., 2003, "*Global lightning activity*" Proceedings of the 12th International Conference on Atmospheric Electricity, 9-13 June, Versailles,.

33. Christian, H.J., Blakeslee, R.J., Boccipio D.J., Boeck, W.L., Buechler, D.E., Driscoll, K.T., Goodman, S.J., Hall, J.M., Koshak, W.J., Mach, D.M., Stewart, M.F., 2003, *"Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector"* Preprints, J. Geophys. Res., Vol: 108, No:D1, 1-15.

34. Cummer, S.A., 1997, *"Lightning and ionospheric remote sensing using VLF/ELF radio atmospherics"* Phd Thesis, Stanford University, Stanford.

35. Cummer, S.A., Inan, U.S., Bell, T.F., 1998, *"Ionospheric D region remote sensing using VLF radio atmospherics"* Radio Science, Vol:33, No:6, 1781-1792.

36. Inan, U.S., Bell, T.F., Rodriquez, J.V., 1991, *"Heating and ionization of the lower ionosphere by lightning"* Geophysical Research Letters, Vol:18, No:4,705-708.

37. Inan, U.S., Pasko, V.P., Bell, T.F., 1996 *"Sustained heating of the ionosphere above thunderstorms as evidenced by early/fast VLF events"* Geophysical Research Letters, Vol:23, No:10, 1067-1070.

38. Pasko, V.P., Inan, U.S., Bell, T.F., 1996, *"Sprites as luminous columns of ionization produced by quasi-electrostatic thundercloud fields"* Geophysical Research Letters, Vol:23, No:6, 649-652.

39. Pasko, V.P., Inan, U.S., Bell, T.F., 1998, *"Ionospheric effects due to electrostatic thundercloud fields"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:60, 863-870.

40. Taranenko, Y.N., Inan, U.S., Bell, T.F., 1993, *"Interaction with lower ionosphere of electromagnetic pulses from lightning: Excitation of optical emissions"* Geophysical Research Letters, Vol:20, No:23, 2675-2678.

41. Inan U. S., Schafer D. C., Yip W. Y., Orville R. E., 1988, "*Subionospheric VLF signatures of nighttime D region perturbations in the vicinity of lightning discharges"* J.Geophysical Research, Vol. 93, No. A10, 11455–11472.

42. Mika, A., 2007, *"Very low frequency EM wave studies of transient luminous events in the lower ionosphere"* Phd Thesis, Crete University.

43. Inan, U.S., Inan, A.S., 1999, *"Engineering Electromagnetics"* Addison Wesley Longman.

44. Budden, K.G., 1985, *"The Propagation of Radio Waves"* Cambridge University Press, Cambridge.

45. Barr, R., Jones, D.L., Rodger, C.J., 2000, *"ELF and VLF radio waves"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:62, 1689-1718.

46. Inan, U.S., Inan, A.S., 2000, *"Electromagnetic waves"* Prentice Hall.

47. Inan, U.S., Carpenter, D.L., 1987, *"Lightning-induced electron precipitation events observed at L=2.4 as phase and amplitude perturbations on subionospheric VLF signals"* J. Geophysical Research, Vol:92, No:A4, 3293.

48. Poulsen, W.L., Bell, T.F., Inan, U.S., 1990, *"Three-dimensional modeling of subionospheric VLF propagation in the presence of localized D region perturbations associated with lightning"* J. Geophysical Research, Vol:95, No:A3, 2355-2366.

49. Güzel, E., 1998, "*İyonkürenin Isıl Özellikleri*" Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, , Elazığ.

50. Güzel, E., Aydoğdu, M., 2002, "*Üst iyonküredeki ısıl iletkenlik*" Fırat Üniv. Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, Vol:14, No:2, 65-71.

51. Ratcliffe, J.A., 1972, *"An Introduction to the Ionosphere and Magnetosphere"* Cambridge University Press, Cambridge.

52. Goldberg, R.A., 1989, *"Middle atmosphere electrodynamics"* International Council of Scientific Union, Middle Atmosphere Program, Vol:27, 178-185.

53. Danilov, A.D., 2000, *"New ideas on the D-region modelling"* Adv. Space Science, Vol:25, No:1, 5-14.

54. Davies, K., 1990, *"Ionospheric radio"* Peter Peregrinus Ltd., London.

55. Potemra, T.A., Zmuda, A.J., 1973, *"VLF propagation disturbances and electron precipitation at Mid-latitudes"* J. Geophysical Research, Vol:78, No:10, 1572-1580.

56. Deeks, D.G., 1966, *"D-region electron distributions in middle latitudes deduced from the reflexion of long radio waves"* Proc.R.Soc.Lond. A, Vol: 291, 413-437.

57. Kane, J.A., 1962, *"Re-evaluation of ionospheric electron densities and collision frequencies derived from rocket measurements of refractive index and attenuation"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:23, 338-347.

58. Belrose, J.S., Hatton, W.L., Mckerrow, C.A., Thain, R.S., 1959, *"The engineering of communication system for low radio frequencies"* Proceedings of IRE, 661-680.

59. Barr, R., Stubbe P., 1997, "*ELF and VLF wave generation by HF heating: A comparision of AM and CW techniques"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:59, No:18, 2265-2279.

60. Inan, U.S., 1990, *"VLF heating of the lower ionosphere"* Geophysical Research Letters, Vol:17, No:6, 729-732.

61. McRae, W.M., Thomson, N.R., 2000, "VLF phase and amplitude: daytime ionospheric parameters" J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:62, 609-618.

62. Poulsen, W.L., 1991, *"Modelling of very low frequency wave propagation and scattering within the Earth-ionosphere waveguide in the presence of lower ionospheric disturbances"* Phd. Thesis, Stanford university, Stanford, California.

63. Poulsen, W.L., Inan, U.S., Bell, T.F., 1993, *"A multiple-mode three-dimensional model of VLF propagation in the Earth-ionosphere waveguide in the presence of localized D region disturbances"* J. Geophysical Research, Vol:98, No:A2, 1705-1717.

64. Bilitza, D., 1997, *"International Reference Ionosphere-Status 1995/1996"* Adv. Space Research, Vol:20,No:9, 1751-1754.

65. Ratcliffe, J.A., 1959, *"The magneto-ionic theory and its applications to the ionosphere"* Cambridge University Press, Cambridge.

66. Schunk, R.W., 2000, *"Theoretical developments on the causes of ionospheric outflow"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:62, 399-420.

67. Stix, T.H., 1992, *"Waves in plasmas"* American Institute of Physics, New York.

68. Aydoğdu, M., Yeşil, A., Güzel, E., 2004, "*The group refractive indices of HF waves in the ionosphere and departure from the magnitude without collisions*" J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:66, 343-348.

69. Aydoğdu, M., Güzel, E., Yeşil, A., Ozcan, O., Canyılmaz, M., 2007, "Comparision of the calculated and the measured field strength of HF waves reflected from the ionosphere" II Nuova Cimento C, Vol:30, 243-253.

70. Bortnik, J., 2004, *"Precipitation of radiation belt electrons by lightning-generated magnetospherically reflecting whistler waves"* Phd. Thesis, Stanford University.

71. Dungey, J.W., 1963, *"Loss of Van Allen electrons due to whistlers"* Planet. Space Science, Vol:11, 591-595.

72. Carpenter, D.L., 1963, *"Whistler evidence of a `knee' in the magnetospheric ionization density profile"* J.Geophysical Research, Vol:68, No:6, 1675-1682.

73. Guyodo, Y., Valet, J., 1999, *"Global changes in intensity of Earth's magnetic field during the past 800 kyr"* Nature, Vol:399, 249-252.

74. Tsyganenko, N.A., 2002, *"A model of the near magnetosphere with a dawn-dusk asymmetry 1.Mathematical structure"* J.Geophysical Research, Vol:107, No:A8, 1-17.

75. Van Allen, J.A., 1965, *"Some general aspects of geomagnetically trapped radiation"* Adv. Study Institute on Radiation Trapped in the Earth's Magnetic Field, Bergen,Norway.

76. Lauben, D.S., Inan, U.S., Bell, T.F., 2001, *"Precipitation of radiation belt electrons induced by obliquely propagating lightning-generated whistlers"* J.Geophysical Research, Vol:106, No:A12, 29745-29770.

77. Hess, W.N., Bloom, S., Mann, L., Seward, F., West, H.I., 1962, "*Electron loss rate from the outer radiation belt"* The Cospar Meeting, May.

78. Uman, M.A., 1984, "*Lightning"* Dover Publications.

79. Peter, W.B., 2007, *"Quantitative measurement of lightning-induced electron precipitation using VLF remote sensing"* Phd. Thesis, Stanford University.

80. Saunders,C.R.P., 1992, *"A review of thunderstorm electrification process"* J. Applied Meteorology. Vol:32, 642-655.

81. Voss, H.D., Imhof W.L., Walt, M., Mobilia J., Gaines E.E., Reagan J.B.,. Inan U.S, Helliwell R.A., Carpenter D.L., Katsufrakis J.P., Chang H.C., 1984, *"Lightning-induced electron precipitation"* Nature, Vol:312, No:5996, 740-742.

82. Burgess, W.C., Inan U.S., 1993, "The role of ducted whistlers in the precipitation loss and equilibrium flux of radiation belt electrons" J.Geophysical Research, Vol:98, No:A9, 15643-15665.

83. http://www.adhunikpowersystems.info/concept.html

84. http://www.stormchasing.nl/lightning.html

85. http://www. lightningwizzard.html

86. http://www.mark-stanley.com/dissertation/main.html

87. Suszcynsky, D.M., Kirkland, M.W., Jacobsen, A.R., Franz, R. C., Knox, S.O., Guillen, J.L.L., Green, J.l*.,* 1993, *"FORTE observations of simultaneous VHF and optical emissions from lightning: Basic phenomenology"* J.Geophys. Res., Vol:105, No:D2, 2191-2201.

88. Füllekrug, M., Constable, S., 2000, *"Global triangulation of intense lightning discharge"* J. Geophysical Research, Vol:27, No:3, 333–336.

89. Takahashi, Y., Miyasato, R., Adachi, T., Adachi, K., Sera, M., Uchida, A., Fukunishi, H., 2003, *"Activities of sprites and elves in the winter season, Japan"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:65, 551-560.

90. Hardman, S. F., Rodger, C. J., Dowden, R. L., Brundell, J. B., 1998, *"Measurements of the VLF scattering pattern of the structured plasma of red sprites"* IEEE Antennas&Propagation Magazine, Vol:40, No:2, 29-38.

91. Wescott, E. M., Sentman, D. D., Heavner, M. J., Hampton, D. L., Lyons, W.A., Nelson, T. , 1998, *"Observations of columniform sprites"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:60, 733-740.

92. Inan, U.S., Bell, T.F., Pasko, V.P., Sentman, D. D., Wescott, E. M., Lyons, W.A., 1995, *"VLF signatures of ionospheric disturbances associated with sprites"* Geophysical Research Letters, Vol:22, No:24, 3461-3464.

93. Bering,E.A., Benbrook, J.R., Garret, J.A., Paredes, A.M., Wescott, E. M., Moudry, D.R., Sentman, D. D., Stenbaek-Nielson, H.C., Lyons, W.A., 2002, *"Sprite and elve electrodynamics"* Adv. Space Research, Vol: 30, No:11, 2585-2595.

94. Neubert, T., Allin, T. H., Blanc, E., Farges, T., Haldoupis, C., Mika, A., Soula, S., Knutsson, L., Van der Velde, O., Marshall, R. A., Inan, U., S´atori, G., B´or, J., Hughes, A., Collier, A., Laursen, S., and Rasmussen, I. L., 2005, *"Co-ordinated observations of transient luminous events during the EuroSprite2003 campaign"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:67, 807-820.

95. Neubert, T., 2003, *"On sprites and their exotic kin"*, Science, Vol:300, 747–749.

96. Wescott, E. M., Sentman, D., Osborne, D., Hampton, D.,Heavner, M., 1995, "*Preliminary results from the Sprite94 aircraft campaign: 2. Blue jets",* Geophysical Research Letters, Vol:22, No:10, 1209–1212.

97. Gerken, E.A., 2003, *"Telescopic imaging of streamer and diffuse glow dynamics in sprites"* Phd. Thesis, Stanford University.

98. Cummer, S. A., Jaugey, N., Li, J., Lyons, W. A., Nelson, T. E., Gerken, E. A., 2006, *"Submillisecond imaging of sprite development and structure"* Geophysical Research Letters, Vol:33, No:L04104, 1-4.

99. Gerken, E. A., Inan, U. S.,Barrington-Leigh, C. P., 2000, *"Telescopic imaging of sprites"*, Geophysical Research Letters, Vol:27, No:17, 2637–2640.

100. Fukunishi, H., Takahashi, Y., Kubota, M., Sakanoi, K., Inan, U. S., Lyons, W. A., 1996, *"Elves: Lightning-induced transient luminous events in the lower ionosphere"* Geophysical Research Letters, Vol:23, No:16, 2157–2160.

101. Barrington-Leigh, C. P., Inan, U. S., Stanley, M.,Cummer, S. A., 1999,*"Sprites triggered by negative lightning discharges"* Geophysical Research Letters, Vol:26, No:24, 3605–3608.

102. Moudry, D. R., Stenbaek-Nielsen, H. C., Sentman, D. D., Wescott, E. M., 2003, "*Imaging of elves,halos and sprite initiation at 1 ms time resolution"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:65, 509-518.

103. Barrington-Leigh, C. P., Inan, U. S.,Stanley, M., 2001, *"Identification of sprites and elves with intensified video and broadband array photometry"* J.Geophysical Research, Vol:106, No:A2, 1741–1750.

104. Inan, U.S., Rodriquez, J.V., Idone, V.P., 1993, *"VLF signatures of lightning-induced heating and ionization of the nighttime D region"* Geophysical Research Letters, Vol:20, No:21, 2355-2358.

105. Rodger, C.J., Wait, J.R., Dowden, R.L., 1998, *"VLF scattering from red sprites-theory"* J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:60, 755-763.

106. Inan, U.S., Marshall, R.A., 2005, *"High-speed telescopic imaging of sprites"* Geophysical Research Letters, Vol:32, No:L05804, 1-4.

107. Poulsen, W.L., Bell, T.F., Inan, U.S., 1993, *"The scattering of VLF waves by localized ionospheric disturbances produced by lightning-induced electron precipitation"* J. Geophysical Research, Vol:98, No:A9, 15553-15559.

108. Chen, J., Inan, U.S., Bell, T.F., 1996, *"VLF strip holographic imaging of lightning-associated ionospheric disturbances"* Radio Science, Vol:31, No:2, 335-348.

109. Johnson, M.P., Inan, U.S., Lev-Tov, S.J., Bell, T.F., 1999, *"Scattering pattern of lightning-induced ionospheric disturbances associated with Early/Fast VLF events"* Geophysical Research Letters, Vol:26, No:15, 2363-2366.

110. Helliwell,R.A., Katsufrakis, J.P., Trimpi, M.L., 1973, *"Whistler-induced amplitude perturbation in VLF propagation"* J. Geophysical Research, Vol:78, No:22, 4679-4688.

111. Voss, H.D., Walt, M., Imhof, W.L., Mobilia, J., Inan, U.S., 1998, *"Satellite observations of lightning-induced electron precipitation"* J. Geophysical Research, Vol:103, No:A6, 11725-11744.

112. Inan, U.S., Bell, T.F., 1991, *"Pitch angle scattering of energetic particles by oblique Whistler waves"* Geophysical Research Letters, Vol:18, No:1, 49-52.

113. Peter, W.B., Inan, U.S., 2004, *"On the occurence and spatial extent of electron precipitation induced by oblique nonducted Whistler waves* J. Geophysical Research, Vol:109, No:A12215, 1-17.

114. Helliwell,R.A., 1965, *"Whistlers and related ionospheric phenomena"* Stanford University, Stanford University Press.

115. Angerami, J.J., 1970, *"Whistler duct properties deduced from VLF observations made with the Ogo 3 satellite near the magnetic equator"* J. Geophysical Research, Vol:75, No:31, 6115-6135.

116. Edgar, B.C., 1976, *"The upper and lower frequency cutoffs of magnetospherically reflected whistlers"* J. Geophysical Research, Vol:81, N0:205, 1640-1646.

117. Gurnett, D.A., Inan, U.S., 1988, *"Plasma wave observations with the Dynamics Explorer 1 spacecraft"* Reviews of Geophysics, Vol:26, No:2, 285-316.

118. Inan, U.S., Bell, T.F., Helliwell,R.A., 1978, *"Nonlinear pitch angle scattering of energetic electrons by coherent VLF waves in the magnetosphere"* J. Geophysical Research, Vol:83, No:A7, 3235-3253.

119. Inan, U.S., Carpenter, D.L., Helliwell,R.A., Katsufrakis, J.P., 1985, *"Subionospheric VLF/LF phase perturbations produced by lightning-whistler induced particle precipitation"* J. Geophysical Research, Vol:90, No:A8, 7457-7469.

120. Johnson, M.P., Inan, U.S., Lauben, D.S., 1999, *"Subionospheric VLF signatures of oblique (nonducted) whistler-induced precipitation"* Geophysical Research Letters, Vol:26, No:23, 3569-3572.

121. Inan, U.S., Knifsend, F.A., Oh, J., 1990, *"Subionospheric VLF imaging of lightning-induced electron precipitation from the magnetosphere"* J. Geophysical Research, Vol:95, No:A10, 17217-17231.

122. Lauben, D.S., Inan, U.S., Bell, T.F., 1999, *"Poleward-displaced electron precipitation from lightning-generated oblique whistlers"* Geophysical Research Letters, Vol:26, No:16, 2633-2636.

123. Cohen M., 2004, "*2005 VLF Receiver Documentation*" STAR Laboratory VLF Group, Stanford University.

124. Rodger, C. J., 2003, "*Subionospheric VLF perturbations associated with lightning discharges*" J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:65, 591-606.

125. http://www.bbc.co.uk/…/05/anthorn_masts_470x353.jpg

126. Murphy, M. J., Demetriades, N.W.S., Holle, R.L., Cummins, K. L., 2005, "*Overview of capabilities and performance of the U.S. National Lightning Detection Network*" Second Conference on Meteorological Applications of Lightning Data, J2.5.

127. http://www.meteorologie.eu.org/RDT/doc/SAF-NWC-MFCNRM-SCI-MTR-001.pdf

128. Cummins, K. L., Krider, E.P., Malone, M.D., 1998, "*The U.S. National Lightning Detection Network TM and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities*" IEE Transactions an the Electromagnetic Compatibility, Vol:40, No:4, 465-480.

129. Mika, A., Haldoupis, C., Marshall, R.A., Neubert, T., Inan, U.S., 2005, "*Subionospheric VLF signatures and their association with sprites observed during EuroSprite-2003*" J.Atmospheric&Solar-Terrestrial Physics, Vol:67, 1580-1597.

130. Inan, U.S., Chang, H.C., Helliwell, R.A., Imhof, W.L., Reagan, J.B., Walt, M., 1985, "*Precipitation of radiation belt electrons by man-made-waves- a comparison between theory and measurement*" J. Geophysical Research, Vol:90, No:A1, 359-369.

131. Inan, U.S., Wolf,T.G., Carpenter, D.L., 1988, "*Geographic distribution of lightning-induced electron precipitation observed as VLF/LF perturbation events*" J. Geophysical Research, Vol:93, No:A9, 9841-9853.

132. Inan, U.S., Walt, M., Voss, H., Wolf,T.G., Imhof, W.L., 1989, "*Energy spectra and pitch angle distrubition of lightning-induced electron precipitation: analysis of an event observed on the S81-1 (SEEP) satellite*" J. Geophysical Research, Vol:94, No:A2, 1379-1401.

133. Peter, W.B., Inan, U.S., 2007, "*A quantitative comparison of lightning-induced electron precipitation and VLF signal perturbations*" J. Geophysical Research, Vol:112, No:A12212, 1-20.

134. Karagöz, M., 2006, "*İstatistik Yöntemleri*" Ekin Kitabevi Yayınları, Bursa.

135. http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/niemegk/kp_index/description.html

136. http://www.swpc.noaa.gov/info/Kindex.html

137. http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/niemegk/kp_index/description.html

138. http://www.gfz-potsdam.de/pb2/pb23/niemegk/kp_index/apdescription.html

139. http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html

140. Carpenter, D.L., LaBelle, J.W., 1982, "*A study of whistlers correlated with bursts of electron precipitation near L=2*" J. Geophysical Research, Vol:87, No:A6, 4427-4434.

141. Leyser,T.,Inan, U.S., Carpenter, D.L., Trimpi, M.L., 1984, "*Diurnal variation of bursts precipitation effects on subionospheric VLF/LF signal propagation near L=2*" J. Geophysical Research, Vol:89, No:A10, 9139-9143.

142. http://sprg.ssl.berkeley.edu/dst_index/Dst_index.html

143. http://www.oulu.fi/~spaceweb/textbook/indices.html

144. http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html

ÖZGEÇMİŞ

Uzman Murat CANYILMAZ

Fırat Üniversitesi
Fen-Edebiyat Fakültesi
Fizik Bölümü
23169, ELAZIĞ

Tel: (424) 2370000 / 3560
Faks: (424) 2330062
e-posta: mcanyilmaz@firat.edu.tr

Kişisel Bilgiler:

Doğum Tarihi	: 22.06.1971
Doğum Yeri	: Elazığ
Uyruğu	: T.C.
Medeni Hali	: Evli

Eğitim:

İlköğretim:

1977–1982 Atatürk İlköğretim Okulu (Elazığ)

Lise:

1982–1989 Elazığ Anadolu Lisesi (Elazığ)

Lisans:

1989–1994 Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Müh. Bölümü, Elazığ

Yüksek Lisans:

1998–2001 Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ

Tez: Plazma İçindeki Alfven Dalgaları

Danışman: Prof.Dr. Mehmet AYDOĞDU