T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOMANYETİK FIRTINALARA İYONOSFERİN TEPKİSİ

Ceren BAYHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Fizik Programı

Danışman

Doç. Dr. Zehra CAN

Mart, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

JEOMANYETİK FIRTINALARA İYONOSFERİN TEPKİSİ

Ceren BAYHAN tarafından hazırlanan tez çalışması 01.03.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı, Fizik Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Zehra CAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Zehra CAN, Danışman

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Oya OĞUZ, Üye

Haliç Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üye. Macide CANTÜRK RODOP, Üye

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Zehra CAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Jeomanyetik Fırtınalara İyonosferin Tepkisi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Ceren BAYHAN

İmza

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü' nün 5624 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

TEŞEKKÜR

Yıllar boyunca ciddi bir emek ve özveri ile hazırladığım yüksek lisans tezimi tamamlamanın heyecanını ve gururunu yaşıyorum. Bu bölümü bana yardımlarını esirgememiş ve teşvik etmiş insanlara teşekkür etmek için bir fırsat olarak kullanacağım.

Öncelikle danışmanlığımı üstlenen, konu seçiminden araştırmanın yürütülmesine dek beni sınırlamayıp, özgün bırakan, yüksek lisans öğrencisinin yeterliğini göstermesine olanak tanıyan hocam Doç. Dr. Zehra CAN danışmanlığı için çok teşekkür ediyorum.

Tez savunmamda yer alarak değerli görüşleri ile araştırmanın şekillenmesini sağlayan hocalarıma teşekkür ederim.

Hayatım boyunca beni destekleyen, haklarını asla ödeyemeyeceğim annem ve babama teşekkürlerimi sunarım.

Ceren BAYHAN

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iv
İÇİNDEKİLER v
KISALTMA LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ x
ÖZET xi
ABSTRACT xiii
GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti…… 1
1.2 Tezin Amacı……... 8
1.3 Hipotez……... 9
GÜNEŞ 11
2.1 Güneş'in Yapısı……11
2.2 Güneş Rüzgârı……..13
2.3 Güneş Döngüsü…… 14
2.4 Güneş Radyo Akısı (F10.7cm)……15
İYONOSFER 17
3.1 Atmosfer……...17
3.2 İyonosfer……...18
3.3 İyonosfer 'in Yapısı……..19
3.3.1 İyonosfer 'in Coğrafi Yapısı……..21
MANYETOSFER 23
4.1 Manyetosfer'in Yapısı……..23
4.2 Chapman Tabakası……... 27
JEOMANYETİK FIRTINA 28
5.1 Jeomanyetik Fırtına Oluşumu…….. 28
5.2 Dst İndeks…… 29
5.3 Kp İndeks…… 31
5.4 Gezegenlerarası Manyetik Alan……... 32
5.5 Auroral Elektrojet (AE)……33

İYONOSFERİK FIRTINALAR 35
6.1 İyonosferik Fırtına Oluşumu…… 35
6.2 İyonosferik Fırtınaların Evreleri…….. 41
6.2.1 Pozitif Aşama…… 41
6.2.2 Negatif Aşama……... 41
6.2.3 Kurtarma Aşaması…… 41
İYONOSFERİK FIRTINA İNCELEME YÖNTEMLERİ 44
7.1 Yöntemler……44
7.2 GPS Yöntemi……44
7.3 İyonosfer İncelemesi için Yer Merkezli Teknikler…….. 47
7.4 İyonosferik Parametreler…….. 49
DATA VE METODOLOJİ 51
ELDE EDİLEN SONUÇLAR 59
SONUÇ 91
KAYNAKÇA 95
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 109

KISALTMA LİSTESİ

AE	Geomagnetic Auroral Electrojet
B	Geomagnetic Field
CIR	Corotating Interaction Regions
CME	Coronal Mass Ejection
Dst	Disturbance Storm Time
E	Electric Field
EIA	Equatorial Ionization Anomaly
EUV	Extreme Ultraviolet Ray
f0F2	F2 Layer Critical Frequency
F10.7	The 10.7 cm solar radio flux
GIRO	Global Ionosphere Radıo Observatory
GPS	Global Positioning System
HF	High Frequency
hmF2	Peak Height F2 Layer
IRI	International Reference Ionosphere
IS	Inconsistent Scatter
Kp	Planetary K- index
NmF2	Peak Electron Density of the F Region
Np	Proton Density
P	Flow Pressure
SF	Solar Flare
T	Proton Temperature
TEC	Total Electron Content
TECU	Total Electron Content Unit
TID	Traveling Ionospheric Disturbances
UV	Ultraviolet Ray
V	Flow Speed

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Güneş'in katmanları 11
Şekil 2.2 Güneş'teki manyetik yapıların ve koronal kütle atımının temsili 13
Şekil 2.3 Tahmin edilen ve gerçekleşen Güneş leke sayısı grafiği.....15
Şekil 3.1 Atmosfer bölümleri 17
Şekil 3.2 İyonosfer'in yapısı.....19
Şekil 3.3 İyonosferik elektron yoğunluğunun yüksekliğe bağlı değişimi 20
Şekil 3.4 İyonosfer bölgeleri 21
Şekil 4.1 Manyetosfer yapısı ve katmanları 23
Şekil 4.2 Yer'in manyetosferi ve karakteristik bölgeleri 25
Şekil 4.3 Van Allen radyasyon kuşakları 25
Şekil 5.1 Manyetosfer ile etkileşime giren güneş rüzgârı parçacıkları 29
Şekil 5.2 Kasım 2023 jeomanyetik aktivite değişim grafiği 31
Şekil 5.3 Helyosferik manyetik alanın Bx, By ve Bz bileşenleri.....33
Şekil 5.4 AU, AL, AO, AZ, AE arasındaki ilişkilerin gösterimi.....34
Şekil 6.1 Orta enlemlerde pozitif iyonosferik fırtınaların oluşumuna katkıda bulunan mekanizmalar 37
Şekil 6.2 Pozitif iyonosferik fırtına gösterimi 38
Şekil 6.3 Pozitif ve negatif iyonosferik fırtınalar 40
Şekil 7.1 GPS uydularının dağılımı 45
Şekil 7.2 Toplam elektron içeriğinin grafiksel gösterimi.....46
Şekil 7.3 İyonosonda modları.....48
Şekil 8.1 Program ekranı.....52
Şekil 8.2 Örnek veri seti.....55
Şekil 8.3 Örnek veri seti.....55
Şekil 8.4 Veri seti özeti 56
Şekil 8.5 Test verisi modeli.....56
Şekil 8.6 Test verisi modeli.....57
Şekil 8.7 Test verisi ROC eğrisi 58
Şekil 8.8 Eğitim verisi ROC eğrisi 58
Şekil 9.1 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği 67
Şekil 9.2 07.07.2022 Roquetes istasyon TEC değişimi 68
Şekil 9.3 02.07.2022-12.07.2022 TEC anomali grafiği 68

Şekil 9.4 07.07.2022 İyonosferik fırtına değişim grafiği 69

Şekil 9.5 07.07.2022 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)f0$F2$, (b)hm$F2$, (c)Nm$F2$.....70

Şekil 9.6 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği 71

Şekil 9.7 20.05.2023 Dourbes istasyon TEC değişimi.....72

Şekil 9.8 15.05.2022-25.05.2022 TEC anomali grafiği 73

Şekil 9.9 20.05.2023 İyonosferik fırtına değişim grafiği 74

Şekil 9.10 20.05.2023 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)f0$F2$, (b)Nm$F2$, (c)hm$F2$ 75

Şekil 9.11 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği 76

Şekil 9.12 04.11.2021 Roma istasyon TEC değişimi 77

Şekil 9.13 30.10.2021-09.11.2021 TEC anomali grafiği 78

Şekil 9.14 04.11.2021 İyonosferik fırtına değişim grafiği 79

Şekil 9.15 04.11.2021 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)f0$F2$, (b)hm$F2$, (c)Nm$F2$ 80

Şekil 9.16 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği 81

Şekil 9.17 12.05.2021 Chilton istasyon TEC değişimi 82

Şekil 9.18 07.05.2021-17.05.2021 TEC anomali grafiği 82

Şekil 9.19 12.05.2021 İyonosferik fırtına değişim grafiği 83

Şekil 9.20 12.05.2021 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)f0$F2$, (b)hm$F2$, (c)Nm$F2$ 84

Şekil 9.21 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği 85

Şekil 9.22 16.06.2023 Pruhonice istasyon TEC değişimi 86

Şekil 9.23 11.06.2023-21.06.2023 TEC anomali grafiği 86

Şekil 9.24 16.06.2023 İyonosferik fırtına değişim grafiği 87

Şekil 9.25 16.06.2023 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)Nm$F2$, (b)f0$F2$, (c)hm$F2$.....88

Şekil 10.1 Jeomanyetik fırtınalar sırasında bulunan iyonosferik bozukluk türleri 94

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 F10.7cm indeks değerleri 16
Tablo 5.1 Dst indeks değerleri 30
Tablo 5.2 Kp indeks değerleri 31
Tablo 8.1 İstasyon bilgileri 52
Tablo 9.1 Jeomanyetik fırtına listesi.....59
Tablo 9.2 İyonosferik fırtına ve jeomanyetik fırtına köken kıyaslama tablosu ...90

ÖZET

JEOMANYETİK FIRTINALARA İYONOSFERİN TEPKİSİ

Ceren BAYHAN

Fizik Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Zehra CAN

Doğal bir plazma olan iyonosfer, yeryüzünden yaklaşık 60 km ila 1100 km yükseklikte bulunan, Güneş kaynaklı ışınımlar nedeni ile iyonize olmuş gazlardan oluşan ve radyo dalga yayılımı açısından oldukça önemli bir atmosfer tabakasıdır. İyonosfer tabakası coğrafi konum, gece-gündüz, mevsim, güneş aktivite, jeomanyetik fırtına, deprem gibi etmenlere bağlı olarak değişim göstermekte, bu sebeple iyonosfer modellemesi yapılırken bu etkilerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu tez çalışması jeomanyetik fırtınalar nedeniyle iyonosferde meydana gelen iyonosferik fırtınalar üzerine kurulmuştur. Jeomanyetik fırtına, genellikle gezegenlerarası manyetik alandaki anormal koşullar ve çeşitli güneş aktivitelerinin neden olduğu güneş rüzgârı plazma emisyonları nedeniyle Dünya'nın manyetik alanında küresel bir bozulmadır. Bu çalışmada, 25. Güneş döngüsünün başlangıcından itibaren dört yılı kapsayacak olan zaman diliminde meydana gelen ve jeomanyetik aktivitenin önemini belirtmek için beş seviyeli bir sistem olan G ölçeğine göre belirlenen jeomanyetik fırtınaların dağılımı incelenmiştir. Çalışmanın ilk amacı güneş rüzgârı parametrelerinin (B_z, F10.7) ve jeomanyetik indislerin (Dst, Kp) fırtınaya olan etkisini açıklamak için çalışmada istatistiksel bir model olan regresyon modeli kurulmuştur. Ayrıca jeomanyetik fırtınaların orta enlem bölgesi kapsamında iyonosferde yarattığı pozitif ve negatif

iyonosferik fırtına değişimlerini görmek için GIRO (Global Ionosphere Radio Observatory) iyonogram verileri kullanılarak elde edilen iyonosferin F2 bölgesindeki toplam elektron içeriği (TEC) verileri üzerinde çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar istatistiksel metodu kullanılmıştır. Avrupa bölgesindeki iyonosferik değişimler incelenerek, TEC'deki ani değişimler saptanarak, iyonosferik fırtınalar tespit edilmiştir. Bu fırtınaların uzay havasına olan etkisi incelenip jeomanyetik fırtına ve iyonosferik değişim arasındaki ilişki ortaya konmuştur.

Anahtar Kelimeler: İyonosfer, Jeomanyetik Fırtına, İyonosferik Fırtına

ABSTRACT

THE RESPONSE OF THE IONOSPHERE TO GEOMAGNETIC STORMS

Ceren BAYHAN

Department of physics

Master of Science Thesis

Supervisor: Ass. Dr. Zehra CAN

The ionosphere, which is a natural plasma, is a very important atmospheric layer in terms of radio wave propagation, located at an altitude of about 60 km to 1100 km from the earth, consisting of ionized gases due to solar radiation. The ionosphere layer changes depending on factors such as geographical location, day and night, season, solar activity, geomagnetic storm, earthquake, therefore these effects should be taken into consideration while modeling the ionosphere. This thesis is based on geomagnetic storms that cause the change of the ionosphere. A geomagnetic storm is a global disturbance in the Earth's magnetic field, usually due to abnormal conditions in the interplanetary magnetic field and solar wind plasma emissions caused by various solar activities. In this study, the distribution of geomagnetic storms occurring in the time period that will cover four years from the beginning of the 25th solar cycle and determined according to the G scale, which is a five-level system to indicate the severity of geomagnetic activity, was investigated. The first aim of the study is to explain the relationship of solar wind parameters (B, F10.7) with the geomagnetic index (Dst,Kp). For this, the regression model was used in the study.

In addition, a quarter-aperture-based sliding median statistical method was used on the total electron content (TEC) data in the F2 region of the ionosphere

obtained by using GIRO (Global Ionosphere Radio Observatory) ionogram data to see the positive and negative changes in the ionosphere within the mid-latitude region of geomagnetic storms. Thanks to this method, changes in the ionosphere at stations in the European region were observed, sudden changes in TEC were detected and ionospheric storms were detected. The origins of the detected negative and positive ionospheric storms were investigated. These results contribute to the modeling of geomagnetic storms and ionospheric storms for many geomagnetic storm-ionosphere studies in the literature.

Keywords: Ionosphere, Geomagnetic Storm, Ionospheric Storm

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Uzay havası terimi Dünya'ya yakın uzayda ve Dünya atmosferinin üst kısmında güneş rüzgârı ve güneş patlamalarının neden olduğu olayları ifade eder. Bu olaylar genellikle Güneş'in manyetik alanındaki karmaşık etkileşimler sonucu ortaya çıkar. Jeomanyetik fırtınalar, iyonosfer, iyonosferik fırtınalar dahil olmak üzere çeşitli kavramlar uzay havası ile ilişkilidir. Uzay havasının anlaşılması ve jeomanyetik fırtına-iyonosfer arasındaki ilişkinin öneminin vurgulanması için birçok bilim insanı uzun yıllardır çalışmalar yapmaktadır.

[1,2]'ye göre bir jeomanyetik fırtına genellikle, plazma yoğun dinamik yapıya sahip Güneş'ten kopan proton ve elektron yüklü parçacıkların, güneş rüzgârı vasıtasıyla dünyanın manyetik alanının yönünde ve büyüklüğünde önemli değişiklikler yapması ile başlar.

[3] iyonosferin 60 km-1000 km arasında değişim gösteren ve içerisinde çok sayıda serbest halde elektron bulunduran tabaka olduğunu söyler. Bu tabaka kendi içerisinde farklı katmanlara ayrılmaktadır. Genel olarak D, E ve F (F_1, F_2) olarak isimlendirilen bu katmanların her biri gün içerisinde farklı davranış sergilemektedir. Bu katmanların içerisinde iyonosfer modellemesi yapılırken dikkate alınan katmanın F_2 olduğu söylenir.

İyonosfer tabakası coğrafi konum, gece-gündüz, mevsim, solar aktivite, jeomanyetik fırtına, deprem gibi etmenlere bağlı olarak değişim göstermekte, bu sebeple iyonosfer modellemesi yapılırken bu etkilerin göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Bu etkilerden biri olan jeomanyetik fırtınalar haberleşme ve navigasyon sistemlerini etkilemektedir. Jeomanyetik fırtınanın oluş biçimi ve iyonosfer tabakası üzerinde yarattığı düzensizliklerin net olarak belirlenmesi oldukça önemlidir. Bu zamana kadar yapılan deneysel ve teorik çalışmalar sayesinde jeomanyetik fırtına kaynaklı iyonosferik bozulmaların anlaşılabilmesi adına önemli çalışmalar yapılmıştır.

[4]’e göre İyonosfer-termosferin tek bir sistem olduğunun altı çizilmelidir. Jeomanyetik fırtına sırasında, yüksek enlemlerdeki enerji girişi atmosferin üst katmanını etkileyerek termosferik rüzgâr ve bileşimde değişikliklere neden olur. Jeomanyetik aktivitedeki artışla ilişkili iyonosferik değişimlerin yanı sıra, sakin jeomanyetik koşullar altında meydana gelen ve büyüklüğü orta dereceli fırtına etkileriyle karşılaştırılabilecek iyonosferik değişimlerde vardır.

[5] çalışmalarında ani bir başlangıç fazı, ana faz ve iyileşme fazı olmak üzere üç evreli jeomanyetik fırtınalarda, ilk tetiklemenin basınçta ani bir artışla ilgili olduğunu söyler. Dinamik basınçtaki bu ani artış, güneş rüzgârı ile gezegenlerarası ortama doğru hidrodinamik şoklar meydana getirir.

[6,7,8]’e göre bir jeomanyetik fırtına, Dünya'nın manyetik alanında dalgalanmalara ve bozulmalara neden olur. Bu dalgalanmalar, manyetosferin içindeki elektrik akımlarının değişmesine ve manyetik alanda ani değişikliklere yol açar. Jeomanyetik fırtınalar genellikle Güneş’ten gelen koronal kütle atımları (CME'ler) ile ilişkilidir. Bu parçacıkların Dünyanın manyetik alanı ile etkileşime girerek manyetosfer ve iyonosferde değişimlere neden olduğunu söylerler.

[9]’a göre CME'nin gelişi ani bir darbeye neden olmadı ve yerdeki manyetometreler tarafından yakalanmadı. Bununla birlikte, neredeyse fark edilmeden gelmesine rağmen, CME manyetosfer, iyonosfer ve termosferde büyük rahatsızlıkları tetikledi.

[10]’a göre dinamik bir yapıya sahip olan CME, F10.7 cm güneş akısı değerini değiştirme yeteneğine sahiptir. [11,12,13,14] CME patlaması sırasında, çok yüksek hızlara sahip plazma bulutları hareketleri ile manyetosferi etkileyen manyetik aktivite indekslerini yönetir. Jeomanyetik fırtınanın etkilerinin AE (auroral electrojet) ve Dst (Disturbance Storm Time) gibi indislerle tespit edildiğini söylerler.

Genellikle "İyonosferik fırtınalar" olarak adlandırılan jeomanyetik fırtınalardan kaynaklanan iyonosferik karışıklıklar, son derece çeşitlidir. Fırtına iyonosferi küresel olarak etkiler ve farklı mekansal ve zamansal ölçeklerde karışıklıklara neden olur.

İyonosferik fırtınalar genellikle jeomanyetik fırtınalarla birlikte gelir ve her ikisi de birbirini etkiler. Jeomanyetik alt fırtınalar, gezegenlerarası manyetik alanın

(IMF) değişkenliği tarafından tetiklenen manyetosferin kuyruğundaki plazma kararsızlıkları tarafından yükseltilir [15].

IMF'nin (B_Z) dikey yönünün, jeomanyetik alanla bağlantının düzeyini ve etkinliğini belirlemede kritik olduğu ve dolayısıyla jeomanyetik aktivitede önemli Güneş girdisi parametresi olduğu konusunda genel bir kabul vardır.

Fırtına zamanı iyonosfer davranışı, sürücüler olarak bilinen, birbiriyle yarışan çeşitli dinamik ve elektrodinamik süreçler tarafından kontrol edilir. Manyetosferik kaynaklı elektrik alanlarının nüfuzu (yani, hızlı nüfuz eden elektrik alanları, PPEF), bozucu dinamo elektrik alanları ve iyonlar ile nötrler arasındaki etkileşim, iyonosferik bölgede artışlara (pozitif fırtınalar) veya azalmalara (negatif fırtınalar) neden olan ana faktörlerdir [16].

İyonosferik fırtınalar uzayın aşırı etkilerini gösterir. Uzun yıllar bu konu üzerine çalışan [17] iyonosfer üzerindeki jeomanyetik fırtına etkilerini iyonosferik istasyonlar tarafından ispat etmeye çalıştılar.

İyonosferin modellenmesi için literatürde bir grup bilim insanı iyonosonda verilerini kullanmıştır. İyonosonda verileri kullanarak [18] iyonosferde meydana gelen bozuklukları tespit etmiş ve gezici iyonosferik fırtınalar (TID) hakkında bilgi vermiştir. TID'ler [19,20]'ye göre dalga benzeri yayılan düzensizliklerdir.

İyonosferik fırtınalar 80 yılı aşkın bir süredir rapor edilmektedir. Ancak sayısız çabaya rağmen iyonosferik fırtınalar, doğru modelleme ve uzay hava durumu tahminleri için en büyük zorluk olmaya devam ediyor. Son yıllarda, endüstrinin artan ilgisi ve ölçümlerin daha kolay ulaşılabilir olması nedeniyle, fırtına koşulları sırasında iyonosferik parametreler üzerine yapılan çalışmaların sayısı önemli ölçüde arttı. İyonosferik fırtına özelliklerinin karakterinin çok karmaşık olduğu bulunmuştur [21,22]. Pozitif fırtına etkileri (sakin koşullara kıyasla elektron yoğunluğunun artması) ve negatif fırtına etkileri (sakin koşullara kıyasla elektron yoğunluğunun tükenmesi) mevcuttur ve genellikle birbirini takip eder.

Fırtına özelliklerinin yalnızca fırtına zamanına değil, aynı zamanda konuma (jeomanyetik yerel saat ve enlem) ve mevsime de bağlı olduğu görülmektedir. Her ne kadar ortak bir ortalama davranış tespit edilse de tek bir fırtınanın ortalama davranıştan sapması hala büyük olabilir [23]. TEC en büyük gradyanlar ve iyonosferik değişimler genellikle pozitif iyonosferik fırtınalar sırasında ortaya

çıkar. Bu nedenle burada sunulan çalışmalar ve literatürdeki çalışmalar pozitif fırtına araştırmalarına odaklanmaktadır.

Bu çalışmalardan bazıları [24] tarafından 2006 yılında jeomanyetik fırtına kaynaklı elektron değişiminin pozitif ve negatif fırtına olarak kendini gösterdiği ispatlanmıştır.

[25] Avrupa'da iyonosferik tepkiyi incelediler ve jeomanyetik fırtınanın ana fazı sırasında orta ve alçak enlemlerde pozitif iyonosferik fırtınalar gözlemlediler. Çünkü ana faz evresinde oluşan maksimum TEC değerindeki ani artışlar pozitif fırtınaların meydana gelmesine sebep oldu.

Literatürde iyonosferde meydana gelen karmaşıklıkları incelemek ve jeomanyetik fırtına-iyonsofer ilişkisini ortaya atmak için özellikle [26,27,28,29,30] GPS ve iyonosonda verileri kullanmıştır. GPS verileri kullanılarak çeşitli bilim insanları tarafından iyonosfer hakkında önemli çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları şu şekilde özetlenebilir, [31] tarafından yapılan bir çalışmada iyonosferik TEC incelenmiş, [32] tarafından ise iyonosferik elektron yoğunluğu profilleri incelenmiştir. Büyük ölçekli iyonosferik düzensizlikler ise [33] tarafından araştırılmıştır.

Bir manyetik dalganın başlangıcından önceki günlerde iyonosferin F_2 katmanının frekansı, yüksekliği ve TEC'deki bozulmalar sonucunda meydana gelen bozukluklar zaten onlarca yıldır biliniyordu. Birçok yayın, iyonosferin bozukluklarının analizine adanmıştır. [34] bozulmaların hemen hemen her fırtınadan önce gözlemlendiğini söyler. Hatta [35,36] rahatsızlıkların yaklaşan manyetik fırtınanın habercisi olduğunu söyler. Diğer bazı yazarlar fırtına öncesi günlerdeki rahatsızlıkların yaklaşan fırtına ile ilgili olmadığı, ancak çeşitli süreçlerin; meteorolojik etkiler, manyetosfer iyonosfer etkileşimindeki değişimlerden dolayı iyonosferik parametrelerde sapmalar olduğunu söylerler.

[37]'ye göre gözlemsel iyonosferik parametreleri kullanarak iyonosferik aktiviteyi karakterize etmek için çeşitli girişimlerde bulunulmuştur. İyonosferin indekslerinden biri, aylık ortalama f0F_2 olarak tanımlanan aylık F_2 katmanı kritik frekans indeksidir (f0F_2). İndeks, iyonosferin uzun vadeli eğilimlerini araştırmak için kullanılır. Son yıllarda, iyonosferik bilgilerin kullanımının artmasıyla araştırmacılar, gerçek zamanlı olarak türetilebilecek iyonosferik indeksler

oluşturmaya çalıştılar. Örneğin, iyonosferik aktivite indeksi Bremer ve arkadaşları tarafından önerilmiştir.

[38] tarafından orta enlem Avrupa istasyonunda elde edilen 13 yıllık verileri kullandılar ve iyonosferik fırtınaların mevsimsel bağımlılığını araştırdılar.

[39] ise gezici iyonosferik bozucu (TID), iyonosferik rahatsızlıklar gibi olayları karakterize eden iyonosferin davranışında meydana gelen küçük değişiklikleri tanımladı.

Dünyanın çeşitli bölgelerindeki daha genel kullanıcılar için potansiyel olarak genişletilebilecek bir iyonosferik fırtına ölçeği geliştirildi. Bu amaçla iyonosferik değişimlerin mevsime, yerel saate ve konuma bağımlılığı ortadan kaldırılmalıdır. Böyle yeni bir iyonosferik fırtına ölçeği oluşturmak için TEC ve f0F_2'nin istatistiksel özellikleri araştırıldı. Bu parametreler küresel olarak iyonosferi izlemek için kullanılır.

Pozitif iyonosferik fırtına modeline neden olan etkilerin kapsamlı bir listesi [40]'da toplanmıştır ve bunların arasında doğru olmadığı veya gözlemlerle doğrulanmadığı tespit edilen bazı maddeler de bulunmaktadır. Ancak ortak görüş, pozitif fırtına etkilerinin ana kaynağının, F_2 bölgesinin yükselme nedeniyle plazmanın korunması olduğu yönündedir. Rüzgârlar veya plazma konveksiyonu nedeniyle F_2 bölgesinde yükselme meydana gelebilir.

Orta enlemlerde ekvator yönündeki rüzgârlar, iyonosferik fırtınaların pozitif bir aşamasının oluşmasına esas olarak katkıda bulunabilir. Küresel rüzgâr kaynakları genellikle gündüz saatlerinde ortaya çıkar. Plazmanın taşınımı genellikle $\vec{E} \times \vec{B}$ sürüklenmeleriyle ilişkilidir. Doğuya doğru yönlendirilmiş elektrik alanları, orta enlemlerde en güçlü etkiye sahip olan yukarı doğru bir plazma kayması üretir [41].

Manyetik fırtına adı verilen büyük ve uzun ömürlü jeomanyetik rahatsızlıklarda, bir noktada çok sayıda alt fırtına meydana gelebilir. Manyetik bir alt fırtına sırasında, büyük miktarlarda güneş rüzgâr enerjisi termosferde birikebilir ve bu da Joule ısınmasına, parçacık ısınmasına ve halka akımında enerji depolanmasına neden olur. Her ne kadar bu üç etkinin bölümlenmesi kesin olarak belirlenmemiş olsada, Joule ısınmasının yüksek enlem iyonosfer-termosfer sisteminde en önemli

enerji biriktirme süreci olduğuna dair güven vardır. Joule ısınması termosferde ve iyonosferde birçok karmaşıklığa yol açar.

Ayrıca yerçekimi dalgaları sıcaklık ve yoğunluktaki ani değişikliklerle harekete geçirilebilir. Bu yerçekimi dalgalarının üst üste binmesi, ekvatora doğru yönlendirilmiş meridyen rüzgârlarını taşıyan Gezici Atmosfer Rahatsızlıkları (TAD'ler) olarak gözlemlenir [42,43].

Meridyonel rüzgârlar F_2'nin tepe elektron yoğunluğunu değiştirmede en etkili olanlardır. İyon ve elektron ısınmasının yanı sıra, enerji birikiminden dolayı aurora termosferinde önemli bir genişleme meydana gelir [44]. Auroralar, hem termosferde hem de ekzosferde üst atmosferde meydana gelen ışık etkileridir.

Literatürde iyonosferik fırtınalar hakkında çözülmemiş problemler hala mevcuttur. Özellikle iyonosferik fırtınaların pozitif fazı en zorlu problem olmaya devam etmektedir. Temel olarak, iyonlaşma yoğunluğu rahatsız koşullar sırasında artabilir veya azalabilir ve bu değişiklikler sırasıyla pozitif ve negatif iyonosferik fırtınalar olarak tanımlanır.

[45]'e göre negatif iyonosferik fırtınanın kaynağı üst atmosferin nötr gaz bileşimindeki değişikliklere atfedilir. Fakat pozitif iyonosferik fırtına için durum böyle değildir.

[46]'ya göre pozitif iyonosferik fırtınalarda nötr gaz bileşimindeki değişikliklerden kaynaklanır. Ancak şu ana kadar bu varsayımı destekleyecek hiçbir deneysel kanıt sunulmamıştır.

[47], iyonosferik fırtınalara yönelik incelemesinde, uzun süreli pozitif iyonosferik fırtına etkilerinin mekanizmasının henüz anlaşılmadığına işaret etmiştir. Pozitif iyonosferik fırtınaların nötr gaz bileşimindeki artıştan meydana geldiği, kesin pozitif fırtına var demek için yeterli değildir demiştir.

[48], fırtına zamanı orta enlem F_2 katmanı yanıtının genellikle NmF_2'de bir artış ve ardından NmF_2'de bir düşüş gösterdiğini buldu. Ani bir enerji enjeksiyonuna yanıt olarak orta enlem bölgesinde iyi belirlenmiş bir pozitif iyonosferik fırtına gelişir. Bu yoğunluk artışının doğrudan nedeni F katmanın aniden yükselmesidir. F katmanının yukarı doğru yer değiştirmesi iyonlaşma yoğunluğunda bir artışa neden olacak ve bunun sonucunda pozitif fırtına etkilerine yol açacağı kolayca anlaşılır.

Pozitif iyonosferik fırtınaların meydana getirdiği yoğunluk artışındaki nedenin F bölgesinin ani yükselişinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Büyük ve henüz cevaplanmamış soru, bu yukarı doğru harekete neyin sebep olduğudur [49].

Gün boyunca iyon kaybını azaltan ve iyon üretimini arttıran termosferik rüzgârlar, elektriksel alan veya termosferik rüzgâr kaynaklı plazma yükselmesi, nötr gazların aşağıya doğru hareket etmesi gibi etmenlerden dolayı pozitif anomalilerin meydana geldiği düşünülmektedir [50]. Burada bilimsel topluluk iki gruba ayrılmıştır. Biri rüzgârları, diğeri elektrik alanlarını birincil neden olarak savunuyor.

[51,52,53,54,55] arasında genel bir fikir birliği var gibi görünsede pozitif iyonosferik fırtınaların meridyen rüzgârlarından mı yoksa elektrik alandan mı etkilendiği konusunda görüşler bölünmüştür. Rüzgârlar pozitif iyonosferik fırtınanın birincil nedeni olarak tanımlansa bile bu rüzgârların kaynağı nedir? Şu anda literatürde iki farklı rüzgâr vardır. Birincisi büyük ölçekli rüzgâr sirkülasyonundaki değişiklikler ikincisi gezici atmosferik rahatsızlıklar olarak bilinen TAD'lar.

Bu dalga paketi yaygın olarak TAD olarak bilinir. Bir TAD, 100–150 m/s hızında ekvatora doğru nötr bir rüzgâr taşır. TAD'nin arkasında küresel ölçekte bozulmuş bir termosferik sirkülasyon kurulur. Bozucu nötr rüzgârlar, gece sektöründe ve manyetik kutbun boylamında orta ve alçak enlemlere daha verimli bir şekilde nüfuz eder ve [56]'ya göre de orta ve alçak enlemlerde iyonosferik bozucu dinamo elektrik alanlarını çalıştırabilir. Orta enlemlerde iyonlaşma yoğunluğunun anormal artışları, genellikle üst atmosferik fırtınaların belirgin bir özelliğidir.

[57]'ye göre iyonosferik fırtınaların ana itici güçleri termosferik ısınmanın bir sonucu olarak kutup enlemlerinden kaynaklanan nötr gaz bileşimi ve nötr rüzgârları içerir.

[58]'e göre bileşimdeki değişiklikler, geceleri rüzgârlar tarafından ekvatora doğru taşınan ve daha sonra gündüz tarafına dönen artan N_2/O yoğunluk oranına sahip bir şişkinlik şeklini alır. Auroral ısı girişindeki ani artış, ~ 600-700 m/s ortalama hızla düşük enlemlere yayılan büyük ölçekli bir yerçekimi dalgaları paketi oluşturur.

Pozitif iyonosferik fırtınaların birincil nedeninin elektrik alanlar olduğu ortaya çıksa da hala bu alanların kaynağına ilişkin sorular ile karşı karşıyayız. İyonosfere dışarıdan mı etki ediliyorlar yoksa alt iyonosferin dinamo bölgesindeki nötr

rüzgârlar tarafından mı üretiliyorlar? Ve eğer dışarıdan empoze ediliyor ise yüksek enlemlerden alçak enlemlere mi yayılıyorlar? Yoksa iç manyetosferdeki kutuplaşma etkileri tarafından mı üretiliyor? Birçok farklı olasılığın değerlendirilmesi, yeterli zamansal ve uzamsal çözünürlüğe sahip eş zamanlı elektrik alan ve rüzgâr ölçümlerini gerektirir.

Elektrik alanlarının orta enlemlere nüfuz etmesi prensip olarak artan NmF_2 etkisi üretebilir, ancak [59] tarafından işaret edildiği gibi bu mekanizma pozitif fırtına morfolojisini açıklayamaz. Bu mekanizmaya karşı ek ciddi argüman, orta enlemlerde elektrik alanlarının artması beklenmediğinde, düşük jeomanyetik aktivite altında uzun süreli pozitif fırtına etkilerinin varlığı ve pozitif bozulmaların hakimiyetidir. Bununla birlikte, doğrudan gözlemler, elektrik alanlarının en azından jeomanyetik bozulma dönemlerinde orta enlemlerde ortaya çıktığını ve F_2 katmanı pozitif fırtına etkileri ürettiğini göstermektedir. Orta enlem iyonosferinde sıklıkla gözlemlenen TEC artışları jeomanyetik fırtınalar sırasında genişletilmiş bir konveksiyon elektrik alanı ile açıklanmaktadır. TAD ve elektrik alanlarının birleşik etkisine ilişkin benzer sonuçlar, [60,61,62,63,64] tarafından elde edilmiştir. [65,66,67]'ye göre de muhtemel bozulma dinamosu elektrik alan bozulmalarından kaynaklanmaktadır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmamızda, jeomanyetik fırtınaların neden olduğu iyonosferik fırtınalar tespit edildi. TEC anomali hesabı ile elde edilen sonuçlar değerlendirildi. Uzay havası üzerindeki etkileri literatür ile karşılaştırıldı.

İyonosonda verileri kullanarak iyonosfer hakkında bilgi sahibi olmak mümkündür. Bu amaçla biz de tez çalışmamızda 25. Güneş çevriminin başlangıcından günümüze kadar olan zaman dilimindeki jeomanyetik fırtınaların meydana geldiği tarihler ve orta enlemde bulunan istasyonlar için, iyonosonda verilerinden faydalanarak çalışma kapsamı içerisinde kendi tasarladığımız program sayesinde iyonosferde meydana gelen TEC değişimlerinin yarattığı iyonosferik fırtınaları çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar istatistiksel metot ile tespit ettik. Bunun yanı sıra jeomanyetik fırtına esnasında Dst, Kp, F10.7 ve B_z indis değişiminin jeomanyetik fırtınalar üzerindeki etkilerini regresyon analizi ile tayin ettik.

Tüm bu amaçlar doğrultusunda tez çalışmamızda yapılanları kısaca şu şekilde özetlemek mümkündür.

2. Bölümde Güneş sistemi üzerinde durulmuştur. 11 yıllık Güneş çevrimi ve güneş rüzgârlarının oluşumuna değinilmiştir. 3. Bölümde doğal plazma olan iyonosfer, iyonosfer'in tabakalı yapısı ve iç dinamiklerinden söz edilmiştir. 4. Bölümde Dünya'nın manyetik alanı olan manyetosfer ve yapısına değinilmiştir. 5. Bölümde Dünya manyetik alanında bozulma sonucu meydana gelen jeomanyetik fırtınaların oluşumu bu fırtınaların şiddetleri ve kökenleri hakkında bilgi verilmiştir. 6. Bölümde jeomanyetik fırtınaların sonucu iyonosfer tabakasında meydana gelen anomalilerin yarattığı pozitif ve negatif iyonosferik fırtınalar, bu fırtınaların oluşumu üzerinde durulmuştur. 7. Bölümde uzay tabanlı GPS verisi ve yer tabanlı iyonosonda verisi ile elde edilen çeşitli parametreler kullanılarak TEC deki değişim hakkında bilgiler verilmiştir. 8. Bölüm çalışma kapsamı içerisinde bahsedilen istatistiksel metotlar kullanılarak elde edilen sonuçların yer verildiği karşılaştırılıp yorumlandığı kısımdır. 9. Bölümde elde edilen grafiklerin sonucunda çıkan değerler analiz edilmiştir ve 10. Bölümde bu çalışmanın uzay havası üzerindeki etkisi, çalışmadaki eksiklikler ve bir sonraki çalışmalarımızda yapılacaklar üzerinde durulmuştur.

Çalışmada uzay havasının yukarı atmosfere olan etkisini anlamak ve uzay havasının daha iyi anlaşılmasına katkıda bulunmak için güneş rüzgârı, jeomanyetik fırtınalar, manyetosfer, iyonosfer ve iyonosferik fırtınalar arasındaki ilişkiler araştırılmıştır.

1.3 Hipotez

İyonosonda ile elde edilen verilerin analizleri ve gözlemleri ile literatürde elde edilen bulgular arasındaki ilişkinin kurulabilmesi önem taşımaktadır. İyonosferik plazmanın tanımlanmasında ve iyonosferik fırtınaların oluşmasında bu istatistiksel metotlarında kullanılması var olan modellerin gelişmesini sağlayacaktır. İyonosferik fırtınaların oluşum mekanizmaları, pozitif ve negatif iyonosferik fırtınaların kökenleri halen tam anlamıyla ortaya konulmamış geliştirmeye açık fiziksel problemlerdendir. Uygulama kısmında iyonosferik fırtınaları anlayabilmek hem de iyonosfer-jeomanyetik fırtına ilişkisini açıklayabilmek için GIRO Lowell iyonosonda verileri aracılığı ile plazma parametrelerinin (f0F_2,

NmF_2, TEC, hmF_2) verilerinin analizi yapılmıştır. Orta enlem bölgesinde bulunan farklı seviyelerdeki jeomanyetik fırtınalar için iyonosferdeki düzensizlikler gelecek çalışmalar için, iyonosferik fırtınaların ve olası etkilerinin anlaşılmasına katkı sağlayacaktır.

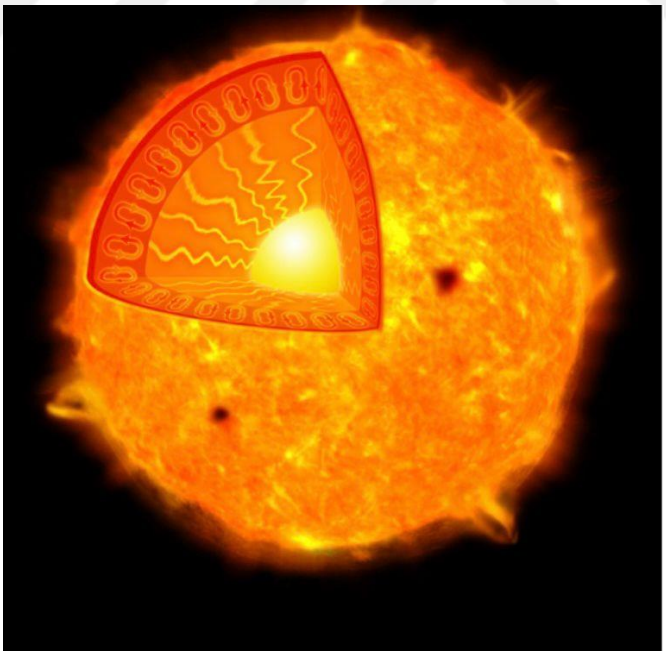
2
GÜNEŞ

2.1 Güneş'in Yapısı

Dünya'mızdan yaklaşık olarak 150 milyon kilometre uzaktaki Güneş, Dünya yönünde devamlı enerji ve ısı dalgası yayarak parlamaya devam eder. Bu dalganın içerdiği ısı, enerjinin miktarı ve tipi, Güneş'in yüzeyinin altında gelişen olaylara bağlı olarak sürekli değişikliğe uğrar. Bu durum, Güneş sisteminin de sürekli olarak değişmesi ve uzay iklimi denilen kavramın ortaya çıkması anlamına gelir.

Kimyasal açıdan ele alırsak, Güneş %91,2 oranında hidrojen %8,7 oranında helyum ve kalan yüzde %0,1'lik kısmı yani Güneş'in toplam atom sayısının çok küçük bir kısmını oluşturan 65 farklı elemente sahiptir [68].

Güneş'in yapısı Şekil 2.1 'de gösterildiği gibi farklı karakteristik özelliklere sahip katmanlardan oluşur.



Şekil 2.1 Güneş'in katmanları [69]

Çekirdek; Güneş'in yarıçapının merkezinden 1/3'lük kısmına kadar olan bölümdür. Enerjinin üretildiği kısımdır. Üretilen enerji ışınım katmanına iletilir. Işınım Katmanı; bu katmandan enerji konveksiyon bölgesine ışınım olarak taşınır. Konveksiyon Katmanı; bu katmanda enerji ışınımsal taşımadan daha çok

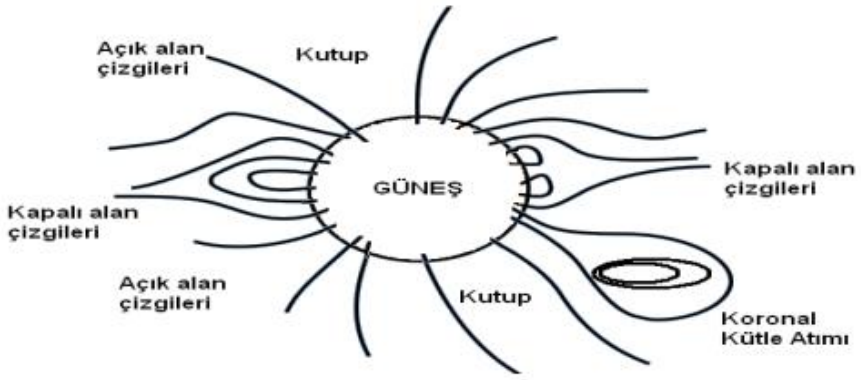
plazmanın yüzeye doğru dikey hareketi ile taşınır. Güneş'in manyetik alanının temel olarak bu katmanda oluştuğu düşünülmektedir. Fotosfer; yüzey bu katmandan itibaren başlar ve 500 km yüksekliğe kadar ulaşır. Güneş lekeleri bu katmanda gözlemlenir. Güneş'in bağıl olarak en soğuk katmanıdır. Kromosfer; Fotosferin üzerinde 2000-3000 km'ye kadar uzanır. Güneş tutulmasında ince pembe bir katman olarak gözlemlenir. Korona Katmanı; Güneş'in atmosferinin en dış katmanı olup keskin dış sınırları bulunmamaktadır. Korona'da güneş rüzgârları adı verilen akımlar ile madde dış uzaya savrulmaktadır. Ayrıca bu katmanda gerçekleşen olaylar güneş lekeleri, Granüller, Prominanslar'dır [70,71].

Koronada meydana gelen bazı oluşumlar koronal delikler, birlikte dönen etkileşim bölgesi (CIR), güneş patlamaları ve CME'dır. Koronal delikler, Güneş üzerinde herhangi bir zamanda ve yerde gelişebilir, ancak Güneş çevriminin minimumuna yakın yıllarda daha yaygın ve kalıcıdır [72]. Daha kalıcı koronal delikler bazen birkaç Güneş dönüşü boyunca devam edebilir. Koronal delikler en çok Güneş'in kuzey ve güney kutuplarında yaygın ve sabittir; ancak bu kutup delikleri büyüyebilir ve daha düşük Güneş enlemlerine doğru genişleyebilir. Kalıcı koronal delikler, yüksek hızlı Güneş rüzgârı akışları için uzun ömürlü kaynaklardır. Yüksek hızlı akış, nispeten daha yavaş ortam Güneş rüzgârı ile etkileşime girdiğinde, CIR olarak bilinen bir sıkıştırma bölgesi oluşur. CIR, koronal delik yüksek hızlı akışların başlangıcından önce parçacık yoğunluğunun artmasına ve gezegenlerarası manyetik alan IMF gücünün artmasına neden olabilir. Koronal delik yüksek hızlı akış Dünya'ya varmaya başladığında, parçacık yoğunluğu azalmaya başlarken Güneş rüzgâr hızı ve sıcaklığı artar. CIR'nin geçişinden sonra ve koronal delik yüksek hız akışına geçişin ardından, genel IMF gücü normal olarak yavaş yavaş zayıflamaya başlayacaktır. Genel olarak, Güneş ekvatorunda veya yakınında bulunan koronal deliklerin Dünya'da herhangi bir CIR geçişi ve/veya daha yüksek Güneş rüzgâr hızları ile sonuçlanması muhtemeldir [73].

Güneş patlamaları, Güneş lekelerinin yakınındaki manyetik alan çizgileri genellikle dolanır, kesişir ve yeniden düzenlenir. Bu durum Güneş patlamaları adı verilen ani enerji patlamalarına neden olur. Patlamalar yüksek oranda radyasyonu uzaya saçar. Eğer patlamalar çok yoğun olursa, salınan radyasyon Dünya'da radyo iletişimini sekteye uğratabilir. Güneş patlamalarına bazen CME eşlik eder.

CME ise manyetik alan çizgileri ile sarılmış, birkaç saat içinde Güneş'ten atılabilen büyük gaz balonlarıdır. CME'ler kapalı manyetik yapılar sayesinde oluşur [74]. Koronal kütle atılımları, Güneş rüzgârlarının hızlarını arttırıcı, geçici aktiviteler olarak isimlendirilebilir. CME' lerin hız aralığı 300 km/s ve 2000 km/s arasındadır.

Bu nedenle, CME'ler, hızlı Güneş rüzgârlarının oluşumuna yardımcı olur. Bu süreçte, Şekil 2.2'de ki gibi CME ile atılan plazma, gezegenlerarası manyetik alan çizgileriyle taşınarak Güneş rüzgârı içerisine girer.



Şekil 2.2 Güneş'teki manyetik yapıların ve koronal kütle atımının temsili [75]

2.2 Güneş Rüzgârı

Güneş durmadan kütle ve enerji kaybetmektedir. Fotonlara dönüştürerek kaybettiği kütlenin dışında, iyonize gaz olarak kaybettiği kütleye Güneş rüzgârı denir. Güneş rüzgârı parçacık popülasyonları Güneş koronasında doğar ve Güneş'ten dışarıya doğru farklı hızlarla hareket eder. Dünyaya ulaşan Güneş rüzgârının yaklaşık hızı saniyede 400 km'dir [76]. Güneş'in üst atmosferinden yayılan plazma dalgasının büyük bir çoğunluğu, 1,5 ve 10 keV arası olan enerjilere sahip elektronlar, protonlar ve alfa parçacıklarından oluşur. Böyle parçacıklarla yüklü bir rüzgâr, gezegenlerin atmosferine girdiği taktirde oldukça büyük etkiler meydana getirir. Dünya'nın manyetik alanı bir tür kalkan görevi görerek bizi meydana gelebilecek büyük olumsuz etkilerden korur ve çarpan parçacıkların Dünya'nın etrafında kalkan boyunca dolaşmasını ve bir süre sonra etkisini kaybetmesini sağlar. Dünyanın dış atmosferine çarpan Güneş rüzgârları atmosferin genişlemesine sebep olur. Ayrıca Manyetosfer'de yüksek akımlar

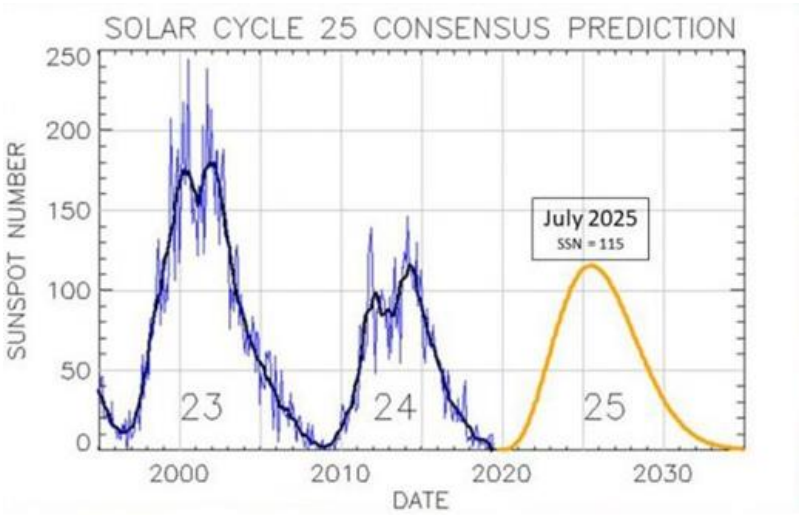
oluşturarak normalden daha fazla akım oluşmasına sebep olur ve bunun neticesinde elektrik kesintileri yaşanabilir [77].

Manyetik alandaki anormal koşullar ve çeşitli Güneş aktivitelerinin neden olduğu Güneş rüzgârı plazma emisyonları nedeniyle Dünya'nın manyetik alanında küresel bozulmalar meydana gelir. Bu bozulmalar sonucunda jeomanyetik fırtınalar ortaya çıkar [78].

Bu olumsuz etkiler dışında Güneş rüzgârları aurora olarak da adlandırdığımız kuzey ışıklarını meydana getirir. Kuzey ışıkları, Güneş rüzgârlarını oluşturan iyonize parçacıkların dünya manyetik alan çizgilerinin yoğunlaştığı bölgelerden girerek, atmosferin üst katmanları ile etkileşmesi sonucu oluşan ışımalardır [79]. Bu kısım Bölüm 4 ve 5'te daha detaylı olarak ele alınacaktır.

2.3 Güneş Döngüsü

Güneş döngüsü, Güneş yüzeyinde gözlenen Güneş lekeleri sayısındaki varyasyonları açısından ölçülen yaklaşık periyodik 11 yıllık bir değişimdir. Her bir döngü, Güneş minimumu ile başlayıp ardından gelen diğer Güneş minimumu arasındaki zaman aralığı olarak tanımlanmıştır. Bir minimum döngüden itibaren geçen 4-5 yıl içinde gözlemlenen lekelerin sayısı maksimum değere ulaşır. Bu durumda Güneş etkinliği maksimum evreye ulaşmış olur. Art arda gelen iki minimum veya iki maksimum evre arasındaki ortalama süre 11 yıldır [80]. Ortalama olarak verilen bu süreye döngü veya çevrim denir. Yapılan araştırmalar bu döngünün, Güneş'in manyetik kutuplarının yer değiştirmesi için geçen süreyle ilişkili olduğunu göstermiştir. En yaygın Güneş aktivite indisi, Güneş lekesi sayısıdır (R). Şekil 2.3'te, 2000-2034 yılları arası gözlemlenen ve olası gözlemlenecek Güneş lekesi sayıları gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Tahmin edilen ve gerçekleşen Güneş leke sayısı grafiği [81]

Şekil 2.3'e bakıldığında bir önceki 24. Güneş döngüsü, görece düşük şiddette seyretti ve döngü 25'in de düşük şiddette olacağı tahmin ediliyordu. Ancak şu ana kadar gerçekleşen Güneş aktivitesi dikkate alındığı döngünün bir önceki döngüye göre şiddetli olacağı görülmektedir.

2.4 Güneş Radyo Akısı (F10.7cm)

Güneş yavaş değişen şiddette radyo enerjisi yayar. Farklı atmosfer katmanlarından kaynaklanan Güneş radyo akısı, Güneş etkinliğinin mükemmel bir göstergesidir. Genellikle F10.7 indeksi olarak adlandırılır. Bu indeks 2800 MHz frekanslı 10,7 cm dalga boyundaki Güneş radyo akısını tanımlamaktadır. 10,7 cm'lik bir Güneş akısı ölçümü 100 MHz genişliğinde bir bantta bir saat boyunca ortalama olarak Güneş radyo emisyonunun gücünü belirler. F10.7 indeksinin birimi solar akıdır (sfu) [82]. Kromosferin üst katmanları ve koronanın alt katmanlarındaki şartlara çok duyarlı olduğundan Güneş aktivitesinin takibi için idealdir. Aktif bölgelerin üzerinde bulunan manyetik alanlarda hapsolan plazmanın toplam miktarı ile doğrudan ilgilidir. Bu da manyetik akı miktarı ile ilişkilidir. Yapılan çalışmalar 10,7 cm Güneş akısı ile aktif bölgelerdeki toplam fotosferik manyetik akı arasında doğrusal bir korelasyon olduğunu gösterir. Bu frekansta Güneş'in sürekli incelenmesi Güneş'in kromosfer ve korona katmanları hakkında bilgi verdiği gibi Güneş'in manyetik alanındaki değişimler hakkında da fikir edinmeyi sağlamaktadır [83]. Güneş aktivitesi F10.7 aralıklarına bağlı olarak belirlenir. Tablo 2.1 F10.7 indeks değerine bağlı Güneş aktivitesi etkisini göstermektedir.

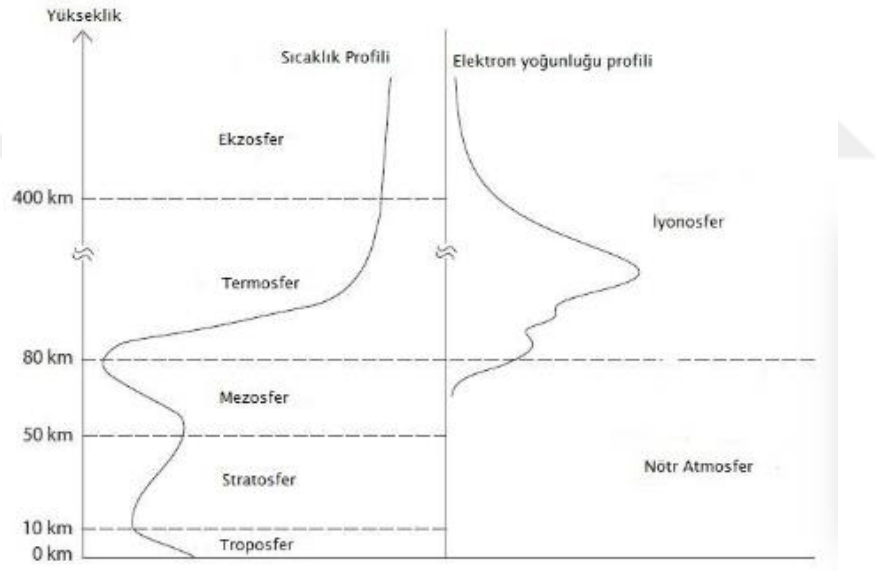
Tablo 2.1 F10.7cm indeks değerleri

F10.7cm İndeksi (sfu)	**Güneş Aktivite Etkisi**
$70\text{sfu} - 100\text{sfu}$	Düşük
100sfu-150sfu	Orta
150sfu-250sfu	Yüksek

3
İYONOSFER

3.1 Atmosfer

Dünyayı çevreleyen hava katmanına atmosfer denir. Atmosfer ısıyı, ışığı, sıcaklığı dağıtır. Atmosferin tabakalarını belirleyen en önemli faktörler sıcaklık ve iyonizasyon dağılımıdır. Şekil 3.1'de gösterildiği gibi sıcaklığın düşey değişimine göre atmosfer; 10 km'ye kadar olan atmosferin gökyüzüne baktığımızda görülen ilk tabakasına Troposfer, 10 km ile 50 km arası ozon tabakasının bulunduğu, Güneş'in gönderdiği ultraviyole ışınların (UV) çoğunu emen Stratosfer, 50 km ile 80 km arası tüm gazların karıştığı Mezosfer, 80 km ile 400 km arasında hidrojen ve oksijenin iyonlara ayrıldığı tabaka Termosfer olmak üzere dört tabaka ile tanımlanmaktadır. Ekzosfer atmosferin en dışındaki tabakadır [84].



Şekil 3.1 Atmosfer bölümleri [85]

Şekil 3.1'de görülen İyonosfer ilginç bir tabakadır. Mezosfer, termosfer ve ekzosfer ile örtüştüğü yerler vardır. Atmosferin çok aktif bir parçasıdır. Bu tabaka hakkında detaylı bilgi Bölüm 3.2 ve 3.3'te verilmektedir.

3.2 İyonosfer

Doğal bir plazma olan Dünya iyonosferi iyonize olmuş gaz ve yüklerden oluşan yeryüzünden yaklaşık 60 km'den 1100 km yüksekliğe kadar olan iletken tabaka olarak tanımlanır [86].

Atmosfer içinde iletken bir tabakanın varlığının anlaşılması yaklaşık bir asır öncesine dayanır. Atmosfer içinde manyetik alan değişimlerinden etkilenen bir iletken tabaka olduğu fikri 1839'da Gauss, 1860'ta Kelvin tarafından ileri sürüldü. Marconi'nin 1901'de Cornwall'den yayımlamış olduğu radyo sinyalini Newfoundland'da alması, Yer iyonosferinin deneysel olarak saptanmasını sağladı. 1902'de Kennelly ve Heaviside, 80 km yükseklikte, yansıtıcı bir iletken katmanın varlığını ileri sürmüşlerdir. 1903 yılında Taylor ve 1906 yılında Fleming, bu tabakaların Güneş ışınlarıyla şekillendiğini söylediler. 1925'e doğru Appleton ve Hartree, atmosferde radyo dalgalarının yayılması kuralını ortaya attılar. 1931'de Chapman, Güneş ışınımının etkisi altında iyon ve elektronların oluşumunu nicel olarak formülleştirdi. 1960'tan bugüne kadar iyonosfer ile ilgili bilgiler, yapay uydulara yerleştirilen ölçü aygıtları ve iyonosondalar tarafından geliştirilmeye devam etmektedir. [87,88,89,90]

Bu tabaka serbest elektronlar ve pozitif yüklü iyonlardan oluşmaktadır. İyonosferin büyük bir kısmı ise nötr gazlardan oluşmaktadır. Genel olarak iyonosfer; coğrafi konuma, jeomanyetik konuma, jeomanyetik aktiviteye, Güneş aktivitesine, Güneş lekesi sayısına, mevsimselliğe, yerel zamana bağlı değişimler gösterebilir. İyonosfer tabakasında meydana gelen uzay kaynaklı düzensizlikler, Güneş tutulması, Güneş patlamaları ve jeomanyetik fırtınalara bağlı olarak oluşur. İyonosferde düzensizliğe neden olan jeomanyetik fırtınaların oluşum süreci, Dünya'nın manyetik alan çizgileri boyunca elektron parçacıklarının akmasıyla başlar [91]. İyonosfer- jeomanyetik fırtına ilişkisi Bölüm 6'da detaylı olarak ele alınacaktır.

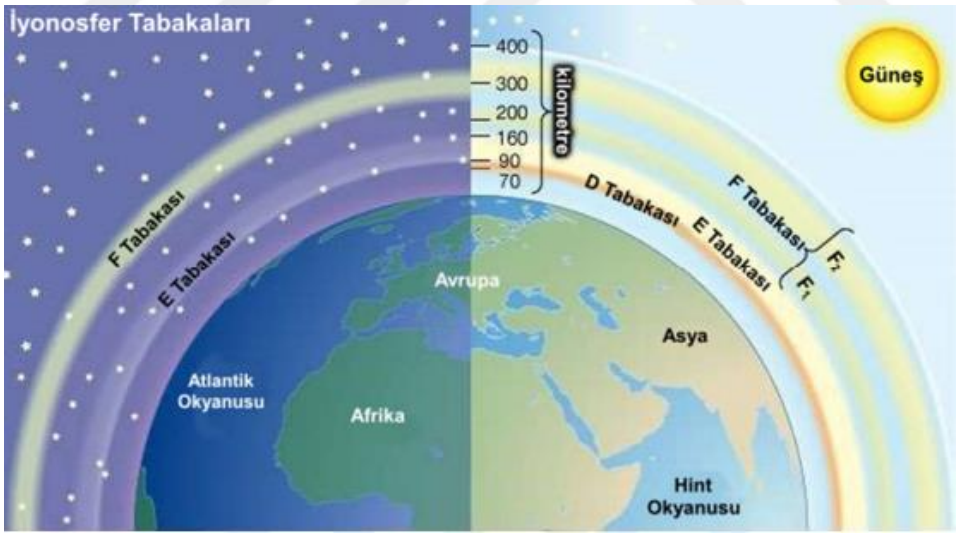
İyonosfer TEC, gece-gündüz, mevsimsel, coğrafi konum ve Güneşte meydana gelen anormallikler gibi etkenlerin tümünden etkilenerek değişir. Güneş ışınımı ile elektronlarından ayrılıp serbest hale geçen elektronlar gün içerisinde yerel saatle 12:00–14:00 arasında en yoğun değerine ulaşır. Elektronların iyonlarla birleşmesinden dolayı geceleri iyonlaşma azalır. İyonosferdeki mevsimsel

elektron yoğunluğu değişimleri Dünya ile Güneş arasındaki açı ve mesafe değişimlerinden kaynaklanmaktadır [92].

3.3 İyonosfer 'in Yapısı

İyonosferin oluşumunda en büyük etki Güneş tarafından oluşturulmakla birlikte, her bölgenin kimyasal yapısı ve bileşenleri farklı olduğundan, Güneş'ten gelen farklı dalga boyuna sahip ışınlar farklı özelliklere sahip bölgelerin oluşmasını sağlamaktadır [93].

İyonosferin Güneş'e göre olan konumu zamanla değiştiğinden elektron içeriği ve iyonlaşma miktarı zamana göre de değişmektedir. TEC, iyonosferin yapısını incelemek için kullanılan önemli parametrelerden biridir. 1 m^2 kesitli bir silindir boyunca toplam serbest elektron miktarı olarak da yorumlanır. TEC'in birimi TECU'dur. İyonosfer elektron yoğunluğu ve iyonlaşma miktarına göre D, E ve F olmak üzere üç bölgeye ayrılır. Şekil 3.2 iyonosferin bölgelerini gösterir. Gündüz saatlerinde iyonosferin F bölgesi F_1 ve F_2 olmak üzere iki bölgeye ayrılır. Gece saatlerinde ise bu iki bölge, birleşip tek bir bölge haline gelir [94].



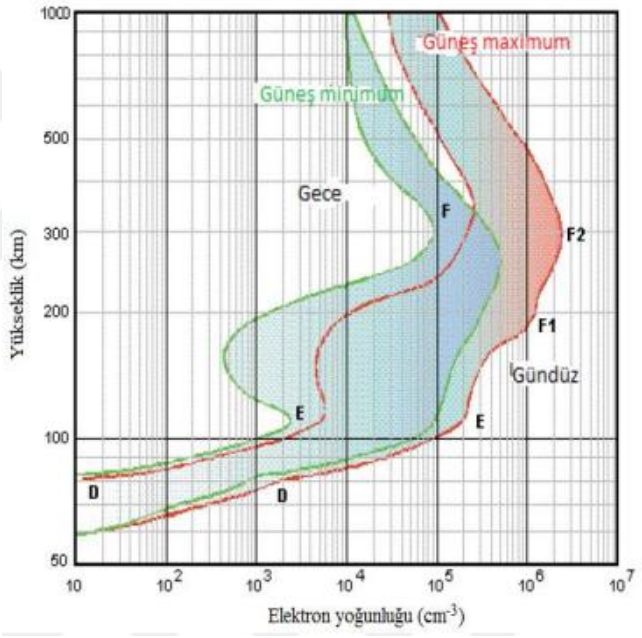
Şekil 3.2 İyonosfer'in yapısı [95]

En alttaki bölge, 60 km ile 90 km arasında uzanan D bölgesidir. D bölgesinde baskın olan X ışını fotonları ve kozmik ışın parçacıklarıdır. İyon ve elektronların yeniden birleşerek nötr hale dönmesi anlamına gelen yeniden birleştirme hızları bu seviyede yüksektir. Bu nedenle, atmosfer zayıf bir şekilde iyonize olduğu için bu bölge plazma olarak kabul edilmez. D bölgesi radyo iletişiminde çok

önemlidir. İyonizasyon oranları, Güneş radyasyonu olmaması nedeniyle geceleri çok daha düşük olur; bu nedenle, kozmik ışınlar nedeniyle D bölgesi geceleri zor var olur [96].

Gün içinde değişen ve farklı değerlere sahip olan TEC, güneşli öğle vakitlerinde yüksek değerlere, gece vakitlerinde ise düşük değerlere sahiptir. Yaz, kış ve ekinoks zamanlarında farklı TEC yapıları oluşabilir [97]. Günlük ve mevsimsel değişimlerle ilişkili olarak enleme bağlı TEC değişimleri olabilmektedir.

İyonosferik bölgelerin elektron yoğunluğunun yüksekliğe bağlı genel gösterimi Şekil 3.3'te gösterildiği gibidir. Yükseklik arttıkça iyonlaşma miktarı da artar. En yüksek elektron yoğunluğuna sahip bölge Güneş maksimum zamanı içerisinde F_2 bölgesidir.



Şekil 3.3 İyonosferik elektron yoğunluğunun yüksekliğe bağlı değişimi [98]

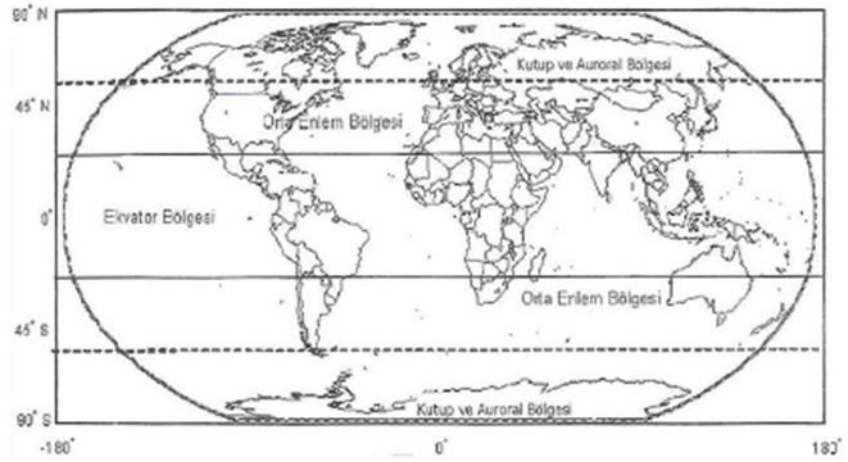
E bölgesi 90 km ile 150 km arasında uzanır. D bölgesinden sonra gelen bölgedir. Bu bölge hem gündüz hem gece vardır. Bu bölgede ana iyonlaşma kaynağı kısa dalga boylu UV radyasyondur ve orta frekanslı radyo dalgaları yansıtılır. Ayrıca E bölgesi yüksek miktarda elektron, yüksek frekanslı dalgaların kırılmasına neden olur [99].

İyonosferin dış bölgesi, gece boyunca F bölgesidir. 150 km ile 500 km arasında uzanır. Bu bölgedeki ana iyonlaşma kaynağı, Güneş'ten gelen aşırı ultraviyole radyasyondur. Gün içinde F bölgesi F_1 ve F_2 olmak üzere 2 bölgeye ayrılır. Uzun

mesafelere yüksek frekanslı radyo sinyalleri, elektron yoğunluğunun en yüksek olduğu tabaka olduğu için genellikle F bölgesi aracılığıyla yapılır. F_2 bölgesi, tüm gün boyunca mevcut olduğu için burada radyo iletişimi için en önemli bölgedir [100].

3.3.1 İyonosfer 'in Coğrafi Yapısı

İyonosfer coğrafi enleme göre Şekil 3.4' de gösterildiği gibi yüksek enlem, orta enlem ve Ekvator bölgesi olmak üzere üç ana bölgeye ayrılır.



Şekil 3.4 İyonosfer bölgeleri [101]

Yüksek enlem bölgesi kuzey enlemlerde görülen auroral ve kutup bölgelerinden oluşur. Elektron yoğunluğu değerleri Ekvator bölgesine göre bu bölgede daha düşüktür. Auroral bölgede gündüz zamanı UV ışınlarının düşük iyonlaşma eğilimi göstermesinden dolayı iyonosferik gecikme düşüktür [102].

Kutup bölgesinde ise iyonlaşma hem güneş ışınının etkisi hem de parçacıkların birbirine çarpması sonucu gerçekleşmektedir [103].

Orta enlem bölgesi, iyonosferin sakin ve değişimin az olduğu bölgedir. Bu bölgede oluşan iyonlaşma genellikle Güneş'ten gelen X ışını emisyonu ve enerji yüklü UV radyasyon ile üretilir [104].

Ekvatoral bölge ise en yüksek elektron yoğunluğuna sahip ve sinyalin genliği ve fazı sıkça değişen bir bölgedir. Bunun nedeni güçlü güneş radyasyonu ve yoğun iyonlaşmadır. Ekvator bölgesinde meydana gelen iyonosferik aktivite ekvatoral anomali olarak adlandırılır. Ekvatoral anomali, manyetik fırtına gibi nedenlerle jeomanyetik ekvatorda oluşan elektron yoğunluğu azalmasıyla tanımlanmaktadır [105].

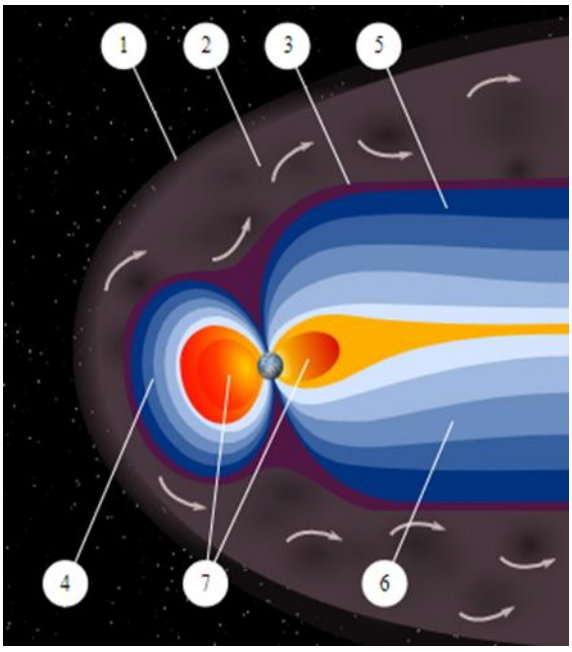
4

MANYETOSFER

4.1 Manyetosfer'in Yapısı

Manyetik ara bölgesini de içine alan ve yerin manyetik alanının güneşin manyetik alanı tarafından hapsedildiği bölgeye manyetosfer denir. Manyetosferler, manyetik alanın yapısına bağlı olarak yaklaşık küresel biçimdedir.

Manyetosferlerin Güneş rüzgârı ile karşılaştığı yerlerde, yay biçiminde Şekil 4.1'de (1) numara ile gösterilen şok dalgası meydana gelir. Şok dalgalarının oluşabilmesi için bir cismin, ona doğru gelen rüzgâr içinde yayılan dalgalardan daha hızlı ilerlemesi gerekir. Böylece Güneş rüzgârı, karşısındaki manyetik kalkanı fark edemez. Fark edemeyeceği ve çevresinden akıp gidemediği için de onunla çarpışır. Şok dalgasını geçen plazma, manyetik alanın etkisiyle ve Güneş rüzgârının oluşturduğu basınçla, gezegenin arkasında bir kuyruk oluşturur. Şekil 4.1'de manyetik kuyruğun kısımları gösterilmektedir. Dünya'nın manyetik kuyruğunun uzunluğu, birkaç milyon kilometreyi bulabilmektedir. Ayrıca plazmanın Dünya'ya en çok yaklaştığı yer, manyetosferin Güneş'e bakan yönüdür. Çünkü burada Güneş rüzgârı manyetosfer üzerinde basınç oluşturur ve onu iter [106].



Şekil 4.1 Manyetosfer yapısı ve katmanları [107]

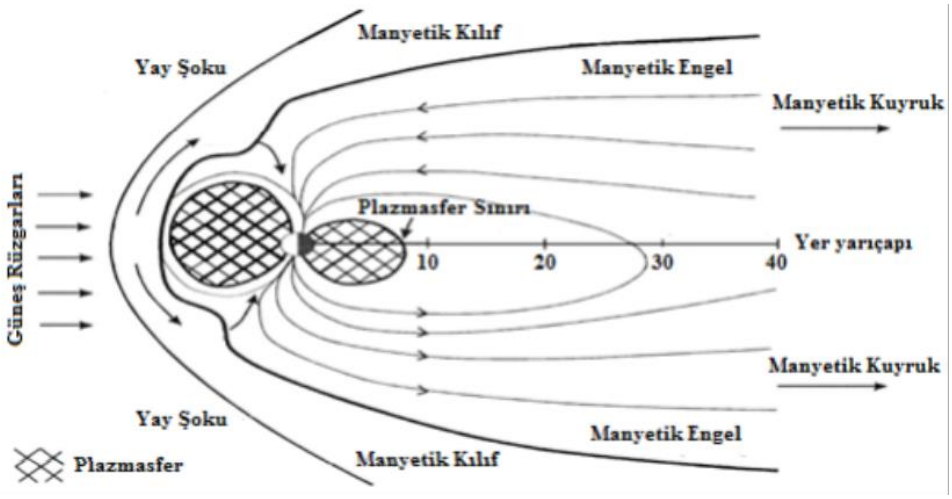
(4) Manyetosfer ile (1) yay şoku arasında gri ile temsil edilen alan (2) manyeto kılıf olarak adlandırılırken, (3) manyetopoz ise manyetosfer ile manyeto kılıf arasındaki sınırdır. (5) ve (6) numaralı yerler sırasıyla kuzey ve güney kuyruk lobunu gösterir. (7) numaralı yer ise plazma küreyi temsil eder. Bu bölge manyetik alan çizgileri içindeki iyonosfer 'in üzerindeki plazma bölgesine denir.

Bir gezegende manyetosferin oluşabilmesi için ilk önce gezegenin bir manyetik dinamosu olması gerekir. Bu manyetik dinamonun oluşumu genellikle çekirdekteki kimyasal madde fazlalığına ve konveksiyonla enerjisine bağlıdır.

Dünyanın kendi etrafında dönmesi, manyetosfer denilen manyetik alan kalkanı ortaya çıkarır. Dinamo etkisi ile Dünya'nın etrafında oluşan bu kalkan bizi Güneş'ten gelen zararlı ışımalardan korur. Güneş rüzgârlarıyla Güneş'ten ayrılan parçacıklar yaklaşık 40 saat sonra Dünya'nın çekirdeğinin ürettiği manyetosfere ulaşırlar. Bu parçacıklar atmosferde bulunan elementlerle etkileşime geçerek her iki kutupta Aurora denilen kutup ışıkları ortaya çıkarır.

Manyetosfer, Dünya'nın kendi manyetik etkisi tarafından tutulan uzayda küre biçimindeki bir alandır. Manyetosfer güneş rüzgârının yolu üzerinde bir engel oluşturur ve güneş rüzgârının yeryüzünün yaklaşık 70.000 km dışından dolaşmasına neden olur. Manyetosferik engelin genişliği hemen hemen 190.000 km'yi bulur. Dünyanın karanlık tarafında ise çapı çok büyük boyutlara ulaşan manyetosfer uzun bir manyetik kuyruk haline gelir [108].

Şekil 4.2 Dünya manyetosferinin şemasını göstermektedir. Şekil 4.2'de güneş rüzgârı soldan sağa doğru akmaktadır.

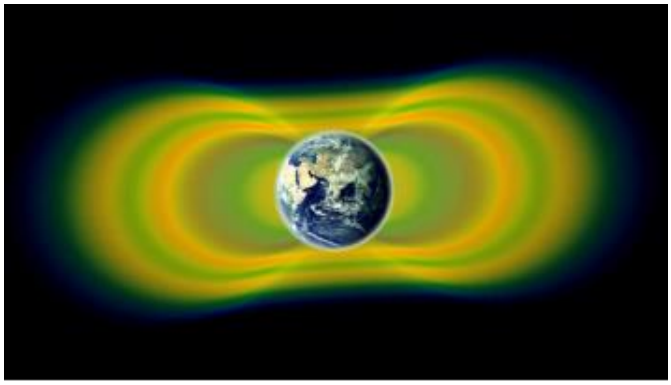


Şekil 4.2 Yer'in manyetosferi ve karakteristik bölgeleri [109]

Güneş rüzgârı ortamı bozduğunda, enerjiyi ve materyali kolayca manyetosfere taşır. Manyetosferdeki enerji yüklü elektronlar ve iyonlar manyetik alan çizgilerini izleyerek atmosferin kutup bölgelerine doğru hareket eder.

Kutup bölgelerine sızan enerji yüklü bu iyonlar, Van Allen radyasyon kuşaklarında tuzaklanan yüklü parçacıkların kaynağıdır. Kuzey ve güney ışıklarının oluşumu doğrudan Dünya'nın manyetik alanı tarafından tuzaklanan bu yüklü parçacıklar tarafından gerçekleşir. Uzay ortamında bulunan radyasyonun doğal kaynakları Van Allen radyasyon kuşağı, kozmik ışınlar ve güneş sisteminden kaynaklanan parçacık olaylarını içermektedir.

Şekil 4.3'te görüldüğü üzere Van Allen kuşakları çok yüksek enerjili elektron parçacıklarından oluşan iç ve dış radyasyon kuşaklarını içermektedir. Bu kuşaklar manyetik alanın güçlü olmasından dolayı Dünya'nın etrafında kalabilmektedir.



Şekil 4.3 Van Allen radyasyon kuşakları [110]

Atmosfere ulaşan enerji yüklü iyonlar çoğunlukla iyonosfer tabakasında atomlarla etkileşime girer. Bunun sonucunda atomlar iyonlardan enerji alarak uyarılmış hale geçer. Bu atomların yeniden temel enerji seviyesine geçmesi sonucunda elektromanyetik dalgalar oluşur.

Elektromanyetik dalgalar, yüklü parçacıkların ivmeli hareketi sonucu oluşur. Birbirine dik elektrik ve manyetik alan bileşeni bulunan ve bu iki alanın oluşturduğu düzleme dik doğrultuda yayılan dalgalardır. Elektromanyetik dalga ilk James Clerk Maxwell tarafından ortaya atılmıştır.

Homojen ve izotrop ortamda yayılan elektromanyetik dalganın elektrik alan bileşeni

$$\nabla^2 E - \mu\varepsilon \frac{\partial^2 \mathrm{E}}{\partial \mathrm{t}^2} = 0 \tag{4.1}$$

dalga denklemin uyar. n kompleks kırılma indisi ($i^2 = -1$)

$$\mathrm{n} = \mu - i\chi \tag{4.2}$$

olmak üzere

$$n^2 = (\frac{ck}{w})^2 \tag{4.3}$$

olarak ifade edilmektedir. İyonosferi tanımlayan önemli parametrelerden birisi olan kırılma indisi hesabı yapılırken, ortamın ve dalganın özellikleri bilinmelidir. Bu nedenle önce dalganın elektrik bakımdan nötral gaz ve iyonlardan oluşan bir ortamda ilerlediği düşünülür. Böyle bir ortamda dalganın yayılmasını etkileyen en önemli faktörler elektron yoğunluğu, dış manyetik alan B_0 ve elektron ile diğer parçacıklar arasındaki çarpışma frekansıdır. Bununla birlikte ortamın kırılma indisi, dalganın özelliklerine de bağlıdır. Ayrıca dalga frekansına, dalganın yayılım yönüne, dalganın elektrik veya manyetik alan vektör bileşenlerinin yönüne de bağlıdır. Denklem 4.3'te k, kompleks dalga yayılma sabiti, c, elektromanyetik dalganın boşluktaki hızı, w ise dalganın açısal frekansı olarak adlandırılır. Kırılma indisi elektrik alan ve polarizasyona bağlı olarak

$$n^2 = 1 + \frac{P}{\varepsilon_\circ E} \tag{4.4}$$

yazılabilir. İzotropik ortamın özelliklerini içeren kırılma indisi bağıntısı denklem 4.5'te, ortamın açısal frekansının karesi W_N^2 ve dalganın açısal frekansının karesi W^2' ye bağlı olarak

$$\mu^2 = 1 - \frac{Ne^2}{\varepsilon_\circ m w^2} = 1 - \frac{w_N^2}{w^e} \tag{4.5}$$

elde edilmektedir [111].

4.2 Chapman Tabakası

İyonosfer değişken bir yapıda olmasından dolayı, elektron yoğunluğunun yüksekliğe bağlı olarak hesaplanması oldukça zordur. Bu zorluğun giderilmesi için 1931 yılında Chapman tarafından birtakım varsayımlar yapılarak iyonosfer modellenmiştir [112].

İyonosferi belirli kalınlıkta dilimlere ayırır ve elektron yoğunluklarını hesaplayarak yükseklik ile elektron yoğunluğu değişimleri bulunabilir. Böylelikle iyonosferin tabanı olan 65 km'den başlayarak, dilediğimiz yüksekliğe kadar olan elektron sayısını, sayısal integrasyon yolu ile hesaplayabiliriz. Maksimum elektron yoğunluğunun bulunduğu hmF_2'nin üzeri Chapman tabakası bağıntısına göre tek tabaka modeli için kolaylıkla hesaplanabilir.

Digi-Sonda ile alınan iyonogramlar, elektron yoğunluğunun gerçek yükseklik ile değişimini vermektedir. hmF_2'den itibaren elektron yoğunlukları bilinen ince tabakalara ayrılmaktadır.

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

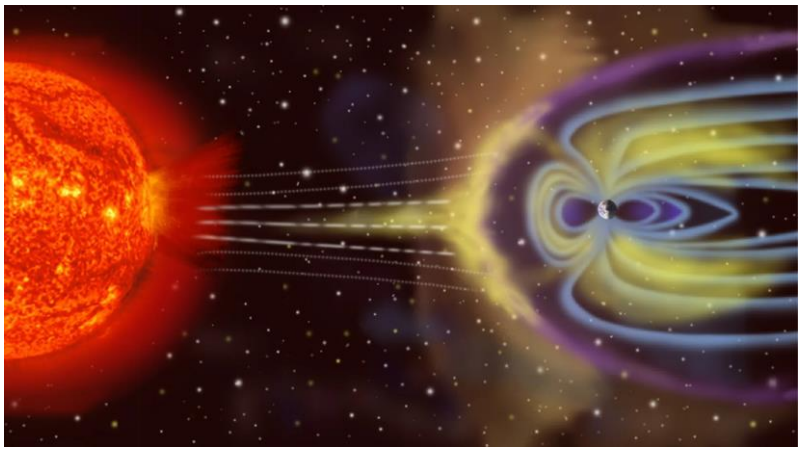
- Atmosferde yalnızca bir çeşit gazın bulunması
- Atmosferin tabakalı düzlemlerden oluşması
- Güneşten gelen iyonize radyasyon ışınının dalga boyuna sahip olması ve paralel gelmesi
- Atmosferi izotermal bir ortam olması varsayımlarına dayanır [113].

5
JEOMANYETİK FIRTINA

5.1 Jeomanyetik Fırtına Oluşumu

Dünya'nın manyetik alanı diğer adıyla**,** jeomanyetik alan, Bölüm 4' de bahsedildiği gibi Dünya'dan uzaya doğru uzanan manyetik alandır. Dünya'da çıkan manyetik alan, Güneş'ten gelen yüklü parçacıklardan oluşan Güneş rüzgârlarıyla buluşur. Bu buluşma sonucu Dünya'nın manyetik alanında birkaç saatten birkaç güne kadar süren bozukluklar meydana gelir. Bu bozuklukları oluşumları güneş aktivitesi ile ilgili olan jeomanyetik fırtınalar yaratır. Jeomanyetik fırtınalar doğaları gereği küreseldir ve Dünya'nın tüm noktalarında aynı anda başlar [114].

Jeomanyetik fırtınalar Şekil 5.1'de de gösterildiği gibi bir manyetik alan bulutu veya bir güneş rüzgârı şok dalgasının Dünya'nın manyetik alanı ile etkileşmeleri sonucunda oluşur. Bir jeomanyetik fırtına genellikle, plazma yoğun dinamik yapıya sahip güneşten kopan proton ve elektron yüklü parçacıkların, güneş rüzgârı vasıtasıyla dünyanın manyetik alanının yönünde ve büyüklüğünde önemli değişiklikler yapması ile başlar. Güneş rüzgâr basıncındaki artış başlangıçta manyetosferi sıkıştırır. Güneş rüzgârının manyetik alanı, Dünya'nın manyetik alanıyla etkileşime girer ve artan bir enerjiyi manyetosfere aktarır. Her iki etkileşim de manyetosfer boyunca plazma hareketinde bir artışa ve manyetosfer ve iyonosferde elektrik akımında bir artışa neden olur. Jeomanyetik bir fırtınanın ana aşaması sırasında, manyetosferdeki elektrik akımı, manyetosfer ve güneş rüzgârı arasındaki sınırı dışarı iten bir manyetik kuvvet yaratır [115].



Şekil 5.1 Manyetosfer ile etkileşime giren güneş rüzgârı parçacıkları [116]

Jeomanyetik fırtınalar, güneş patlamaları ile güneş kütle atımı arasında gerçekleşen fırtınalardır. Bu iki olay birbirine bağlı gerçekleşirken, birbirinden bağımsız da oluşabilir. Jeomanyetik fırtınalar elektronik ve haberleşme sistemlerini, uyduları ve iklimi etkileyebilirler. Ayrıca jeomanyetik fırtınalar, iyonosferik bozukluklara da sebep olabilirler. İyonosferik fırtınalar Bölüm 6'da ele alınacaktır.

Bir jeomanyetik fırtına, jeomanyetik gözlemevlerinde, Dünya'nın manyetik alanının bileşenlerini etkileyen ve sakinlik geri gelene kadar bir gün veya daha fazla süren ani bir bozulma olarak kaydedilir. Jeomanyetik fırtınaların büyüklüklerini ölçmek için jeomanyetik indeks kullanılır. Bu indekslerden en yaygın kullanılan manyetik aktiviteyi temsil eden Dst indeksidir. İkinci olarak yerel jeomanyetik alanın bozulmasını temsil eden bir jeomanyetik indeks olan K indeksi en yaygın kullanılanıdır. K indekslerinin ağırlıklı ortalamasının hesaplanmasıyla elde edilen Kp indeksi tanımlanır [117].

5.2 Dst İndeks

Jeomanyetik alan değerlerinin değişikliklerini takip etmek için Dst indeksi kullanılır. Normal durumda Dst değeri ± 10 nT iken jeomanyetik fırtına sırasında birkaç saat içinde yüzlerce nT kadar düşebilir. Jeomanyetik fırtınanın davranışı üç bölüme ayrılır: başlangıç fazı, ana faz ve iyileşme fazı. Başlangıç fazı, Dst indeksinin birkaç on dakika içinde 10 nT'dan 50 nT'a artışının olduğu durumlarda oluşabilir. İkinci bir faz ise ana fazdır. Jeomanyetik fırtınanın bu fazında Dst indeksi -50 nT'dan başlayarak azaldığı durumlar için tanımlanır. Dst indeks

aralığı -50 ve -600 nT aralığında iken tipik bir ana fazın süresi 2 ve 8 saat arasındadır. İyileşme fazı da jeoamanyetik fırtınaların üçüncü fazıdır. Bu fazda Dst değeri orijinal değerine yükselir ve -10 +10 nT aralığına geri döner. Bu iyileşme fazı kısa sürerse 8 saat, uzun sürerse 7 güne kadar sürebilir.

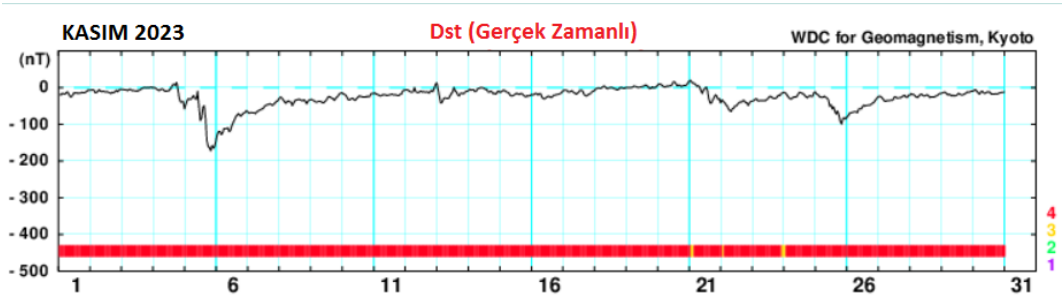
Jeomanyetik fırtınalara ilişkin yapılan sınıflandırma Tablo 5.1'de gösterilmektedir. Dst indeksi, birkaç manyetometre istasyonundan alınan ölçümlere dayanarak, Dünya'nın manyetik ekvatordaki yatay bileşeninin küresel olarak ortalama değişimini tahmin eder. Dst saatte bir hesaplanır ve neredeyse gerçek zamanlı olarak rapor edilir. Sakin bir jeomanyetik aktivite etkisine sahip fırtınanın Dst indeksi -30 nT'nın üzerinde, zayıf şiddetli bir jeomanyetik fırtınanın Dst indeksi

-30 nT ile -50 nT aralığındadır. Orta şiddetli bir jeomanyetik fırtınanın Dst indeksi -50 nT ile -100 nT aralığında, kuvvetli şiddette bir jeomanyetik fırtınada bu aralık -100 nT ile -250 nT aralığında olurken, Dst indeksi -250 nT'dan -600 nT'ya kadar olan aralık ise süper fırtına olarak sınıflandırılır.

Şekil 5.2 2023 yılı Kasım ayı için jeomanyetik aktivite indisi olan Dst değerinin negatif değere düştüğünü göstermektedir.

Tablo 5.2 Dst indeks değerleri

Dst İndeksi (nT)	**Jeomanyetik Aktivite Etkisi**
$Dst_{min} \geq -30$	Sakin
-30 $\geq Dst_{min} \geq -50$	Zayıf Fırtına
-50 $\geq Dst_{min} \geq -100$	Orta Fırtına
-100 $\geq Dst_{min} \geq -250$	Kuvvetli Fırtına
-250 $\geq Dst_{min} \geq -600$	Süper Fırtına



Şekil 5.2 Kasım 2023 jeomanyetik aktivite değişim grafiği [118]

5.3 Kp İndeks

Jeomanyetik fırtınaların yoğunluğunu ve etkisini ölçmek için Kp indeksi kullanılır. Kp ölçeği değerleri birimsizdir. Bu indeks 13 farklı istasyondan alınan verilerle elde edilir [119]. Ulaşılan Kp indeks değeri ile ilgili beş olası değer Tablo 5.2'de listelenmiştir. Bu değerler 0 ile 9 arasında birer birer artarak değişmektedir.

Kp indeksi 5 değerine ulaştığı zaman G1 küçük derecede bir fırtına, Kp indeks değeri 6 olduğu zaman G2 orta dereceli bir fırtına, Kp indeksi 7 olduğu zaman G3 kuvvetli bir jeomanyetik fırtına, Kp indeksi 8 ve 9 değerlerine ulaştığı zaman sırasıyla G4 ağır ve G5 aşırı şiddetli bir jeomanyetik fırtına derecesine sahip olur [119].

Tablo 5.3 Kp indeks değerleri

Kp İndeksi	Jeomanyetik Fırtına Derecesi
5	G1 Küçük
6	G2 Orta
7	G3 Kuvvetli
8	G4 Ağır
9	G5 Aşırı

Bu indeks auroraların oluştuğu bölgenin jeomanyetik enlemi ile yakından ilişkilidir. Auroraların oluştuğu bölge ‘’auroraloval’’ olarak adlandırılır. Jeomanyetik aktivite şiddetlendikçe, auroraloval daha alt enlemlere inmeye başlar.

Toplam aurora sayısı, auroralovallerde meydana gelen auroraların oluşum sıklığını gösterir. Auroralovallerde meydana gelen auroralar arttıkça aurora oluşum sıklığı da artmış olur. Toplam aurora sayısı, güneş leke sayısı ile ilişkilendirilebilir [120].

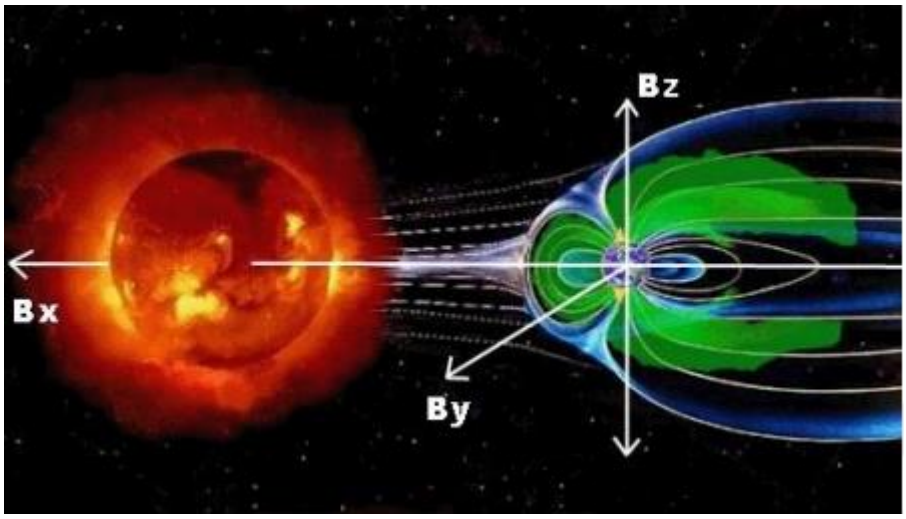
5.4 Gezegenlerarası Manyetik Alan

Gezegenlerarası manyetik alanı B_z bileşeni, auroral çalışmalarda kullanılan parametrelerden biridir. Helyosferik manyetik alan olarak da bilinen gezegenlerarası manyetik alan, güneş rüzgârı tarafından güneş koronasından gezegenlerarası ortama sürüklenen manyetik alanın bir parçasıdır. Helyosferik manyetik alan ölçümünde yer merkezli Güneş manyetosferik (GSM) koordinat sisteminden yararlanılır. Bu koordinat sistemi, güneş rüzgârı ve helyosferik manyetik alan tarafından kontrol edilen bölgeler olan manyetopoz ve manyetik kuyruktaki parçacıklarla ilişkili parametreleri belirlemede kullanılır. Gezegenlerarası manyetik alan, üç vektörel bileşene sahiptir [121].

Bunlar, Şekil 5.3’ de gösterilen B_x, B_y ve B_z ’dir. B_x bileşeni, ekliptik düzlem üzerinde Güneş-Yer doğrultusunda ve Güneş’e doğru pozitif yönlü, B_y bileşeni, gündoğumu ve günbatımı doğrultusunda ve gündoğumu yönünde pozitif, B_z bileşeni ise kuzey-güney bileşeni olup kuzey yönünde pozitif ve ekliptik düzleme diktir.

Z bileşeni auroral aktivite çalışmalarında daha sık kullanılır. Nedeni ise bu bileşen güneş rüzgârındaki tedirginlikler tarafından etkilenir. Böylece koronal kütle boşalımları tarafından tetiklenen kutup ışıkları (aurora) oluşmaktadır.

Değerlerin pozitif olması, gezegenlerarası manyetik alan ile yerin manyetik alanı aynı tarafa yönelmiş olması anlamına gelir. O halde, bu iki manyetik alan arasındaki etkileşim çok zayıftır. Buna bağlı olarak auroral aktivite şiddetli değildir [122].



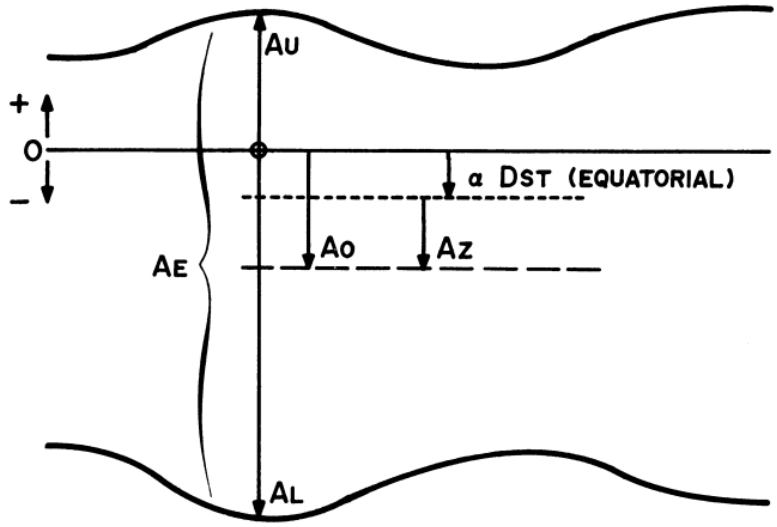
Şekil 5.3 Helyosferik manyetik alanın B_x, B_y ve B_z bileşenleri [123]

Veri tabanında negatif olarak verilen değerler B_z'nin güneye yönelmesi anlamına gelir. Bu da iki manyetik alan çizgilerin zıt yönlü olmasıdır.

5.5 Auroral Elektrojet (AE)

Auroral elektrojetler, auroral enlemlerde en belirgin akımlardır. Toplamda birkaç milyon amperlik bir akım taşırlar. Auroral elektrojet indeksi (AE), iyonosfer tarafından üretilen auroral bölge manyetik aktivitesinin küresel, nicel bir ölçüsünü sağlamak üzere tasarlanmıştır. İdeal olarak, auroraovalinin etrafındaki yatay manyetik alanın sakin gün değerlerinden bir andaki toplam sapma aralığıdır. 1966 yılında Davis ve Sugiura tarafından tanımlanan ve geliştirilen AE, iletişim uydularının davranışı, radyo yayılımı, radyo sintilasyonu ve gezegenlerarası manyetik alan arasındaki bağlantı çalışmalarında hem niteliksel hem de niceliksel olarak bir bağıntılı indeks olarak faydalı bir şekilde kullanılmıştır.

Anlık olarak veya seçilen herhangi bir aralıkta hesaplanan varyasyonların ortalamalarından elde edilir. Genel olarak gözlemlenen manyetik varyasyonları üreten süreçlerle doğrudan ilgili olan niceliksel bir indekstir. Şekil 5.4, AU, AL, AO, AZ, AE arasındaki ilişkilerin şematik çizimini göstermektedir.



Şekil 5.4 AU, AL, AO, AZ, AE arasındaki ilişkilerin gösterimi [124]

AU ve AL indeksleri, auroral bölgedeki seçilmiş bir manyetometre ağı tarafından ölçüldüğü üzere, sırasıyla doğuya ve batıya doğru auroral elektrojetlerin en güçlü akım yoğunluklarını temsil eder. AU ve AL farkı olarak tanımlanan AE indeksi, AE = AU -AL, elektrojetlerin genel aktivitesini temsil eder. AU ile AL'nin ortalama değerinin yani $\frac{AU+AL}{2}$, AO indeksini tanımlar. AU ve AL indeksleri, sırasıyla doğuya ve batıya doğru auroral elektrojetlerin en güçlü akım yoğunluğunu ifade etmeye yöneliktir. AE indeksi, elektrojetlerin genel aktivitesini temsil eder ve AO indeksi, eşdeğer bölgesel akımın bir ölçüsünü sağlar [125].

6
İYONOSFERİK FIRTINALAR

6.1 İyonosferik Fırtına Oluşumu

İyonosferik fırtınalar, uzay havasının yer ve uzay tabanlı teknolojik sistemler üzerindeki aşırı etkilerini göstermektedir. İyonosferik fırtınalar elektron yoğunluk profilindeki hızlı değişimler olarak görülmektedir [126]. F bölgesindeki elektron yoğunluğundaki değişiklikleri açıklamak için fırtınanın belirli evrelerinin pozitif ve negatif sınıflandırılması kabul edilir.

İyonosferik fırtınalar güneşten üretilen elektronların değişen yoğunluklarını içeren fırtınalardır. İyonosferik fırtınalara jeomanyetik fırtınalar neden olur. Pozitif fırtınaların yüksek elektron yoğunluğuna sahip olduğu ve negatif fırtınaların daha düşük yoğunluk içerdiği pozitif ve negatif fırtınalara ayrılırlar. TEC bu yoğunlukları ölçmek için kullanılan önemli bir değişkendir. İyonosferik fırtına oluşumları, güneş rüzgârının enerjili elektronları Dünya'nın üst atmosferine getirdiği ve TEC'in artmasına katkıda bulunduğu ani güneş rüzgârı hızı artışlarıyla güçlü bir şekilde bağlantılıdır.

Güneş ve manyetosferik bozulmalara tepki, farklı iyonosferik bölgelerde farklı olabilir. D ve E bölgeleri temel olarak iyonlaşmanın değişiminden etkilenirken, F bölgesindeki elektron yoğunluğu esas olarak nötr gazın bileşimindeki değişikliklerden ve nötr ve iyonize bileşenlerin taşınmasından etkilenir [127].

Güçlü uzay hava olayları olarak iyonosferik fırtınalar, iyonosferdeki yüklü parçacıkların dağılımındaki değişiklikler nedeniyle teknolojik altyapı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Çeşitli iletişim ve navigasyon sistemlerini etkilediği için uzay havasına giderek daha fazla bağımlı hale gelmektedir [128].

İyonosferik fırtına terimi burada, Dünya'ya yakın uzay ortamında güneş rüzgâr enerjisinin güçlü bir şekilde artan dağılımının neden olduğu iyonosferin küresel bir bozulmasını belirtmek için kullanılmaktadır. Açıkçası, bu tür rahatsızlıklar karmaşık güneş-karasal ilişkiler zincirinde önemli bir halka oluşturur. Ayrıca, bu tür olaylar sırasında radyo iletişimleri ciddi şekilde bozulabileceğinden ve hatta kesintiye uğrayabileceğinden, pratikte büyük ilgi görmektedir.

Bir jeomanyetik fırtınanın başlangıcından önceki günlerde F_2 bölgesinin ve üst iyonosferin parametrelerindeki bozulmalar sorunu uzun zamandır bilinmektedir.

Birçok iyonosferik fırtına çalışması, hem F_2 bölgesinin kritik frekansı ve yüksekliğinde hem de TEC değerindeki bu bozulmaların analizini kapsamaktadır. F_2 bölgesinin maksimum iyonizasyon yoğunluğu, iyonosferik davranışı belirlemek için uygun bir parametredir [129].

İyonosferin jeomanyetik fırtınalarla bağlantılı bozulmaları 80 yıldan beri araştırılmaktadır. Çok sayıda çalışma, jeomanyetik fırtınalar sırasında iyonosferin dinamik karakterine işaret etmiştir fakat iyonosferin dinamik yapısındaki değişimin kesin bir morfolojisi ortaya çıkmamıştır. Temel olarak, iyonlaşma yoğunluğu rahatsız koşullar sırasında artabilir veya azalabilir ve bu değişiklikler sırasıyla pozitif ve negatif iyonosferik fırtınalar olarak adlandırılır [130].

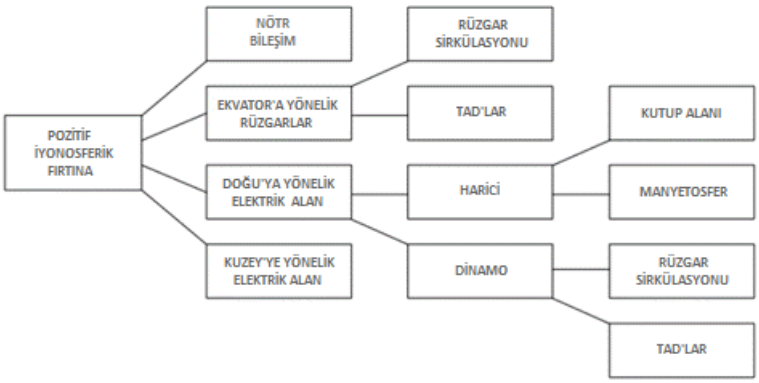
İyonosferik bir fırtınanın başlangıcında, iyonosferdeki jeomanyetik bozulmalar nedeniyle, fırtına kısa bir süre için pozitif hale gelecektir. Daha sonra negatif bir faz fırtınası haline gelecek ve elektron yoğunluğunun nötrleştiği bir geri kazanım aşamasına geri dönecektir.

Negatif iyonosferik fırtınaların, jeomanyetik bozulmalar sırasında termosferin ısınması nedeniyle termosferik bileşimdeki değişikliklerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bazı araştırmalarda ise titreşimle uyarılan nitrojenin iyonosferin negatif fırtınasını oluşturmada da önemli bir rol oynadığı işaret edilmektedir [131].

Pozitif iyonosferik fırtınaların mekanizmaları daha karmaşıktır. En sık ele alınan mekanizmalardan bazıları Şekil 6.1'de listelenmiştir. Orta ve alt enlemlerde, hızlı nüfus eden elektrik alanı ve bozulan rüzgâr dinamosu, elektrik alanlarının dalgalanmasına neden olacak, plazmayı $\vec{E} \times \overrightarrow{B}$ sürüklenmesi yoluyla yukarı ve aşağı doğru yönlendirecek, F_2 katmanını yukarı aşağı daha fazla kaldıracaktır. F_2 katmanının hareketi iyonosferde pozitif iyonosferik fırtınaları yaratabilir [132].

Negatif iyonosferik fırtınaların kaynağı iyi anlaşılmış olsa da pozitif iyonosferik fırtınalar için durum böyle değildir. Orta ve alt enlemlerde O/N_2 yoğunluk oranındaki yükseliş pozitif iyonosferik fırtınaları açıklamak için yeterli değildir. Pozitif iyonosferik fırtınaların iyonlaşmanın yukarı doğru taşınmasından kaynaklandığı bilinmektedir. Kutup enlemlerinde ani bir enerji enjeksiyonuna

yanıt olarak, orta enlemlerde iyi tanımlanmış bir pozitif iyonosferik fırtına gelişir. Bu yoğunluk artışının doğrudan nedeni, F katmanının aniden yükselmesidir. İyonlaşma üretimi ve kayıp oranlarının yükseklik bağımlılıkları dikkate alındığında, tabaka yüksekliğindeki bir artışın pozitif fırtına etkilerine yol açacağı kolayca anlaşılır [133]. Şekil 6.1'de ortam enlem bölgesi için iyonosferik fırtınaların pozitif fırtınalarına katkıda bulunan mekanizmalar gösterilmektedir.

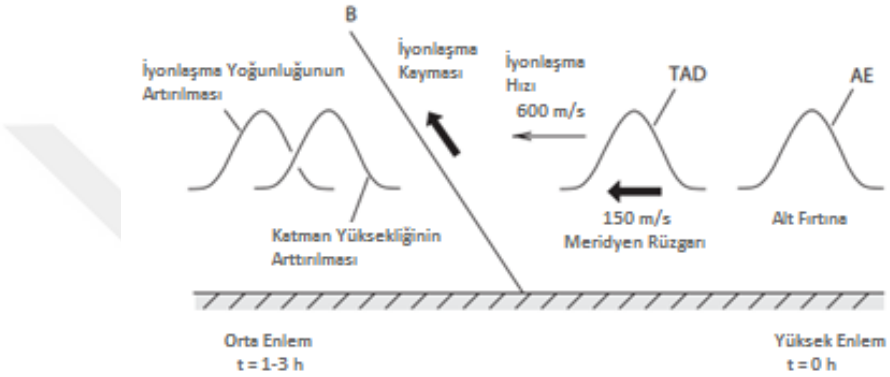


Şekil 6.1 Orta enlemlerde pozitif iyonosferik fırtınaların oluşumuna katkıda bulunan mekanizmalar [134]

Büyük ve henüz cevaplanmamış soru, iyonosferin bu yukarı doğru hareketine neyin sebep olduğudur. Burada bilimsel topluluk iki gruba ayrılmıştır. İlk topluluk rüzgârları, diğeri elektrik alanlarını birincil neden olarak savunuyor. Ekvatora doğru yönlendirilmiş rüzgârlar söz konusu olduğunda, iyonosferik plazmanın yukarı ve ekvatora doğru yönlendirilen manyetik alan çizgileri boyunca sürtünme kaynaklı sürüklenmesi beklenir. Doğuya yönelik bir elektrik alanı durumunda, iyonosferik plazmanın yukarıya ve kutba doğru yönlendirilen bir $\vec{E} \times \overrightarrow{B}$ kayması beklenir. Bu nedenle, yerel sürüklenme vektörünün ölçülmesi bize hangi mekanizmanın iş başında olduğunu söylemelidir [135]. Ne yazık ki, bu türden kesin ölçümler azdır. Doğru açıklamayı seçmenin bir başka yolu da bölgesel elektrik alanlarının ve meridyen rüzgârlarının doğrudan ölçülmesidir. Pozitif iyonosferik fırtına koşulları sırasında bu tür ölçümler daha da nadir görünmektedir. Rüzgârlar, pozitif iyonosferik fırtınaların birincil nedeni olarak tanımlansa bile, bu rüzgârların kaynağına ilişkin soru hala ortadadır. Şu anda, literatürde iki farklı rüzgâr pertürbasyonu türü tartışılmaktadır.

Birincisi, büyük ölçekli rüzgâr sirkülasyonundaki değişiklikler ve ikincisi, TAD'ler olarak adlandırılır [136]. İlk durumda, yüksek enlem üst atmosferin

fırtına kaynaklı ısınması, yüksek enlemlerden alçak enlemlere uzanan geniş ölçekli Hadley tipi bir rüzgâr sirkülasyonunu harekete geçirir. Bir manyetik alt fırtına sırasında enerji kutupsal üst atmosfere enjekte edilir. Bu ani enerji ilavesi, TAD'ları başlatır. Böyle bir TAD'nin önemli bir özelliği, orta şiddette ekvator yönlü rüzgârları taşımasıdır. Orta enlemlerde bu meridyen rüzgârları F_2 tabakasının yükselmesine neden olur ve bu da iyonlaşma yoğunluğunun artmasına neden olur [137]. Şekil 6.2'de TAD'nın neden olduğu kısa süreli bir pozitif iyonosferik fırtına oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 6.2 Pozitif iyonosferik fırtına gösterimi [138]

Öte yandan, pozitif iyonosferik fırtınaların birincil nedeninin elektrik alanları olduğu ortaya çıkarsa, hala bu alanların kaynağına ilişkin soruyla karşı karşıya kalınmaktadır [139]. İyonosfere dışarıdan mı empoze ediliyorlar yoksa alt iyonosferin dinamo bölgesindeki nötr rüzgârlar tarafından mı üretiliyorlar? Ve eğer dışarıdan empoze edilirlerse, yüksek enlemlerden alçak enlemlere mi yayılıyorlar yoksa iç manyetosferdeki kutuplaşma etkileri tarafından mı üretiliyorlar? Öte yandan, dinamo etkileri baskınsa, bunlar büyük ölçekli rüzgâr sirkülasyonundaki değişikliklerden mi yoksa seyahat eden atmosferik rahatsızlıklardan mı kaynaklanıyor? [140]. Açıkçası, Şekil 6.1'de listelenen birçok farklı olasılığın değerlendirilmesi, eş zamanlı elektrik alan ve rüzgâr ölçümlerini gerektirmektedir.

Jeomanyetik fırtınalar gerçekleşmeden önce, iyonosfer tabakasında değişimlere neden olabilecek bir fiziksel süreci tetiklediği ve bu sürecin iyonosferde beklenmedik aykırılıklara neden olduğu belirtilmiştir. Bu fiziksel süreç, elektrik alan, manyetik alan bozulma dalgaları ve elektromanyetik gibi farklı teoriler ile açıklanmaya çalışılmıştır.

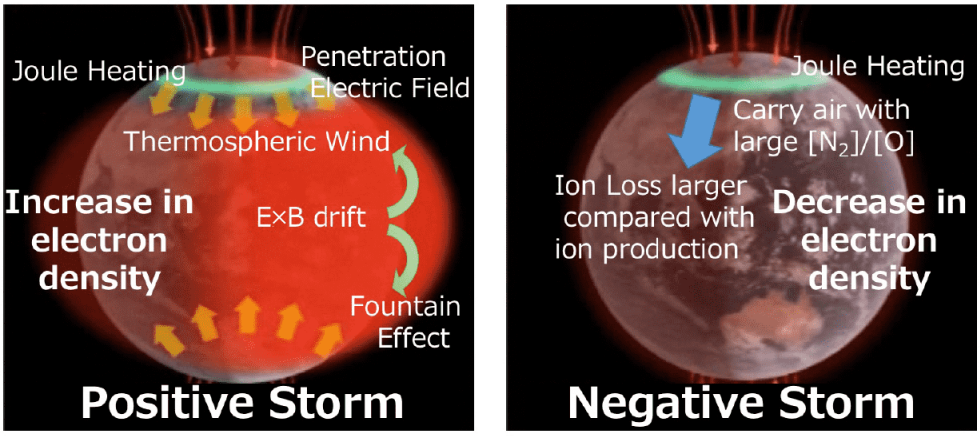
Literatürde yer alan çalışmalarda; iyonosfer üzerinde etkili olabilecek uzay-iklim koşulları ve çeşitli diğer varsayımlar ortaya konularak, bu olasılıkların elenebileceği bir süreçte meydana gelen bir fırtınanın öncesinde iyonosferde gerçekleşen değişimlerin jeomanyetik fırtına kaynaklı olabileceği şeklinde irdelemeler yapılmıştır. Şu ana kadar iyonosfer ve jeomanyetik fırtına arasındaki fiziksel süreci kesin olarak tanımlayan ve kanıtlayan bir çalışma bulunmamakla birlikte, süreç hakkında çeşitli görüşler ortaya atılmıştır. Bu yaklaşımlardan bazıları $\vec{E} \times \vec{B}$ sürüklenmesi ve manyetik alan dalgalanmalardır.

Fırtına öncesi tetiklenen elektrik alanın (E) iyonosfere nüfuz ettiği bölgede yerel manyetik alan (B) etkisiyle iyonizasyonda elektriksel alanın yönüne bağlı olarak yukarı veya aşağı yönlü oluşturduğu harekete $\vec{E} \times \vec{B}$ sürüklenmesi denir [141].

$\vec{E} \times \vec{B}$ sürüklenmesi teorisi, jeomanyetik fırtına-iyonosfer ilişkisini açıklaması açısından yeterli görülmemiş bir teoridir. Diğer bir yaklaşım, güçlü jeomanyetik fırtınalar öncesi oluşan manyetik alan dalgalarının iyonosferde değişime neden olduğudur. Bu teoriye göre manyetik alan dalgalanmaların, gerçekleşmesi yakın bir fırtınanın dış merkez ve çevresi üzerindeki iyonosferin yerel bir bölgesinin durağan olmayan Joule ısıtmasından kaynaklanır. Manyetik alan dalgaları troposferdeki çok sayıda fiziksel olayın yorumlanması ve iyonosferik plazmanın dinamiği için önemli bir rol oynamaktadır. Fırtına-iyonosfer arasındaki ilişkiyi açıklamaya çalışan teorilerin hemen hepsinde fırtına öncesi bir elektrik alan değişiminin varlığından bahsedilmektedir. Burada önemli hale gelen diğer bir soru, fırtına oluşumu öncesi elektrik alan değişimlerinin nasıl meydana geldiğidir. Konuyla ilgili yaklaşımlardan bazıları güçlü atmosferik elektrik alanları, pozitif yüklü delikler ve yarı-elektrostatik modeldir. Güçlü atmosferik elektrik alanların, yeryüzü üzerinde veya yakın bir bölgesinde meydana geldiği düşünülmektedir. Bu elektrik alanların oluşmasına neden olabilecek teorilerden biri, fırtına öncesi oluşan iyonlaşmadır. Fırtına öncesi iyonlaşma miktarında meydana gelen değişim, yer yüzeyinde büyük bir düşey yönlü elektrik alanı üreten yakın zemin atmosferini iyonize edebilir. Bu elektrik alan, iyonosferin alt katmanına nüfuz ederek jeomanyetik alan boyunca iyonosferin F_2 bölgesine iletilir ve fırtına başlangıcından önce $\vec{E} \times \overrightarrow{B}$ kayması etkisi ile iyonosferin dinamiğini ve elektron yoğunluk dağılımını değiştirebilir. Ekvatoryal bölgede meydana gelen fırtınalar için fırtına etki alanındaki doğu yönlü anormal elektrik alanlarının, plazmanın

yukarı (atmosfer) yönlü hareketiyle daha düşük O_2 ve N_2 yoğunluklarına sahip alana geçişine yol açtığını öne sürülmüştür. Sonuç olarak, iyonosferin F_2 katmanında O+ oranının azalmasıyla elektron yoğunluğunda ve ekvatoryal anomalide artış gözlenebilmektedir [142].

Şekil 6.3, iyonosferik bir fırtına meydana geldiğinde Dünya'nın iyonosferik durumunu göstermektedir; sol ve sağ paneller, F bölgesi elektron yoğunluğunun sırasıyla önemli bir artış ve düşüş yaşadığı "pozitif" ve "negatif" fırtınalara karşılık gelir.



Şekil 6.3 Pozitif ve negatif iyonosferik fırtınalar [143]

Negatif fırtınalara genellikle kutupsal termosfer ısıtıldıktan ve daha düşük enlemlere doğru genişledikten sonra atmosferik bileşimdeki değişiklikler neden olur. Öte yandan, pozitif fırtınalar, manyetosferden ve manyetosferik bir rahatsızlığın sonucu olarak ekvatora doğru termosferik rüzgâra nüfuz eden elektrik alanı nedeniyle iyonosferik tabakanın yükselmesinden kaynaklanır. Negatif bir fırtına meydana geldiğinde, F bölgesinin kritik frekansı azaldığından, iyonosfer tarafından normal olarak yansıyan radyo dalgaları frekanslarına bağlı olarak yansıtılmaz.

Bir "iyonosfer fırtınası", iyonosferdeki elektronların büyük bir kısmının bulunduğu F bölgesinde elektron yoğunluğunun önemli ölçüde azaldığı veya arttığı bir olgudur. Fenomenin, manyetosferde bir bozulma meydana geldiğinde meydana geldiği ve etkisinin, arka plan nötr atmosferinin (termosfer) durumundaki ve iyonosfere etki eden elektrik alanlarındaki bozukluklar gibi çeşitli işlemler yoluyla iyonosfere iletildiği bilinmektedir.

6.2 İyonosferik Fırtınaların Evreleri

Bir iyonosferik fırtınanın başlangıcında, iyonosferdeki jeomanyetik bozulmalar nedeniyle, fırtına kısa bir süre için pozitif hale gelecektir. Daha sonra, negatif bir faz fırtınası olacak ve elektron yoğunluğunun nötralize olduğu bir iyileşme aşamasına dönecektir.

6.2.1 Pozitif Aşama

İyonosferik fırtınanın olumlu aşaması ilk 24 saat kadar sürecektir. Bu aşamada iyonosferdeki, özellikle F_1 ve F_2 gibi daha yüksek rakımlı tabakalarda elektron yoğunluğu artacaktır. Pozitif fazdaki iyonlaşma, elektron yoğunluğunun artması nedeniyle daha az belirgin olacaktır. Büyük iyonosferik fırtınaların pozitif fazı sırasında, iyonosferik F bölgesinin yüksekliği artar, bu da yer radarları ve uydular ve GPS sistemi tarafından gözlemlenebilen jeomanyetik kutup üzerinde güneşe doğru yayılan plazma anomalisine neden olur. Pozitif fazlı iyonosferik fırtınalar daha uzun sürer ve kışın daha yaygındır.

6.2.2 Negatif Aşama

Bir iyonosferik fırtınanın negatif fazı, fırtınanın pozitif fazından hemen sonra ortaya çıkacak ve pozitif fazın TEC değerinin "sakin zaman referans seviyesinin altına" düşmesinden bir ila iki gün sonra devam edecektir. Negatif fazlar fırtınanın elektron yoğunluğunu azaltır. Ayrıca daha uzun sürelere yayılırlar ve yaz aylarında daha sık görünürler.

6.2.3 Kurtarma Aşaması

İyonosferik fırtınanın iyileşme aşaması, negatif faz sona erdikten sonra meydana gelir ve elektron yoğunluğunu nötralize eder.

Dünyanın iyonosferi, güneşin aşırı ultraviyole (EUV) radyasyonu ve manyetosferden enerjik parçacıkların çökelmesi nedeniyle üst atmosferin iyonlaşmasıyla oluşur. İyonosferdeki plazma yoğunluğu değişimleri, alt atmosfer ve manyetosferden gelen enerji girdisinden kaynaklanmaktadır. Güneye doğru güçlü gezegenlerarası manyetik alan (IMF) gündüz tarafı manyetopozuna ulaştığında, jeomanyetik fırtınaların ana fazının gelişmesine ve yüksek enlem iyonosferi ve manyetosferde plazma konveksiyonunun önemli ölçüde artmasına neden olur. Yüksek enlem plazma konveksiyonuyla ilgili kutupsal elektrik alanı,

orta enlem ve ekvator iyonosferine anında nüfuz eder. Artan plazma konveksiyonu, iç manyetosferde, alçak ve orta enlemlerde yerdeki jeomanyetik alanın H bileşenini baskılayan halka akımının gelişmesine yol açar. İç manyetosferdeki kısmi halka akımının artması nedeniyle orta enlem ve düşük enlem iyonosferinde ters bir konveksiyon elektrik alanı oluşur. IMF aniden güneyden kuzeye döndüğünde elektrik alanı 1-2 saat baskın hale gelir. Ayrıca, kutup bölgesindeki Joule ısınmasının artması nedeniyle termosferdeki nötr rüzgârlar, orta enlem ve alçak enlem iyonosferinde, bozucu dinamo alanı olarak bilinen başka bir elektrik alanı üretir. Bu nedenle, fırtınanın güçlendirdiği bu elektrik alanları ve nötr rüzgârlar, iyonosferdeki plazma yoğunluk dağılımını büyük ölçüde değiştirerek uydu konumlandırma ve navigasyonda artan hataya neden olur. Jeomanyetik fırtınaların ana aşaması sırasında, iyonosferdeki F bölgesinin tepe yüksekliğinin artmasıyla birlikte plazma yoğunluğunun artması, tutarsız bir saçılma (IS) radarıyla öğleden sonra-akşam sektörlerinde orta enlemlerde sıklıkla gözlemlenir [144].

Jeomanyetik fırtınaların toparlanma aşamasında, iyonosferdeki plazma yoğunluğu, fırtına zamanında batıya doğru elektrik alanlarındaki değişiklik, nötr rüzgârlar ve üst atmosferdeki nötr kompozisyon nedeniyle küresel olarak yüksek enlemlerden alçak enlemlere doğru azalır. Bu olguya negatif fırtına denir. Fırtına zamanı konveksiyonunun batıya doğru bileşeni ve aşırı kalkan elektrik alanları, negatif fırtınaya katkıda bulunabilir çünkü batıya doğru elektrik alanları, rekombinasyonun yüksek olduğu bölgede iyonosferik plazmayı taşır. Jeomanyetik fırtınaların iyileşme aşaması sırasında ekvatoral iyonizasyon anomalisi (EIA) yapısında açık bir azalma olduğu zaman gün ışığı Joule ısınmasıyla ilgili nötr rüzgârlar tarafından tahrik edilen dinamo rahatsızlığından kaynaklanan gündüz ekvatorunda doğuya doğru elektrik alanının azalması olarak yorumlanabilir. Orta enlem ΔTEC artışının gündüz ve akşam sektörlerinde iki tanımlayıcı yapıya sahip olduğu tespit edildi. Gündüz ve akşam ΔTEC artışlarının sırasıyla manyetosferik doğuya doğru elektrik alanı ve ekvatora doğru rüzgâr nedeniyle iyonosferin yüksek enlemlerden alçak enlemlere doğru yükselmesinden kaynaklandığı yorumları yapıldı. Bu yazıda, jeomanyetik fırtınaların ana ve toparlanma aşamaları sırasında iyonosferdeki küresel TEC değişimlerinin istatistiksel davranışını, güneş rüzgârı parametrelerinin, jeomanyetik indekslerin 2019-2023

yılları arasında meydana gelen 147 jeomanyetik fırtına olayı için TEC değerlerini ve orta enlemlerde jeomanyetik fırtınalara verilen TEC tepkisinin fırtına şiddetine olan bağımlılığını da araştırıyoruz. Ayrıca, mevcut istatistiksel analiz sonuçlarına dayanarak fırtına zamanındaki iyonosferik bozulmaları yaratan baskın fiziksel süreçlerin neler olduğuna da değinilmiştir.

7

İYONOSFERİK FIRTINA İNCELEME YÖNTEMLERİ

7.1 Yöntemler

İyonosferik fırtınaların rahatsızlıkları, yer tabanlı ve uzay tabanlı teknolojik sistemleri ve insan faaliyetlerini etkileyerek birkaç saatten birkaç güne kadar sürebilir. Bu nedenle, iyonosferik fırtınaların anlaşılması, iyonosferik varyasyonların modellenmesi ve tahmin edilmesinde büyük önem taşımaktadır. İyonosferik değişimler hem yer tabanlı hem de uydu tabanlı etki eden çok çeşitli süreçler aracılığıyla meydana gelir. TEC, özellikle manyetik fırtına dönemlerinde, iyonosfere ait durumu belirlemek için son dönemde yaygın olarak kullanılan bir parametredir. İyonosfere ait TEC değeri yer temelli ve Dünya yüzeyine çokça yayılmış olan GPS istasyonları ve uydular aracılığıyla kestirilmektedir. TEC değeri ayrıca yarı deneysel modeller olan Uluslararası İyonosfer Referans (IRI) ve NeQuick yardımıyla da tahmin edilmektedir.

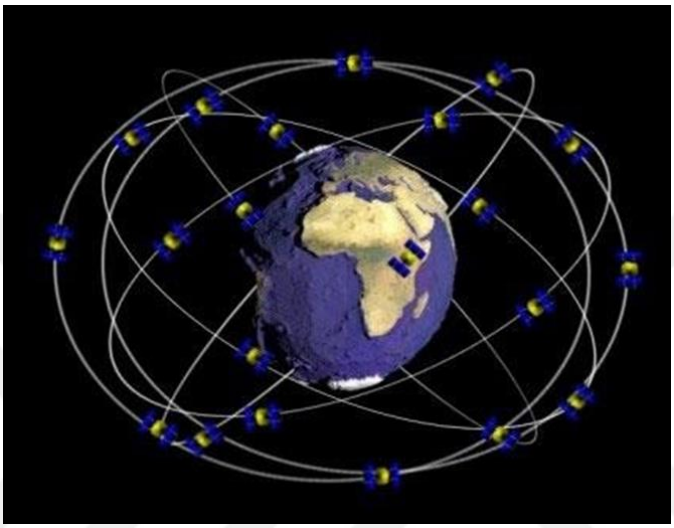
IRI, verilen konum, tarih ve saate göre 60-2000 km arasındaki yüksekliklerde elektron yoğunluğu başta olmak üzere TEC değerinin de içinde bulunduğu iyonosfere ait ilişkin çok sayıda parametre değerlerini sunabilmektedir.

NeQuick ise tek frekans kullanıcıları için iyonosferik gecikme düzeltmelerini hesaplamaya yardımcı olmak amacıyla ortaya çıkmış iyonosferik modeldir. Ayrıca güneş aktivitesiyle ilgili girdi değerlerine bağlı olarak analitik profillerden aylık ortalama elektron yoğunluğunu tahmin eden bir modeldir [145]. Literatürde en çok kullanılan yöntemler GPS ve yer tabanlı İyonosonda yöntemleridir. Bölüm 7.2 ve 7.3 ‘de detaylı olarak ele alınmaktadır.

7.2 GPS Yöntemi

Uydu tekniklerinden yararlanılarak yapılan ölçümlerde yüksek duyarlılık elde etmek için atmosferin söz konusu ölçümlere olan etkisinin bilinmesine gereksinim vardır. Bu etkiler Global Konumlama Sistemi (GPS) ölçülerinden yararlanarak büyük ölçüde giderilebilmektedir.

Günümüzde GPS, jeodinamik amaçlarla yoğun bir şekilde kullanılmaktadır. Yüksek duyarlılık isteyen bilimsel amaçlı çalışmalarda göreli statik konumlama yöntemi ve faz ölçüleri tercih edilmektedir. Bu ölçülerdeki en önemli hata kaynağı ise atmosferik gecikme etkisidir. Dolayısıyla, GPS ile elde edilen ölçülere çeşitli işlem ve hesaplamalar sonucu jeodinamik ve astronomik amaçlarla kullanılmadan önce mutlaka atmosferik düzeltmeler getirilmelidir [146]. Şekil 7.1'de GPS uydularının yüksek yörüngelerde Dünya çevresinde dolaşması resmedilmiştir.

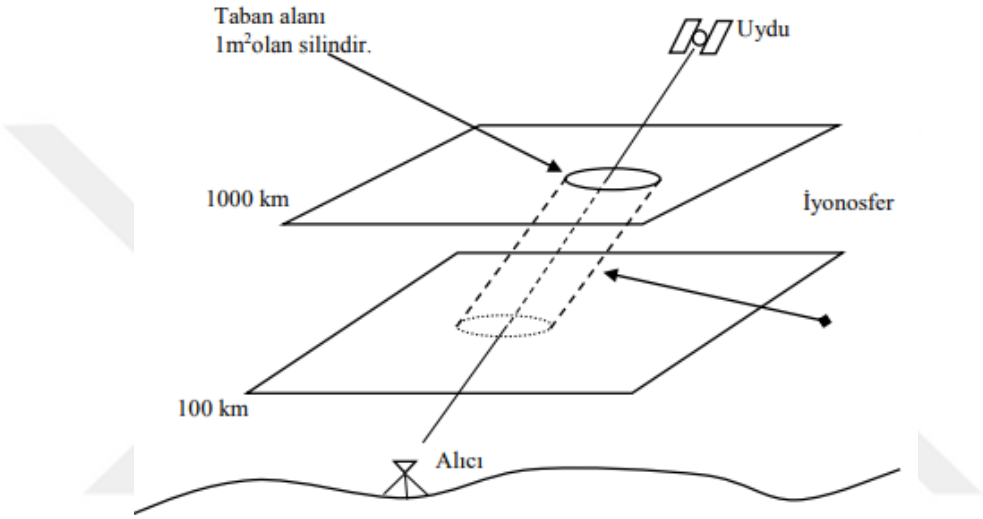


Şekil 7.1 GPS uydularının dağılımı [147]

TEC, GPS alıcısı ile her bir GPS uydusu arasındaki sinyal yolunda bulunan ve GPS sinyalinden elde edilen iyonosferdeki serbest elektronların göstergesi olarak da ifade edilmektedir**.** Bu değer genellikle taban alanı 1 m^2 olan silindirdeki toplam elektron sayısı $10^6 elektron/m^2$ = 1TECU birimi olarak değerlendirilir [148]. TEC'e etki eden değişkenler coğrafi konum, yerel zaman, mevsim, EUV radyasyonu değişkenliği ve manyetik aktiviteler olarak sıralanabilir. En küçük TEC değeri gece yarısında ve en büyük TEC değeri öğlen saatlerinde oluşmaktadır. Gece TEC değişimi elektron ve iyonların durumlarına göre yavaştır. En büyük TEC değeri genellikle öğleden önce ve en küçük TEC değeri gün doğumundan hemen önce ortaya çıkmaktadır. Bununla beraber güneş ışınları direkt ulaştığı için TEC değişimi kuzeyden güneye doğru artmaktadır. Herhangi bir operasyonel veya potansiyel radyo dalgalarının yayılımının kullanıldığı zaman gecikmesinin ölçülmesi uygulamalarında iyonosferden geçen sinyalin gecikmesine veya hızlanmasına sebep olan TEC düzeltmeleri, konum doğruluğunu arttırmak için dikkate alınması gereken bir parametredir [149].

İyonosferik TEC genellikle GPS uydularını kullanılarak taşıyıcı fazın uydudan alıcıya kadar olan gecikmelerinin karakterizasyonu ile belirlenir.

GPS uyduları, konumlandırma için iki farklı frekans olan L1 (1575.42MHz) ve L2 (1227.60MHz) frekanslarındaki sinyali çift frekansı alabilen donanımlı alıcılar için gönderirler. GPS uydularından gönderilen C/A ve P kod ölçüleri GPS sinyalinin uydudan çıkış zamanını taşımaktadır. GPS ölçüleri ile TEC değerlerinin belirlenmesi, iyonosferin yapısını anlamada kullanılan maliyeti düşük ve hızlı bir metottur [150]. Şekil 7.2'de TEC'in grafiksel gösterimi gösterilmektedir.



Şekil 7.2 Toplam elektron içeriğinin grafiksel gösterimi [151]

Kırıcılık indisi, atmosferi radyo sinyalleri açısından karakterize etmek için en önemli parametrelerin başında gelmektedir. Radyo sinyallerinin iyonosferdeki hareketi sırasında bu ortamdaki en büyük etkilerden biri de ortamın kırıcılık indisidir ve mutlaka tanımlanmalıdır. Appleton ve Hartree'nin çalışmaları neticesinde iyonosfere ait faz kırıcılık indisi n_p aşağıdaki (7.1) denkleminde tanımlanmıştır; [152].

$$n_p^2 = 1 - \frac{X}{1 - iZ - \frac{Y_T^2}{2(1 - X - iZ)} \pm [\frac{Y_T^4}{4(1 - X - iZ)^2} + Y_L^2]^{\frac{1}{2}}} \qquad (7.1)$$

GNSS'te kullanılan frekanslar için dünyanın manyetik alanını içeren terimlerin bir kısmı ve elektron çarpışmaları ihmal edildiğinde kırılma indisi (7.2) denkleminde gösterilmektedir;

$$N = 1 - \frac{X}{2(1 \pm Y_L)} \tag{7.2}$$

Dünyanın manyetik alanının boylamsal etkileri yok sayılıp gerekli düzeltmeler yapılırsa faz ölçüleri (f frekansındaki) için kırılma indisi denklem (7.3)'de ki gibi olur [153].

$$n_p = 1 - \frac{X}{2(1 \pm Y_L)} \tag{7.3}$$

7.3 İyonosfer İncelemesi için Yer Merkezli Teknikler

Uzun menzilli haberleşmede en çok kullanılan bantlardan biri de Yüksek Frekans (HF) bandıdır.

HF bant aralığındaki ($3 - 30$ MHz) radyo dalgaları, atmosferin katmanlarından biri olan iyonosferden yansır. Böylece birbirinden binlerce kilometre uzakta olan iki düğüm arasında bir iletişim bağlantısı kurulabilir.

Bu nedenle, tarih, saat, konum, güneş aktiviteleri gibi faktörlere bağlı olan iyonosfer durumunu karakterize etmek önemlidir. İyonosondalar bu amaç için kullanılır. İyonosondalar, HF bant radarı olarak kabul edilebilir, bu nedenle iyonosferik katman yükseklikleri, kritik frekanslar ve yansıma yükseklikleri arasındaki ilişki aracılığıyla gönderilen ve alınan sinyaller arasındaki zaman gecikmesi ölçülerek hesaplanabilir. İyonosonda istasyonlarının inşası maliyetlidir ve özel uzmanlık gerektirir. Bu yüzden, dünya çapında sınırlı sayıda istasyon vardır ve bunlar seyrek olarak dağıtılır [154].

İyonosondalar iyonosfere yüksek frekanslı işaret gönderirler, gönderilen işaretin frekansı artırılarak ölçümler alınır.

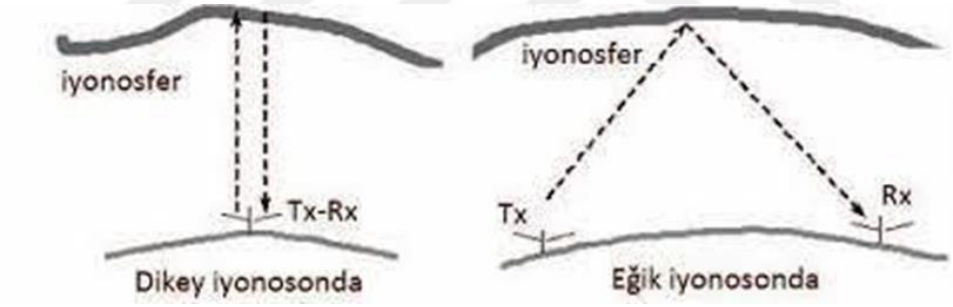
İşaretin gönderilme zamanı ile geri dönme zamanı arasındaki süre ölçülür. İyonogramlar ölçülen yükseklik ile gönderilen işaretin frekansı arasında bir ilişki kurulabilir. İyonogramlar ile görünen iyonosferik yükseklikler ve kritik frekanslar hesaplanabilir. İyonosfer yüksekliğinin tespiti için yerden yukarı radyo darbe işaretleri göndermek en iyi yöntemlerden biridir. Fakat bu yöntemle gönderilen işaretin geri dönüş süresini hesaplamak gerçek yüksekliği bulmak için uygun

değildir. Çünkü gönderilen işaret iyonosfer katmanı içinde yerde olduğundan daha yavaş ilerlemektedir [155].

İyonosondalar, radyo dalgalarını yatık bir açıdan iyonosfere gönderdiklerinde, kısa darbe treni biçimindeki radyo dalgaları iyonosferde kırınıma uğrar ve düzensiz biçimde saçılır. Saçılma doğrudan saçılma ve yerden yansıyarak saçılma olmak üzere iki farklı biçimde gerçekleşir.

İyonosonda, iyonosferi incelemek için kullanılan en güçlü yer tabanlı tekniktir. Teknik radar temeline dayanır. Hedefe doğru radyo işareti gönderilir ve yansıyan işaret incelenir. Bu yöntemde hedef iyonosferdeki elektronlardır. Her bir elektronun saçtığı enerji miktarı bilindiğinden geri dönen işaretin gücü elektron miktarını dolayısıyla elektron yoğunluğunu göstermektedir. Spektrumun genişliği iyonosferdeki sıcaklığın bir ölçüsüdür. Bu sıcaklık iyonlar ya da elektronlar için farklı olabilmektedir [156].

İyonosondalar Şekil 7.3'te gösterildiği gibi dikey ve eğik olmak üzere iki temel modda kullanılmaktadır.



Şekil 7.3 İyonosonda modları [157]

Dikey iyonosondalar çalışma alanı üzerinde bulunan, belirli bir alanı kapsayan iyonosfer tabakası ile ilgili bilgi vermektedir. Eğik iyonosondalar ise vericinin ve alıcının farklı konumlarda olduğu durumlarda kullanılmaktadır.

Literatürde daha önce birçok jeomanyetik fırtına ile ilgili iyonosfer-jeomanyetik fırtına etkileşiminin farklı yöntem ve veri kaynakları kullanılarak incelendiği çalışmalar yer almaktadır. [158] GPS-TEC verileriyle 15 günlük hareketli ortancalar ve çeyrekler açıklığı yöntemlerini kullanarak incelemiştir. Sonuç olarak, GPS-TEC verilerinin büyük fırtınalarda fırtına öncesi iyonosferik aykırılıkları algılamada başarılı olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan başka bir yılda [159] iyonosonda istasyonlarından elde ettikleri TEC ve f0F_2 verileriyle

iyonosfer-jeomanyetik fırtına ilişkisini incelemiştir. Çalışmalarda çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar yöntemi kullanılarak fırtınalarla ilişkisi olan aykırılıklara rastlanmıştır. Bizde bu aykırılıkları daha detaylı görebilmek adına çalışmamızda iyonosonda verilerini kullanmayı tercih ettik.

7.4 İyonosferik Parametreler

TEC değerinden sonra diğer önemli iyonosferik parametreler ise, f0F_2 ve hmF_2. İyonosferik fırtınalar üzerine yapılan araştırma, özellikle fırtına başlangıcından hemen sonra iyonosferik F_2 bölgesinin parametrelerinin (f0F_2, hmF_2) davranışının analizine odaklanır.

f0F_2, iyonosferik F_2 bölgesi tarafından yansıtılan ya da bu katmandan nüfuz eden radyo frekansını tanımlamak için kullanılır.

Bir radyo sinyali, frekansı f0F_2 değerinin üzerinde olduğunda yalnızca F_2 bölgesinden geçebilir. hmF_2 ise, F_2 bölgesinde maksimum elektron yoğunluğunun oluştuğu yüksekliği gösterir. Bu yükseklik, elektron içeriği ölçümleri için bölgesel tek katmanlı iyonosferik yüksekliği belirlemek adına önemlidir [160].

Tepe elektron yoğunlu (NmF_2) ise F_2 bölgesindeki en yüksek yoğunluk değerini gösterir. NmF_2 ve foF_2 arasında denklem (7.4) da görüldüğü gibi bir ilişki söz konusudur.

$$\mathrm{Nm}F_2/m^{-3} = 1.24x10^{10}\ (foF_2/MHz)^2 \tag{7.4}$$

İyonosferik parametreler (f0F_2, hmF_2, TEC) saatlik, günlük, mevsimsel ve yıllık değişimler göstermektedir [161]. Ayrıca bu parametreler uzay iklimi, doğal ve insan kaynaklı olaylar esnasında da belirli mertebede değişiklikler gösterir [162].

Literatürde orta enlemde ve ekvatoral enlemde meydana gelen TEC değişiminin sebep olduğu yüzdelik anomali değerlerinin ortalamaları ayrı ayrı hesaplandığında orta enlemde meydana gelen TEC anomalilerinin %50,4 TECU, ekvatoral enlemin ise %43.3 TECU olduğu hesaplanmıştır. Bu değişimler göz önüne alındığında orta enlemde meydana gelen iyonosferik TEC anomali değişimlerinin ekvatoral bölgeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Kutup bölgesinde ise elektron yoğunluğu değerleri ekvatordakine oranla bu bölgede daha düşüktür.

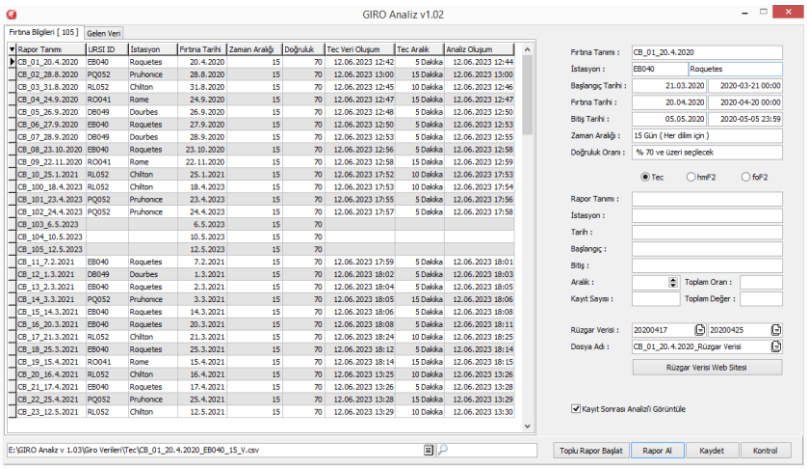
Ancak kısa dönemli iyonosferik değişimler Ekvator bölgesine göre daha fazladır [163].

Bu çalışmada iyonogram verileri kullanılarak orta enlem bölgesinde bulunan seçili istasyonlar için meydana gelmiş olan pozitif ve negatif fırtınaların iyonosfer bölgesinde yarattığı etkileri detaylı şekilde ele almak için Bölüm 8'de bahsedilen yöntemler kullanılarak incelenmiştir.

8
DATA VE METODOLOJİ

İçerisinde serbest halde çok sayıda elektron barındıran iyonosfer tabakası yansıtıcı özelliğinden dolayı sinyal bazlı uygulamalar için oldukça önemlidir. Diğer yandan jeomanyetik fırtınaların üst atmosferde olası sebep olabileceği değişimlerin tespit edilebilmesi açısından da önemli bir tabakadır. Uzay havası bozukluğunun iyonosfer üzerindeki etkilerini görebilmek için bu tez çalışması kapsamında 2019 Aralık ve 2023 Aralık yılları arasında dünya genelinde meydana gelen ve fırtına seviyeleri G1, G2, G3 ve G4 olan 147 adet jeomanyetik fırtınaya ilişkin iyonosferik TEC değişimleri Tablo 8.1'de adı geçen orta enlemde bulunan 5 Avrupa istasyonu için irdelendi. Söz konusu olası iyonosferik TEC değişimlerinin fırtına ile olan ilişkininin daha iyi yorumlanabilmesi amacıyla Kyoto ve Wind Nasa sitelerinden uzay iklim koşulları hakkında bilgiler alındı. Ayrıca f0F_2, TEC, hmF_2 ve NmF_2 değerleri iyonogram veri bilgi sitesi olan Lowell Giro sitesinden gerçek zamanlı elde edildi. Çalışmada fırtına öncesi ve sonrası anomalilerin tespit edilmesine yönelik istatistiksel yöntem uygulanmış ve sonuçları detaylı bir şekilde irdelenmiştir.

Uygulanan yöntemlerin daha pratik yapılması adına çalışma kapsamında RAD Studio ile yardımcı araç olarak hazırlanmış GIRO Analiz v1.02 adında program geliştirildi. Bu program sayesinde tez için kullanılan TEC verileri sayesinde istatistiksel metot ile iyonosferde meydana gelmiş olan anomaliler kolayca tespit edildi. İstenilen fırtınanın iyonosferik anomalisini görebilmek için istasyonu, tarih aralığını ve doğruluk oranı bilgilerini girdikten sonra excel üzerinden fırtına bilgilerini de içeren iyonosferik anomali grafikleri karşımıza çıkmaktadır. Bu grafiklere Bölüm 9'da yer verilmiştir. Şekil 8.1 bu çalışma kapsamında fırtına analizi için tasarlanmış olan program sayfasını göstermektedir.



Şekil 8.1 Program ekranı

TEC değerlerinin çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar yöntemi ile alt ve üst sınır değerleri fırtına anı, öncesi ve sonrası için elde edilmiştir. Toplamda 45 günlük TEC verisinin kullanıldığı bu çalışmada fırtına bölgesine ilişkin istatistiksel analizde kullanılacak özel bir k değeri belirlenmiştir. Bu değerin belirlenmesinden sonra uygulanan istatistiksel test sonucunda elde edilen pozitif ve negatif anomaliler verilmiştir. Yapılan analizler sonucunda jeomanyetik fırtınaların büyük bölümünde öncesi ve sonrası negatif veya pozitif anomaliler gözlemlenmiştir. İkinci yöntemde ise TEC değerlerinin Güneş ve jeomanyetik alan indislerine bağlı olarak değişimi analiz edilmiştir. 25. Güneş çevriminin artan fazının başlangıcı olan Aralık 2019 yılından 2023 yılının sonuna kadar olan zaman için çalışma kapsamında seçilen orta enlemde bulunan 5 istasyon için elde edilen TEC değerleri üzerinde Güneş ve jeomanyetik parametrelerin etkisi jeomanyetik fırtınaların oluşumuna göre regresyon modeli ile analiz edilmiştir.

Tablo 8.1 İstasyon bilgileri

ROME	RO041	41° 53′ 26″ 12° 29′ 39″
DOURBES	DB049	50° 05' 00" 4° 36' 00"
PRUHONICE	PQ052	50° 0′ 0″ 14° 34′ 1″
CHILTON	RL052	51° 26' 29" 1° 32' 42"
ROQUETES	EB040	36° 45′ 51″ 2° 36′ 54″

Bölüm 9 incelendiğinde, gözlemlenen iyonosonda verilerinde ortaya çıkan anomali grafikleri ele alındığında yatay sütun zamanı, dikey sütun ise TEC değerlerini göstermektedir. Fırtına öncesi ve sonrası elde edilen TEC değerleri istatistik teste tabi tutularak alt ve üst sınır değerleri belirlenmiştir.

$$LB = M - k(M - LQ) \tag{8.1}$$

$$UB = M + k(UQ - M) \tag{8.2}$$

(8.1) ve (8.2) denklemleri kullanılarak sırasıyla LB ve UB değerleri elde edilmiştir. Bu iki denklemde yer alan LB alt sınır TEC değerini, UB üst sınır TEC değerini, M ise medyan TEC değerini, LQ ve UQ alt ve üst çeyrek değerlerini ifade etmektedir. Bu işlemler için gerekli verilerin indirilmesi, analiz edilmesi gibi işlemler Delphi ortamında hazırlanan program ile elde edilmiştir.

TEC değerlerinin üst çeyreği aşması durumunda pozitif, alt çeyreğin altında kalması durumunda ise negatif fırtınaların oluştuğu bilinmektedir.

İyonosferik anomali grafiklerinde mavi renk iyonosferde meydana gelen negatif iyonosferik fırtınaların olduğu zamanlara, turuncu renk ise pozitif iyonosferik fırtınaların olduğu zamanlara karşılık gelmektedir.

İyonosferik fırtınaları incelemeden önce 25. Güneş çevriminde meydana gelmiş jeomanyetik fırtınaları belirleyip sınıflandırması yapıldı. Bunun için fırtına kökenleri araştırıldı.

Jeomanyetik indisler (Dst, Kp) ve Güneş indisleri (F10.7 cm) her fırtına için incelendi. İndis değerleri sonucunda fırtına seviyeleri belirlendi. Fırtına seviyelerine göre oluşan anomaliler kıyaslandı ve sonuç kısmında yorumlandı.

İyonosfer tabakası coğrafi konum, mevsimsel değişim, jeomanyetik etki, solar aktivite vs. gibi etkilere karşı değişim göstermektedir. Bu sebeple iyonosferin doğru şekilde modellenmesi önem arz etmektedir. Çalışmanın son kısmında indislerin fırtınaya olan etkisini istatistiksel açıdan görebilmek için regresyon modeli kullanıldı. Regresyon, bir model oluşturarak hem sayısal hem de kategorik veri değerlerini tahmin etmeyi amaçlar. Bu çalışmada, çok katmanlı algılayıcılara dayalı regresyon algoritmasının uygulanması ve veri seti üzerinde analizlerin gerçekleştirilmesi için RStudio programı kullanılmıştır. Regresyon genel tanımı,

değişkenler arasındaki ilişkiyi araştırmak ve modellemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir. Regresyon uygulamaları mühendislik, fen bilimleri, ekonomi, yönetim, yaşam ve sosyal bilimler dâhil olmak üzere birçok alanda yaygın kullanılan istatistiksel bir tekniktir. Yapılan analiz sonucunda değişkenler arasında bir regresyon ilişkisinin olup olmadığı uygun bir matematiksel denklem yazılarak kanıtlanmıştır.

Değişkenlerin türlerine, sayılarına ve dağılımlarına göre farklı regresyon modelleri bulunmaktadır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanı doğrusal regresyon modelidir.

TEC üzerinde Güneş ve jeomanyetik süreçlerin etkisini görebilmek için

Güneş parametreleri için;

$$\text{TEC} = \beta_0 + \beta_1 \text{ F10.7} + \beta_2 \text{ IMF} + \varepsilon_0 \quad (8.3)$$

Jeomanyetik parametreler için;

$$\text{TEC} = \beta_0 + \beta_1 \text{ Kp} + \beta_2 \text{ Dst} + \varepsilon_0 \quad (8.4)$$

Burada β_0 regresyon sabitini, $\beta_1$ve β_2 regresyon katsayılarını, F10,7 ve IMF (B_z) Güneş parametrelerini, Kp ve Dst jeomanyetik indisler ve ε_0 hata terimini ifade etmektedir.

Bu modelle kurulan çoklu regresyon denklemlerinden elde edilen sonuçların istatistiksel olarak geçerli ve anlamlı olabilmesi için regresyon belirleme katsayıları (R^2) elde edilmiştir.

Bu olasılık değerlerinin 0,05 değerinden küçük olması gerekmektedir. (8.3) ve (8.4) 'de gösterilen denklemler R Studio programı üzerinde modellenerek aşağıdaki grafikler elde edilmiştir. Bu modellemede fırtınanın meydana geldiği zamanlara evet sakin günlere ise hayır diyerek kategorik regresyon olan lojistik regresyon modeli üzerinden arasındaki bağlantı hesaplanmıştır. Lojistik regresyon, iki veri faktörü arasındaki ilişkileri bulmak için matematikten yararlanan bir veri analizi tekniğidir. Lojistik regresyon, daha sonra diğerine dayalı bu faktörlerden birinin değerini tahmin etmek için bu ilişkiyi kullanır. Tahminin genellikle evet ya da hayır gibi sınırlı sayıda sonucu vardır.

Anomalilerin uzay iklim koşulları kaynaklı olup olmadığının araştırılması adına güneş akısı (F10.7), jeomanyetik fırtına (Kp), gezegenlerarası manyetik alan (B_z) ve jeomanyetik aktivite (Dst) indisleri incelenmiş olup TEC anomalileri ile aralarındaki korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Çalışma sonucunda, jeomanyetik fırtınaların öncesinde uzay iklim koşullarından bağımsız oluşan TEC anomalileri gözlenmiş ve fırtına öncülü olarak kabul edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, çalışmanın iyonosferik TEC araştırma çalışmalarına katkı sağlaması beklenen ve jeomanyetik fırtına tahmin modelleri için TEC anomalilerinin de dikkate alınması gerekliliğini gösteren örnek bir çalışmadır.

R studio aracılığıyla yapılan regresyon modeli aşağıdaki kodlama şeklinde yapılmış ve model kurulup sonuçlanmıştır. Modele göre bağımlı değişken fırtınanın olduğu zamanlar bağımsız değişkenler ise güneş ve jeomanyetik fırtına indisleri olan B_z, Kp, Dst ve F10.7 indisleridir. Şekil 8.2 de kurulan modelin örnek olan 6 adet zamanını gösteren veri seti gösterilmektedir.

	Tarih	Saat	BZ	Kp	Dst	F10.7	Strom
	<dttm>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<dbl>	<fct>
1	2020-01-01 00:00:00	0	-0.4	3	-6	69.4	neg
2	2020-01-01 00:00:00	1	0.8	3	-1	69.4	neg
3	2020-01-01 00:00:00	2	-0.2	3	3	69.4	neg
4	2020-01-01 00:00:00	3	0.1	0	5	69.4	neg
5	2020-01-01 00:00:00	4	1.7	0	7	69.4	neg
6	2020-01-01 00:00:00	5	0.4	0	10	69.4	neg

Şekil 8.2 Örnek veri seti

Aralık 2019 – Aralık 2023 yılları arasında seçilen veri setinde toplam 35.064 tane veri yer almaktadır. Bu veriler aşağıdaki şekilde numerik olarak modellenmiştir.

```
tibble [35,064 x 7] (S3: tbl_df/tbl/data.frame)
 $ Tarih: POSIXct[1:35064], format: "2020-01-01" ...
 $ Saat : num [1:35064] 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 ...
 $ BZ   : num [1:35064] -0.4 0.8 -0.2 0.1 1.7 0.4 -1.8 -3.2 -2.8 -1.5
 $ Kp   : num [1:35064] 3 3 3 0 0 0 0 0 0 7 ...
 $ Dst  : num [1:35064] -6 -1 3 5 7 10 11 8 3 2 ...
 $ F10.7: num [1:35064] 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4 69.4
 ...
```

Şekil 8.3 Örnek veri seti

Sonrasında veri setinin özeti Şekil 8.4' de çıkarılmıştır. Burada her değişken için maksimum minimum değer, çeyrek değer ve medyan değer belirlenmiştir. Fırtınanın olduğu zamanlar Dst değerinin eksi olduğu zamanlara fırtına var yani pozitif denilmiş Dst değerinin pozitif olduğu saatlerde fırtınanın olmadığı

zamanlara negatif denmiştir. Toplam veri setinde 2910 tane pozitif 32154 tane negatif fırtına var olduğu belirlenmiştir.

```
> summary(VS_01012020_31122023)
     Tarih                 Saat                BZ
 Min.   :2020-01-01   Min.   : 0.00   Min.   :-32.40
 1st Qu.:2020-12-31   1st Qu.: 5.75   1st Qu.: -1.60
 Median :2021-12-31   Median :11.50   Median : -0.10
 Mean   :2021-12-31   Mean   :11.50   Mean   : 41.89
 3rd Qu.:2022-12-31   3rd Qu.:17.25   3rd Qu.:  1.60
 Max.   :2023-12-31   Max.   :23.00   Max.   :999.90
       Kp              Dst               F10.7         Strom
 Min.   : 0.00   Min.   :-212.000   Min.   : 67.4   neg:32154
 1st Qu.: 7.00   1st Qu.: -15.000   1st Qu.: 74.3   pos: 2910
 Median :13.00   Median :  -6.000   Median : 98.7
 Mean   :16.39   Mean   :  -8.255   Mean   :110.6
 3rd Qu.:23.00   3rd Qu.:   1.000   3rd Qu.:141.5
 Max.   :83.00   Max.   :  42.000   Max.   :999.9
```

Şekil 8.4 Veri seti özeti

Regresyon modelini eğitim ve test verisi olarak ayırmak eğitim setinde eğitebilmeyi, değerleri tahmin etmek için kullanabilmeyi, sonra bu öngörülen değerleri test setinde oturan gerçek değerlerle karşılaştırabilmeyi sağlar. Bunun için toplam veri setinin %80 i eğitim verisi geri kalan %20 si test verisini oluşturur.

Aşağıda kurulan modele göre yıldızlar değişkenlerin modele olan anlam katkısını göstermektedir. Modelde F10.7 değerinin modele olan katkısının en düşük olduğu Şekil 8.5'te gösterilmektedir.

```
Call:
glm(formula = Strom ~ BZ + Kp + Dst + F10.7, family = binomial,
    data = egitim_veri)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.4791  -0.3151  -0.1885  -0.1268   3.2427

Coefficients:
             Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -5.2453446  0.0980622 -53.490  < 2e-16 ***
BZ          -0.0008636  0.0001381  -6.252 4.04e-10 ***
Kp           0.0751000  0.0024599  30.530  < 2e-16 ***
Dst         -0.0613771  0.0018813 -32.624  < 2e-16 ***
F10.7        0.0014487  0.0006463   2.242    0.025 *
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Şekil 8.5 Test verisi modeli

Burada Ho RED %95 güven aralığında modelin anlamlılığını test etmek için modele katkısı en az olan güneş indisi değeri F10.7 değerini çıkarıp modeli tekrardan kurduğumuz zaman modelin anlamlılığı %93 değerinde çıkmış olup model anlamlı olarak kurulmuştur. Beklenen sonuç modelde çıkmış olup fırtınanın oluşumuna olan katkısı en az olan güneş indis değeri F10.7 en çok katkısı olan B_z indis değeri olmuştur. Jeomanyetik indis değerlerinde fırtınanın oluşumuna katkısı Dst ve Kp indislerinin eşit oranda olduğu tespit edilmiş ve model anlamlı olarak kurulmuştur. Fırtınaların seviyelerinin ve oluşumlarının tespit edilip incelenmesinde bu indis değerlerinin katkısının modelin anlamlılığına göre değerlendirilmesi gerekmektedir.

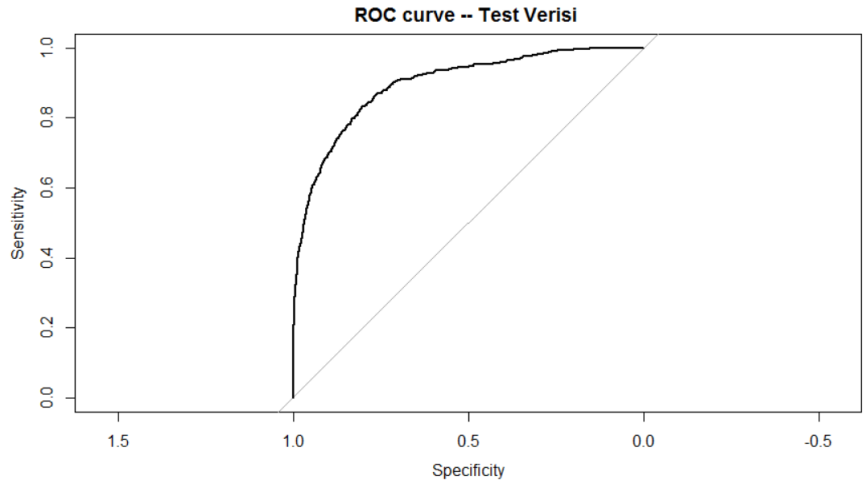
```
Call:
glm(formula = Strom ~ BZ + Kp + Dst, family = binomial, data =
i)

Deviance Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.4794  -0.3149  -0.1894  -0.1278   3.2451

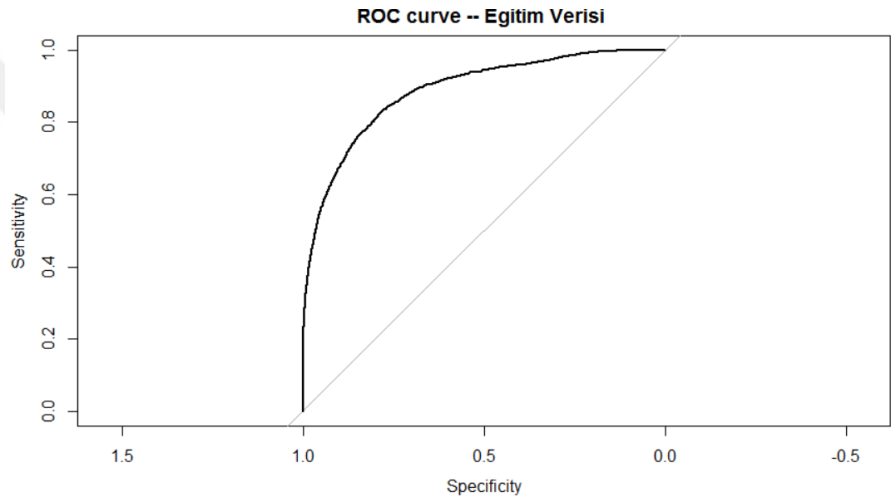
Coefficients:
             Estimate Std. Error z value Pr(>|z|)
(Intercept) -5.0908712  0.0683674 -74.463  < 2e-16 ***
BZ          -0.0008205  0.0001369  -5.992 2.07e-09 ***
Kp           0.0753077  0.0024597  30.617  < 2e-16 ***
Dst         -0.0619573  0.0018704 -33.126  < 2e-16 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

Şekil 8.6 Test verisi modeli

Değişkenler arasındaki ilişkiyi anlayabilmek için değişkenler arasında doğrudan bir ilişki olup olmadığı, değişkenler arasında ilişki bulunuyorsa bu ilişkinin ne kadar güçlü olduğu aşağıda elde edilen eğitim ve test verisi eğri grafikleri ile anlaşılmaktadır. Elde edilen modelin sonuçları doğrultusunda çıkan eğri grafiklerinin kesiştiği noktanın 1 değerinde 90 derece olması modelin tam anlamlı olduğunu göstermektedir. Şekil 8.7 ve Şekil 8.8' de yer alan ROC eğri grafikleri modelin %93 olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.



Şekil 8.7 Test verisi ROC eğrisi



Şekil 8.8 Eğitim verisi ROC eğrisi

Bu çalışma, iyonosferin f0F_2, hmF_2 ve TEC parametrelerini tahmin etmek için derin öğrenme algoritmalarından olan lojistik regresyonunun potansiyel kullanımını göstermeyi amaçlamıştır. Aynı zamanda bu yöntemin kullanılmasının gerekçesi, derin öğrenme algoritmalarının literatürde kabul edilen diğer modeller gibi iyonosferik parametre kestirimi için kullanımını yaygınlaştırma hedefidir.

9
ELDE EDİLEN SONUÇLAR

25. Güneş çevriminin başlangıcından Aralık 2023 yılına kadar olan farklı seviyelerdeki 147 tane farklı kökenlere sahip jeomanyetik fırtınaların orta enlem bölgesinde yer alan 5 istasyon için iyonosferde neden olduğu pozitif ve negatif iyonosferik fırtınalar bu bölümde grafikler ile gösterilmektedir. 111 tane G1 seviyesinde, 26 tane G2 seviyesinde, 6 tane G3 ve 4 tane G4 seviyesine sahip jeomanyetik fırtınalar olmak üzere fırtına anında fırtına öncesi ve sonrasında farklı TEC değerlerine ulaşmış negatif ve pozitif fırtınalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Fırtına kökenlerine göre iyonosferde yarattıkları farklı etkilere sahip iyonosferik fırtınalar belirlenmiştir. Oluşan jeomanyetik fırtınaların kökenleri, seviyeleri ve fırtınaların meydana geldiği gün ve saat Tablo 9.1'de listelenmiştir.

Tablo 9.1 Jeomanyetik fırtına listesi

Tarih	Seviye	Köken	Kp	F10.7 (sfu)	Dst min (nT)	Dst maks (nT)	Saat (UT)	İstasyon
20.4.2020	G1	CME	5	68,0	-59	20	13:00	Roquetes
28.8.2020	G1	CME	5	71,5	-20	5	17:00	Pruhonıce
31.8.2020	G1	CME	5	70,5	-34	-13	01:00	Chilton
24.9.2020	G2	CME	6	74,2	-40	-4	09:00	Roma
26.9.2020	G1	SF	5	72,9	-50	-13	04:00	Dourbes
27.9.2020	G1	CME	5	74,4	-45	-17	22:00	Roquetes
28.9.2020	G1	CME	5	74,1	-57	-17	04:00	Dourbes
23.10.2020	G1	CME	5	71,0	-23	31	23:00	Roquetes
22.11.2020	G1	CME	5	85,0	-38	-14	09:00	Roma
25.1.2021	G1	CME	5	74,8	-33	3	10:00	Chilton
7.2.2021	G1	CME	5	71,0	-32	5	11:00	Roquetes
1.3.2021	G2	CME	6	73,0	-58	16	07:00	Dourbes
2.3.2021	G1	CME	5	74,0	-33	-3	23:30	Roquetes
3.3.2021	G1	CME	5	75,0	-39	-5	07:00	Pruhonıce

Tablo 9.1 Jeomanyetik fırtına listesi (devamı)

14.3.2021	G1	CME	5	74,5	-43	-9	06:00	Roquetes
20.3.2021	G2	CME	6	74,5	-45	42	10:00	Roquetes
21.3.2021	G1	CME	5	74,5	-34	-8	01:00	Chilton
25.3.2021	G1	CME	5	74,8	-25	-4	03:00	Roquetes
15.4.2021	G1	CME	5	76,0	-14	20	08:00	Roma
16.4.2021	G1	CME	5	75,0	-48	16	21:00	Chilton
17.4.2021	G1	CME	5	75,5	-54	-20	06:00	Roquetes
25.4.2021	G1	CME	5	79,0	-41	-16	05:00	Pruhonıce
12.5.2021	G3	CME	7	76,5	-56	26	15:00	Chilton
20.5.2021	G1	CME	5	74,0	-34	8	18:00	Dourbes
26.5.2021	G1	CME	5	91,0	0	40	09:00	Pruhonıce
15.6.2021	G1	CME	5	77,9	-19	27	21:00	Pruhonıce
2.8.2021	G1	CME	5	76,8	-38	19	20:00	Roquetes
28.8.2021	G1	CME	5	91,7	-79	-21	01:00	Roquetes
17.9.2021	G1	CME	5	74,0	-64	10	22:00	Chilton
10.10.2021	G1	CME	5	84,2	-29	13	23:00	Roquetes
12.10.2021	G2	CME	6	83,1	-63	-28	15:00	Roma
2.11.2021	G1	CME	5	95,5	-12	15	05:00	Chilton
3.11.2021	G2	CME	6	87,5	-18	26	23:30	Pruhonıce
4.11.2021	G4	CME	8	92,5	-105	-1	14:00	Roma
30.11.2021	G1	CIR	5	87,5	-28	24	23:30	Roquetes
19.12.2021	G1	SF	5	112,0	-36	26	23:00	Roma
8.1.2022	G1	CME	5	99,0	-14	25	23:00	Roquetes
14.1.2022	G2	SF	6	107,0	-91	14	23:00	Roquetes
15.1.2022	G1	CME	5	112,0	-73	-19	01:00	Roquetes
18.1.2022	G1	CME	5	111,0	-34	-16	23:00	Roquetes
19.1.2022	G1	CME	5	102,0	-44	-8	04:00	Roquetes
3.2.2022	G1	CME	5	123,0	-66	6	11:00	Dourbes
4.2.2022	G1	CME	5	126,0	-61	4	21:00	Roma
10.2.2022	G1	CME	5	115,0	-60	23	20:00	Dourbes
20.2.2022	G1	SF	5	91,5	-14	8	07:00	Roma
22.2.2022	G1	SF	5	93,5	-32	0	08:00	Pruhonıce

Tablo 9.1 Jeomanyetik fırtına listesi (devamı)

5.3.2022	G1	CME	5	118,5	-56	6	22:00	Roquetes
6.3.2022	G1	SF	5	114,0	-46	-25	03:00	Chilton
12.3.2022	G1	CME	5	123,0	-51	-13	07:00	Roma
13.3.2022	G2	CME	6	121,5	-85	-3	23:30	Roquetes
14.3.2022	G2	CME	6	113,0	-85	-26	01:00	Roma
31.3.2022	G1	CME	5	240,0	-18	22	08:00	Chilton
2.4.2022	G1	CME	5	145,0	-46	-11	07:00	Roquetes
10.4.2022	G3	CME	7	102,0	-48	12	08:00	Dourbes
14.4.2022	G2	CME	6	104,0	-81	15	23:00	Roma
15.4.2022	G1	SF	5	111,0	-71	-8	01:00	Chilton
27.4.2022	G1	SF	5	144,0	-26	21	19:00	Dourbes
27.5.2022	G1	CIR	5	117,0	-38	34	23:30	Roquetes
28.5.2022	G1	CIR	5	104,5	-63	-21	08:00	Roma
13.6.2022	G1	SF	5	135,0	-5	15	18:00	Roma
25.6.2022	G1	CIR	5	112,0	-48	-8	23:30	Dourbes
26.6.2022	G1	CIR	5	105,0	-47	-13	01:00	Roquetes
2.7.2022	G1	CME	5	105,0	-54	7	11:00	Chilton
7.7.2022	G1	CIR	5	125,0	-81	42	23:00	Roquetes
8.7.2022	G1	CME	5	135,0	-74	-13	01:00	Roma
19.7.2022	G1	CME	5	149,0	-62	23	08:00	Dourbes
21.7.2022	G1	CME	5	125,0	-24	14	23:00	Dourbes
23.7.2022	G1	CME	5	115,0	-23	-1	20:00	Chilton
7.8.2022	G2	CME	6	119,0	-30	22	23:30	Pruhonıce
8.8.2022	G1	CME	5	116,5	-59	-24	08:00	Roma
17.8.2022	G3	CME	7	126,0	-50	25	23:30	Roquetes
18.8.2022	G1	CME	5	119,0	-49	-27	15:00	Chilton
19.8.2022	G1	CME	5	107,0	-39	-8	01:00	Roquetes
3.9.2022	G1	CME	5	125,5	-35	7	16:00	Dourbes
4.9.2022	G2	CME	6	131,0	-72	-1	17:00	Roma
5.9.2022	G1	CME	5	133,0	-60	-30	17:00	Roquetes
27.9.2022	G1	CME	5	135,0	-28	17	17:00	Roquetes
2.10.2022	G1	CME	5	154,0	-30	10	23:30	Chilton

Tablo 9.1 Jeomanyetik fırtına listesi (devamı)

3.10.2022	G2	CME	6	156,0	-37	-11	04:00	Pruhonıce
15.10.2022	G1	CME	5	114,0	-25	1	01:00	Pruhonıce
22.10.2022	G1	CME	5	104,0	-76	13	19:00	Dourbes
29.10.2022	G1	CME	5	133,0	-43	-8	09:00	Roquetes
3.11.2022	G1	CME	5	123,0	-58	-26	23:00	Roquetes
7.11.2022	G1	SF	5	133,0	-92	13	18:00	Roma
28.11.2022	G1	CME	5	104,0	-39	-13	06:00	Roquetes
30.11.2022	G1	CME	5	108,0	-46	-7	20:00	Roquetes
1.12.2022	G1	CME	5	116,0	-42	-24	11:00	Pruhonıce
7.12.2022	G1	CIR	5	144,0	-63	-2	18:00	Dourbes
4.1.2023	G1	CME	5	145,0	-2	-61	10:00	Roma
15.1.2023	G1	CME	5	227,0	-22	-58	14:00	Pruhonıce
15.2.2023	G1	CME	5	170,0	0	-69	18:00	Roquetes
16.2.2023	G1	CME	5	160,0	-18	-53	17:00	Dourbes
26.2.2023	G2	CME	6	160,0	16	-65	23:00	Pruhonıce
27.2.2023	G3	CME	7	160,0	-50	-132	13:00	Pruhonıce
28.2.2023	G2	CME	6	160,0	-50	-100	02:00	Roquetes
15.3.2023	G2	CME	6	135,0	-10	-53	23:00	Pruhonıce
23.3.2023	G3	CME	7	150,0	24	-163	03:00	Dourbes
24.3.2023	G4	CME	8	157,0	-64	-163	03:00	Pruhonıce
30.3.2023	G1	CME	5	140,0	19	-23	17:00	Dourbes
18.4.2023	G1	CME	5	155,0	29	-3	23:00	Chilton
23.4.2023	G4	CME	8	136,0	-8	-165	22:00	Pruhonıce
24.4.2023	G4	CME	8	135,0	-56	-212	06:00	Pruhonıce
6.5.2023	G2	CME	6	155,0	16	-75	06:00	Roquetes
10.5.2023	G1	CME	5	170,0	36	-27	23:00	Pruhonıce
12.5.2023	G1	CME	5	152,0	17	-18	20:00	Pruhonıce
20.5.2023	G2	SF	6	174,0	-17	-57	12:00	Dourbes
21.5.2023	G2	CME	6	168,0	-5	-38	11:00	Roquetes
22.5.2023	G1	SF	5	166,0	-3	-40	03:00	Roquetes
15.6.2023	G1	CIR	5	157,0	20	-41	00:00	Roquetes
16.6.2023	G2	CIR	6	163,0	-41	-72	10:00	Pruhonıce

Tablo 9.1 Jeomanyetik fırtına listesi (devamı)

25.6.2023	G1	CME	5	158,0	159	-57	11:00	Pruhonıce
14.7.2023	G1	CME	5	187,0	-3	-43	07:00	Dourbes
17.7.2023	G1	CME	5	185,0	-11	-48	12:00	Dourbes
26.7.2023	G1	CME	5	173,0	-5	-52	09:00	Dourbes
5.8.2023	G2	CME	6	181,0	-33	-93	07:00	Roquetes
2.9.2023	G1	CME	5	134,0	0	-58	13:00	Pruhonıce
3.9.2023	G1	CME	5	133,0	-8	-35	02:00	Roquetes
12.9.2023	G1	CME	5	155,0	31	-79	23:00	Dourbes
13.9.2023	G1	CME	5	145,0	-19	-62	01:00	Roquetes
18.9.2023	G1	CME	5	155,0	20	-73	20:00	Roquetes
19.9.2023	G2	CME	6	168,0	-37	-85	03:00	Dourbes
24.9.2023	G2	CME	6	175,0	5	-45	23:30	Roquetes
25.9.2023	G1	CME	5	172,0	0	-69	03:00	Roquetes
26.9.2023	G1	CME	5	168,0	-20	-58	13:00	Dourbes
5.10.2023	G1	CME	5	156,0	3	-40	04:00	Chilton
21.10.2023	G1	CME	5	121,0	-13	-82	08:00	Pruhonıce
26.10.2023	G1	CME	5	125,0	10	-33	22:00	Roquetes
29.10.2023	G1	CIR	5	135,0	-12	-49	11:00	Chilton
4.11.2023	G1	CME	5	152,0	14	-58	23:00	Roquetes
5.11.2023	G3	CME	7	151,0	-11	-165	22:00	Dourbes
6.11.2023	G2	CME	5	145,0	-63	-127	01:00	Roquetes
7.11.2023	G1	CME	5	144,0	-30	-70	01:00	Chilton
13.11.2023	G1	CME	5	132,0	0	-42	03:00	Pruhonıce
22.11.2023	G1	CME	5	185,0	-33	-65	08:00	Dourbes
25.11.2023	G2	CME	6	172,0	-18	-99	20:00	Roquetes
5.12.2023	G2	SF	6	137,0	-7	-34	13:00	Roquetes
6.12.2023	G1	SF	5	125,0	-16	-30	18:00	Pruhonıce
8.12.2023	G1	CME	5	130,0	0	-16	22:00	Roquetes
9.12.2023	G1	CME	5	127,0	-5	-18	17:00	Pruhonıce
10.12.2023	G1	CME	5	125,0	0	-10	08:00	Dourbes
11.12.2023	G2	CME	5	122,0	7	-9	05:00	Roquetes
12.12.2023	G1	CME	5	122,0	12	-26	20:00	Chilton

Tablo 9.1 Jeomanyetik fırtına listesi (devamı)

13.12.2023	G1	CME	5	130,0	1	-27	18:00	Chiton
14.12.2023	G1	CME	5	150,0	-27	-81	10:00	Roquetes
15.12.2023	G1	CME	5	139,0	-4	-34	02:00	Chilton
20.12.2023	G1	CME	5	190,0	-17	-34	04:00	Pruhonıce
31.12.2023	G1	CIR	5	140,0	10	-4	21:00	Chiton

İyonosferde uzay iklim koşullarından kaynaklanan herhangi bir iyonosferik fırtınaların olup olmadığını belirlemek için TEC verileri, çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar istatistiksel yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Bu yöntemde birinci çeyrek (Alt Çeyrek (LQ)), ortanca (Medyan (M)) ve üçüncü çeyrek (Üst Çeyrek (UQ)) değerleri belirlenmiştir. İlk 15 gün için elde edilen bu değerler 16. gün için sınır değer oluştururken, 2-16 gün için elde edilen değerler ise 17. gün için sınır değer olarak kullanılmıştır.

TEC için ortalama ve standart sapmalarla normal dağılım varsayımıyla, M, LQ veya UQ için beklenen değer sırasıyla m (ortalama) olmuştur [164]. Denklem (8.1) ve Denklem (8.2) de yer alan formüller ile bu değerler hesaplanmıştır. 8 saate karşılık gelen TEC verileri üst sınırı aşarsa pozitif fırtına günü, alt sınırı aşarsa negatif fırtına günü olarak adlandırılmıştır.

Çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar istatistiksel metot sayesinde TEC anomali hesabı yapılarak elde edilen sonuç verilerine göre ilgili tarih için istasyon belirlenmiş olup iyonosfer tabakasında oluşan negatif ve pozitif iyonosferik fırtınalar tespit edilmiştir. Meydana gelme sebeplerine göre oluşan iyonosferik fırtınalar sınıflandırılmıştır. CME, CIR ve güneş patlaması sonucunda oluşan iyonosferik fırtınaların farkları iyonosonda verileri sayesinde belirlenerek tespit edilmiştir. Fırtınaların seviyelerinin belirlenmesi için ilgili jeomanyetik ve güneş indis verilerinden faydalanarak jeomanyetik fırtınaların G ölçeği elde edilmiştir. Omnı Web sitesi aracılığı ile jeomanyetik ve güneş indis grafikleri oluşturulmuştur. İyonosferdeki değişimleri daha detaylı ele alıp incelemek için fırtınaların meydana gelmediği sakin zaman günleri de incelenerek meydana gelmiş olan anomaliler ele alınmıştır. TEC değerleri dışında iyonosferik parametreler olan iyonosfer yüksekliği, F_2 bölgesinin kritik frekansı ve Denklem (4.9) formülü sayesinde kritik frekans değerine bağlı hesaplanan iyonosfer tabakasındaki tepe elektron yoğunluk değerleri hesaplanıp,

Jeomanyetik fırtınalar, CME'lerden, güneş rüzgârlarından veya güneş patlamalarından gelen yüksek konsantrasyonlarda elektrik yüklü parçacıkların, Dünya'nın atmosferiyle etkileşime girmesiyle oluşmaktadır. Bu fırtınaların sıklığı, güneş lekesi döngüsüyle birlikte artar veya azalır. Jeomanyetik fırtınalar, güneş maksimum sırasında daha çok meydana gelir ve çoğunluğu CME tarafından yönlendirilir. Jeomanyetik fırtınalar Dst indisindeki değişikliklerle tanımlanmaktadır ve boyutu Dst indisinin ölçüsüne göre orta, şiddetli veya olağanüstü fırtına olarak sınıflandırılmaktadır. (Tablo 5.1) Jeomanyetik fırtına esnasında iyonosferin TEC değeri artar ve uydulardan sinyal yayılmasında gecikmelere yol açabilir. Radyo iletişimi jeomanyetik fırtınalara karşı hassastır. İyonosfer, fırtınalar sırasında ısındığı ve bozulduğu için radyo iletişimi, GPS iletişimi, uydu iletişimi gibi uzaya bağlı hizmetlerin işleyişi ve elektrik dağıtım şebekeleri bozulabilir. Jeomanyetik fırtına ne kadar güçlü olursa, bu bozulmalar o kadar şiddetli ve uzun süreli olabilir.

Güneş patlamaları, Güneş yüzeyinin yakınında gözlenen ve Güneşin dış atmosferinde biriken manyetik enerjinin aniden salınımı ile gerçekleşen yoğun radyasyon patlamalarıdır. Güneş patlamasının üç aşaması vardır ve bu aşamaların süresi bazen bir saat kadar uzun olabilirken bazen de birkaç saniye kadar kısa olabilir. Bir patlamanın sıcaklığı 10-100 milyon Kelvin arasında değişebilir. Güneş patlamalarının meydana gelme sıklığı, 11 yıllık Güneş döngüsüne denk gelir ve minimum ve maksimum dönemlerinde doğru orantılı olarak patlamaların sayısı değişir.

Güneş'in koronasından manyetik radyasyonla birlikte plazmanın dışarı atılması olan manyetik enerji ile yüklü bir CME, Dünyanın manyetik alanı ve atmosferi ile etkileşime girerek 25. Güneş çevrimi başlangıcından (Aralık 2019 – Aralık 2023) ayı içerisinde meydana gelmiş olan 147 tane jeomanyetik fırtınanın içerisinden 125 tanesinin oluşmasına neden olmuştur.

Güneşin manyetik alanındaki karmaşık etkileşimler sonucu Güneş'in yüzeyinde meydana gelen ani enerji patlamalarına güneş patlamaları denir. 25. Güneş çevrimi içerisindeki 4 yıl boyunca 11 tane jeomanyetik fırtına güneş patlamaları sonucu meydana gelmiştir.

Korotasyon Etkileşim Bölgeleri denilen CIR, sabit bir hızlı güneş rüzgârı akışının çevredeki yavaş güneş rüzgârı ile etkileşimi ile heliosferin alçak ve orta enlem bölgelerinde üretilen uzun süreli büyük ölçekli plazma yapılarının oluşması sonucu ortaya çıkan sıkıştırılmış plazma ve manyetik alanlara yol açar. İncelenen periyot içerisinde 11 tane jeomanyetik fırtına CIR etkileşim bölgeleri sebebi ile meydana gelmiştir.

Negatif ve pozitif iyonosferik fırtınaların gücünü belirlemekte kullanılan denklemler aşağıda sırasıyla (9.1) ve (9.2) denklemlerinde verilmiştir.

$$I_{NIS} = 10log\ \frac{N_o}{N_{min}} \tag{9.1}$$

$$I_{PIS} = 10log\ \frac{N_{max}}{N_O} \tag{9.2}$$

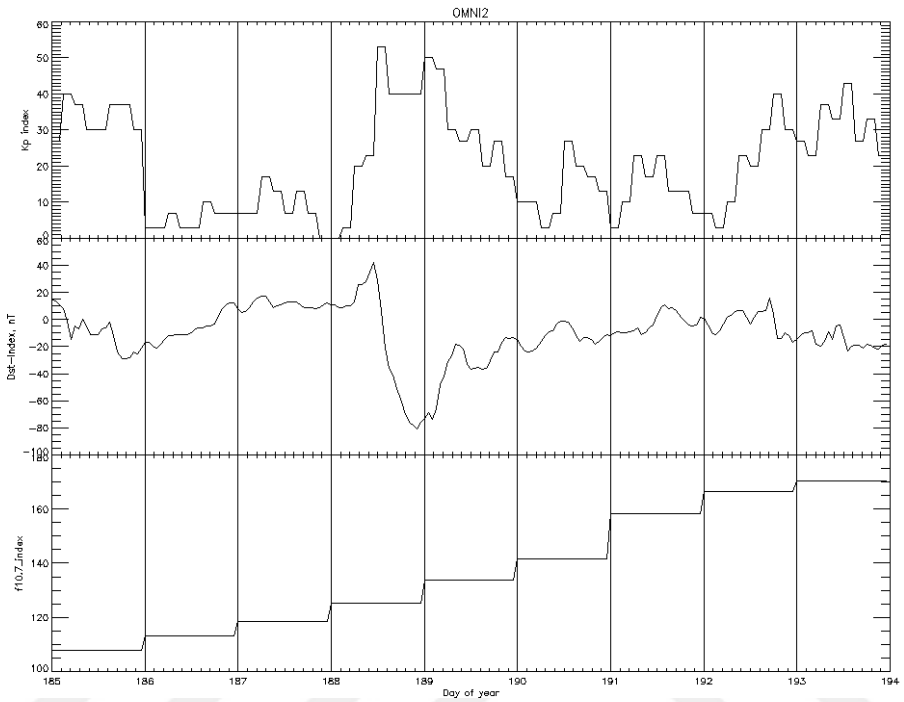
N_o Değeri sakin zamanda tepe elektron yoğunluğu ortalama değerini N_{min} fırtına zamanı minimum N_{max} fırtına zamanı maksimim tepe elektron yoğunluğu değerlerini göstermektedir [165].

Buna göre 07.07.2022 (G1) tarihinde Roquetes istasyon verilerine göre negatif iyonosferik fırtına gücü 2,22 pozitif iyonosferik fırtına gücü 5,14 olarak hesaplanmıştır. 20.05.2023 (G2) Dourbes istasyon verisine göre negatif iyonosferik fırtına gücü 5,53 pozitif iyonosferik fırtına gücü 1,48 olarak hesaplanmıştır. 4.11.2021 (G4) Roma istasyon verisine göre negatif iyonosferik fırtına gücü 6,08 pozitif iyonosferik fırtına gücü 2,96 olarak hesaplanmıştır. 16.06.2023 (G2) Pruhonıce istasyon verisine göre negatif iyonosferik fırtına gücü 6,5 pozitif iyonosferik fırtına gücü 0,93 olarak hesaplanmıştır. 12.05.2021 (G3) Chilton istasyon verisine göre negatif iyonosferik fırtına gücü 2,47 pozitif iyonosferik fırtına gücü 2,38 olarak hesaplanmıştır.

Farklı seviye, köken ve istasyon verisine göre incelenen farklı zamanda meydana gelmiş jeomanyetik fırtınaların bazılarının iyonosfer tabakasında yarattığı etkiler aşağıda ele alınıp incelenmiştir. Geri kalan fırtınalar çalışma içerisinde bahsi geçen metot ile analiz edilip her bir fırtına için 13 adet elde edilen grafikler çalışma için tasarlanan elektronik olan proje dosyası içerisinde resim formatı şeklinde yer almaktadır. Diğer fırtınalar için bulunan sonuçlar aşağıda yer alan istasyon verilerine göre benzer sonuçlar göstermiştir.

İlk olarak fırtınaların sınıflarını tespit etmek için x ekseni günleri y ekseni fırtına indekslerini gösteren grafikler elde edildi.

Şekil 9.1 güneş ve jeoamanyetik indis olan Kp Dst ve F10.7cm verilerini göstermektedir.

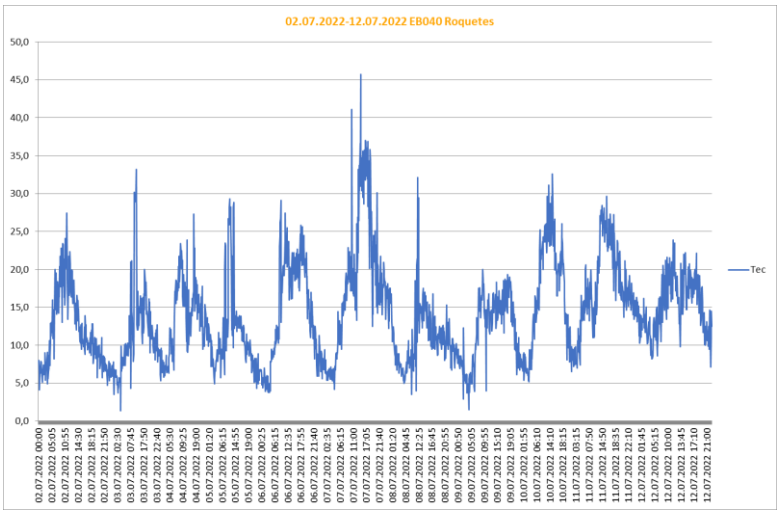


Şekil 9.1 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği

07.07.2022 tarihinde güneş akısı değeri 125 sfu değerine Dst manyetik alan değeri pozitif değer olan 42 nT dan negatif değer olan -81 nT değerine düşmüştür. Dst değerinde yaklaşık 120 nT değerinde bir değişim meydana geldiği görülmektedir. Dst değerinin pozitif değerden aniden negatif değere düşüşü grafikte dikkat çekmektedir. Kp değeri 5 değerine ulaşmıştır. Bu incelenen fırtınanın G1 ölçeğinde düşük seviyeleri bir fırtına olduğunu bize göstermektedir.

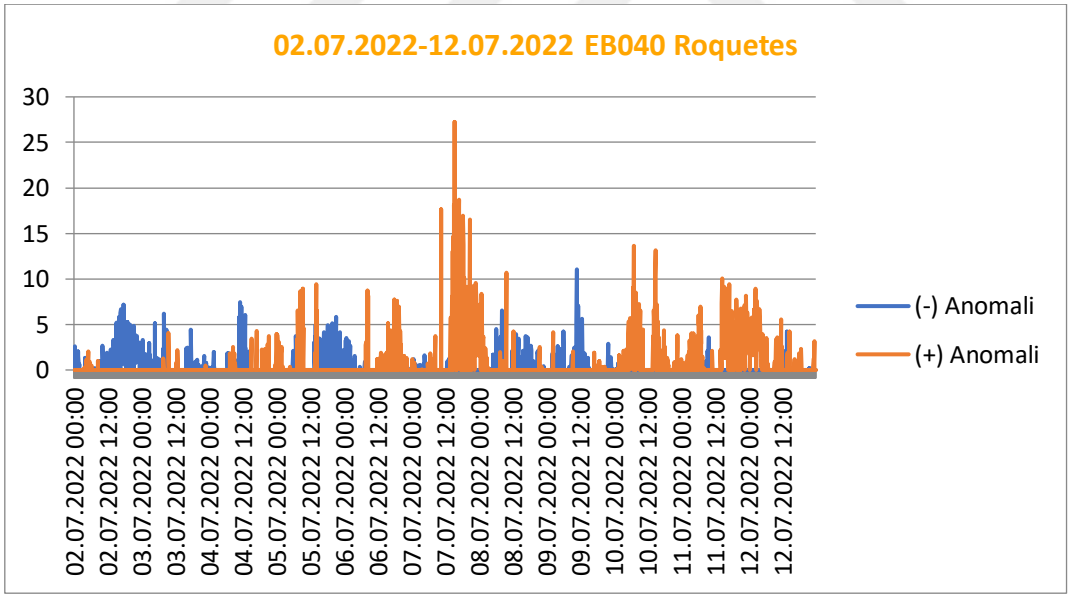
İlk olarak G1 seviyesine sahip olan CIR kökenli 07.07.2022 tarihinde saat 23:00 da meydana gelmiş olan jeomanyetik fırtınanın iyonosfer tabakasında yarattığı TEC değeri Şekil 9.2'de gösterilmektedir.

Elden edilen grafiklerde x ekseni tarih zamanlarını y ekseni ise ilgili grafiklerin değerlerini göstermektedir.



Şekil 9.2 07.07.2022 Roquetes istasyon TEC değişimi

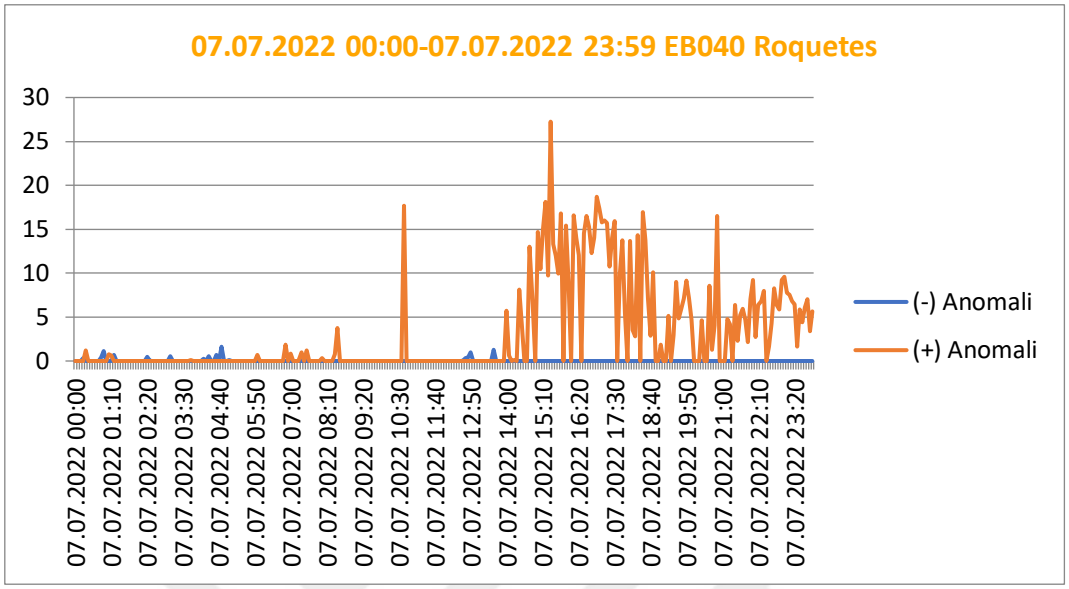
TEC değeri jeomanyetik fırtına günü saat 15:25 te maksimum değer olan 45,7 TECU değerine ulaşmıştır. Fırtına gece vakti meydana gelmiştir. Fırtına ana faz oluşumundan önce başlangıç faz zamanında TEC değerinde ani sapma meydana gelmiştir. Şekil 9.3'te çeyrek açıklık tabanlı kayan ortancalar istatistiksel metot sonucu sakin ve fırtına zamanı günlerin anomali değişimi gösterilmektedir.



Şekil 9.3 02.07.2022-12.07.2022 TEC anomali grafiği

Fırtına öncesi ve sonrası sakin günlerde pozitif ve negatif anomali değerleri maksimum 13 TECU değerine çıkmışken fırtına günü pozitif iyonosferik fırtına çoğunlukta ve uzun süreli meydana gelmiş olup maksimum değer olan 27,25 TECU değerine ulaşmıştır.

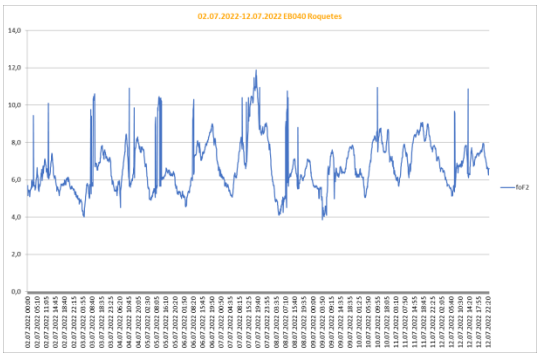
Şekil 9.4'te jeomanyetik fırtına gününde meydana gelmiş olan negatif ve pozitif iyonosferik fırtına oluşumu orta enlem bölgesinde bulunan Roquetes istasyon verilerine göre gösterilmektedir.



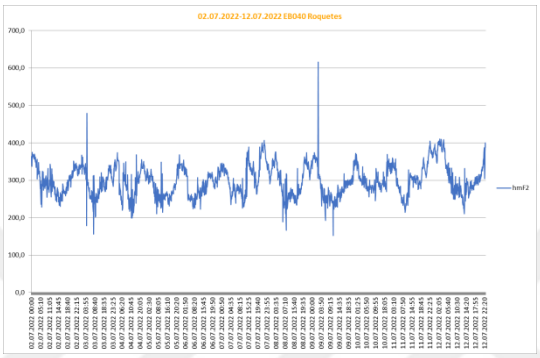
Şekil 9.4 07.07.2022 İyonosferik fırtına değişim grafiği

G1 seviyesine sahip CIR kökenli jeomanyetik fırtına iyonosferde uzun süreli ve elektron yoğunluğu değerinin fazla olduğu pozitif iyonosferik fırtınalar oluşturmuştur. 0,42-1,62 TECU değerine sahip kısa süreli negatif iyonosferik fırtınaları meydana getirmiştir. Fırtınanın ana faz zamanında TEC değeri sabit değerde pozitif iyonosferik fırtınalar gösterirken öncesinde TEC değerinde yükseliş yaratmıştır.

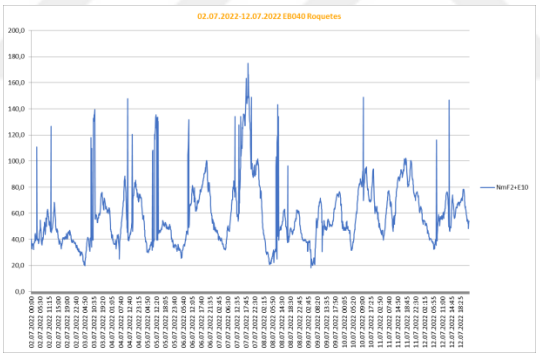
Şekil 9.5'te iyonosferik parametre değişimleri gösterilmektedir. İyonosferik parametre değişimi fırtınanın iyonosferde yaratacağı etkilerin şiddetini görmemiz için yardımcı olan ve bakılması gereken parametrelerdir. Bu parametrelerin fırtına günlerinde ve fırtına zamanının öncesi ve sonrasında değişiklik göstermesi beklenir. NmF_2 değerinin f0F_2 değeri ile doğru orantılı olarak değişmesi ve hmF_2 değerinin fırtına olduğu zamanlarda artan km değerine sahip olması beklenir.



(a)



(b)



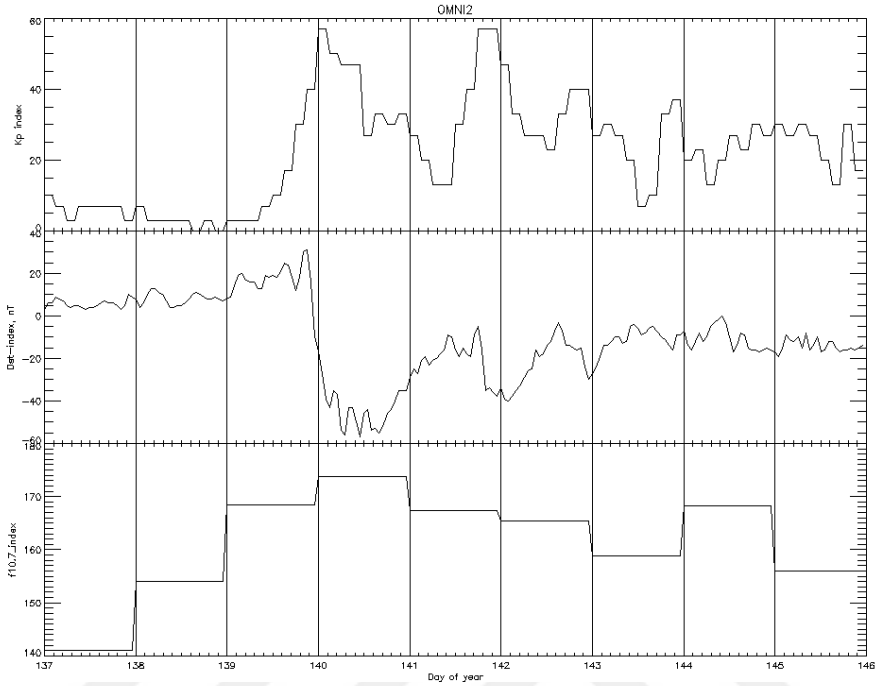
(c)

Şekil 9.5 07.07.2022 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)f0F_2, (b)hmF_2, (c)NmF_2

Kritik frekans değeri fırtına günü saat 19:00 da maksimum değer olan 10,1 MHz değerine, tepe elektron yoğunluğu ise aynı saat içerisinde maksimum 174,9 değerine ulaşmıştır. F_2 tabakası yüksekliği fırtına günü yaklaşık 190,0 km değerlerinden aniden maksimum 375,0 km değerine ulaşmış olduğu görülmektedir.

Diğer fırtınamızda 20.05.2023 tarihinde meydana gelmiş olan G2 seviyesinde Güneş patlaması sonucunda oluşmuş bir jeomanyetik fırtınanın iyonosferik

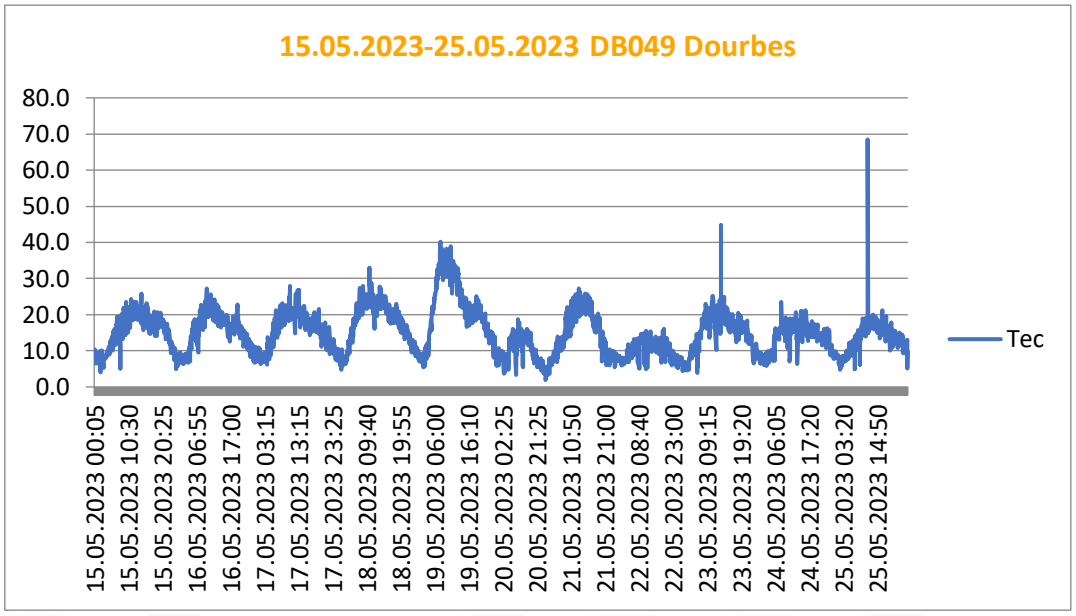
fırtınaya olan etkisi ele alınmıştır. Şekil 9.6 20.05.2023 tarihinde meydana gelmiş olan jeomanyetik fırtınanın güneş ve jeomanyetik fırtına indis değişimini ve sınıflandırmasını göstermektedir.



Şekil 9.6 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği

20.05.2023 tarihinde güneş akısı değeri 174 sfu değerine Dst manyetik alan değeri negatif değer olan -17 nT dan negatif değer olan -57 nT değerine düşmüştür. Dst değerinde yaklaşık 40 nT değerinde bir değişim meydana geldiği görülmektedir. Kp değeri 6 değerine ulaşmıştır. Bu incelenen fırtınanın G2 ölçeğinde orta seviyeleri bir fırtına olduğunu bize göstermektedir.

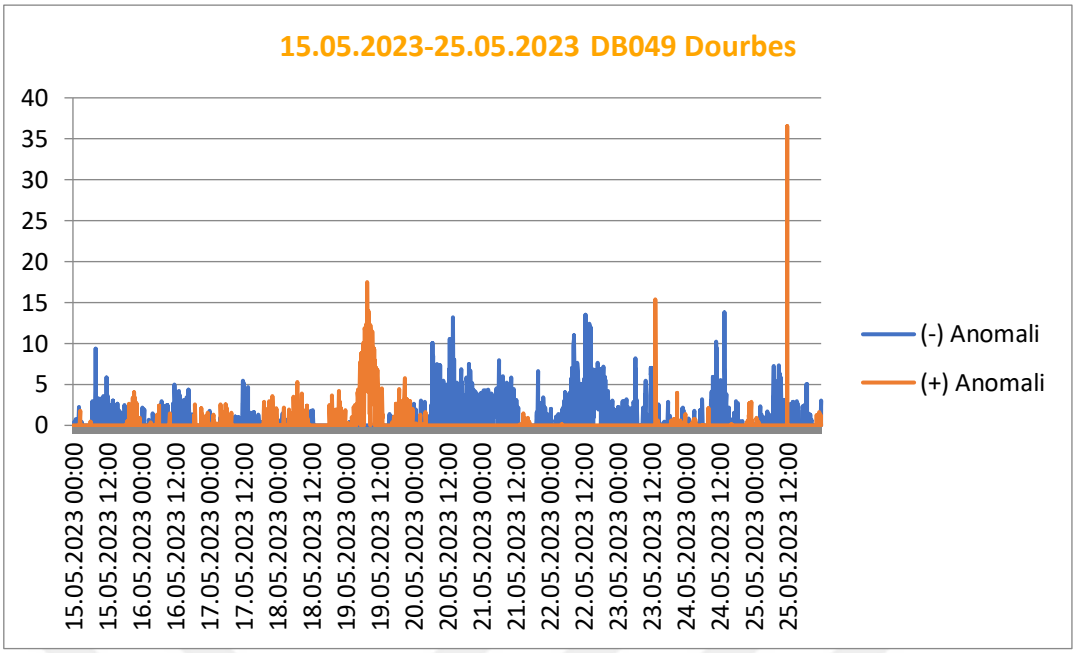
İlk olarak G2 seviyesine sahip olan güneş patlaması sonucu 20.05.2023 tarihinde saat 12:00 da meydana gelen jeomanyetik fırtınanın iyonosfer tabakasında yarattığı TEC değeri Şekil 9.7'de orta enlem bölgesinde yer alan Dourbes istasyon verilerine göre gösterilmektedir.



Şekil 9.7 20.05.2023 Dourbes istasyon TEC değişimi

TEC değeri jeomanyetik fırtına günü saat 10:20 te maksimum değer olan 18,8 TECU değerine ulaşmıştır. Fırtına öğlen vakti 12:00 zamanında meydana gelmiştir. Roquetes istasyon verisine göre Dourbes istasyonunda fırtınanın şiddetinin fazla olmasına rağmen daha az seviyede bir TEC değerinde artış gözlemlenmiştir. Bu durumda diğer çalışmalarımızda fırtınaların kökenlerine ve seviyelerine göre bağlılığının yanında verilerini kullandığımız istasyonların enlem ve boylam coğrafi konumlarını dikkate alarak yorumlanması hedeflenmektedir.

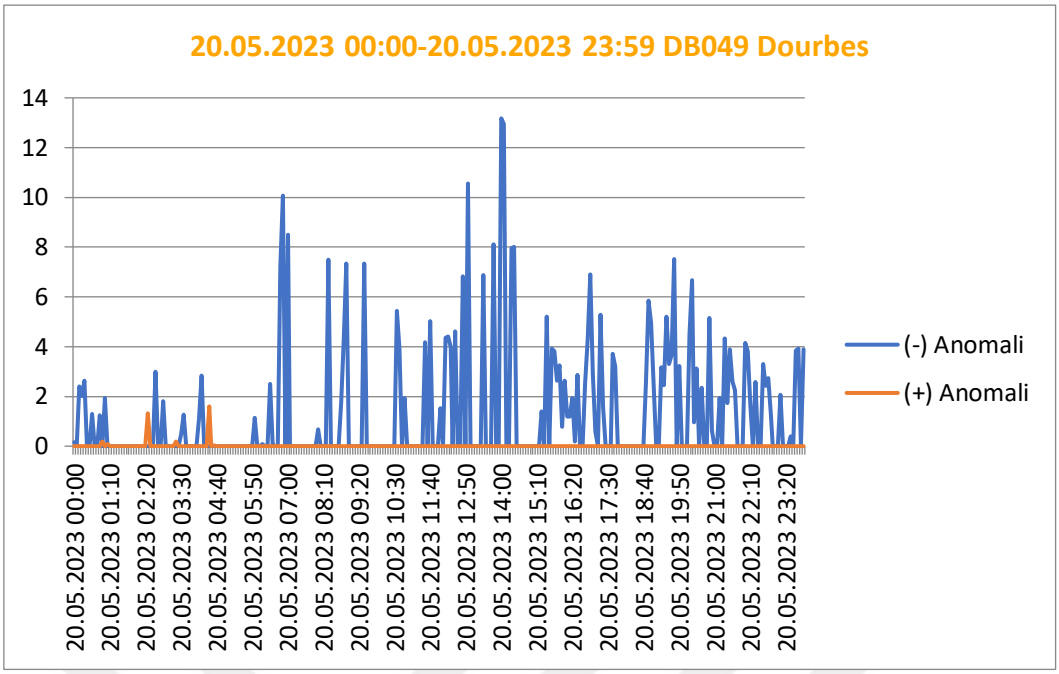
Şekil 9.8'de istatistiksel metot sonucu sakin ve fırtına zamanı günlerin anomali değişimi gösterilmektedir.



Şekil 9.8 15.05.2022-25.05.2022 TEC anomali grafiği

Fırtına öncesi ve sonrası sakin günlerde pozitif ve negatif anomaliler maksimum 35 TECU değerine çıkmışken fırtına günü negatif iyonosferik fırtına çoğunlukta ve uzun süreli meydana gelmiş olup maksimum değer olan 13,17 TECU değerine ulaşmıştır. Fırtınadan 5 gün sonraki TEC değerindeki artış Güneş tutulması deprem gibi farklı faktörlere bağlı olarak değişmiş olması tahmin edilmektedir. Dourbes istasyon verisindeki TEC değerindeki değerin Roguetes istasyonuna göre düşük olmasının nedeni meydana gelmiş olan iyonosferik fırtınaların negatif iyonosferik fırtına oluşmasına sebep olduğunu açıklar.

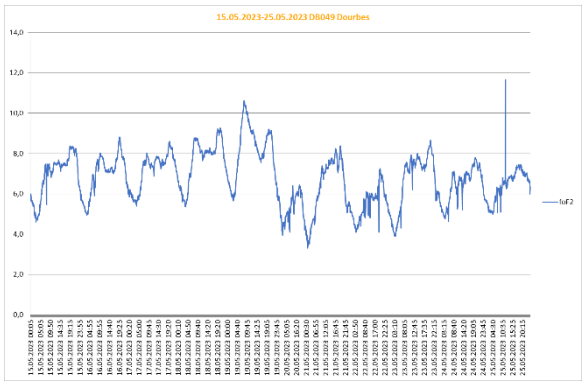
Şekil 9.9'da jeomanyetik fırtına gününde meydana gelmiş olan negatif ve pozitif iyonosferik fırtına oluşumu Giro Lowell sitesinden elde edilen orta enlem bölgesinde bulunan Dourbes istasyon verilerine göre gösterilmektedir.



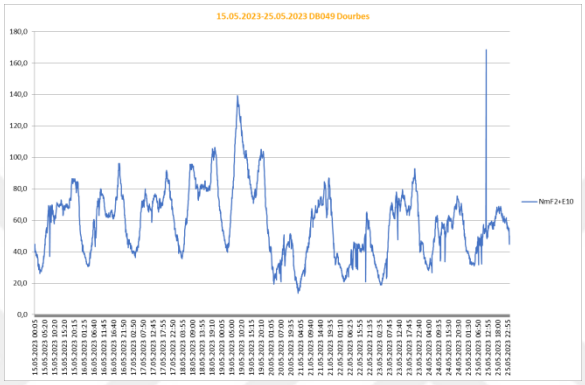
Şekil 9.9 20.05.2023 İyonosferik fırtına değişim grafiği

G2 seviyesine sahip güneş patlaması kökenli jeomanyetik fırtına iyonosferde uzun süreli ve TEC değerinin fazla olduğu negatif iyonosferik fırtınalar oluşturmuştur. 0,20- 1,56 TECU değerine sahip kısa süreli pozitif iyonosferik fırtınaları meydana getirmiştir. Negatif iyonosferik fırtınaların çoğunlukta meydana gelmiş olması TEC değerindeki fazla artış olmamasından kaynaklı olmuş olması ve bundan dolayı iyonosfer tabakasında oksijen azot elementlerinin oranındaki düşüşten kaynaklı olması düşünülmektedir.

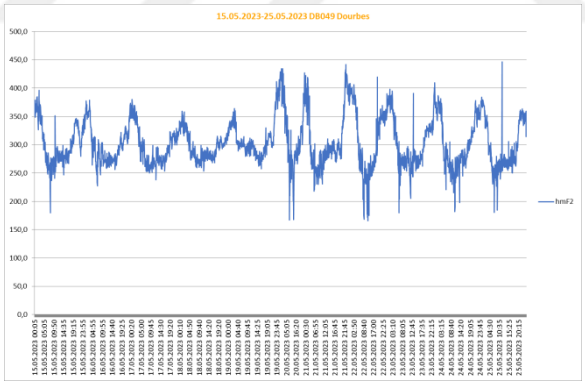
Şekil 9.10'da iyonosferik parametre değişimleri gösterilmektedir.



(a)



(b)



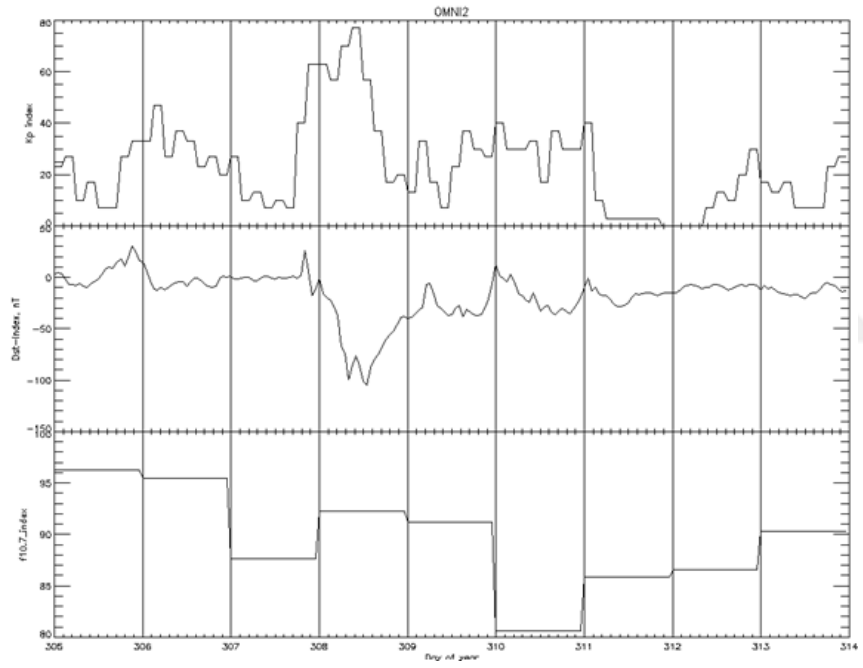
(c)

Şekil 9.10 20.05.2023 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)f0F_2, (b)NmF_2, (c)hmF_2

Kritik frekans değeri fırtına günü saat 18:55 de maksimum değer olan 6,3 MHz değerine, tepe elektron yoğunluğu maksimum 49,2 değerine ulaşmıştır. İyonosferik fırtına yüksekliği fırtınanın meydana geldiği gün maksimum 401,0 km değerine ulaşmış olduğu görülmektedir.

CME manyetik alan çizgileri ile sarılmış, birkaç saat içinde Güneş'ten atılabilen büyük gaz balonlarıdır. CME' ler kapalı manyetik yapılar sayesinde oluşur. CME, Güneş rüzgârlarının hızlarını arttırıcı, geçici aktiviteler olarak isimlendirilebilir. CME' lerin hız aralığı 300 km/s ve 2000 km/s arasındadır. Bu nedenle, CME' ler, hızlı Güneş rüzgârlarının oluşumuna yardımcı olur. 25. Güneş çevrimi içerisinde en çok CME kökenli fırtınalar meydana gelmiştir.

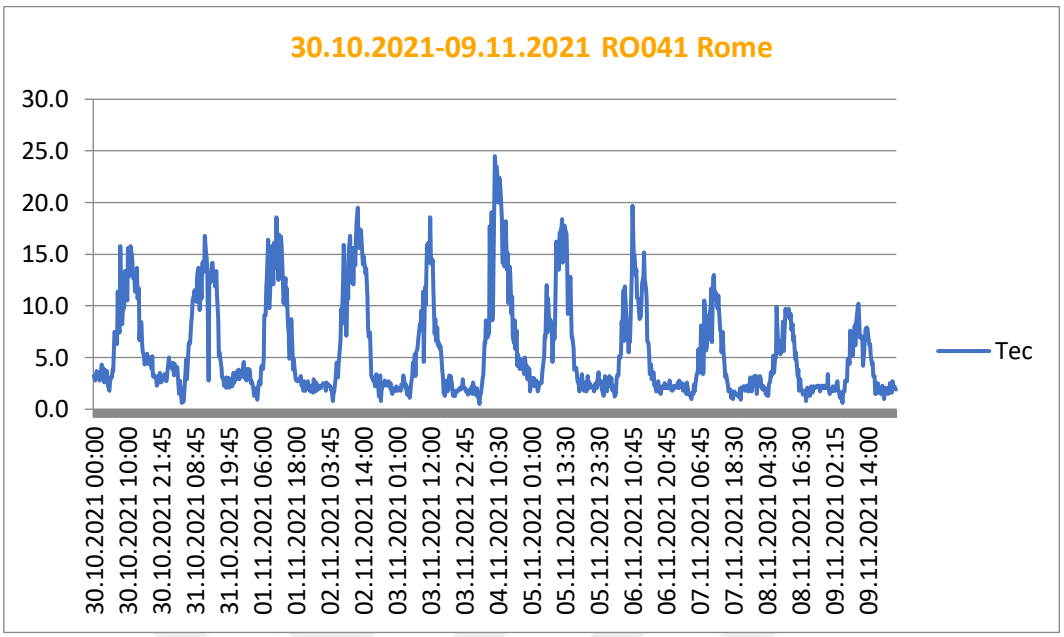
Diğer fırtınamızda 04.11.2021 tarihinde meydana gelmiş olan G4 seviyesinde CME sonucunda oluşmuş bir jeomanyetik fırtınanın iyonosferik fırtınaya olan etkisi ele alınmıştır. Şekil 9.11 04.11.2021 tarihinde meydana gelmiş olan jeomanyetik fırtınanın güneş ve jeomanyetik fırtına indis değişimini ve sınıflandırmasını göstermektedir.



Şekil 9.11 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği

04.11.2021 tarihinde güneş akısı değeri 92,5 sfu değerine Dst manyetik alan değeri negatif değer olan -1 nT dan negatif değer olan -105 nT değerine düşmüştür. Dst değerinde yaklaşık 104 nT değerinde bir değişim meydana geldiği görülmektedir. Kp değeri 8 değerine ulaşmıştır. Bu incelenen fırtınanın G4 ölçeğinde güçlü seviyeleri bir fırtına olduğunu bize göstermektedir. İlk olarak G4 seviyesine sahip olan CME sonucu 04.11.2021 tarihinde saat 14:00 da meydana gelen jeomanyetik fırtınanın iyonosfer tabakasında yarattığı TEC değeri Şekil

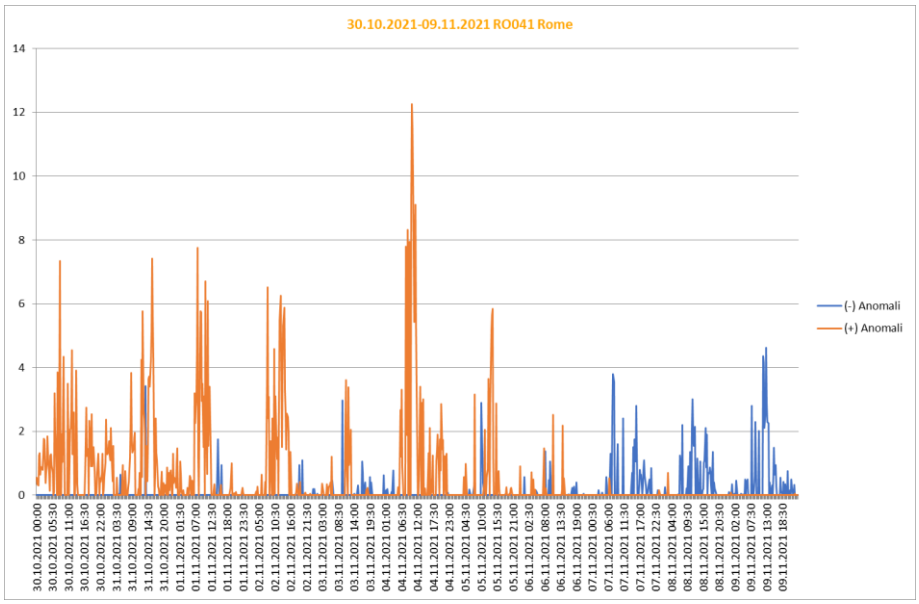
9.12'de orta enlem bölgesinde yer alan Roma istasyon verilerine göre gösterilmektedir.



Şekil 9.12 04.11.2021 Roma istasyon TEC değişimi

TEC değeri jeomanyetik fırtına günü saat 09:45 te maksimum değer olan 24,5 TECU değerine ulaşmıştır. Fırtına öğlen vakti 14:00 zamanında meydana gelmiştir. Maksimum TEC değerine fırtınadan yaklaşık 4 saat önce iyonosfer ulaşmıştır. Roma istasyon verisine göre Roma istasyonunda fırtınanın şiddetinin fazla olmasına rağmen sakin günlere göre daha az seviyede bir TEC değerinde artış gözlemlenmiştir.

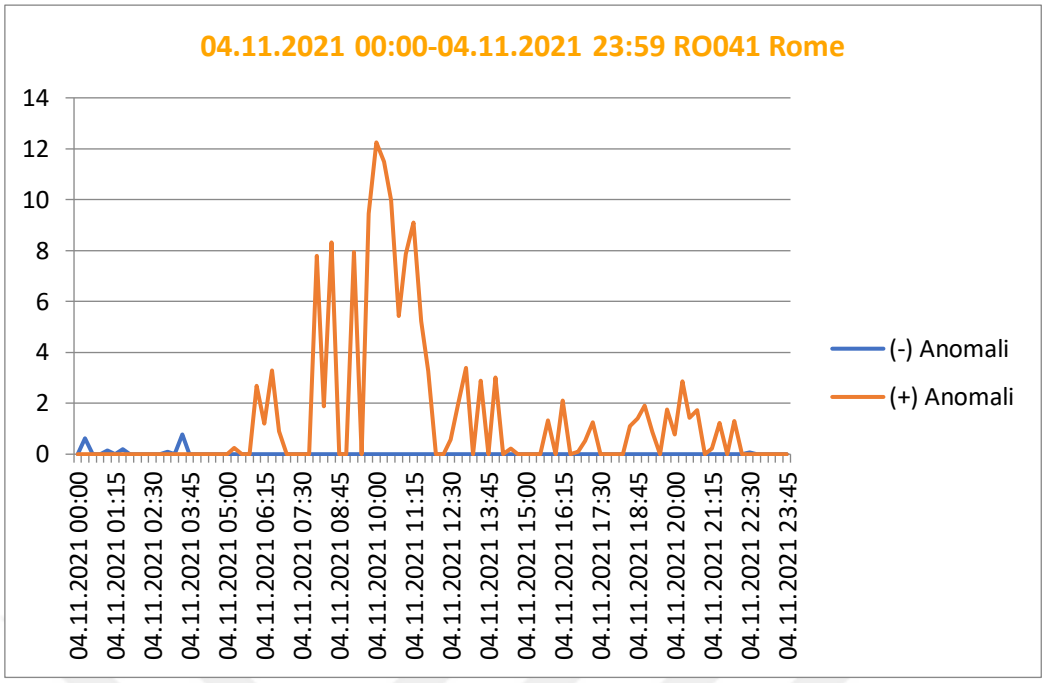
Şekil 9.13'te istatistiksel metot sonucu sakin ve fırtına zamanı günlerin anomali değişimi gösterilmektedir.



Şekil 9.13 30.10.2021-09.11.2021 TEC anomali grafiği

Fırtına öncesi ve sonrası sakin günlerde pozitif ve negatif anomaliler maksimum 4-8 TECU değerine çıkmışken fırtına günü pozitif iyonosferik fırtına çoğunlukta ve uzun süreli meydana gelmiş olup maksimum değer olan 12,25 TECU değerine ulaşmıştır.

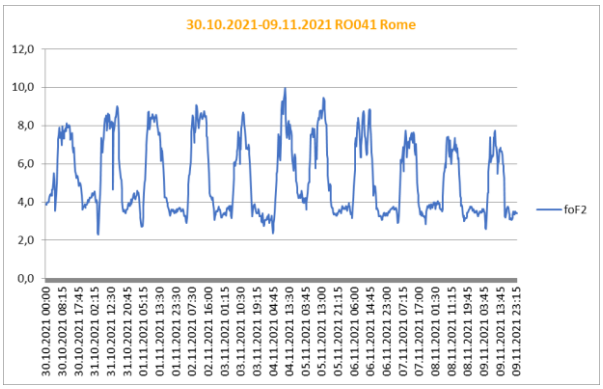
Şekil 9.14'te jeomanyetik fırtına gününde meydana gelmiş olan negatif ve pozitif iyonosferik fırtına oluşumu Giro Lowell sitesinden elde edilen orta enlem bölgesinde bulunan Roma istasyon verilerine göre gösterilmektedir.



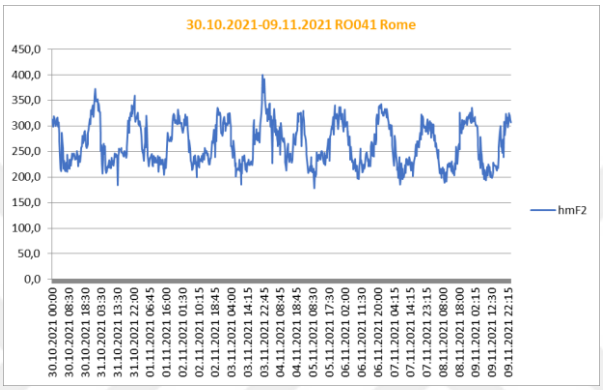
Şekil 9.14 04.11.2021 İyonosferik fırtına değişim grafiği

G4 seviyesine sahip CME kökenli jeomanyetik fırtına iyonosferde uzun süreli ve elektron yoğunluğu değerinin fazla olduğu pozitif iyonosferik fırtınalar oluşturmuştur. 0,62 TECU değerine sahip kısa süreli negatif iyonosferik fırtınaları meydana getirmiştir. Fırtınanın ana faz zamanında TEC değeri sabit değerde pozitif iyonosferik fırtınalar gösterirken öncesinde TEC değerinde iyonosferde elektron sayısında yükseliş yaratmıştır. Fırtınanın meydana geldiği zaman saat 14:00 da TEC değeri yaklaşık 3,01 TECU değerine düşerek sonrasında iyileşme aşamasına geçmiştir.

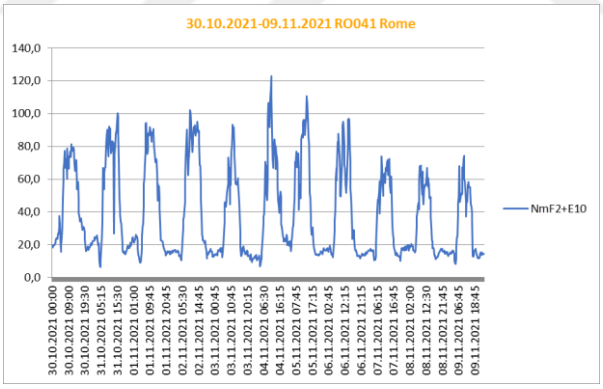
Şekil 9.15'te Roma istasyon verilerine göre iyonosferik parametre değişimleri gösterilmektedir.



(a)



(b)

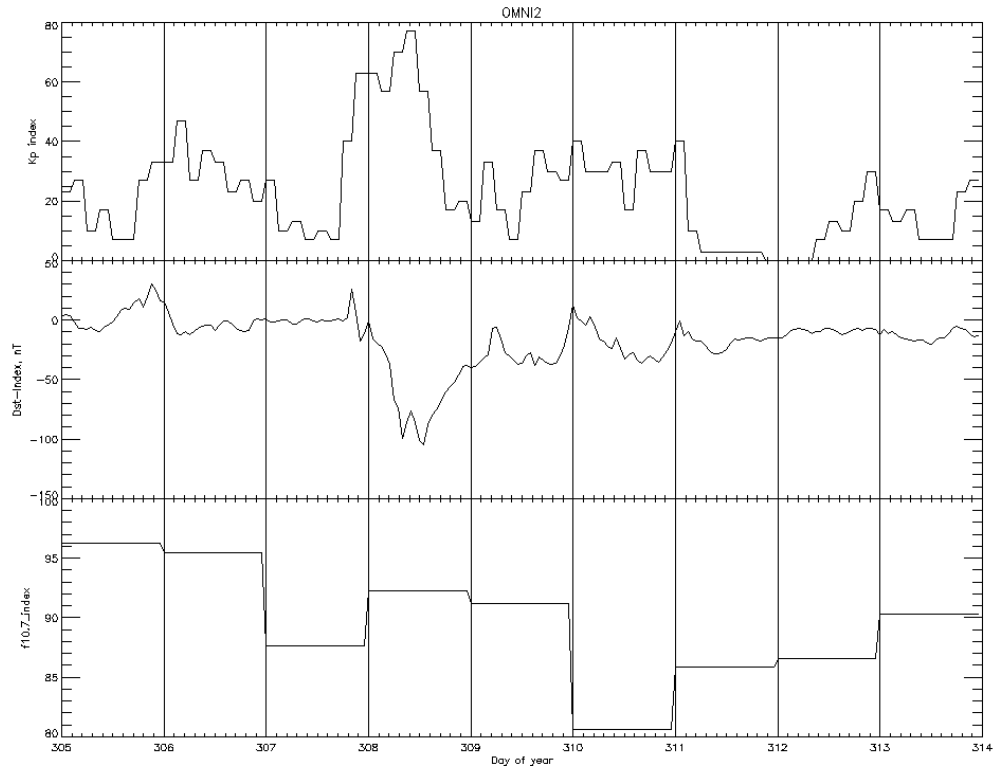


(c)

Şekil 9.15 04.11.2021 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)f0F_2, (b)hmF_2, (c)NmF_2

Kritik frekans değeri fırtına günü maksimum değer olan 10,0 MHz değerine, tepe elektron yoğunluğu fırtına günü 11:30'da maksimum 122,8 değerine ulaşmıştır. İyonosferik fırtına yüksekliği maksimum 333,6 km değerine ulaşmış olduğu görülmektedir.

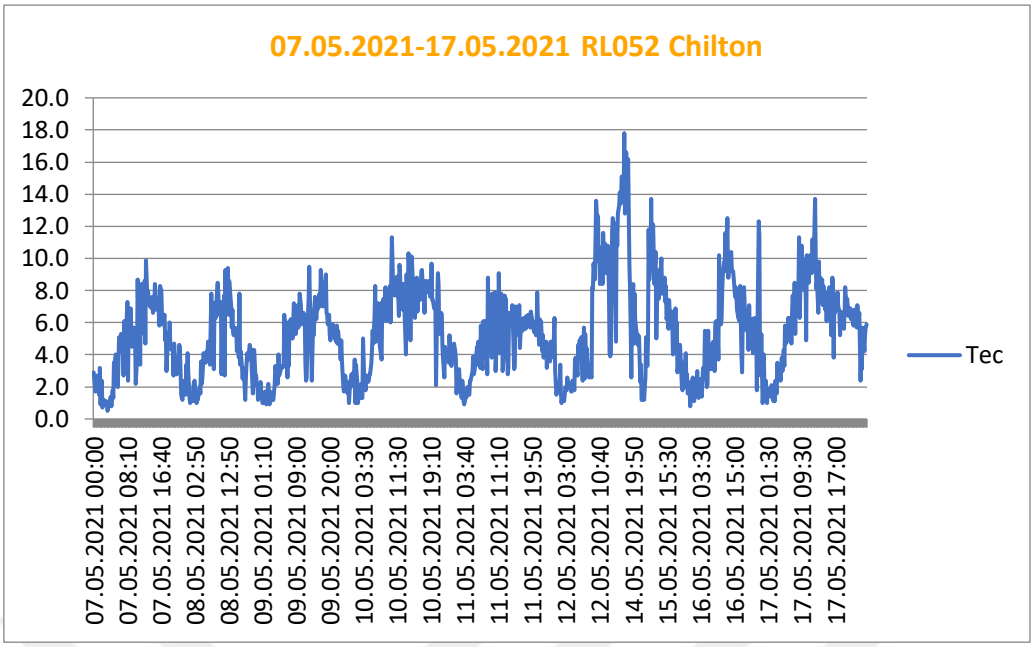
Diğer fırtınamızda 12.05.2021 tarihinde meydana gelmiş olan G3 seviyesinde CME patlaması sonucunda oluşmuş bir jeomanyetik fırtınanın iyonosferik fırtınaya olan etkisi ele alınmıştır. Şekil 9.16 12.05.2021 tarihinde meydana gelmiş olan jeomanyetik fırtınanın güneş ve jeomanyetik fırtına indis değişimini ve sınıflandırmasını göstermektedir.



Şekil 9.16 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği

12.05.2021 tarihinde güneş akısı değeri 76,5 sfu değerine Dst manyetik alan değeri pozitif değer olan +26 nT dan negatif değer olan -56 nT değerine düşmüştür. Dst değerinde yaklaşık 82 nT değerinde bir değişim meydana geldiği görülmektedir. Kp değeri 7 değerine ulaşmıştır. Bu incelenen fırtınanın G3 ölçeğinde kuvvetli bir fırtına olduğunu bize göstermektedir.

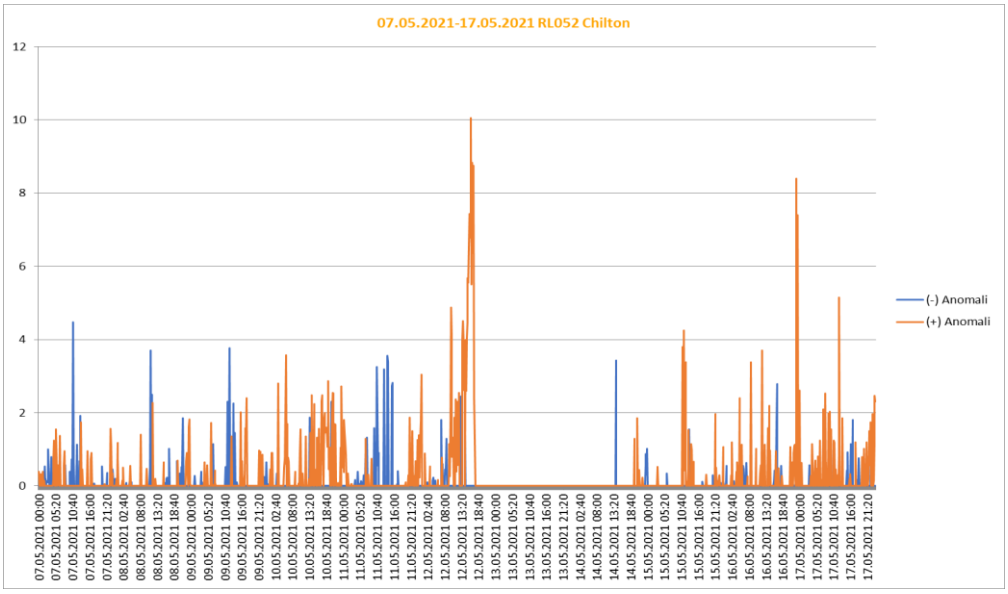
İlk olarak G3 seviyesine sahip olan CME sonucu 12.05.2021 tarihinde saat 15:00 da meydana gelen jeomanyetik fırtınanın iyonosfer tabakasında yarattığı TEC değeri Şekil 9.17'de orta enlem bölgesinde yer alan Chilton istasyon verilerine göre gösterilmektedir.



Şekil 9.17 12.05.2021 Chilton istasyon TEC değişimi

TEC değeri jeomanyetik fırtına günü saat 16:20 de maksimum değer olan 17,8 TECU değerine ulaşmıştır. Fırtına öğlen vakti 15:00 zamanında meydana gelmiştir. Maksimum TEC değeri fırtınadan yaklaşık 1 saat sonra ortaya çıkmıştır.

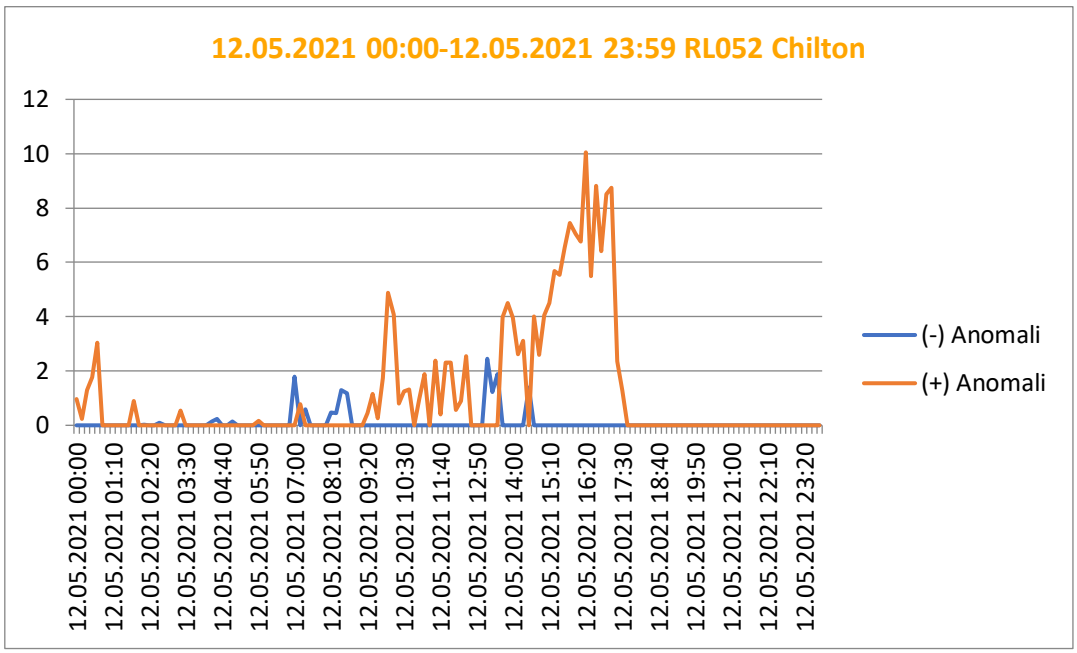
Şekil 9.18'de istatistiksel metot sonucu sakin ve fırtına zamanı günlerin anomali değişimi gösterilmektedir.



Şekil 9.18 07.05.2021-17.05.2021 TEC anomali grafiği

Fırtına öncesi ve sonrası sakin günlerde pozitif ve negatif anomaliler maksimum 4-5 TECU değerine çıkmışken fırtına günü pozitif iyonosferik fırtına çoğunlukta ve uzun süreli meydana gelmiş olup maksimum değer olan 10,0 TECU değerine ulaşmıştır.

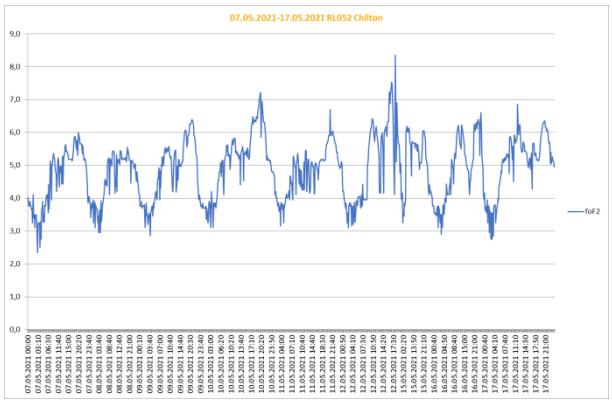
Şekil 9.19'da jeomanyetik fırtına gününde meydana gelmiş olan negatif ve pozitif iyonosferik fırtına oluşumu Giro Lowell sitesinden elde edilen orta enlem bölgesinde bulunan Chilton istasyon verilerine göre gösterilmektedir.



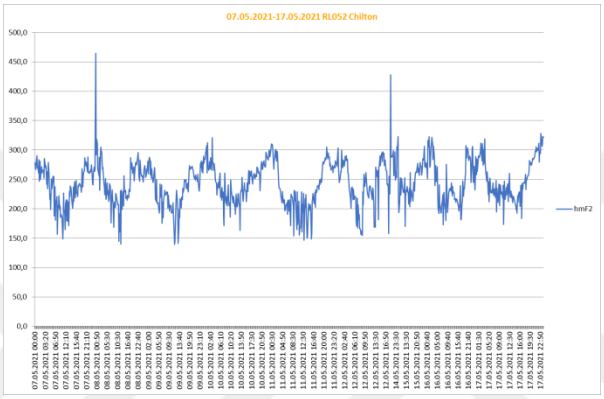
Şekil 9.19 12.05.2021 İyonosferik fırtına değişim grafiği

G3 seviyesine sahip CME kökenli jeomanyetik fırtına iyonosferde uzun süreli ve elektron yoğunluğu değerinin fazla olduğu pozitif iyonosferik fırtınalar oluşturmuştur. 2,0 TECU değerine sahip kısa süreli negatif iyonosferik fırtınaları meydana getirmiştir. Fırtınanın ana faz zamanında TEC değeri pozitif iyonosferik fırtınalar gösterirken sonrasında TEC değerinde iyonosferde elektron sayısında yükseliş yaratmıştır. Fırtınanın meydana geldiği zaman saat 15:00 da TEC değeri yaklaşık 5,55 TECU değerine düşerek sonrasında TEC değeri artmaya başlamış maksimum değer olan 10,05 değerine saat 16:20 de ulaşmıştır.

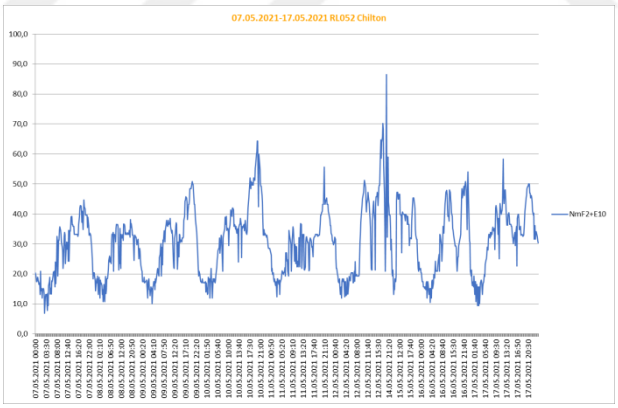
Şekil 9.20'de Chilton istasyon verilerine göre iyonosferik parametre değişimleri gösterilmektedir.



(a)



(b)

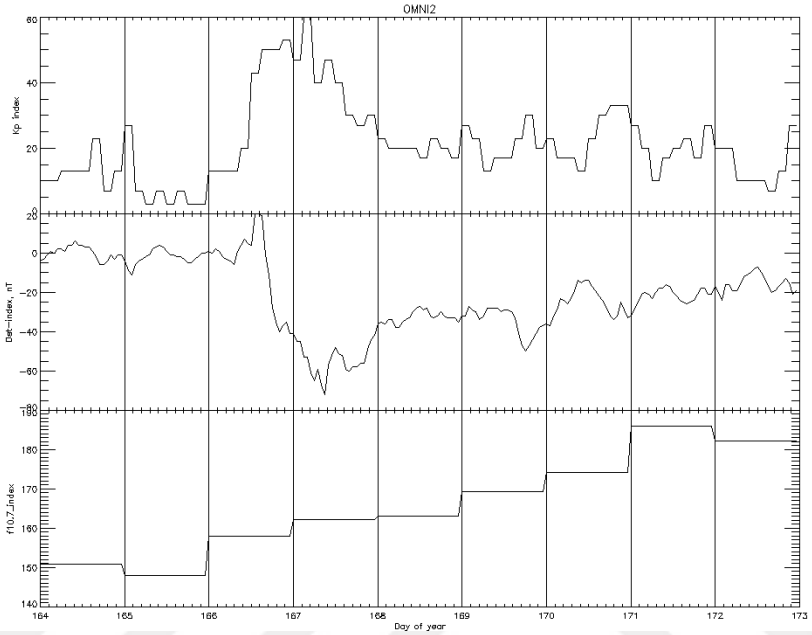


(c)

Şekil 9.20 12.05.2021 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)f0F_2, (b)hmF_2, (c)NmF_2

Kritik frekans değeri fırtına günü maksimum değer olan 7,4 MHz değerine, tepe elektron yoğunluğu fırtına günü 17:10'da maksimum 68,10 değerine ulaşmıştır. İyonosferik fırtına yüksekliği saat 16:00 da maksimum 297,1 km değerine ulaşmış olduğu görülmektedir.

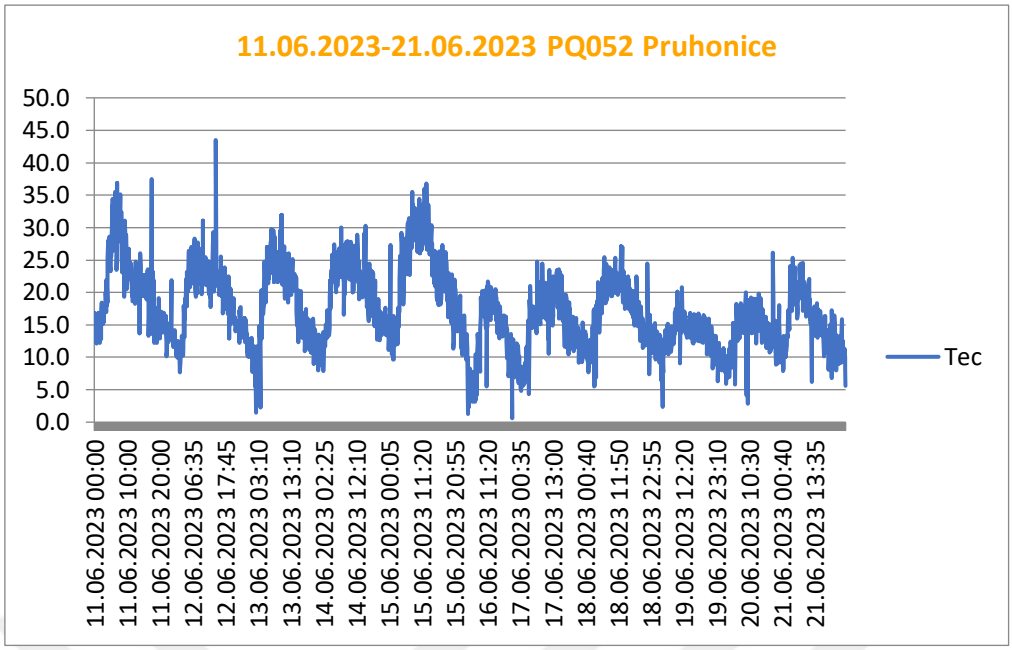
Diğer fırtınamızda 16.06.2023 tarihinde meydana gelmiş olan G2 seviyesinde CIR sonucunda oluşmuş bir jeomanyetik fırtınanın iyonosferik fırtınaya olan etkisi ele alınmıştır. Şekil 9.21 16.06.2023 tarihinde meydana gelmiş olan jeomanyetik fırtınanın güneş ve jeomanyetik fırtına indis değişimini ve sınıflandırmasını göstermektedir.



Şekil 9.21 Jeomanyetik ve güneş indis grafiği

16.06.2023 tarihinde güneş akısı değeri 163,0 sfu değerine Dst manyetik alan değeri negatif değer olan -41 nT dan negatif değer olan -72 nT değerine düşmüştür. Dst değerinde yaklaşık 31 nT değerinde bir değişim meydana geldiği görülmektedir. Kp değeri 6 değerine ulaşmıştır. Bu incelenen fırtınanın G2 ölçeğinde orta şiddetli bir fırtına olduğunu bize göstermektedir.

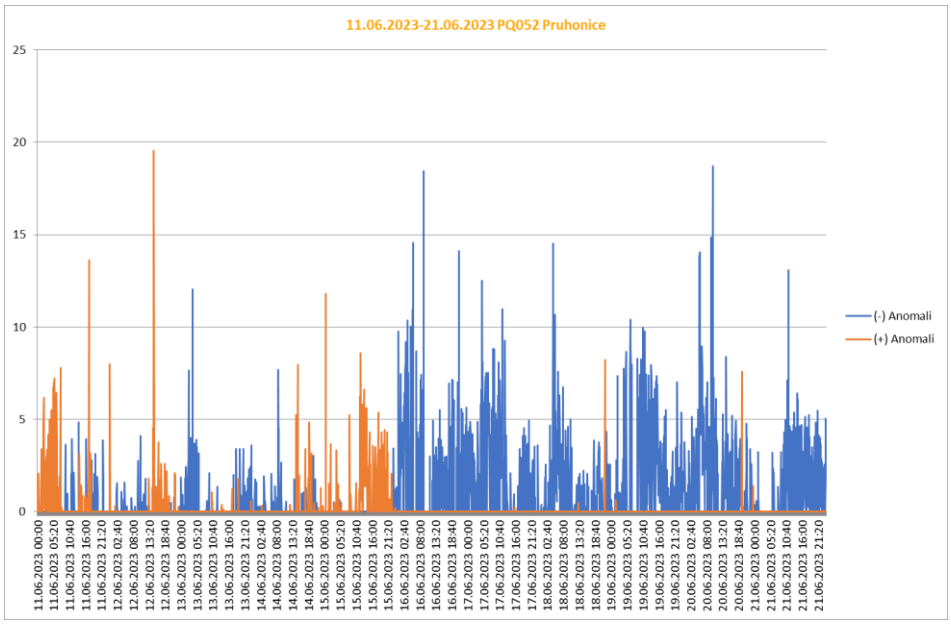
İlk olarak G2 seviyesine sahip olan CIR sonucu 16.06.2023 tarihinde saat 10:00 da meydana gelen jeomanyetik fırtınanın iyonosfer tabakasında yarattığı TEC değeri Şekil 9.22'de orta enlem bölgesinde yer alan Pruhonice istasyon verilerine göre gösterilmektedir.



Şekil 9.22 16.06.2023 Pruhonice istasyon TEC değişimi

TEC değeri jeomanyetik fırtına günü saat 11:55 de maksimum değer olan 21,7 TECU değerine ulaşmıştır. Fırtına sabah vakti 10:00 zamanında meydana gelmiştir. Maksimum TEC değeri fırtınadan yaklaşık 2 saat sonra ortaya çıkmıştır.

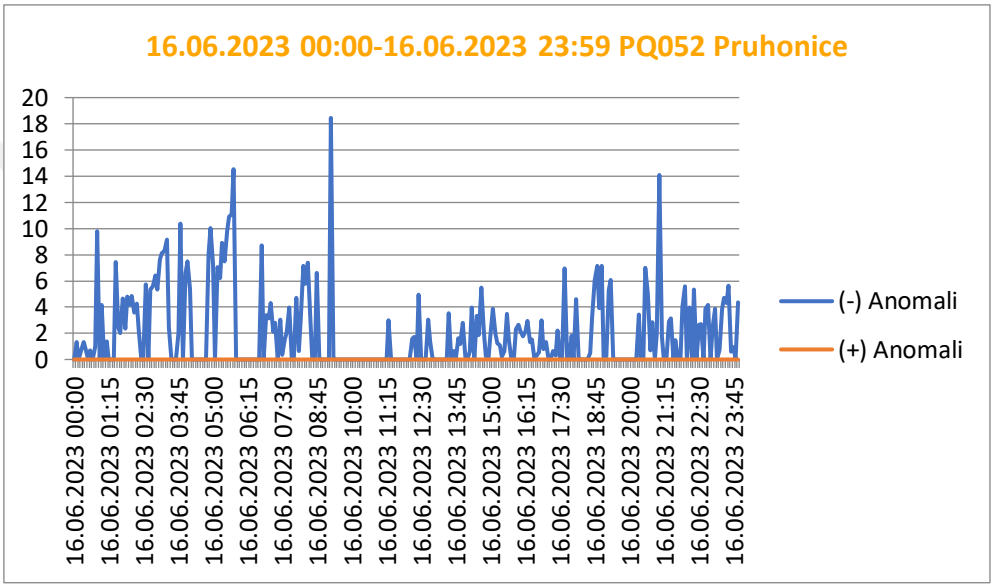
Şekil 9.23'te istatistiksel metot sonucu sakin ve fırtına zamanı günlerin anomali değişimi gösterilmektedir.



Şekil 9.23 11.06.2023-21.06.2023 TEC anomali grafiği

Fırtına öncesi ve sonrası sakin günlerde pozitif ve negatif anomaliler maksimum 3-19 TECU değerine çıkmışken fırtına günü uzun süreli negatif iyonosferik fırtına meydana gelmiş olup maksimum değer olan 18,45 TECU değerine ulaşmıştır.

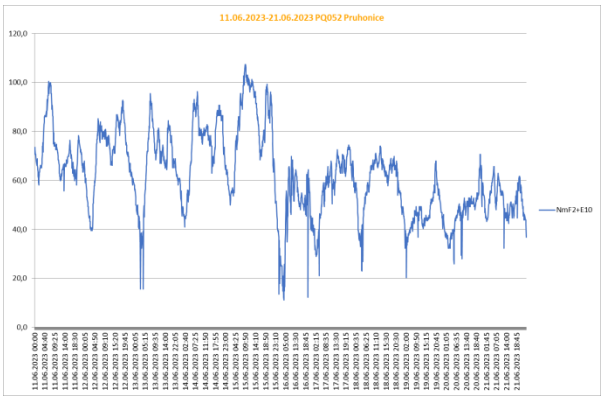
Şekil 9.24'te jeomanyetik fırtına gününde meydana gelmiş olan negatif ve pozitif iyonosferik fırtına oluşumu Gıro Lowell sitesinden elde edilen orta enlem bölgesinde bulunan Pruhonıce istasyon verilerine göre gösterilmektedir. İyonosferde 16.06.2023 tarihinde iyonosferde pozitif iyonosferik fırtına meydana gelmemiştir. Uzun süreli negatif iyonosferik fırtınalar oluşmuştur.



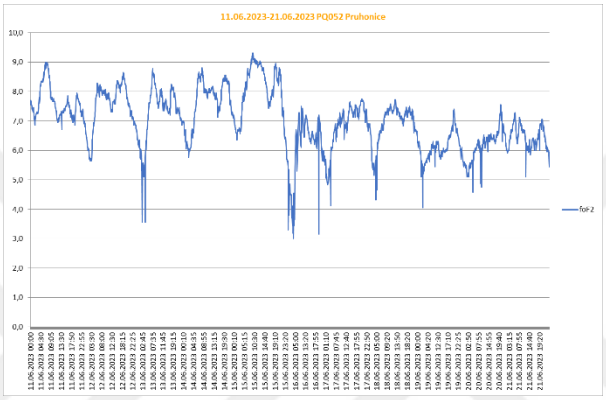
Şekil 9.24 16.06.2023 İyonosferik fırtına değişim grafiği

G2 seviyesine sahip CIR kökenli jeomanyetik fırtına iyonosferde uzun süreli ve TEC değerinin fazla olduğu negatif iyonosferik fırtınalar oluşturmuştur. Fırtınanın ana faz zamanında TEC değerinden kaynaklı bir fırtına gözlemlenmemiş olup fırtınanın meydana geldiği saatten yaklaşık 1 saat önce TEC değerinde iyonosferde elektron sayısında yükseliş meydana gelmiş ve maksimum negatif iyonosferik fırtına oluşumu gerçekleşmiştir. Fırtınanın meydana geldiği zaman saat 10:00 da TEC değeri 0 TECU değerine düşerek sonrasında TEC değeri artmaya başlamış sonrasında maksimum değer olan 14,05 değerine saat 21:05 de ulaşmıştır.

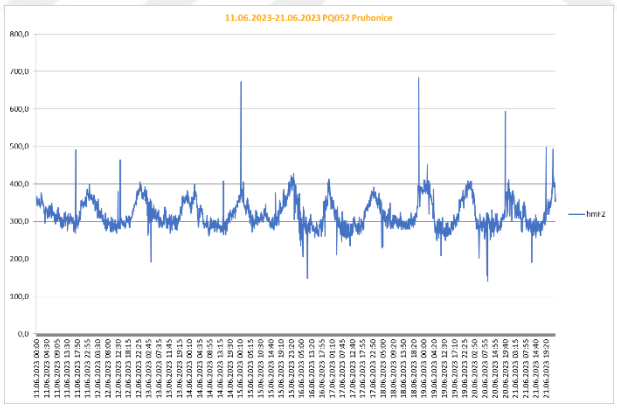
Şekil 9.25'te Pruhonıce istasyon verilerine göre iyonosferik parametre değişimleri gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 9.25 16.06.2023 İyonosferik parametre değişim grafikleri (a)NmF_2, (b)f0F_2, (c)hmF_2

Kritik frekans değeri fırtına günü maksimum değer olan 7,5 MHz değerine, tepe elektron yoğunluğu fırtına günü 09:15'te maksimum 69,8 değerine ulaşmıştır. İyonosferik fırtına yüksekliği saat 23:40 da maksimum 412,6 km değerine ulaşmış olduğu görülmektedir.

İyonosferik fırtınalar, jeomanyetik indekslerdeki değişikliklerle iyi bir şekilde ilişkilendirilebilen veya ilişkilendirilemeyen, üst atmosferin genel tedirginlikleridir. Bu çalışmada, iyonosferik fırtınalar mevcut anlayışımız ve son gelişmeler, F_2 bölgesi vurgulanarak gözden geçirilmektedir. İyonosferik fırtınalar, yer ve uzay tabanlı teknolojik sistemler üzerinde önemli etkileri olan aşırı bir uzay havası biçimini temsil eder. Çalışma kapsamında orta enlem bölgesinde bulunan 5 istasyon verisine ve farklı kökenlere sahip olan oluşan farklı seviyelerdeki jeomanyetik fırtınaların iyonosferde yarattığı etkilerin bazıları yukarıda gösterilmektedir. Elde edilen bulgular sonucunda ve diğer fırtınaların analizleri sonucunda meydana gelmiş olan 147 adet jeomanyetik fırtınanın aynı istasyonda benzer sonuçlara ulaşıldığı tespit edilmiştir. Pruhonıce istasyon verilerine göre fırtına zamanı iyonosferde yüksek TEC değerine sahip uzun süre devam eden negatif iyonosferik fırtınalar meydana geldiği tespit edilmiştir. Genellikle Dourbes istasyon verilerine göre ortaya çıkan sonuçlar doğrultusunda negatif iyonosferik fırtınaların şiddeti pozitif iyonosferik fırtınaların şiddetinden daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Diğer istasyon verileri kullanılarak iyonsoferde pozitif iyonosferik fırtınaların daha şiddetli ve daha sık olarak oluştuğu tespit edilmiştir.

Sonuç kısmında incelenen fırtınaların iyonosferik fırtına güç değerleri hesaplandığında oluşan anomaliler ile fırtına güç değerlerinin doğru orantılı olduğu saptanmıştır. Genel olarak fırtınanın meydana geldiği saatten ya önce ya sonrasında TEC değerlerinin ve iyonosferik parametrelerin ani olarak arttığı gözlemlenmiştir. Daha kapsamlı olarak bir sonraki çalışmalarda fırtınaların kutup ve ekvatoral enlemde bulunan istasyon verilerine göre iyonosferde yarattığı iyonosferik fırtınalar tespit edilip bu elde edilen sonuçlar ile kıyaslanıp yorumlanabilir.

Tablo 9.2'de incelenen farklı oluşum kökenlerine sahip jeomanyetik fırtınaların kökenlerine bağlı oluşan iyonosferik fırtına türleri tespit edilip gösterilmiştir. İstasyonlara ve kökenlerine göre iyonosferik fırtınaların türleri Pruhonice istasyonu için TEC değerinin yüksek olduğu zamanlarda negatif fırtınalar uzun süreli, şiddetli ve baskın olarak meydana gelmiştir. Chilton istasyon verilerine göre TEC değerleri yüksek ve uzun süreli pozitif iyonosferik fırtınalar, Dourbes istasyon verilerine göre CIR kökenli jeomanyetik fırtınalar fırtına günü pozitif iyonosferik fırtınaları CME ve güneş patlaması sonucu oluşan jeomanyetik fırtına

zamanları ise çoğunlukla negatif iyonosferik fırtnalar baskın olarak ortaya çıkmıştır. Roma istasyonu verileri sonucunda CIR ve güneş patlamaları sonucu oluşan jeomanyetik fırtınalardan önce iyonosferde negatif iyonosferik fırtınalar, CME kökenli jeomanyetik fırtınalar sonucu ise pozitif iyonosferik fırtınalar meydana gelmiştir. Roquetes istasyon verilerine göre güneş patlamaları sonucu oluşan jeomanyetik fırtnalardan önce iyonosferde çoğunlukla negatif iyonosferik fırtınalar, CME ve CIR kökenli jeomanyetik fırtınalar sonucu iyonosferde pozitif iyonosferik fırtınalar baskın olarak ortaya çıkmıştır. Bu durum iyonosferik fırtınaların oluşumunun oluşan jeomanyetik fırtınaların kökenlerine göre farklılık gösterdiğini kanıtlar niteliktedir. Pruhonice çevresinde sürekli negatif iyonosferik fırtınaların oluşuyor olması çevresinde elektron çukuru varlığı ihtimalini doğurmaktadır.

Tablo 9.2 İyonosferik fırtına ve jeomanyetik fırtına köken kıyaslama tablosu

Fırtına Kökenleri	**RO041**	**DB049**	**PQ052**	**RL052**	**EB040**
CIR	Negatif	Pozitif	Negatif	Pozitif	Pozitif
CME	Pozitif	Negatif	Negatif	Pozitif	Pozitif
SF	Negatif	Negatif	Negatif	Pozitif	Negatif

10
SONUÇ

Havacılık, navigasyon ve iletişim gibi radyo frekansı aktarımına dayanan birçok uygulama, güçlü iyonosferik bozulmalardan ve özellikle iyonosferik plazmadaki gradyanlardan etkilenebilir. İyonosferdeki bozuklukların çoğu ağırlıklı olarak uzaydaki hava olaylarından kaynaklanmaktadır. Dünyanın manyetosferi tarafından yakalanan güneş rüzgârı enerjisi, öncelikle kutupsal üst atmosferde dönüştürülür ve dağıtılır, bu da iyonosferik rahatsızlık etkilerine yol açar. Uydu misyonlarının ve modern iletişim, navigasyon ve uzaktan algılama sistemlerinin ekonomiyi ve sosyal yaşamı etkileyen aksaması, iyonosferdeki bu bozulmaların sonucu olabilir. Bu nedenle, uzay havası ile ilgili iyonosferik bozuklukların izlenmesi ve tahminleri, birçok uygulamada uzay havası etkilerinin azaltılması için gereklidir.

Bölüm 9'da sunulan sonuçlar, pozitif ve negatif özelliklerin yanı sıra mevsimsel ve yerel zamana bağlılığı da içeren iyonosferik fırtınaların ortak tanımını iyi bir şekilde yansıtmaktadır. Yaz ve kış fırtınalarının özellikleri arasındaki farklar, küresel rüzgârların ve kompozisyonun farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Kışın termosferik günlük ortalama meridyen rüzgârları daha kutuplara doğru eserken, yazın daha ekvatora doğru esmektedir. Yüksek güneş aktivitesi sırasında, orta enlemlerdeki meridyen rüzgârları yaz aylarında yerel öğle saatlerinde çok düşüktür. Kış aylarında ise güçlü bir şekilde kutuplara doğrudur. Bu nedenle yaz aylarında Joule ısınmasının etkileri gün içindeki rüzgârları kolaylıkla tersine çevirebilirken, kışın rahatsız edici rüzgârlar kutup yönündeki güçlü klimatolojik rüzgârlarla rekabet eder. Bu nedenle yaz aylarında ısınma nedeniyle yüksek enlemlerde yükselen ağır moleküller ekvatora doğru daha kolay taşınarak orta enlemlerde negatif fırtınalara yol açar. Moleküler açıdan zengin havanın taşınması, [O / N_2] oranında bir azalmaya yol açarak rekombinasyon oranını artırır. Prölss ve Werner, Volland çalışmalarında elde edilen sonuçlar tez kapsamında ortaya çıkan sonuçlar ile kıyaslandı ve benzer sonuçlar elde edildi.

Fırtına zamanı TEC bozukluklarının Orta Avrupa üzerindeki üst üste binmesi iyonosferik fırtınaların birçok tanımıyla iyi bir uyum içinde, seçilen iyonosferik

fırtınalar sırasında gündüz artışlarının baskınlığını iyi bir şekilde belgelemektedir. Mevsim şartları ne olursa olsun, orta enlemlerde pozitif fırtınaların gelişmesini sağlayan itici mekanizmaların, fırtınanın ilk saatlerinde ve gündüz saatlerinde en etkili olduğu görülmektedir. Bu, sabah ve öğlen arasında başlayan fırtınalar sırasındaki en güçlü TEC artışıyla gösterilir. Bununla birlikte, kışın, gece yarısı ile sabah arasında başlayan fırtınalar sırasında da önemli derecede güçlü TEC artışları meydana gelir ve maksimum artış gündüz vakti olur.

Fırtınanın başlamasından hemen sonra başlayan, aurora bölgesindeki Joule ısınması, bu rüzgârları taşıyan TAD'leri harekete geçirir. Termosferik TAD'lerin imzası iyonosferde TID'ler olarak gözlemlenebilir.

Fırtına koşullarının daha iyi anlaşılması için bu tez çalışması, TEC'de gözlemlenen iyonosferik fırtınaların çeşitli fırtına sınıflarına ayrılmış analizlerini sunmaktadır. Vaka incelemelerinin ötesinde, orta enlem Avrupa üzerindeki tipik iyonosferik fırtına davranışının ayrıntılı bir karakterizasyonunu sağlar.

Tez çalışmamızda atmosfer ve plazma olan İyonosfer'deki TEC parametre değişimi üzerinde durulmuştur ve iyonosonda sinyalleri ile TEC değişiminin hesaplanma yöntemlerine yönelik detaylı bilgi verilmiştir. Farklı fırtınalar analiz edilerek karşılaştırma yapılmıştır.

Elde edilen sonuçların karşılaştırılması neticesinde literatürde de belirlediğimiz gibi pozitif ve negatif iyonosferik fırtınaların oluşum nedenleri ve oluşma sürelerinin birbirleri ile uyumlu olduğu incelediğimiz fırtınalar sayesinde tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar ve literatür taramasına göre orta enlemlerde öğle vakti iyonosferik fırtınalar en kuvvetlidir. Ayrıca yaz ve kış fırtınaları arasında belirgin bir fark olduğu literatürde bildiriliyor. Yalnızca kış fırtınaları yüksek enlemde TEC artışları geliştirirken, yalnızca yaz fırtınaları tipik olarak fırtına iyileşme aşamasında TEC tükenmeleri sergiler. Kış fırtınaları sırasında, yaz fırtınalarının aksine, TEC iyileştirmeleri fırtınanın başlangıcından sonraki gün de meydana gelebilir.

Güneş patlaması ve jeomanyetik fırtınalar, seviyelerini açıkça temsil eden sırasıyla X-ışını akışı ve K-indeksi tarafından belirlenen net ölçeklere sahiptir. Öte yandan, iyonosferik fırtınanın bu kadar net bir ölçeği olmamıştır ve iyonosferik

fırtınanın seviyesini nicel olarak temsil etmek zordur. Bunun nedeni, mevsimsel, günlük, yerel saat ve enlemsel değişkenlikler gibi iyonosferik elektron yoğunluğundaki büyük zamansal ve uzaysal değişkenliklerden kaynaklanmaktadır.

Regresyon modeli sonucunda dört değişken arasında güçlü ve pozitif bir ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.

Durağanlık analiz sonuçlarına bakılarak, orta enlem istasyonları için regresyon sonuçlarına göre kurulan regresyon modelinin anlamlı olduğu R^2 (0,93) katsayısından anlaşılmaktadır. Ayrıca elde edilen katsayılara bakıldığında tüm regresyon katsayılarının anlamlı oldukları olasılık değerlerinden anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada orta manyetik enlemler için aktif jeomanyetik dönemlerde manyetik eşlenik noktalardaki TEC'in değişimi istatistiksel analiz yöntemiyle incelenmiş ve bu sonuçların analizleri fırtına şiddetine göre karşılaştırılmıştır.

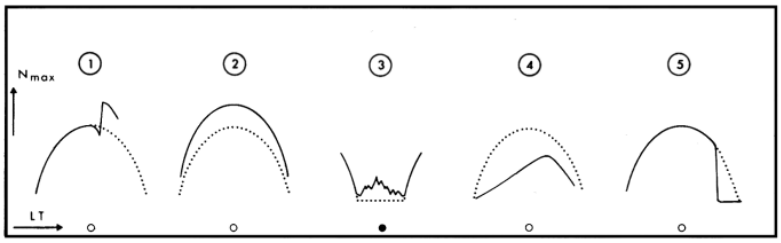
Meydana gelmiş olan pozitif iyonosferik fırtınaların ve negatif iyonosferik fırtınaların sadece oluşumlarının TEC değerlerine bağlı olmadığı farklı nedenlere bağlı olarak farklı zaman içerisinde farklı etkilerde meydana gelmiş olduğu ispatlanmıştır. Literatürde bahsi geçen F_2 bölgesinin hareketi sonucu ortaya çıkan iyonosferik fırtınaların nedenlerinin atmosferik rüzgârlara ya da elektrik alan sürüklenmesine bağlı olduğu fakat bu nedenlerin kaynağının uzay havasına olan etkisinin farklı istatistiksel metotlar ve farklı veri setleriyle ele alınıp incelenmesi gerekecektir.

İyonosfer jeomanyetik fırtına ilişkisini daha fazla irdeleyebilmek için bu çalışmada yaptığımız gibi sadece orta enlem bölgesinde bulunan istasyon verilerine göre değil, kutup ve ekvatoral bölgelerde bulunan istasyonları da ele alıp analiz ederek jeomanyetik fırtına coğrafi konum etkisini vurgulayıp iyonosferik fırtınaların var oluş nedenleri daha detaylı ele alınıp TEC değişiminin belirlenmesi gerekecektir.

Tez çalışması kapsamında yer tabanlı iyonosonda verileri ele alınıp incelenmiştir. Bunun dışında internet sitelerinden kolay erişim sağlayabileceğimiz GPS uydu verileri sayesinde TEC verilerinin GPS üzerinden iyonosfere olan etkisini inceleyip iyonosfer jeomanyetik fırtına ilişkisi farklı bir bakış açısı ile daha detaylı ele alınıp incelenmesi gerekecektir. Bu sayede çeşitli iyonosferik fırtına

inceleme yöntemleri kullanılarak literatüre bu alanda farklı bakış açıları ile katkı sağlanmış olacaktır.

İyonosfer her gün aynı değildir. Birden çok nedene bağlı olarak değişiklik gösterir. Bunların başında jeomanyetik fırtınalar gelir. İyonosferin genellikle iyonosferik fırtınalar olarak adlandırılan jeomanyetik aktiviteye tepkisi uzay fiziğinde uzun yıllardır bilinmektedir. Jeomanyetik fırtınalar sırasında bulunan iyonosferik değişim türleri sınıflandırması her mevsim TEC fırtına modellerinin genel karakterizasyonu için uygundur. Şekil 10.1'e göre sunulan (1) yorum, manyetosferik konveksiyonla çalışan alacakaranlık etkisini tanımlamaktadır. Elektrik konveksiyon alanının kökeni güneş rüzgârı plazma ve jeomanyetik alandan kaynaklanır. Jeomanyetik alanın gezegenlerarası manyetik alan bölgelerinden akan güneş rüzgârı, şafaktan alacakaranlığa yönlendirilen bir elektrik alanını indükler. Güneş rüzgârı akısının değişkenliği, genelliklle yerde gözlemlenen jeomanyetik aktivite derecesi ile ifade edilen manyetosferik aktiviteyi belirler. (2) yorum, rüzgârlara bağlı oluşan pozitif iyonosferik fırtına (3) yorum, auroral çökelmeye bağlı artış göstergesi (4) yorum ise gündoğumu sonrası konveksiyon etkileri ve daha uzun ömürlü olması nedeniyle negatif iyonosferik fırtınaya bağlı tükenmeleri ve (5) yorum ise çukurun konveksiyon kaynaklı görünümü yoluyla (1) alacakaranlık etkisinin sona ermesi anlamına gelmektedir.



Şekil 10.1 Jeomanyetik fırtınalar sırasında bulunan iyonosferik bozukluk türleri [166]

Çalışma sonucunda elde edilen veriler (2) ve (4) nolu şekillere benzemektedir. Bu sonuç jeomanyetik fırtınalar sırasında iyonosferde pozitif ve negatif iyonosferik fırtına türlerinin varlığının tespit edildiğini kanıtlar nitelikte olmuştur.

KAYNAKÇA

[1] R. K. Burton, R. L. McPherron, C.T Russell, "An empirical relationship between interplanetary conditions and Dst." J. Geophys. Res., vol. 80, pp. 4204-4214, 1975, doi: https://doi.org/10.1029/JA080i031p04204.

[2] S. I. Akasofu, "The Development of the Auroral Substorm.", Planet. Space Sci., vol. 12, no. 4, pp. 273-282, 1964, doi: https://doi.org/10.1016/0032-0633(64)90151-5.

[3] V. U. Nwankwo, S. K. Chakrabarti, "Effects of Plasma Drag on Low Earth Orbiting Satellites due to Heating of Earth's Atmosphere by Coronal Mass Ejections", arXiv preprint arXiv:1305.0233, 2013.

[4] L. Perrone, L. P. Korsunova, A.Mikhailov, "Ionospheric precursors for crustal earthquakes in Italy.", In Annales Geophysicae, vol. 28, no. 4, pp. 941-950, 2010, doi: https://doi.org/10.5194/angeo-28-941-2010.

[5] K. W. Ogilvie, L. F. Burlaga, "Hydromagnetic shocks in the solar wind", Solar Physics, vol. 8, pp. 422-434, 1969, doi: https://doi.org/10.1007/BF00155390.

[6] H. S. Fu, J. Tu, P. Song, B. Cao, B. W. Reinisch, B. Yang, "The nightside-to-dayside evolution of the inner magnetosphere: Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration Radio Plasma Imager observations", J. Geophys. Res., vol. 115, p. A04213, 2010, doi: https://doi.org/10.1029/2009JA014668.

[7] T. Zic, B. Vrsnak, M. Temmer, "Heliospheric Propagation of Coronal Mass Ejections Drag-Based Model Fitting", Ap. J.S, vol. 218, no. 2, pp. 1-7, 2015.

[8] P. K. Manoharan, C. R. Subrahmanya, J. N. Chengalur, "Space Weather and Solar Wind Studies with OWFA", J. Astrophys. Astr., vol. 38, no. 16, 2017, doi: https://doi.org/10.1007/s12036-017-9435-z.

[9] E. L. Afraimovich, E. I. Astafyeva, "TEC anomalies—Local TEC changes prior to earthquakes or TEC response to solar and geomagnetic activity changes?", Earth, Planets and Space, vol. 60, no. 9, pp. 961–966, 2008, doi: https://doi.org/10.1186/BF03352851.

[10] W. D. Gonzalez, B. T. Tsurutani, A. L. Gonzalez, "Interplanetary Origin of Geomagnetic Storms", Space Sci. Rev., vol. 88, pp. 529-563, 1999, doi: https://doi.org/10.1023/A:1005160129098.

[11] P. N. Mayaud, "Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices", Geophys. Monogr. Ser., vol. 22, pp. 1-154, 1980, doi: https://doi.org/10.1029/GM022.

[12] Y. Kamide, W. Baumjohann, L. A. Daglis, W. D. Gonzalez, M. Grande, J. A. Joselyn, R. L. McPherron, J. L. Phillips, G. D. Reeves, G. Rostoker, A. S. Shanna, H. J. Singer, B. T. Tsurutani, V. M. Vasyliuna, "Current Understanding of Magnetic Storms' Storm-Substorm Relationships", J. Geophys. Res., vol. 103, no. A8, pp. 17705-17728, 1998, doi: https://doi.org/10.1029/98JA01426.

[13] N. C. Joshi, N. S. Bankoti, S. Pande, B. Pande, K. Pandey, "Relationship Between Interplanetary Field/Plasma Parameters with Geomagnetic Indices and Their Behavior During Intense Geomagnetic Storms", New Astronomy,

vol. 16, no. 6, pp. 366-385, 2011, doi: https://doi.org/10.1016/j.newast.2011.01.004.

[14] H. A Elliott, J. M. Jahn, J. M. C. David, "The Kp index and solar wind speed relationship: Insights for improving space weather forecasts", Sp. Weather, vol. 11, no. 6, pp. 339-349, 2013, doi: https://doi.org/10.1002/swe.20053.

[15] H. Volland, "Dynamics of the Disturbed Ionosphere", Space Science Reviews, vol. 34, pp. 327-335, 1983, doi: https://doi.org/10.1007/BF00175287.

[16] T. J. Fuller-Rowell, M. V. Codrescu, E. Aranjo-Prodere, I. Kutiev, "Progress in developing a storm-time ionospheric model", Advances in Space Research, vol. 22, no. 6, pp. 821-827, 1998, doi: https://doi.org/10.1016/S0273-1177(98)00105-7.

[17] L. R. Hafstad, M. A. Tuve, "Note on Kennelly-Heaviside layer observations during magnetic storm", Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity, vol. 34, no. 1, pp. 39-44, 1929, doi: https://doi.org/10.1029/TE034i001p00039.

[18] D. Altadill, A. Segarra, E. Blanch, J. M. Juan, V. V. Paznukhov, D. Buresova, I. Galkin, B. W. Reinisch, A. Belehaki, "A method for real-time identification and tracking of traveling ionospheric disturbances using ionosonde data: First results", J. Space Weather Space Clim., vol. 10, no. 2, pp. 1-11, 2020, doi: https://doi.org/10.1051/swsc/2019042.

[19] C. O. Hines, "The upper atmosphere in motion", Geophysical Monograph, vol. 18, 1974, doi: https://doi.org/10.1029/GM018p0014.

[20] K. Hocke, K. Schlegel, "A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995", Ann Geophys, vol. 14, no. 9, pp. 917–940, 1996, doi: https://doi.org/10.1007/s00585-996-0917-6.

[21] M. J. Buonsanto, "Ionospheric Storms – A Review", Space Sci. Rev., vol. 88, pp. 563–601, 1999, doi: https://doi.org/10.1023/A:1005107532631.

[22] C. Borries, J. Berdermann, N. Jakowski, V. Wilken, "Ionospheric storms – A challenge for empirical forecast of the total electron content", J. Geophys. Res.-Space, vol. 120, no. 4, pp. 3175–3186, 2015, doi: https://doi.org/10.1002/2015JA020988.

[23] C. A. Loewe, G. W. Prölss, 1997. "Classification and mean behavior of magnetic storms", Journal of Geophysical Research, vol. 102, no. A7, pp. 14209–14213, 1997, doi: https://doi.org/10.1029/96JA04020.

[24] S. M. Stankov, N. Jakowski, K. Tsybulya, V. Wilken, "Monitoring the generation and propagation of ionospheric disturbances and effects on Global Navigation Satellite System positioning", Radio science, vol. 41, no. 06, pp. 1-14, 2006, doi: https://doi.org/10.1029/2005RS003327.

[25] E. Astafyeva, I. Zakharenkova, M. Förster, "Ionospheric response to the 2015 St. Patrick's Day storm: A global multi-instrumental overview", Journal of Geophysical Research: Space Physics, vol. 120, no. 10, pp. 9023–9037, 2015, doi: https://doi.org/10.1002/2015JA021629.

[26] Q. Li, Y. Gao, P. Zhu, H. Chen, X. Zhang, “Statistical study on great geomagnetic storms during solar cycle 23”, Earthquake Science, vol. 24, pp. 365–372, 2011, doi: https://doi.org/10.1007/s11589-011-0799-x.

[27] G. Le, Z. Cai, H. Wang, Y. Zhu, “Solar cycle distribution of great geomagnetic storms.”, Astrophysics and Space Science, vol. 339, pp. 151–156, 2012, doi: https://doi.org/10.1007/s10509-011-0960-y.

[28] M. Chakraborty, S. Kumar, B. K. De, A.Guha, “ Latitudinal characteristics of GPS derived ionospheric TEC: a comparative study with IRI 2012 model”, Annals of geophysics, vol. 57, no. 5, p. A0539, 2014, doi: https://doi.org/10.4401/ag-6438.

[29] D. A. Chekole, N. M. Giday, “Evaluation of ionospheric and solar proxy indices for IRI-Plas 2017 model over the East African equatorial region during solar cycle 24”, Adv Sp Res, vol. 66, pp.: 604–611, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.04.029.

[30] W. D. Gonzalez, A. L. C Gonzalez., B. T. Tsurutani, “Dual-peak solar cycle distribution of intense geomagnetic storms”, Planetary and Space Science, vol. 38, no. 2, pp. 181-187, 1990, doi: https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90082-2.

[31] A. J. Mannucci, B. D. Wilson, C. D. Ewards, “A new method for monitoring the Earth’s ionosphere total electron content using the GPS global network”, Proceedings of the 6th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation, pp. 1323- 1332, 1993.

[32] G. A. Hajj, L. J. Romans, “Ionospheric electron density profiles obtained with the global positioning systems: Results from the GPS/MET experiment”, Radio Science, vol. 33, no. 1, pp. 175-190, 1998, doi: https://doi.org/10.1029/97RS03183.

[33] M. Mendillo, J. Klobuchar, H. Hajeb-Hosseinieh, “Ionospheric disturbances: Evidence for the contraction of the plasmasphere during severe geomagnetic storms”, Planetary and Space Science, vol. 22, no. 2, pp. 223-236, 1974, doi: https://doi.org/10.1016/0032-0633%2874%2990026-9.

[34] A. D. Danilov, L. D. Belik, “Thermospheric composition and positive phase of the ionospheric storm “, Advances in Space Research, vol. 12. no. 10, pp. 257-260, 1992, doi: https://doi.org/10.1016/0273-1177%2892%2990475-D.

[35] A. Danilov, A. V. Konstantinova, “Detailed Analysis of the Behavior of the F2 Layer Critical Frequency Before Magnetic Storms”, Geomagnetism and Aeronomy, vol. 62, pp. 590-606, 2022, doi: https://doi.org/10.1134/S0016793222050036.

[36] A. D. Danilov, A. V. Konstantinova, “Ionospheric precursors of geomagnetic storms. 1. A review of the problem”, Geomagnetism and Aeronomy, vol. 59, no. 5, pp. 554–566, 2019, doi: https://doi.org/10.1134/S0016793219050025.

[37] G. H. Bazzard, C. M. Minnis, “Geographic distribution of harmonics of the annual change in the critical frequency of the 2 layers at noon”, J. Atmosph. Terr. Phys., vol. 22, no. 3, pp. 192-199, 1961, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9169(61)90128-3.

[38] J. Lastovicka, R. A. Akmaev, G. Beig, J. Bremer, J. T. Emmert, “Global change in the upper atmosphere”, Science, vol. 314, no. 5803, pp. 1253-1254, 2006, doi: https://doi.org/10.1126/science.1135134.

[39] C. Borries, N. Jakowski, V. Wilken, “Storm-induced large-scale TIDs observed in GPS-derived TEC”, Ann. Geophys., vol. 27, no. 4, pp. 1605-1612, 2009, doi: https://doi.org/10.5194/ANGEO-27-1605-2009.

[40] G. W. Prölss, “Ionospheric F-region storms, in Handbook of Atmospheric Electrodynamics”, CRC Press, vol. 2, no. 8, pp. 195–248, 1995.

[41] T. J. Immel, S. L. England, S. B. Mende, R. A. Heelis, C. R. Englert, J. Edelstein, H. U. Frey, E. J. Korpela, E. R. Taylor, W. W. Craig, S. E. Harris, M. Bester, G. S. Bust, G. Crowley, J. M. Forbes, J. C. Gérard, J. M. Harlander, J. D. Huba, B. Hubert, F. Kamalabadi, J. J. Makela, A. I. Maute, R. R. Meier, C. Raftery, P. Rochus, O. H. W. Siegmund, A. W. Stephan, G. R. Swenson, S. Frey, D. L. Hysell, A. Saito, K. A. Rider, M. M. Sirk, “The Ionospheric Connection Explorer Mission: Mission Goals and Design”, Space Sci. Rev., vol. 214, no. 13, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/s11214-017-0449-2.

[42] T. N. Davis, M. Sugiura, “Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations.”, J. Geophys. Res., vol. 71, no. 3, pp. 785-801, 1966, doi: https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785.

[43] K. Hocke, K. Schlegel, “A review of atmospheric gravity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982-1995”, Annales Geophysicae, vol. 14, no. 9, pp. 917-940, 1996, doi: https://doi.org/10.1007/S00585-996-0917-6.

[44] K. Schlegel, M. Füllekrug, “Worldwide Locating Lightning: 50 Years of Schumann Resonances”, Physik In Unserer Zeit, vol. 33, no. 6, pp. 256-261, 2002, doi: https://doi.org/10.1002/1521-3943(200211)33:6%3C256::AID-PIUZ256%3E3.0.CO;2-V.

[45] G. W. Prölss, S. Werner, “Vibrationally excited nitrogen and oxygen and the origin of negative ionospheric storms”, J. Geophys. Res., vol. 107, no. A2, pp. IUA 5-1-IUA 5-12, 2002, doi: https://doi.org/10.1029/2001JA900126.

[46] H. Rishbeth, “F -Region Storms and Thermospheric Dynamics”, Journal of geomagnetism and geoelectricity, vol. 43, no. 1, pp. 513-524, 1991, doi: https://doi.org/10.5636/JGG.43.SUPPLEMENT1_513.

[47] M. J. Buonsanto, “Ionospheric Storms”, Space Science Reviews, vol. 88, pp. 563–601, 1999, doi: https://doi.org/10.1023/A:1005107532631.

[48] S. Matsushita, “A study of the morphology of ionospheric storm “, J. Geophys. Res., vol. 64, no. 3, pp. 305-321, 1959, doi: https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305.

[49] A. D. Danilov, “Discussion of the problem of ionospheric precursors of magnetic storms”, Geomagnetism and Aeronomy, vol. 61, no. 1, pp. 94–102, 2021, doi: https://doi.org/10.1134/S0016793222010042.

[50] M. J. Buonsanto, J. C. Foster, “Effects of magnetospheric electric fields and neutral winds on the low-middle latitude ionosphere during the March 20-21,

1990, Storm", J. Geophys. Res., vol. 98, no. A11, pp. 19133-19140, 1993, doi: http://dx.doi.org/10.1029/93JA01807.

[51] N. Matuura," Theoretical models of ionospheric storms", Space Sci. Rev., vol.13, pp. 124-189, 1972.

[52] J. V. Evans, "The causes of storm-time increases of the F-layer at mid-latitudes", Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 35, no. 4, pp. 593-616, 1973, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90191-8.

[53] X. Pi, M. Mendillo, M. W. Fox, D. N. Anderson, "Diurnal double maxima patterns in the F-region ionosphere: Substormrelated aspects", J. Geophys. Res., vol. 98, pp. 13677-13691, 1993, doi: https://doi.org/ 10.1029/93JA00502.

[54] M. Mendillo, J. A. Klobuchar, "An atlas of the midlatitude Fregion response to geomagnetic storms", Tech. Rep. 74-0065, Air Force Cambridge Res. Lab., Cambridge, Mass., 1974.

[55] D. N. Anderson, M. J. Buonsanto, M. Codrescu, D. Decker, C. G. Fesen, T. J. Fuller-Rowell, B. W.Reinisch, P. G. Richards, R. G. Roble, R. W. Schunk, J. J. Sojka, "Intercomparison of physical models and observations of the ionosphere", J. Geophys. Res., vol. 103, pp. 2179-2192, 1998, doi: https://doi.org/10.1029/97JA02872.

[56] A. D Richmond, S. Matsushita, "Thermospheric response to a magnetic substorm", J. Geophys. Res., vol. 80, no. 19, pp. 2839-2850, doi: https://doi.org/10.1029/JA080i019p02839.

[57] G. Kirchengast, K. Hocke, K. Schlegel, "The gravity wave-TID relationship: insight via theoretical model, EISCAT data comparison", Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 58, no. 1-4, pp.233-243, 1996, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9169(95)00032-1.

[58] T. J. Fuller-Rowell, D. Rees, S. Quegan, R. J. Moffett, G. J. Bailey, "Interactions between neutral thermospheric composition and the polar ionosphere using a coupled ionospherethermosphere model", J. Geophys. Res., vol. 92, pp. 7744-7748, 1987, doi: https://doi.org/10.1007/BF00879811.

[59] G. W. Prölss, "Common origin of positive ionospheric storms at middle latitudes and the geomagnetic activity effect at low latitudes", J. Geophys. Res., vol. 98, no. A4, pp. 5981-5991, 1993, doi: https://doi.org/10.1029/92JA02777.

[60] S. Y. Ma, L. Xu, K. C. Yeh, "A study of ionospheric electron density deviations during two great storms", Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 57, no. 9, pp. 1037-1043, 1995, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9169(94)00111-Z.

[61] C. J. Davis, M. N. Wild, M. Lockwood, Y. K. Tulunay, "Ionospheric and geomagnetic responses to changes in IMF BZ: a superposed epoch study", Annales Geophysicae, vol. 15, no. 2, pp. 217-230, 1997, doi: https://doi.org/10.1007/s00585-997-0217-9.

[62] J. Laštovička, A. Danilov, “Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere”, International Journal of Geomagnetism and Aeronomy, vol. 2, pp. 209-224, 2002.

[63] N. Jakowski, K. Tsybulya, J. Mielich, A. Belehaki, D. Altadill, J. C. Jodogne, B. Zolesi, “Validation of GPS ionospheric radio occultation results onboard CHAMP by vertical sounding observations in Europe”, Springer Berlin Heidelberg, pp. 447-452, 2002, doi: https://doi.org/10.1007/3-540-26800-6_70.

[64] N. Jakowski, V. Wilken, S. Schlueter, S. M. Stankov, S. Heise, “Ionospheric space weather effects monitored by simultaneous ground and spaced based GNSS signals”, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, vol. 67, no. 12, pp. 1074-1084, 2005, doi: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.02.023.

[65) T. Tanaka, “The worldwide distribution of positive ionospheric storms”, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 41, pp. 103-110, 1979, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9169(79)90001-1.

[66] T. Tanaka, K. Hirao, “Effects of an electric field on the dynamical behavior of the ionospheres and its application to the storm time disturbance of the F-layer”, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 35, no. 8, pp. 1443- 1452, 1973, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9169(73)90147-5.

[67] K. C. Yeh, S. Y. Ma, K. H. Lin, R. O. Conkright, “Global ionospheric effects of the October 1989 geomagnetic storm”, J. Geophys. Res., vol. 99, pp. 6201-6218, 1994, doi: https://doi.org/10.1029/93JA02543.

[68] M. Stix, “The Sun: An Introduction”, Springer Berlin Heidelberg, pp. 1-492, 2002, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-56042-2.

[69] "Astronomi Laboratuvarı RSS", [Çevrimiçi].Mevcut: https://astronomi.bogazici.edu.tr/ [Erişim: 17 Şubat 2024].

[70] E. R. Priest, “Solar Magnetohydrodynamics”, Springer Dordrecht, pp. 1-471, 2012, doi: https://doi.org/10.1007/978-94-009-7958-1.

[71] M. J. Thompson, J. Christensen-Dalsgaard, M. S. Miesch, J. Toomre, “The Internal Rotation of the Sun”, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, vol. 41, pp. 599-643, 2003, doi: https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.011802.094848.

[72] R. H. Munro, J. T. Gosling, E. Hildner, R. M. MacQueen, A. I. Poland, C. L. Ross, “The association of coronal mass ejection transients with other forms of solar activity”, Solar Physics, vol. 61, pp. 201-215, 1979, doi: https://doi.org/10.1007/BF00155456.

[73] H. Cavus, A. Kurt, “Effects of viscosity on the behavior of entropy change in the shock wave that occurred after the December 13, 2006 coronal mass ejection”, Astrophysical Bulletin, vol. 70, pp. 220-225, 2015, doi: https://doi.org/10.1134/S199034131502008X.

[74] P. L. Verma, P. Singh, P. Singh, “Coronal Mass Ejections And Disturbances In Solar Wind Plasma Parameters In Relation With Geomagnetic Storms”, Journal of Physics: Conference Series, vol. 511, p. 12060, 2014, doi: https://doi.org/ 10.1088/1742-6596/511/1/012060.

[75] H. Çavuş, D. Kazkapan, "Magnetic Kelvin–Helmholtz instability in the solar atmosphere ", New Astronomy, vol. 25, pp. 89-94, 2013, doi: https://doi.org/10.1016/j.newast.2013.04.001.

[76] C. W. Snyder, M. Neugebauer, U. R. Rao, "The solar wind velocity and its correlation with cosmic ray variations and with solar and geomagnetic activity", J. Geophys. Res., vol. 68, pp. 6361-6370, 1963, doi: https://doi.org/10.1029/JZ068i024p06361.

[77] J. H. King, N. E. Papitashvili, "Solar wind spatial scales in and comparisons of hourly Wind and ACE plasma and magnetic field data", J. Geophys. Res., vol. 110, p. A02209, 2005, doi: https://doi.org/10.1029/2004JA010649.

[78] X. Li, S. R. Habbal, "Ion cyclotron waves, instabilities and solar wind heating", Solar Physics, vol. 190, pp. 485-497, 1999, doi: https://doi.org/10.1023/A:1005288832535.

[79] X. Luan, W. Wang, G. A. Burns, S. C. Solomon, Y. Zhang, L. J. Paxton, "Unusual declining phase of solar cycle 23: Weak semi-annual variations of auroral hemispheric power and geomagnetic activity", Geophysical Research Letters, vol. 36, p. L22102, 2009, doi: https://doi.org/10.1029/2009GL040825.

[80] A. Kilcik, A. Ozguc, "One Possible Reason for Double-Peaked Maxima in Solar Cycles: Is a Second Maximum of Solar Cycle 24 Coming?", The Astrophysical Journal, vol. 289, pp. 1379–1386, 2014, doi: https://doi.org/10.1007/s11207-013-0407-4.

[81] "ESA-Solar cycle 25 prediction,NOAA" esa.int. https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2020/10/Solar_cycle_25_prediction_NOAA. [Erişim: 16.Şubat.2024].

[82] K. F. Tapping, "The 10.7 cm solar radio flux (F10.7)", Space Weather, vol. 11, pp. 394-406, 2013, doi: https://doi.org/10.1002/swe.20064.

[83] B. A. Emery, V. Coumans, D. S. Evans, G. A. Germany, M. S. Greer, E. Holeman, K. Kadinsky-Cade, Rich, W. Xu, "Seasonal, Kp, solar wind, and solar flux variations in long-term singlepass satellite estimates of electron and ion auroral hemispheric power", Journal of Geophysical Research, vol. 113, p. A06311, 2008, doi: https://doi.org/10.1029/2007JA012866.

[84] D. Bilitza, D. Altadil, Y. Zhang, C. Mertens, V. Truhlink, P. Richards, L. McKinnell, B. Reinish, "The International Reference Ionosphere 2012-a model of international collaboration.", Journal of Space Weather and Space Climate, vol. 4, no. A107, p. 12, 2014, doi: https://doi.org/10.1051/swsc/2014004.

[85] Y. Memarzadeh, 2009, "Ionospheric modeling for precise GNSS applications", Doktora Tezi, Delft University of Technology, Netherlands, 2009.

[86] H. Rishbeth, O. K. Garriott, "Introduction to Ionospheric Physics", International Geophysics , vol. 14, pp. 1-331, 1969.

[87] S. Chapman, V. C. A. Ferraro, "A new theory of magnetic storms", J. Geophys. Res., vol. 36, pp. 171–186, 1931, doi: https://doi.org/10.1029/TE036i003p00171.

[88] S. Chapman, “The absorption and dissociative or ionizing effect of monochromatic radiation in an atmosphere on a rotating earth”, vol. 43, pp. 26–45, 1931 doi: https://doi.org/10.1088/0959-5309/43/1/305.

[89] M. L. Gizawy, “Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users”, Doktora Tezi, University of Calgary, Italy, 2003.

[90] S. Todorova, T. Hobiger, R. Weber, H. Schuh, “Regıonal Ionosphere Modellıng With GPS And Comparison With Other Techniques”, [Çevrimiçi]. Mevcut: https://www.researchgate.net/publication/235246648_Regional_ionosphere_modelling_with_GPS_and_comparison_with_other_techniques.[Erişim: 16 Şubat 2024].

[91] B. Adhikari, B. Kaphle, N. Adhikari, S. Limbu, A. Sunar, R. K. Mishra, S. Adhikari, “Analysis of cosmic ray, solar wind energies, components of Earth’s magnetic field, and ionospheric total electron content during solar superstorm of November 18–22, 2003.”, SN Appl. Sci., vol. 1, pp. 1-453, 2019, doi: https://doi.org/10.1007/s42452-019-0474-8.

[92] G. Abraha, “Total electron content (TEC) variability of low latitude ionosphere and role of dynamical coupling: quiet and storm-time characteristics.” Doktora Tezi, Addis Ababa University, Addis Ababa, Ethiopia, 2014.

[93] L. Liu, W. Wan, Y. Chen, “Solar activity effects of the ionosphere: A brief review”, Chin. Sci. Bull., Vol. 56, pp. 1202–1211, 2011, doi: https://doi.org/10.1007/s11434-010-4226-9.

[94] A. Komjathy, “Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System”, Doktora Tezi. Thesis, Dept. of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 188, Univ. of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1997.

[95] M. B.McElroy, “Ionosphere and Magnetosphere.” , [Çevrimiçi].Mevcut: https://www.britannica.com/science/ionosphere-and-magnetosphere.[Erişim: 16 Şubat 2024].

[96] R. Schunk, A. Nagy, “Ionospheres. Physics, Plasma Physics and Chemistry”, [Çevrimiçi].Mevcut: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/79547/5/Ionospheres.pdf [Erişim: 16 Şubat 2024].

[97] R. J. Moffett, J. A. Murphy, G. J. Bailey, “Storm-time increases in the ionospheric total electron content”, Nature, vol. 253, pp. 330 – 331, 1975, doi: https://doi.org/10.1038/253330a0.

[98] T. F. Tascione, “Introduction to the space environment”, Orbit Book Co. Inc. and Krieger Publishing Co., 1988.

[99] M. Förster, N. Jakowski, “Geomagnetic storm effects on the topside ionosphere and plasmasphere: a compact tutorial and new results”, Surv. Geophys., vol. 21, pp. 47-87, 2000, doi: https://doi.org/10.1023/A:1006775125220.

[100] K. A. Berényi, V. Barta, Á. Kis, "Midlatitude ionospheric F2-layer response to eruptive solar events-caused geomagnetic disturbances over Hungary during the maximum of the solar cycle 24: A case study.", Advances in Space Research, vol. 61, pp. 1230–1243, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.12.021.

[101] D. Odijk, "Fast Precise GPS Positioning in the Presence of Ionospheric Delays" [Çevrimiçi].Mevcut: https://www.researchgate.net/publication/27348975_Fast_Precise_GPS_Positioning_in_the_Presence_of_Ionospheric_Delays [Erişim: 16 Şubat 2024].

[102] S. Skone, M. Cannon, "Ionospheric effects on differential GPS applications during auroral substorm activity", ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, vol. 54, pp. 279-288, 1999, doi: https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00017-9.

[103] D. R. Weimer, N. C. Maynard, W. J. Burke, C. Liebrecht, "Polar cap potentials and the auroral electrojet indices", Planetary and Space Science, vol. 38, pp. 1207-1222, 990, doi: https://doi.org/10.1016/0032-0633(90)90028-O.

[104] M. Mendillo, "A study of the relationship between geomagnetic storms and ionospheric disturbances at mid-latitudes", Planet. Space Sci., vol. 21, pp. 349–358, 1973, doi: https://doi.org/10.1016/0032-0633(73)90033-0.

[105] S. Alcay, M. Gungor, "Investigation of ionospheric TEC anomalies caused by space weather conditions, Astrophysics and Space Science , vol. 365, no. 150, 2020, doi: https://doi.org/10.1007/s10509-020-03862-x.

[106] E. L. Gunnarsdóttir, "Earth's magnetic field", Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 451, 2014, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-642-41714-6_50293.

[107] P. M. Banks, T. E. Holzer, "The polar wind", Journal of Geophysical Research, vol. 73, pp. 6846-6854, 1968, doi: https://doi.org/10.1029/JA073i021p06846.

[108] M. B. McElroy, "Ionosphere and Magnetosphere", [Çevrimiçi].Mevcut: https://www.britannica.com/science/ionosphere-and-magnetosphere [Erişim: 16 Şubat 2024].

[109] K. Aksaç, "Yüksek Enlem foF2 Değerlerindeki Değişimlerin Jeomanyetik Aktiviteye Bağlılığı", Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 2017.

[110] G. W. Prölss, "9 Lines With All of Physics-Motion Mountain", [Çevrimiçi].Mevcut: https://www.motionmountain.net/9lines.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAiArLyuBhA7EiwA-qo80EeUjdabpnpX2c0nUDzPZQnUdZnoZmlcsm7RJtTQDqgSim78p5Q--hoCy-MQAvD_BwE. [Erişim: 16 Şubat 2024].

[111] G. Seeber, (2003), "Satellite Geodesy", [Çevrimiçi].Mevcut: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-seeber-g-satellite-geodesy-2003.pdf. [Erişim: 16 Şubat 2024].

[112] S. Chapman, K. Davies, “on The Approximate Daytime Constancy of The Absorption of Radio Waves in The Lowet Ionosphere”, Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics, vol. 13, pp. 86-89, 1958, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9169(58)90027-8.

[113] S. Chapman, “The Absorption and Dıssociative or Ionizing Effect of Monochromatic Radiation in An Atmosphere on A Rotating Earth”, Proc. Phys. Soc., vol. 43, 1931, doi: https://doi.org/10.1088/0959-5309/43/1/305.

[114] A. Danilov, J. Lastovicka, “Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere”, International Journal of Geomagnetism and Aeronomy, vol. 2, pp. 209-224, 2001.

[115] D. Buresova, G. D. Franceschi, J. Lastovicka, “Manifestation of Strong Geomagnetic Storms in the Ionosphere above Europe”, Space Weather, vol. 344, pp. 185-202, 2007, doi: https://doi.org/10.1007/1-4020-5446-7_17.

[116] A. D. Danilov, A. V. Konstantinova, “Ionospheric Precursors of Geomagnetic Storms. 1. A Review of the Problem”, Geomagnetism and Aeronomy, vol. 59, pp. 554-566, 2019, doi: https://doi.org/10.1134/S0016793219050025.

[117] W. D. Gonzalez, A. Joselyn, H. W. Kroehl, G. Ros, B. T. Tsuru, V. M. Vasyliunas, “What is a geomagnetic storm?”, Journal of Geophysical Research, vol. 99, pp. 5771–5792, 1994, doi: https://doi.org/10.1029/93JA02867.

[118] Kyoto, “Real-time (Quicklook) Dst Index Monthly Plot and Table”, [Çevrimiçi].Mevcut: https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst_realtime/202311/index.html. [Erişim: 16 Şubat 2024].

[119] GFZ Postdam, “What is the Kp index? - Space Weather”, What is the Kp index?, [Çevrimiçi].Mevcut: https://spaceweather.gfz-potsdam.de/products-data/nowcasts/nowcast-kp-index/what-is-the-kp-index. [Erişim: 16 Şubat 2024].

[120] “Planetary K-index” | NOAA / NWS Space Weather Prediction Center. Retrieved December 20, 2022, from https://www.swpc.noaa.gov/products/planetary-k-index

[121] Y. Tulunay, “Interplanetary magnetic field and its possible effects on the midlatitude ionosphere II”, Annali Di Geofisica, vol. 37, pp. 193-200, 1994, doi: https://doi.org/10.4401/ag-4226.

[122] G. W. Prölss, “Ionospheric F-region storms, in Handbook of Atmospheric Electrodynamics”, vol. 2, pp. 195 – 248, 1995.

[123] A. J. Kavanagh, “Energy Deposition in the Lower Auroral Ionosphere Through Energetic Particle Precipitation”, PhD thesis, Physics, Lancaster University, UK, 2002.

[124] T. N. Davis, M. Sugiura, “Auroral electrojet activity index AE and its universal time variations”, Journal of Geophysical Research, vol. 71, pp. 785-801, 1966, doi: https://doi.org/10.1029/JZ071i003p00785.

[125] J. H. Allen, H. W. Kroehl, “Spatial and temporal distributions of magnetic effects of auroral electrojets as derived from AE indices”, J. Geophys. Res.,

vol. 80, no. 25, pp. 3667-3677, 1975, doi: https://doi.org/10.1029/JA080i025p03667.

[126] S. Matsushita, “A study of the morphology of ionospheric storms”, J. Geophys. Res., vol. 64, pp. 305–321, 1959, doi: https://doi.org/10.1029/JZ064i003p00305.

[127] B. G. Fejer, “Low latitude storm time ionospheric electrodynamics”, J. Atmos. Sol. Terr. Phys., vol. 64, pp. 1401–1408, 2002, doi: https://doi.org/10.1016/S1364-6826(02)00103-7.

[128] K. Davies, “Studies of ionospheric storms using a simple model”, J. Geophys. Res., vol. 79, pp. 605–613, 1974, doi: https://doi.org/10.1029/JA079i004p00605.

[129] K. Davies, “A model of ionospheric F-2 region storms in middle latitudes”, Planet. Space Sci., vol. 22, pp. 237–253, 1974, doi: https://doi.org/10.1016/0032-0633(74)90027-0.

[130] G. W. Prölss, U. von Zahn, “Esro 4 gas analyzer results: 2. Direct measurements of changes in the neutral composition during an ionospheric storm”, J. Geophys. Res., vol. 79, pp. 2535–2539, 1974, doi: https://doi.org/10.1029/JA079i016p02535.

[131] M. J. Seaton, “A possible explanation of the drop in F-region critical densities accompanying major ionospheric storms”, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 8, pp. 122–124, 1956, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9169(56)90102-7.

[132] K. L. Jones, H. Rishbeth, “The origin of storm increases of mid-latitude F-layer electron concentration”, J. Atmos. Terr. Phys., vol. 33, pp. 391–401, 1971, doi: https://doi.org/10.1016/0021-9169(71)90144-9.

[133] J. K. Hargreaves, F. Bagenal, “The behavior of the electron content during ionospheric storms: A new method of presentation and comments on the positive phase”, J. Geophys. Res., vol. 82, pp. 731–733, 1977, doi: https://doi.org/10.1029/JA082i004p00731.

[134] G. W. Prölss, “Ionospheric Storms at Mid-Latitude: A Short Review”, vol. 181, 2008, doi: https://doi.org/10.1029/181GM03.

[135] A. Danilov, J. Lastovicka, “Effects of geomagnetic storms on the ionosphere and atmosphere”, International Journal of Geomagnetism and Aeronomy, vol. 2, pp. 209-224, 2001.

[136] M. Mendillo, X.-Q. He, H. Rishbeth, “How the effects of winds and electric fields in F2-layer storms vary with latitude and longitude: A theoretical study”, Planet. Space Sci., vol. 40, pp. 595–606, 1992, doi: https://doi.org/10.1016/0032-0633(92)90001-5.

[137] M. Li, Y. Yuan, B. Zhang, N. Wang, Z. Li, X. Liu, X. Zhang, “Determination of the optimized single-layer ionospheric height for electron content measurements over China”, Journal of Geodesy, vol. 92, pp. 169–183, 2018, doi: https://doi.org/10.1007/s00190-017-1054-6.

[138] G. W. Prölss, “Ionospheric F Region Storms”, International Journal of Astronomy and Astrophysics, vol. 8, no. 2, pp. 195-248, 1995.

[139] N. Matuura, “Theoretical models of ionospheric storms”, Space Sci. Rev., vol. 13, pp. 124–189, 1972, doi: https://doi.org/10.1007/BF00198166.

[140] M. Mendillo, “Behavior of the ionospheric F-region during geomagnetic storms, Final Sci. Rep.”, AFGL-TR-78 – 0092, A. F. Syst. Comm., Air Force Geophys. Lab., Hanscom Air Force Base, Bedford, Mass., 1978.

[141] A. R. Jain, M. R. Deshpande, G. Sethia, R. G. Rastogi, M. Singh, H. S. Gurm, V. Janve, R. K. Rai, “Geomagnetic storm effects on ionospheric total electron content in Indian zone—part II: Evidence of equatorial electrojet control through fountain effect”, IJRSP, vol. 7, pp. 254–261, 1978, doi: http://nopr.niscpr.res.in/handle/123456789/37338.

[142] M. Freeshah, X. Zhang, E. Şentürk, M. A. Adil, B. G. Mousa, A. Tariq, X. Ren, M. Refaat, “Analysis of Atmospheric and Ionospheric Variations Due to Impacts of Super Typhoon Mangkhut (1822) in the Northwest Pacific Ocean”, Remote Sensing, vol. 13, pp. 661, 2021, doi: https://doi.org/10.3390/rs13040661.

[143] “User guide | Introduction | ISES, RWC Japan”, [Çevrimiçi].Mevcut: https://swc.nict.go.jp/en/knowledge/.[Erişim: 17 Şubat 2024].

[144] R. Vaishnav, C. Jacobi, J. Berdermann, “Long-term trends in the ionospheric response to solar extreme-ultraviolet variations”, Annales Geophysicae, vol. 37, pp. 1141–1159, 2019, doi: https://doi.org/10.5194/angeo-37-1141-2019.

[145] S. Sağır, R. Atıcı, “Jeomanyetik fırtına süresince NeQuick2 modelinin performansı.”, MAUN Fen Bilimleri Dergisi, vol. 7, pp. 689-696, 2019, doi: https://doi.org/10.18586/msufbd.650664.

[146] C. M. Ho, A. J. Mannucci, U. J. Lindqwister, X. Pi, B. T. Tsurutani, “Global ionosphere perturbations monitored by the Worldwide GPS Network”, Geophysical Research Letters, vol. 23, pp. 3219-3222, 1996, doi: https://doi.org/10.1029/96GL02763.

[147] Ç. Mekik, “Tropospheric Delay Models in GPS, Proceed. of Int. Symp. On GIS/GPS”, pp. 156-170, 1997.

[148] L. Ciraolo, F. Azpilicueta, C. Brunini, A. Meza, S. M. Radicella, “Calibration errors on experimental slant total electron content (TEC) determined with GPS.”, Journal of Geodesy, vol. 81, pp. 111–120, 2007, doi: https://doi.org/10.1007/s00190-006-0093-1.

[149] E. J. Petrie, M. Hernández-Pajares, P. Spalla, P. Moore, M. A. King, “A Review of Higher Order Ionospheric Refraction Effects on Dual Frequency GPS”, Surveys in geophysics, vol. 32, pp. 197-253, 2011, doi: https://doi.org/10.1007/s10712-010-9105-z.

[150] M. L. Gizawy, “Development of an ionosphere monitoring technique using GPS measurements for high latitude GPS users”, Doktora Tezi, University of Calgary, Italy, 2003.

[151] R. B. Langley, “Monitoring the Ionosphere and Neutral Atmosphere with GPS, Viewgraphs of invited presentation to the Canadian Association of Physicists Division of Atmospheric and Space Physics Workshop”, Fredericton, N.B.

[152] G. Ma, T. Maruyama , "Derivation of TEC and estimation of instrumental biases from GEONET in Japan", Annales Geophysicae, vol. 21, pp. 2083-2093, 2003, doi: https://doi.org/10.5194/angeo-21-2083-2003.

[153] S. Brown, D. Bilitza, E. Yigit, "Ionosonde-based indices for improved representation of solar cycle variation in the international reference ionosphere model", J. Atmos. Sol.-Terr. Phys., vol. 171, pp. 137–146, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.08.022.

[154] K. A. Berényi, V. Barta, A. Kis, "Midlatitude ionospheric F2-layer response to eruptive solar events-caused geomagnetic disturbances over Hungary during the maximum of the solar cycle 24: A case study.", Advances in Space Research, vol. 61, no. 5, pp.1230–1243, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/J.ASR. 2017.12.021.

[155] E.Calais, J. B. Minster, "GPS, earthquakes, the ionosphere, and the Space Shuttle", Physics of the Earth and Planetary Interiors, vol. 105, no. 3-4, pp. 167-181, 1998, doi: https://doi.org/10.1016/S0031-9201(97)00089-7.

[156] S. Hu, A. Bhattacharjee, J. Hou, B. Sun, D. Roesler, S. Frierdich, N. Gribbs, J. Whited, "Ionospheric storm forecast for high-frequency communications", Radio Sci., vol. 33, pp. 1413–1328, 1998, doi: https://doi.org/10.1029/98RS02219.

[157] B. W. Reinisch, H. Xueqin, "Automatic calculation of electron density profiles from digital ionograms: Processing of bottomside ionograms", Radio Science, vol. 18, no. 3, pp. 477–492, 1983, doi: https://doi.org/10.1029/RS018i003p00477.

[158] W. Wan, F. Ding, Z. Ren, M. Zhang, L. Liu, B. Ning, "Modeling theglobal ionospheric total electron content with empirical orthogonal functionanalysis.", Science China Technological Sciences, vol. 55, no. 5, pp. 1161- 1168, 2012, doi: https://doi.org/10.1007/s11431-012-4823-8.

[159] S. Skone, M. de Jong, "The Impact of Geomagnetic Substorms on GPS Receiver Performance", Earth Planets and Space, vol. 52, pp. 1067- 1071, 2000, doi: https://doi.org/10.1186/BF03352332.

[160] U. Sezen, F. Arikan, O. Arikan, O. Ugurlu, "Sadeghimorad, A., Online, automatic, near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC", Space Weather, vol. 11, no. 5, pp. 297–305, 2013.

[161] R. Vaishnav, C. Jacobi, J. Berdermann, "Long-term trends in the ionospheric response to solar extreme-ultraviolet variations", Annales Geophysicae, vol. 37, no. 6, pp. 1141–1159, 2019, doi: https://doi.org/10.5194/angeo-37-1141-2019.

[162] K. C. Yeh, S. Y. Ma, K. H. Lin, R. O. Conkright, "Global ionospheric effects of the October 1989 geomagnetic storm", J. Geophys. Res., 99, 6201-6218, 1994, doi: https://doi.org/10.1029/93JA02543.

[163] I. Stanislawska, Z. Zbyszynski, "Forecasting of the ionospheric quiet and disturbed *f* o F 2 values at a single location", Radio Science, vol. 36, no. 5, pp. 1065–1071, 2001, doi: https://doi.org/10.1029/1999RS002242.

[164] S. Klotz, N. L. Johnson, Encyclopedia of Statistical Sciences, Volume 1 - Google Kitaplar,Kitaplar, [Çevrimiçi].Mevcut:

https://books.google.com.tr/books?hl=tr&lr=&id=2ZdKEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1&dq=Encyclopedia+of+Statistical+Sciences,+John+Wiley+and+Sons.&ots=zArAXQfIfN&sig=jta9xFgWm5DJoCe-8ORYPwQeA3U&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. [Erişim: 17 Şubat 2024].

[165] L.F. Chernogor, I. F. Domnin, "Physics of Geospace Storms." Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. P. 407, 2014.

[166] M. Mendillo, "Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content", Rev. Geophys., vol. 44, no. 4, pp. 1-47, 2006, doi: https://doi.org/10.1029/2005RG000193.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Bayhan, C., & Can, Z. (2022). 6 Mart 2016 ve 28 Mayıs 2017 Jeomanyetik Fırtınaların Kutup Bölgelerinde Yarattığı İyonosferik Fırtınalar. 6. Ulusal Kutup Bilimleri Çalıştayı. Trabzon
2. Bayhan, C., & Can, Z. (2022). 16 Temmuz 2017 Jeomanyetik Fırtınanın İyonosferde Yarattığı Değişim. Türk Fizik Derneği 38. Uluslararası Fizik Kongresi. Bodrum
3. Bayhan, C., & Can, Z. (2023). Farklı Seviyelere Sahip CME Kökenli Jeomanyetik Fırtınaların İyonosfere Olan Tepkisi. Türk Fizik Derneği 39. Uluslararası Fizik Kongresi. Bodrum
4. Bayhan, C., & Can, Z. (2023). Kutup Bölgesi Üzerindeki İyonosferik TEC Değişimleri. 7. Ulusal Kutup Bilimleri Sempozyumu ve 3. Kutup Şenliği. İstanbul

Projeler

1. Bayhan, C., & Can, Z. (2024). Jeomayetik Fırtınalara İyonosferin Tepkisi. 5624 Numaralı Bilimsel Araştırma Projesi (BAP). İstanbul