TÜBİTAK

Yakın Uzay Ortamında Uzay Havası ve Etkileri: Ay Mesafesinde Manyetosfer Ortamı, Manyetosfer-Iyonosfer-Termosfer İlişkileri ve İyonosfer

Program Kodu: 1001

Proje No: 113Y213

Proje Yürütücüsü:
Prof. Dr. Zerefşan KAYMAZ

Bursiyerler:

Ayşegül Ceren Moral	Eylül 2013-Nisan 2015	Yüksek lisans+PhD
Emine Ceren Kalafatoğlu	Eylül 2013-Şubat 2016	PhD
İklim Gençtürk Akay	Eylül 2013-Eylül 2016	PhD
Bute Naz Erbaş	Eylül 2015-Eylül 2016	Yüksek lisans
Yiğit Çay	Eylül 2015-Eylül 2016	Yüksek lisans

KASIM 2016
İSTANBUL

ÖNSÖZ

Bu projede yere yakın uzay ortamı ve ortamın güneş rüzgârı ile etkileşimi uydu verileri ve uzay havası modelleri aracığıyle detaylı olarak incelenmiştir. Yere yakın uzay ortamı manyetosfer, iyonosfer ve termosfer bölgelerini kapsamaktadır. Uzay havası Güneş'in manyetik ve plazma alanında meydana gelen olayları, bu olayların oluşum sebeplerini ve temporal değişkenliğini, gezegensel ortam içerisinde geçirdiği değişimi (evrimi) ve ortama etkilerini ve bunların tahminini içermektedir. Biraz daha spesifik olursak, Dünya için uzay havası, güneş aktivitelerinde ve güneş rüzgârında meydana gelen değişimlerin yere yakın uzay ortamına olan bozucu etkilerinin belirlenmesine ve bu bozucu etkileri azaltmak ve/veya ortadan kaldırmak için gerekli tedbirlerin alınmasına yönelik bilimsel ve teknolojik alt yapının oluşturulması çalışmalarını içerir. Dolayısıyle uzay havasının elemanları güneş aktivitelerine yol açan güneş lekeleri, koronal kütle atımı (CME), güneş alevleri, patlayan manyetik halkalar (prominence), gezegenler arası şok yapıları, kuvvetli güneş rüzgârları vb gibidir. Güneş'de meydana gelen bu olaylar güneş rüzgârı yolu ile Dünya'yı içine alan yere yakın uzay ortamına taşınır. Güneş rüzgârı ve diğer güneş olayları yere yakın uzay ortamı ile etkileşir. Bu etkileşim sonucunda yakın uzay ortamının genel yapısında bir takım değişiklikler meydana gelir. İkisi arasındaki etkileşimi irdeleyebilmek için öncelikle yere yakın uzay ortamının genel yapısını ve özelliklerini bilmek gerekir. Bu çalışmamızda manyetosfer, iyonosfer ve termosferden oluşan uzay ortamının yapısını uzay uydusu verileri ile incelemekte, güneş rüzgârının, güneş aktivitelerinin ve manyetosferik fırtınaların bu yapı üzerindeki etkilerini ortaya koymaktayız.

Projemizde NASA'a ait uzay uydusu ve radar gözlemleri kullanılarak, ay mesafesinde (-60 R_e, 1 R_e=6371 km) Dünya'nın gece tarafındaki manyetosfer ortamının (manyetik kuyruk) manyetik ve plazma (parçacık hızı, yoğunluk, sıcaklık) yapısı ve güneş rüzgârı ve manyetik alanı ile olan etkileşimi; manyetik fırtına dönemlerinde manyetosfer ile iyonosferin birbirleri ile olan etkileşimi; iyonosfer ortamının yapısı ve manyetosferik fırtına dönemlerindeki değişkenliği gözlemlere dayalı olarak incelenmiş ve mevcut manyetosferik ve iyonosferik model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Manyetik kuyruk çalışmalarında özellikle güneş rüzgârının manyetik alanının (IMF) ve plazmasının manyetik kuyruğun manyetik alan ve plazma yapısına olan etkileri vektör haritaları ile, buna ilaveten manyetopoz sınır tabakanın yapısına, geometrisine, boyutuna ve hareketine olan etkilerine de vaka bazında ve istatistiksel olarak bakılmıştır, mevcut modeller çerçevesinde karşılaştırmalar yapılmıştır.

Manyetosferik fırtınalar, manyetik kuyruğun yaklaşık olarak 10-20 R_e mesafesinde, manyetik birleşme sonucunda oluşan ve yüksek enerjili parçacık üreten olaylardır. Güneş'in manyetik alanının (IMF) yönüne bağlı olarak meydana gelirler. Manyetik fırtınalar sırasında atmosfere çok yüksek miktarlarda parçacık akışı olur ve iyonosferin ve termosferin yapısı değişime uğrar. IMF ne kadar güneyli ise o kadar çok yüksek enerjili parçacık Dünya

atmosferine akar. Çalışmamızın manyetosfer-iyonosfer etkileşimi kısmında manyetosferik fırtınaların atmosferin iyonosfer ve termosferinde meydana getirdiği sıcaklık ve nötral rüzgâra olan etkileri Joule ısınması aracılığıyle incelenmiş, irdelenmiş ve model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. İyonosfer kısmında ise, manyetik ve manyetosferik fırtınaların İstanbul üzerindeki iyonosfere etkileri vaka çalışmaları ve istatistiksel olarak incelenmiş ve iyonosferik modellerle karşılaştırmalar yapılmıştır. Çalışmamızın bu bölümünde aynı zamanda, İstanbul üzerindeki iyonosferin yapısı, yani elektron yoğunluğu ve kritik frekansların genel dağılımı ve değişkenlikleri ortaya konulmuş, GPS uydu haberleşmesi ile ilişkisi incelenmiş, manyetosferik fırtınaların etkisi çalışılmıştır. İyonosfer ortamı çalışmaları ilk defa bu kadar sistematik bir şekilde ve ülkemizde şu anda tek olan İTÜ iyonozonde radar sistemi kullanılarak yürütülmüştür. Çalışmalarımızda gözlemsel analizlerin yanısıra, elde edilen bulgular uzay havası tahmininde kullanılan modeller ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmalar yolu ile modellerin güvenilirlik dereceleri incelenmiş, model-gözlem benzerlikleri ve aykırılıkları ortaya konulmuştur. Bu incelemeler gözlemlerin arkasındaki fiziksel ve dinamik olayları ortaya çıkarırken, modellerin tahmin edebilirlik düzeylerinin iyileştirilmesine de katkıda bulunmaktadırlar.

Yere yakın uzay ortamı pek çok farklı amaç ile uzaya gönderilen uyduların dolaştığı uzay bölgesidir. Bir kaç örnek verecek olursak askeri ve savunma amaçlı, meteorolojik amaçlı, telekomünikasyon amaçlı gibi. Bunların yanısıra çoğu zaman uydular, ortamı incelemek ve anlamak için bilimsel çalışmalar yapmak üzere gönderilmektedirler. Bu uydular öngörülen bilimsel amaca yönelik olarak uzayda incelenecek bölgenin yapısı ve değişkenliği gözönüne alınarak donatılan ve bilimsel yükü belirlenen uydulardır. Bu uydular yer merkezli olup yerden 100 km'den başlayarak gezegenler arası ortamı inceleyecek şekilde yörüngelere sahip olabilirler. Uzay havasında meydana gelen değişimler bu uyduların çalışmasına, yörüngesini muhafaza etmesine, üzerinde bulunan aletlerin veri toplamasına, uyduların yer ile olan haberleşmelerine ve uydunun sağlıklı işlemesine engel olacak pek çok zararlı etkiye sahiptir. Ortamın yapısı ve değişkenliklerinin bilinmesi bu etkilerinin azaltılmasında önemli rol oynamaktadır. Bu gün gezegenimizde artan nüfusun yarattığı pek çok sosyoekonomik problemler çözülemeyecek boyutta olup, gelişmiş ülkelerin uzay ortamına yaptıkları yatırımın gün geçtikçe artmasına neden olmuştur. Gezegenimizin tek uydusu ve Dünya'a en yakın gök cismi olması nedeni ile Ay ve Ay etrafındaki atmosfer ve uzay ortamının bilinmesi, araştırılması bu açıdan çok büyük önem arzetmektedir. Çalışmamızda kullandığımız ARTEMIS uydu çiftinin, Ay etrafında hareket ederken ve Ay ile birlikte manyetik kuyruk içerisinde ilerlerken kaydetmiş olduğu manyetik alan ve parçacık verileri, en son teknolojik seviyede Ay çevresindeki manyetosfer ortamını incelememize olanak vermektedir. Projemizde elde ettiğimiz sonuçlar bu yöndeki çalışmalara katkı vermek amacı ile değişik platform ve konferanslarda sözlü ve yazılı bildirilerle sunulmuştur. Benzer şekilde alçak yörüngeli uyduların en sert uzay havası şartları

altında (güneş ve manyetik fırtınaların en yüksek olduğu dönemler) genişleyen atmosfer ve artan sürükleme kuvveti nedeni ile yörüngede kalabilmeleri tamamen güneş rüzgârı ve manyetosferik şartların bilinmesine bağlıdır. Bunun için kullandığımız Joule ısınması parametresi bu konudaki modelleri test ederken daha etkin uzay havası tahminlerinin yapılmasına katkıda bulunmaktadır. Çalışmamızda İstanbul iyonozonde verilerini kullanarak ortaya koyduğumuz iyonosferik yapının manyetosferik fırtına dönemlerindeki değişkenlikleri Dünya üzerinde uzun mesafeli ve uzayda uydularla haberleşme imkânlarını kısıtlar veya tamamen ortadan kaldırır. Iyonosferik durumların belirlenmesi bu şartların da iyileştirilmesine büyük katkıda bulunur. Uydu teknolojilerinin rolü her geçen gün günlük yaşantımızda giderek artmaktadır. Uzaya gönderilen uyduların sayısı da bu ihtiyaca göre katlanarak artmaktadır. Günlük yaşantımızda giderek bağımlısı olduğumuz uydu teknolojilerinin ortamdaki bu değişkenliklerden minimum düzeyde etkilenmesi gerekmektedir. Milyonlarca dolar harcanarak gönderilen bu uyduların, süresi içinde verimli bir şekilde hizmet verebilmeleri ve yörüngede kalabilmeleri tamamen güneş rüzgârı-manyetofer-iyonosfer ortamındaki şartların çok iyi bir şekilde bilinmesi ve modellenmesi ile mümkündür. Projemiz bu konulardaki stratejik planlama ve bilimsel çalışmalara yardımcı olacak yön gösterici sonuçlar sunmaktadır. Projemizin son kısmında üç grup halinde yürüttüğümüz proje sonuçlarının bir sentezi yapılmakta ve ülkemizdeki ve uluslararası çalışmalardaki yeri ortaya konulmaktadır.

Projemizde kullandığımız ARTEMIS uydusu ve tamamlayıcı diğer bütün uydu verileri NASA CDAWeb sayfasından, kullanım şartları gözetilerek, elde edilmiş olup bu uydularda veri toplamak için kullanılan aletlerin yürütücülerine teşekkür ederiz. Model çalışmaları için yine NASA CCMC Space Weather Laboratory kullanılmıştır. Bu konuda destek veren CCMC grubuna ayrıca teşekkür ederiz. Iyonosfer çalışmamızda kullandığımız veriler için İstanbul Teknik Üniversitesi Rektörlüğü iyonozonde radarının alımı ve kurulumunda destek vermiştir. Bu konuda ekibimize ve diğer yardımcı olanlara teşekkür ederiz. Ölçülen iyonozonde verilerinin arşivlenmesinde ise projemizin kaynakları kullanılmıştır.

Projemiz TÜBİTAK 1001 projesi olup, 113Y213 proje numarası ile desteklenmiştir. Yukarı Atmosfer ve Uzay Havası Laboratuvarı'nın Uzay Havası Modellerinin çalıştırılması ve yüksek miktarlarda yukarı atmosfer ve uzay havası verilerinin analizi ve yorumlanmasına yönelik iş istasyonları ve brifing ekranları; İTÜ Maslak kampüsü içerisinde bulunan iyonozonde radarının verilerinin depolanması için alınan depolama üniteleri, radarın bakımı için gerekli makine ve teçhizat; proje süresince ihtyacımız olan bilgisayar yazılımları (IDL, vb.) ve sarf malzemesi ve gerektiğinde hizmet alımları bu projemizin kaynaklarından sağlanmıştır. Projemizi destekleyen ve projemizin yürütülmesi sırasında karşılaşılan her türlü problemin giderilmesinde, güçlüklerin aşılmasında yardımcı olan TÜBİTAK ÇAYDAG birimine teşekkürlerimiz sonsuzdur.

TÜBİTAK

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ i
İÇİNDEKİLER iv
ÖZET v
ABSTRACT vi
TABLO LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
1. GİRİŞ 1
2. LİTERATÜR ÖZETİ 2
3. GEREÇ VE YÖNTEM 10
    3.1. Ay mesafesinde ($x=-60R_e$)Manyetik Kuyruk ve Manyetopoz 10
    3.2. Manyetosfer-Iyonosfer Etkileşimi (MI-Etkileşimi) 12
    3.3. İstanbul Üzerindeki Iyonosferin Yapısı ve Özelliklerinin Belirlenmesi 13
4. BULGULAR VE TARTIŞMA 13
    4.1. ARTEMIS uydusu ile Manyetik Kuyruğun Incelenmesi 13
    4.2. Manyetosfer-Iyonosfer Etkileşimi 20
    4.3. İstanbul Üzerindeki Iyonosferik Elektron Yoğunluğu Değişimi 25
5. SENTEZ 29
6. SONUÇLAR 32
7. ÖNERİLER 34
8. TEŞEKKÜR 35
YAYIN ÇALIŞMALARI 36
KAYNAKLAR 40
EKLER 45
    EK 1. TABLOLAR 45
    EK 2. ŞEKİLLER 51
    EK 3. MAKALELER 118

ÖZET

Projemizin amacı yere yakın uzay ortamının manyetik ve plazma yapısını incelemek ve güneş rüzgârının bu yapıyı nasıl etkilediğini ortaya koymaktır. Bu çalışmada incelenen yere yakın uzay ortamı manyetosfer, iyonosfer ve termosfer bölgeleridir. Çalışmalarımızı üç ana gruba ayırarak yürütmüş bulunuyoruz: 1. Manyetosferin -60 Re'deki yapısını anlamak ve değişimlerini incelemek, 2. Manyetosfer-Iyonosfer etkileşimini incelemek ve 3. Iyonosferin yapısını ve manyetik fırtınalar sırasındaki değişkenliğini incelemek. Öncelikle bu bölgelerin genel yapısı ARTEMIS uydusu verileri ile incelenmiş ve bunu takiben bu yapının değişken güneş rüzgârı şartları altındaki değişimleri araştırılmıştır.

Çalışmalarımız seçilmiş vaka çalışmaları, istatistiksel veri analizleri ve model karşılaştırmaları olarak yürütülmüştür. Çalışmalarımızda kullandığımız veriler uydulardan elde edilen manyetik alan, parçacık hızı, yoğunluğu ve sıcaklık verileridir. Bunlara ilaveten yüksek enerjili parçacık akısı ve diğer türetilmiş değişkenler (dinamik basınç, plazma basıncı, elektrik alanı, elektrik akımı vb) kullanılmıştır. Manyetosfer-iyonosfer etkileşimi kısmında SuperDARN radar verileri (plazma hızı, yönü, elektrik potansiyeli vb), iyonosferik değişkenliğin belirlenmesi kısmında ise İTÜ Yukarı Atmosfer ve Uzay Havası Laboratuvarı (YA-UHlab) iyonozonde radarından elde edilen elektron yoğunluğu ve diğer iyonosferik veriler kullanılmıştır. Veri-model karşılaştırmalarında NASA/GSFC Space Weather Laboratory'da bulunan küresel MHD ve iyonosfer modelleri kullanılmıştır. ARTEMIS uydu verileri ile manyetosferin ay mesafesindeki yapısı ve özellikleri belirlenmiştir. Manyetik kuyruğun boyutunun güneşin manyetik alanı (IMF) ve dinamik basıncı ile değişimi gösterilmiştir. Küresel MHD modeli BATSRUS ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Manyetosfer-iyonosfer etkileşimi kısmında BATSRUS modeli İyonosferik Elektrodinamik (IE) modülü eklenerek çalıştırılmıştır. Manyetik fırtınalar döneminde Joule ısınması belirlenmiş, modellerin uyumları test edilip, farklılıklar sayısal olarak değerlendirilmiştir. CHAMP uydu verileri ve modellerin manyetik fırtına dönemleri esnasında yoğunluk tahminleri kullanılarak modeller birbirleri ile kalibre edilmiştir. Iyonosfer çalışmalarımızda TIEGCM, GITM, CTIPe ve IRI iyonosferik modelleri kullanılmıştır. İstanbul enlemlerindeki elektron yoğunluğu ve F2 tabakasına ait kritik frekansın temporal değişimleri (günlük, mevsimsel, yıllık) ile manyetik fırtınaların elektron yoğunluğu üzerine etkileri belirlenmiştir. Model-veri karşılaştırmaları sonucunda benzerlik/aykırıklar tesbit edilmiş ve böylece hem uzay havası tahminlerinin başarısı açısından modellerin iyileştirilmesine çalışılmış, hem de ortamı etkileyen fiziksel ve dinamik süreçler tartışılmıştır.

Anahtar kelimeler: Güneş rüzgârı, IMF, Manyetik fırtınalar, ARTEMIS uydusu, manyetosfer, manyetopoz, manyetik kuyruk, Joule ısınması, SuperDARN, iyonosfer, kritik frekans, toplam elektron yoğunluğu (TEC), MHD modelleri, iyonosferik modeller, GPS.

ABSTRACT

The aim of this project is to investigate the magnetic and plasma properties of the near Earth space environment and its interaction with the solar wind. The near Earth space environment in this study covers the space regions that include magnetosphere, ionosphere and thermosphere. We divide our study into three subsections: 1. Magnetotail structure at -60Re, 2. Magnetosphere-ionosphere coupling during magnetospheric substorms, and 3. Ionospheric variability at mid latİTÜdes and the magnetospheric storm/substorm effects on the ionosphere.

Our method of analysis is based on the selected case studies, statistical analysis of spacecraft data and comparisons with models. The data include magnetic field, particle velocity, density and temperature as well as the energetic particle flux and other derived quantities such as dynamic pressure, plasma pressure, electric field and electric currents etc. In addition, in the magnetophere-ionosphere coupling part, ionospheric plasma velocity, and direction and electric potential data from SuperDARN radar; and in the ionospheric part, elektron density and critical frequency data from İTÜ's Upper Atmosphere and Space Weather Laboratory (UA-SWIab) ionosonde radar were used. For comparisons between data and models, global MHD and ionospheric models were used and run at NASA's CCMC Space Weather Lab. computers. Global MHD model BATSRUS for magnetospheric studies, BATSRUS with IE module for coupling studies and ionospheric models which are TIEGCM, GITM, CTIPe and IRI. In the ionospheric part, temporal variations of the ionospheric elektron density, TEC and critical frequency for F2 layer (daily, seasonal and annual) at our latitudes were investigated and the effects of magnetospheric storms were determined. ARTEMIS observations were used to determine the magnetotail geometry and structure at lunar distances and how the solar wind and IMF controls this structure. Joule heating were determined by using various combinative methods and available numerical models. Comparisons with spacecraft observations were made and the discrepancies between the models and the observations were discussed. This was followed by an attempt to understand the interaction between these regions and construct a global view of the magnetosphere-ionosphere-thermospheric environment. The results help scientist to improve our understanding on the physical and dynamic processes that control the structure of near Earth space environment and its variability under different IMF and solar wind conditions as well as to improve the space weather models towards an accurate forecasting in the future.

Key Words: Solar wind, IMF, Magnetic storms, ARTEMIS, magnetosphere, magnetopause, magnetotail, Joule heating, SuperDARN, ionosphere, critical frequency, total elektron content (TEC), MHD models, ionospheric models, GPS.

TABLO LİSTESİ

Tablo-1: Bu çalışmada kullanılan manyetopoz modelleri ve bazı özellikleri. 40
Tablo 2: Modellerin manyetopoz yarıçapı tahminleri (R_e olarak) ve % hataları. 41
Tablo 3: Modellerin manyetopoz tahminlerindeki performansları..... 42
Tablo 4: İstanbul üzerindeki iyonosferik elektron yoğunluğunda görülen anomaliler..... 43
Tablo 5: Joule ısınması ve nötral yoğunluk ilişkisi için seçilen manyetik fırtına vakaları 44
Tablo 6: İyonosferik değişkenlik için seçilen 41 manyetik fırtına vakası. 45

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1: Projedeki çalışma alanı ve birbirlerine göre konumu. 45
Şekil 2: Manyetik kuyruğun x=-60 R_e'deki kesit yapısı. 46
Şekil 3: Günümüze kadar manyetik kuyruğa dair çalışmaları gösteren özet çizim. 47
Şekil 4: ARTEMIS uyduları ve yörüngelerinin şematik çizimleri 48
Şekil 5: ARTEMIS-1 uydusunun 23-29/Ocak/2013 tarihleri arasında xy-, xz-, yz ve xR-düzlemindeki yörüngesi..... 49
Şekil 6: Manyetopoz sınır tabakasını belirlemek için kullanılan veri örneği. 50
Şekil 7: ARTEMIS uydusunun Ay mesafesinde (x=-60 R_e) Ağustos 2011-Ağustos 2013 arasındaki manyetik kuyruk geçişlerine ait uydu yörüngeleri. 51
Şekil 8: Manyetik kuyruğun güneş rüzgârı yönüne göre hareketinin incelenmesi. 52
Şekil 9: Manyetopoz sınır tabaka geçiş noktalarının dağılımı. 53
Şekil 10: ARTEMIS 1 ve 2 uydularının 25/Ocak/2013 ekstrem vakasındaki yörünge parçası. 54
Şekil 11: ARTEMIS 2 uydusunun 25/Ocak/2013 tarihindeki yörünge geçişi sırasında kaydettiği manyetik alan ve plazma verileri. 55
Şekil 12: ARTEMIS 2 uydusunun 25/Ocak/2013 yörünge geçişi sırasında kaydettiği manyetopoz yarıçapının (kırmızı, R) IMF B_z (siyah) ve dinamik basınç (mavi) ile değişimi. 56
Şekil 13: En küçük manyetopoz yarıçapının (10 R_e) görüldüğü yörünge üzerinde manyetopoz yarıçapının güneş rüzgârının dinamik basıncı ve IMF B_z ile değişimi. 57
Şekil 14: ARTEMIS 1 ve 2 uydularının 28/Ağustos/2012 ekstrem vakasındaki yörünge parçası. 58
Şekil 15: ARTEMIS 2 uydusunun 28/Ağustos/2012 tarihindeki yörünge geçişi sırasında kaydettiği manyetik alan ve plazma verileri. 59
Şekil 16: ARTEMIS 2 uydusunun 28/Ağustos/2012 yörünge geçişi sırasında kaydettiği manyetopoz yarıçapının (kırmızı, R) IMF B_z (siyah) ve dinamik basınç (mavi) ile değişimi 60
Şekil 17: En büyük manyetopoz yarıçapının (39 R_e) görüldüğü yörünge üzerinde manyetopoz yarıçapının güneş rüzgârının dinamik basıncı ve IMF B_z ile değişimi 61
Şekil 18: 25/Ocak/2013 en küçük manyetopoz yarıçapının görüldüğü zaman ACE ve WIND uydularının L1 noktasında birbirlerine göre konumlarının xR-düzleminde görünümü..... 62

Şekil 19: ARTEMIS uydusunun manyetik kuyrukda x=-60 R_e mesafede 25/Ocak/2013 yörünge geçişi sırasında kaydettiği en küçük manyetopoz yarıçapına (10 R_e) karşı gelen WIND uydusunun IMF ve güneş rüzgârı plazma verileri..... 63

Şekil 20: ARTEMIS uydsunun manyetik kuyrukda, x=-60 R_e mesafede, 25/Ocak/2013 yörünge geçişi sırasında kaydettiği en küçük manyetopoz yarıçapına (10 R_e) karşı gelen AE manyetosferik mikrofırtına indeksi ve Dst manyetik fırtına ve ani sıçrama indeksi. 64

Şekil 21: 28/Ağustos/2012 en büyük manyetopoz yarıçapının görüldüğü zaman ACE ve WIND uydularının L1 noktasında birbirlerine göre konumlarının xR-düzleminde görünümü..... 65

Şekil 22: ARTEMIS uydusunun manyetik kuyrukda x=-60 R_e mesafede 28/Ağustos/2012 yörünge geçişi sırasında kaydettiği en büyük manyetopoz yarıçapına (39 R_e) karşı gelen WIND uydusunun IMF ve güneş rüzgârı plazma verileri. 66

Şekil 23: ARTEMIS uydsunun manyetik kuyrukda, x=-60 R_e mesafede 28/Ağustos/2012 yörünge geçişi sırasında kaydettiği en büyük manyetopoz yarıçapına (10 R_e) karşı gelen AE manyetosferik mikrofırtına indeksi ve Dst manyetik fırtına ve ani sıçrama indeksi. 67

Şekil 24: Manyetopoz modellerinin ekstrem manyetopoz pozisyonu için tahminleri. 68

Şekil 25: IMF B_y egemen sektör için manyetopoz sınırı geçiş noktalarının yz-düzlemindeki dağılımı. 69

Şekil 26: Kuzeyli IMF B_z egemen sektör için manyetopoz sınırı geçiş noktalarının yz-düzlemindeki dağılımı ve bu noktalardaki manyetik alan vektörleri..... 70

Şekil 27: Güneyli IMF B_z egemen sektör için manyetopoz sınırı geçiş noktalarının yz-düzlemindeki dağılımı ve bu noktalardaki manyetik alan vektörleri..... 71

Şekil 28: ARTEMIS uydusunun Ay mesafesinde manyetik kuyruk içerisinde manyetik alan vektör haritalarının ve BATSRUS model karşılaştırmaları..... 72

Şekil 29: ARTEMIS uydusunun Ay mesafesinde manyetik kuyruk içerisinde plazma hızı vektör haritalarının ve BATSRUS model karşılaştırmaları. 73

Şekil 30: +IMF B_y sektöründe, manyetik kuyruğun kuzey-güney ve doğu-batı bölgelerindeki ARTEMIS By istatistikleri..... 74

Şekil 31: -IMF B_y sektöründe, manyetik kuyruğun kuzey-güney ve doğu-batı bölgelerindeki ARTEMIS By istatistikleri..... 75

Şekil 32: +IMF B_y ve –IMF B_y sektörlerine karşı gelen ARTEMIS yoğunluk ve sıcaklık istatistikleri. 76

Şekil 33: +IMF B_z ve –IMF B_z sektörlerine karşı gelen ARTEMIS yoğunluk (sol) ve sıcaklık (sağ) istatistikleri. 77
Şekil 34: +IMF B_z ve –IMF B_z sektörlerine karşı gelen ARTEMIS yoğunluk ve sıcaklık dağılımları. 78
Şekil 35: ARTEMIS uydusunun 7/Mart/2012 tarihindeki manyetik kuyruk geçişinin model ile karşılaştırması. 79
Şekil 36: Birleştirilmiş farklı metod ve modellerin Joule ısınması tahminlerinin Mart 8, 2008 manyetik fırtınası esnasında karşılaştırılması. 80
Şekil 37: Farklı metod ve modellerin ve Joule ısınması tahminlerinin karşılaştırılması. 81
Şekil 38: Joule ısınması metod ve model tahminlerinin manyetik sektörlere göre incelenmesi. 82
Şekil 39: Sektör tanımlamasını gösteren çizim. 83
Şekil 40: Nötral rüzgârın Joule ısınması üzerine etkisinin manyetik sektör bazında metod/model karşılaştırmaları. 84
Şekil 41: CHAMP uydusu nötral yoğunluk değerlerinin (yeşil) farklı iyonosferik modellerin tahmin sonuçları ile karşılaştırılması. 85
Şekil 42: 13-17 Aralık 2006 için modellerin Weimer iyonosferik potansiyel modeli ile koşturulması ve CHAMP verisi ile aralarındaki farklar. 92
Şekil 43: CHAMP uydusu nötral yoğunluk değerlerinin (yeşil) farklı iyonosferik modellerin tahmin sonuçları ile karşılaştırılması ve model klimatolojsisinin farklı kıstaslara göre elenmesi. 93
Şekil 44: Klimatoloji elemesi öncesi ve sonrası model başarı sonuçları. 94
Şekil 45: 13-17 Aralık 2006 için Joule ısınmasının termosferik nötral yoğunluklara etkisi. 95
Şekil 46: Seçilen altı vaka için modellerden elde edilen toplam Joule ısınması ve toplam nötral yoğunluk arasındaki ilişki. 96
Şekil 47: 15/Mayıs/2005, saat 08:00 UT'de meydana gelen manyetik fırtınanın ana faz döneminde (Dst: maksimum -263 nT) TIEGCM, GTIM, CTIPe ve HWM93 iyonosfer modellerinden elde edilen nötral rüzgâr ve sıcaklığın 140 km'deki enlem-boylam dağılımı. 97
Şekil 48: Iyonosferik modellerin (CTIPe, GITM, TIEGCM) manyetik fırtınanın değişik fazlarındaki Joule ısınması tahminlerinin karşılaştırılması. 98
Şekil 49: İTÜ Yukarı Atmosfer ve Uzay Havası Laboratuvarı iyonozonde istasyonunun arazideki konumunu gösteren resim. 99
Şekil 50: 21/Nisan/2013 gününe ait ionogram örneği ve aynı güne ait kritik frekans ve TEC zaman serisi örneği. 100

Şekil 51: Ekim 2012-Ekim 2013 tarihleri arasında istatistiksel olarak foF2 (üst), hmF2 (orta) ve TEC (alt) değerlerinin günlük değişiminin aylara göre dağılımı. 101
Şekil 52: Ekim 2012-Ekim 2013 tarihleri arasında istatistiksel olarak foF2 (üst), hmF2 (orta) ve TEC (alt) değerlerinin günlük değişiminin mevsimlere göre dağılımı. 102
Şekil 53: İstanbul üzerindeki iyonosferik elektron yoğunluğunun en tipik günlük dağılımlarına örnekler. 103
Şekil 54: İstanbul üzerinde görülen tiplerin aylara göre oluşum frekansı. 104
Şekil 55: İstanbul üzerinde 8/Ekim/2012 tarihinde kaydedilen gravite dalgası örneği. 105
Şekil 56: İstanbul üzerinde görülen gravite dalgası vakalarının aylara göre oluşum sıklığı. 106
Şekil 57: F2 tabakasının kritik frekansının öğlen ve gece yarısı vakti değerlerinin aylara ve mevsimlere göre dağılımı. 107
Şekil 58: Manyetik fırtına örneği (17 Mart 2013) ve bu gündeki Dst, AE, foF2, hmF2 ve TEC değişimleri. 108
Şekil 59: Kritik frekansların (foF2) seçilen en şiddetli 5 manyetik fırtına (aktif gün) esnasındaki değşimlerinin sakin gün ile karşılaştırılması. 109
Şekil 60: Manyetik fırtınalar esnasında iyonosferik modellerin (TIEGCM ve IRI) foF2 tahminlerinin karşılaştırılması. 110
Şekil 61: Iyonosferik model tahminlerinin gözlemlerden en fazla ve en az farklı olduğu zamanların belirlenmesi. 111
Şekil 62: GPS-L1 sinyalinin seçilmiş beş günde elektron yoğunluğundaki değişme nedeni ile göstereceği gecikme zamanı. 112
Şekil 63: En kuvvetli manyetik fırtına gününde maksimum kullanılabilir frekansın (MUF) gönderme açısına göre değişimi. 1113
Şekil 64: Manyetosfer ile iyonosferin manyetosferik fırtınalar yolu ile etkileşiminin su kovası analojisi ile anlatımı. 114
Şekil 65: Manyetosfer ve iyonosferin manyetik alan çizgileri boyunca etkileşimi. 115
Şekil 66: Manyetosferik mikrofırtınalar sonucunda atmosfere olan parçacık akışı nedeni ile iyonosferik seviyelerde meydana gelen kuzey/güney ışıkları ve Joule ısınmasının IMF B_z ile olan ilişkisini gösteren grafik. 116
Şekil 67: Manyetosferik fırtınalar esnasında manyetik kuyrukğun yapısında meydana gelen değişimlerin çizimle anlatılması. 117

1. GİRİŞ

Manyetosfer Dünya atmosferini güneş rüzgârının zararlı etkilerinden koruyan ve bu şekilde yeryüzeyinde yaşanabilir bir ortamın oluşmasını ve sürekliliğini sağlayan atmosferin en son tabakasıdır. Gündüz tarafında ortalama olarak 10 R_e (~$6.3x10^4$km) ve gece tarafında ise 100 R_e'den (~$6.3x10^5$km) büyük, 1000 R_e (~$6.3x10^6$km) mesafelerine kadar uzanabilen Dünya'nın manyetik alanının hapsolduğu bölgedir. Güneş rüzgârını Dünya'dan uzak tutan da bu manyetik alanın yarattığı manyetik basınçtır. Güneş rüzgârı Güneş'den olan yüklü parçacık akışıdır ve Güneş'den dışarı atılan yüklü parçacıkları yani plazmayı ve Güneş'in manyetik alanını (IMF) uzay ortamına taşır. Güneş rüzgârının taşıdığı plazmanın ve manyetik alanın koşullarına bağlı olarak manyetosfer bazen tamamen kendi içinde kapalı bir uzay ortamıdır- ki bu durumda güneş rüzgârı tamamen manyetosfer etrafından akar gider- etkileşim minimum düzeydedir (kapalı etkileşim). Bu durumda manyetosfer kapalı manyetosfer olarak adlandırılır. Ancak bazı dönemlerde ise özellikle IMF'nin yönünün güneyli olduğu durumlarda manyetosfer açıktır, yani IMF ile Dünya'nın jeomanyetik alanı birleşmiştir (açık etkileşim). Bu olaya manyetik birleşme adı verilir. Bu durumda güneş rüzgârından Dünya atmosferine kütle, momentum ve enerji akışı olur. Manyetosfer içinde barındırdığı plazma ve manyetik alanın durumuna göre farklı bölgelere ayrılır. Güneş rüzgârından olan momentum ve enerji akışında manyetosferik sınır tabakaların ve manyetik kuyruğun önemi büyüktür ve bu akışı kontrol eder. Manyetopoz olarak adlandırılan manyetosferik sınır tabaka aslında Dünya'a ait ortamın bittiği ve ötesinde güneş rüzgârlarının egemen olduğu en son sınırdır. Kalınlığı çok ince olup gündüz tarafında ortalama 100 km olup, güneş rüzgârı ile Dünya ortamının (manyetik alan ve plazma) karıştığı bölgedir. Açık etkileşim durumunda manyetopozun bir kısmı veya tamamı açıktır ve güneş rüzgârı manyetosferin iç kısımlarına girer ve en sonunda Dünya atmosferinde son bulur. Manyetik kuyruğun görevi Dünya atmosferine olan bu akışı düzenlemektir. Manyetik kuyruk manyetosferin gece tarafında yer alan ve jeomanyetik alan çizgilerinin güneş rüzgârı tarafından çekilerek uzun bir kuyruk şekline dönüştürüldüğü bölgedir. Manyetik fırtınalar ve manyetosferik mikrofırtınalar manyetik kuyrukda meydana gelir ve güneş rüzgârının momentum ve enerjisinin atmosfere aktarımının gerçekleştirildiği ve ayarlandığı bölgedir. Bu nedenle manyetopozun ve manyetik kuyruğun yapısını, morfolojisini, fizik ve dinamiğini anlamak, gerek atmosferimizin maruz kalacağı yüksek enerjili parçacıkların getireceği sonuçlardan gerekse de bu parçacıkların uydu teknolojileri ve yer sistemlerine vereceği zararlardan korunmak için çok önemlidir. Bu açıdan sistemin elemanlarının özelliklerini, güneş rüzgârı ile olduğu kadar birbirleri ile olan etkileşimini ve farklı güneş rüzgârı ve IMF şartları altında davranışını incelemek gerekir. Bu çalışmamızda bu sistemi oluşturan parçalar manyetosfer, iyonosfer ve termosfer yani yukarı nötral atmosferdir.

Üç ana bölümden oluşan projemizin ilk kısmını manyetik kuyruğun ve manyetopozun gece tarafında gezegenimizin uydusu Ay'in yörünge mesafesinde, x=-60 R_e mesafesindeki içyapısının ve sınır tabakasının özelliklerini çıkarmak, değişimini ortaya koymak (nasıl, ne zaman, hangi şartlarda) ve bu değişimi kontrol eden parametreleri incelemektir. Projemizin üçüncü kısmı İstanbul'da bulunan iyonozondeden elde edilen elektron yoğunluğu ve kritik frekans gözlemlerini kullanarak orta enlem kuşağındaki iyonosfer tabakasının özelliklerini belirlemek, manyetik fırtına dönemlerinde bu yapıda meydana gelen değişimleri ortaya koymaktır. Projemizin birinci ve üçüncü kısmını bağlayan köprü niteliğindeki ikinci kısım ise manyetosfer-iyonosfer etkileşimine yöneliktir. Manyetik fırtınalar manyetik kuyrukda olmaktadır. İyonosfer ise fırtına dönemlerinde oluşan yüksek enerjili parçacıkların son bulduğu atmosfer tabakasıdır. Bu kısımda, manyetik fırtınaların iyonosferik yükseklikleri (>100 km) ve termosferi nasıl etkilediği Joule ısınması parametresi kullanılarak incelenmektedir. Her üç bölümde kendi içinde büyük miktarlarda uydu verisi analizi ve model karşılaştırmaları içermektedir. Şekil 1 projemizin çalışma alanını ve bu üç çalışmanın ilişkisini yansıtmaktadır. Projemizin son kısmı, toparlama/sentez kısmı, küresel bir bakış açısı ile üç çalışmayı birleştirmekte ve özellikle uzay havası tahminlerine yönelik olarak, elde edilen sonuçların değerlendirmesini içermektedir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Teorik olarak jeomanyetik alanın varlığı yer bilimlerinin en eski konularından birisidir. Gözlemsel olarak Dünya'nın manyetosfer tabakasınıın ilk incelemeleri ise 1950'li yılların sonlarında roketlerin radyasyon kuşaklarını keşfetmesi ile başlamıştır. Manyetosferin ilk defa sistematik olarak uydu aracığıyle incelenmesi ise Explorer (IMP) uydu serisinin 1958 yılında uzaya gönderilmesi ile olur ki bu aynı zamanda American Uzay Ajansı NASA'ın kuruluş yılıdır. IMP uydu serisi ile başlayan manyetosferik çalışmalar bu gün en son Mart 2015'de gönderilen MMS küme (quartet) uydusu ile büyük bir hızla devam etmektedir. 1950'lerden bu yana manyetosfer bilimi uydu gözlemleri sayesinde günümüzde altın çağını yaşamaktadır.

Manyetik kuyruk ile ilgili ilk direk bilgiler, 1966 yılında Ay'ın yörüngesine gönderilen ve iki aylık ömür süresi içerisinde manyetik kuyruktan da iki kez geçen Luna 10 uydusu ile; 1966-1967 yıllarında Güneş'i, güneş rüzgârını ve kozmik ışınları incelemek üzere gönderilen Pioneer 7 ve 8 uydularının başlangıç fazlarındaki kısa süreli kuyruk geçişlerinden elde edilen gözlemlere dayanır. Bu bölgeyi incelemek için gönderilen uzay uydularının sayısı az olduğu kadar bu bölge içerisinde kalış süreleri de manyetosferin diğer bölgelerine göre daha azdır. Manyetik kuyruğun ilk kez sistematik incelemesi 1972'li yıllarda IMP uyduları ile yapılmış, daha sonraları ise 1982'li yıllarda ISEE-3, 1994'lü yıllarda da WIND uydusu ile devam etmiştir. Bu uydu verileri ile ilk defa Dünya'nın manyetik alan çizgilerinin manyetosfer içinde, güneş rüzgârı

tarafından güneş rüzgârının doğrultusunda olacak şekilde çok uzak mesafelere doğru çekildiği ortaya konmuştur. Manyetik kuyruğun uzunluğunun sabit olmadığı gibi yapısının da mesafe ile ve zamana göre (temporal) farklılıklar gösterdiği ortaya konulmuştur. IMP 1 uydusunun manyetik alan verilerine dayanarak x=-30 R_e mesafesindeki (orta mesafe) kuyruğun yapısı belirlenmiştir (Ness vd. 1967; Mihalov vd. 1968; Behannon 1970). Şekil 2 manyetik kuyruğun yakın Dünya mesafelerindeki yapısını çizim halinde göstermektedir. Buna göre yaklaşık -30 R_e mesafedeki manyetik kuyruk tam ortasından geçen bir plazma örtüsü, plazma örtüsünün kuzey ve güney taraflarındaki manyetik loblardan oluşmaktadır. Plazma örtüsü ve manyetik loblar manyetopoz sınır tabaka akımları ile bir arada tutulurlar ve manyetik kuyruğun yapısını meydana getirirler. Plazma örtüsünün merkezindeki çok dar bir bölge içinden doğudan batıya doğru manyetik kuyruğun elektrik akımları geçmekte ve bu akımlar kuyruğun batı manyetopozuna eriştiğinde kuzeye ve güneye saparak, yine manyetopoz üzerinden tekrar doğu ucundaki manyetopoza dönmektedir. Bu yapı theta (θ) şekline benzediğinden manyetik kuyruğun theta şekli gösterdiği söylenir. Ay mesafesi (-60 R_e) veya daha uzak mesafelerdeki kuyruğun yapısı ise yukarıda belirtilen sınırlı sayıdaki uydu verileri ile vaka bazında incelenmiştir. Luna 10 uydusu verileri manyetik kuyruğun x=-60 R_e mesafede genel yapısını koruduğunu göstermiştir. Yani, manyetik kuyruk bu mesafede dahi ortasında bir plazma örtü tabakasını barındırmaktadır (Gringauz, 1966; Ness, 1967). Ay ve ötesi mesafelerde (x=-80 R_e) manyetik kuyruğun ilk manyetopoz çalışmaları ise IMP 8 uydusu tarafından yapılmıştır (Ness vd. 1967; Behannon 1968, Mihalov vd. 1968). IMP 8 uydu verileri aynı zamanda manyetik kuyruğun sınır tabakasının ileri geri uydu üzerinden birçok kez hareket ettiğini de göstermiştir. Pioneer 7 and 8 uydu verileri ise kuyruğun -1000 R_e mesafesinde dahi mevcut olduğunu ancak yapısının -500 R_e'den sonra filament yapısında olduğunu göstermişlerdir (Ness 1969; Fairfield 1968; Mariani and Ness 1969).

Manyetik kuyruğun manyetotopoz sınır tabakası üzerine detaylı incelemeler IMP 4 ve IMP 5 verileri kullanılarak Howe and Binsack (1972) tarafından yapılmıştır. Yazarlar, bu uyduların manyetik kuyruğun manyetopoz sınır tabakasını geçtiği noktaları inceleyerek ilk kez detaylı bir manyetopoz sınır tabakası çalışmasını yapmışlardır. Bu noktaları kullanarak manyetik kuyruğun boyutunu belirlemeye çalıştılar ve manyetik kuyruğun yarıçapının -40 R_e'den daha uzak kuyruk mesafelerinde 13.8 Re ile 40 Re arasında değiştiğini, ortalama olarak da 26.5 R_e olduğunu gösterdiler. İlk defa manyetopoz geçiş noktalarını kullanarak sınır tabakanın radyal olarak x=0 dan manyetik kuyruk mesafelerine doğru nasıl değişeceğini gösteren analitik bir formül geliştirdiler ki bu gün dahi bu basit formülasyon başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Biz de ilk bölümdeki manyetik kuyruk incelemelerimizde Howe and Binsack (1972) modelini model karşılaştırmalarımızda kullanmaktayız. Manyetik kuyruğun şekli ve boyutunun büyüklüğü konusunda buna benzer çalışmalar farklı manyetik kuyruk mesafelerinde yine IMP serisi

uydular kullanılarak yapılmıştır. Bunlara göre -50 R_e ile -70 R_e mesafelerinde manyetik kuyruğun yarıçapının 18 R_e-20 R_e arasında değiştiği ve şeklinin daire yerine elips olduğunu ileri süren çalışmalar da vardır (Ness 1967; Ness vd. 1967). ISEE-3 gözlemleri öte yandan -200 R_e'den daha büyük mesafede manyetik kuyruğun yarıçapının 24 R_e ile 30 R_e arasında değiştiğini göstermiştir. Şekil 3 Ay mesafesi ve ötesinde manyetik kuyruğun yapısı üzerine yapılan ilk çalışmaları özetleyen bir çizim sunmaktadır.

Manyetik kuyruğun yapısına ait bu ilk sınırlı sayıdaki IMP gözlemlerine dayanan bulgular daha sonraları ISEE-3 ve WIND uyduları ile devam etmiştir. Her iki uydu da manyetik kuyruğun -200 R_e ve sonrasındaki yapısı ve hareketliliği ile ilgili çok değerli bilgiler katmışlardır. Manyetik kuyruğun şeklinin çoğuncası bir daire şeklinde olduğu gözlemlenmiştir. Buna dayanarak manyetik kuyruk ve sınır tabakası manyetopoz, simetrik bir silindir olarak düşünülerek bir daire olarak modellenmiştir (ör. Sibeck vd. 1991; Petrinec and Russell, 1996; Shue vd. 1997; Kawano vd. 1999). ISEE-3 verileri ile yapılan detaylı analizler manyetik kuyruğun mevcut yapısının farklı IMF By ve IMF Bz dönemlerinde değişikliğe uğradığı göstermiştir (Sibeck vd. 1991). Keza daha yakın manyetik kuyruğun içyapısına ait çalışmalar IMP-8 verileri ile detaylı bir şekilde x=-30 R_e'de yapılmıştır (Kaymaz vd. 1994).

Manyetik kuyruğun uydu verilerine dayanarak günümüzde ortalama güneş rüzgârı ve aktivite şartları altında belirlenen morfolojisi ve göreceli boyutları kesit olarak Şekil 2'deki çizimde verilmektedir. Ancak bu yapı değişik iç ve dış etkenlere göre değişim göstermektedir. Dış etkenler güneş aktiviteleri ve güneş rüzgârındaki dalgalanmalar olup, iç etkenler manyetik kuyruk içinde oluşan manyetik fırtına ve manyetosferik mikrofırtınalardır. Her iki etken de hem manyetik kuyruğun manyetik ve plazma yapısı üzerinde etkili olurlar hem de morfolojik yapısı yani şekli ve boyutları üzerinde etkin rol oynarlar. Ayrıca manyetopoz sınır tabası üzerinde de değişimlere neden olurlar. Kuvvetli güneş rüzgârı zamanlarında manyetik kuyruğun sağa sola ve aşağı yukarı hareket ettiği (rüzgâr çorabı hareketi) (Howe and Binsack 1972; Shodhan vd. 1996), IMF'nin manyetik kuyruğun şeklini, kesit düzleminde daireden elipse çevirdiği (Cowley 1981; Gosling 1991; Sibeck et al. 1986; Sibeck and Lin 2014) ve IMF'nin gücüne bağlı olarak manyetik kuyruğun döndüğü (Sibeck vd. 1986; Kaymaz vd. 1994) kaydedilmiştir.

Teorik olarak, güneş rüzgârı ile taşınan güneşin manyetik alanının (IMF) yönü manyetik kuyruğun morfolojisinde büyük değişimlere neden olur. IMF B_y (IMF'nin yatay bileşeni) ile gündüz tarafında manyetopozda meydana gelen manyetik birleşme sonucunda güneş rüzgârının manyetik alanı ile birleşen manyetik kuyruğun manyetik alan çizgileri manyetik kuyruğu manyetopozun kuzey ve güney taraflarından baskılarken, yan taraflarından şişmesine neden olur; yani şeklini daireden, üsten ve alttan basıklığı olan bir elipse çevirir. Aynı zaman manyetik birleşmeden kaynaklanan moment nedeni ile manyetik kuyruğu döndürür. Bunun sonucunda tüm manyetik kuyruk IMF By'nin yönüne göre saat ibresine ters (+IMF B_y) veya

saat ibresi yönünde (-IMF B_y) döner (ör. Sibeck vd. 1991; Kaymaz vd. 1994). Buna karşılık IMF'nin z-bileşeni (-IMF B_z) ise manyetik kuyruğun boyutunu (yarıçapını) artırır veya küçültür (+IMF B_z) (ör. Kaymaz vd. 1992).

IMF'nin ve güneş rüzgârının dinamik basıncının etkilerine ilaveten manyetik kuyruğun manyetopozunun hareketliliğine neden olan bir diğer etmen manyetosferik miktofırtınalardır. Manyetik bileşme sırasında manyetik kuyruk içinde biriken manyetik akının çok şiddetli bir şekilde iyonosfere boşalması kuyruğun kesit alanını küçültürken, akının dolma aşamasında kuyruğun kesit alanı büyür (ör. Shodhan vd. 1996). Bu genleşme ve büzüşme olayına kuyruğun soluma hareketi adı verilir. Bu esnada mikrofırtına enerjisinin boşalmasını takiben kuyruğa atılan ve kuyruk merkez hattı boyunca hareket eden plazmoid (plazma balonu) de uzak mesafelerde kuyruğun kesit alanında kuyruğun soluma hareketine benzer peryodik hareketlere neden olur (ör. Slavin 1998, Slavin vd. 1994). Plazmoidin neden olduğu genleşme ve büzüşme hareketi, içten yönetilen bir hareket olup, plazmoidin bulunduğu yerde, kuyruğun manyetik alan çizgileri içerden dışarı doğru ittirilerek sıkıştırılır. Böylece kuyruğun boyutu büyür. Plazmoidin geçip gittiği yerde ise manyetik alan çizgileri eski sıkıştırılmamış hallerine geri dönerler. Böylece kuyruğun boyutu yine eski haline döner, yani küçülür. Buna Hareketli Sıkışma Bölgeleri (TCR=Travelling Compression Regions) adı verilir (Slavin vd. 1993; Slavin 1998).

Projemizin ilk bölümünde ARTEMIS uydu verileri kullanılarak manyetik kuyruğun x=-60 Re (Ay mesafesi)'deki morfolojisi ve boyutları incelenmiştir. Buna ilaveten kuyruğun bu mesafedeki manyetik ve plazma iç yapısı ortaya konulmuştur. Bu yapıyı etkileyen güneş rüzgarı ve IMF şartları incelenmiştir. Çalışmamızın diğer çalışmalarla kıyaslandığında en büyük avantajı en son teknolojilere göre üretilmiş aletlerle ölçülen yüksek çözünürlüklü uydu verilerine dayanmasıdır. Çalışmalarımızda saniye bazlı ölçülmüş dakikalık veriler kullanılarak manyetik kuyruğun manyetopoz noktaları belirlenmiş ve analizler yapılmıştır. İlk çalışmaların yapıldığı 1970'li yıllardan bu zamana manyetosferik modellemelerde meydana gelen gelişmeler sonucunda ortaya çıkan en son MHD modelleri ile karşılaştırmalar yapılmıştır. Bunlar uzay havası tahminlerinde manyetosferin hareketi ve pozisyonuna ilişkin daha hassas çıktıların elde edilmesini sağlamaktadır.

Gündüz tarafında manyetopozda meydana gelen manyetik birleşme sonucunda manyetik kuyruk x=-10 ile x=-20 R_e mesafeleri arasında, açık manyetik alan çizgileri boyunca akan manyetik akı ile dolar. Manyetik kuyruk bu dolmayı sonsuza kadar taşıyamayacağından kuyruğun merkezeinde meydana gelen ikinci bir manyetik birleşme bu dolan manyetik enerjiyi Dünya'nın manyetik alan çizgileri boyunca Dünya atmosferine boşaltır. Bu olaya manyetosferik mikrofırtına adı verilir. Çalışmamızın ikinci bölümünde manyetik kuyruk ile iyonosfer arasında etkileşimi sağlayan mikrofırtınaların iyonosferik seviyelerde atmosferin

yapısı üzerine etkisi incelenmiştir. Bu inceleme için Joule ısınması parametresi kullanılmıştır. Joule ısınması yukarı atmosfer çalışmalarında önemli bir parameter olup, termosferik ısı dengesinde ve termosferik sirkülasyonda etkin rol oynamaktadır.

Yukarı atmosferdeki en önemli enerji kaynaklarından iki tanesi, özellikle 1-2 saat gibi kısa zaman ölçeklerinde, manyetosferik fırtına dönemlerinde termosfere giren Joule ısınması ve parçacık yağışıdır. İletilen enerji miktarı olarak Joule ısınması parçacık yağışına göre daha egemendir (ör. Wilson vd. 2006). Uzay havası uygulamaları ve termosferik dinamik Joule ısınmasının hassas bir şekilde belirlemesini gerektirir (Thayer, 1998; Wilson vd. 2006). Joule ısınmasının belirlenmesindeki güçlükler çoğunlukla iyonosferik elektrik alanlarının gösterdiği değişkenliklerden (Codrescu, vd. 1995; Deng ve Ridley, 2007; Deng vd., 2009; Matsuo ve Richmond, 2008), iyonosferik iletkenliklerin hassas bir şekilde belirlenmesindeki güçlüklerden (ör. Aikio ve Selkälä, 2009; Thayer 1998), termosferik nötral rüzgarların formülasyonlara dahil edilememesinden (Deng ve Ridley, 2007; Wilson vd. 2006; Thayer, 1998) ve zamansal ve yersel olarak yüksek çözünürlükte uydu verilerinin eksik oluşundan kaynaklanmaktadır. Elektrik alanlarının, elektrik akımlarının ve iletkenliklerin modellenmesindeki gelişmelere ragmen Joule ısınmasının farklı güneş rüzgarı ve jeomanyetik aktivite seviyelerinde belirlenmesi hala çok zordur (Zhang vd. 2005).

Joule ısınmasını hesaplamak için bir çok direk ve indirek metod vardır. Bunlardan en çok kullanılanı AE indeksini içeren metoddur. AE verisi en kolayca ulaşılan bir veri olduğu için. AE tabanlı Joule ısınması metodları yer seviyesinde ölçülen manyetik alan verilerinin yatay bileşenindeki değişime dayanmaktadır (Ostgaard, 2002). AE kullanılarak Joule ısınması

$$JH(GW) = aAE(nT) + b \tag{1}$$

olarak verilir. Buradaki a ve b katsayıları mevsime ve hesaplamada kullanılan AE verisinin geldiği istasyon sayısına bağlı olarak belirlenir (Ahn vd. 1989; Østgaard, 2002). Eşitlik (1) de verilen Joule ısınması miktarı global Joule ısınması miktarıdır ve AE istasyonlarının enlemlerini kapsar. Joule ısınmasının local olarak değişimi ise ($\vec{J} \bullet \vec{E}$)

$$q_j(z) = \sigma_p(z)(\vec{E}_\perp + \vec{U}(z) \times \vec{B})^2 \tag{2}$$

kullanılarak bulunur (Thayer, 1998; Wilson vd., 2006). Bu eşitlikte, q_j istenen noktadaki Joule ısınması, σ_p Pedersen iletkenliği, $\vec{E}_\perp$ manyetosferik konvektif elektrik alanı, $\vec{U}$ nötral rüzgarın hızı, ve $\vec{B}$ nokta üzerindeki jeomanyetik alan değeridir. Eşitlikteki ikinci terim termosferik nötral rüzgarın Joule ısınması üzerine etkilerini göstermektedir. Nötral rüzgar Joule ısınmasının hem şiddetini hem de dağılımını etkiler (Lu vd. 1998; Thayer, 1998; Wilson vd. 2006; Deng ve

Ridley, 2007). Ancak, nötral rüzgarın ölçülmesindeki güçlükler nedeni ile Joule ısınması ile ilgili pek çok çalışmada nötral rüzgar katkısı ihmal edilmektedir. Nötral rüzgar ihmal edilerek yapılan hesaplamalarda Eşitlik 2'deki ikinci terim düşer ve geri kalan terimlerinde yükseklikle integrali alındığında Eşitlik 3'de verilen toplam Joule ısınması (Q_j) elde edilmiş olur (Thayer 1998; Zhang vd. 2005).

$$Q_j(z) = \Sigma_p \vec{E}_\perp^2 \tag{3}$$

Burada Σ_p yükseklikle göre integre edilmiş Pedersen iletkenliğidir. Bu eşitlikteki elektrik alanı yer seviyesinde ölçülen manyetometre ölçümlerinden (Kamide vd. 1981; Kamide vd. 1982), veya yer seviyesinde bulunan SuperDARN gibi radarlar yolu ile elde edilebilir (Ruohoniemi ve Baker, 1998). Bu eşitliğin kullanılmasındaki en büyük güçlük Pedersen iletkenliğinden gelir. Pedersen iletkenliği ölçülemediğinden modeller aracılığıyle elde edilir. Joule ısınmasının nümerik modelleri manyetik alan boyunca kuyruktan iyonosfere akan elektrik akımlarını kullanarak iyonosferik potansiyel ve elektrik alanı Poynting akısını hesaplarlar ki bu Joule ısınmasını hesaplamaya eşdeğerdir (Wilson vd., 2006; Palmroth vd. 2005; Zhang vd. 2005). Joule ısınmasının belirlenmesinde kullanılan bir diğer metod da AMIE tekniğidir. AMIE tekniği bir çok yer ve uzay tabanlı gözlemler kullanarak Joule ısınmasının hesabında geçen parametrelerin klimatolojisini oluşturur (Richmond and Kamide, 1988).

Joule ısınması aynı zamanda hem nötral rüzgarı etkiler hem de ondan etkilenir (Ridley vd, 2004). Nötral rüzgar termosferik yoğunlukla da sıkı derecede ilişkilidir (Lühr ve Marker, 2013). Daha önceki çalışmalarda Fedrizzi vd. (2012) fizik temelli bir iyonosfer-termosfer modeli (CTIPe) kullanarak termosferik yoğunluklarla Joule ısınmasını ilişkilendirmeye ve bir Joule ısınması indisi oluşturmaya çalışmıştır. Çalışmalarında önce yörünge ortalama yüksekliği 450 km olan CHAMP uydusunun nötral yoğunluk verileri ile CTIPe model sonuçlarını 2007 senesi için karşılaştırmış ve aralarındaki standart sapmanın 0.21 civarında olduğunu tespit etmişlerdir. Bir çoklu korelasyon (cross-correlation) hesabı ile şu an gözlemlediğimiz nötral yoğunluğun 3 gün öncesine kadarki manyetosferik kaynaklardan etkilenebildiğini göstermişlerdir. Bu da demektir ki 3 gün önce olan bir manyetik fırtına 3 gün sonra hala termosferdeki etkisini kaybetmemiştir. Buna göre daha önce hesapladıkları hata payını da göz önüne alarak model Joule ısınmasının görece iyi tahmin edildiğini ileri sürmüşler ve CHAMP nötral yoğunluk verisi ile aralarındaki ilişkiye bakmışlardır. Joule ısınmasının etkisi termosferde uzun süre kalabildiğinden bir şekillendirici filtre (shaping filter) kullanarak Joule ısınması indisi üretmişler ve nötral yoğunluklar ile Joule ısınması indisinin birbirini karşılamasını sağlamışlardır. Joule ısınması indisini temel alarak hesaplanan nötral yoğunluklar CHAMP verisi ile en az %88 en yüksek %95 korelasyon göstermiştir.

Liuzzo vd. (2015) nötral rüzgar yapılarını tek bir olay için farklı yukarı enlem sürücüleri (iyonosferik elektrik alan/iyonosferik potansiyel ve aurora yapısının modele girdisi: high latitude drivers) ile Michigan Üniversitesi'nin GITM modelini kullanarak modellemeyi denemişler ve herhangi birinin diğerine üstünlüğünü bulamamışlardır. Bu sonuçlarını aurora ve elektrik alan yapısının tam olarak çözümlenememesine bağlamışlardır.

Projemizde Joule ısınması hem nötral rüzgar etkisi gözetilerek hem de nötral rüzgar etkisi ihmal edilerek belirlenmiştir, mevcut metod ve model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Buna ilaveten nötral rüzgarın hesaplanmasında önemli rol oynayan termosferik yoğunluklar bir yukarı atmosfer uydusu olan ve 450 km'de ortalama yüksekliğe sahip CHAMP uydusundan elde edilen nötral yoğunluk verilerinden elde edilmiştir. Nötral yoğunluk verileri ve elde edilen nötral rüzgar verileri mevcut modellerle karşılaştırılmıştır. Bu şekilde hangi modelin nötral rüzgar belirlenmesinde en uygun olduğu ve buna bağlı olarak da elde edilen Joule ısınmasının modeller arasında nasıl ve ne kadar farklı olduğu incelenmiştir. Joule ısınması hesaplama yönteminin ve Joule ısınmasını hesaplamak için seçilen verinin Joule ısınmasına etkisini bulmak için birbirini takip eden iki manyetosferik mikrofırtınanın mevcut olduğu 8 Mart 2008 günü seçilmiştir. Uydu sürüklemesini (drag) etkileyen nötral yoğunluk ve Joule ısınması arasındaki ilişkilerin bulunması ve bir Joule ısınması indisi oluşturulmaya çalışılması ise farklı tarihlerde meydana gelmiş 6 manyetik fırtına vakası ve 5 farklı model ve farklı yukarı enlem sürücüleri kullanılarak denenmiştir. Uzay havası tahminlerinde kullanılan bu modellerin gözlemlerle veya birbirlerine kıyasla başarı seviyelerinin belirlenmesi tahminlerin tutarlılığı konusunda çok kritik bir öneme sahiptir. Bu projemizdeki çalışmalarımız buna yönelik önemli katkı sunmaktadır.

Joule ısınması iyonosferin/termosferin yapısında değişikliğe neden olur. Joule ısınmasının çok olduğu dönemlerde iyonosferik elektron ve iyonların hareketi nötral parçacıkları etkilediği gibi nötrallerin hareketi de iyon ve elektronların hareketini etkiler. İkisi birbirlerinin hareketini tetikler. Dolayısıyle iyonosferik seviyelerde hem elektron dağılımında hem de sıcaklık dağılımında değişiklikler meydana gelir. Çalışmamızın bu kısmında aynı zamanda CHAMP yukarı atmosfer uydusunun ölçmüş olduğu nötral yoğunluk kullanılarak mevcut manyetosfer-iyonosfer etkileşimi için kullanılan modeller kalibre edilmiştir.

Manyetik fırtınalar küresel olaylardır. Etkileri enlemlere göre değişiklik gösterir. Projemizin üçüncü kısmında orta enlemlerdeki iyonosferin yapısı ve özellikleri İstanbul, İTÜ kampüsünde kurduğumuz iyonozondeden elde edilen elektron yoğunluğu verileri ile incelenmiş, manyetik fırtınaların etkileri ortaya konulmaya çalışılmıştır.

Iyonosfer atmosferin 60 ila 2000 km'inde (gerçekte kesin bir üst sınır yoktur) yer alan ve nötral atomların yüksek enerjili güneş radyasyonu nedeni ile iyon ve elektronların ayrıştığı atmosfer tabakasıdır. Iyonosfer, elektron yoğunluğuna bağlı olarak, radio sinyallerinin geriye

yansıdığı veya uzaya geçtiği tabakadır. Bu şekilde gerek yeryüzeyindeki uzun mesafeli iletişim ve gerekse de uydularla olan iletişim sağlanmış olur. Dolayısıyle iyonosferdeki elektron yoğunluğunun belirlenmesi haberleşmenin gerçekleşebilmesi için çok kritiktir.

Iyonosferik elektron yoğunluğunu etkileyen en temel parameter atmosfere gelen kısa dalga boylu radyasyondur. Bunu takiben manyetosferik fırtınalardır. Her iki kaynaktaki değişimler iyonosferik elektron yoğunluğunun hem kısa dönemde hem de uzun dönemde değişimine neden olur. Bu değişim yıllar bazında olabildiği gibi saatler, hatta dakikalar bazında da olabilir. Elektron yoğunluğundaki en belirgin değişim güneş radyasyonundaki günlük değişimdir. Gelen güneş radyasyonuna bağlı olarak iyonosferik elektron yoğunluğu geceleri minimum gündüz öğlen vakitlerinde maksimum değere ulaşır. Uzun dönemde ise güneş aktivitelerindeki peryodik değişimler elektron yoğunluğunu etkiler. Güneş'in çok aktif olduğu zamanlarda artan güneş alevleri yukarı atmosfere çok miktarda EUV (Etreme UltraViolet) radayasyon gönderir. Elektron yoğunluğundaki değişimler iyonosferin elektrodinamiğini değiştirir. Nötral-iyon etkileşimini artırır, modifiye eder. Mendillo (2006) iyonosferik değişkenlik üzerine çok detaylı bir özet çalışma yapmıştır. Çalışmasında manyetik fırtınaların elektron yoğunluğu üzerine etkisini incelemiştir. Toplam elektron yoğunluğunun manyetik fırtınanın fazına göre değiştiğini göstermiştir. Manyetik kuyrukta meydana gelen manyetik fırtınanın, oluştuğu bölgeye olan direk bağlılığı nedeni ile, özellikle yukarı enlem iyonosfer tabakasında elektron yoğunluğunun çok kompleks bir dağılım gösterdiğini belirtmiştir. Projemizde İTÜ iyonozonde istasyonundan elde edilen F2 tabakasına ait kritik frekansların ve elektron yoğunluklarının manyetik fırtına dönemlerinde analizi yapılarak bölgemiz üzerindeki iyonosferik değişkenlik belirlenmeye çalışılmış ve bunun sonuçları irdelenmiştir. Bölgemiz üzerinde bu konuda daha önce yapılan bir kaç çalışmada ve iyonosferin güneş aktivitelerine ve manyetik fırtınalara olan tepkisi kısıtlı ve düşük çözünürlüklü iyonosferik verilerle belirlenmeye çalışılmıştır (Agopyan, 1994; 2002; Özgüç vd. 1998). Kullanılan verilerin çözünürlüğü 30 ila 60 dakika arasında değişmektedir. Bu çalışmalar öncü çalışmalar olmuşlardır. GPS verileri kullanılarak bir bölge üzerindeki elektron yoğunluğu belirlenebilmektedir. Son yıllarda Türkiye üzerindeki GPS verilerini kullanarak iyonosferik değişkenliği inceleyen araştırma grupları olmuştur (ör. Can ve Gümrükcü 2009; Unver ve Can, 2011; Arıkan vd. 2007). Bu çalışmaların çoğunda GPS ile elde edilen toplam elektron yoğunluğu model sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Örneğin Arıkan vd. (2007)'nin GPS tabanlı geliştirdikleri algoritma ile sakin ve aktif manyetosfer dönemlerinde elde ettikleri TEC değerlerinin IRI küresel iyonosferik modeli ile karşılaştırılmasında, kullanılan algoritmanın modele kıyasla daha doğru sonuçlar verdiği görülmüştür. Bu yaklaşımdaki tek dezavantaj, GPS yolu ile elde edilen parametre toplam elektron yoğunluğu (TEC) olup iyonosferik seviyelerin kritik frekanslarına karşı gelen elektron yoğunluğunu elde etmenin mümkün olmamasıdır. Orta enlemlerdeki iyonosferin değişkenliğine yönelik çalışmalar birçok

araştırmacı tarafından çalışılmıştır (Zou vd. 2000; Rishbeth vd. 2000; Park vd. 2010; Lin vd. 2010). Zou vd. (2000) hem kuzey hem de güney orta enlemlerinde değişik noktalardan elde edilen iyonosferik elektron yoğunluğunun kış, 6-aylık ve bir yıllık değişimlerini incelemiş ve CTIP modeli sonuçları ile karşılaştırmıştır. Bu projede İTU iyonozonde istasyonundan alınan F2 tabakasının elektron yoğunluğu, F2 tabakasının kritik frekansı, F2 tabakasının maksimum yüksekliği ve TEC verilerinin temporal (günlük, mevsimlik) değişimleri ortaya konulmuş, manyetik fırtına dönemlerinde bu yapının nasıl değiştiği incelenmiş ve mevcut iyonosferik modllerden IRI ve TIEGCM ile karşılaştırılmıştır. Bulgularımız literatür çalışmaları ile karşılaştırılmaktadır.

3. GEREÇ VE YÖNTEM

Çalışmalarımızı vaka örnekleri, istatistiksel veri analizleri ve model karşılaştırmaları yaparak yürüttük.

3.1 Ay Mesafesinde (x=-60 R_e) Manyetik Kuyruk ve Manyetopoz: Manyetik kuyruk ve manyetopoz ile ilişkili çalışmalarımızda kullandığımız veriler ARTEMIS 1 ve ARTEMIS 2 (Şekil 4) uydularından ve kullanım kuralları çerçevesinde NASA/GSFC'de bulunan CDAWeb sayfasından sağlanmıştır. Şekil 5'de ARTEMIS uydusunun 23/Ocak/2013 gününe ait yörünge örneği görülmektedir. Bu çalışmamızda her iki uyduda bulunan bilimsel veri ölçümü yapan aşağıdaki aletlerden yine aşağıda belirtilen veriler kullanılmıştır:

- **a.** Fluxgate manyetometresi (FGM): Manyetik alan vektörü (B_{tot}, B_x, B_y, B_z)
- **b.** Elektrostatik analiz aleti (ESA): Plazma ve akı verisi. Parçacık hızı, parçacık yoğunluğu, sıcaklığı ve yüksek enerjili parçacık akısı.

Çalışmamızın bu kısmında ARTEMIS uydusuna ait Ağustos 2011-Ağustos 2013 zaman diliminde elde edilen yukardaki veriler kullanılmıştır. Verilerin öncelikle belirlenen zaman aralıklarında tamlığı, sürekliliği kontrol edilerek ve veri seti veri boşluklarından ve kötü veriden arındırılmıştır. Uyduların manyetopoz sınır tabakasından geçtiği zamanlar ve bu zamanlardaki uydu pozisyonları (Şekil 6) belirlenmiştir. ARTEMIS uyduları hem Şekil 4 hem de Şekil 5'den görüldüğü üzere Ay'ın çevresinde dönmekte ama aynı zamanda Ay ile beraber Ay'ın Dünya etrafındaki yörüngesinde manyetik kuyrukdan ve diğer uzay ortamlarından geçmektedir. Projemizin bu kısmında x=-60 R_e mesafesindeki manyetik kuyruk (kırmızı bölge) ve manyetopoz incelemektedir. Uyduların Ay ile beraber manyetik kuyruğu bir baştan diğerine geçmesi (kırmızı bölge) yaklaşık 4 gün sürmektedir. Manyetopoz noktaları için 24 aylık süre içerisinde ARTEMIS uydularının manyetik kuyruğa girdiği ve çıktığı zamanlar ve bu zamanlardaki ARTEMIS pozisyonları belirlenmiştir. Bu manyetopoz noktaları uyduların ölçtüğü manyetik alan, plazma ve yüksek enerjili iyon akısı verisi görsel olarak taranarak saptanmıştır. Şekil 6 bu giriş çıkışların belirlenmesi için kullanılan veri örneğini göstermektedir. Manyetopoz

geçişi anlarındaki manyetik alan ve plazma verileri manyetopozun yapısını ve özelliklerini belirlemek için kullanılırken, giriş-çıkış zamanları arasında kalan veriler de manyetik kuyruğun manyetik alan ve plazma, özellikle parçacık hızı, yapısını ve özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır. Söz konusu zaman peryodunda iki uydudan toplam 110 tane manyetopoz geçişi belirlenmiştir. Çoklu manyetopoz geçişleri ile beraber veri sayısı 888'e çıkmıştır. Manyetopoz çalışmaları bu verilerle yürütülmüştür. Tekli geçiş (110) yörüngelerinin giriş ve çıkış zamanları arasında kalan veri 3 saniye rezolusyonlu olup, 180,000 den fazla manyetik alan ve plazma verisi mevcuttur. Manyetik kuyruğun yapısı ise bu veriler kullanılarak incelenmiştir. Dolayısıyle manyetik kuyruğun yapısı belirlenirken, özellikle vektör haritalarında, iki seneden daha küçük olan zamansal (temporal) değişimler ihmal edilmiştir. İki yıllık veri peryodunda veriler değişik zaman aralıklarında ortalama alınarak ve vektör haritalarında ise değişik uzaysal (spatial) ortalamalar alarak manyetik kuyruğun ortalama manyetik alan ve plasma yapısı elde edilmeye çalışılmıştır.

Elde edilen verilen en uygun koordinat sisteminde ifade edilmeye çalışılmıştır. Bunun için GSE koordinat siseminde gelen veri, önce güneş rüzgârının hız vektörüne göre dönüştürülmüş, daha sonra GSM koordinat sistemine aktarılmış. Tüm manyetopoz sınır tabaka pozisyonları ve diğer tüm vektör büyüklükler bu koordinat sisteminde yani aSWGSM koordinat sisteminde incelenmiştir.

ARTEMIS uydularına ilaveten bu kısımda güneş rüzgârı ve IMF verileri için Lagrange (L1) noktasındaki diğer bir uydu, ACE uydusu, verileri kullanılmıştır. ACE uydusundan IMF'i ölçen aletten (MAG) Güneş'e ait manyetik alan verileri ve parçacık hız, yoğunluk ve sıcaklık verileri de plazma aletinde (SWE) aletinden elde edilmiştir. ACE verileri manyetopoz ve manyetik kuyruk için belirlenen özelliklerin hangi güneş rüzgârı şartlarında oluştuğunu anlamak için kullanılmıştır. Bu kısımda manyetik kuyruğa ait manyetik alan, parçacık hızı, yoğunluğu ve sıcaklık verileri IMF'nin durumuna göre sınıflandırılarak her bir durum ayrı ayrı incelenmiştir.

Elde edilen veriler seçilmiş tekli ve/veya çoklu vaka çalışmalarının yanısıra, tüm veri ile istatistiksel veri analizi yöntemleri uygulayarak genel yapının ortaya çıkarılmasına çalışılmıştır. Manyetik kuyruk çalışmalarında manyetik alan ve plazma akışı (hız) verileri değişik düzlemlerde vektör çalışmaları ile yürütülmüştür. Bunun yanısıra verinin durumuna göre histogram (bar veya açısal grafikler) teknikleri kullanılmıştır.

Manyetik kuyruğun yapısı ve IMF ile olan etkileşimi küresel MHD modelleri ile incelenmiş, model sonuçları uydu verisi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Bu amaç için BATSRUS MHD modeli kullanılmıştır. Model NASA/GSFC Community Coordinated Modelling Center (CCMC)'da kullanım koşullarına uygun bir şekilde çalıştırılmıştır.

3.2 Manyetosfer-Iyonosfer Etkileşimi (MI-Etkileşimi): Bu bölümde atmosferin 120 km ve üzerine manyetosferden gelen yüksek enerjili parçacıkların neden olduğu elektrik alan, elektrik akımları, elektrik alanının neden olduğu ısınma olan Joule ısınması (Joule heating) parametresi kullanılarak incelenmiştir. Bu parçacıkların nötral rüzgâr üzerine etkisi ve nötral rüzgârın da Joule ısınması üzerine etkisi belirlenmiştir. Ayrıca uydu sürüklemesini etkileyen nötral yoğunlukların modellerce tahmini ve Joule ısınması ile ilişkisi irdelenmiştir. Öncelikle manyetik kuyrukta meydana gelen manyetosferik mikrofırtına ve küresel manyetik fırtına vakaları seçilmiştir ve bu vakalar çerçevesinde manyetik aktivitenin Joule ısınması ve nötral rüzgâr üzerine olan etkilerine bakılmıştır. Bu çalışmamızda kullanılan aletler/teknikler ve veriler aşağıdaki gibidir:

a. Manyetik fırtına indisleri: Manyetik kuyrukta meydana gelen manyetosferik mikrofırtınayı belirlemek için AE ve Dst indisleri kullanılmıştır. Manyetik fırtına olayları için K_p indisi de analize dahil edilmiştir.
b. SuperDARN radar verisi: Yukarı enlemlerde değişik yerlere yerleştirilen 18 adet SuperDARN radarı verisinden elde edilen iyonosferik elektrik alan, parçacık hareketi (ionospheric convection), elektrik potansiyeli verileri.
c. CHAMP uydusu verisi: Yaklaşık 450 km yüksekliğinde yörüngesi bulunan CHAMP uydusu yukarı atmosfer seviyelerinde hassas manyetik alan ve yoğunluk ölçümlerini yapmaktadır. Bu veri içerisinden parçacık yoğunluğu verisi iyonosferik model çıktıları ile karşılaştırılmış ve modellerin kalibrasyonu yapılmıştır. Öğrencimiz çalışmanın bu kısmını NASA/GSFC CCMC Space Weather Lab.'da bir sene araştırmalara katılarak yürütmüştür.
d. Nümerik Modeller: Manyetosfer iyonosfer etkileşiminde, hem manyetosferik, hem iyonosferik hem de bu iki model grubunu birbirine integre eden modeller kullanılmıştır. SWFM-BATSRUS manyetosferi iyonosferik elektrodinamik ile koşan bir modeldir. Dolayısıyle manyetosferik etkileri içinde barındırır. Bunun yanısıra, TIEGCM, GITM, CTIPe ve HWM93 modelleri iyonosferik parametrelerin ortaya konulmasında kullanılmıştır. Bu modeller, elektron/iyon yoğunluğu, nötral yoğunluk, elektron/iyon sıcaklığı, nötral sıcaklık, nötral ve yüklü parçacık hızlarını çıktı olarak hem zamansal hem de dünya üzerinde küresel olarak uzaysal dağılımını vermektedir.
e. ACE uydusu: Manyetik kuyruk çalışmasında olduğu gibi MI-etkileşimi kısmında da güneş rüzgârının plazma (hız, basınç, sıcaklık, yoğunluk) ve IMF'nin durumuna göre sınıflandırmaların yapılarak güneş rüzgârı ve IMF'nin etkilerinin belirlenebilmesi için ACE manyetik alan ve plazma verileri kullanılmıştır.

3.3 İstanbul Üzerindeki Iyonosferin Yapısı ve Özelliklerinin Belirlenmesi: Projenin bu bölümünde İTÜ-Yukarı Atmosfer ve Uzay Havası Laboratuvarı'na ait iyonozonde radarı kullanılarak İstanbul ve orta enlemler üzerinde iyonosferin yapısı, özellikleri, temporal değişkenliği ve manyetik fırtına dönemlerinde bu yapıda meydana gelen değişimler çalışılmıştır. Iyonosferdeki fiziksel ve dinamik süreçler incelenmiştir. Bu amaç için kullandığımız veri ve takip ettiğimiz yöntem aşağıdaki gibidir.

a. İyonozonde radar verileri: F2 tabakası kritik frekansı, F2 tabakası kritik yükseklik, plazma frekansı-yükseklik verileri ve toplam elektron yoğunluğu (TEC). Bu veriler kullanılarak orta enlem iyonosferinin elektron yoğunluğu ve maksimum elektron yüksekliğinin özellikleri zamansal olarak ortaya konulmuştur. Günlük, mevsimsel ve yıllık olmak üzere ilgili parametrelerin değişimleri belirlenmiştir.
b. Manyetik fırtına indeksleri: AE ve Dst indeksleri ve gerektiğinde Kp manyetik indeksi kullanılmıştır. İndeksler manyetik kuyrukda manyetik fırtınanın var olup olmadığını anlamak için kullanılmıştır. Bu çalışmadan verinin durumuna göre ilk ölçümlerin yapıldığı yıllarda vaka analizi şeklinde (Ayşegül Ceren Moral) ve daha sonra verilerin yeterince birikmesi ile istatistiksel olarak (Bute Naz Erbaş) yürütülmüştür. AE ve Dst indeksleri taranarak 2012-2015 seneleri arasında meydana gelen en kuvvetli manyetik fırtınalardan 41 tane seçilerek manyetik fırtınalarla ilişkisi belirlenmiştir. Buna ilaveten GPS uydularına olan etkileri görebilmek için aynı dönemlerde iyonosferin orta enlemlerde GPS frekanslarındaki absorblama gücüne bakılmıştır.
c. Iyonosferik modeller: Bu çalışmada kullanılan iyonosferik modeller TIEGCM ve IRI modelleridir. Her iki modelden elde edilen toplam elektron yoğunluğu (TEC), plazma frekansı, maksimum elektron yüksekliği çıktılarının yükseklik ve zamansal değişimi iyonozonde verilerinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. En büyük ve en küçük farklılıkların görüldüğü zamanlar belirlenmiştir. Bu amaç için histogram grafikleri kullanılmıştır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 ARTEMIS Uydusu ile Manyetik Kuyruğun İncelenmesi

Manyetosferin Ay mesafesinde, -60 Re'deki, manyetik yapısı manyetosferik sınır tabaka (manyetopoz) ve manyetik kuyruk şeklinde incelenmiştir. Şekil 7, uydunun, Bölüm 3'de anlatıldığı şekilde belirlenen manyetopoz geçiş noktaları arasında kalan manyetik kuryuk geçişlerini xy-düzleminde göstermektedir. Manyetosferin bu mesafede güneş rüzgârının yönüne göre rüzgâr çorabı hareketi belirlenmiştir. Şekil 8'de bu hareketin doğu-batı ve kuzey-güney doğrultusundaki değişimi gösterilmektedir. Şekil 8a manyetik kuyruğun, merkez

eksenden doğu-batı doğrultusundaki sapmasını (yalpalama hareketi), Şekil 8b ise düşey yönde yani kuzey güney doğrultusundaki sapmasını (yunuslama hareketi) vermektedir. Güneş rüzgârının doğu-batı yönündeki hızı (V_y) arttığında bu yöndeki sapması, kuzey-güney yönündeki hız bileşeni (Vz) arttığında da o yöndeki (b) sapması artar veya azalır. Şekil 8c'den V_y hızının 150 km'lere kadar değiştiğini ve bunun manyetik kuyruğun ekseninin doğu-batı yönünde 20^o kadar saptırdığını görmekteyiz. Benzer şekilde kuzey güney yönündeki sapmanın ise Vz ile orantılı olarak daha küçük olduğunu görmekteyiz. Şekil 8 ortalama x=-60 R_e'deki sapmanın 5^o olduğunu vermektedir. Ancak güneş rüzgârındaki değişimleri anlık yakalayabilmek için, çalışmamızdaki tüm vektör büyükler anlık sapma açısı kullanılarak yeni koordinat sistemi aSWGSM'e dönüştürülmüşlerdir.

Manyetosferik sınır tabaka geçişleri ile manyetopozun (aynı zamanda manyetik kuyruğun) büyüklüğü belirlenmiş (Şekil 9a) ve mevcut analitik modellerle karşılaştırılmıştır (Şekil 9b). Şekil 9a ve Şekil 9b manyetik kuyruğun ortalama yarıçapının 26.3 R_e olduğunu ancak dönem dönem 10 R_e kadar küçük olabildiği gibi 39 R_e kadar da büyük olabildiğini, bu iki ekstrem aralık içerisinde değiştiğini göstermektedir.

Şekil 10 en küçük manyetopoz yarıçapının (10 R_e) görüldüğü geçişe (25/Ocak/2013) ait ARTEMIS 1 ve 2 uydularının geçiş anındaki pozisyonunu yz-düzleminde vermektedir. Şekil 11 ise bu geçiş esnasında ARTEMIS 2 uydusunun kaydettiği manyetik alan ve plazma parametrelerini göstermektedir. Şekil 11 yukardan aşağıya ARTEMIS uydusundan alınan toplam manyetik alan şiddeti ve B_z bileşeni, yoğunluk, sıcaklık, hız ve enerjetik parçacık değişimini vermektedir. Şekilde ok işareti ile verilen dikey çizgi en küçük manyetopoz geçişini ve bunu takip eden diğer çoklu manyetopoz geçişlerini göstermektedir. Şekil 12'de en küçük manyetopoz yarıçapının kaydedildiği yörüngedeki, bu (10 R_e) geçişten önceki ve sonraki, çoklu girdi-çıktılara ait manyetopoz noktalarının eşleştirilmiş IMF B_z ve güneş rüzgârı dinamik basıncı ile olan değişimini göstermektedir. Şekilde manyetopoz yarıçapı (R) kırmızı, IMF B_z siyah ve dinamik basınç ise mavi ile gösterilmektedir. Büyük daireler en küçük yarıçapı işaret etmektedir. Görüleceği üzere en küçük manyetopoz yarıçapı 10 R_e'nin görüldüğü noktada IMF B_z en kuvvetli ve pozitif, yani kuzeyli, dinamik basınç ise bu geçiş sırasında çok yüksek bir değere ulaşmaktadır. Bu manyetopoz yarıçapı gözlenmeden önce, ARTEMIS 2 uydusu yörüngesi üzerinde hareket ederken sürekli küçülen bir manyetik kuyruk şekli (manyetopoz yarıçapı) ölçmekte ve 10 R_e'de en düşük değere ulaşmaktadır. Bu esnada IMF Bz başlangıçta çoğunlukla kuzeyli ama çok kuvvetli olmayıp düşük değerlerde seyretmektedir. 10 R_e görüldükten sonra da hızlı bir şekilde kuvvetli sayılabilecek güneyli yöne dönmektedir. Dinamik basınç ise artmaya devam etmektedir. Şekil çok net bir şekilde kuzeyli IMF B_z ve yüksek dinamik basıncın manyetopozun yarıçapını veya manyetik kuyruğun alanını küçülttüğünü göstermektedir. Bu noktadan sonra dinamik basınç artsa dahi IMF B_z'nin şiddetini artırarak

güneyli yöne dönmesi manyetopozun boyutunda artırıcı bir yönde etki etmektedir. İki etki, IMF Bz ve dinamik basınç burada birbirleri ile yarışmakta ve bu geçiş için egemen etkiye tepki olarak, yani IMF Bz'nin güneyli olması ve şiddetli olmasına karşılık olarak, bu noktadan sonra manyetopozun yarıçapı giderek artmaktadır. Kuzeyli IMF durumunda manyetik birleşmenin olmayışı ve dinamik basıncın sıkıştırma etkisi nedeni ile manyetopoz küçülmekte; öte yandan güneyli IMF durumunda meydana gelen manyetik birleşme nedeni ile "açık" manyetik akı ile dolan manyetik kuyruk büyüdüğü için manyetopoz genişlemektedir. Bu ikinci durumda artan dinamik basıncın sıkıştırıcı etkisi güneyli IMF Bz'nin etkisi yanında hafif kalmakta, sönümlenmektedir. Manyetk kuyruk egemen faktörün etkisi altına hareket etmektedir- ki bu noktadan sonra güneyli IMF B_z'nin baskın olduğu anlaşılmaktadır.

Bu durumu Şekil 13 a ve Şekil 13b'de yakından görmek mümkündür. Şekil 13a ve Şekil 13b, sıra ile, bu geçişe ait ARTEMIS 1 ve ARTEMIS 2 uydularının dinamik basınç-manyetopoz yarıçapı ve IMF B_z-manyetopoz yarıçapı ilişkilerini göstermektedir. Üstteki şekilde (Şekil 13a) bu geçiş için artan dinamik basınç ile yarıçapın azaldığı net bir şekilde görülmektedir. Noktalı çizgi veriye uydurulan eğriyi göstermektedir. Alttaki IMF B_z panelinde ise sağ taraf pozitif IMF B_z panelini, sol taraf ise negatif IMF B_z panelini vermektedir. Her iki panelde de artan IMF B_z şiddeti ile manyetopozun küçüldüğü anlaşılmaktadır. Ancak negatif IMF Bz panelinde aynı zamanda belli bir negatif IMF B_z değerinden (bu geçiş için -5 nT) sonra manyetopoz yarıçapında bir duraklamanın olduğu, bir doyuma ulaşıldığı ve bundan sonra artan negatif IMF B_z ile boyutun küçülmediği, bu vaka için 10-15 R_e arasında, sabit kaldığı da görülmektedir. Belli bir doyum noktasından sonra, güneyli IMF Bz'nin şiddeti ne kadar artarsa artsın, manyetopozun küçülmesi yönünde bir etki yapmadığı anlaşılmaktadır.

Benzer ama tam tersi bir durum, 28/Ağustos/2012'de gerçekleştirilen manyetik kuyruk geçişinde gözlemlenmiştir. Şekil 14 ARTEMIS uydularının bu geçiş anındaki konumunu yz-düzleminde vermektedir. Bu geçiş esnasında en büyük manyetopoz kaydedilmiştir. Şekil 15 bu geçişe ait ARTEMIS 2 uydusunun kaydettiği manyetik alan ve plazma ölçümlerini vermektedir. Şekildeki paneller sıra ile Şekil 11'deki gibi verilmiştir. Geçiş anı ok ile gösterilen dikey çizgidir. Diğer dikey çizgiler de aynı gün görülen çoklu manyetopoz çizgilerini göstermektedir. Şekil 16'de ise en büyük manyetopoz yarıçapının kaydedildiği yörüngedeki, bu (39 R_e) geçişten önceki ve sonraki, çoklu girdi-çıktılara ait manyetopoz noktalarının IMF B_z ve dinamik basınç ile olan değişimi sunulmaktadır. Sol taraftaki eksende siyah çizgi IMF B_z'i, sağ taraftaki mavi çizgi ise dinamik basıncı vermektedir. Kırmızı renkli çizgiler manyetopoz yarıçapını (R), büyük daireler ise en büyük manyetopoz yarıçapının kaydedildiği noktayı göstermektedir. Görüldüğü üzere tüm geçiş noktaları boyunca dinamik basınç çok düşük olup ortalamada 0.06 nPa'da, IMF B_z ise 3nT kuzeyli olarak başlamakta ve daha sonra iyice azalmakta, sıfır civarında kalmakta, bir ara hafifçe güneyli olmakta ve daha sonra tekrar

yavaşça artmaktadır. Ortalamada 1.5 nT civarındadır. Hem küçük kuzeyli IMF B_z ve hem de çok düşük dinamik basınç bu geçiş esnasında manyetopozun yarıçapının artmasına neden olmuştur. Şekil 17 ise dinamik basınç-manyetopoz yarıçapı ve IMF Bz-manyetopoz yarıçapı ilişkilerini bu en büyük manyetopoz geçişin görüldüğü vaka için göstermektedir. Her iki grafikte de dinamik basınç ve kuzeyli IMF Bz'nin çok düşük seviyelerde olduğu görülmektedir. Çok yavaşça artan kuzeyli IMF çok düşük dinamik basınç yanında etkisini gösteremiyor ve manyetopoz çok büyük ölçülüyor.

Her iki ekstrem durum için güneş rüzgârı verileri incelendiğinde güneş rüzgarı ve IMF değerleri de iki ekstrem durumu göstermektedir. Her iki ekstrem durum için de ACE uydusu yoğunluk verileri olmadığından ACE uydusu ile hemen hemen aynı konumda olan WIND uydusu verileri bu iki durum incelenmiştir (Şekil 18). Şekil 19 25/Ocak/2013 vakası için, WIND uydusundan alınan IMF (B_{tot} ve B_z) ve plazma (sıcaklık, hız, yoğunluk ve dinamik basınç) verileri gösterilmektedir. Görüldüğü üzere ARTEMIS uydusunun en küçük manyetopoz yarıçapını ölçtüğü zamanlarda ortala hız (350 km/sec), yüksek yoğunluk (25 #/cm^3), yüksek sıcaklık (4 eV ve yüksek dinamik basınç (~4 nPa) söz konusudur. IMF B_z pozitiftir ve IMF Btot (15 nT) da artmıştır. Bu veriler 25/Ocak/2013 durumu için güneş rüzgârında bir CME kütle atımı olduğunu göstermektedir. Aynı gün yer istasyonlarında ölçülen Dst değerinin 20 nT civarında pozitif yönde arttığı görülür (Şekil 20) -ki bu manyetosferin gündüz tarafında sıkıştırıldığını gösterir. Bunu takiben de bir gün sonra manyetik fırtına ve manyetosferik fırtınanın oluştuğu görülmektedir (AE> 100 nT ve Dst~-40nT). Sonuç olarak da manyetopozun yarıçapı, CME nedeni ile artan dinamik basınç ve kuzeyli IMF nedeni ile çok küçülmüştür. ARTEMIS uydusu bu değeri 10 R_e olarak kaydetmiştir. Şekil 21'de ise en büyük manyetopoz yarıçapının görüldüğü 28/Ağustos/2012 günündeki ACE ve WIND pozisyonları karşılaştırılmaktadır. Şekil 22 ise bu günde en büyük manyetopoz yarıçapının kaydedildiği andaki WIND uydusu IMF ve güneş rüzgârı verilerini göstermektedir. Bu geçiş için WIND uydusu verilerinden görüleceği üzere, 28/Ağustos/2012 durumu için güneş rüzgârı sakindir. Güneş rüzgârında herhangi bir aktivite, bir olay yoktur. Şekil 23 ise bu geçiş anındaki AE ve Dst manyetik indekslerini vermektedir. Her iki indeks de herhangi bir manyetik fırtınanın veya manyetosferik mikrofırtınanın da oluşmadığı göstermektedir. Bu da daha büyük bir manyetopoz yarıçapının oluşması için uygun şartların olduğunu göstermektedir. ARTEMIS de bu durum için manyetopoz yarıçapını 39 R_e olarak kaydetmiştir. Bu durumda manyetopoz, 25/Ocak/2013'deki durumun nerede ise 3 katı kadar büyümüştür.

Şekil 24 bu iki ekstrem durumdaki model karşılaştırmalarını göstermektedir. Ancak bunu incelemeden önde Şekil 9b'e geri dönüp genel durum için model karşılaştırmasına bakmak iyi olur. Şekil 9b'de modeller şekildeki noktalara karşı gelen ortalama güneş rüzgârı şartları için çalıştırılmışlardır. Karşılaştırılan analitik ve veri tabanlı modeller, Howe ve Binsack (1972),

Shue vd. (1997), Shue vd. (1998), Chao vd. (2002) ve Lu vd. (2011) modelleridir. Bu modeller içinde Howe ve Binsack'ın (1972) modeli en eski model olup, dinamik bir model olmayıp güneş rüzgârı ve IMF şartlarını içermez, sadece mesafe ile değişimi içerir. Shue vd. (1997) modeli güneş rüzgârının dinamik basınç ve IMF B_z'nin bir fonksiyonudur. Shue vd. (1998) modeli ise Shue vd. (1997) modelinin ektrem durumlar için genişletilmiş geliştirilmiş versiyonudur. Chao vd. (2002) modelindeki fonksiyonel ifade Shue vd. (1997 ve 1998) modelleri ile aynıdır. Ancak Chao vd. (2002), modellerinde ortalama bir güneş rüzgârı gecikmesi kullanmak yerine, modellerini anlık bazda güneş rüzgârı ve IMF ile birleştirerek iyileştirmişlerdir. Lu vd. (2011) modeli ise pek çok IMF ve güneş rüzgârı şartları altında çalıştırılmış MHD modellerinin sonuçlarının değerlendirilmesi sonucunda ortaya çıkan fonksiyonel forma dayanmaktadır. Tablo 1 modellerin özelliklerini, varsayımlarını ve çalışma limitlerini göstermektedir. Şekil 9b genel olarak incelendiğinde modellerin hepsinin manyetosferin gündüz tarafında (x=+12 R_e) aşağı yukarı aynı değerleri verdiği, farklılıkların gece tarafında yani manyetik kuyruk tarafında oluştuğu görülebilir. Howe ve Binsack (1972) modeli ile Lu vd. (2011) modelleri birbirine yakın iken diğer üç model de, Shue vd. (1997), Shue vd. (1998) ve Chao vd. (2002), birbirlerine yakın değerler vermektedirler. Modeller, ARTEMIS verilerinin ortalama manyetopoz yarıçapı olan 26.3 R_e ile, ortalama x-mesafesi -54 R_e'de karşılaştırıldığında en yakın modelin Lu vd. (2011) ve Howe ve Binsack (1972) modelleri olduğu görülür. Lu vd. (2011) modelinin veriye daha yakınsaması beklenebilir bir durumdur çünkü MHD modeli gerçek fiziksel ve dinamik şartları içinde barındıran modeldir. Burada sürpriz sonuç veren Howe ve Binsack (1972) modelidir. Statik yani herhangi bir fizik içermemesine rağmen ortalama şartlar altında ARTEMIS gözlemlerine yakın değerler vermektedir. Model ortalama güneş rüzgârı şartları altında halen kullanılabilir.

Modellerin 25/Ocak/2013 ve 28/Ağustos/2012 ekstrem durumları için performansları ise Şekil 24'de görülmektedir. Üstteki panelde 25/Ocak/ 2013, alttaki panelde ise 28/Ağustos/2012 durumları için elde edilen sonuçlar verilmektedir. Şekil 24a'da en küçük manyetopoz yarıçapının ölçüldüğü 25/Ocak/ 2013 durumu için, gözlem noktasına en yakın manyetopoz değerini Lu vd. (2011) modelinin verdiği, iyiden kötüye doğru bunu Shue vd. (1997), Shue vd. (1998), ve Chao vd. (2002) modellerinin sıra ile takip ettiği görülmektedir. En kötü performansı ise Howe ve Binsack (1972) modelinin verdiği görülmektedir. Ancak bu şaşırtıcı bir durum değildir. Howe ve Binsak (1972) modeli güneş rüzgârı dinamik basıncı veya IMF B_z etkilerini ve değişkenliklerini içermemektedir. Dolayısıyle gerçekten uzaktır ve sonuç olarak da gerçek veri ile uyumlu çıkmamıştır. Chao vd. (2002) ile Howe ve Binsack (1972) modellerinin gündüz tarafında da büyük bir manyetopoz verdiği, yani CME'nin sıkıştırma etkisinden etkilenmediği görülmektedir. Diğer üç model gündüz tarafında da küçük bir manyetopoz göstererek gündüz tarafı manyetopozunun CME tarafından sıkıştırıldığını, Dünya'a doğru itildiğini

göstermektedirler. Yine bu üç model gece tarafında yani manyetik kuyruk tarafında mesafe ile küçülen veya değişmeyen bir manyetopoz yarıçapı verirken, Chao vd. (2002) ve Howe ve Binsack (1972) giderek genişleyen, yani büyüyen bir manyetik kuyruğu göstermektedir.

Şekil 24b'de modellerin 28/Ağustos/2012 vakası için performansları karşılaştırıldığında da en iyi performansın Lu vd. (2011) ve Chao vd. (2002) modellerinde; en düşük performansında yine Howe ve Binsack (1972) modelinde olduğu görülür. Howe ve Binsack (1972) modelinin özelliği göz önüne alındığında bunun da yine şaşırtıcı olmadığı anlaşılır. Tablo 2 modellerin performanslarını bütün veri, 25/Ocak/2013 ekstrem vakası ve 28/Ağustos/2012 ekstrem vakası için sayılaştırmaktadır. Tabloda ilk sütun veriye ait ortalama ve medyan değerleri verirken, her bir model altındaki ilk sütunlar ilgili modelin tahmin ettiği manyetopoz yarıçapını, ikinci sütunlar ise bütün ARTEMIS verisi için verilen ortalama veya ekstrem vakalar duruma karşı gelen manyetopoz yarıçapına göre % hatayı göstermektedir. Tablo 3 ise modelleri Tablo 2'de görülen % hata performanslarına göre sınıflandırmaktadır.

Modellerin Ay mesafesindeki manyetopoz yarıçapını veya manyetik kuyruğun büyüklüğünü başarılı bir şekilde tahmin edebilmeleri IMF Bz ve dinamik basınç ilişkisini ne kadar iyi modelin içine koyabildiklerine ve bu mesafeden uydu verisi içerip içermediğine yakından bağlıdır. Ne kadar çok farklı IMF ve dinamik basınç değişim aralıklarını içeriyorsa ve manyetik kuyruğun Ay mesafesinden ne kadar çok veri kullanıyorsa tahminlerinin iyileştirilebileceği açıktır. Burada kullanılan modellerin hiç birisi Ay mesafesinden uydu verisi barındırmamaktadır. Yani fonksiyonel ilişkilerinin belirlenmesinde bu mesafeden veri bulunmamaktadır. Dolayısıyle bu şartlar altında çok iyi bir performans zaten beklenmemektedir. Ancak burada ortaya çıkan farklılıklar giderildiğinde tahminlerin daha gözleme yakın olacaktır.

IMF'nin manyetik kuyruğun manyetopoz sınır tabakasının yarıçapında oluşturduğu değişimler, elde ettiğimiz manyetopoz geçiş noktalarının IMF B_y ve IMF B_z yönüne göre ayrıştırılması ile incelenmiştir. Şekil 25 IMF B_y durumu için manyetik kuyruğun şekil ve boyut yönünden incelenmesini, Şekil 26 ve Şekil 27 ise IMF B_z durumu için olan incelemeyi sunmaktadır. IMF B_y durumunda Şekil 25a'da +IMF B_y ve Şekil 25b'de ise –IMF B_y durumu gösterilmektedir. Şekiller üzerinde manyetopoz sınır tabaka noktalarına uygulanan en küçük kareler yöntemi ile elde edilen elips verilmektedir. Şekilden görüleceği üzere kuyruğun şekli her iki IMF B_y durumu için de üstten basık bir elipsdir. Elipsin parametreleri +IMF B_y ve –IMF B_y için, sıra ile, "a" uzun eksen yarısı 29 ve 30 R_e; "b" kısa eksen yarı uzunluğu ise 20 ve 21 R_e'dir. IMF B_y ile ilişkili herhangi bir asimetrik kuyruk döngüsü görülmemiştir. Bu ortalama IMF B_y değerlerinin küçük olmasından dolayı olabilir. Ortalama IMF B_y bu iki şekilde yaklaşık +4 ve -4 nT civarındadır. Her ne kadar manyetik kuyruktaki mesafe ile değişiyor olsa da, manyetik kuyruğun döngüsünün görülebilmesi için minimum güneş rüzgârı IMF B_y şartlarının 10nT ve üzerinde olması beklenir (Kaymaz vd. 1994).

Şekil 26'de ise manyetopoz sınır tabakasının geçiş noktalarının pozitif IMF Bz durumu için dağılımı görülmektedir. Şekil 26a'da sadece manyetopoz geçiş noktalarını ve Şekil 26b'de ise bu noktalardaki manyetopoz manyetik alan vektörlerini vermektedir. Burada kuzeyli IMF B_z durumunda manyetopoz sınır tabaka vektörlerinin daha düzenli ve sınıra paralel ve büyüklükleri aşağı yukarı daha orantılı, benzer büyüklüklerde oldukları ve genel olarak akışın da kuzeyli olduğu görülmektedir. Bu kuzeyli IMF durumunun türbülanstan uzak bir etkileşim sergilediğini göstermektedir. Şekil 27 ise Şekil 26'e benzer olup güneyli IMF B_z için durumu göstermektedir. Şekil 27a ve Şekil 26a karşılaştırıldığında kuzeyli IMF ve güneyli IMF için mayetopoz sınır tabakanın büyüklüğünde bir fark saptanamamıştır. Kuzey ve güney IMF B_z'sine karşılık gelen kuyruğun kesit şekli çok az da olsa doğu-batı doğrultusunda sıkıştırılmış bir manyetik kuyruk şeklidir. Elipsin eksentrisi çok küçük olup her iki IMF B_z için de daireye daha yakındır. Şekil 27b manyetopoz sınır tabaka noktalarındaki manyetik alan vektörlerini negatif IMF B_z durumu için göstermektedir. Şekilden de görüleceği üzere, güneyli IMF B_z'e karşı gelen sınır tabaka vektörleri daha bir random, kaotik bir değişim sergilemekte, sınır tabakanın şekline çoğu zaman dik, her yönde ve her büyüklükte vektörlerin olduğu görülmektedir. Bu güneyli IMF B_z'nin daha türbülanslı bir geçiş sergilediğini göstermektedir. Manyetik kuyruğun manyetik ve plazma yapısı üzerine olan incelemelerimizde vektör haritaları kullanılmıştır. Bu kısımda manyetik kuyruğun manyetik açıdan dipol özelliğini -60 R_e'e kadar koruduğu görülmüştür (Şekil 28). Hız haritaları parçacıkların dominant olarak Dünya'dan uzağa doğru hareket ettiğini göstermiştir (Şekil 29). IMF B_y'nin pozitif veya negatif oluşuna göre manyetik kuyruk quadrantlarına göre ayrıştırmalarda +IMF B_y için asimetrik B_y dağılımı görülürken (Şekil 30), negatif IMF B_y sektörüne ait net bir manyetik kuyruk B_y dağılımı elde edilmemiştir (Şekil 31). IMF B_y'nin pozitif veya negatif oluşuna göre hız değerlerindeki ilk analizlerimiz de net bir asimetrik, IMF B_y'nin yönüne uygun beklenen değişim göstermemiştir. Ancak bu konu üzerinde halen ileri analizler yapmaktayız. Yoğunluk ve sıcaklık verileri incelendiğinde manyetik kuyrukta bu mesafede üç tip plazmanın olabileceği anlaşılmaktadır (Şekil 32, 33 ve 34): soğuk ve yoğun, sıcak ve az yoğun ve ikisinin ortası olacak şekilde.

Son olarak Şekil 35'de ise ARTEMIS uydusunun 7/Mart/2012 tarihindeki manyetik kuyruk geçişi sırasındaki manyetik alan ve plazma hız vektörleri xy-, xz- ve yz-düzlemlerinde BATSRUS model sonuçları ile karşılaştırılmaktadır. Sol üstteki ilk dört panelde, sıra ile, uydu ve model manyetik alan vektörleri xy- ve xz- düzleminde gösterilmektedir. Sol alttaki dört panelde ise xy- ve xz-düzlemlerindeki uydu ve model plazma hızı vektörleri karşılaştırılmaktadır. Sağ üstteki ilk iki panelde uydu ve model manyetik vektörleri yz-düzleminde gösterilmektedir. Sağ ortadaki iki panelde ise uydu ve model plazma hızı vektörleri yz-düzleminde verilmektedir. Model bu geçişe karşı gelen IMF ve güneş rüzgârı şartları için çalıştırılmıştır. Şekilde, bütün düzlemlerde bu geçiş esnasında modelin aşırı büyük manyetik

alan ve hız değerleri verdiği net olarak görülmektedir. Model tahminleri aşırı büyüktür. Aynı şekilde yine sağ tarafta, en altta ise uydunun 7/Mart/2012 tarihinindeki geçişine karşı gelen AE manyetosferik mikrofırtına indisini verilmektedir. Bu panelden görüleceği üzere AE indisi bu geçiş esnasında çok şiddetli bir manyetosferik fırtınanın olduğunu göstermektedir. Bu sonuç Şekil 28 ve 29 ile birleştirildiğinde MHD modeli BATSRUS'un hem hız hem de manyetik alan vektörlerini aşırı büyük tahmin ettiği görülmektedir.

Projemizin buraya kadar olan kısmında manyetik kuyruğun şekil ve boyut çalışmaları, model karşılaştırmaları, manyetik kuyruğun manyetik ve plazma hızı yapısı ve model karşılaştırmaları tamamlanmış ve sunulmuştur. Bunlara ilaveten manyetik alan ve hız verilerine dayanarak türetilen diğer türetilmiş parametreler halen inceleme altındadır. Bu parametrelerden bazıları manyetik basınç, plazma basıncı, elektrik alan, elektrik akımları ve manyetik kuvvet vb'dir. Çalışmamızın bu kısmı da tamamlandığında TÜBİTAK'a sunulacaktır.

Projemizin ARTEMIS manyetopoz sınır tabakası üzerine olan sonuçlarını içeren makale dergiye gönderilmek üzere hazırlanmıştır. Makalemiz EK 3.1'de verilmiş olup, şu anda çalışmamızda yer alan diğer yazarlar tarafından incelenmektedir.

4.2. Manyetosfer-Iyonosfer Etkileşimi

Manyetosfer-iyonosfer etkileşimi kısmında değişik metodlarla Joule ısınması hesaplanmış ve karşılaştırmaları yapılmıştır (Şekil 36). Joule ısınması üzerine manyetik fırtınaların etkisi modellerin manyetik fırtına döneminde ürettikleri Joule ısınması hesaplanarak gösterilmiştir. Bunun için önce birbirini takip eden iki manyetosferik mikrofırtınanın görüldüğü bir gün tesbit edilmiş (8/Mart/2008) ve farklı modeller/metodlar seçilen bu gün için çalıştırılmıştır/uygulanmıştır. SWMF-BATSRUS model verileri ile SuperDARN verilerinin kombine edildiği yöntem en uygun Joule ısınması değerlerini vermiştir (Şekil 36). En çok kullanılan AE indeks yöntemi beklenenden çok fazla ve IRI model verileri ile hesaplanan Joule ısınması ise çok düşük değerler vermiştir. Şekil 37 BATSRUS modeli sonucu ile BATSRUS-SuperDARN birleşiminden elde edilen Joule ısınması değerlerini karşılaştırmaktadır. Görüldüğü üzere BATSRUS model sonucu BATSRUS-SuperDARN birleşiminden daha düşük Joule ısınması değerleri vermiştir. Bu model-metod farkı kullanılan elektrik field değerlerinden kaynaklanmaktadır. BATSRUS-SuperDARN birleşiminden SuperDARN radarından elde edilen elektrik alanını kullanırken BATSRUS modeli manyetosferden manyetik alan çizgileri üzerinden gelen parçacıkların oluşturduğu elektrik alanını kullanmaktadır. Şekil 38a model ve metodların kendi içinde manyetik sektörlere göre (öğlen-gece yarısı-sabah ve akşam sektörleri olmak üzere) performansını ölçmektedir. Yani, her panelde bir modelin sektör bazında karşılaştırması sunulmaktadır. Şekil 39'da sektör tanımı görülmektedir. IB ve IS metodları en yüksek Joule ısınması değerlerini öğlen, en düşük değerleri ise gece yarısı sektöründe

vermektedir. BS ile BB metodları öğlen ve gece sektörlerinde hemen hemen aynı Joule ısınması değerlerini göstermektedirler. Bu ikisinde dikkati çeken nokta akşam sektöründeki Joule ısınmasının öğlen sektörününki kadar güçlü olmasıdır. Bu durum BS metodunda biraz daha zayıf olmakla beraber BS metodunda da gece yarısı Joule ısınması sabah ve akşam sektörlerindeki kadar yüksektir. BB modelinde en düşük Joule ısınması ise sabah sektöründe elde edilmiştir. Şekil 38b ise her sektördeki model karşılaştırmasını yapmaktadır. Yani her panelde bir sektör ve o sektörde bütün modeller birbirlieri ile karşılaştırılmaktadır. Burada da sabah sektöründe en düşük Joule ısınmasını IB metodu, en yüksek Joule ısınmasını ise BS modeli vermektedir. Öğlen sektöründe BB ve BS birbirine çok yakın ve IB ile IS'den daha yüksek Joule ısınması tahmin etmiştir. Akşam ve gece yarısı sektörlerinde ise BS ve BB birbirine çok yakın ve en yüksek Joule ısınması değerleri verirken IB ve IS en düşük Joule ısınması değerlerini vermiştir. Şekil 40 ise Joule ısınması üzerine nötral rüzgârın etkisini göstermektedir. İlk panelde kırmızı noktalı çizgi BB modelinin nötral rüzgâr eklenerek elde edilen Joule ısınmasını, siyah noktalı çizgi BB modelinin nötral rüzgâr olmadan Joule ısınması tahminini ve siyah noktasız çizgi de BS modelinin Joule ısınması sonucunu karşılaştırmaktadır. Buradan da görüleceği gibi özllikle manyetik fırtınanın gelişme fazında nötral rüzgâr terimi eklenerek elde edilen Joule ısınması değerleri nötral rüzgâr terimi olmadan elde edilen Joule ısınması değerlerinden daha büyüktür. Nötral rüzgâr Joule ısınmasını artıracak şekilde etki etmektedir. BS metodundan elde edilen Joule ısınması ise her ikisinden de büyüktür. BS metodu Joule ısınması aşırı tahmin etmektedir. Bu SuperDARN radarının elektrik alan verilerinin BASTRUS modelinin elektrik alan değerlerinden büyük olduğunu göstermktedir. Şekil 40'deki ikinci panel nötral rüzgârın etkisini sayısallaştırmaktadır. Burada Joule ısınmasına etkisinin bu fırtına için yaklaşık olarak 10 GW'a kadar ulaştığını görmek mümkündür. Şekil 40'deki üçüncü panel ise nötral rüzgârın katkısını manyetik fırtınanın fazlarına göre vermektedir. Görüldüğü üzere en büyük etkiyi akşam sektöründe ve genişleme ile geriye dönme (recovery) fazında yapmıştır. Bu, yukarı atmosferdeki dinamiklerin rolünü ortaya koymaktadır. Şekil 40'deki son panelde ise sektöre göre nötral rüzgâr dağılımı verilmektedir. Burada da en yüksek nötral rüzgâr katkısının yine akşam sektöründe olduğu vurgulanmakta ve diğer sektörlerdeki katkının hemen hemen eşit olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuçlar literatürdeki diğer çalışmalarla uyumludur. Nötral rüzgarla drift hızlarının birbirine ters olduğu yerlerde nötral rüzgar katkısı daha fazla, aynı yönlü oldukları yerlerde daha az olduğu görülmüştür.

Çalışmamızın amaçlarından biri de istatistik analize dayalı Joule ısınması indisi oluşturmaktır. Bir Joule ısınması indisi oluşturabilmek için öncelikle Joule ısınması ve nötral yoğunluklar doğru tahmin edilebiliyor olmalıdır. Dolayısıyla, Joule ısınması indisi bulma çalışmamızda öncelikli olarak iyonosfer-termosfer modellerinin nötral yoğunluk için tahmin

başarılarına bakılmıştır. Çalışmamızın bu kısmı NASA/CCMC ile ortaklaşa yürütülmüştür. Bu amaçla çeşitli manyetosferik mikrofırtına ve manyetik fırtına aralıkları için en iyi nötral yoğunluk tahminini hangi iyonosfer-termosfer modelinin yaptığı araştırılmıştır. Seçili manyetik fırtına aralıkları için CHAMP yukarı atmosfer uydusunun nötral parçacık yoğunlukları TIEGCM, GTIM ve CTIPe modelleri ile karşılaştırılmış ve farklı kıstaslar kullanılarak modellerin veriye karşı avantajları ve dezavantajları belirlenmiş ve modeller kalibre edilmiştir. Bu karşılaştırmalara göre JB2008 modeli uydu verilerine en yakın yoğunluk değerleri vermiştir.

Nötral yoğunluk ve Joule ısınması arasındaki ilişkinin analizinin ayrıntılarını sunmak için K_p indisinin en yüksek 8.3 değeri aldığı şiddetli bir manyetik fırtına vakası olan 15 Aralık 2006 gününü seçtik. Şekil 41, 13-17 Aralık 2006 zaman aralığı için fizik temelli (TIEGCM, CTIPe) ve amprik formüllere dayalı (MSIS ve JB2008) modellerin CHAMP uydusu yörüngesi boyunca ortalaması alınmış nötral yoğunluk tahminlerini göstermektedir. Yörünge boyunca ortalamalar termosferin küresel olarak bir manyetik fırtınaya o andaki cevabını vermektedir. Ele aldığımız bu aralık hem manyetik fırtınanın başlayıp dindiği süreyi hem de öncesinde bulunan aktivitesiz sakin günü içermektedir. Çalışmamızda öncelikle en iyi yukarı enlem sürücüsünü tespit etmek için farklı sürücüler (Weimer, Heelis, AMIE, SWMF) denenmiştir. Yeşil çizgi CHAMP nötral yoğunluk gözlemlerini göstermektedir. Şekildeki CTIPe ve TIEGCM örneklerinden de görülebileceği gibi, aynı model, farklı versiyon ve farklı sürücüler ile koşulduğunda çok farklı nötral yoğunluk değeri verebilmektedir. Bu durum termosferik fiziğin model içinde ne kadar iyi ele alındığını ve modele girdi olarak verilen auroral yapı, iyonosferik elektrik alan ve iyonosferik potansiyelin gerçeğe ne kadar yakın olduğunu göstermektedir. 2006 olayı için öncül incelememiz Weimer elektrik alan yapısının nötral yoğunluk tahminlerinde daha verimli olduğunu göstermiştir. Bu nedenle incelememizi sadece Weimer elektrik alanlarını yukarı enlem sürücüsü olarak kullanarak sınırladık.

Şekil 42 Weimer elektrik alanını yukarı enlem sürücüsü olarak kullanan modellerin nötral yoğunluk tahminlerini CHAMP ölçümleri ile beraber göstermektedir. CHAMP, MSIS, JB2008, TIEGCM, CTIPe ve GITM model sonuçları sırasıyla yeşil, kırmızı, cyan, mavi, mor ve magenta çizgiler ile temsil edilmiştir. Manyetik fırtınanın başlangıcı ve bitişi oklarla belirtilmiştir. Modeller manyetik açıdan aktif olmayan 13 Aralık günü için bile farklı sonuçlar vermektedir. Bu, model klimatolojisi nedeniyle ortaya çıkan bir sonuçtur. Model klimatolojileri nedeniyle TIEGCM modeli nötral yoğunlukları yüksek; GITM ise düşük tahmin etmektedir. Klimatolojisi iyi görünen CTIPe ise manyetik fırtına nedeni ile olan artışı düşük tahmin etmiş olarak görülmektedir.

Çalışmamızda klimatoloji kaynaklı ve Fedrizzi vd. (2012) çalışmasında bahsedilen öncül manyetosferik etkilerden kurtulabilmek için bir takım sayısal eleme yöntemleri kullanılmıştır. Amacımız bu bahsedilen etkileri eleyip veride sadece manyetik fırtınaya bağlı etkilerin kalmasını sağlamaktır. Böylece toplam Joule ısınması ile toplam nötral yoğunluk şekillendirici

bir filtre kullanılmadan ve Joule ısınması değerleri olduğu gibi korunarak ilişkilendirilebilir. Şekil 43 farklı yöntemler kullanılarak klimatolojinin elenmesini göstermektedir. Veriler üç türlü ötelenmiştir: CHAMP uydusu oratalama gözlemlerine çekilerek (SHIFT1 (a): sakin zaman ortalama yoğunluk seviyesine göre, SHIFT3 (b): birebir model-veri farklarına göre; CHAMP uydusunda görülen de dahil olmak üzere klimatoloji sıfırlanarak bütün verinin ortalama ve birebir fark kullanılarak sıfır seviyesine çekilmesi (SHIFT3 (d), SHIFT4 (e)); CHAMP ve modeller arasındaki sakin zaman ortalama oran ve birebir oranları kullanılarak verilerin CHAMP seviyesine çekilmesi (SHIFT5(c), SHIFT6(f)). Her eleme yönteminde modellerin başarısı farklı olarak bulunmuştur.

Şekil 44 bulgularımızı göstermektedir. Model başarısını arttıran ve fırtınanın etkisini en iyi eleyen öteleme yöntemleri Shift1 ve Shift2 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara dayanarak Joule ısınması ile model ilişkisini incelemek için Shift2 ile devam etme kararı alınmıştır. Shift2, verilerin sakin gün ortalamasını sıfır civarına çektiğimiz eleme yöntemidir. Klimatolojinin etkisi en aza indirilmiştir.

Bu noktaya kadar olan çalışmamız amprik ve nümerik termosfer-iyonosfer modellerinin nötral yoğunluğu ne derece iyi tahmin ettikleri ile ilgilidir. Modellerin kalibrasyonu ve başarının arttırılması hedeflenmiştir. Bu sonuçlara göre JB2008 modeli manyetik fırtına nedeniyle oluşan nötral yoğunluk değişiminin tahmininde en başarılı modeldir. Ancak, JB2008 ve MSIS modelleri Joule ısınmasına dair bir bilgi içermemektedir. GITM çıktılarında da Joule ısınması hesaplanması gereken ekstra bir parametredir. Bu nedenle, Joule ısınması ve nötral yoğunluk arasındaki ilişkinin nicelleştirilmesi için bu çalışmamızda sadece TIEGCM ve CTIPe modelleri kullanılmıştır. Fizik bazlı modellerdeki hata payları, bir kaç modelin aynı anda çalıştırılması gereken ensemble yaklaşımının nötral yoğunluk tahmini için daha verimli olabileceğini düşündürtmektedir. Dolayısıyla, ileriki çalışmalarda kullanılan model sayısı artırılmaya çalışılacaktır.

Şekil 45, 13-17 Aralık 2006 zaman aralığı için Joule ısınmasının termosferik nötral yoğunluklara etkisini göstermektedir. Ortamdaki nötrallerin yoğunluğu Joule ısınması bir süre aktif olduktan sonra artmaya başlamaktadır. Aralarında bir gecikme zamanı vardır. Açık mavi çizgi Joule ısınmasının artmaya başladığı zamanı, kırmızı çizgi ise nötral yoğunlukların artmaya başladığı zamanı göstermektedir. Modeller arasında parametrelerin artmaya başlama zamanlarının ve nötral yoğunluğu-joule ısınması tepki sürelerinin birbirleri ile tutarlı olduğu görülmüştür. Hem Joule ısınmasının miktarı hem de nötral yoğunluk açısından model sonuçları birbirinden farklıdır. Joule ısınması miktarı CTIPe tarafından daha az belirlenmesine ragmen verdiği nötral yoğunluklar TIEGCM modeli ile aynı mertebededir. TIEGCM sonuçları, modelin manyetik fırtınaya verdiği tepkinin CHAMP ölçümleri ile nerederyse aynı olmasına rağmen model klimatolojisi nedeniyle daha yüksek seyretmiştir. CTIPe modeli için ise kimatoloji çok iyi

temsil edilmiş olmasına ragmen manyetik fırtına etkisi yeteri kadar şiddetli tahmin edilememiştir.

Joule ısınması ve nötral yoğunluk arasında bir ilişki bulunabilmesi için 6 manyetik fırtına olayı seçilmiş ve bu olaylar için Weimer iyonosferik potansiyeli ile simülasyonlar koşturulmuştur. Tablo 5 seçilen olayları listelemekte ve yüksek şiddetten düşük şiddete doğru K_p indisine dayanan sıralamasını vermektedir.

CHAMP, CTIPe ve TIEGCM toplam nötral yoğunluklarının düşük şiddetli manyetik fırtınadan yüksek şiddetli manyetik fırtına için değişimi Şekil 46 üst panelde gösterilmiştir. Görünürde olayın K_p indisine dayanan şiddeti ile nötral yoğunluk arasında lineer orantılı bir ilişki bulunamamıştır. Bunun nedeni her olay için iyonosferik elektrodinamiğin güneş rüzgarındaki değişimler ve manyetosferik etkiler nedeniyle farklı işlemesi ve Joule ısınması miktarının olayın şiddeti ile doğru orantılı olmamasıdır. Ancak Joule ısınmasına karşılık nötral yoğunluklar çizdirildiğinde, aralarında olayın şiddeti ile artan düzgün doğrusal bir ilişki bulunduğu söylenebilir. Bu ilişkilere dayanarak her iki model için de toplam Joule ısınması ve toplam nötral yoğunluklar arasında bir regresyon hesabı yapılmış ve iki farklı denklem bulunmuştur. Şekil 46'daki orta panel TIEGCM Joule ısınması miktarına karşı çizdirilen CHAMP ve TIEGCM nötral yoğunluklarını göstermektedir. Alt panel ise CTIPe Joule ısınması miktarına karşı çizdirilen CHAMP ve CTIPe nötral yoğunluklarını vermektedir. Regresyondaki standart sapmalar ve hata miktarları ise şekil üzerindeki küçük tablolarda verilmektedir.

Sonuç olarak projemizin bu aşamasında 6 olay için 64 farklı simülasyon koşturulmuş, daha fazla istatistik çalışmalarımız için teorik temeli oluşturulmuştur. Burada sunulan 6 olayla sunulan ön istatistiki çalışma ile karşılaşılabilecek prolemler tesbit edilmiş, her aşamada atılması gereken adımlar belirlenmiştir. Bu adımlar: termosferin manyetik fırtınaya küresel tepkisini bulmak için yörünge üzerinde ortalaması alınmış nötral yoğunlukların kullanımı; model başarısı için Weimer elektrik alanının kullanılması; model ve gözlem klimatolojisinin veri öteleme yöntemleri ile elenmesi gerektiğidir. Burada 6 vaka ve TIEGCM ve CTIPe modellerinden elde edilen sonuçlar için regresyon hesabı yapılmıştır ve hata payları bulunmuştur. Şu an çalışmamız 6 olayla sınırlanmış olmasına rağmen çalışmamızın ileriki aşamalarında olay sayısı arttırılacaktır.

Aynı modeller nötral rüzgâr hız ve yönü açısından 15 Mayıs 2005 manyetik fırtınası sırasında incelenmiştir. Şekil 47, 15/Mayıs/2005'de meydana gelen manyetik fırtınanın ana fazı döneminde (Dst: maksimum -263 nT) TIEGCM, GTIM, CTIPe ve HWM93 modellerinden elde edilen nötral rüzgâr ve sıcaklığın 140 km'deki enlem-boylam dağılımını vermektedir. Bu şekil, TIEGCM, GTIM, CTIPe modellerinin nötral rüzgâr tahminlerinin manyetik fırtınanın ana fazında klimatolojik HMW93 modelinden çok farklı olduğunu göstermektedir. Modellerin bu

nötral rüzgâr hız tahminleri daha sonra Joule ısınması tahmininde kullanıldığında, Joule ısınması değerlerinde %10-%40 arasında bir farklılığa neden olmuştur. Şekil 48, Şekil 47'de verilen nötral hız paternine dayalı olarak CTIPe, GTIM ve TIEGCM modellerinin Joule ısınması tahminleri karşılaştırmaktadır. Şekil öncelikle modellerin en fazla Joule ısınmasını fırtınanın geriye dönme (recovery) fazında verdiğini; bunu başlangıç fazının takip ettiğini ve en düşük Joule ısınmasının ise fırtınanın ana fazında elde edildiğini görmekteyiz. Başlangıç ve ana faz sırasında CTIPe ve TIEGCM modelleri birbirlerine eşit Joule ısınması verirken, GTIM modeli bu iki modele göre başlangıç ve ana faz dönemlerinde en yüksek Joule ısınması tahmin etmişlerdir. Benzer şekilde geriye dönme fazında ise GTIM yine en yüksek Joule ısınması tahmini yaparken TIEGCM ondan biraz düşük, CTIPe ise en düşük Joule ısınması vermektedir. Şekil 47'deki nötral rüzgâr dağılımı kullanılarak elde edilen bu karşılaştırma nötral rüzgârın Joule ısınması üzerine etkisinin ihmal edilemeyeceğini ve Joule ısınmasını artırıcı yönde etki ettiğini göstermektedir. Literatürdeki bazı kaynaklarda bahsedilen nötral rüzgârın Joule ısınmasını azalttığı yönündeki bulgular bizim bulgularımızla uyuşmamaktadır.

Projemizin manyetosfer-iyonosfer etkileşimi kısmında, Joule ısınmasının farklı metod ve modeller ile hesaplanması ve karşılaştırılmasını içeren makale dergiye gönderilmek üzere hazırlanmıştır. Makalemiz EK-3.2'de verilmiş olup, şu anda çalışmamızda yer alan diğer yazarlar tarafından incelenmektedir.

4.3 İstanbul Üzerindeki İyonosferik Elektron Yoğunluğu Değişimi

Projemizin iyonosfer kısmında Ekim 2012 senesinde çalışmaya başlayan İTÜ Yukarı Atmosfer ve Uzay Havası Laboratuvarı'na ait iyonozonde radarından (Şekil 49) 2012-2014 yılları arasında kaydedilen elektron yoğunluğu verileri kullanılarak, İstanbul enlemlerinde iyonosferin temporal değişkenlikleri belirlenmiş ve manyetik fırtına dönemlerindeki elektron yoğunluğu değişimleri çalışılmıştır. Manyetik fırtınaların elektron yoğunluğu üzerine etkileri vaka çalışmalarının yanısıra istatistiksel olarak da belirlenmiştir. Şekil 50 21/Nisan/2013 yılına ait bir iyonogram örneği ile o güne ait foF2, hmF2, foE, hmE ve TEC verilerinin günlük dağılımını vermektedir. Görüldüğü üzere elektron yoğunluğu, beklendiği gibi, güneş radyasyonundaki günlük değişimi takip eden bir değişim sergilemektedir. Yani geceleri aksam saat 6 ve sabah saat 6 arasında minimum, gündüz öğlen vakti minimumdur. Şekil 51 (a, b ve c) ise sırası ile foF2, hmF2 ve TEC değerlerinin aylara göre değişimini verirken Şekil 52 mevsimsel değişimi sergilemektedir. En yüksek elektron yoğunluğunun Ekim aylarında en düşük yoğunluğun ise Temmuz ayında olduğu görülmüştür. Değişkenliğin en fazla olduğu dönem bahar ve yaz ayları olarak saptanmıştır. Ayrıca elektron yoğunluğunun diğer aylara göre yaz aylarında ve öğlen vakitlerinde en düşük olduğu görülmüştür. Bu durum orta enlemlerde bahar ve yaz aylarında güneş radyasyonuna ilaveten elektron yoğunluğu

değerlerini etkileyen başka etmenlerin olduğunu göstermektedir. İyonosferik dinamiğin bu dönemlerde daha kuvvetli olduğu ve bunun orta enlemlerdeki elektron yoğunluğunu oğlen vakitlerinde azaltıcı yönde olduğunu göstermektedir. 2012-2013 senelerindeki tüm foF2 ve hmF2 veriler görsel olarak incelendiğinde İstanbul enlemlerinde elektron yoğunluğunun dört farklı ana tipde değiştiği belirlenmiştir. Şekil 53'de yukardan aşağı sırası ile gösterilen bu tipler şu şekildedir: 1. Güneş radyasyonu değişimini takip eden tip (solar flux type), 2. Öğlen vakti çöküş gösteren tip (noon depression type), 3. Öğlenden sonra güneş batımına yakın sırt gösteren tip (shoulder type), ve 4. Dalgalı tip (wavy type). Her biri için istatistikler oluşturulmuştur. Şekil 54'da tiplerin sene içerisinde oluşum istatistiklerini görmekteyiz. Görüldüğü üzere Tip 1 ve Tip 3 sene içerisinde birbirleir ile zıt bir değişim segilemektedir. Tip-1 yaz aylarında minimum gösterirken Tip 3 yaz aylarında maksimum göstermektedir. Bu şekil, Tip 2'nin genel olarak diğer tiplere nazaran en seyrek görülen bir tip olduğunu, tüm sene boyunca görülebilen ancak sonbahar aylarında biraz daha fazla görülebilen bir tip olduğu göstermektedir. Dalgalı bir yapı arzeden Tip 4'ün ise her ayda diğerlerine göre en fazla görülen bir tip olduğu ancak yaz aylarında bu tipin oluşmasında da bir artış olduğu görülmektedir. Dolayısıyle mevsimsel olarak baktığımızda Tip 3 ve Tip 4 yaz aylarında en sık görülen bir değişimdir. Kış aylarında ise Tip 1 ve Tip 4 baskın olarak görülmektedir.

Bu çalışmamızın en önemli bulgularından bir tanesi iyonosferik seviyelerinde görülen gravite dalgalarının iyonogramlarda çok net bir şekilde saptanabilmiş olmasıdır. Şekil 55 buna bir örnek göstermektedir. 8/Ekim/2012 tarihinde sabaha karşı gözlenen gravite dalgası bu örnekte U-şeklinde bir sinyal vermektedir ve saat 06:04 UT'de 400 km civarından 06:08 anlarında 300 km civarına indiği görülmektedir. Bu sinyallerin TID (Travelling Iyonospheric Disturbances) geçişine ait olduğu anlaşılmaktadır. TIDlerin iyonosfere manyetosferden veya troposferik seviyelerden geldiği bilinmektedir. Troposferdeki bozucu olayların neden olduğu gravite dalgaları iyonosfere kadar yükselerek bu seviyelerdeki elektron yoğunluğunda değişimlere neden olmaktadırlar. Bu örnekte iki iyonogram arasındaki farkın 4 dakika olduğu dikkate alınırsa, kritik frekans (foF2) 4 dakikalık zaman diliminde 3.5 MHz'den 3 MHz'e düşmüştür. Yani bu olay İstanbul üzerinde elektron yoğunluğunda bir azalmaya neden olmuştur. Şekil 56 ise U-şekli sinyalinin yani gravite dalgalarının sene içerisindeki oluşum sıklığını göstermektedir. Görüldüğü üzere gravite dalgalarının neden olduğu TID'ler iyonosferde en sık yazın Temmuz ve Ağustos aylarında, güzün Aralık ve Ocak aylarında, baharda ise Mart ayında görülmektedir. Bu ilk sonuçlarımızı daha detaylandıracak şekilde çalışmalarımız devam etmektedir. Özellikle kaynağın manyetosferden mi troposferden mi olduğu ileri analizler gerektirmektedir. Görülen bu dalgaların özelliklerini belirlemek de Wavelett tekniği gibi ileri analizlere ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmalarımıza öğrencilerimizle devam etmekteyiz.

Literatürde orta enlemlerdeki elektron yoğunluğunun 3 tip anomali durumu gösterdiği bilinmektedir (Zou vd. 2000). Bunlar: (a) kış anomalisi, (b) yarım-senelik (6-aylık) anomali ve (c) senelik (1 yıllık) anomalidir. Kış anomalisi Aralık ayının öğlen vaktindeki elektron yoğunluğunun, Haziran ayının öğlen vaktindeki elektron yoğunluğundan farklı olması durumunda görülür. Yarım-senelik anomali, ekinoks dönemindeki (Mart ve Eylül) elektron yoğunluğunun solstis zamanlarındaki (Aralık ve Haziran) elektron yoğunluğundan fazla olması durumunda görülür. Senelik anomali ise yaz mevsiminin elektron yoğunluğunun sürekli bir şekilde kış mevsimindeki elektron yoğunluğundan düşük olması durumunu gösterir. Şekil 57 öğlen (mavi, 12:00 lokal zaman) ve gece (siyah, 00:00 lokal zaman) vaktinde İstanbul üzerinde ölçülen elektron yoğunluklarını aylara (a) ve mevsimlere (b) göre karşılaştırmaktadır. Şekilde bu amaç için öğlen ve gece vakitlerindeki foF2 değerleri çizdirilmiştir. Şekli incelediğimizde, İstanbul üzerinde kış anomalisinin hem öğlen hem de gece görülmediğini; yani Aralık ayında öğlen vaktindeki elektron yoğunluğunun Haziran ayında öğlen vaktinde elektron yoğunluğundan fazla olmadığını görmekteyiz. Çok az da olsa Haziran ayındaki elektron yoğunluğu Aralık ayındaki elektron yoğunluğundan fazladır. Gece vakti ise yine bir kış anomalisi görülmemektedir. Yarı-senelik anomali durumu incelendiğinde equinoks aylarındaki (Mart+Eylül) toplam elektron yoğunluğunun solstis aylarındaki (Aralık+Haziran) elektron yoğunluğundan öğlen vakitlerinde az da olsa büyük olduğu, ancak gece vaktinde az da olsa küçük olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyle, bu sonuçlara göre yarı-senelik anomali öğlen vakitlerinde görülmekte, gece vakitlerinde görülmemektedir diyebiliriz. Senelik anomaliye baktığımızda ise toplam kış aylarındaki öğlen vakti elektron yoğunluğu değerleri toplam yaz aylarındaki öğlen vakti elektron yoğunluğu değerlerinden büyüktür. Dolayısıyle senelik anomalinin öğlen vakti elektron yoğunlukluklarında göründüğü söyleyebilriz. Gece vakti elektron yoğunluklarında ise bunun görünmediği çok kuvvetli bir şekilde anlaşılmaktadır. Tablo 4 bu incelemenin sonucunu göstermektedir.

Projemizin iyonosferin İstanbul üzerindeki özelliklerinin incelenmesi kısmınını içeren makale dergiye gönderilmek üzere hazırlanmıştır. Makalemiz EK-3.3'de verilmiş olup, şu anda çalışmamızda yer alan diğer yazarlar tarafından incelenmektedir.

Vaka bazındaki çalışmalara ilaveten, İstanbul üzerindeki iyonosferin jeomanyetk fırtınalar zamanındaki durumunu incelemek için istatistiksel bazda 41 tane en şiddetli manyetik fırtına vakası seçilmiş ve iyonosferin bu vakalar sırasındaki davranışı incelenmiştir. Manyetik fırtına vakaları 2013 ve 2014 yıllarını kapsayan 2 senelik zaman diliminde AE ve Dst indeksleri incelenerek belirlenmiştir. Tablo 6 seçilen bu jeomanyetik fırtına dönemlerini göstermektedir. Şekil 58 seçilen vakalardan bir örnek göstermektedir. Şekilde üstteki iki panel Dst ve AE manyetik indekslerini göstermektedir. Onu takip eden paneller ise sırası ile foF2, hmF2 ve TEC değerleridir. 17 Mart 2013 tarihinde oluşan bu fırtına sabah saat 06:00 UT'de Dst'nin ani

sıçrama fazı ile başlamakta ve aynı zamanda AE 1300 nT'lara çıkmakta olduğu görülür. Onu takip eden saatlerde Dst negatif 150 nT'lere inmekte ve AE ise 1000-1200 nT civarında çalkalanmaktadır. Seçilen 41 vaka içinde en kuvvetli manyetik fırtına ve manyetosferik mikrofırtınadır. Şekil 59'un sol tarafında seçilen 41 vakadan şiddetine göre en şiddetli 5 tanesine ait F2 tabakasının kritik frekansının, foF2 (elektron yoğunluğuna eşdeğer), günlük değişimlerini göstermektedir. Şekilde siyah çizgi he panelin sol köşesinde belirtilen aktif güne ait değişimi, kırmızı çizgi ise sene içerisinde örnek olarak seçilen en sakin güne ait olan değişimi vermektedir. Bu şekilden çok net bir şekilde aktif günlerde elektron yoğunluğunun (veya kritik frekans) akşam vakitlerinden gece yarısına doğru arttığını ve sakin günden çok farklılaştığını görmekteyiz. Şekil 59'ün sağ tarafında ise bu iki güne ait kritik frekans değerlerinin oranlarını (aktif/sakin) olarak vermektedir. Oranın 1'e eşit olması aktif ve sakin gün arasında hiç bir farklılığın olmadığını göstermkedtedir. En büyük oran saat 16:00 UT sonrasında, en düşük oran ise gündüz sabah saat 06:00 UT ile 14:00 UT arasında görülmektedir. Aktif günde, akşam vakitlerinde genelde saat 17:00 UT civarında sakin gündeki elektron yoğunluğu değerlerinin nerede ise 2 katına çıkan değerler görülmektedir. Geceleri manyetik fırtınanın kendini göstermesi ile birlikte iyonosfere/termosfere parçacık akışının olduğu ve Joule ısınmasının arttığı elektron yoğunluğu değerlerinden de anlaşılmaktadır.

Elektron yoğunlukları değişimleri aynı zamanda model sonuçları ile de karşılaştırılmıştır. Şekil 60'in sol tarafındaki grafiklerde IRI ve TIEGCM modellerinin sonuçları iyonozonde verisi üzerine konularak çizdirilmiştir. TIEGCM sonuçları kırmızı, IRI sonuçları mavi ve iyonozonde datası siyah ile çizdirilmiştir. Şekil incelediğinde genel olarak IRI modelinin gözlemlerle daha uyumlu olduğu, TIEGCM modelinin ise gözlemlerden daha düşük değerler verdiği görülür. Modeller ile veri arasındaki oran, yani (Model/Gözlem) modellerin gözlemlerle ne kadar ve ne zamanlar daha iyi uyumlu olduğunu gösterir. Burada uyum gözlemlerin model tahminlerine bölünmesi (gözlem/model) ile belirlenmiştir. Şekil 55'in orta ve sağ kısmında verilen grafikler bu oranı IRI ve TIEGCM modelleri için göstermektedir. Görüldüğü üzere öncelikle en büyük farkların her iki model için de akşam ve gece vakitlerinde oluştuğu söylenebilir. İkinci olarak TIEGCM modelinin gözlemlerden özellikle gece yarısı ve gece yarısını takiben çok düşük değerler verdiği görülür. Oranın 1 olması gözlem ile modelin aynı değeri verdiğini ve uyumun çok iyi olduğunu gösterir. 1'in altındaki değerler için model gözlemden daha aşağı bir değer tahmin etmekte, 1'in üstündeki değerler için ise model gözlemden daha yüksek değerler tahmin etmektedir. Şekilde TIEGCM modelinin bazı fırtına günlerinde, öğleden sonraları akşama doğru yüksek tahmin verdiği görülmektedir (ilk iki panel). Çoğunlukla düşük, gözlemlerin dört birine yakın değerler vermektedir.

Şekil 61 ise modellerdeki farklılığı istatistiksel olarak 41 olay için bar grafik şeklinde vermektedir. Şekilde (a ve b) foF2 için, IRI ve TIEGCM modellerinin maksimum farkların (oran

olarak) görüldüğü zamanları, (c ve d) ise minimum farkların görüldüğü zamanları vermektedir. Şekilden genel olarak 41 vaka incelendiğinde maksimum ve minimum farkların (oran bazında) IRI için TIEGCM'e göre daha düşük olduğu ve gün boyunca herhangi birsaatte görülebildiği, ancak TIEGCM modelinin gözlemlerden daha çok geceleri çok farklı olduğunu söyleyebiliriz.

Elektron yoğunluğundaki değişimler uzun mesafeli ve yer ile uydu arasındaki haberleşmeyi yakından etkilemektedir. Iyonosferin absorblama gücü özellikle gündüz vakitlerinde elektron yoğunluğu arttıkça artmaktadır. GPS uydularının L1 (1575 MHz) ve L2 (1227 MHz) frekans bantlarında kullandığı radyo dalgaları iyonosferdeki elektron dağılımından etkilenmektedir. Sinyallerin absorblanması ve hedefine ulaşamaması özellikle iyonosferik D tabakasının varlığında çok büyük bir olasılıktır. Buna göre Istanbul iyonozonde radarından elde edilen elektron yoğunluğu değişimleri L1 ve L2 bantlarındaki absorblanmanın gündüz öğlen vakitlerinde (Şekil 62), mevsimsel olarak güz ve bahar aylarında, ve güneş aktivitelerinin ve manyetosferik fırtınaların çok olduğu dönemlerde daha çok olduğunu göstermektedir. Buna göre iyonosferik absorblama radyo frekansı arttıkça artmakta, dolayısyle L1 bandındaki absorblama L2 bandına göre daha fazla olmaktadır.

Uzun mesafeli iletişimde ise haberleşmenin kalitesi radyo dalgasının gönderildiği açı ile yakından ters orantılı olarak ilişkilidir. Şekil 63'de haberleşme için gerekli olan MUF (maksimum usable frequency) yani haberleşebilecek en yüksek frekansın değerinin gönderme açısı ve elektron yoğunluğu ile nasıl değiştiğini vermektedir. Gün içinde öğlen vakitlerinde artmakta, geceleri ise düşmektedir. Bu tahmin edilebilir bir sonuçtur. Gönderme açısı arttıkça kaliteli haberleşme için kullanılan frekansın artırılması gerekir. Aksi halde daha düşük bir frekans kullanılırsa sinyalin hedefe ulaşamayacağı veya çok yüksek bir frekans kullanılırsa da uzaya kaçacağı muhtemeldir.

İlk sonuçlarını sunduğumuz iyonosfer ve GPS uygulamaları halen öğrencimizin tez çalışması olarak devam etmektedir.

5. SENTEZ

Bu projede, gerek yer yüzeyinde gerekse uzaydaki uzay sistemler üzerine giderek artan hasar verici etkilere sahip ve yine Dünya üzerinde uzay teknolojilerine olan giderek artan bağımlılık nedeni ile de insan yaşamının kalitesini etkileyen iki ana uzay ortamı tabakasının özelliklerini ve dış etkenlere karşı davranışını üç ayrı bölüm halinde inceledik. Bu tabakalar manyetosfer ve iyonosfer/termosfer tabakalarıdır. Manyetosfer-iyonosfer etkileşimi konusu ise iki ortamın etkileşimine yönelik çalışmaları kapsamıştır. Uzay ortamını birbirinden kesin sınırlarla ayırmak mümkün değildir. Şekil 1'de bu bölgeler ölçeklendirme açısından canlandırabilmek için verilmiştir. Görüldüğü üzere her iki tabaka birbirlerine göre çok büyük mesafelerde yer almaktadırlar. İlk akla gelen soru bu tabakalar birbirleri ile nasıl etkileşim

halinde olabilirler? Bu sorunun en net cevabı Dünya'nın jeomanyetik alanı, jeomanyetik alan çizgileridir. Şekil 64 manyetik kuyruk bölgesi ile iyonosferin etkileşimini canlandırmak için analoji olarak verilmiştir. Şekilde su kovası Dünya'nın manyetik kuyruğunu, kovaya ulaşan boru ucundaki musluk ise Güneş'in manyetik alanının yönünü (IMF Bz), kova içindeki akışkan ise Güneş rüzgârının manyetik akısını, enerjisini, momentumunu ve kütlesini temsil etmektedir. Kovanın alt kısmında ise, kova içine dolan güneş rüzgârına ait manyetik akı/enerji/kitle/momentumun iyonosfere boşalması canlandırılmaktadır. Projemizde de detaylı bir şekilde çalıştığımız üzere, IMF Bz'nin yönüne bağlı olarak kova içine enerji ve manyetik akı gelir veya gelmez veya az gelir çok gelir. IMF Bz'nin güney yönlü olması durumunda kovaya çok fazla manyetik akı ve enerji dolar. Bu enerji kovada yani manyetik kuyrukda birikmekte ve belli bir süre sonra veya anında iyonosfere akmaktadır. İyonosfere akan bu enerji auroralara, Joule ısınmasına, nötral rüzgârda değişikliklere neden olmaktadır (Şekil 65a ve b). IMF Bz güneyli olduğu sürece manyetik kuyrukda biriken enerji, IMF Bz'nin kuzeye döndüğü anda iyonosfere akar. IMF Bz'nin güneyli iken aniden kuzeye dönmesi manyetosferik mikrofırtınanın başlamasını tetikler. Manyetosferik mikrofırtınalar sırasında manyetik kuyruk akımının parçalanır, manyetik enerji parçacıkların kinetik enerjisine dönüşür. Sonuç olarak parçacıklar manyetik kuyruktan ivmelenerek manyetik alan çizgileri boyunca atmosfer/iyonosfere akar. ması ile ortaya çıkar (Şekil 66). İyonosfere akan bu enerjinin bir kısmı iyonosferde harcanırken, bir kısmı da yine manyetik alan çizgileri boyunca iyonosferik elektrik akımlarının vasıtası ile manyetik kuyruğa geri taşınır. Bu hareket esnasında iyonosferik parçacıklar da manyetosfere taşınabilir. Bu şekilde iyonosfer ve manyetik kuyruk manyetik fırtına dönemlerinde etkileşir. Bu etkileşimin derecesini kontrol eden faktör ise Güneş'in manyetik alanının yönüdür, yani IMF Bz'dir. Manyetosferik mikrofırtınalar bir kısım enerjiyi iyonosfere gönderirken bir kısmını da Dünya'a ters yönde plazmoid (plazma balonu) olarak gönderirler. Şekil 62 manyetik kuyruğun bu anlardaki durumunu ve manyetik ve plazma yapısını çizim ile göstermektedir.

Manyetosfer ve iyonosfer tabakalarını birarada tutan, etkileşimine neden olan fiziksel ve dinamik olaylar öncelikle tabakaların genel durumlarının bilinmesini gerektirir. Bu açıdan projemiz çok detaylı bir çalışma ile manyetosfer ve iyonosfer tabakalarının özelliklerini ortaya çıkarmıştır. Çalışmamızda, manyetik kuyruk bölgesi, -60 Re, yani Dünya'nın arka tarafında 60Re uzaklıkta, şimdiye kadar kimsenin incelemediği bir detayda, ARTEMIS uzay uydusu verilerini kullanarak inceledik. Bu bize Ay mesafesinde manyetopozun hareketi, bu hareketi kontrol eden etmenlerin rolleri ve hareketin derecesi konusunda birçok yeni bilgi verdi. Manyetik kuyruk bölgesinin içyapısının manyetik ve plazma vektörleri ile incelenmesi IMF'nin bu bölgeler üzerindeki etkisini belirlemek açısından çok önemli idi.

Manyetik kuyrukdan iyonosfere boşalan enerjinin yarattığı Joule ısınmasını çok detaylı olarak değişik modeller kullanarak inceledik. Joule ısınmasının manyetik fırtınanın fazlarına ve

oluşma sektörüne bağımlılığı ortaya koyduk. Joule ısınmasını belirlemek için direk ölçüm olmadığı gibi kullanılan birçok metod veya model yine ölçümü yapılamayan parametrelere dayanmaktadır. Bu çalışmamızda kullandığımız metod ve modellerin karşılaştırılması bu yüzden çok büyük önem taşımaktadır. En çok kullanılan AE metodunun, örneğin, çok fazla Joule ısınmasına neden olduğu görülmektedir. Çalışmamız bu açıdan modelleri kullanırken Joule ısınması konusunda dikkat edilmesi gereken noktaları öne çıkarmıştır. Bunun yanısıra yine direk metodlarla ölçülemeyen yukarı atmosfer yoğunluğu, nötral rüzgârın değişimi ve Joule ısınmasına olan katkılarını hem modellerin karşılıklı kalibrasyonu hem de uydu verilerine karşı test ederek ortaya koyduk.

Iyonosferin Istanbul uzerindeki değişiminin belirlenmesi ise ilk defa bu kadar yüksek çözünürlüklü gözlemlerle detaylı bir şekilde manyetik fırtına dönemlerinde hem vaka bazında hem de istatistiksel olarak incelenmiştir. Sonuçlar bölgemizdeki haberleşmenin kalitesi konusunda önemli etkilere sahiptir.

Uzay havası modellerinin performansı ancak modellerin detaylı bir şekilde pek çok farklı güneş rüzgârı şartları ve manyetosferik koşullar altında test edilmesi ile artırılabilir. Güvenilir, hassas ve doğru tahminler bu karşılaştırmalar ne kadar çok olursa modeller de o kadar iyileştirilir, eksik yanları tamamlanır, değiştirilir, geliştirilir. Tahminlerin iyileştirilmesi uzay havasının etkilerinden korunmak için gerekli önlemlerin alınmasına fırsat verecek zamanın sağlanması/bilinmesi açısından önemlidir.

Projemizin ulularararası çalışmalardaki yerini irdeleyecek olur isek; ARTEMIS uydusunun Ay mesafesindeki manyetik alan ve plazma hız yapısı ilk defa uluslararası çalışmalarda bu şekilde vektör haritaları ile incelenmiştir. Manyetik kuyruğun güneş rüzgârı hızına karşı ilk defa 20 Re kadar manyetik kuyruk ekseninden saptığı yine bu çalışmamızda gösterilmiştir. BATSRUS modeli ilk defa bu çalışmada Ay mesafesinde gözlemlerle karşılaştırılmıştır. Iyonosfer-manyetosfer etkileşimi kısmında ilk defa CHAMP uydusu verileri ile modellerin kalibrasyonu bu çalışmada yapılmış, öğrencimiz tez çalışmasının bu kısmını yürütmek üzere NASA/GSFC'de bir senelik araştırma için kabul edilmiş ve başarılı bir şekilde tamamlamıştır. Orta enlemlerdeki iyonosferik değişkenlik İstanbul'da bulunan iyonozonde gözlemleri ile detaylı bir şekilde ilk defa çalışılmıştır. Bu çalışma bu bölgede yapılan en detaylı ilk çalışmadır ve bölgemiz üzerindeki haberleşme amaçlı uygulamalarda büyük öneme sahiptir.

Son olarak vurgulamak gerekir ki, projemizin ilk kısmında yürüttüğümüz ARTEMIS uyduları ile manyetik kuyruğun Ay mesafesi bölgelerinde incelenmesi, tüm ileri ülkelerin Ay için düşündükleri Ay görevleri ve Ay çevresi çalışmalar için yol gösterici bir çalışma niteliğindedir. Bu konuda özellikle ülkemizde gelecekte oluşturulacak bir Ay misyonlu uzay uydusu ve uzay çalışmaları için bir başlangıç oluşturmaktadır.

6. SONUÇLAR

Bu projemizde elde ettiğimiz sonuçlarımızı şu şekilde özetleyebiliriz.

1. Ay mesafesinde manyetopozun büyüklüğü ortalama 26 R_e olarak bulunmuştur. Ancak bu değer, güneş rüzgârı ve IMF değerlerine bağlı olarak 39 R_e ile 10 R_e arasında değişebilir. Manyetik kuyruğun şekli daireseldir.
2. Mevcut analitik modellerden Howe and Binsack (1972) modeli, en eski model olmasın arağmen, x=-60 R_e'de manyetopoz sınır tabaka gözlemleri ile çok iyi bir uyum göstermekte, ortalama şartlar altında diğer modellere kıyasla daha iyi sonuç vermektedir.
3. Manyetik kuyruğun Ay mesafesinde kesit şekli IMF B_y zamanlarında üstten ve alttan basık bir elips, IMF B_z zamanlarında ise yanlardan basık bir elip şeklindedir. Kuzeyli IMF durumunda manyetik kuyruk sınır tabakası daha düzenli, türbülansdan uzak ve manyetik alan vektörleri genelde sınıra paraleldir. Güneyli IMF Bz zamanlarında ise daha türbülanslı, manyetik alan vektörleri random ve her yönde ve her büyüklüktedir.
4. Manyetopozun ektrem yarıçap değerleri yani 10 R_e ve 39 R_e, detaylı olarak incelendiğinde bunların çok ekstrem, tipik olmayan güneş rüzgarı ve IMF şartları altında oluştuğu görülür. En düşük yarıçap 10 R_e durumunda, IMF B_z'nin çok kuvvetli bir şekilde kuzeyli IMF B_z'e karşılık geldiği ve aynı zamanda güneş rüzgârının dinamik basıncının çok yüksek olduğu görülür. Bu iki durum küçük manyetopozun oluşması için ideal bir kombinasyondur. Kuzeyli IMF B_z durumunda manyetik birleşmenin o lmaması veya çok zayıf olması ve dinamik basıncın sıkıştırma etkisi nedeni ile manyetik kuyruğun boyutu bu şartlar altında küçülmüştür. Bu durumda güneş rüzgârın abkıldığında da bir CME'nin olduğu görülür.
5. Ekstrem olan diğer manyetopoz yarıçapı, 39 R_e, ise ARTESMIS tarafından kaydedilen en büyük manyetopoz yarıçapıdır. Buna karşı gelen güneş rüzgârı dinamik basıcnı incelenirse çok düşük olduğu görülür. IMF B_z her nekadar pozitif olsa da şiddetinin küçüklüğü, dinamik basıncın etkisi daha ön plana çıkarmıştır. Dinamik basıç etkisi ile manyetopoz daha büyük bulunmuştur. Dolayısıyle manyetopozun veya manyetik kuyruğun ay mesafesindeki büyüklüğünü veya yarıçapını IMF B_z nin yönü ve değeri ile dinamik basıncın değeri kontrol etmektedir. Manyetik kuyruk güneş rüzgârındaki ani değişikliklere anında karşılık veremez. Dolayısıyle dinamik basıncın veya IMF B_z'nin ne kadar süre ile aynı değerler de kaldığı da önemli bir faktördür. Yani manyetosferik hafıza son durum için önemlidir.
6. Manyetopoz yarıçapı için ortalama güneş rüzgârı şartları altında Lu vd. (2011) ve Howe ve Binsack (1972) modelleri, gözleme en yakın modeller olarak bulunmuştur. Howe ve Binsack (1972) modeli ortalama şartlar için gözleme yakın sonuçlar vermesine rağmen statik bir model olması nedeni ile ektrem şartlar altında gözlemden çok uzak değerler vermektedir. Model ortalama güneş rüzgârı şartları altında hala kullanılabilir durumdadır.

7. Ekstrem manyetopoz noktaları için ise en küçük manyetopoz yarıçapını en iyi Lu vd. (2011) modeli tahmin etmiştir. Bunu takiben Shue vd. (1997) ve Shue vd. (1998) modelleri gözleme yakın değerler vermişlerdir. En kötü performansı Howe ve Binsack modeli vermiştir. En büyük manyetopoz mesafesinin tahminin de ise en iyi performansı Lu vd. (2011) ve Chao vd. (2002) modeli vermiştir. Yine bu durumda en kötü performans Howe ve Binsack (1972) modeli tarafından tahmin edilmiştir. Howe ve Binsack (1972) modelinin ektrem durumlarda kötü performans sergilemesi beklenen bir sonuçtur. Bu model statik bir modeldir. Yani güneş rüzgârı ve IMF'nin değişken şartlarını karşılyamamaktadır. Lu vd. (2011) modeli ise farklı pek çok IMF ve güneş rüzgârı şartları altında çalıştırılmış MHD modeli sonuçlarından elde edilmiştir. Gerçeği daha iyi yansıttığından her iki ekstrem durumda da gözleme yakın sonuçlar tahmin etmiştir.
8. Manyetik kuyruğun manyetik yapısı x=-60 R_e'de halen dipol özelliğini korumaktadır. IMF By etkileri net bir şekilde manyetik alan vektörlerinde görülememektedir.
9. Ay mesafesinde (x=-60 R_e) parçacık hızlarının egemen olarak Dünya'dan uzaklaşacak şekilde olduğunu görmekteyiz.
10. Ay mesafesinde manyetik kuyruk içinde yoğunluk-sıcaklık ilişkisine bakarak üç tip plasma grubu görülmektedir: soğuk-yoğun, sıcak-az yoğun ve ikisi ortası değerler.
11. BATSRUS modeli ARTEMIS manyetik alan ve hız vektörleri karşılaştırıldığında gözlemlere göre çok büyük değerler vermektedir.
12. Literatürde en çok kullanılan AE indeks metodu çok yüksek Joule ısınması değerleri vermektedir. MHD modeli BATSRUS ve SuperDARN radar eşleşmesi en uygun Joule ısınması değerlerini vermektedir.
13. Yukarı Atmosfer uydusu CHAMP yoğunluk verisine en uygun model JB2008 modeli bulunmuştur.
14. Altı manyetik fırtına olayına dayanarak toplam Joule ısınması ve toplam nötral yoğunluklar arasında düzgün doğrusal bir ilişki olduğu bulunmuştur. Daha fazla olay eklenerek aralarındaki istatistik ilişki daha iyi belirlenebilecektir.
15. Nötral rüzgârın Joule ısınmasına etkisi artırıcı yönde görülmektedir.
16. Nötral rüzgârın Joule ısınması değerlerine katkısının geri dönme fazında en yüksek olduğu bulunmuştur.
17. GITM modeli CTIPe ve TIEGCM ile karşılaştırıldığında en yüksek Joule ısınması tahmini vermektedir.
18. 6 vaka ile sınırlı bir şekilde yürütülen istatistiki sonuçlarımız nötral yoğunlukların Kp ile direk ilişki bulunamamıştır. Buna karşılık Joule ısınması ile nötral yoğunluk değişimleri arasında doğru ilişki elde edilmiştir. Bu sonuç nötral yoğunluğun Joule ısınması indisinin

oluşturulmasında kullanılabileceğini ve Joule ısınması için bir tahmin verebileceğini göstermektedir.

19. İstanbul üzerindeki elektron yoğunluğu ve foF2 sene boyunca dört tip değişkenlik sergilemektedir.
20. En yüksek elektron yoğunlukları güz ve bahar aylarında görülmektedir. Yaz aylarında beklenenin tersine düşük elektron yoğunlukları görülmektedir. Elektron yoğunluğunun gün içinde dağılımında öğlen vaktinde sık sık çöküş görülmektedir.
21. Gravite dalgalarının sinyalleri çok net bir şekilde iyonogramlarda görülmektedir ve genel olarak yaz aylarında bu dalgaların görülme sıklığı artmaktadır.
22. Kış anomalisi İstanbul üzerinde görülmemektedir. Yarı-senelik anomali öğlen elektron yoğunluklarında görülebilir. Ancak gece elektron yoğunluklarında yoktur. Senelik anomali ise gündüz görülebilirken, geceleri çok şiddetli bir şekilde yoktur.
23. Iyonosferik modellerle (IRI-TIEGCM) karşılaştırıldığında modellerle gözlemlerin en çok gece vakitlerinde uyumsuz oldukları gözlenmiştir. Bu dönemler manyetik fırtınaların şiddetli olduğu zamanlardır. Dolayısıyle her iki modelin de manyetik aktivite etkilerini iyi modellediği söylenemez.
24. Elektron yoğunluğunun artışı GPS uydularının haberleşmede kullandığı L1 ve L2 bandlarındaki frekansları etkilemektedir. Elektron yoğunluğunun çokluğu bu frekanslardaki absorblamanın artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyle manyetik fırtına dönemleri bu uydularla haberleşme açısından uygun dönemler değildir.

7. ÖNERİLER

Her biri bir yüksek lisans ve doktora öğrencimizin tez çalışması olarak planlanan ve başlayan projemiz uzay ortamının özelliklerini ve değişkenliklerini anlamamıza yönelik önemli sonuçlar sunmuştur. Ancak her üç grupta da model karşılaştırması çalışmalarının istatistiksel olarak biraz daha artırılması uzay havası modellerinin performansını artırmaya yardımcı olacaktır. Bu sonuç raporumuzda sunduğumuz çalışmalarımız doğal olarak geliştirmeye açık, ilk sonuçları kapsamaktadır. Çalışmalarımız pek çok genel ve spesifik noktaya açıklık getirdiği gibi yeni soruların oluşmasına da neden olmuştur. Bunların bir kaçını şu şekilde listelemek mümkündür:

1. Manyetik kuyruğun şeklinin ve büyüklüğünün belirlenmesinde IMF Bz ve dinamik basıncın etkin rollerinin hangi şartlar altında nasıl değiştiğinin belirlenmesi. Manyetik kuyrukda mesafe ile bu etkinin nasıl değiştiği. Manyetopoz modellerinin Ay mesafesinde iyileştirilmesi. Manyetik flaring açısının modeller içerisindeki yerinin belirlenmesi. Manyetik kuyruğun flaring açısının mesafe ile değişiminin belirlenmesi. IMF By ve IMF Bz'nin manyetopozun şekli üzerine etkinin ileri analiz teknikleri ile araştırılması. Manyetopoz sınır

tabakasının süreklilik tipinin belirlenmesi. Manyetik kuyruğun şekli üzerine manyetik fırtınaların etkisinin belirlenmesi.

2. Nötral rüzgarın Joule ısınması üzerine etkisini modeler içinde belirleyen faktörlerin detaylı incelenmesi. Modellerin başarısız oldukları noktaların detaylı karşılaştırması. Joule ısınmasını uzay havası tahmininde parameter olarak kullanılmasına yönelik çalışmalar.
3. Iyonoferdeki gravite dalgalarının kaynağının belirlenmesine yönelik çalışmalar.

8. TEŞEKKÜR

Projemizin yürütülmesinde kolaylıklar gösteren, her türlü bürokraside yardımcı olan İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Dekanlık yetkilileri, İTÜ Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi Meteoroloji Mühendisliği Bölümü yetkilileri ve İTÜ Rektörlüğü Araştırma Birimi yetkililerine teşekkür ederiz.

YAYIN ÇALIŞMALARI

I. TEZLER

a. Yüksek Lisans tezi (Tamamlanmış)

Moral, A. C. 2014. "Ionospheric Variability over Istanbul Using SID-VLF and HF radar Observations", İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Meteoroloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Atmosfer Bilimleri Programı.

b. Yüksek Lisans tezi (Devam ediyor)

Erbaş, B. N. 2015-halen. "Ionosphere and GPS communications during magnetic storms", İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Disiplinlerarası Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı (DAP).

c. Doktora tezi (Devam ediyor)

Kalafatoğlu, E. C. 2012-halen. "A comprehensive Study of Stormtime Joule Heating using Observations and Coupled Space WeatherModels". İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, MeteorolojiMühendisliği Anabilim Dalı, Atmosfer Bilimleri Programı.

d. Doktora tezi (Devam ediyor)

Akay, I. G. 2013-halen. "Magnetotail Shape, Flow and Magnetic Field Structure at Lunar Distances: ARTEMIS Observations and Model Comparisons", İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Disiplinlerarası Uçak ve Uzay Mühendisliği Programı (DAP).

II. MAKALE ÇALIŞMALARI:

a) Aşağıdaki yayınlar ilk versiyonu tamamlanmış olup makalenin proje dışındaki yazarlarına gönderilmiştir:

EK-3.1: Akay, I.G., Kaymaz Z., Sibeck D.G., Angelopoulos V. "Magnetotail Boundary Crossings at Lunar distances: ARTEMIS Observations".

EK-3.2: Eyigüler, ECK, Kaymaz Z., Frissell N., Ruohoniemi J.M., Su Y.-J. "Investigating Upper Atmospheric Joule heating using cross-combination of data for two moderate substorm cases".

EK-3.3: Kaymaz, Z., Moral A.C., Eyigüler E.C.K., Zabotin N., Livingston R., Bullet T.B. "Temporal variability of ionosphere over İstanbul,Turkey".

b) Aşağıdaki dergi yayınları için halen üzerinde çalışmaktayız:

1. Neutral wind comparisons using ionospheric models, Kalafatoğlu vd
2. Model calibration using CHAMP neutral density observations, Kalafatoğlu vd
3. Ionospheric Structure at mid latitudes during magnetic storms: Statistical Investigation and GPS applications, Erbaş vd

III. KONFERANS YAYINLARI VE SUNUMLARI:

Moral, A.C., Kaymaz Z., Katırcıoglu F.T., Sibeck D.G. 2013. "Structure of the Plasma Depletion Layer: Statistical Results from Multi-spacecraft", European Geosciences Union General Assembly 2013, EGU2013, April 7-12, 2013, Vienna, Austria.

Akay, I.G., Kaymaz Z., Sibeck D.G., Angelopoulos V. 2013. "On the shape of the Geomagnetic Tail at Lunar distances: Preliminary Resuts from ARTEMIS Observations"**,** European Geosciences Union General Assembly 2013, EGU2013, April 7-12, 2013, Vienna, Austria.

Eyigüler, E.C.K., Kaymaz Z. 2013. "On the Role of Hall and Pedersen Conductivities in Determination of Ionospheric Joule Heating", European Geosciences Union General Assembly 2013, EGU2013, April 7-12, 2013, Vienna, Austria.

Moral, A.C., Eyigüler E.C.K., Kaymaz Z. 2013. "Sudden Ionospheric Disturbances And Their Detection Over Istanbul", 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2013), June 12-14, 2013, İstanbul, Turkey.

Eyigüler, E.C.K, Kaymaz Z. 2013. "Neutral Wind Comparisons during Substorms using TIEGCM and GITM Models", 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2011), June 12-14, 2013, İstanbul, Turkey.

Akay, I.G., Kaymaz Z., Sibeck D.G. 2013. "Magnetotail Shape at Lunar Distances: ARTEMIS Observations", 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2013), June 12-14, 2013, İstanbul, Turkey.

Moral, A.C., Kaymaz Z., Kalafatoğlu E.C., Zabotin N., Bullett T. 2013. "Variations In Mid-Latitude Ionospheric Elektron Density: İstanbul Dynasonde Observations", CAWSES-II meeting, Nov 18-22, 2013, Nagoya, Japan.

Moral, A.C., Kaymaz Z., Zabotin N. 2014. "Gravity Wave Signatures as Determined by Istanbul Dynasonde Observations", EGU 2014, April 27-May 02, 2014, Vienna, Austria

Moral, A.C., Kalafatoğlu E.C., Kaymaz Z. 2014. "Midlatitude Elektron Density Variations Under Magnetospheric Substorm Conditions As Determined From Istanbul Dynasonde Observations", AOGS 2014, July 28-Aug 01, 2014, Sapporo, Japan.

Eyigüler, E.C.K., Shim J., Kuznetsova M., Kaymaz Z. 2014. "Towards a new metric for satellite drag studies", CCMC Workshop, March 31-April 4, 2014, Annapolis, Maryland, USA.

Eyigüler, E.C.K., Shim J., Kuznetsova M., Kaymaz Z. 2014. "Quantifying the Storm Effects on the Modeled Neutral Density Variations on the CHAMP Satellite Track: Progress since the Mini-GEM", SWW 2014, April 08-11, 2014, Boulder, Colorado, USA.

Eyigüler, E.C.K., Shim J., Kuznetsova M., Kaymaz Z. 2014. "Quantitative Assessment of the Storm Time Performances of IT Models for the Orbit Averaged Neutral Densities on CHAMP orbit", CEDAR Workshop 2014, June 22-26, 2014, Seattle, Washington, USA.

Eyigüler, E.C.K., Kaymaz Z., Moral A. C., Çağlar R. 2015. "Geomagnetically Induced Current (GIC) Observations of Geomagnetic Storms in Turkey", 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2015), June 16-19, 2015, İstanbul, Turkey.

Akay, I.G., Kaymaz Z., Sibeck D.G., Angelopoulos V. 2015. "Investigating Magnetic Field Structure at Moon Distance: A Single Pass Example", 7th International Conference on Recent Advances in Space Technologies (RAST 2015), June 16-19, 2015, İstanbul, Turkey.

Eyigüler, E.C.K., Kaymaz Z. 2015. "Quantitative assessment of the neutral wind contribution to Joule heating during geomagnetic storms", Geospace Environment Modelling, 14-19 June 2015, Snowmass, Colorado.

Eyigüler, E.C.K., Kaymaz Z. 2015. 2015. "Quantitative assessment of the neutral wind contribution to Joule heating during geomagnetic storms", CEDAR, 21-25 June 2015, Seattle, Washington.

Akay, I.G., Kaymaz Z., Sibeck D., Angelopoulos V. 2015. "Plasma flow structure at Lunar distances", AGU, Dec. 14-18 2015, San Fransisco, California.

Akay, I.G., Kaymaz Z., Sibeck D., Angelopoulos V. 2016. "Variations in Plasma Parameters at Lunar Distances Using ARTEMIS Observations", GEM, June 19-24, 2016, Santa Fe, New Mexico.

Erbas, B., Kaymaz Z. 2017. "Ionospheric elektron density variations over İstanbul during geomagnetically disturbed times", AOGS, 31 July-5 August 2017, Singapore, sözlü sunum kabul edildi.

---

30 Temmuz - 7 Ağustos 2016 tarihleri arasında İstanbul'da yapılması planlanan COSPAR2016 toplantısına aşağıda verilen çalışmalar, 2 tanesi Davetli olmak üzere sözlü olarak sunulmak üzere kabul edilmişlerdir. Ancak toplantı maalesef iptal olmuştur.

Akay, I.G., Kaymaz Z., Sibeck D., Angelopoulos V. 2016. **"**Mapping the plasma structure of the central magnetotail using ARTEMIS Observations**",** COSPAR 2016, July 30-August 7, 2016, Istanbul, Turkey. (**Invited Talk**).

Eyigüler, E. C. K., Kaymaz Z. 2016. "Joule Heatıng As A Signature Of Magnetosphere-Ionosphere-Thermosphere Coupling", COSPAR 2016, July 30-August 7, 2016, Istanbul, Turkey. **(Invited Talk).**

Eyigüler, E. C. K., Kaymaz Z., Moral A. C. 2016. "Observation of Sudden Ionospheric Disturbances Over İstanbul in Response To X-Ray Flare Events", COSPAR 2016, July 30-August 7, 2016, Istanbul, Turkey.

Kaymaz, Z., Moral A. C., Eyigüler E. C. K., Katircioglu F. T., Zabotin N. 2016. **"**An overview of ionospheric elektron density variations over Istanbul", COSPAR 2016, July 30-August 7, 2016, Istanbul, Turkey.

Kaymaz, Z., 2016. "Space weather studies at Istanbul Technıcal University", COSPAR 2016, July 30-August 7, 2016, Istanbul, Turkey.

Akay, I.G., Kaymaz Z., Sibeck D., Angelopoulos V. 2016. "MHD models compared wıth ARTEMIS observations at -60 Re", COSPAR 2016, July 30-August 7, 2016, Istanbul, Turkey.

Erbas, B. N., Kaymaz Z., Eyigüler E. C. K., Moral A. C. 2016. "Ionospheric elektron density variations over İstanbul during geomagnetically disturbed times and GPS implications", COSPAR 2016, July 30-August 7, 2016, Istanbul, Turkey.

KAYNAKLAR

Agopyan, H. 1994. “Magnetic and Ionospheric Storms in IST: An Observational Review”, Journal of the Chamber of Geophysical Egineers of Turkey, 8, 2, 105-121, ISSN 0259-1472.

Agopyan, H. 2002. “Severe magnetic storm effects on the ionosphere over Istanbul: a case study”, Annals of Geophysics, 45, 621-628.

Ahn, B. H., Kroehl H. W., Kamide Y., Gorney D. J. 1989. “Estimation of ionospheric electrodynamic prameters using ionospheric conductance deduced from Bremsstrahlung X-ray image data”, Journal of Geophysical Research, 94, 2565–2586.

Aikio, A. T., Selkälä A. 2009. “Statistical properties of Joule heating rate, electric field and conductances at high latitudes”, Annanles Geophysicae, 27, 2661–2673.

Arikan, F., Arikan O., Erol C. B. 2007. “Regularized estimation of TEC from GPS data for certain midlatitude stations and comparison with the IRI model”, Advances in Space Research 39, 867-874.

Behannon, K. W. 1968. “Mapping of the Earth's bow shock and magnetic tail by Explorer 33”, Journal of Geophysical Research, 73, 907–930.

Behannon, K. W. 1970. “Geometry of the geomagnetic tail”, Journal of Geophysical Research, 75, 743–753.

Britanica. 2017. https://www.britannica.com/science/geomagnetic-field/, Accsess: 2 Mayıs 2017.

Can, Z., Gümrükçü O. 2009. “İyonosfer ile GPS Sinyallerinin Etkileşimi”. İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 8, 69-77.

Cao, X., Pu Z. Y., Du A. M., Tian X. G., Wnag C. J., Xiao H. U., Frey M. V., Kubyshkina V. M., Mishin S. Y., Fu L. X., Zong Q. G. 2012. Auroral streamers implication for the substorm progression on September 14, 2004”, Planetary and Apsce Science 71, 1, 119-124.

Chao J. K., Wu D. J., Lin C. -H., Yang Y. -H., Wang X. Y., Kessel M., Chen S. H., Lepping R. P. 2002. “Models for the size and shape of the Earth’s magnetopause and bow shock”, paper presented at 2000 COSPAR Colloquium on Space Weather Study: Using Multi-Point Techniques, Comm.on Space Res., Wanli, Taipei.

Codrescu, M. V., Fuller-Rowell T. J., Foster J. C. 1995. “On the importance of E-field variability for Joule heating in the high-latitude thermosphere”, Geophysical Research Letters, 22, 2393-2397.

COMET-Meted. 2017. https://www.meted.ucar.edu/, Access: 2 Mayıs 2017

Cowley, S. W. H. 1981. “Magnetospheric asymmetries associated with the Y-component of the IMF, Planetary Space Sciences, 29, 79-96.

Deng, Y., Ridley A. J. 2007. “Possible reasons for underestimating Joule heating in global models: E field variability, spatial resolution, and vertical velocity”, Journal of Geophysical Research, 112, A09308.

Deng, Y., Maute A., Richmond A. D., Roble R. G. 2009. “Impact of electric field variability on Joule heating and thermospheric temperature and density”, Geophysical Research Letters, 36, L08105, doi: 10.1029/2008GL036916.

Fairfield, D. H. 1968. “Simultaneous measurements on three satellites and the observation of the geomagnetic tail at 1000 RE.", Journal of Geophysical Research, 73, 6179-6194.

Fedrizzi, M., Fuller-Rowell T. J., Codrescu M. V. 2012. “Global Joule heating index derived from thermospheric density physics-based modeling and observations”, Space Weather, 10, n/a-n/a. doi:10.1029/2011SW000724.

Geoscienceletter. 2017. http://www.issibern.ch/teams/scw/Proposal.htm Access: 2 Mayıs 2017

Gosling, J. T., Thomsen M. F., Bame S.J., Elphic R. C., Russell C. T. 1991. “Plasma flow reversals at the dayside magnetopause and the origin of asymmetric polar cap convection”, Journal of geophysical Research, 95, 8073-8084.

Gringauz, K. I., Bezrukikh V. V., Khokhlov M. Z., Musatov L. S., Reminzov A. R. 1966. "Signs of crossing by the moon of the earth's magnetosphere tail according to data of charged particle traps on the first artificial satellite of the moon", Doklady Akad. Nauk. USSR Geofizika, 170, 570-573.

Howe, H. C. Jr., Binsack J. H. 1972. “Explorer 33 and 35 plasma observations of magnetosheath”, Journal of Geophysical Research, 77, 3334-3344.

Kamide, Y., Richmond A. D. and Matsushita S. 1981. 1Estimation of ionospheric electric fields, ionospheric currents, and field-aligned currents from ground magnetic records”, Journal of Geophysical Research, 86, A2, 801, doi:10.1029/JA086iA02p00801.

Kamide, Y., Ahn B. -H., Akasofu S. -I., Baumjohann W., Friis-Christensen E., Kroehl H. W., Maurer H., Richmond A. D., Rostoker G., Spiro R. W., Walker J. K. and Zaitzev A. N. 1982. “Global distribution of ionospheric and field-aligned currents during substorms as determined from six IMS meridian chains of magnetometers: Initial results”, Journal of Geophysical Research, 87, A10, 8228, doi:10.1029/JA087iA10p08228.

Kawano, H., Petrinec S. M., Russell C. T., Higuchi T. 1999. “Magnetopause shape determinations from measured position and estimated flaring angle”, Journal of Geophysical Research, 104, 247–261.

Kaymaz, Z. 2016. “Magnetospheric Substorms and Upper Atmosphere”, Lecture Notes on Space Envrionment, Chapter 3.

Kaymaz, Z., Siscoe G., Luhmann J. G. 1992. “IMF draping around the geotail - IMP 8 observations”, Geophysical Research Letters, 19, 1992, 829-832.

Kaymaz, Z., Siscoe G. L., Luhmann J. G., Lepping R. P., Russell C. T., 1994.“Interplanetary magnetic field control of magnetotail magnetic field geometry: IMP 8 observations”, Journal of Geophysical Research**,** 99**,** 11113-11126.

Lin, C. H., Liu C. H., Liu J. Y., Chen C. H., Burns A. G., Wang W. 2010. **“**Midlatitude summer nighttime anomaly of the ionospheric elektron density observed by FORMOSAT-3/COSMIC”, Journal of Geophysıcal Research, 115, A03308.

Liuzzo, L.R., Ridley, A. J., Perlongo, N. J., Mitchell, E. J., Conde, M., Hampton, D. L., Bristow, W. A., Nicolls, M. J. 2015. “High-latitude ionospheric drivers and their effects on wind patterns in the thermosphere” Journal of Geophysical Research, 120, 715–735. doi:10.1002/2014JA020553.

Lu, G., Baker D. N., McPherron R. L., Farrugia C. J., Lummerzheim D., Ruohoniemi J. M., Rich F. J., Evans D. S., Lepping R. P., Brittnacher M., Li X., Greenwald R., Sofko G., Villain J., Lester M., Thayer J., Moretto T., Milling D., Troshichev O., Zaitzev A., Odintzov V., Makarov G., Hayashi K. 1998. “Global energy deposition during the January 1997 magnetic cloud event”, Journal of Geophysical Research, 103, 11685–11694.

Lu, J. Y., Liu Z.-Q., Kabin K., Zhao M. X., Liu D. D., Zhou Q., Xiao Y. 2011. “Three dimensional shape of the magnetopause: Global mhd results”, Journal of Geophysical Research, 116, 3113-3125**.**

Lühr, H. ve Marker S., 2013. “High-latitude thermospheric density and wind dependence on solar and magnetic activity”, Climate and Weather of the Sun-Earth System (CAWSES) Springer Netherlands, 189-205.

Mariani, F., Ness N. F. 1969. "Observations of the geomagnetic tail at 500 earth radii by Pioneer 8", Journal of Geophysical Research*,* 74, 5633-5641.

Matsuo, T. ve Richmond, A. D. 2008. “Effects of high-latitude ionospheric electric field variability on global thermospheric Joule heating and mechanical energy transfer rate”, Journal of Geophysical Research, 113, A7, doi:10.1029/2007JA012993.

Mendillo, M. 2006. “Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content.”, Reviews of Geophysics, 44, 4.

Mihalov, J. D., Colburn D. S., Currie R. G., Sonett C. P. 1968. “The geomagnetic tail”, Journal of Geophysical Research, 73, 943–959.

Ness, N. F. 1967. "Remarks on the interpretation of Lunik 10: magnetometer results.", NASA AccessNo:N67-16551 (X67-35965), NASA GFSC, Greenbelt.

Ness, N. F., Behannon K. W., Cantarano S. C., Scearce C. S. 1967, “Observations of the Earth's magnetic tail and neutral sheet at 510,000 kilometers by Explorer 33”, Journal of Geophysical Research, 72, 1967, 927–933.

Ness, N. F., 1969.The geomagnetic tail, Reviews of Geophysics, 7, 97–127.

Ozguc, A., T. Atac, Y. Tulunay, L. Stanislawska. 1998. “The ionospheric foF2 data over Istanbul and their response to solar activity for the years 1964-1969 and 1993”, Studia Geophysica et Geodaetica**,** 42, 112-118.

Østgaard, N. 2002. “Energy analysis of substorms based on remote sensing techniques, solar wind measurements, and geomagnetic indices”, Journal of Geophysical Research, 107, SMP 9-1–SMP 9-14.

Palmroth, M., Janhunen P., Pulkkinen T. I., Aksnes A., Lu G., Østgaard N., Watermann J., Reeves G. D., Germany G. A. 2005. “Assessment of ionospheric Joule heating by GUMICS-4 MHD simulation, AMIE, and satellite-based statistics: towards a synthesis”, Annales Geophysicae, 23, 2051–2068.

Park, Y. -K., Kwak Y. -S., Ahn B. -H., Park Y. -D., Cho I. -H. 2010. “Ionospheric F2-Layer Semi-Annual Variation in Middle Latitude by Solar Activity”, Journal of Astronomy and Space Sciences, 27, 319-327.

Petrinec, S. M. and C. T. Russell. 1996. Near-Earth magnetotail shape and size as determined from the magnetopause flaring angle, Journal of Geophysical Research, 101, 137-150.

Richmond, A. D., Kamide Y., 1988. “Mapping electrodynamic features of the high-latitude ionosphere from localized observations: Technique”, Journal of Geophysical Research, 93, 5741-5755.

Ridley, A. J., Gombosi T. I., Dezeeuw D. L. 2004. “Ionospheric control of the magnetosphere: conductance”. Annales Geophysicae, 22, 567–584. doi:10.5194/angeo-22-567-2004

Rishbeth, H., Müller-Wodarg C. F., Zou L., Fuller-Rowell T. J., Millward G. H., Moffett R. J., Idenden D. W., Aylward A. D. 2000. “Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion”, Annales Geophysicae, 18, 945-956.

Ruohoniemi, J. M. ve Baker K. B. 1998. “Large-scale imaging of high-latitude convection with Super Dual Auroral Radar Network HF radar observations”, Journal of Geophysical Research, 103, A9, 20797–20811, doi:10.1029/98JA01288.

Shue J. H., Chao J. K., Fu H. C., Russell C. T., Song P., Khurana K. K., Singer H. J. 1997. “A new functional form to study the solar wind control of the magnetopause size and shape”, Journal of Geophysical Research**,** 102, 9497-9507.

Shue J.-H., Song P., Russell C. T., Steinberg J. T., Chao J. K., Zastenker G., Vaisberg O. L., Kokubun S., Singer H. J., Detman T. R., Kawano H. 1998. “Magnetopause location under extreme solar wind conditions, Journal of Geophysical Research, 103, 17,691-17,705.

Sibeck, D. G., Lin R.Q. 2014. “Size and shape of the distant magnetotail”, Journal of Geophysical Research, 119, 1028–1043

Sibeck, D. G., Lopez R. E., Roelof E. C. 1991. "Solar wind control of the magnetopause shape, location, and motion.", Journal of Geophysical Research, 96, 5489-5495.

Sibeck, D. G., Slavin J. A., Smith E. J., Tsurutani, B. T. 1986. “Twisting of the geomagnetic tail”, Solar Wind-Magnetosphere Coupling, Editörler: Kamide, Y., Slavin, L. A., Germany:Dordrecht-Kluwer**.**

Slavin, J. A. 1998. “Travelling compression regions”, New Perspectives on the Earth’s Magnetotail, Editörler: Baker D. N., Nishida A., Cowley S. W. H., Washington D. C.:AGU.

Slavin, J. A. Owen C. J., Hesse M. 1994. “The evloution of the plasmoids-lobe interaction with downtail distance”, Geophysical Research Letters, 21, 2,765-2,769.

Slavin, J. A. Smith M. F., Mazur E. L., Baker D. N., Iyemori T., Greenstadt. 1993. “ISEE 3 observations of travelling compression regions in the Earth’s magnetotail”, Journal of Geophysical Research, 98, 15,425-15,438.

Shodhan, S., Siscoe G. L., Frank L. A., Ackerson K. L., Paterson W. R. 1996. “Boundary oscillations at Geotail: Windsock, breathing, and wrenching”, Journal of Geophysical Research, 101, 2577–2586.

Thayer, J. P. 1998. “Radar measurements of the electromagnetic energy rates associated with the dynamic Ionospheric load/generator”, Geophysical Research Letters, 25, 469-474.

U*nver*, O., ve *Can* Z. 2011. "Determination of Total Electron Content through *GPS* Signals", Balkan Physics Letters (BPL), 19, 153-160.

Wilson, G. R., Weimer D. R., Wise J. O., Marcos F. A. 2006. “Response of the thermosphere to Joule heating and particle precipitation”, Journal of Geophysical Research, 111, 1–9.

Zhang, X. X., Wang, C., Chen, T., Wang, Y. L., Tan, A., Wu, T. S., Germany, G. A. Wang, W. 2005. “Global patterns of Joule heating in the high-latitude ionosphere”, Journal of Geophysical Research, 110, 1–22.

Zou, L., Rishbeth H., Müller-Wodarg I.C.F., Aylward A.D., Millward G.H., Fuller-Rowell T.J., Idenden D.W., Moffett R.J. 2000. “Annual and Semiannual variations in the ionospheric F2 layer: I. Modelling”, Annales Geophysicae, 18, 927-944.

EKLER

EK 1. TABLOLAR

Tablo 1. Bu çalışmada kullanılan manyetopoz modelleri ve bazı özellikleri.

	HB72	S97	S98	CH02	LU11
Magnetopause distance (r)	$r = 23.9 \tan^{-1}\left(\frac{10 - X}{15.9}\right)^{1/2}$	$r = r_o \left(\frac{2}{1 + \cos\theta}\right)^{\alpha}$	$r = r_o \left(\frac{2}{1 + \cos\theta}\right)^{\alpha}$	$r = r_o \left(\frac{2}{1 + \cos\theta}\right)^{\alpha}$	
Time delay		Fixed (average)	Fixed (average)	instant	
Aberration for Earth's motion		Yes	Yes	Yes	
Mpause Data		ISEE 1 and 2 AMPTE/IRM IMP8	ISEE 1 and 2 AMPTE/IRM IMP8	ISEE 1 and 2 AMPTE/IRM IMP8	MHD model
Upstream Data		IMP 8 / ISEE 3	IMP 8 / ISEE 3	IMP 8 / ISEE 3	
Symmetric/ asymmetric		Symmetric about solar wind vector Thus circle	Symmetric about solar wind vector Thus circle	Symmetric about solar wind vector Thus circle	Asymmetric

Tablo 2. Modellerin manyetopoz yarıçapı (R) tahminleri (R_e olarak) ve % hataları. E-1 ve E2, sıra ile, 25/Ocak/2013 vakası ile 28/Ağustos/2012 vakasını göstermektedir.

	ARTEMIS	HB72		S97		S98		C02		L11	
	Ortalama/ Medyan	R	%	R	%	R	%	R	%	R	%
Genel	26.3 / 26,6	26.50	7.60	27.90	8.30	27.70	8.60	28.10	8.90	26.30	7.60
E-1	10	27.00	7.16	15.80	5.97	18.10	8.50	20.00	1.21	12.70	2.76
E-2	39	25.40	3.56	36.70	2.52	34.60	4.38	39.80	0.60	37.80	1.18

Tablo 3. Modellerin manyetopoz tahminlerindeki performansları.

Good	Average	1	2
	HB, L11	L11	C02
	S97	S97	L11
	S98	S98	S97
	C02	C02	S98
Poor		HB72	HB

Tablo 4. İstanbul üzerindeki iyonosferik elektron yoğunluğunda görülen anomaliler.

Anomaly	Definition (if)	Noontime foF2	Midnight foF2	Noontime	Midnight
Winter	Dec > June (daytime) Disappears at night	7.2 < 7.3	3.3 < 6.4	NO	NO
Semi Annual	Equinox: March and Sept > Soltice: Dec and Jun.	17.0 >14.5	9.1 < 9.7	YES	NO
Annual	Winter > Summer	7.9 >7.1	3.6 < 6.1	YES	NO

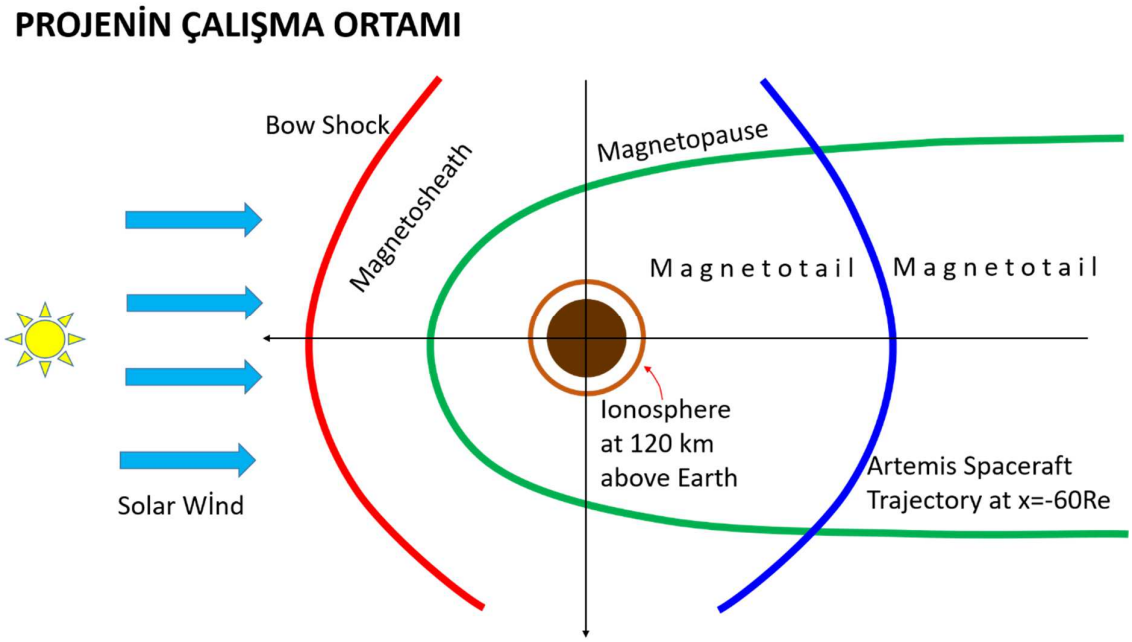
Tablo 5. Joule ısınması ve nötral yoğunluk arasındaki ilişkinin araştırılması için seçilen manyetik fırtına vakaları

Vaka No	Vaka ID	Vaka Tarihi	Kp_{max}
1	2006-348	13-16 Aralık 2006	8.3
2	2005-135	15-16 Mayıs 2005	8.3
3	2005-243	31 Ağustos-1 Eylül 2005	7
4	2005-190	9-11 Temmuz 2005	6.3
5	2007-142	22-25 Mayıs 2007	5.3
6	2007-091	01-02 Nisan 2007	5

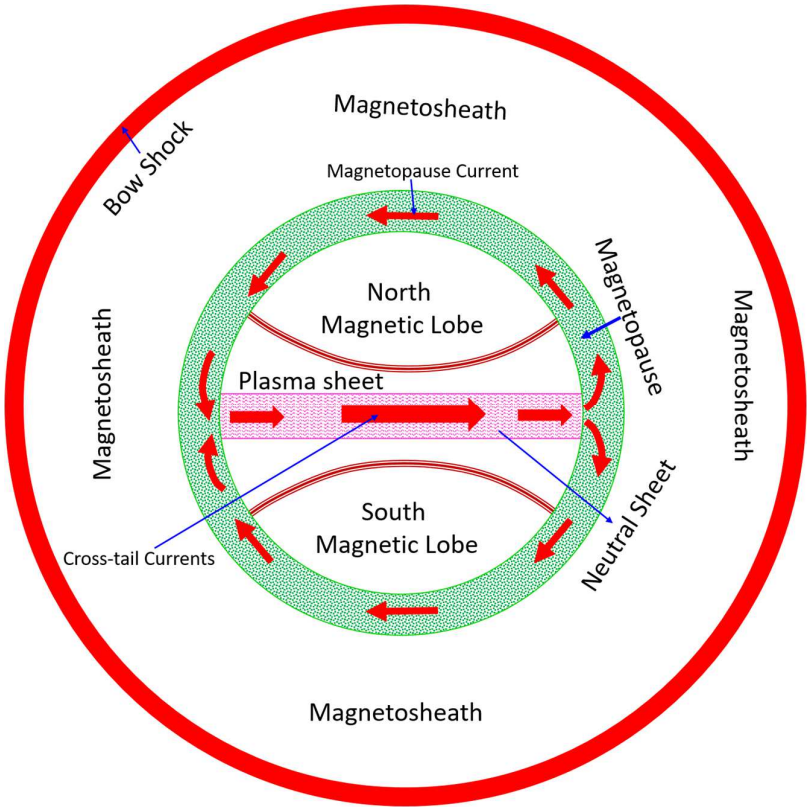
Tablo 6. İyonosferik değişkenlik için seçilen 41 manyetik fırtına vakası. Sarı işaretli vaka sakin gün vakasıdır. Diğerleri Dst ve AE değerlerine bakılarak seçilmiş manyetik fırtına vakalarının tarihleridir.

F2 LAYER CRITICAL FREQUENCY (foF2)	
Event No	**Geomagnetic Storm Dates**
0	3.01.2013
1	17.01.2013
2	18.01.2013
3	26.01.2013
4	1.03.2013
5	17.03.2013
6	18.03.2013
7	19.03.2013
8	20.03.2013
9	21.03.2013
10	29.03.2013
11	30.03.2013
12	24.04.2013
13	1.05.2013
14	2.05.2013
15	18.05.2013
16	19.05.2013
17	25.05.2013
18	1.06.2013
19	2.06.2013
20	6.06.2013
21	7.06.2013
22	24.06.2013
23	28.06.2013
24	29.06.2013
25	30.06.2013
26	6.07.2013
27	10.07.2013
28	14.07.2013
29	15.07.2013
30	5.08.2013
31	27.08.2013
32	28.08.2013
33	2.10.2013
34	3.10.2013
35	9.10.2013
36	30.10.2013
37	7.11.2013
38	9.11.2013
39	11.11.2013
40	16.11.2013
41	8.12.2013

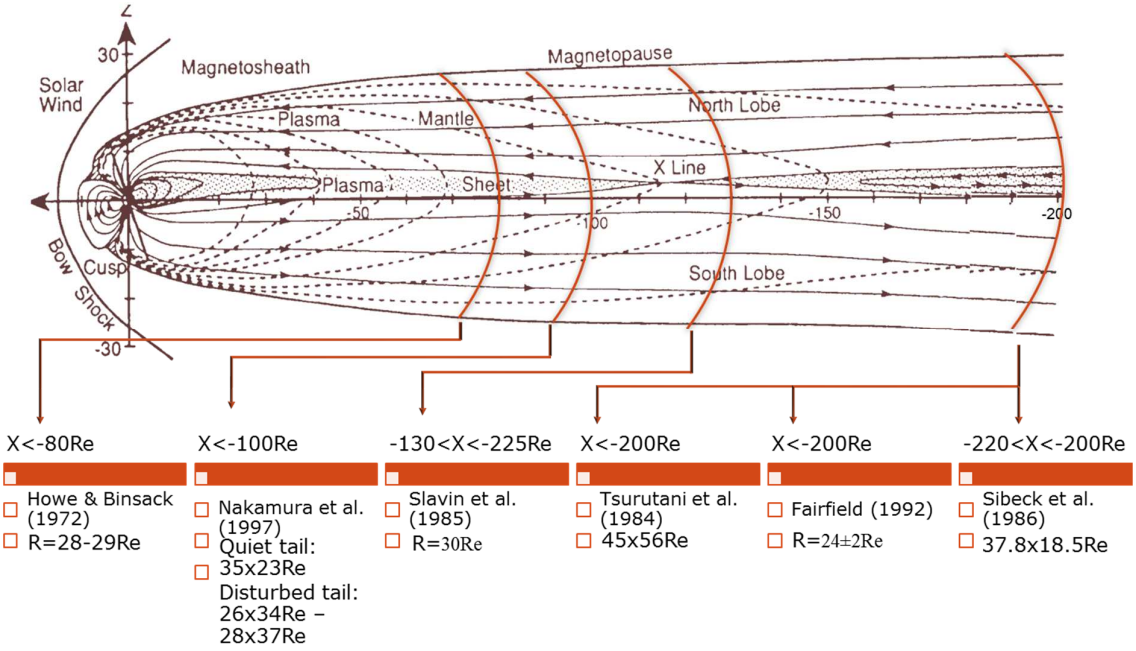
EK 2. ŞEKİLLER



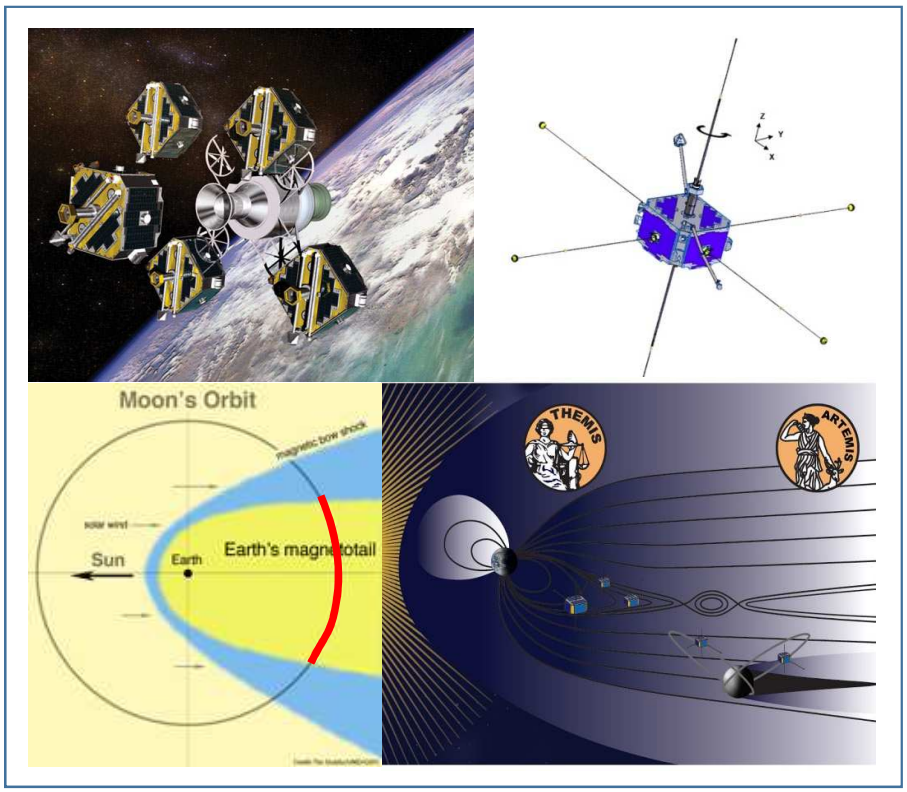
Şekil 1. Projedeki çalışma alanı ve bölgelerin birbirlerine göre konumu.



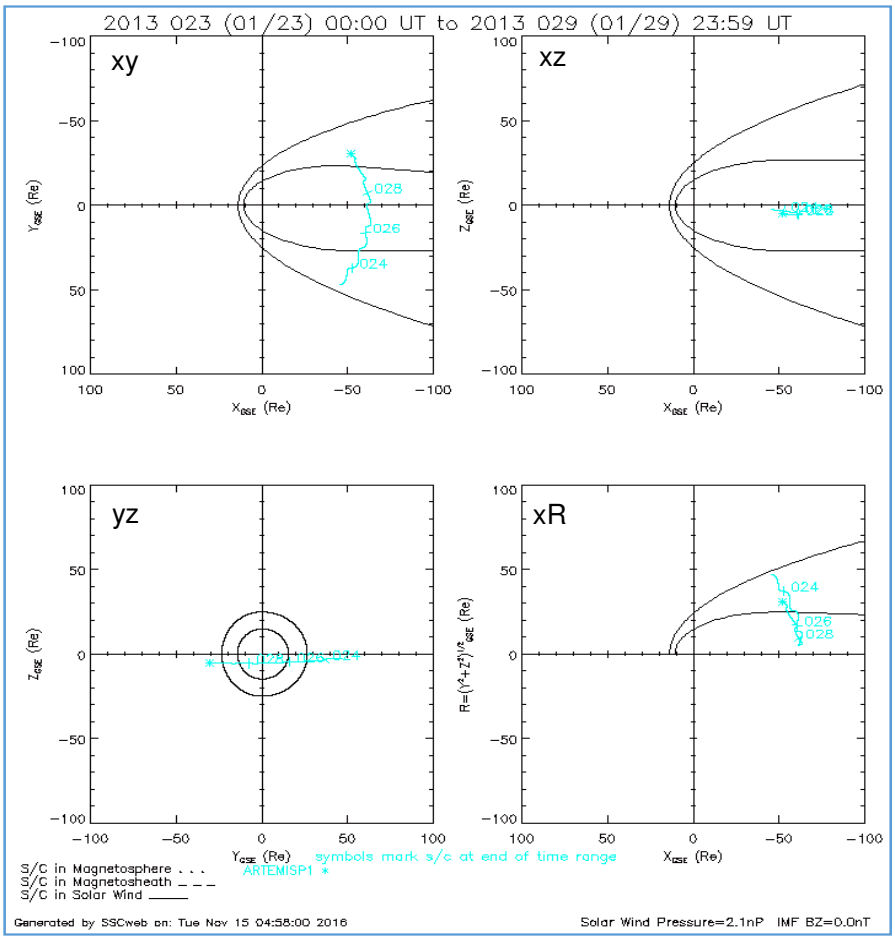
Şekil 2. Manyetik kuyruğun x=-60 R_e'deki kesit yapısı. Manyetopoz ve şok tabakalarının kalınlıkları detayları gösterebilmek için şekilde gerçeğinden büyük verilmiştir.



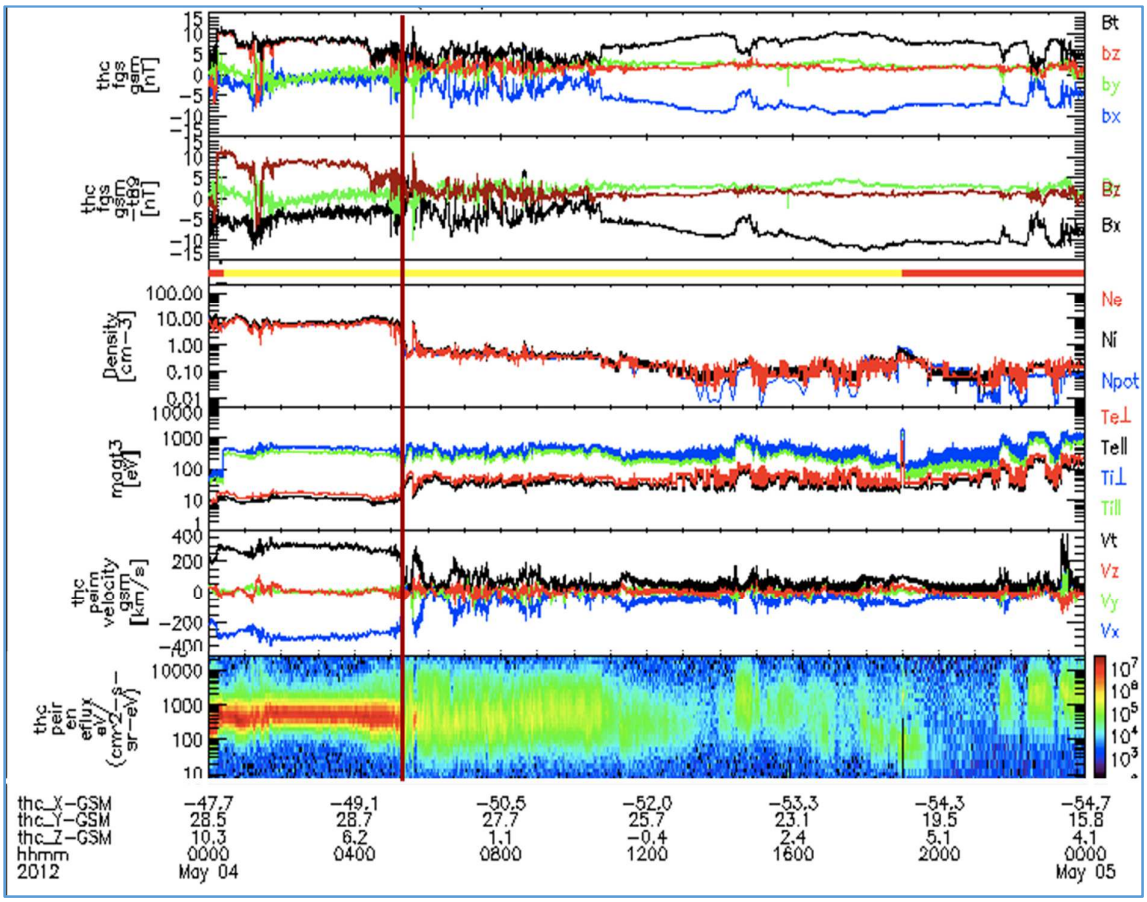
Şekil 3. Günümüze kadar manyetik kuyruk üzerine yapılan çalışmaları gösteren özet çizim.



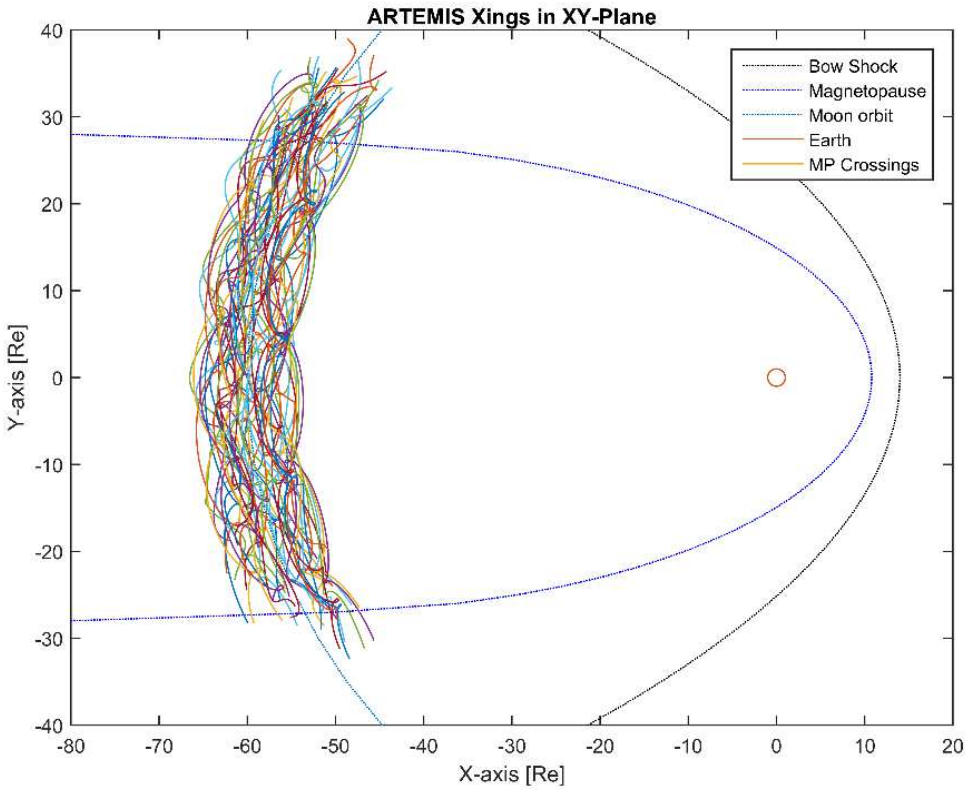
Şekil 4. ARTEMIS uyduları ve yörüngelerinin şematik çizimleri.



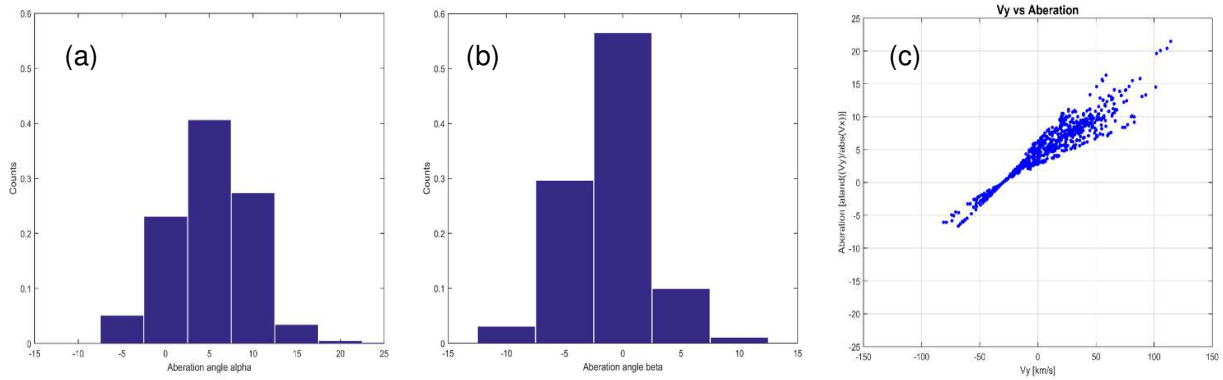
Şekil 5. ARTEMIS-1 uydusunun 23-29/Ocak/2013 tarihleri arasında xy-, xz-, yz ve xR-düzlemindeki yörüngesi (NASA/GSFC, sscweb).



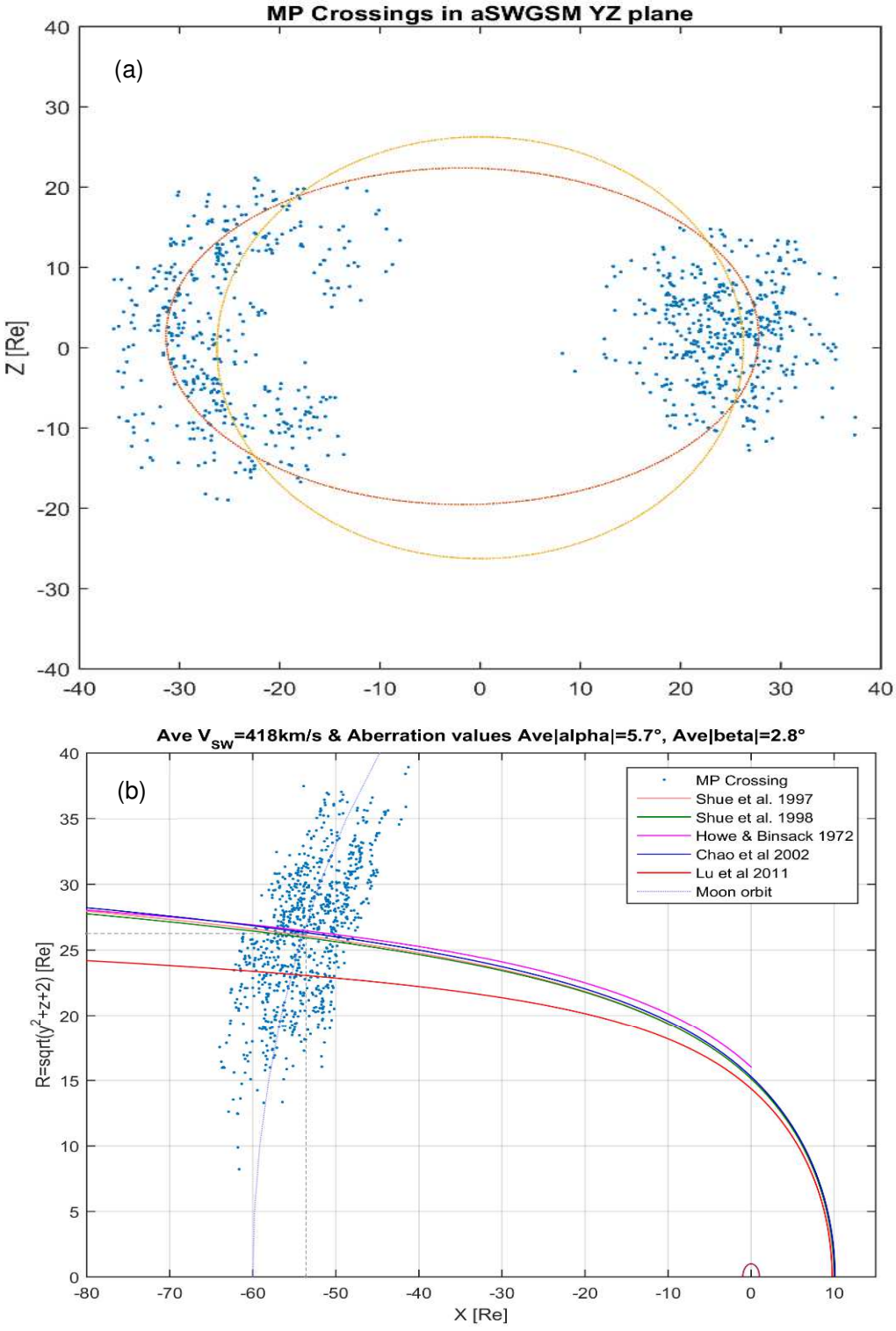
Şekil 6. Manyetopoz sınır tabakasını belirlemek için kullanılan veri örneği. Yukardan aşağıya, ARTEMIS uydusu tarafından ölçülen manyetik alan (ilk iki panel), yoğunluk, sıcaklık, parçacık hız bileşenleri, parçacık enerjisi ve yüksek enerjili iyon akısı (Berkeley, UCLA). Düşey çizgi manyetopoz sınırının görüldüğü anı göstermektedir.



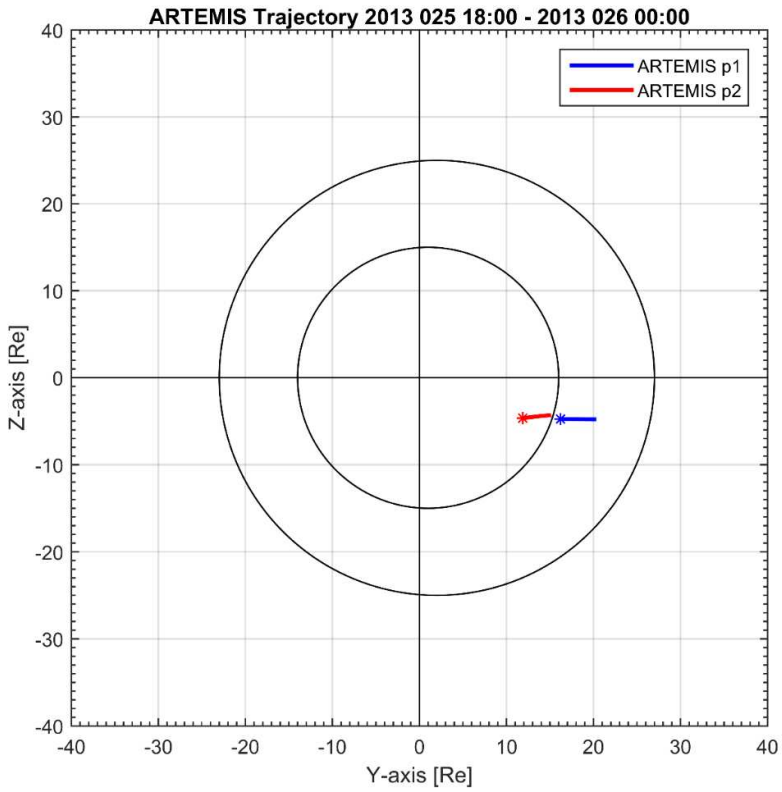
Şekil 7. ARTEMIS uydusunun Ay mesafesinde (x=-60 R_e) Ağustos 2011-Ağustos 2013 arasındaki manyetik kuyruk geçişlerine ait uydu yörüngeleri.



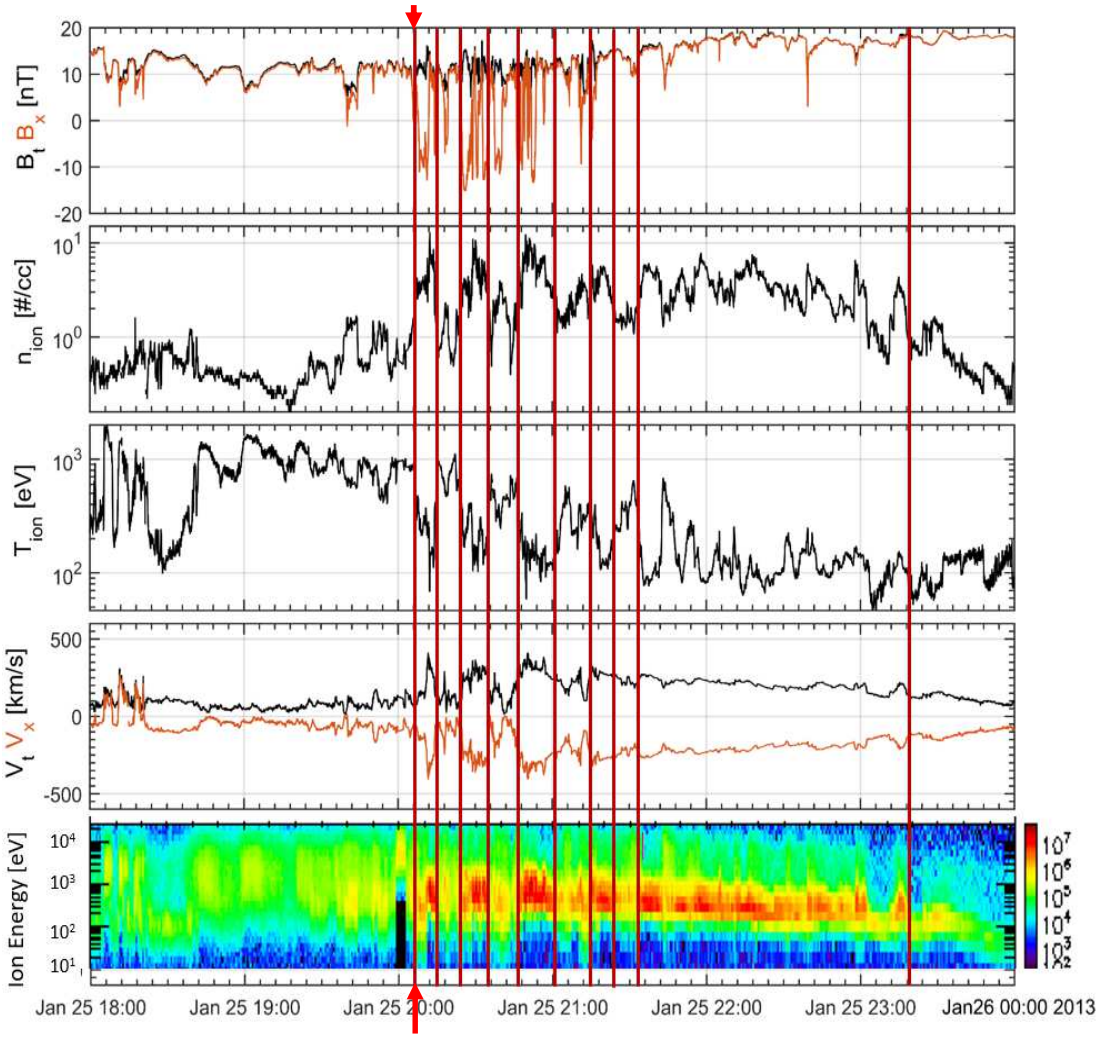
Şekil 8. Manyetik kuyruğun güneş rüzgârı yönüne göre hareketinin incelenmesi. (a) Doğu-batı doğrultusunda düzleminde yalpalama hareketi açısı (α), (b) Kuzey güney yönündeki hareketi, yunuslama açısı (β) ve (c) Güneş rüzgârının Vy hız bileşeninin ve yalpalama açısının (α) ile değişimi.



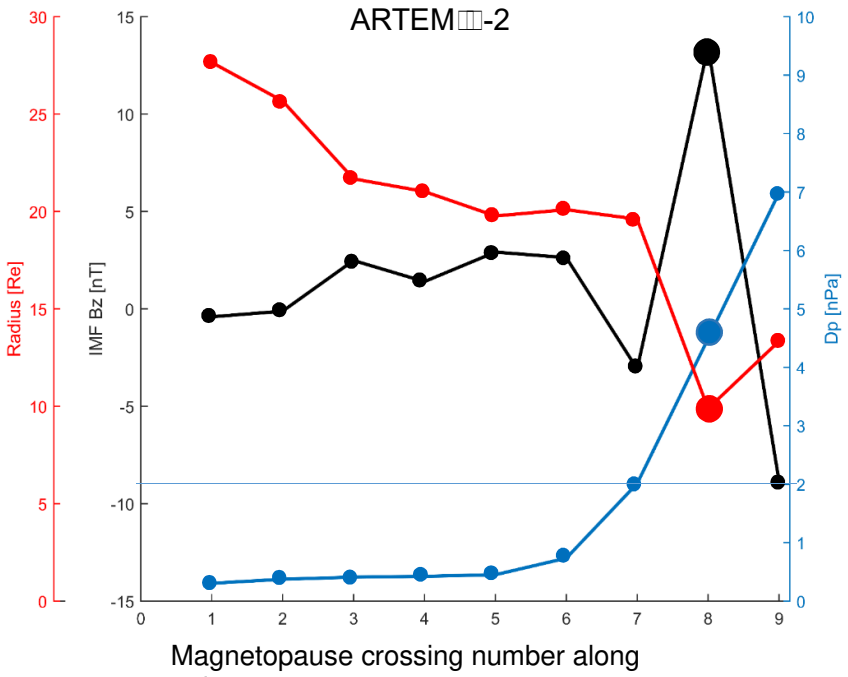
Şekil 9. Manyetopoz sınır tabaka geçiş noktalarının dağılımı. (a) Manyetik kuyrukda Ay mesafesinde belirlenen manyetopoz geçiş noktalarının yz-düzleminde dağılımı. (b) Manyetopoz geçiş noktalarının xR-düzlemindeki dağılımı ve model karşılaştırmaları.



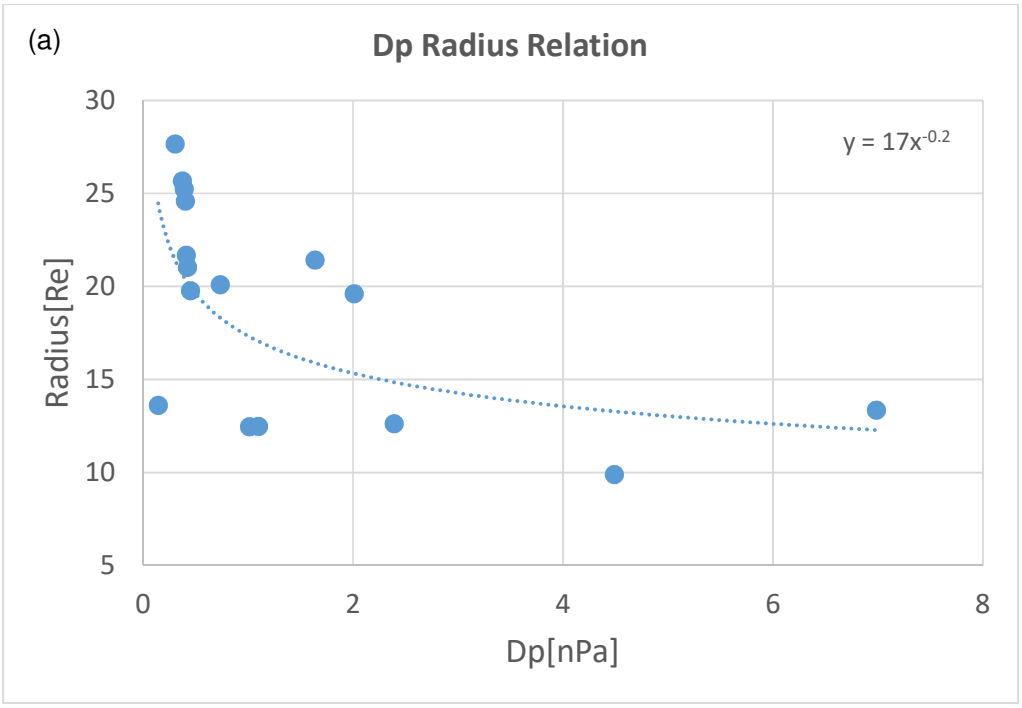
Şekil 10. ARTEMIS 1 ve 2 uydularının 25/Ocak/2013 ekstrem vakasındaki yörünge parçası. Bu geçişlerinde her iki uyduda en küçük manyetopozu (10 R_e) ölçmüştür.

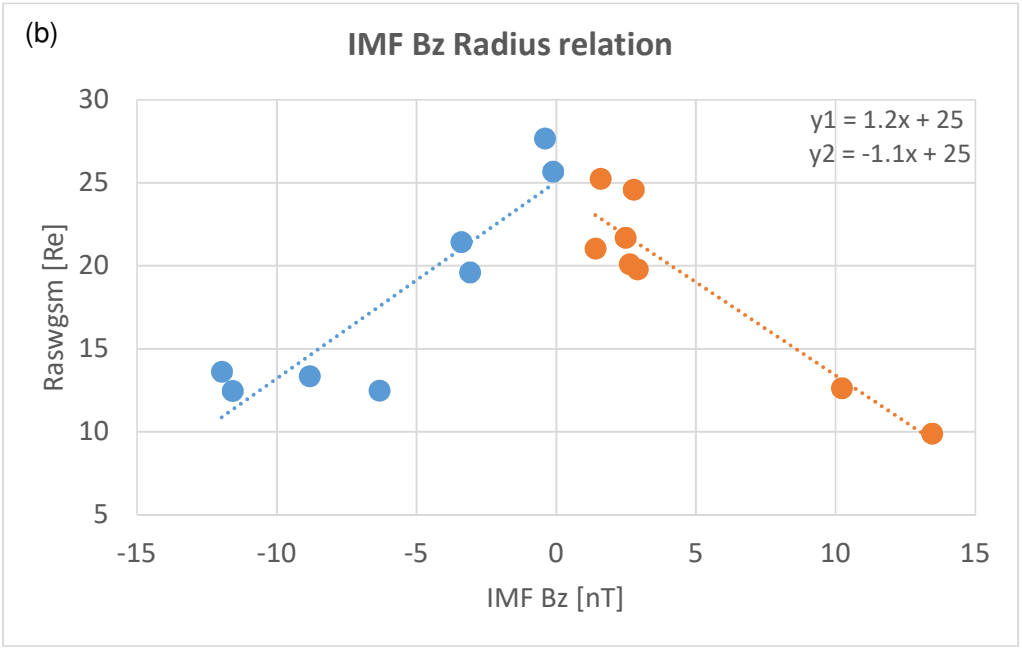


Şekil 11. ARTEMIS 2 uydusunun 25/Ocak/2013 tarihindeki yörünge geçişi sırasında kaydettiği manyetik alan ve plazma verileri. Yukardan aşağıya, toplam manyetik alan (siyah), manyetik alanın Bx bileşeni (turuncu), sıcaklık, plazma hızı (siyah), hızın Vx bileşeni (turuncu), iyon enerjisi (sol) ve yüksek enerjili iyon akısı (sağ).

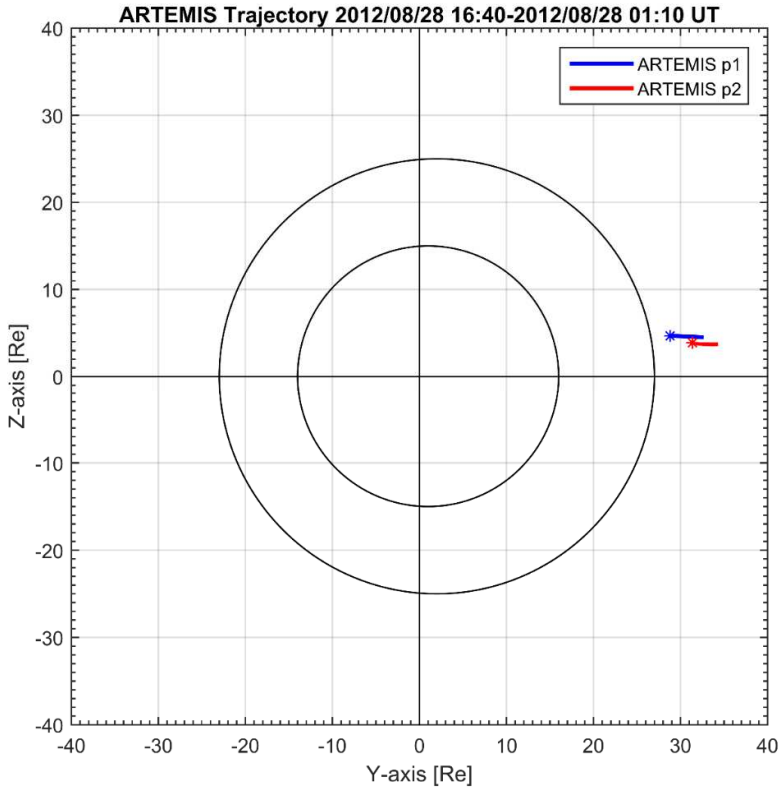


Şekil 12. ARTEMIS 2 uydusunun 25/Ocak/2013 yörünge geçişi sırasında kaydettiği manyetopoz yarıçapının (kırmızı, R) IMF Bz (siyah, sol) ve dinamik basınç (mavi, sağ) ile değişimi. Büyük noktalar en küçük manyetopoz 10 Re'nin kaydedildiği durumu göstermektedir.

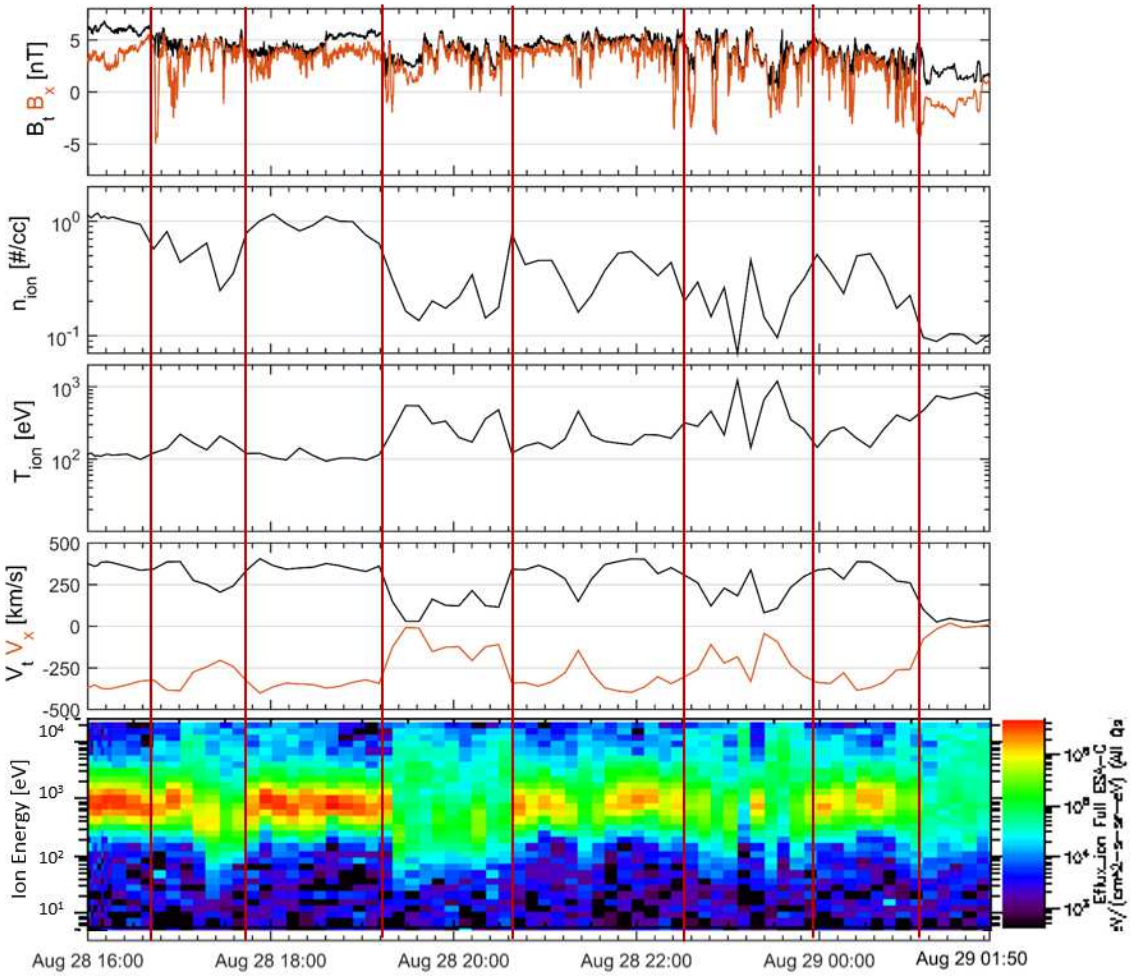




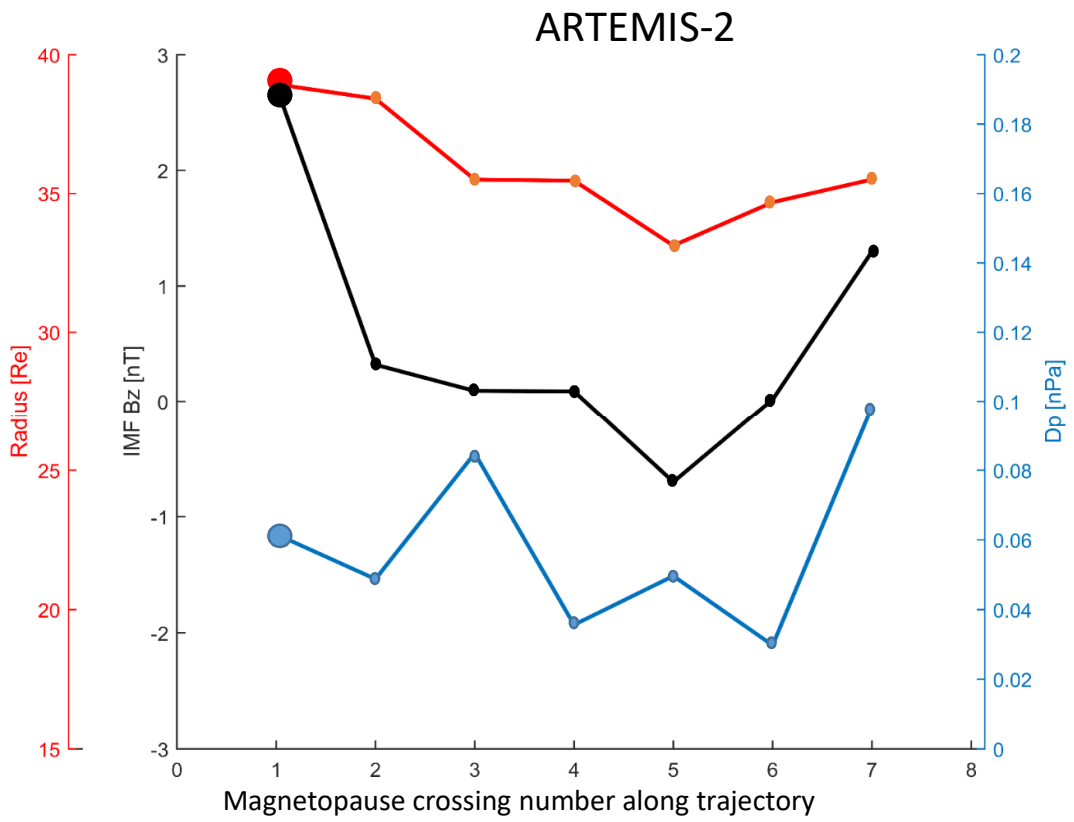
Şekil 13. En küçük manyetopoz yarıçapının (10 Re) görüldüğü yörünge üzerinde manyetopoz yarıçapının (a) güneş rüzgârının dinamik basıncı ve (b) IMF Bz ile değişimi.



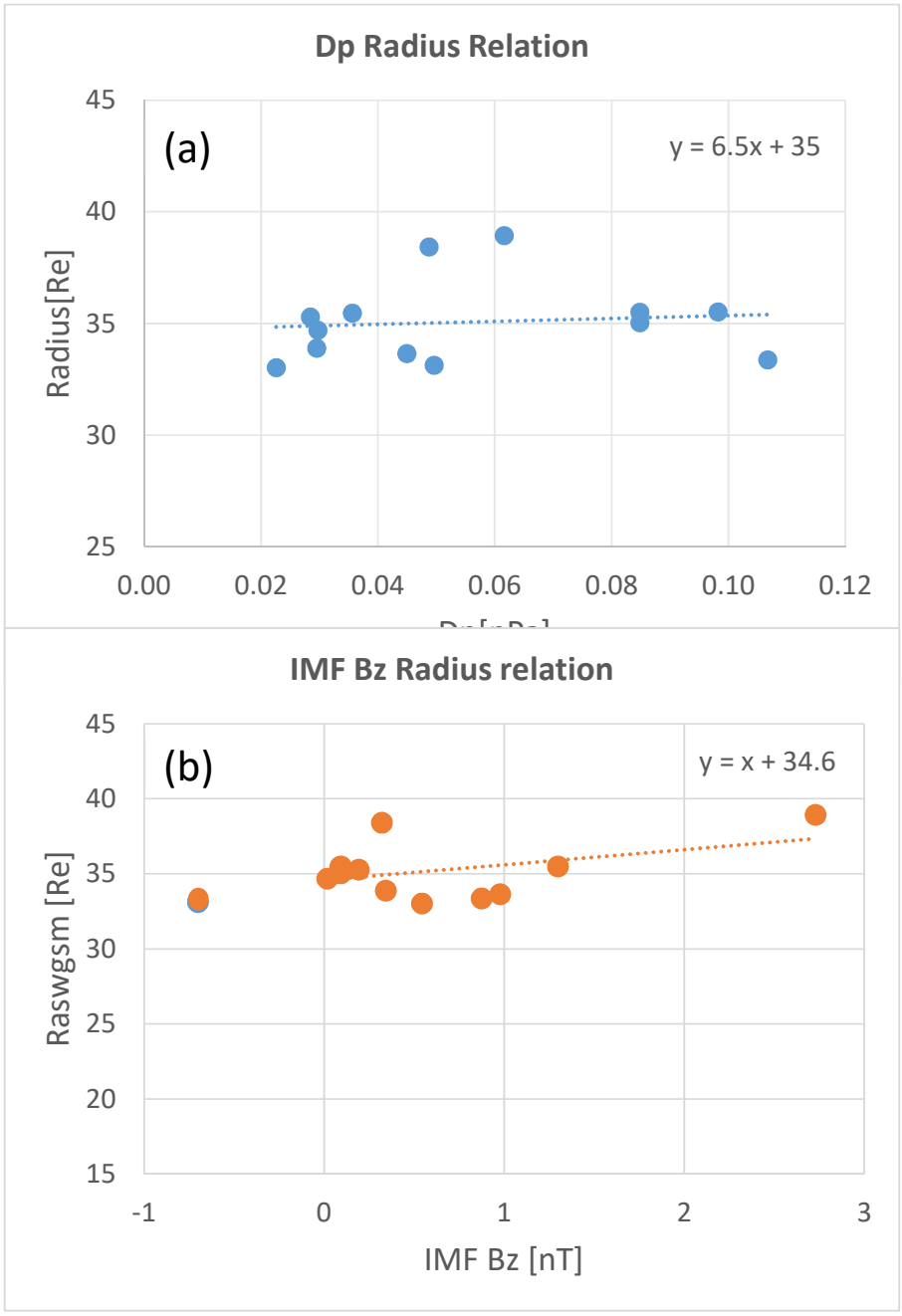
Şekil 14: ARTEMIS 1 ve 2 uydularının 28/Ağustos/2012 ekstrem vakasındaki yörünge parçası. Bu geçişlerinde her iki uyduda en büyük manyetopozu (39 Re) ölçmüştür.



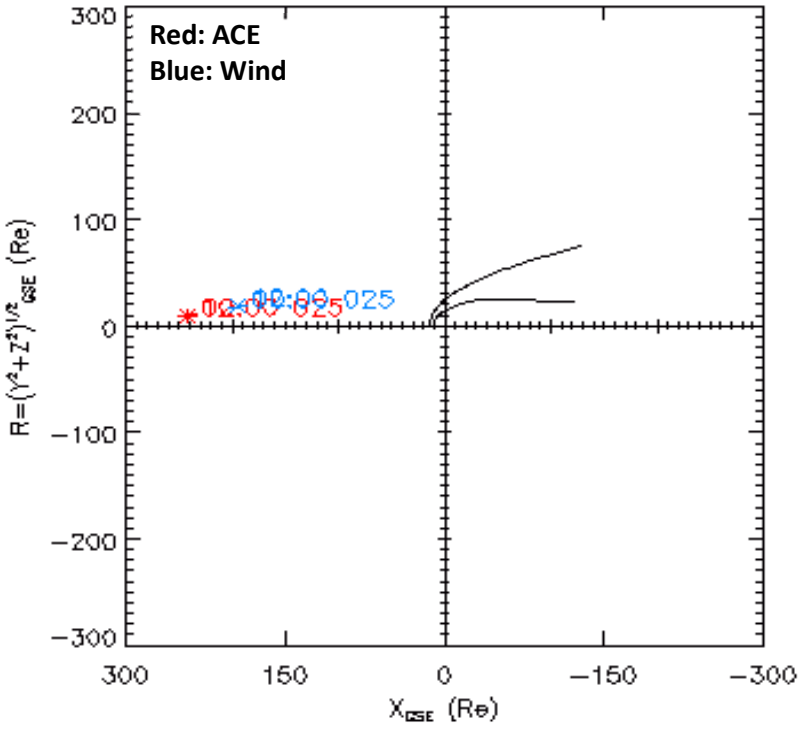
Şekil 15. ARTEMIS 2 uydusunun Ağustos 28, 2012 tarihindeki yörünge geçişi sırasında kaydettiği manyetik alan ve plazma verileri. Yukardan aşağıya, toplam manyetik alan (siyah), manyetik alanın Bx bileşeni (turuncu), sıcaklık, plazma hızı (siyah), hızın Vx bileşeni (turuncu), iyon enerjisi (sol) ve yüksek enerjili iyon akısı (sağ).



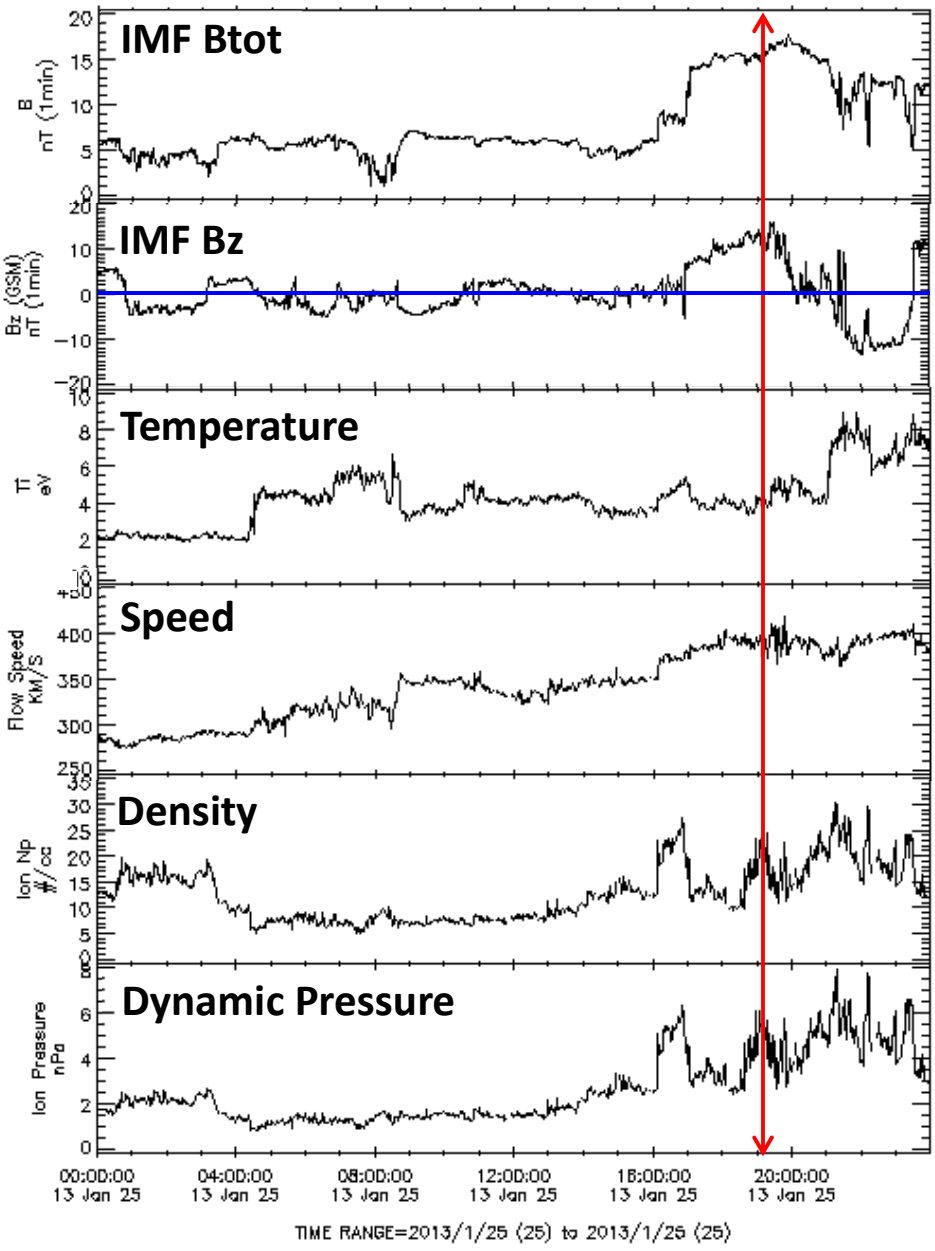
Şekil 16. ARTEMIS 2 uydusunun Ağustos 28, 2012 yörünge geçişi sırasında kaydettiği manyetopoz yarıçapının (kırmızı, R) IMF Bz (siyah) ve dinamik basınç (mavi) ile değişimi. Büyük noktalar en büyük manyetopoz 39 Re'nin kaydedildiği durumu göstermektedir.



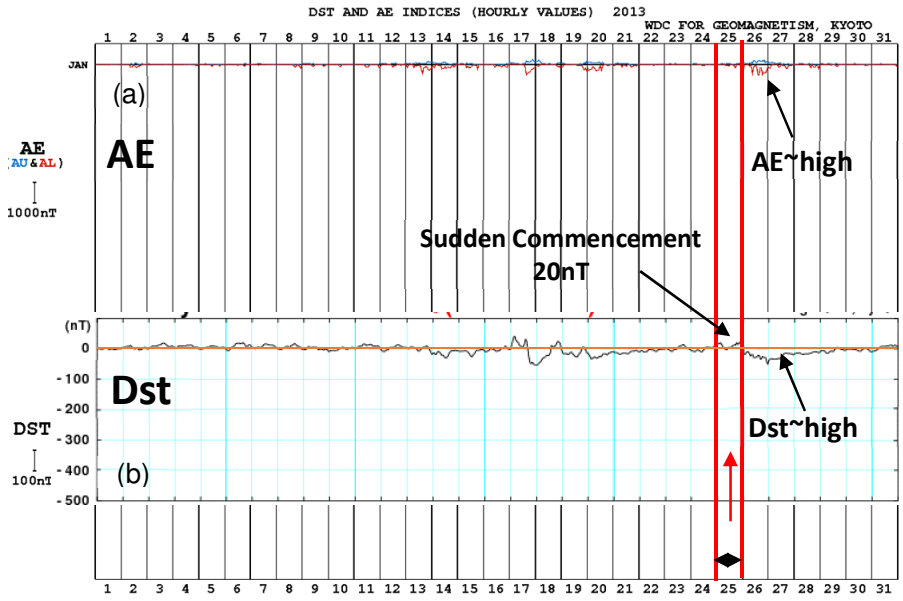
Şekil 17. En büyük manyetopoz yarıçapının (39 Re) görüldüğü yörünge üzerinde manyetopoz yarıçapının (a) güneş rüzgârının dinamik basıncı ve (b) IMF Bz ile değişimi.



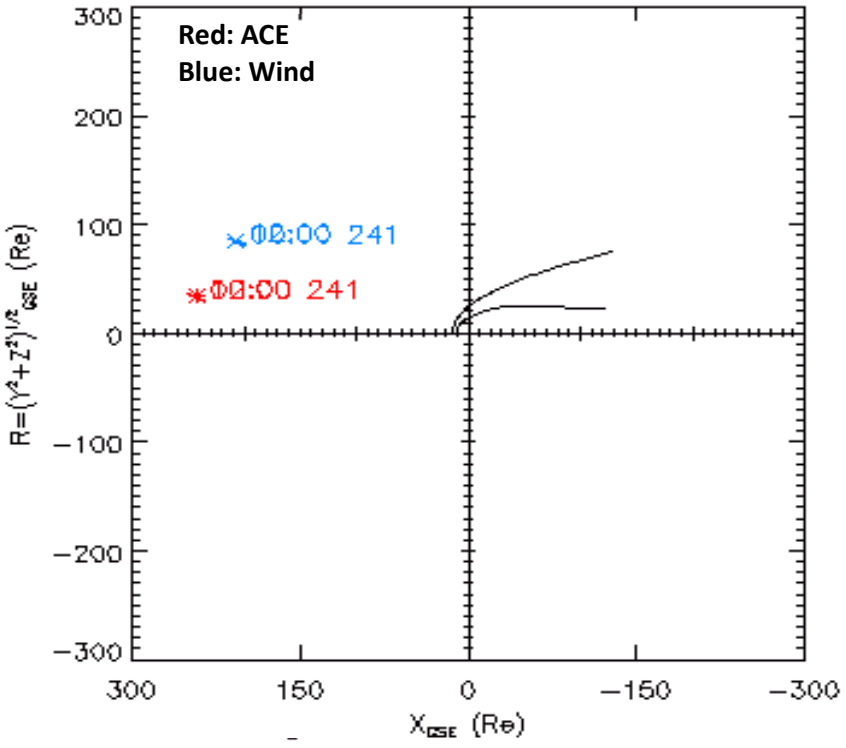
Şekil 18. 25/Ocak/2013 en küçük manyetopoz yarıçapının görüldüğü zaman ACE ve WIND uydularının L1 noktasında birbirlerine göre konumlarının xR-düzleminde görünümü.



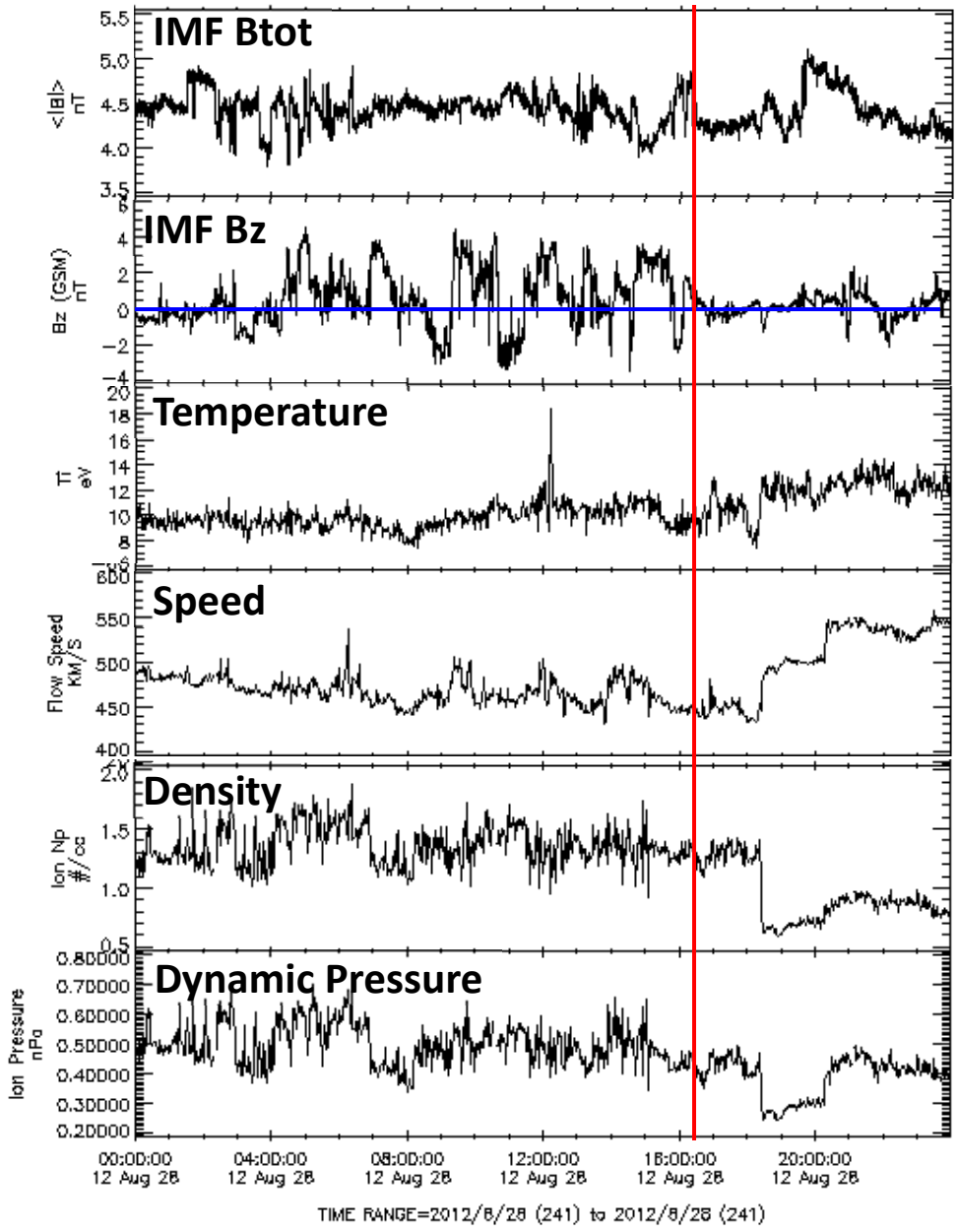
Şekil 19. ARTEMIS uydusunun manyetik kuyrukda x=-60 R_e mesafede Ocak 25, 2013 yörünge geçişi sırasında kaydettiği en küçük manyetopoz yarıçapına (10 R_e) karşı gelen WIND uydusunun IMF ve güneş rüzgârı plazma verileri. Yukardan aşağıya, toplam manyetik alan, IMF B_z, sıcaklık, plazma hızı, yoğunluk ve dinamik basınç. Kırmızı düşey çizgi ARTEMIS 2 uydusunun en küçük manyetopoz yarıçapını (10 R_e) gördüğü ana karşı gelmektedir.



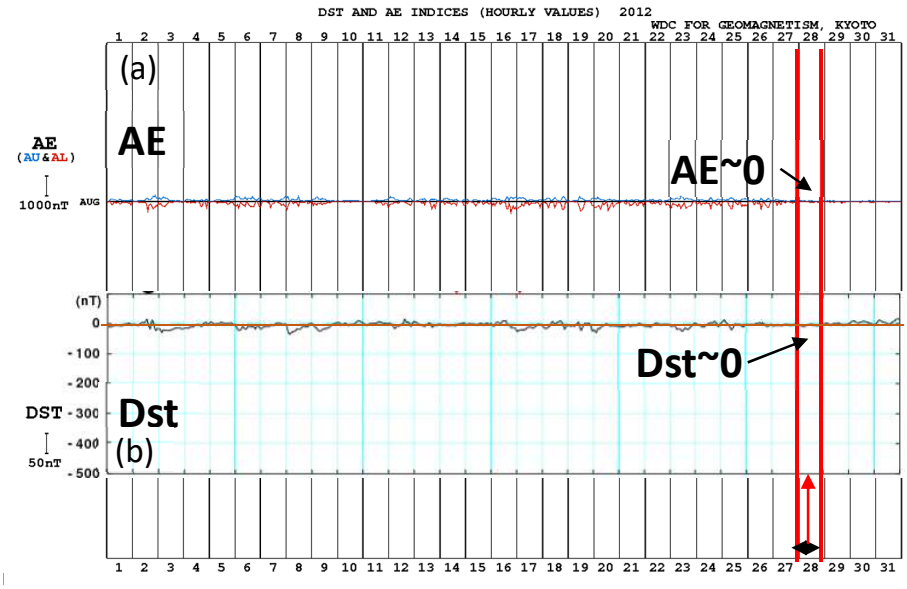
Şekil 20. ARTEMIS uydsunun manyetik kuyrukda, x=-60 R_e mesafede, 25/Ocak/2013 yörünge geçişi sırasında kaydettiği en küçük manyetopoz yarıçapına (10 R_e) karşı gelen (a) AE manyetosferik mikrofırtına indeksi ve (b) Dst manyetik fırtına ve ani sıçrama indeksi.



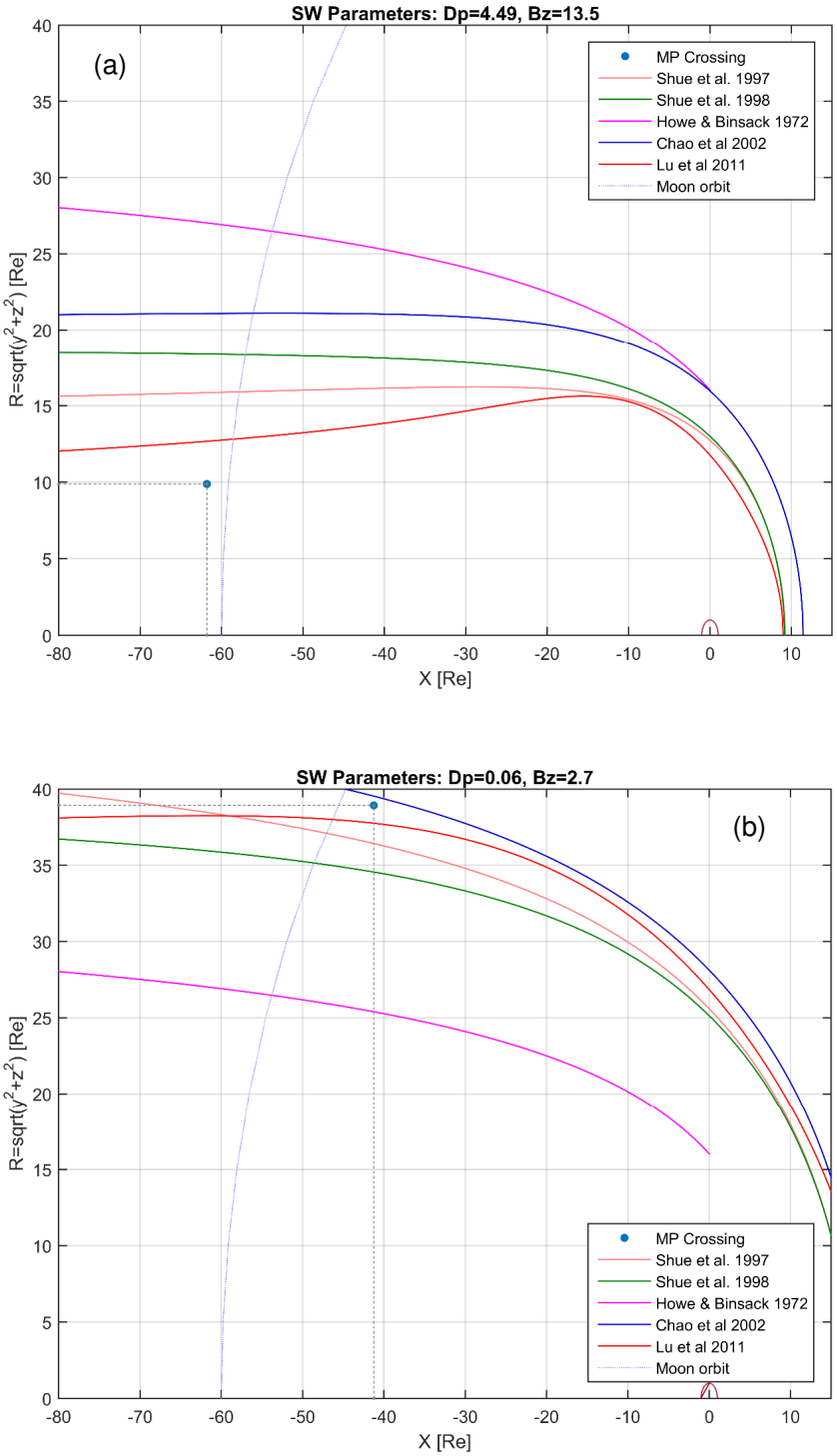
Şekil 21. 28/Ağustos/2012 en büyük manyetopoz yarıçapının görüldüğü zaman ACE ve WIND uydularının L1 noktasında birbirlerine göre konumlarının xR-düzleminde görünümü.



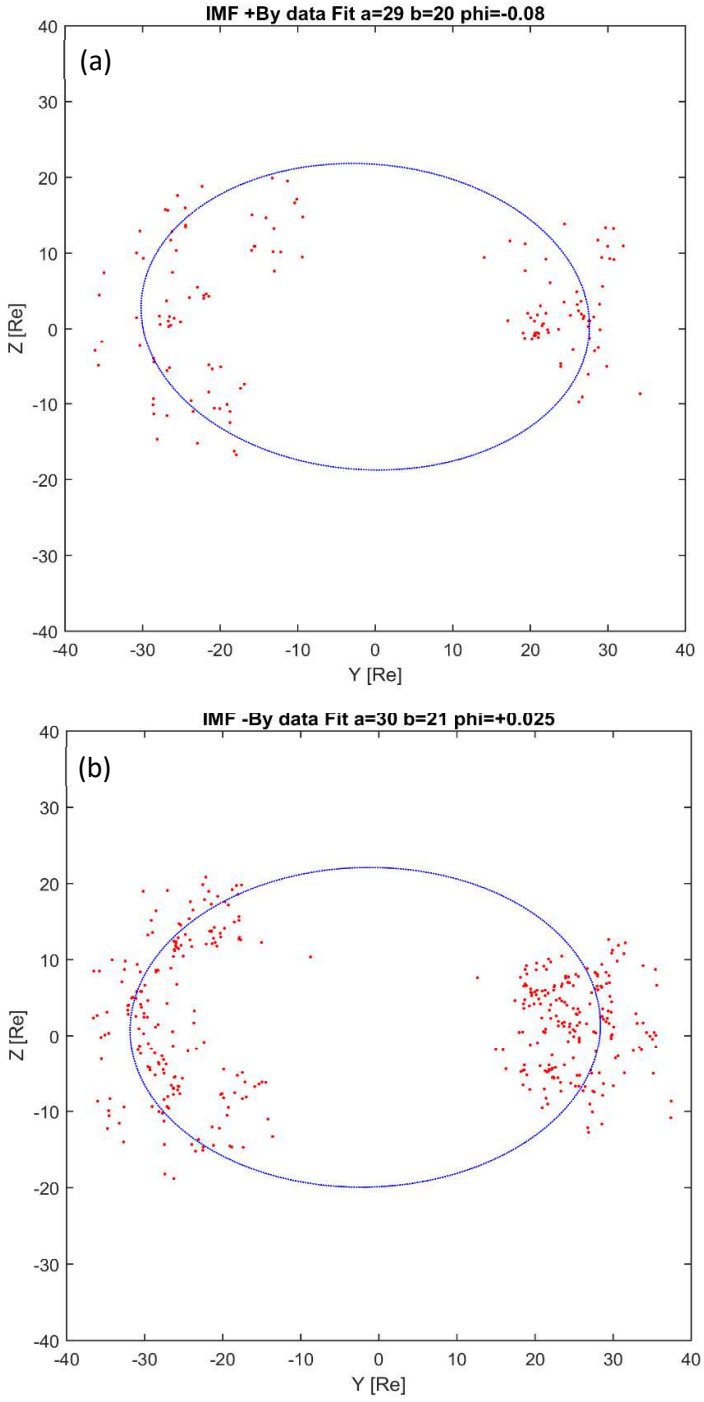
Şekil 22. ARTEMIS uydusunun manyetik kuyrukda x=-60 R_e mesafede 28/Ağustos/2012 yörünge geçişi sırasında kaydettiği en büyük manyetopoz yarıçapına (39 R_e) karşı gelen WIND uydusunun IMF ve güneş rüzgârı plazma verileri. Yukardan aşağıya, toplam manyetik alan, IMF Bz, sıcaklık, plazma hızı, yoğunluk ve dinamik basınç. Kırmızı düşey çizgi ARTEMIS 2 uydusunun en büyük manyetopoz yarıçapını (39Re) gördüğü ana karşı gelmektedir.



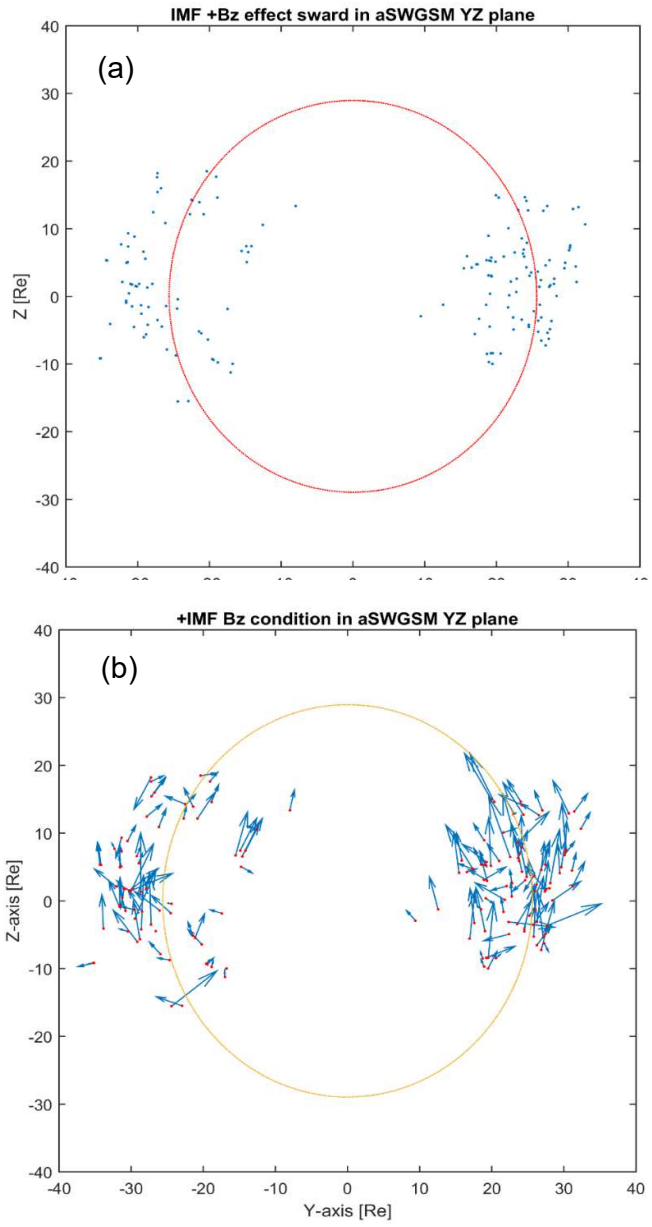
Şekil 23. ARTEMIS uydsunun manyetik kuyrukda, x=-60 R_e mesafede 28/Ağustos/2012 yörünge geçişi sırasında kaydettiği en büyük manyetopoz yarıçapına (39 R_e) karşı gelen (a) AE manyetosferik mikrofırtına indeksi ve (b) Dst manyetik fırtına ve ani sıçrama indeksi.



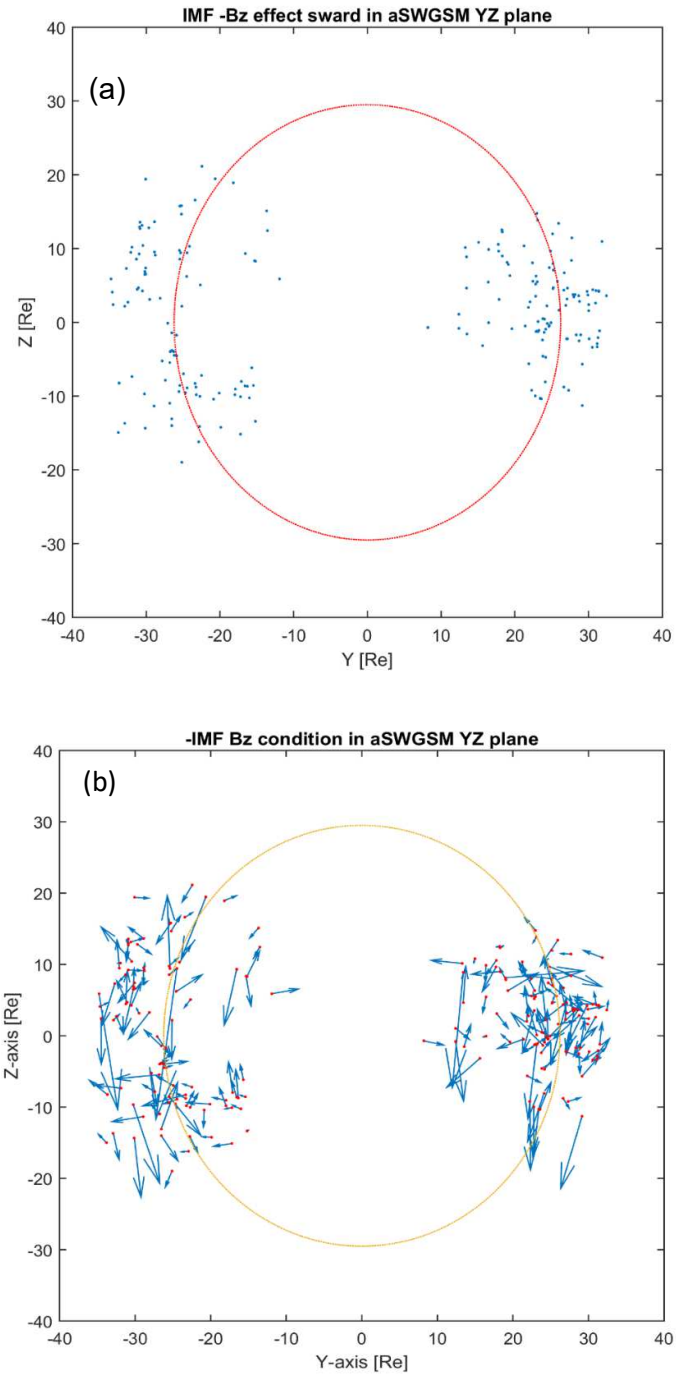
Şekil 24. Manyetopoz modellerinin ekstrem manyetopoz pozisyonu için tahminleri. Modeller ekstrem manyetopoz pozisyonlarındaki güneş rüzgârı ve IMF şartlarında çalıştırılmışlardır. Mavi nokta ektrem manyetopoz pozisyonunu göstermektedir. (a) 25/Ocak/2013 en küçük manyetopoz yarıçapı vakası. (b) 28/Ağustos/2012 en büyük manyetopoz yarıçapı vakası.



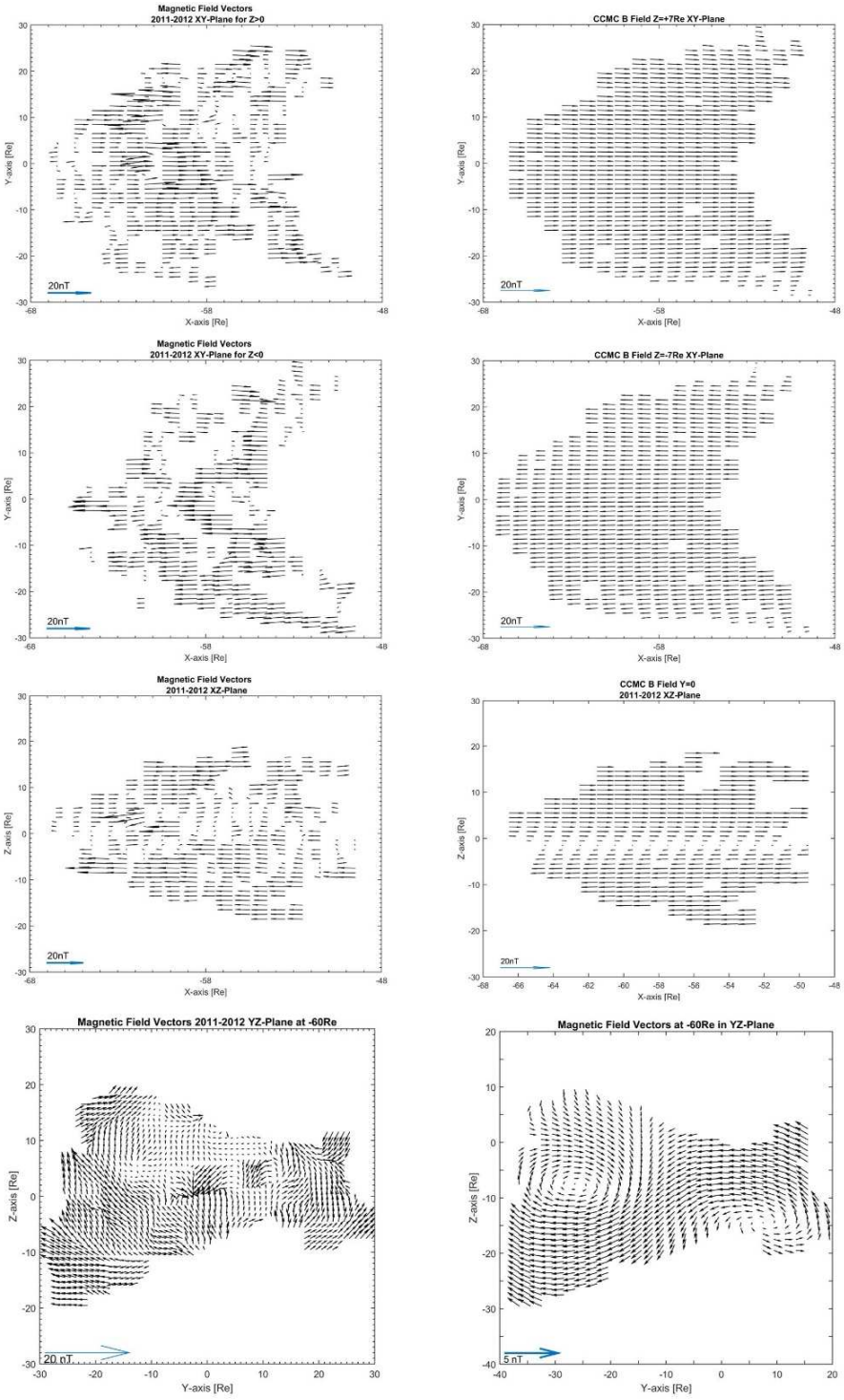
Şekil 25. IMF B_y egemen sektör için manyetopoz sınırı geçiş noktalarının yz-düzlemindeki dağılımı: (a) Batılı (+IMF B_y) and (b) doğulu (-IMF B_y) sektörleri.



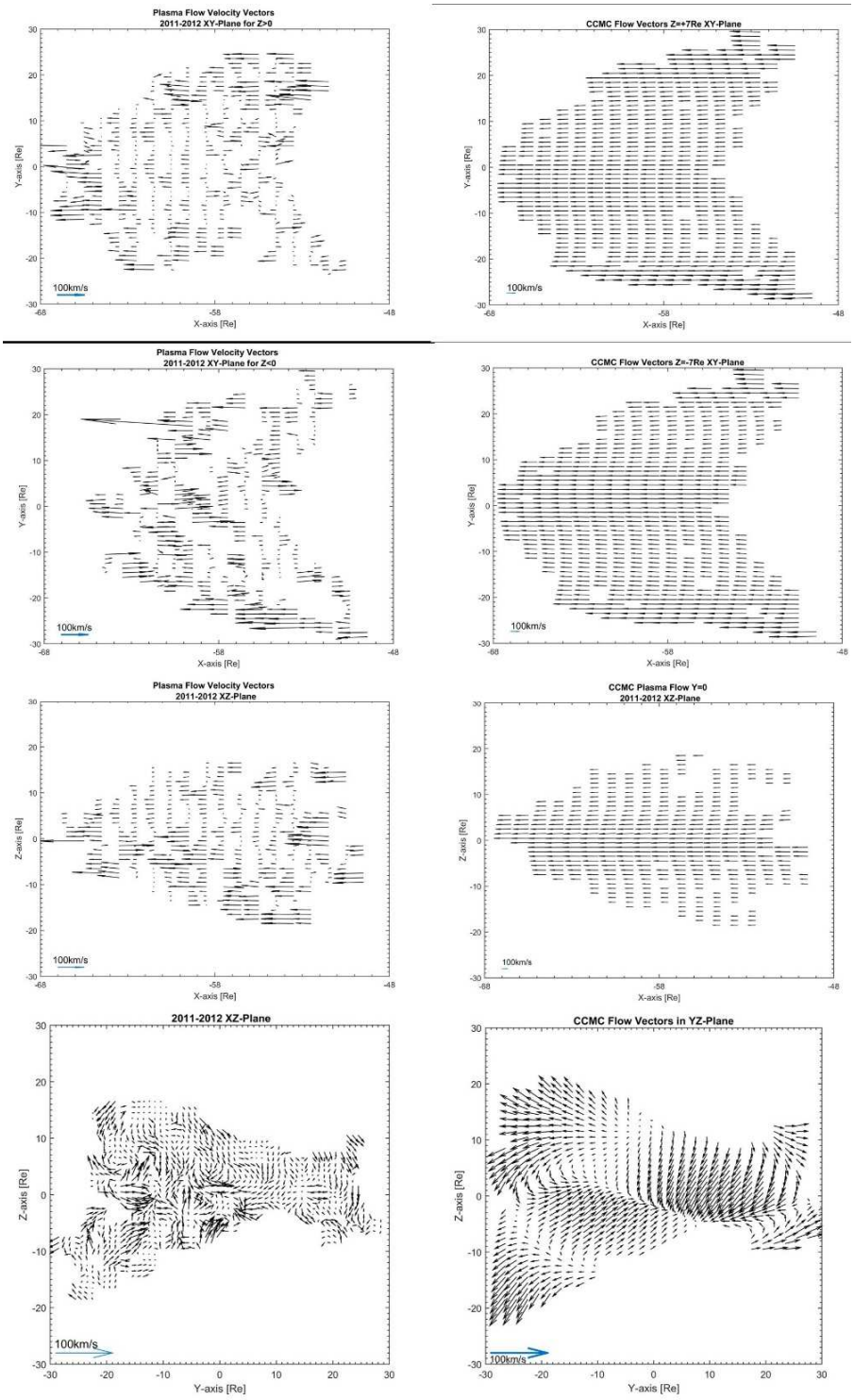
Şekil 26. Kuzeyli IMF B_z egemen sektör için manyetopoz sınırı geçiş noktalarının (a) yz-düzlemindeki dağılımı ve (b) bu noktalardaki manyetik alan vektörleri.



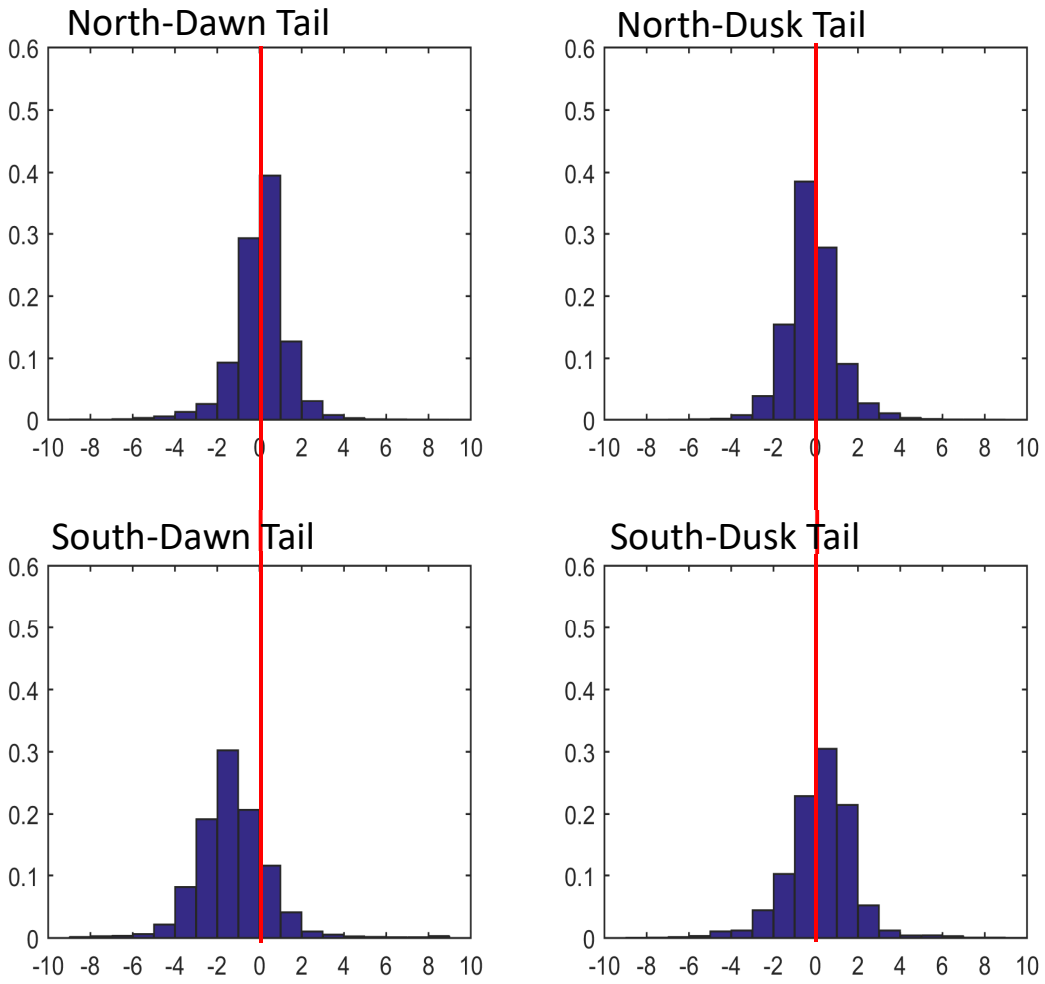
Şekil 27. Güneyli IMF B_z egemen sektör için manyetopoz sınırı geçiş noktalarının (a) yz-düzlemindeki dağılımı ve (b) bu noktalardaki manyetik alan vektörleri.



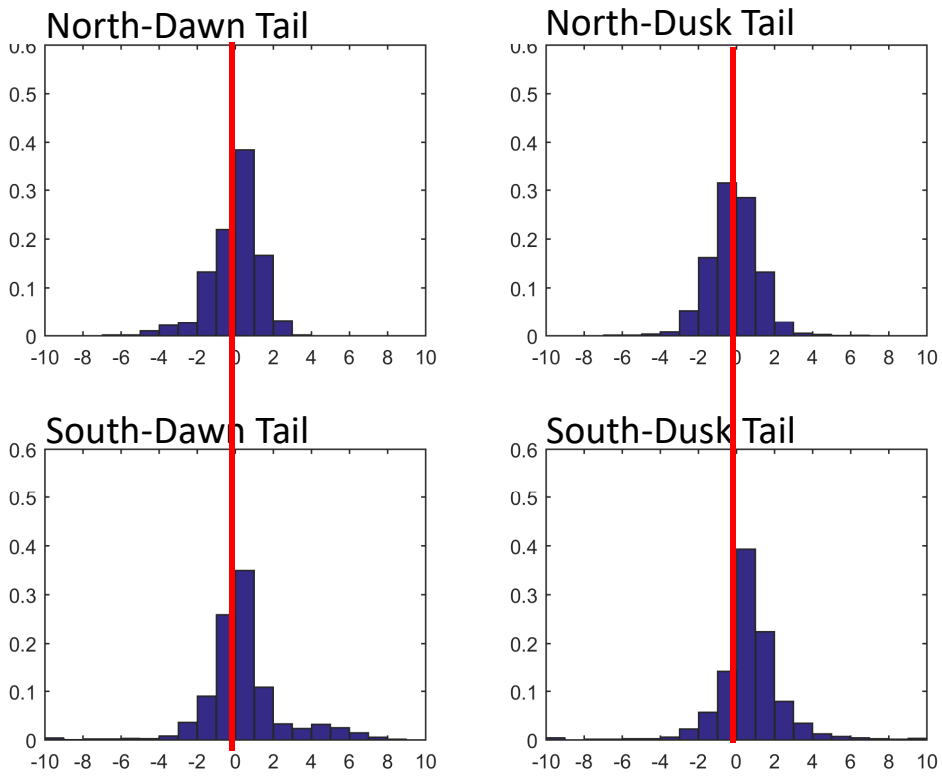
Şekil 28. ARTEMIS uydusunun Ay mesafesinde manyetik kuyruk içerisinde manyetik alan vektör haritaları ve BATSRUS model karşılaştırmaları. (Sağ, üstten alta) xy-düzlemi z>0, xy-düzlemi z<0, xz-düzlemi ve yz-düzleminde manyetik alan vektörleri. (Sol, üstten alta) Aynı düzlemlerde BATSRUS model sonuçları.



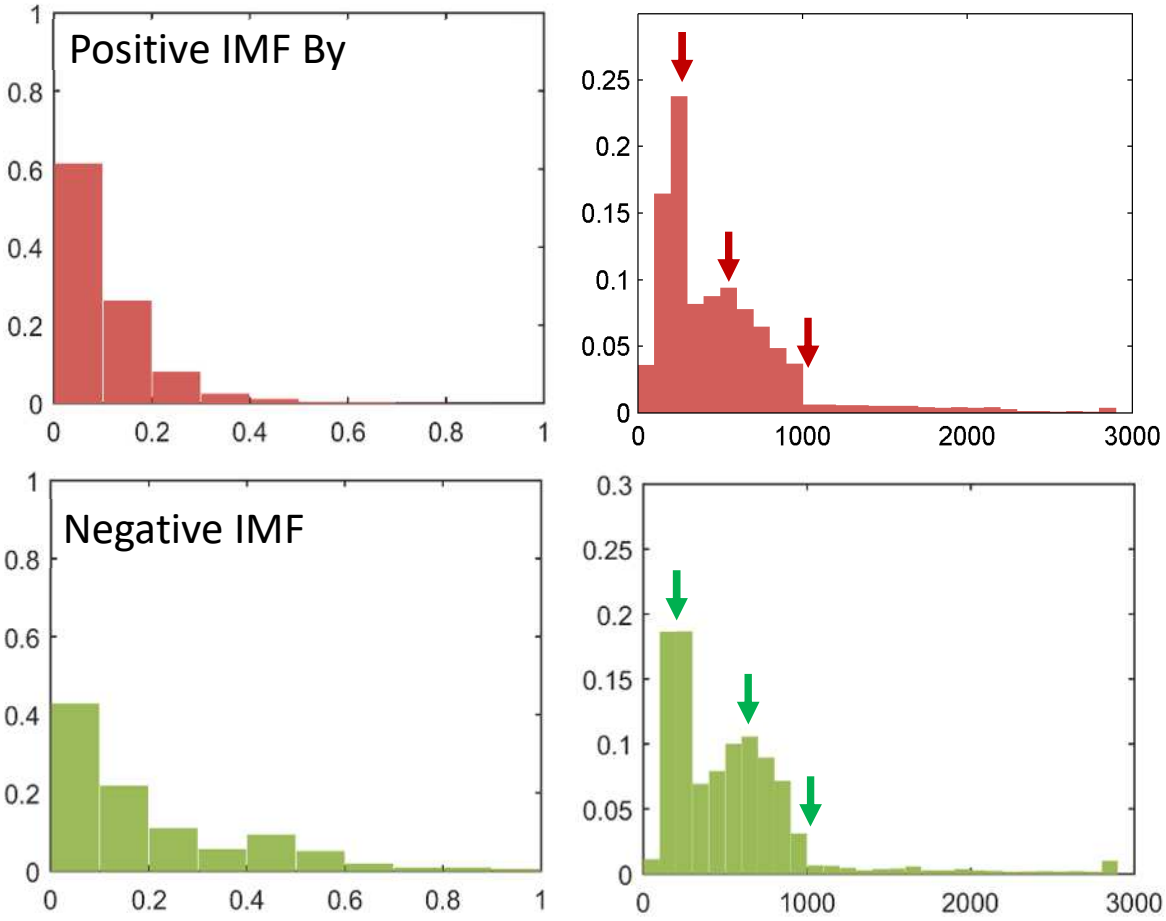
Şekil 29. ARTEMIS uydusunun Ay mesafesinde manyetik kuyruk içerisinde plazma hızı vektör haritalarının ve BATSRUS model karşılaştırmaları. (Sağ, üstten alta) xy düzlemi z>0, xy düzlemi z<0, xz düzlemi ve yz düzleminde manyetik alan vektörleri. (Sol) Aynı düzlemlerde BATSRUS model sonuçları.



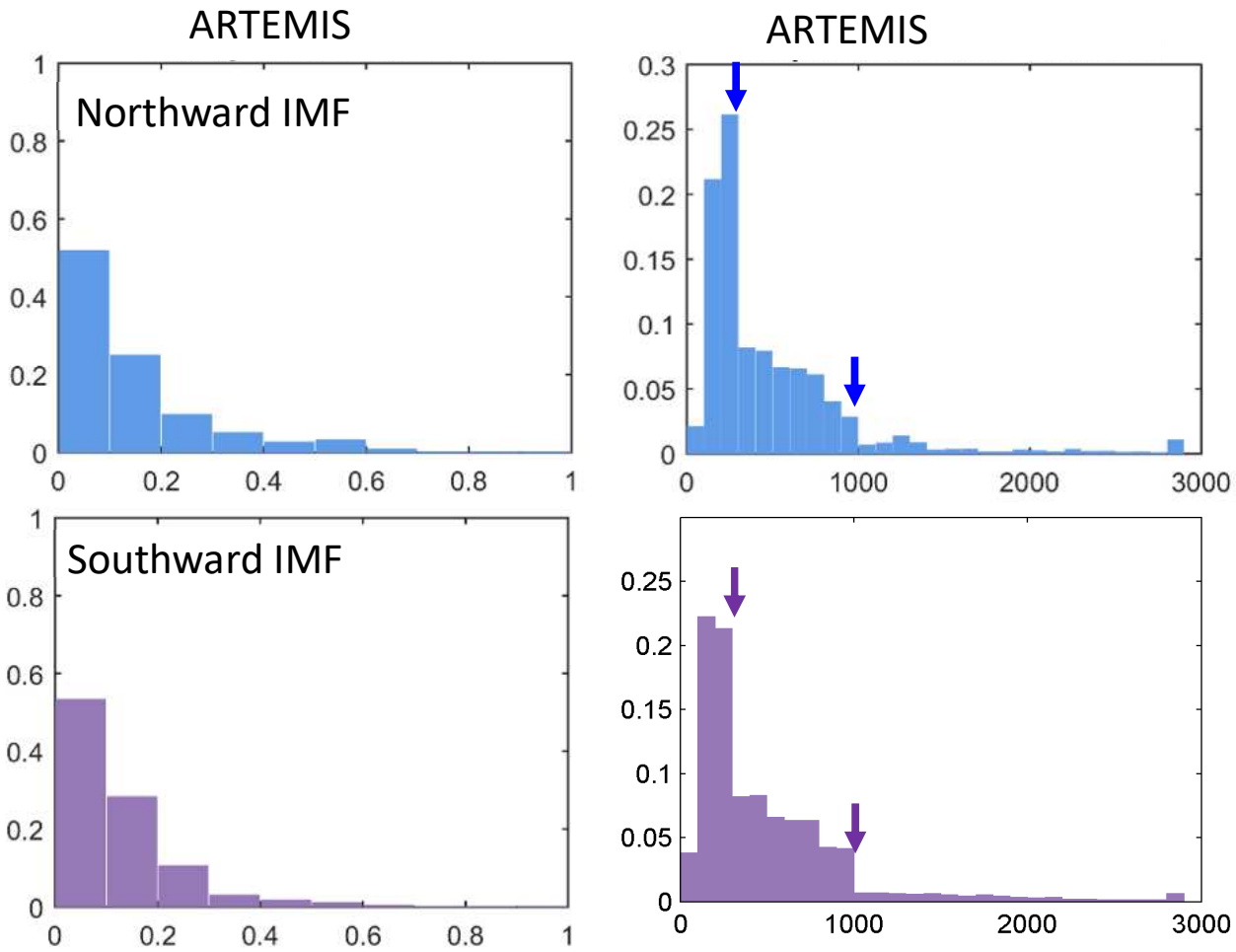
Şekil 30. +IMF B_y sektöründe, manyetik kuyruğun kuzey-güney ve doğu-batı bölgelerindeki ARTEMIS B_y istatistikleri.



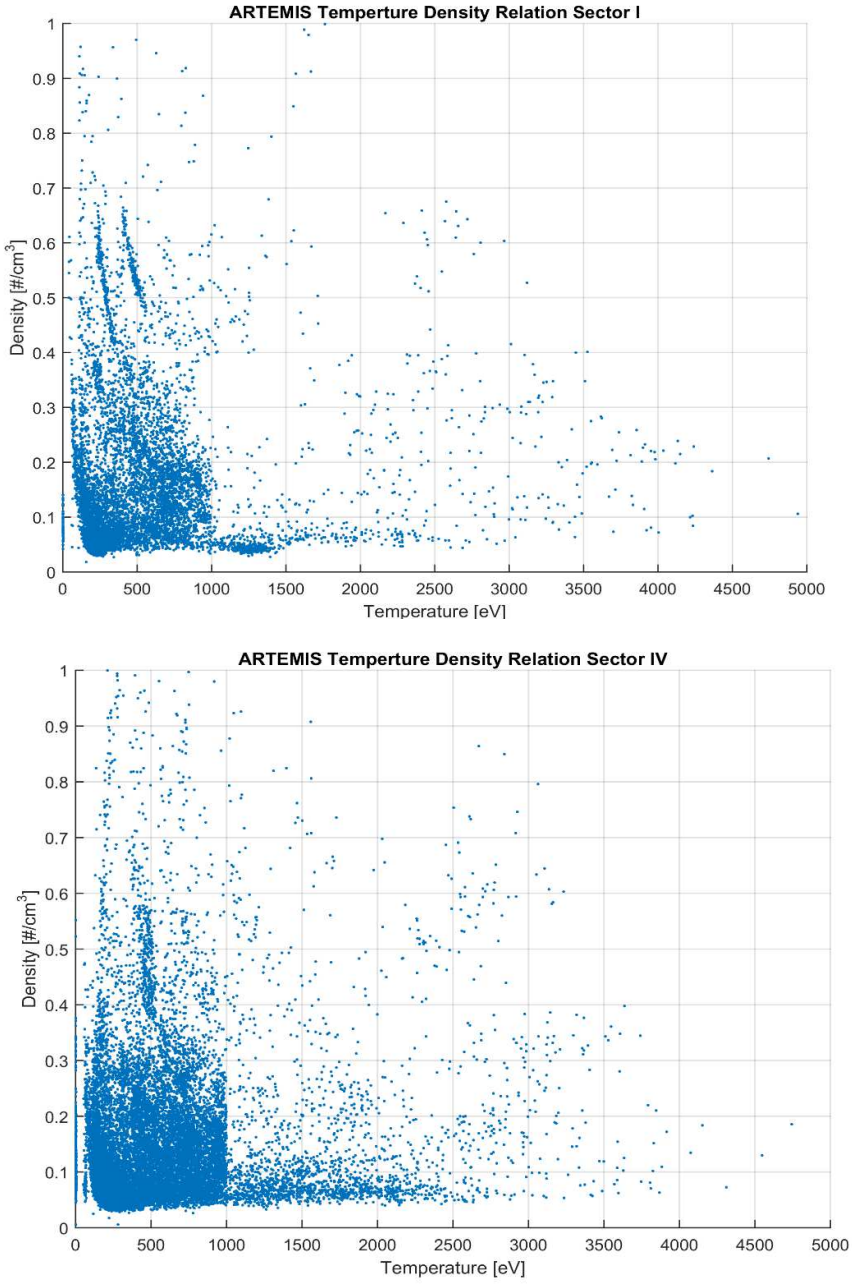
Şekil 31. -IMF B_y sektöründe, manyetik kuyruğun kuzey-güney ve doğu-batı bölgelerindeki ARTEMIS B_y istatistikleri.



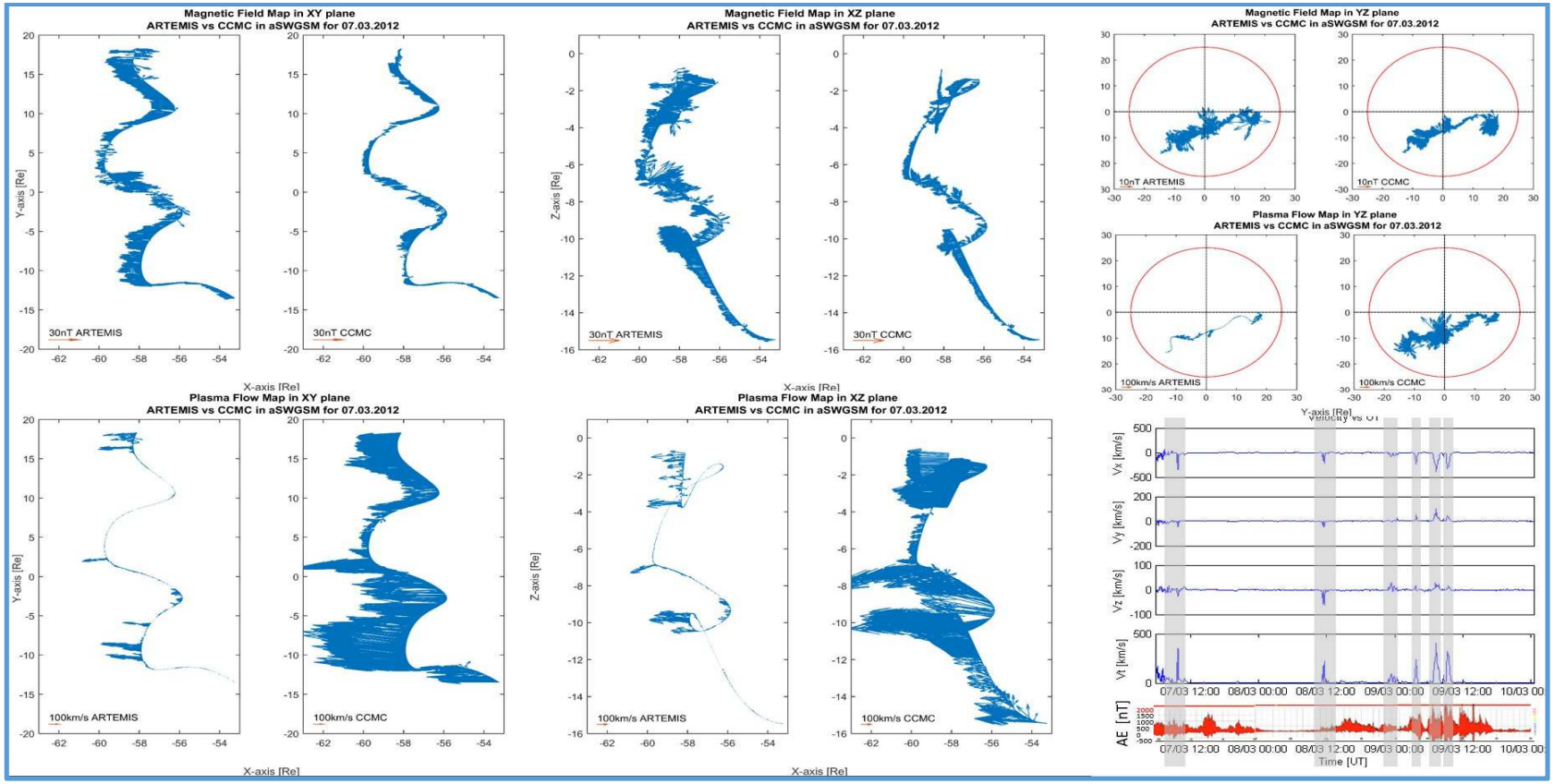
Şekil 32. +IMF B_y (üst) ve –IMF B_y (alt) sektörüne karşı gelen ARTEMIS yoğunluk (sol) ve sıcaklık (sağ) istatistikleri.



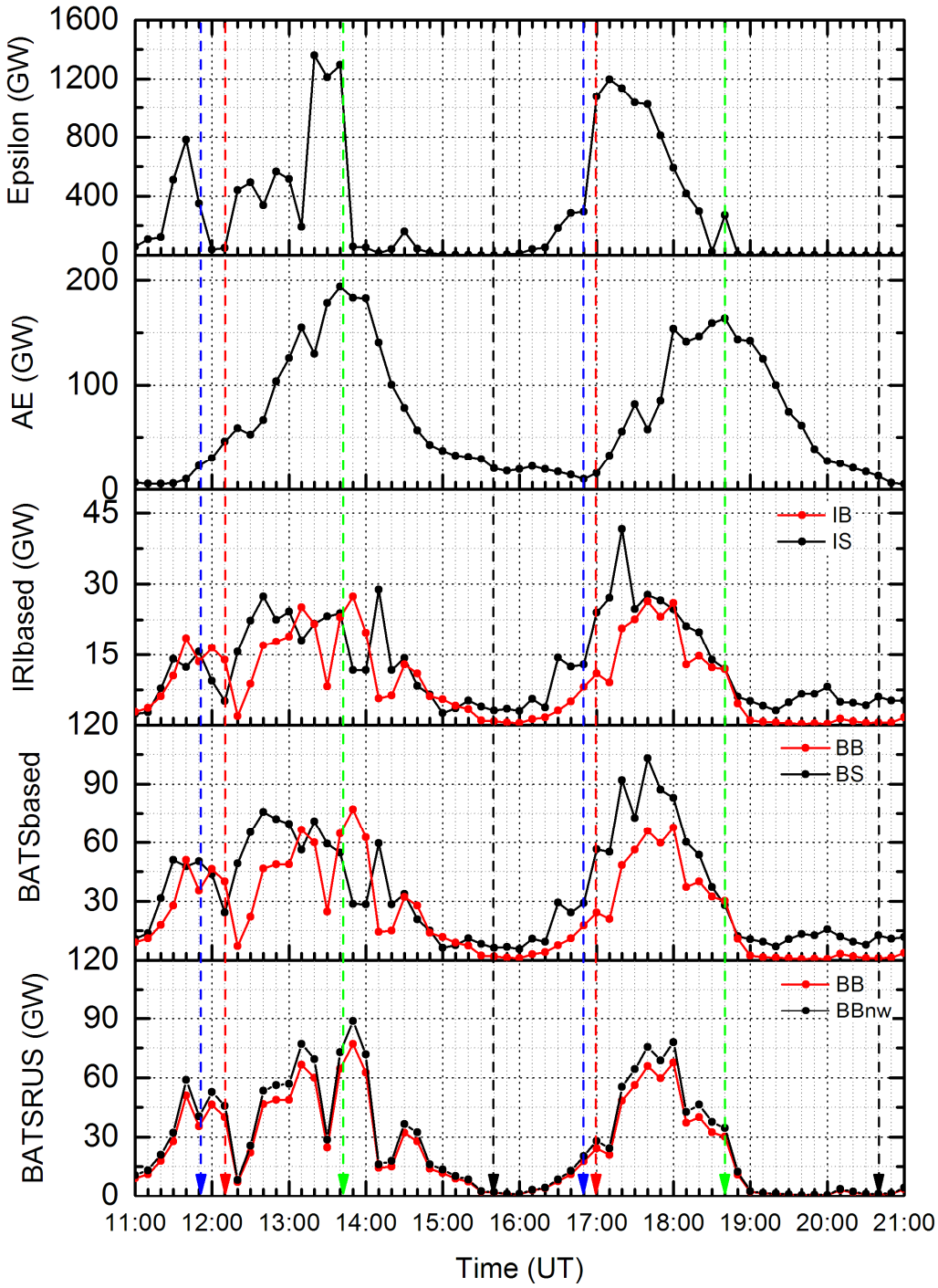
Şekil 33. +IMF B_z (üst) ve –IMF B_z (alt) sektörüne karşı gelen ARTEMIS yoğunluk (sol) ve sıcaklık (sağ) istatistikleri.



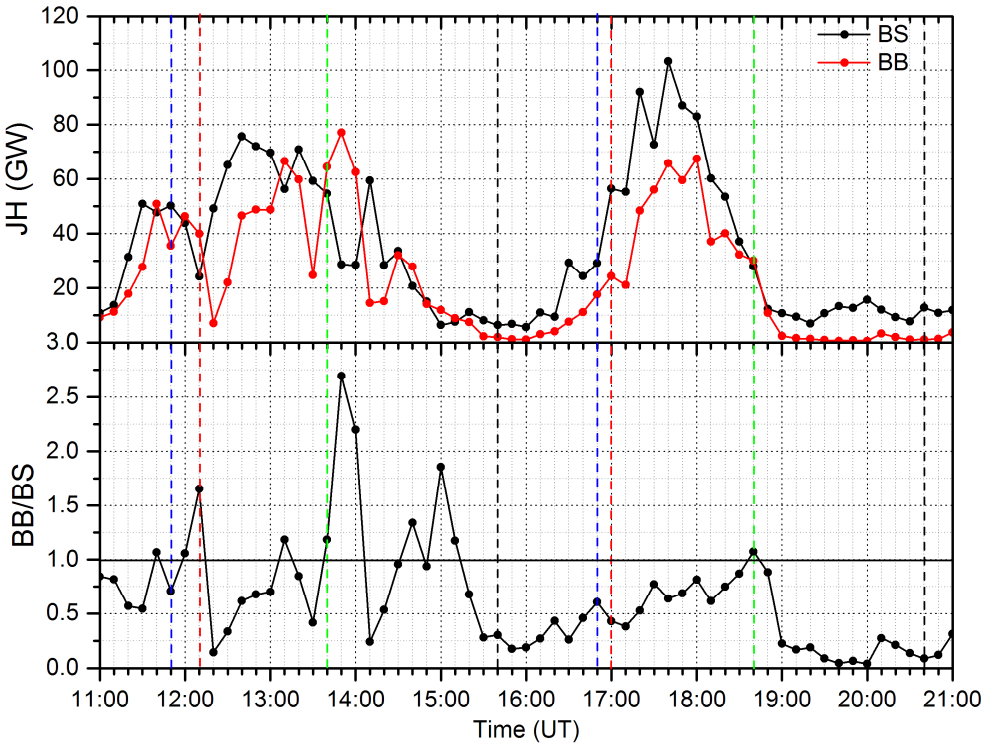
Şekil 34. +IMF B_z (üst) ve–IMF B_z (alt) sektörlerine karşı gelen ARTEMIS yoğunluk (sol) ve sıcaklık (sağ) dağılımları.



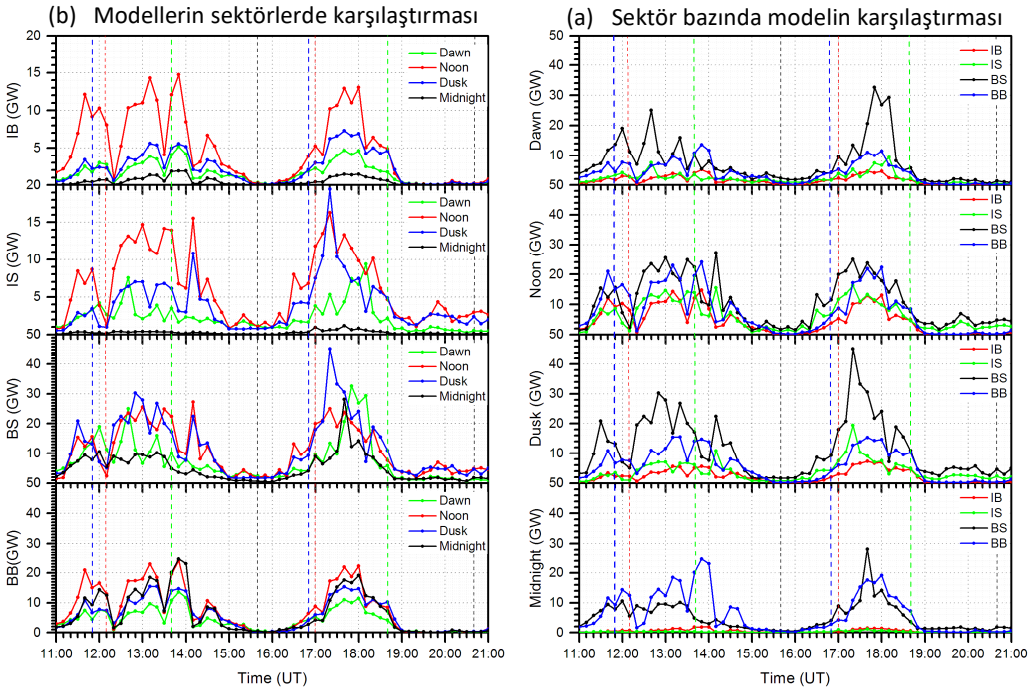
Şekil 35. ARTEMIS uydusunun 7/Mart/2012 tarihindeki manyetik kuyruk geçişinin model ile karşılaştırması. Sol üstteki ilk dört panelde, sıra ile, uydu ve model manyetik alan vektörleri xy- ve xz- düzleminde karşılaştırılmaktadır. Sol alttaki dört panelde ise xy- ve xz-düzlemlerindeki uydu ve model plazma hızı vektörleri karşılaştırılmaktadır. Sağ üstteki ilk iki panelde uydu ve model manyetik vektörleri yz-düzleminde karşılaştırılırken, sağ ortadaki iki panelde ise uydu ve model plazma hızı vektörleri yz-düzleminde verilmektedir. Yine sağ tarafta, en altta ise uydunun 7/Mart/2012 tarihinindeki geçişine karşı gelen AE manyetosferik mikrofırtına indisi gösterilmektedir. İndis bu geçiş esansında manyetosferik fırtına olduğunu göstermektedir.



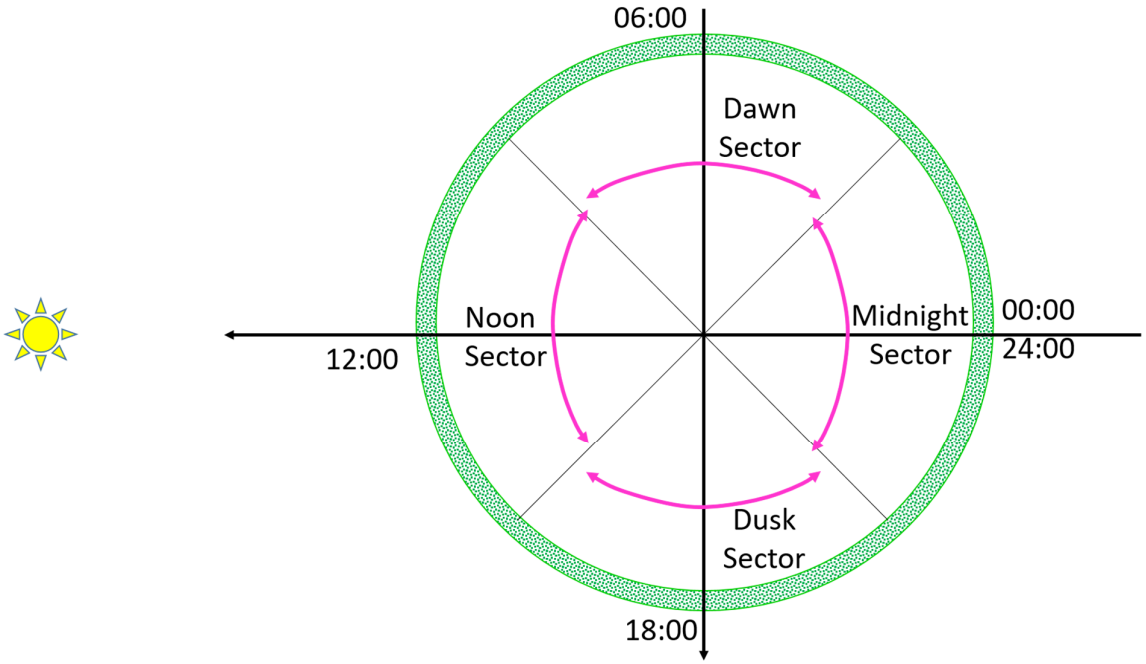
Şekil 36. Birleştirilmiş farklı metod ve modellerin Joule ısınması tahminlerinin 8/Mart/2008 manyetik fırtınası esnasında karşılaştırılması.



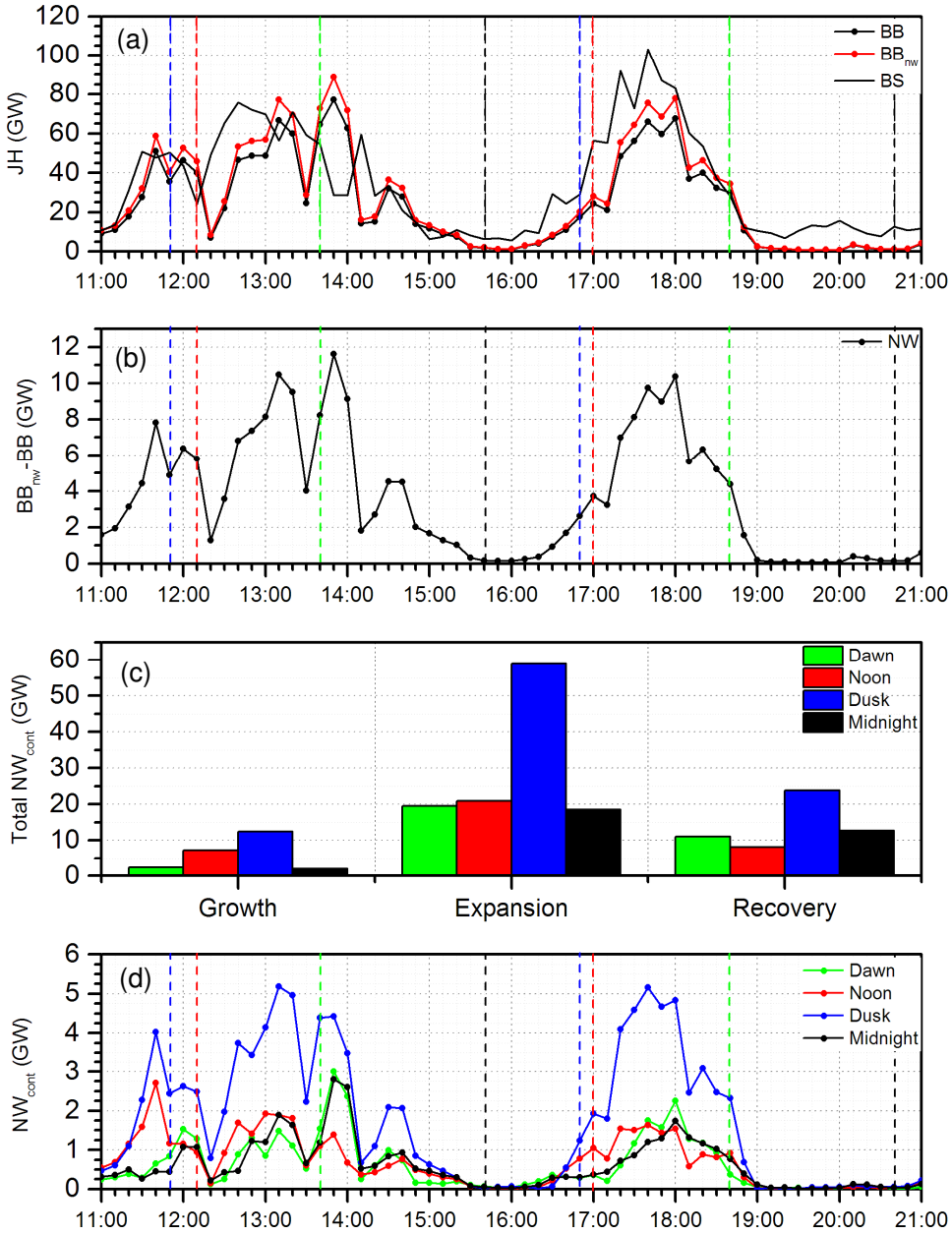
Şekil 37. Farklı metod ve modellerin Joule ısınması tahminlerinin karşılaştırılması. (a) BB (BATSRUS modeli) ve BS (BATSRUS ve SuperDARN birleşimi) karşılaştırması (b) İki metod ile elde edilen Joule ısınması değerlerinin oranı.



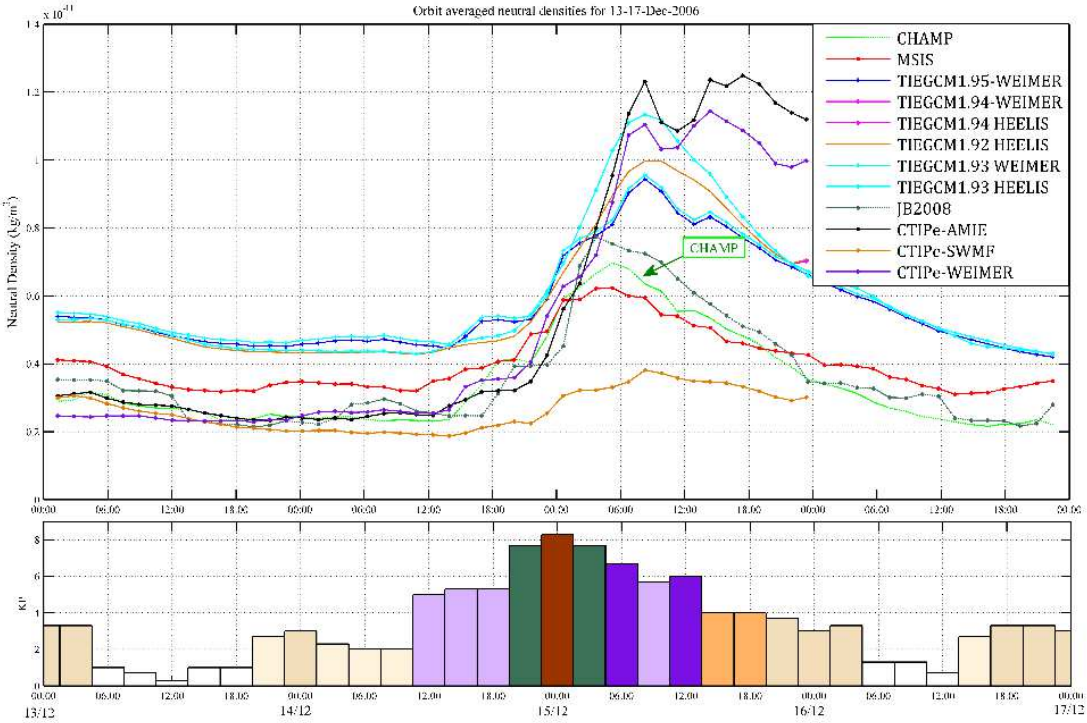
Şekil 38. Joule ısınması metod/model tahminlerinin manyetik sektörlere göre incelenmesi. (a) Modellerin Joule ısınması değerleirnin manyetik sektöre göre karşılaştırılması. Düşey eksende modeller yeralmaktadır. Renkli eğriler ilgili modelin farklı sektörlerdeki tahminlerini vermektedir. (b) Modellerin kendi içlerinde farklı sektörlerde değerlendirilmesi. Düşey eksende sektörler yeralmaktadır. Renkli eğriler ilgili sektörde dört modelin tahminlerini karşılaştırmaktadır.



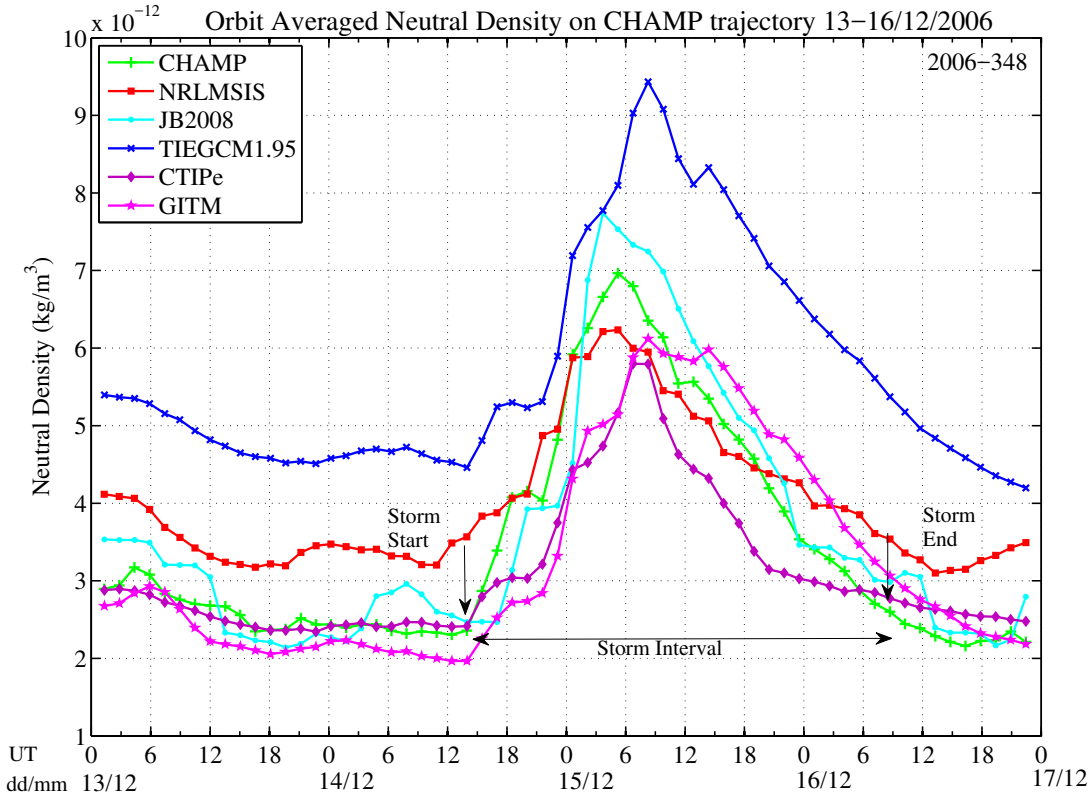
Şekil 39. Sektör tanımlamasını gösteren çizim: sabah sektörü (00:00-06:00 UT), öğlen sektörü (06:00-12:00 UT), akşam sektörü (12:00-18:00 UT), gece (veya gece yarısı) sektörü (18:00-24:00 UT). Şekil ölçekli çizilmemiştir.



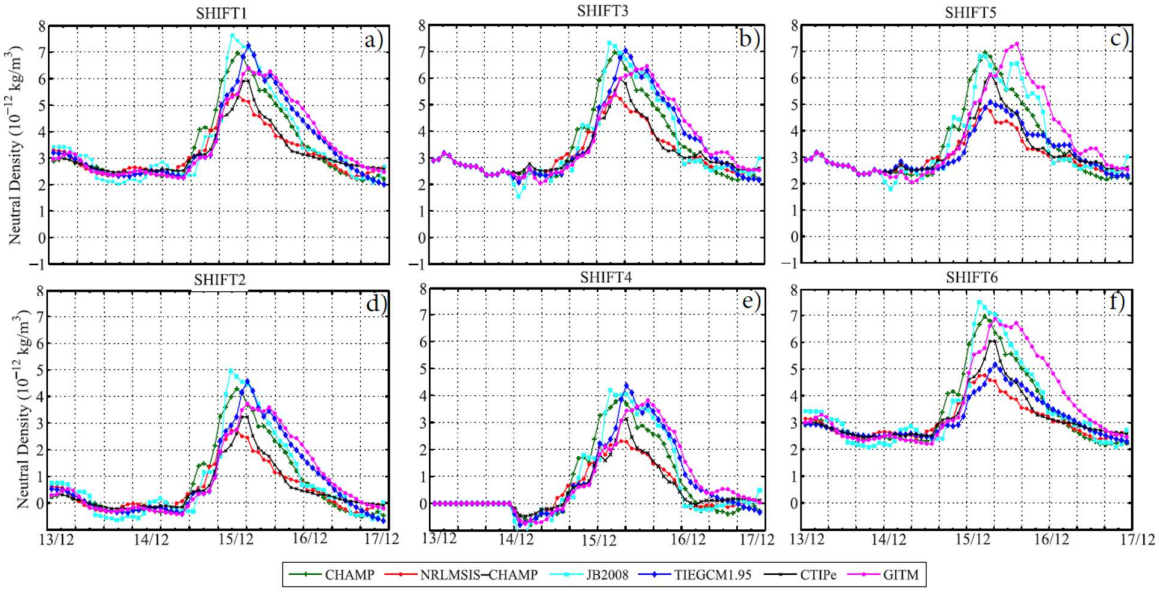
Şekil 40. Nötral rüzgârın Joule ısınması üzerine etkisinin manyetik sektör bazında metod/model karşılaştırmaları. a) Modellerin nötral rüzgârın olduğu (Bnw, kırmızı) ve olmadığı (BB, BS) durumlar için karşılaştırması. b) Nötral rüzgâr etkisinin iki modelin farkını alarak sayısallaştırılması (Bnw-BB). c) Nötral rüzgârın manyetik fırtına fazına ve manyetik sektöre göre dağılımı. d) Nötral rüzgârın sektör bazında zamana göre değişimi.



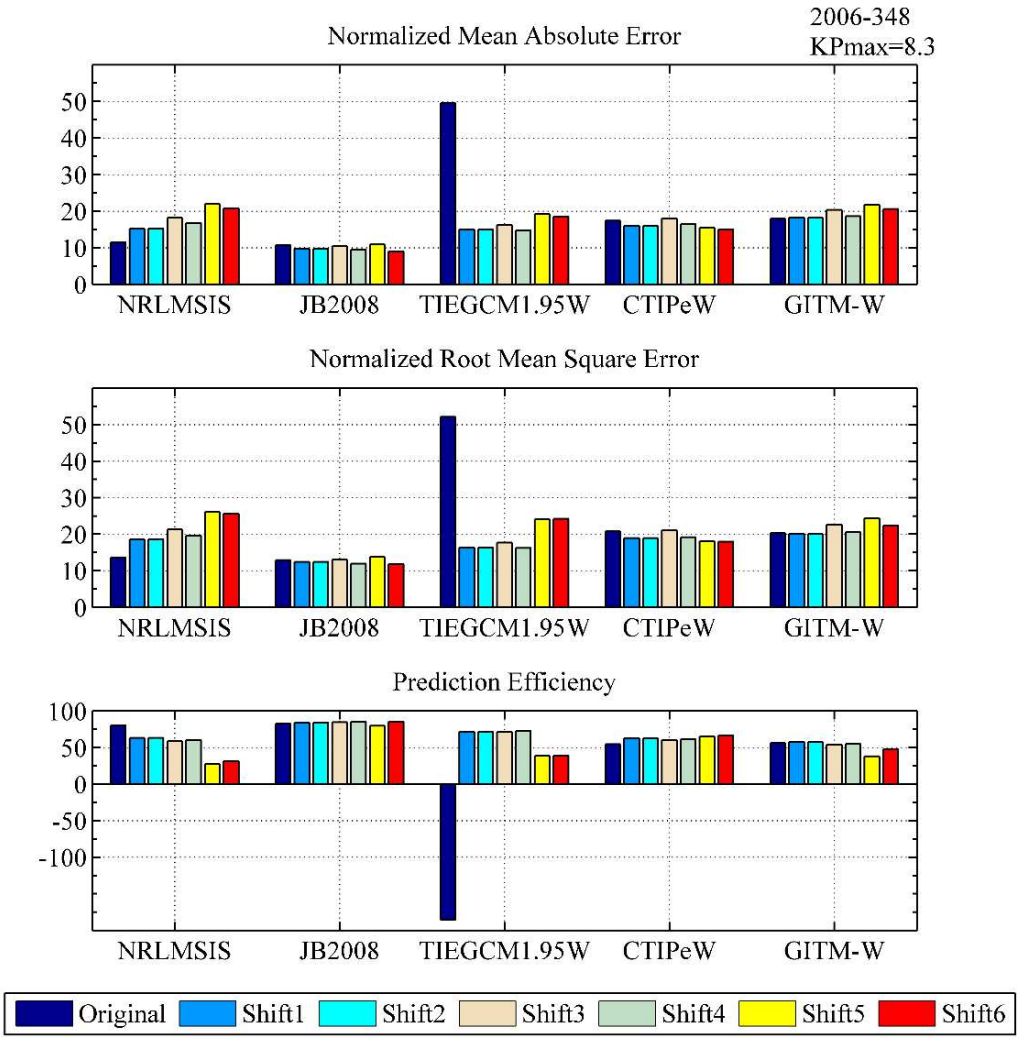
Şekil 41. 13-17 Aralık 2006 zaman aralığı için modellerin farklı yukarı enlem model sürücüleri ile koşturulması ve CHAMP verisi ile aralarındaki farklar.



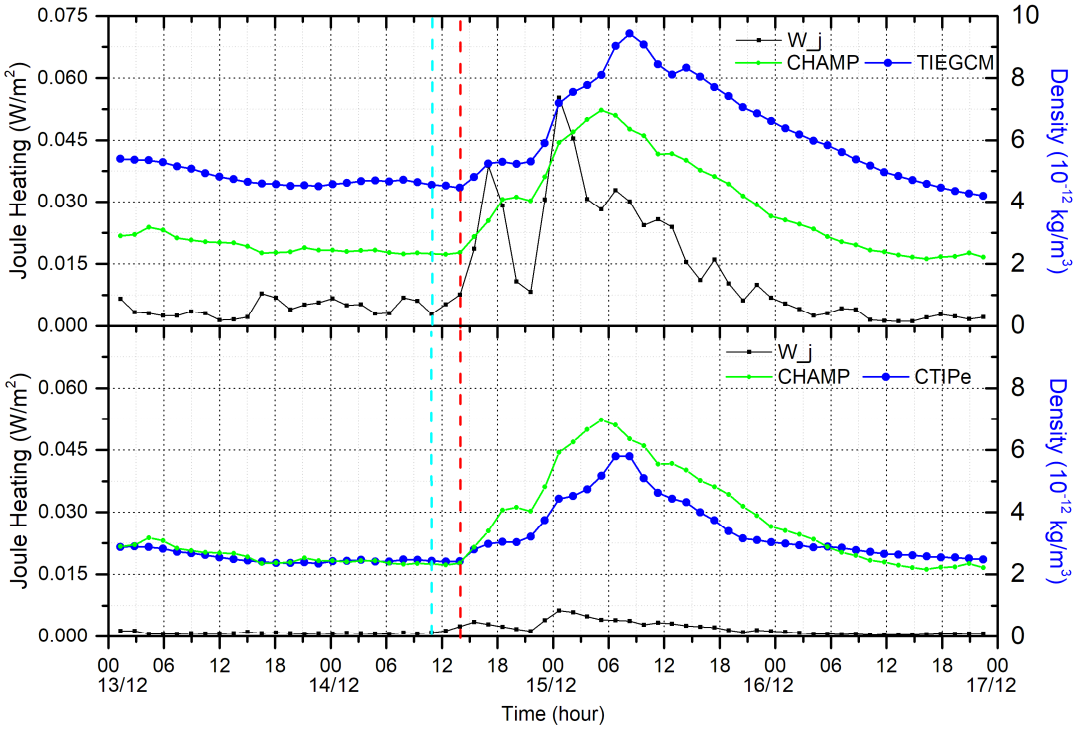
Şekil 42. 13-17 Aralık 2006 zaman aralığı için modellerin Weimer iyonosferik potansiyel modeli ile koşturulması ve CHAMP verisi ile aralarındaki farklar.



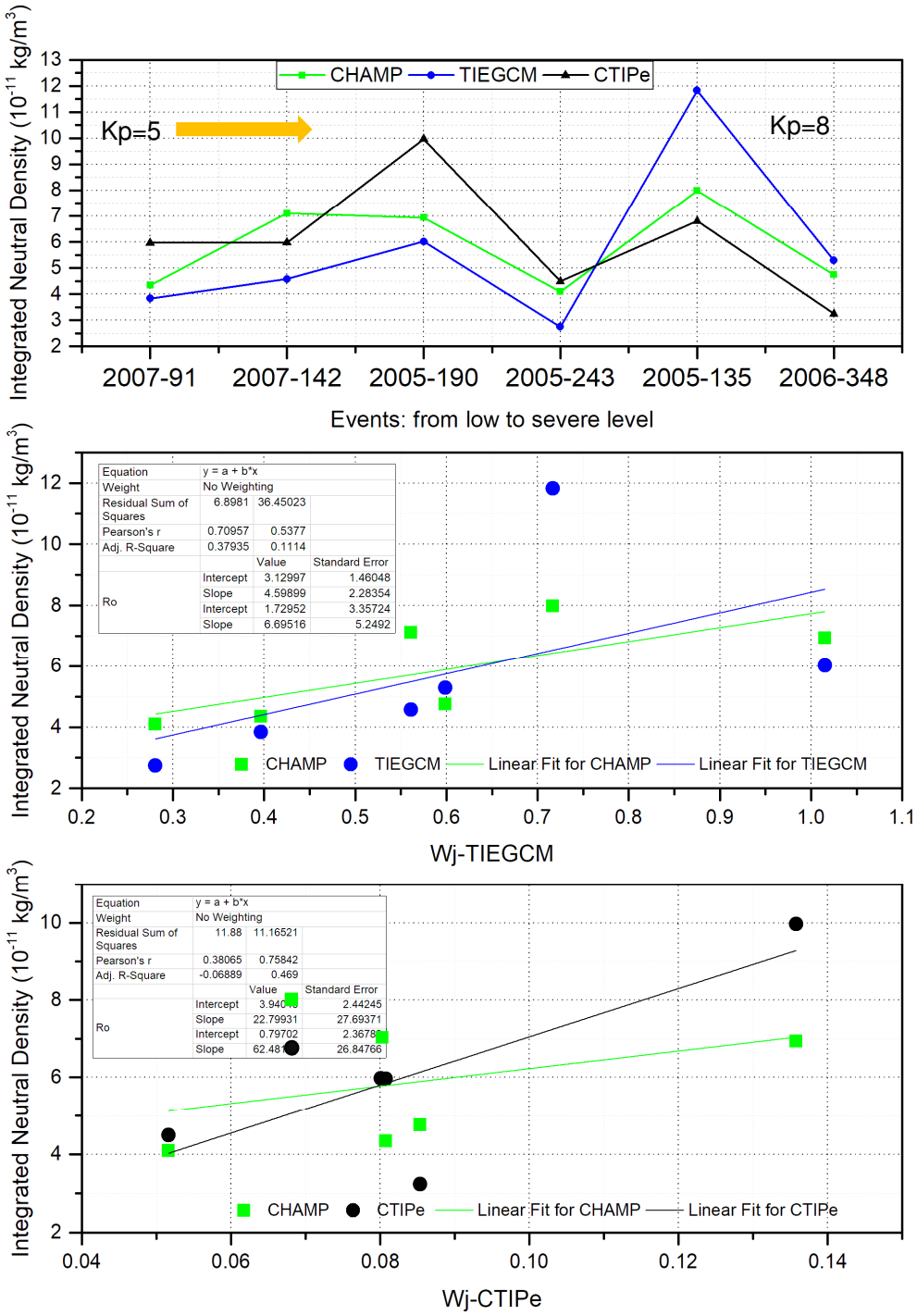
Şekil 43. CHAMP uydusu nötral yoğunluk değerlerinin (yeşil) farklı iyonosferik modellerin tahmin sonuçları ile karşılaştırılması ve model klimatolojsisinin farklı kıstaslara göre elenmesi.



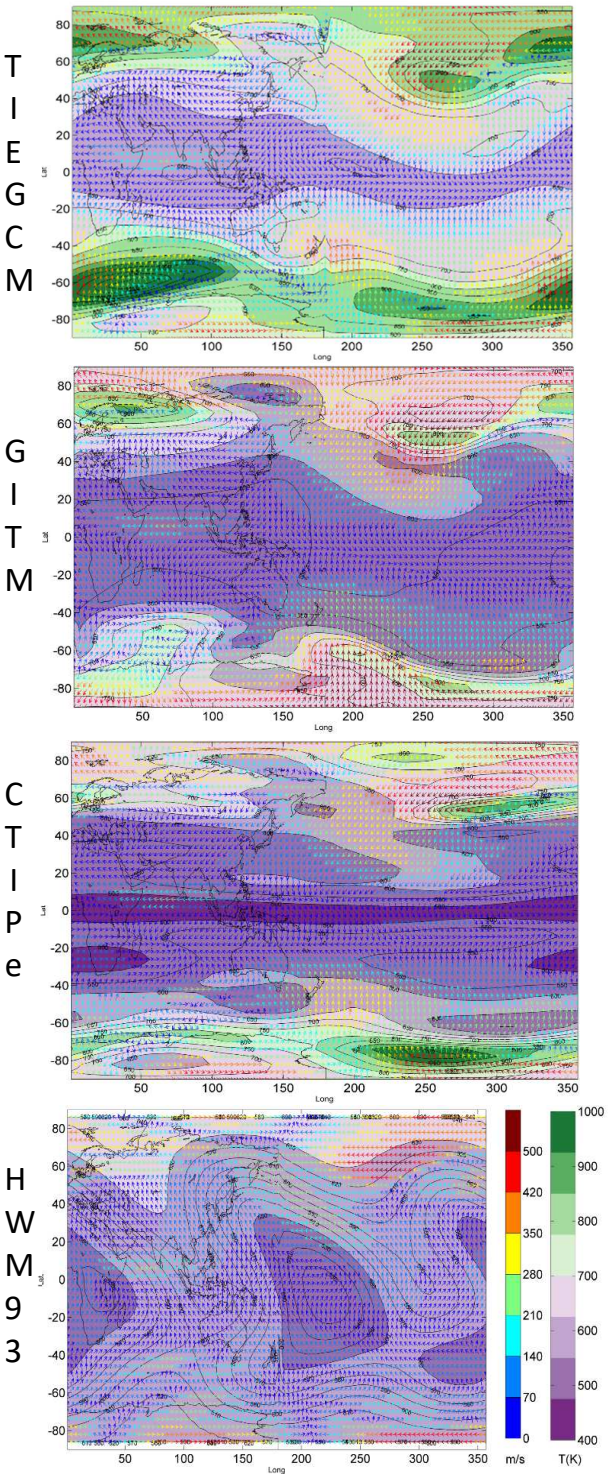
Şekil 44. Klimatoloji elemesi öncesi ve sonrası model başarı sonuçları. Shift 1 ve Shift2 model klimatolojisini elemede ve model başarısını arttırmakta diğer yöntemlerden daha verimli bulunmuştur. Yukarıdan aşağıya: normalize edilmiş ortalama mutlak fark, normalize edilmiş kök ortalama kare hatası, tahmin verimliliği.



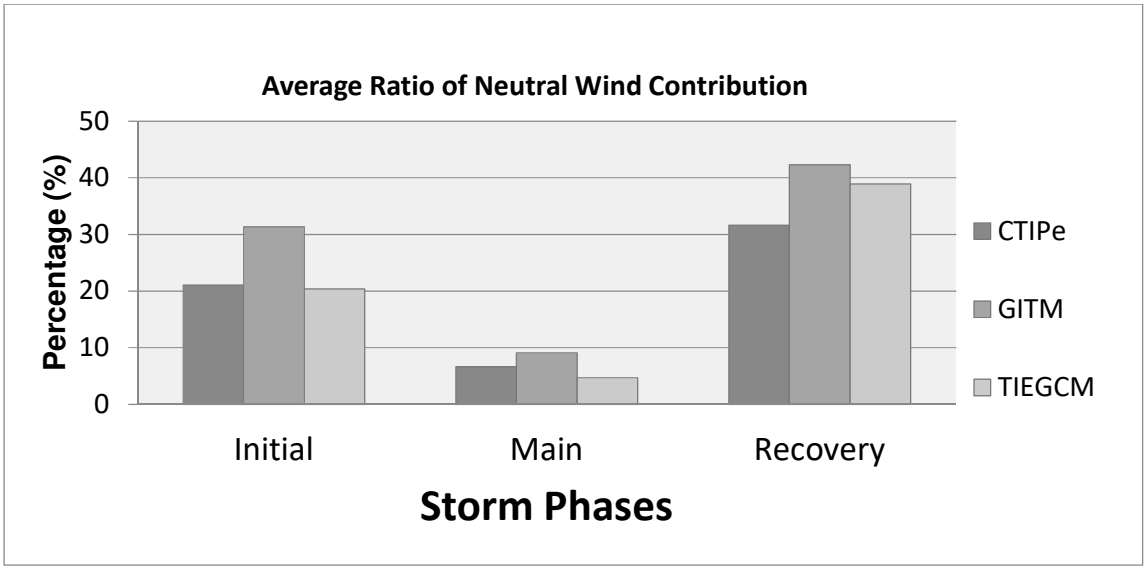
Şekil 45. 13-17 Aralık 2006 zaman aralığı için Joule ısınmasının termosferik nötral yoğunluklara etkisi ve aralarındaki zaman farkı. a) TIEGCM modeli, b) CTIPe modeli.



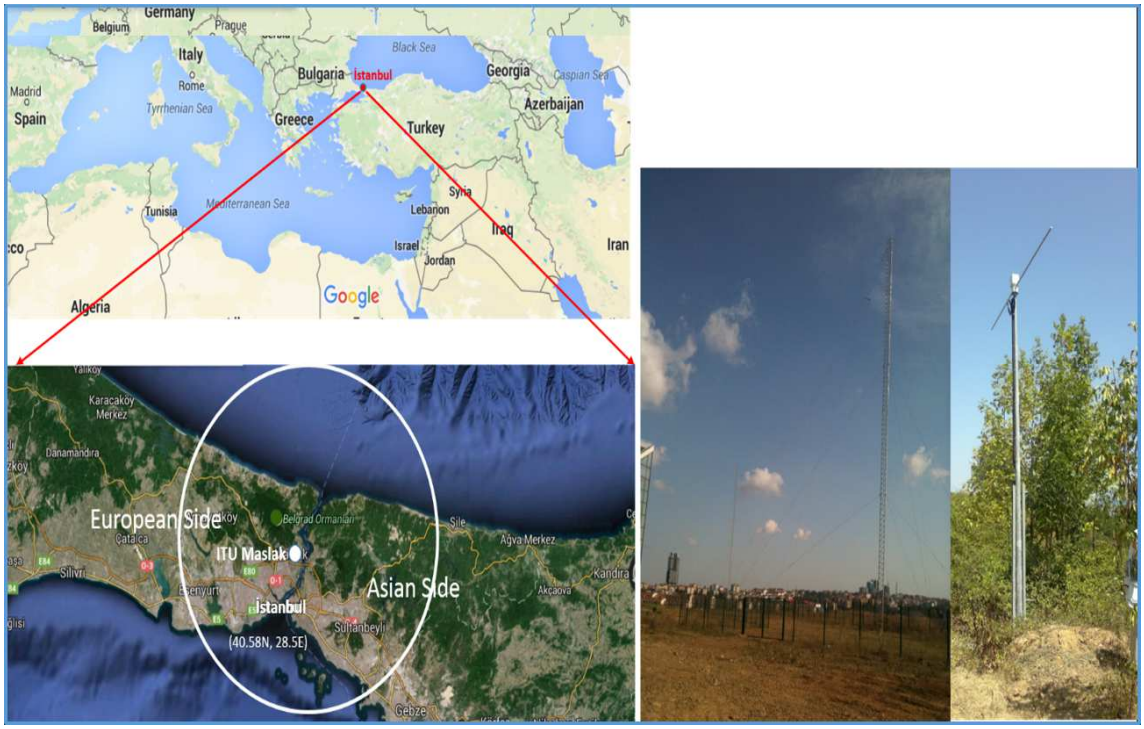
Şekil 46. Seçilen altı vaka için modellerden elde edilen toplam Joule ısınması ve toplam (klimatolojisi elenmiş) nötral yoğunluk arasındaki ilişki. Birinci panel manyetik aktivite seviyesine göre nötral yoğunluk değişimini vermektedir. En düşük aktivite seviyesinden en yükseğe doğru. Yatay eksendeki vaka ID'leri Kp seviyeleirni vermektedir. İkinci panel TIEGCM modeli ve üçüncü model CTIPe modeli Joule ısınması sonuçlarını göstermektedir.



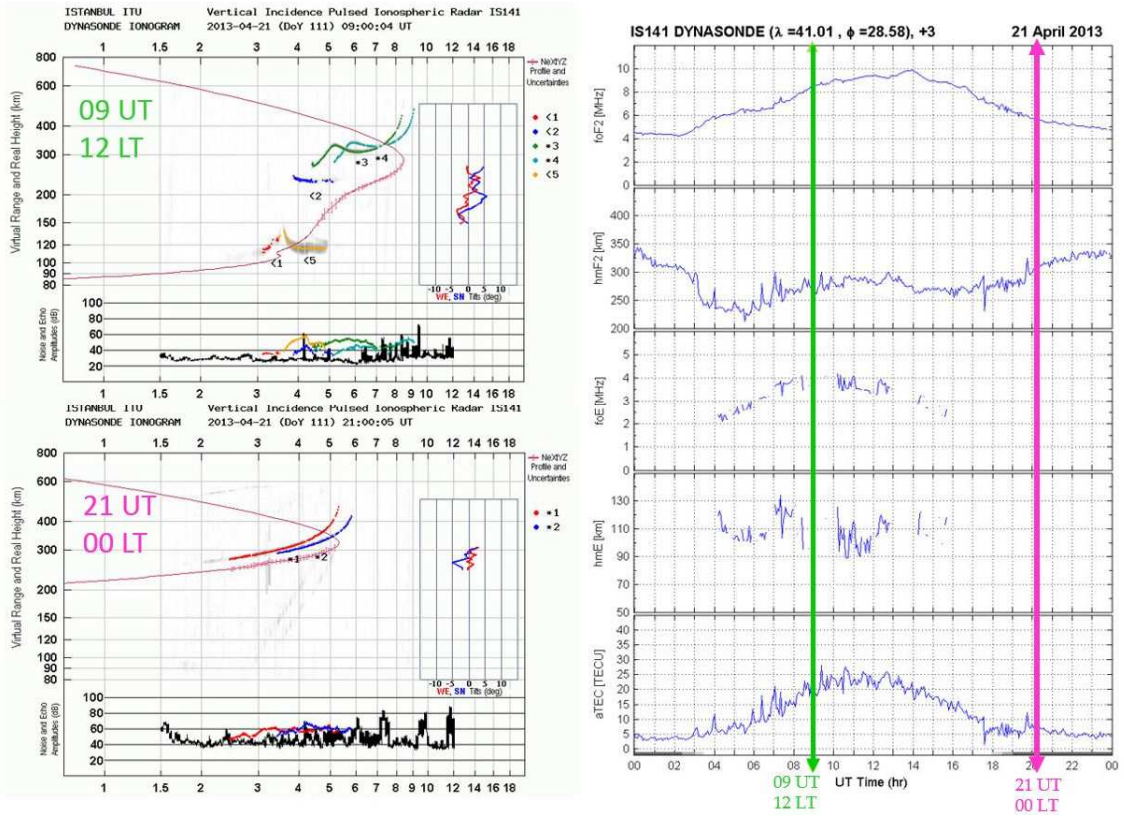
Şekil 47. 15/Mayıs/2005, saat 08:00 UT'de meydana gelen manyetik fırtınanın ana faz döneminde (Dst: maksimum -263 nT) TIEGCM, GTIM, CTIPe ve HWM93 iyonosfer modellerinden elde edilen nötral rüzgâr ve sıcaklığın 140 km'deki enlem-boylam dağılımı. Vektörler nötral rüzgâr vektörleri, konturlar akım çizgileridir. Rüzgâr şiddeti okların renkleri ile (m/s) olarak gösterilmektedir. Renkli konturlar ise sıcaklığı göstermektedir.



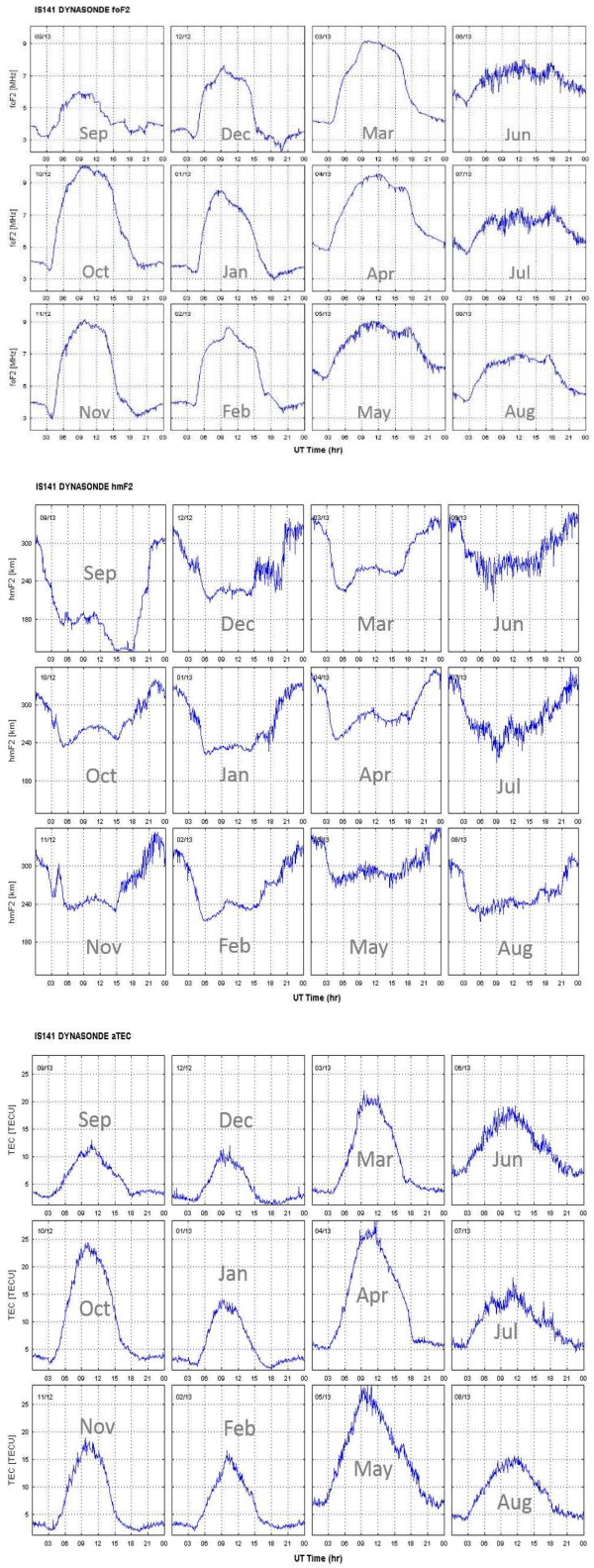
Şekil 48. Iyonosferik modellerin (CTIPe, TIEGCM, GTIM) manyetik fırtınanın değişik fazlarındaki Joule ısınması tahminlerinin karşılaştırılması.



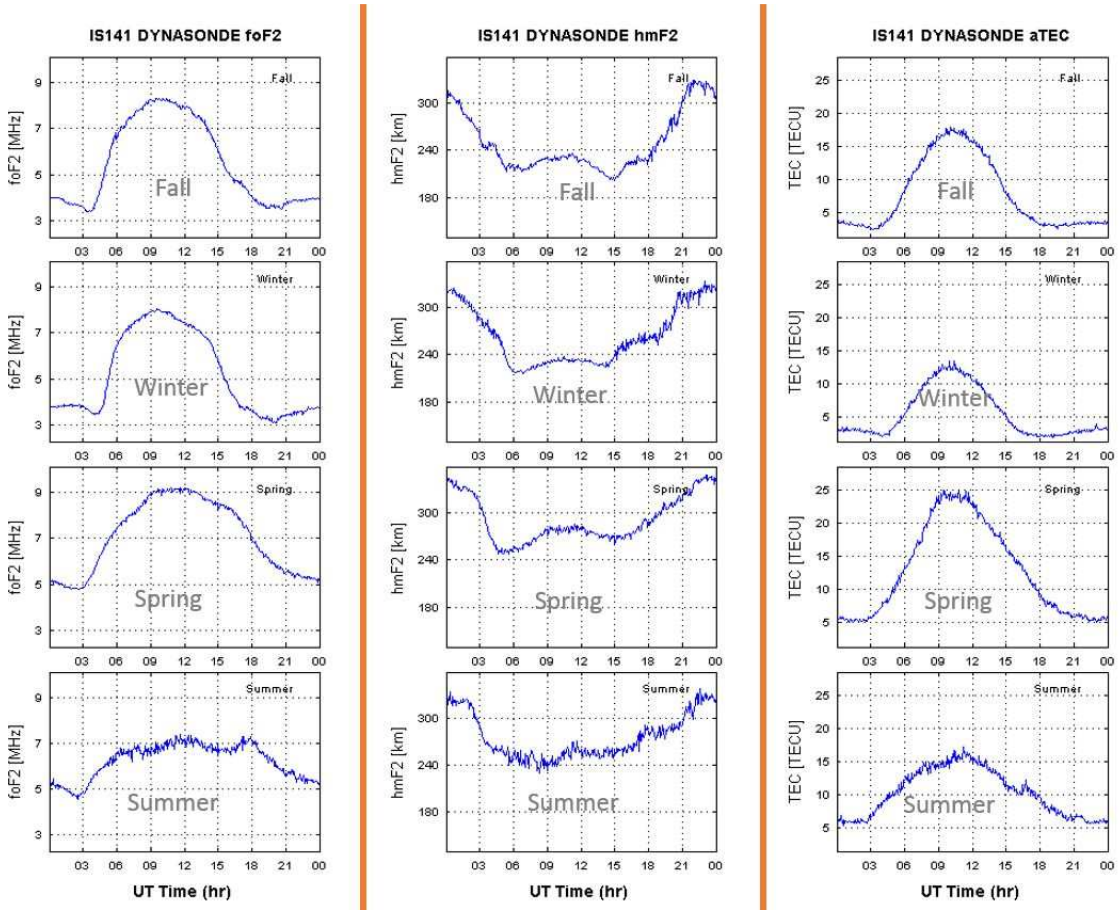
Şekil 49. İTÜ Yukarı Atmosfer ve Uzay Havası Laboratuvarı iyonozonde istasyonunun arazideki konumu.



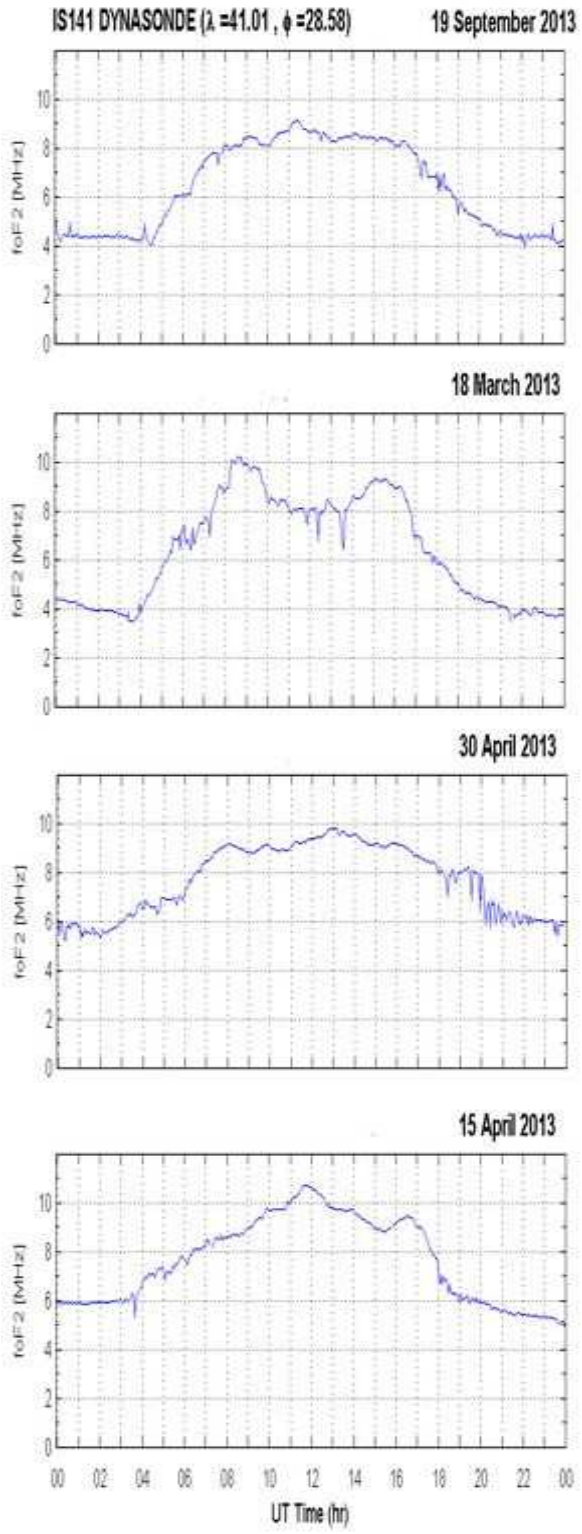
Şekil 50. (Sağ) 21/Nisan/2013 gününe ait ionogram örneği. (Sol) kritik frekans ve TEC zaman serisi örneği.



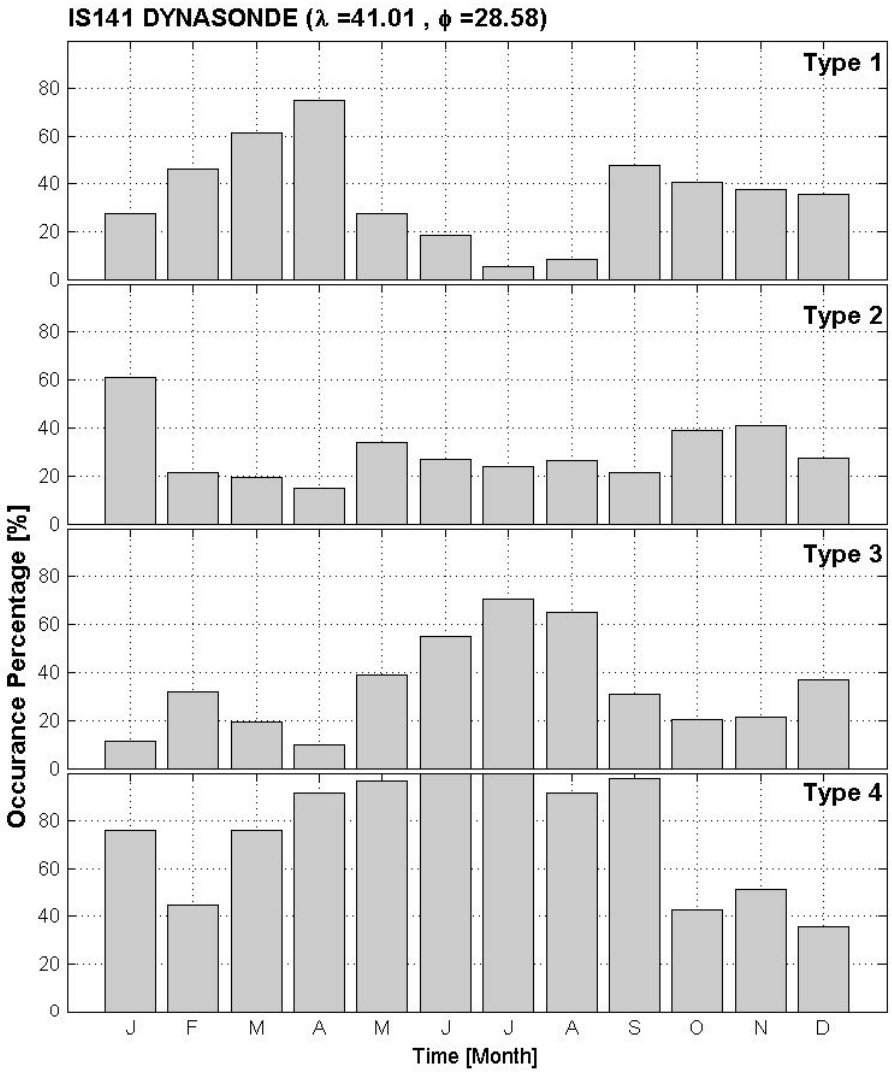
Şekil 51. Ekim 2012-Ekim 2013 tarihleri arasında istatistiksel olarak foF2 (üst), hmF2 (orta) ve TEC (alt) değerlerinin günlük değişiminin aylara göre dağılımı.



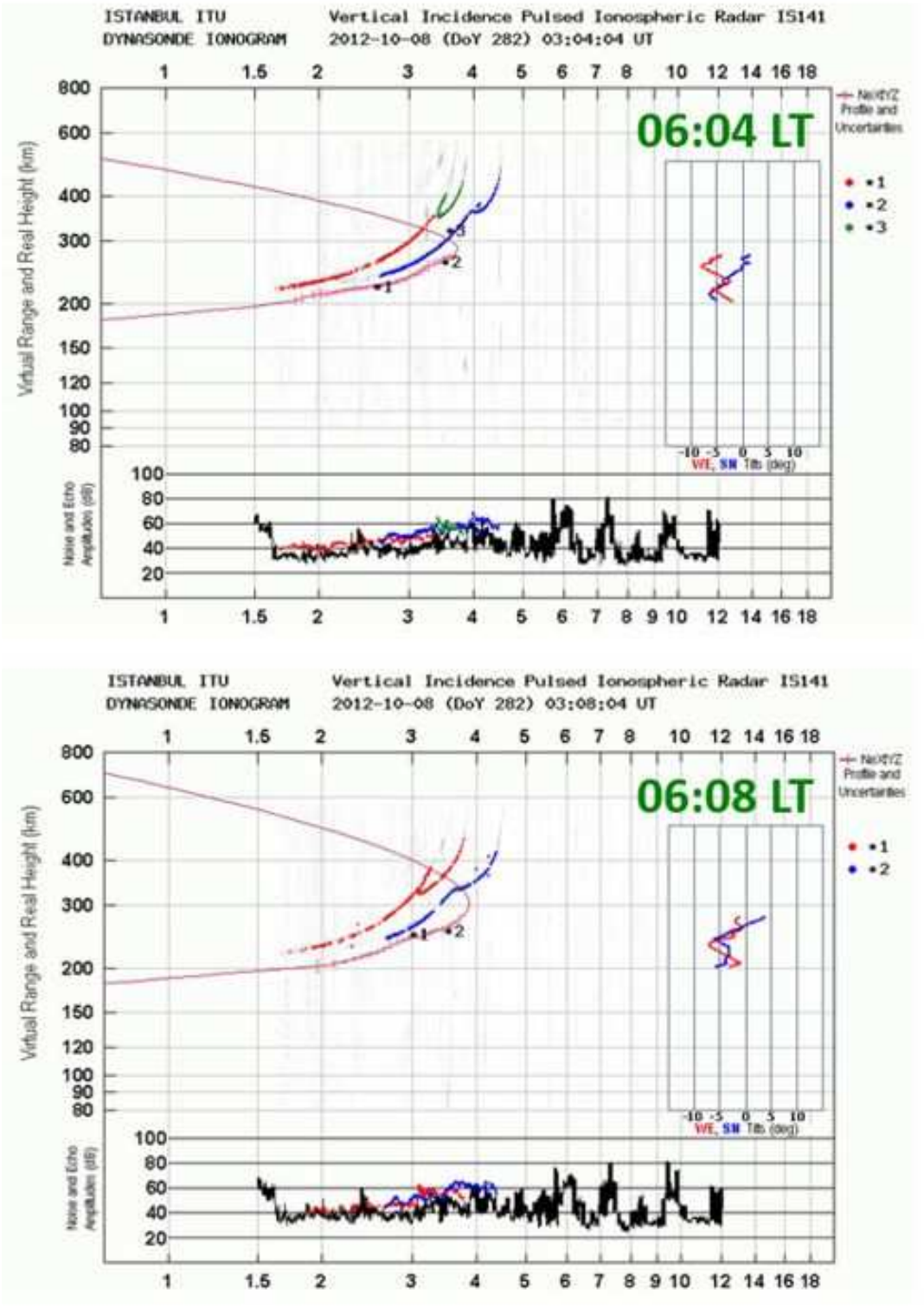
Şekil 52. Ekim 2012-Ekim 2013 tarihleri arasında istatistiksel olarak foF2 (üst), hmF2 (orta) ve TEC (alt) değerlerinin günlük değişiminin mevsimlere göre dağılımı.



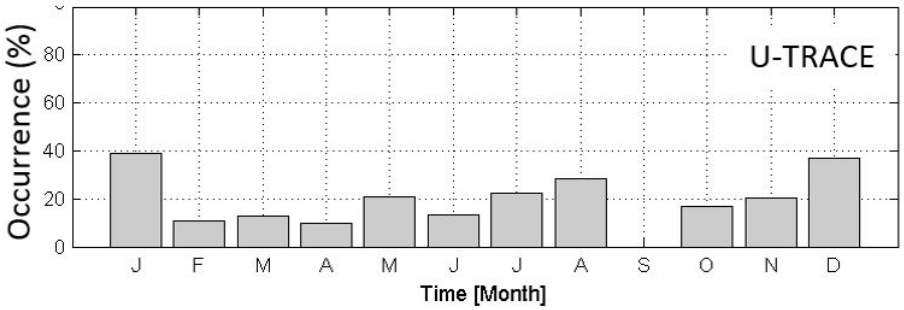
Şekil 53. İstanbul üzerindeki iyonosferik elektron yoğunluğunun en tipik günlük dağılımlarına örnekler. En yaygın görülen 4-Tip dağılımın zaman serisi değişimi.



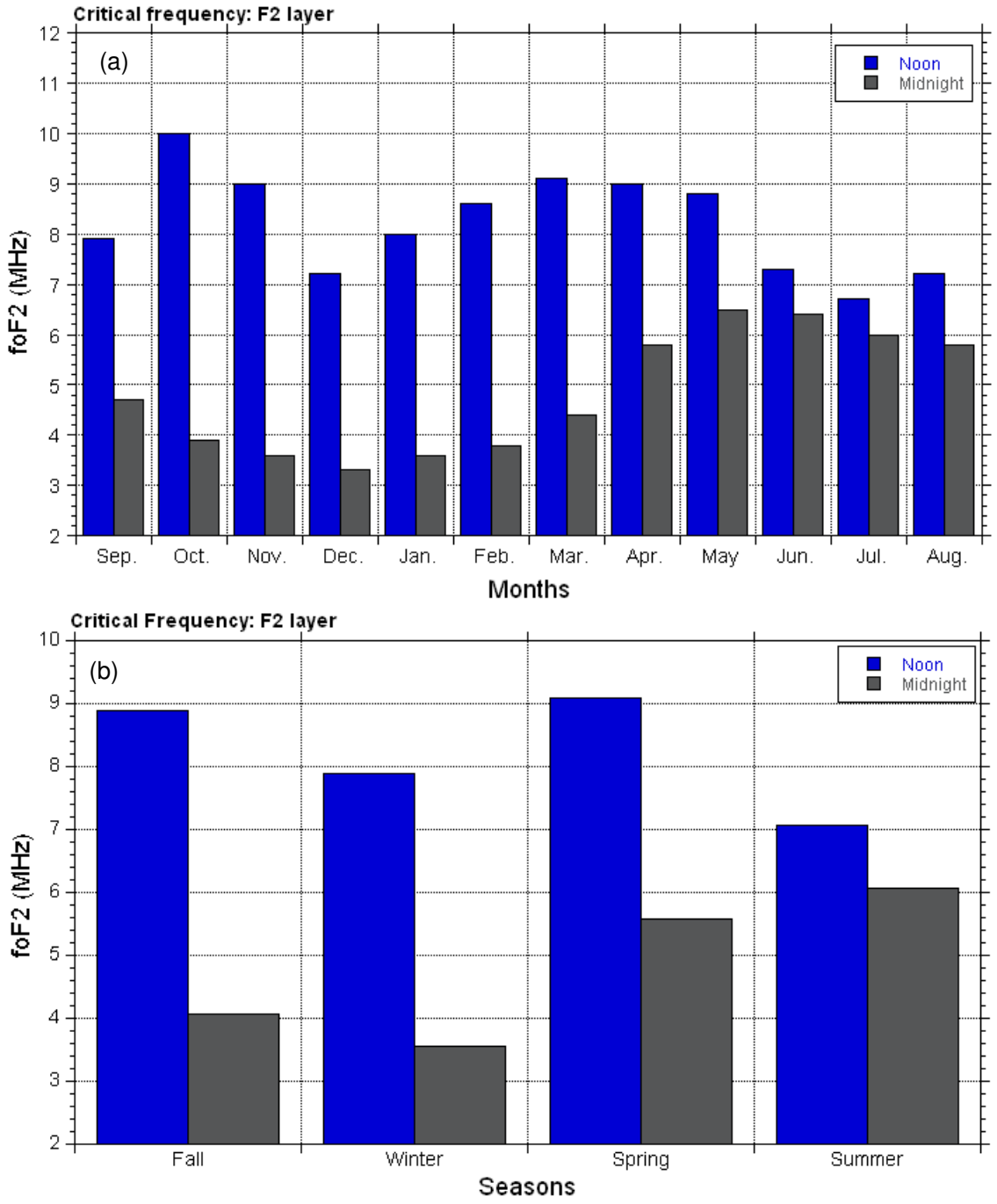
Şekil 54. İstanbul üzerinde görülen tiplerin aylara göre oluşum frekansı.



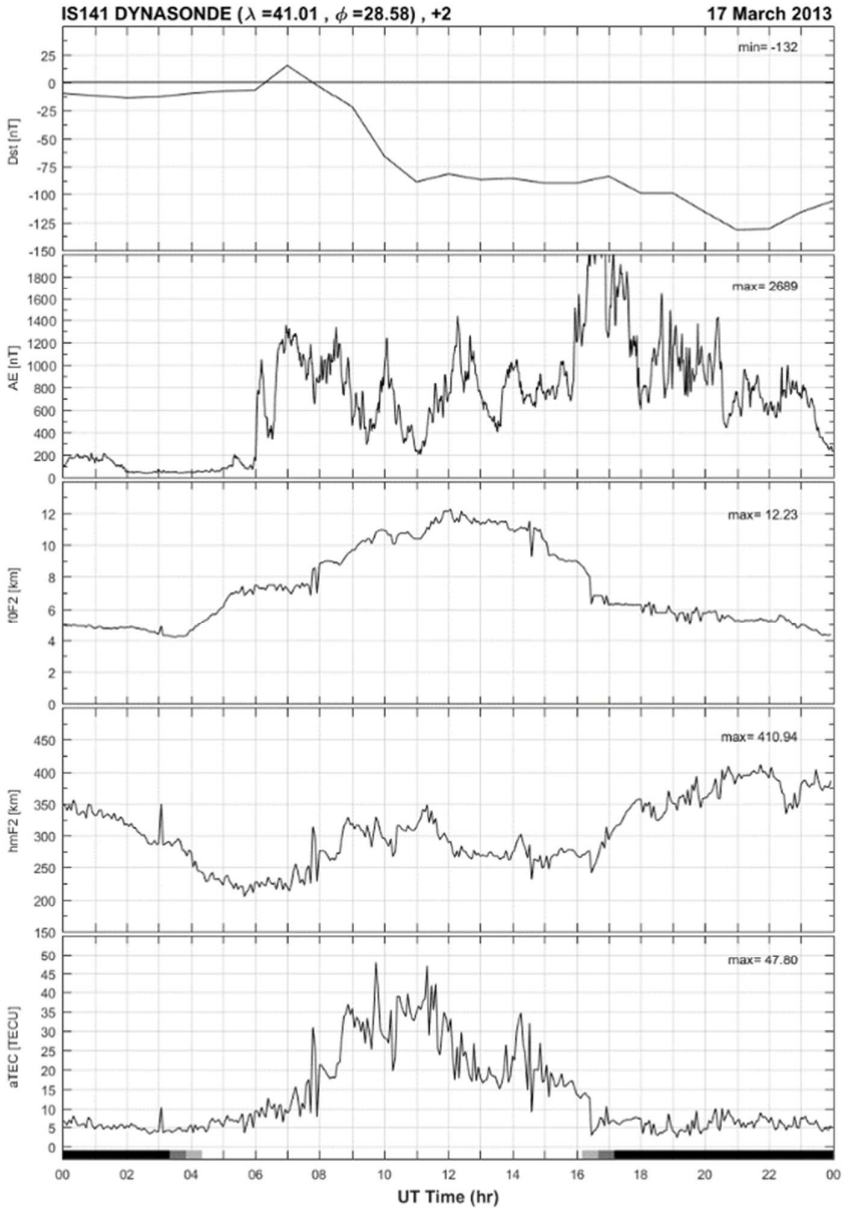
Şekil 55. İstanbul üzerinde 8/Ekim/2012 tarihinde görülen gravite dalgası örneği.



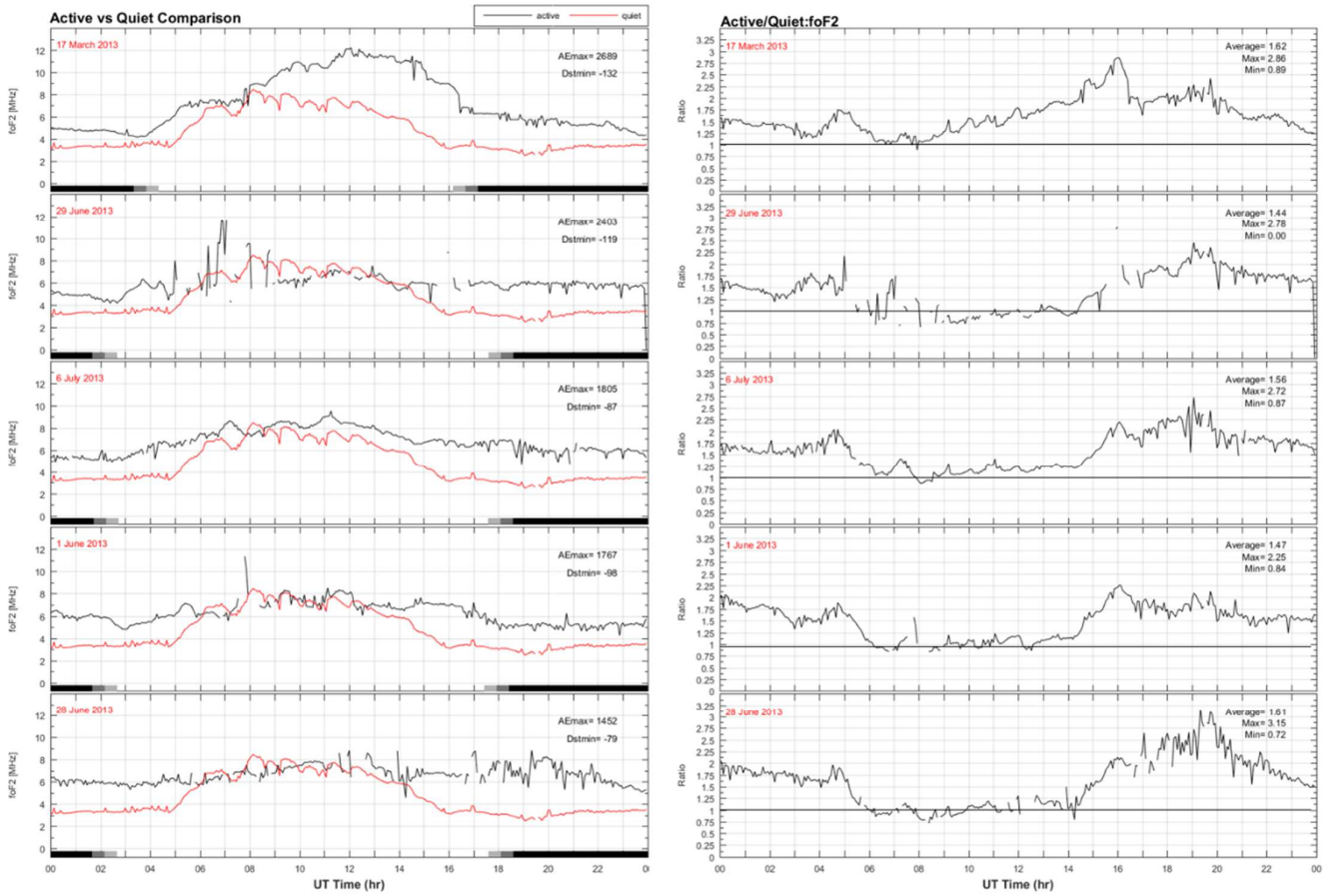
Şekil 56. İstanbul üzerinde kaydedilen gravite dalgası vakalarının aylara göre oluşum sıklığı.



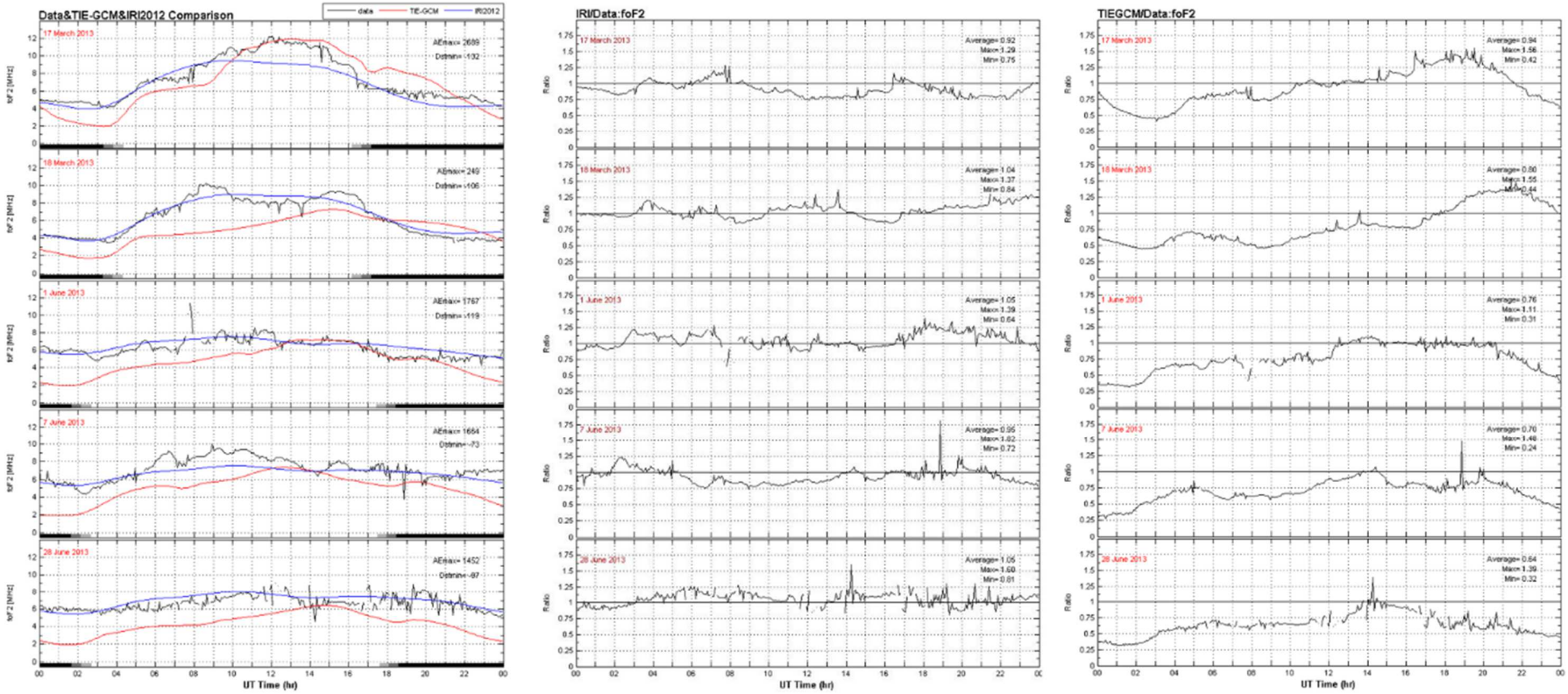
Şekil 57. F2 tabakasının kritik frekansının öğlen ve gece yarısı vakti değerlerinin (a) aylara ve (b) mevsimlere göre dağılımı.



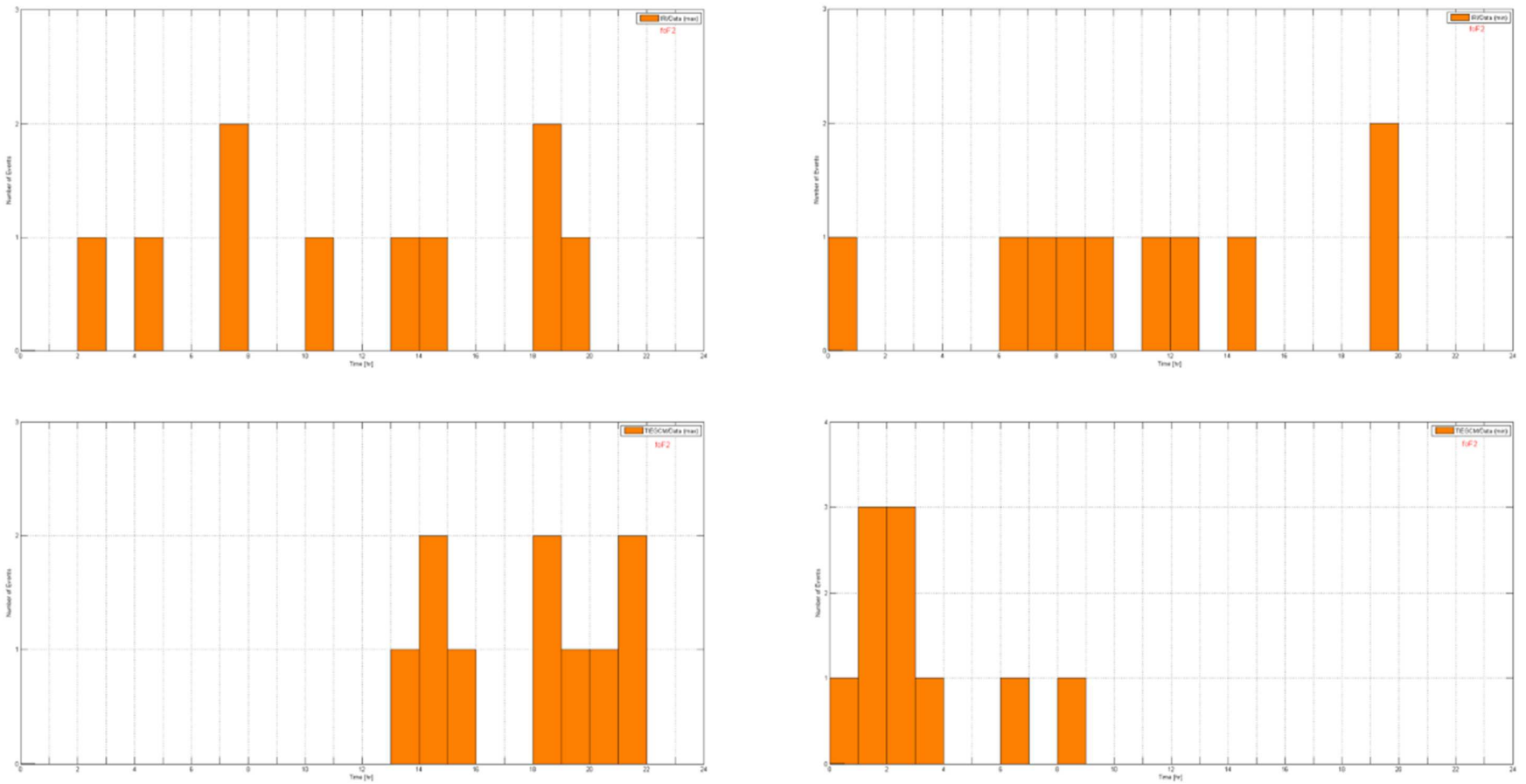
Şekil 58. Manyetik fırtına örneği (17/Mart/2013) ve bu gündeki yukardan aşağıya Dst, AE, foF2, hmF2 ve TEC değişimleri. Manyetik fırtınanın 06:00 UT'de başladığı görülmektedir.



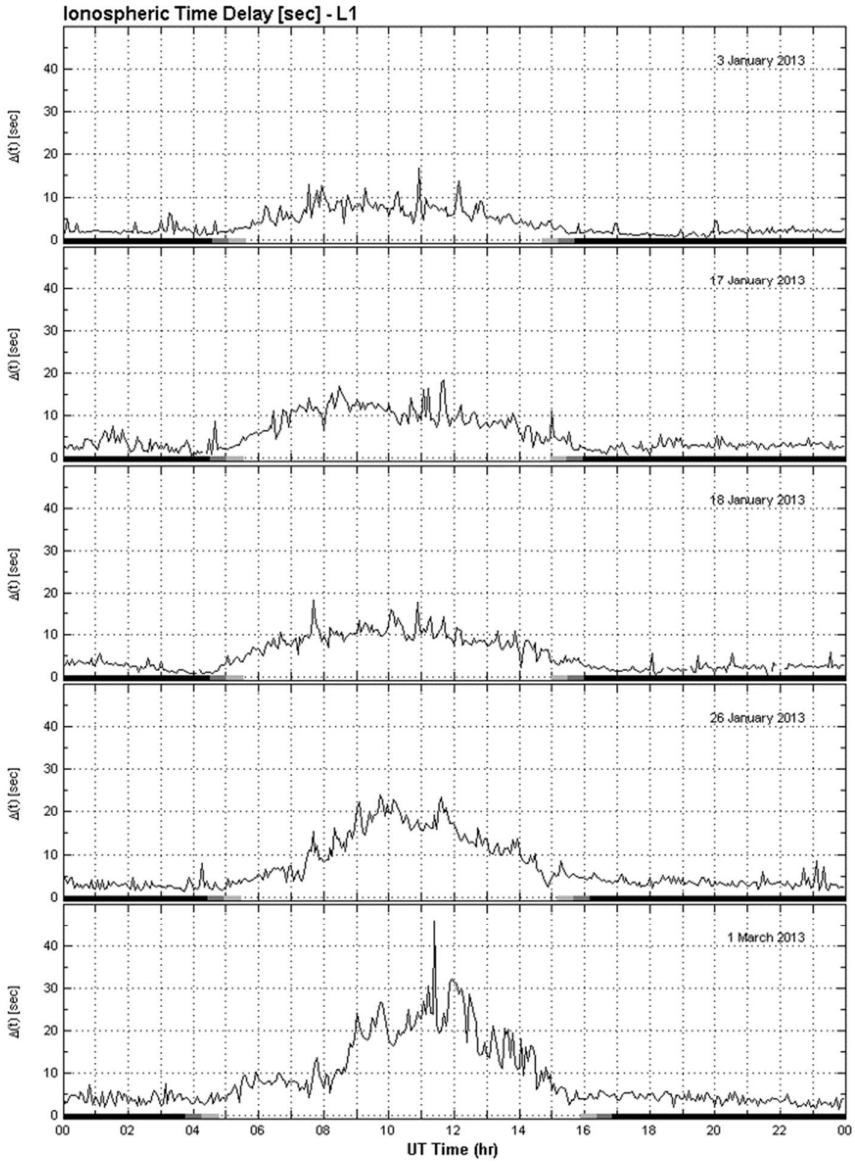
Şekil 59. (Sağ) Kritik frekansların (foF2) seçilen en şiddetli 5 manyetik fırtına (aktif gün) esnasındaki değişimlerinin sakin gün ile karşılaştırılması. Siyah manyetik olarak aktif gündeki foF2, kırmızı sakin gündeki foF2 değişimini göstermektedir. Bu örnekte sakin gün 3/Ocak/2013 olarak belirlenmiştir. (Sol) Aktif güne ait foF2'nin sakin gündeki foF2'e oranı.



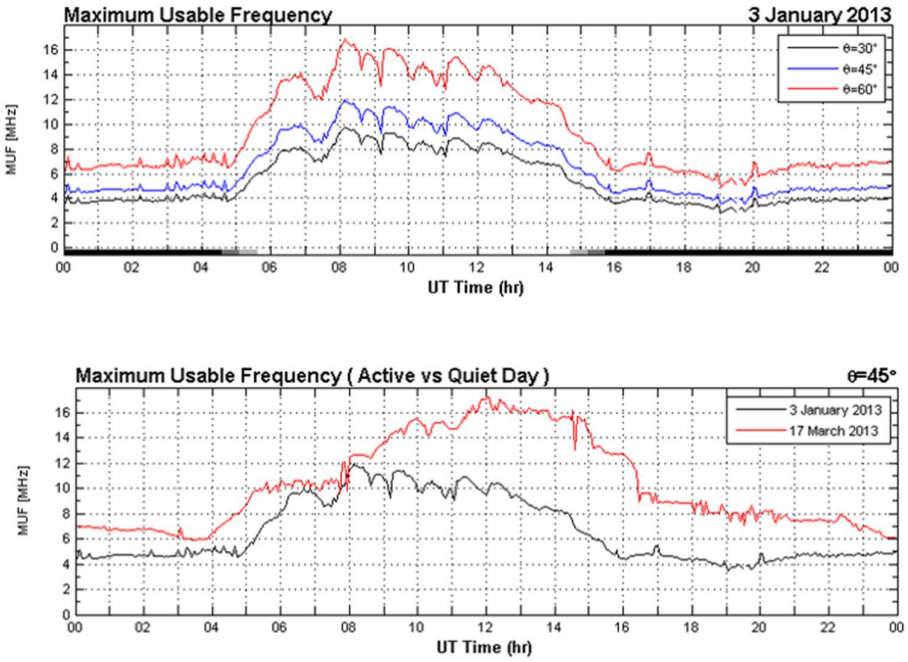
Şekil 60. Manyetik fırtınalar esnasında iyonosferik modellerin (TIEGCM ve IRI) foF2 tahminlerinin karşılaştırılması. (Sol) En kuvvetli 5 manyetik fırtına gününde foF2 nin değişiminin (siyah), IRI (mavi) ve TIEGCM (kırmızı) model sonuçları ile karşılaştırılması. (Orta) IRI model tahminlerinin gözlemlere (iyonozonde foF2) oranı. (Sağ) TIEGCM model tahminlerinin gözlemlere (iyonozonde foF2) oranı.



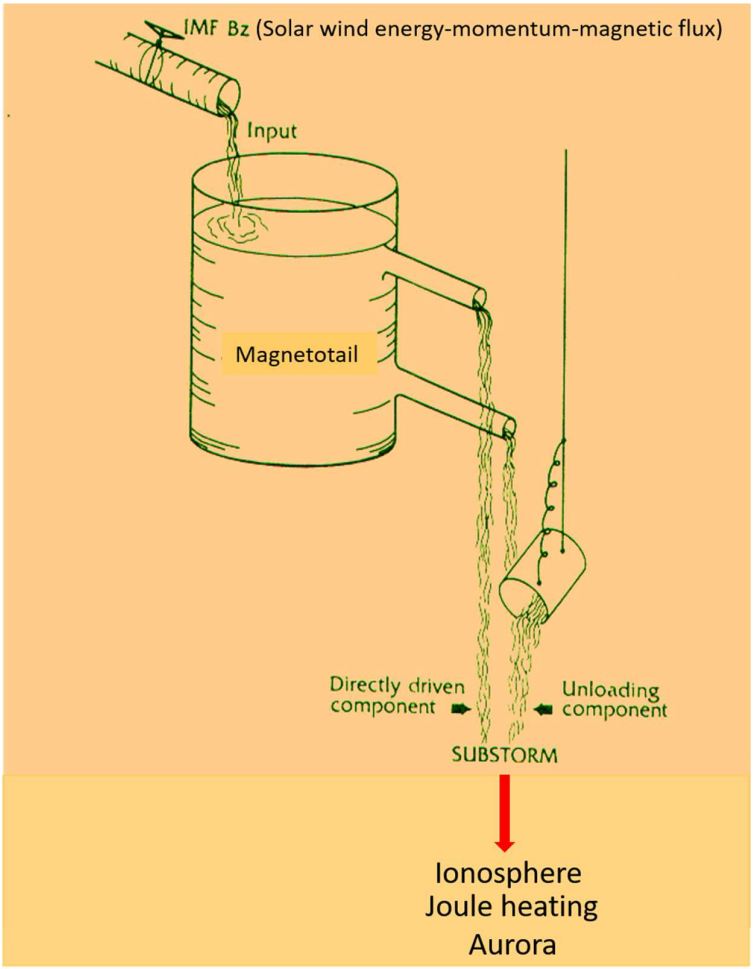
Şekil 61. Iyonosferik model tahminlerinin gözlemlerden en fazla (maksimum) ve en az (minimum) farklı olduğu zamanların belirlenmesi. (Sol, üstte) IRI model maksimum farklılıklarının saatlere göre dağılımı. (Sol, alt) TIEGCM model maksimum farklılıklarının saatlere göre dağılımı. (Sağ, üst) IRI model minimum farklılıklarının saatlere göre dağılımı. (Sağ, üst) TIEGCM model minimum farklılıklarının saatlere göre dağılımı.



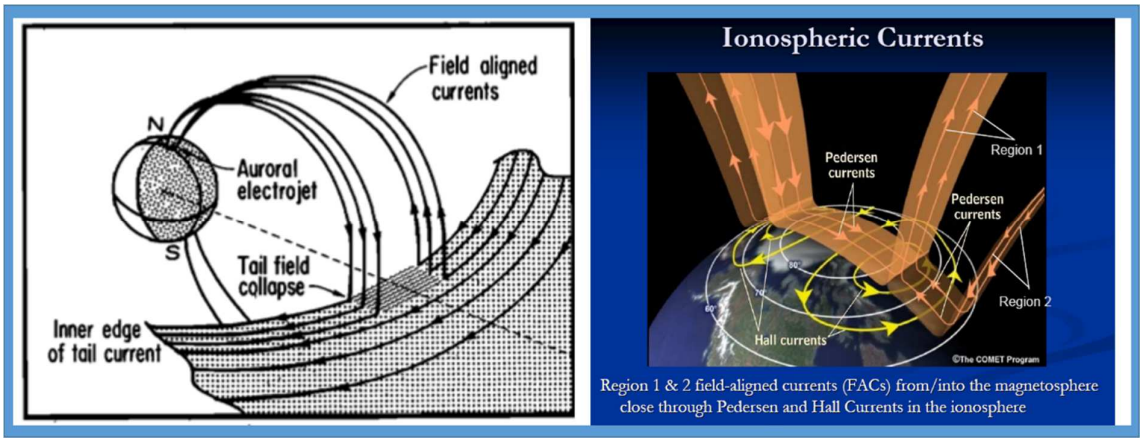
Şekil 62. GPS-L1 sinyalinin seçilmiş 5 günde elektron yoğunluğundaki değişme nedeni ile göstereceği gecikme zamanı (saniye olarak).



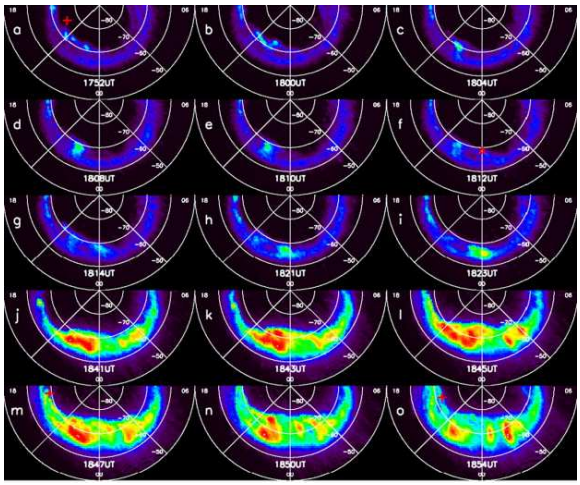
Şekil 63. En kuvvetli manyetik fırtına gününde maksimum kullanılabilir frekansın (MUF) gönderme açısına göre değişimi.

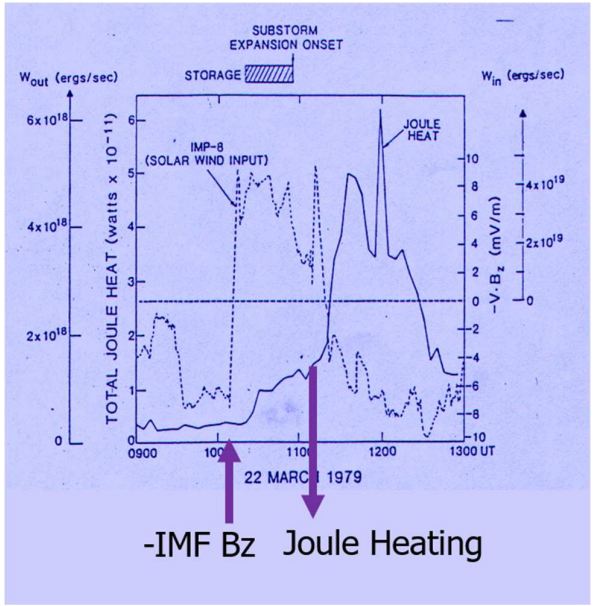


Şekil 64. Manyetosfer ile iyonosferin manyetosferik fırtınalar yolu ile etkileşiminin su kovası analojisi ile anlatımı (Kaymaz, 2016).

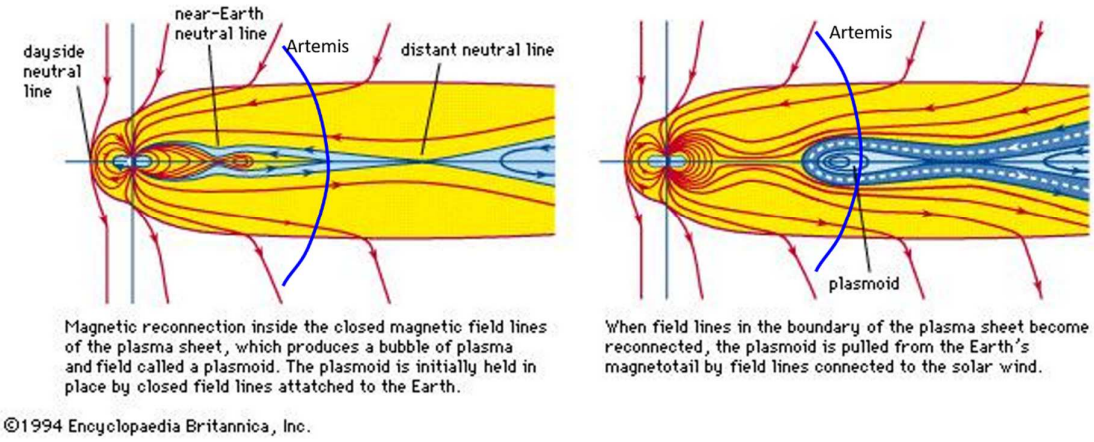


Şekil 65. Manyetosfer ve iyonosferin manyetik alan çizgileri boyunca akan elektrik akımları yolu ile etkileşimini gösteren şekil. Manyetik kuyrukta biriken güneş rüzgârı manyetik akısı ve enerjisi, manyetosferik mikrofırtınalar oluştuğunda, iyonosfere manyetik alan çizgileri boyunca akar ve kuzey/güney ışıklarının oluşmasına ve yukarı atmosferde Joule ısınmasının artmasına neden olur (Geoscienceletters, 2017; COMET-Meted, 2017).





Şekil 66. (Üst) Manyetosferik mikrofırtınalar sonucunda atmosfere olan parçacık akışı nedeni ile iyonosferik seviyelerde meydana gelen kuzey/güney ışıkları (Aurora) ve (alt) parçacıkların oluşturduğu Joule ısınmasının IMF B_z ile olan ilişkisini gösteren grafik. (üst:Cao vd. 2012, alt: Kaymaz, 2016).



Şekil 67. Manyetosferik fırtınalar esnasında manyetik kuyrukğun yapısında meydana gelen değşimlerin çizimle anlatılması. Mavi çizgi ARTEMIS uydusunun yörüngesini temsil etmektedir (Britanica, 2017).

EK 3. MAKALELER:

Aşağıdaki yayın çalışmalarımız sonuç rapor yazım tarihi itibarı ile makaledeki diğer yazarların inceleme sürecindedir. Bu ekler ayrı olarak yüklenmiştir.

EK 3.1: Akay, I.G., Kaymaz Z., Sibeck D.G., Angelopoulos V. "Magnetotail Boundary Crossings at Lunar distances: ARTEMIS Observations".

EK 3.2: Eyigüler, ECK, Kaymaz Z., Frissell N., Ruohoniemi J.M., Su Y.-J. "Investigating Upper Atmospheric Joule heating using cross-combination of data for two moderate substorm cases".

EK 3.3: Kaymaz, Z., Moral A.C., Eyigüler E.C.K., Zabotin N., Livingston R., Bullet T.B. "Temporal variability of ionosphere over İstanbul,Turkey".

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Prof. Dr. ZEREFŞAN KAYMAZ
Proje No:	113Y213
Proje Başlığı:	Yakın Uzay Ortamında Uzay Havası ve Etkileri: Ay Mesafesinde Manyetosfer Ortamı, Manyetosfer-İyonosfer-Termosfer İlişkileri ve İyonosfer
Proje Türü:	1001 - Araştırma
Proje Süresi:	36
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	İSTANBUL TEKNİK Ü. UÇAK VE UZAY BİLİMLERİ F. METEOROLOJİ MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	15/09/2013 - 15/09/2016
Onaylanan Bütçe:	271353.0
Harcanan Bütçe:	234578.13
Öz:	Projemizin amacı yere yakın uzay ortamının manyetik ve plazma yapısını incelemek ve güneş rüzgarının bu yapıyı nasıl etkilediğini ortaya koymaktır. Çalışmalarımızda kullandığımız yere yakın uzay ortamı manyetosfer, iyonosfer ve termosfer bölgeleridir. Çalışmalarımızı üç ana gruba ayırarak yürütmüş bulunuyoruz: 1. Manyetosferin -60 Re?deki yapısını anlamak ve değişimlerini incelemek, 2. Manyetosfer-Iyonosfer etkileşimini incelemek, ve 3. Iyonosferin yapısını ve manyetik fırtınalar sırasındaki değişkenliğini incelemek. Bu bölgelerde değişken güneş rüzgarı şartları altında meydana gelen değişimler ortaya konulmuştur. Çalışmalarımız seçilmiş vaka çalışmaları, istatistiksel veri analizleri ve model karşılaştırmaları şeklinde yürütülmüştür. Çalışmalarımızda kullandığımız veriler özellikle bu bölgeleri incelemek üzere tasarlanmış uydulara yerleştirilen aletlerle ölçülen manyetik alan, parçacık hızı, parçacık yoğunluğu ve sıcaklık verileridir. Bunlara ilaveten yüksek enerjili parçacık akısı ve türetilmiş veriler, yani dinamik basınç, plazma basıncı, elektrik alanı, elektrik akımı vb verileri kullanılmıştır. Ayrıca manyetosfer-iyonosfer etkileşimi kısmında SuperDARN radar verileri (plazma hızı ve yönü, elektrik potansiyeli vb), iyonosferik değişkenliğin belirlenmesi kısmında ise İTÜ-YAUHL iyonozonde radar verileri (iyonosferik elektron yoğunluğu) kullanılmıştır. Veri-model karşılaştırmalarında kullanılan modeller ise global MHD modelleri ve iyonosferik modeller olup NASA CCMC Space Weather Laboratory?da çalıştırılmıştır. Global MHD model olarak BATSRUS ve OpenGCM MHD modelleri olup manyetosfer-iyonosfer etkileşimi kısmında SWMF-BATSRUS modeli İyonosferik Elektrodinamik (IE) modülü ile beraber çalıştırılmıştır. Iyonosfer ilişkili çalışmalarımızda ayrıca TIEGCM, GITM, CTIPe ve IRI iyonosferik modelleri kullanılmıştır. İstanbul enlemlerindeki iyonosferik elektron yoğunluğu ve F2 tabakasına ait kritik frekansların temporal değişimleri (günlük, mevsimsel ve yıllık) ile manyetik fırtınaların elektron yoğunluğu üzerine etkileri belirlenmiştir. Bölgelere ait analiz sonuçları önce söz konusu bölgenin yapısını ve değişkenliğini ortaya koyacak ve güneş rüzgarı ile etkileşimindeki manyetik ve plazma süreçlerini açığa çıkaracak şekilde, daha sonra tüm sonuçlar bir araya getirilerek, global olarak uzay havası uygulamaları açısından yorumlanmıştır. Model-veri karşılaştırmaları sonucunda benzerlikler ve aykırıklar tesbit edilmeye ve bu şekilde hem uzay havası tahminlerinin başarısı açısından modeller iyileştirilmeye hem de ortamda süregelen fiziksel ve dinamik süreçler belirlenmeye çalışılmıştır.
Anahtar Kelimeler:	Güneş rüzgarı, Manyetik fırtınalar, IMF, manyetosfer, iyonosfer, kritik frekans, TEC, MHD modelleri
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır

TÜBİTAK

Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Quantifying the Storm Effects on the Modeled Neutral Density Variations on the CHAMP Satellite Track: Progress since the Mini-GEM (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 2- Gravity Wave Signatures as Determined by Istanbul DynasondeObservations (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 3- Variations In Mid-Latitude Ionospheric Electron Density : İstanbul Dynasonde Observations (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Poster Sunum), 4- Investigating MagneticField Structure at MoonDistance: A Single PassExample (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 5- Quantitative Assessment of the Storm Time Performances of IT Models for the Orbit Averaged Neutral Densities on CHAMP orbit (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 6- Mid-latitude Electron Density Variations Under Magnetospheric Substorm Conditions As Determined From Istanbul Dynasonde Observations (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 7- Towards a new metric for satellite drag studies (Bildiri - Uluslararası Bildiri - Sözlü Sunum), 8- IONOSPHERIC VARIABILITY OVER ISTANBUL USING SID-VLF AND HF-RADAR OBSERVATIONS (Tez (Araştırmacı Yetiştirilmesi) - Yüksek Lisans Tezi),

TÜBİTAK