

## IRI ve IONOLAB Toplam Elektron İçeriğinin Şiddetli Jeomanyetik Fırtınalara Tepkisinin Karşılaştırılması

Ramazan ATICI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Muş Alparslan Üniversitesi, Eğitim Fakültesi, Temel Eğitim Bölümü, 49250 Muş  
e-mail: r.atici@alparslan.edu.tr

(Geliş/Received: 25.05.2017; Kabul/Accepted: 20.07.2017)

### Özet

Bu çalışmada 17 Mart ve 22-23 Haziran 2015 tarihlerinde meydana gelen şiddetli jeomanyetik fırtınalar süresince IRI (International Reference Ionosphere) and IONOLAB (Ionosphere Research Laboratory)'dan elde edilen Toplam Elektron İçeriği (TEC) değerleri karşılaştırıldı. Bir jeomanyetik fırtına solar (Bz, Vp ve Np) ve jeomanyetik (Dst, Kp and Ap) indisler aracılığıyla tanımlandı. TEC değerleri Türkiye'nin Ankara istasyonu için GPS-temelli IONOLAB tahmin yöntemi ve ampirik bir model olan IRI-2012 modeli aracılığıyla elde edildi. Araştırmanın sonucunda 17 Mart 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınanın başlangıç ve ana fazı süresince IRI-2012 TEC değerleri (~ 38 TECU) değişmezken IONOLAB-TEC değerlerinin (~ 64 TECU) aynı süreçte önemli derecede artmıştır. 22-23 Haziran 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınası süresince fırtınanın tüm fazlarında IONOLAB-TEC değerleri diğer fırtına ile karşılaştırıldığında daha az değişim gösterir. Her iki fırtına süresince IRI modelinin TEC değerlerini fırtınanın öncesinde genellikle daha düşük ve fırtınanın sonrasında daha yüksek tahmin ettiği görülmüştür. Sonuç olarak IONOLAB tahmin metodunun şiddetli jeomanyetik fırtına süresince orta enlemde bulunan Türkiye'nin Ankara istasyonu üzerinde meydana gelen tedirginliklere IRI modelinden daha duyarlı olduğu söylenebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Jeomanyetik fırtınalar, IRI-2012, IONOLAB, TEC.

### Comparison of Response to Extreme Geomagnetic Storms of IRI-2012 and IONOLAB TEC Values

#### Abstract

In this study, IRI (International Reference Ionosphere) and IONOLAB (Ionosphere Research Laboratory) Total Electron Content (TEC) values during severe geomagnetic storms on March 17, 2015 and June 22-23, 2015 are compared. The geomagnetic storm is determined by the solar (Bz, Vp and Np) and geomagnetic (Dst, Kp and Ap) indices. TEC values are obtained by IONOLAB estimation method with GPS based and IRI-2012 model, which is an empirical model, at Ankara, Turkey. As a result of investigation, IRI-2012-TEC values (~ 38 TECU) are not change, while IONOLAB-TEC values increase significantly (~ 64 TECU) in the initial and main phase of the March 17, 2015 severe geomagnetic storm. In addition, maximum IONOLAB-TEC values decrease by 23 TECU during the recovery phase of the storm, but no change occur in IRI-2012 TEC values. During the severe geomagnetic storm on June 22-23, 2015, IONOLAB-TEC values in all phases of the storm show less change compared to the other storm (March 17, 2015). During both storms, it is seen that the IRI model predicts lower TEC values than the IONOLAB estimation method before the storms, and generally higher predicts after the storms. Finally, it can be said that the IONOLAB estimation method is more sensitive than the IRI-2012 model to the disturbances that occur at Ankara station, Turkey located in the mid-latitude, during the severe geomagnetic storm.

**Key Words:** Geomagnetic storms, IRI-2012, IONOLAB, TEC.

#### 1. Giriş

İyonküre hem aşağıdan hem de yukarıdan etki eden çok çeşitli süreçler aracılığıyla meydana gelir. [1-4]. İyonküresel toplam elektron içeriği (TEC), özellikle manyetik fırtına dönemlerinde, iyonküreye ait durumu belirlemek için son

dönemde yaygın olarak kullanılan bir parametredir [5-10]. Jeomanyetik fırtına süresince manyetoküre içinde depolanan Güneş (Güneş) rüzgar enerjisi aşamalı olarak iyonküre ve termoküre içerisine aktarılır. Bu sürecin iyonküresel TEC değerinde büyük oranda artma veya azalmalara sebep olacağı ifade edilmiştir [5,

6, 11-16]. TEC parametresi güneş olayları ve jeomanyetik fırtınalara bağlı olarak değişim gösterir [5, 11, 17]. TEC'in Jeomanyetik fırtınalara göre değişimi, iyonkürenin sakin ve tedirgin durumları için ayrı ayrı ele alınır. Dahası, TEC'in jeomanyetik fırtınalar süresince değişimi coğrafik enleme göre de ayrı ayrı çok sayıda çalışmada incelenmiştir [9, 18-25].

Jeomanyetik fırtınanın ekvator bölgesindeki iyonlaşma anormalliği (EIA) üzerinde hem negatif hem de pozitif değişimlere sebep olduğu bildirdi [26]. Fırtına esnasında büyük ölçekli rüzgarlar, elektrik alanın ve akımın varlığı elektronların yeniden dağılımında en büyük itici güç olduğu çoğu yazar tarafından bildirmiştir [17, 27]. Orta enlem iyonküresi üzerinde jeomanyetik fırtınaların büyük bir etkiye sahip olduğu vurgulanmıştır. Bu etkilerden pozitif olanlarına hızlı nüfuz eden elektrik alanların ve ekvator yönündeki nötr rüzgarların, negatif olanlarına ise ekvator yönündeki nötr rüzgarların birleşen (kaldırılabilir) değişim etkisinin sebep olduğu vurgulanmıştır. Kutup bölgelerinde ise jeomanyetik fırtına süresince iyonküreye ait tedirginliklerin oluşmasının auroral parçacıklar ve joule ısınmasından elde edilen ısı enerjisine bağlı olduğunu önerilmiştir [9].

İyonküreye ait İyonosferik (iyonküreye ait) TEC değeri yer temelli ve dünya yüzeyine çokça yayılmış olan GPS istasyonları ve uydular aracılığıyla kestirilmektedir [28-31]. TEC değeri ayrıca yarı deneysel modeller (International Reference Ionosphere-IRI (IRI-2007, IRI-2012-2016, IRI- PLUS gibi alt versiyonlara sahip olan), NeQuick gibi) yardımıyla da tahmin edilmektedir [28, 32-34]. Bu yarı deneysel modellerin kestirim sonuçlarını daha net hale getirme çalışmaları, sürekli olarak çalışılan iyonküreye ait konular arasında yer almaktadır [18, 32, 35-42].

Bu çalışmanın ana amacı GPS-tabanlı tahmin yöntemi ve yarı-deneysel IRI-2012 modeli ile elde edilen TEC değerlerinin şiddetli jeomanyetik fırtınalara tepkisini karşılaştırmaktır. Bu karşılaştırma orta enlem bölgesindeki Türkiye'nin Ankara istasyonu koordinatlarında (39.7 K; 32.76 D) 17 Mart ve 22-23 Haziran 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınalarından üç gün öncesini ve sonrasını kapsayan günler için yapıldı. Ayrıca, TEC değerleri ve solar (Bz, GSE, proton

yoğunluğu (Np) ve proton hızı (Vp)) ve jeomanyetik (Kp, Ap ve Dst) indisler arasındaki ilişki de incelendi.

## 2. Materyal ve Metot

IRI, verilen konum, tarih ve saate göre 60-2000 km arasındaki yüksekliklerde elektron yoğunluğu başta olmak üzere TEC değerinin de içinde bulunduğu iyonküreye ait ilişkin çok sayıda parametre değerlerini sunabilmektedir [28]. Bu çalışmada TEC değerlerini IRI-2012 modelinden elde etmek için IRI ana sayfasında bulunan web ara yüzü kullanılmıştır ([http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html)).

GPS alıcıları, kod ve faz gözlemlerini toplar. GPS gözlemleri aracılığıyla iyonküreye ait gecikmelerin algılanması için GPS-uydu arasında ışın yolunda bulunan elektron içeriği kullanılır. Uydu-alıcı arasındaki ışın yolunda mevcut olan TEC değeri farklı yollarla elde edilir. Bu konuda detaylı bilgi için [30] nolu referansa bakabilirsiniz. IONOLAB grubu, GPS alıcılarından RINEX formatında sağlanan verilerden TEC değerlerini elde etmek için *ionolabtec v1.0* programını geliştirmişlerdir. Bu program aracılığıyla elde edilen TEC verileri kullanışlı bir internet ara yüzü aracılığıyla elde edilebilmektedir. Bu çalışmada IONOLAB TEC verileri <http://www.ionolab.org> adresinden elde edildi [43]. İki farklı yolla elde edilen TEC değerlerinin karşılaştırmaları, fırtınadan önce, sırasında ve sonrasında korelasyon analizi ile yapılmıştır. Her fırtına için sonuçlar, Sonuçlar ve Tartışma bölümünde ayrı olarak sunulmuştur. Şiddetli jeomanyetik fırtınayı tanımlamak için jeomanyetik (Kp, Ap ve Dst) ve solar (Bz, Vp ve Np) indisleri seçilmiştir [5, 21, 44]. Bu indis değerleri NSSDC'nin veri bankasından alınmıştır (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>).

## 3. Bulgular ve Tartışma

Literatürde, tedirgin bir gün  $K_p \geq 4$ ,  $A_p \geq 26$  ve  $Dst \leq -30$  nT olduğu bir gün olarak tanımlanmıştır [5, 15, 16]. Bu çalışmada IRI-2012 ve IONOLAB modelinin 17 Mart 2015 ( $Dst = -223$  nT,  $K_p = 8$  ve  $A_p = 179$  nT, burada "fırtına 1" olarak

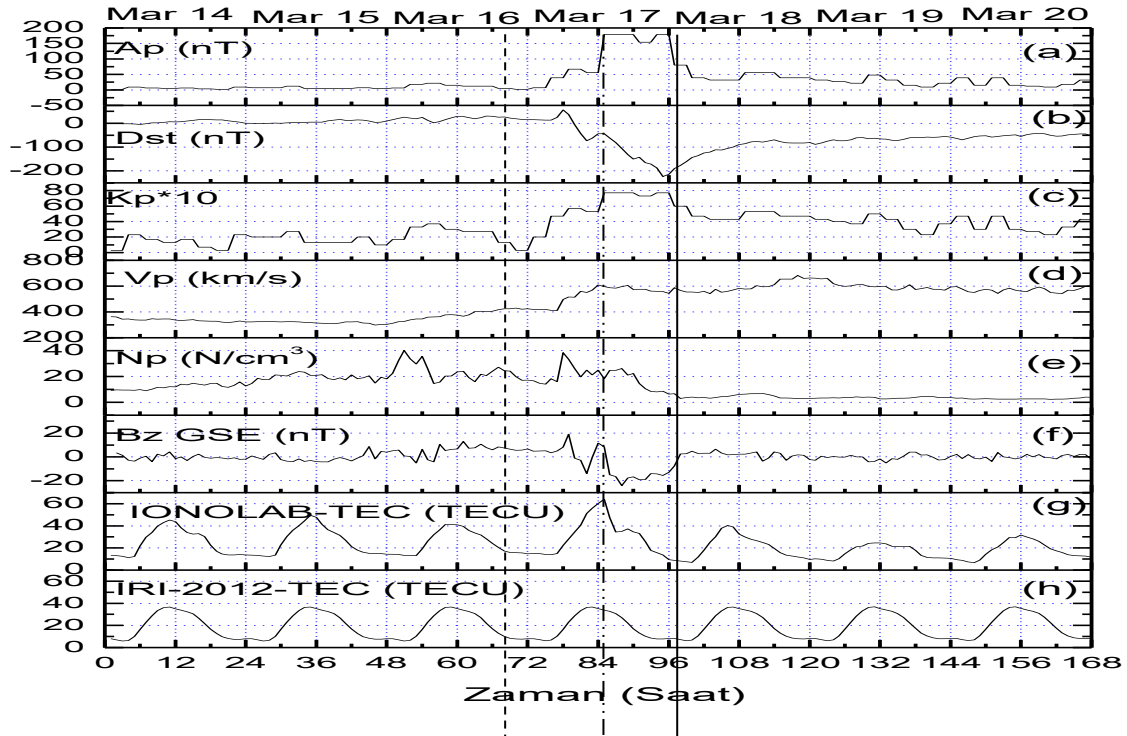
anılır) ve 22-23 Haziran 2015 (Dst=-204 nT, Kp=8 ve Ap=179 nT, burada “fırtına 2” olarak anılır) şiddetli jeomanyetik fırtınalarının üç gün öncesi ve üç gün sonrasında orta enlem bölgesinde iyonosferik TEC değerlerindeki değişimleri algılama hassasiyetleri karşılaştırıldı ve TEC değişimlerinin sebepleri tartışıldı.

### 3.1. Fırtına 1 için sonuçlar

#### 3.1.1. Fırtına 1 süresince solar ve jeomanyetik indislerin değişimi

Şekil 1’de (a)-(c), sırasıyla Ap, Dst, Kp indislerinin (d)-(f) ise Vp, Np ve Bz’nin zamana göre değişimi göstermektedir. Şekil 1-f’den Bz değerinin hem kuzey hem de güney yönünde iki pike sahip olduğu görülmektedir. 17 Mart 04:00 UT’de Bz değeri 8.2 nT iken saat 05.00 UT’de kuzey yönünde ani bir artışla 19 nT’lık ilk pik

değerine ulaşmıştır. Bu durum daha önceki çalışmalarda da ifade edildiği gibi gezegenler arası ortamdaki enerjinin dünyanın manyetosferine ulaştığının sinyalidir [5]. Saat 05:00 UT’de Vp değeri 410 km/s’den 496 km/s’ye ve Np değeri  $15.9 \text{ cm}^{-3}$  ten  $38.5 \text{ cm}^{-3}$  lük bir değere yükselmiştir. Aynı saatte Dst 56 nT’lık değeri ile pozitif yönde pik yapar. Fırtınayı tanımlamak için kullanılan diğer bir indis olan Dst indisinin, benzer bazı çalışmalarda da ifade edildiği gibi, güneye yönelmeden önce pozitif yönde bir artış sergilemesi ani bir fırtına başlangıç olayını işaret eder [17, 21, 22]. Dst’nin pozitif olması solar rüzgâr basınç artışından dolayı manyetosferin sıkışmasını ifade eder. Bu saat jeomanyetik fırtınanın başlangıç fazını (dikey kesikli çizgi), yani ani fırtına yükselmesini (SSC-sudden storm commencement) veya aşamalı artışı (GC-gradual commencement) gösterir.



Şekil 1. 14-20 Mart 2015 tarihleri arası jeomanyetik ve solar parametrelerin zamana göre değişimi. (a), (b) ve (c) panelleri sırasıyla jeomanyetik fırtınanın tanımlanması için kullanılan Ap, Dst ve Kp indislerini gösterir.

Buna karşın (d), (e) ve (f) panelleri solar parametrelerden sırasıyla proton hızını (Vp), yoğunluğunu (Np) ve gezegenler arası manyetik alanı (Bz-GSE) temsil eder. (g) ve (h) IRI-2012-TEC ve IONOLAB-TEC değerlerinin zamanla değişimini gösterir.

Saat 05:00UT'den sonra Bz güneye yönelir ve saat 08:00 UT -14 nT lık değer ile güney yönünde pik yapar. Bu ani yön değiştirme daha önceki çalışmalarda da ifade edildiği gibi fırtınanın ana fazının başlamasına işaret eder (kesikli çizgi ile kesikli noktalı çizgi arası) [5, 17]. Aynı saatte Dst -43 nT, Kp 5.7 ve Ap 67 nT değerindedir. Daha sonra Bz tekrar kuzeye yönelir ve saat 10 UT'de 11.7 nT lık değeri ile ikinci pik değerini alır. Bu saatte Kp= 5.3, Ap= 56 nT ve Dst = 63 nT lık değerlere sahiptir. Son olarak Bz tekrar güneye yönelir ve saat 14:00 UT'de -24.1 nT lık değer ile güney yönünde ikinci pik değerine sahip olur. Saat 14:00 UT'de Kp 7.7= Ap= 179 ve Dst = -81 nT'lık değerler ile fırtınanın habercisi olurlar. Saat 14:00'dan sonra Bz azalmaya başlar. Jeomanyetik fırtınayı tanımlamak için kullanılan tüm bu değerler yukarıda verilen referans değerlerini aşmaktadır. Bu durum jeomanyetik fırtınanın olduğuna işaret eder. Gece saat 22:00 UT'de jeomanyetik indisler Dst=-223 nT, Kp=8 ve Ap= 179 nT lık değerlerle şiddetli manyetik fırtınanın olduğunu işaret eder. Dst değerindeki bu azalma halka akımının önemli bir atışımı temsil eder [17, 45]. Bu saatten sonra Dst indisi yükselmeye başlar ve bu durum fırtınanın geri dönüş fazını (kesikli noktalı çizgi ile düz çizgi arası) temsil eder. Fırtınanın başlamasından 84 saat sonra bile Dst değeri yaklaşık -50 nT'lık değeri ile hala başlangıç değerine ulaşmadığı görülmektedir.

### 3.1.2. Fırtına 1 süresince TEC değişimleri

17 Mart 2015 jeomanyetik fırtınasını kapsayan 14-20 Mart 2015 dönemi süresince IONOLAB-TEC değerlerinin değişimini Şekil 1-g'ta gösterilmiştir. Jeomanyetik fırtınanın başlamasından önceki günler (14-16 Mart) IONOLAB-TEC değerlerinde çok ani değişimler gözlenmemektedir. Bununla birlikte bir önceki günden ortalama 5 TECU luk sapma meydana gelmektedir. Jeomanyetik fırtınanın başlangıç aşamasında (saat 05:00 UT'de) IONOLAB-TEC değerleri lineer olarak artmaya devam etmiştir. Manyetik fırtınanın başlangıç fazında TEC değerlerinde meydana gelen benzer ani artışlar daha önce yapılan çalışmalarda da ifade edilmiştir [5, 6, 9, 15, 16,46]. Fırtınanın ana fazının ilk

saatlerinde IONOLAB-TEC değerleri artmaya devam etmiş ve saat 12:00 UT'de 64 TECU'luk maksimum değerine ulaşmıştır. Ana fazın ilerleyen saatlerinde TEC değerleri azalmaya başlamış fırtınanın en şiddetli olduğu gece saat 22:00 UT'de minimum değerler almıştır ve ilerleyen birkaç saat azalmaya devam etmiştir.

Gece saat 22:00 UT'den sonra fırtınanın geri dönüş fazı başlamıştır. Geri dönüş fazının ilk saatlerinde TEC değerleri azalmaya devam etmiş ve 18 Mart 03:00 UT'de 7 TECU luk minimum değerini almıştır. Daha sonra TEC değerleri artmaya başlamış 18 Mart saat 12:00 UT fırtınadan önceki değerlerine ulaşmıştır. Ancak fırtına günündeki maksimum değerinin çok altına düşmüştür. Bu düşüş 19 Mart günü devam etmiş ve maksimum TEC değeri 24 TECU ya kadar azalmıştır. 20 Mart'ta TEC değerlerinde bir önceki güne nazaran bir artış olmasına rağmen, fırtına öncesindeki değerlere kıyasla bir azalma vardır. Özellikle fırtınanın sonrasındaki günlerde TEC değerlerin belirgin bir azalma meydana gelmiştir. Fırtınayı takip eden günler TEC değerlerinde azalmalar meydana gelmesi orta enlem çukurunun ekvatora doğru hareketinden dolayı olduğu ifade edilmiştir [46]. Ayrıca, literatürde fırtınanın sonrasındaki günler TEC değerlerinde meydana gelen ani azalmaların, iyonkürede bir bileşim değişiminden kaynaklanan fırtına negatif fazını temsil ettiği de ifade edilmiştir [46, 47]. Dahası, orta enlemlerde gözlenen negatif tedirginliklerin termoküreye ait nötr bileşen oranının ( $N_2/O_2$ , moleküler nitrojenin atomik oksijene oranı) artması ile ilişkili olduğuna da inanılır[48, 49]. IONOLAB-TEC değerlerinin 14-20 Mart 2015 tarihlerindeki değişimi, diğer bir iyonküreye ait parametre olan foF2 ile jeomanyetik fırtınaların ilişkisini inceleyen bir çalışmada [49] ifade edildiği gibi, orta enlemlerde jeomanyetik fırtına süresince pozitif fırtına etkilerinin fırtınanın başlangıç fazında, negatif fırtına etkilerinin fırtınanın geri dönüş fazında gözlemlendiğini sonucunu doğrular.

Şekil 1-h 17 Mart 2015 jeomanyetik fırtınasını kapsayan 14-20 Mart 2015 dönemi süresince IRI-2012-TEC değerlerinin değişimini gösterir. Şekilden de görüleceği üzere 17 Mart 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınanın tüm fazlarında (başlangıç, ana ve geri dönüş) IRI-2012

ile elde edilen TEC değerlerinde herhangi bir tedirginlik meydana gelmemiştir. IRI-2012-TEC değerleri burada çalışılan zaman periyodunda benzer bir dağılım sergilemiştir. Tüm günler için TEC maksimum değerleri ortalama 38 TECU ya ulaşmıştır.

IONOLAB-TEC ve IRI-2012-TEC değerleri arasındaki korelasyon analizi sonucunda korelasyon katsayıları fırtına öncesi (14 Mart 00:00 UT-17 Mart 04:00 UT)  $R = 0.98$ , fırtına sırasında (17 Mart 05:00 UT-18 Mart 20:00 UT)  $R = 0.85$  ve fırtına sonrasında (18 Mart 21:00 UT-20 Mart 23:00 UT)  $R = 0.95$  olarak bulunmuştur.

Fırtına süresinde korelasyon katsayısının diğer durumlara (fırtına öncesi ve sonrası) nazaran azaldığı görülmektedir. Bu azalma fırtına süresince iyonkürede meydana gelen tedirginliklere IONOLAB-TEC değerlerinin duyarlılığını IRI-2012-TEC değerlerinin ise duyarsızlığını gösterir. Yani, fırtına öncesi neredeyse aynı oranda ( $R = 0.98$ ) değişen IONOLAB ve IRI-TEC değerleri arasındaki korelasyon katsayısının fırtına sırasında azalması ( $R = 0.85$ ) jeomanyetik fırtınaya IONOLAB-TEC değerlerinin değişmesinden kaynaklanır. Korelasyon katsayısı fırtınadan sonra IONOLAB-TEC değerleri ile IRI-TEC değerleri aynı oranda değişmeye başladığından tekrar yükselmiştir ( $R = 0.95$ ).

### 3.2. Fırtına 2 için sonuçlar

#### 3.2.1. Fırtına 2 süresince solar ve jeomanyetik indislerin değişimi

Şekil 2'de (a)-(c), sırasıyla  $A_p$ ,  $D_{st}$ ,  $K_p$  indislerinin (d)-(f) ise  $V_p$ ,  $N_p$  ve  $B_z$ 'nin zamana göre değişimi göstermektedir. 22 Haziran 17:00 UT'de  $B_z$  güneye yönelmiş ve değeri  $-2.1$  nT iken saat 19:00 UT'de ani bir artışla  $-26.3$  nT'lık pik değerine ulaşmıştır. Bir önceki fırtınada olduğu gibi bu saat SSC veya GC yi ifade eder (dikey kesikli çizgi).  $B_z$ 'de güney yönündeki ani artış daha önceki çalışmalarda da ifade edildiği gibi fırtınanın başlamasına işaret eder [5, 17]. Aynı süreçte  $K_p=8.3$ ,  $A_p=236$  nT iken  $D_{st}$  değeri  $-9$  nT'dan  $-53$  nT lık değerine ulaşmıştır. Bu saatte  $N_p$  değeri  $24.4$  N/cm<sup>3</sup> ten  $49.9$  N/cm<sup>3</sup> lük değere, proton hızı ise  $515$  km/s'den  $675$  km/s ye

yükselmiştir.  $B_z$ 'nin güney yönünde devam ettiği günde  $N_p$  ve  $V_p$  de meydana gelen artışlar şiddetli fırtınanın habercisidir [50]. Daha sonra  $B_z$  yön değiştirerek kuzeye yönelir ve kuzey yönünde 20:00 UT'de  $12.1$  nT'lık pik değerine ulaşır. Aynı saatte  $D_{st}$   $-121$  nT lık değere sahiptir.  $B_z$  değeri 23 Haziran günü saat 01:00 UT'de tekrar güneye yönelir ve saat 02:00 UT'da  $-23.1$  nT lık bir değere ulaşır. Aynı saatlerde  $D_{st}$  değeri azalarak saat 04:00 UT'de  $-204$  nT'lık değeri ile negatif yönde maksimuma ulaşır. Bu saatlerde  $N_p$  değeri azalırken  $V_p$  değeri yükselir. Bu durum fırtınanın ana fazın bittiğini gösterir (kesikli çizgi ile kesikli iki noktalı çizgi arası). Bu saatten sonra  $B_z$  tekrar kuzeye yönelir ve yaklaşık olarak 30 saat sonra fırtınadan önceki duruma döner. Bununla birlikte  $D_{st}$  değeri yükselmeye başlar, ancak fırtınadan sonraki günler ortalama  $-65$  nT lık değerler ile başlangıç değerlerine dönememiştir. Böylece fırtınanın geri dönüş fazına (kesikli iki noktalı çizgi ile düz çizgi arası) girilmiş olur.

#### 3.2.2. Fırtına 2 süresince TEC değişimleri

22-23 Haziran 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınasını süresince IONOLAB-TEC değerlerinin değişimi Şekil 1-g'de gösterilmiştir. Jeomanyetik fırtınanın başlamasından önceki günler (19-21 Haziran) IONOLAB-TEC değerlerinde bir önceki güne nazaran değişimler mevcuttur. Jeomanyetik fırtınanın başlangıç fazında olduğu gün (22 Haziran) IONOLAB-TEC değerlerinde bir önceki güne nazaran artış meydana gelmiş ve saat 11:00 UT'de yaklaşık 40 TECU luk maksimum değere ulaşmıştır.

Fırtınanın ana fazı 22-23 Haziran 2015 tarihlerinde gece saatlerinde meydana gelmiştir. Fırtınanın ana fazında IONOLAB-TEC değerlerinin genellikle azaldığı görülmektedir. Bu sonuç jeomanyetik fırtınaya iyonküreye ait tepkiyi diğer bir iyonküreye ait parametre olan foF2 deki değişimi inceleyerek araştıran Adewale [49]'ün sonucu ile örtüşmektedir. Çünkü jeomanyetik fırtınalar süresince TEC değerlerindeki değişim genellikle F2 bölgesi elektron yoğunluğundaki tedirginlik ile açıklanır [17, 49].

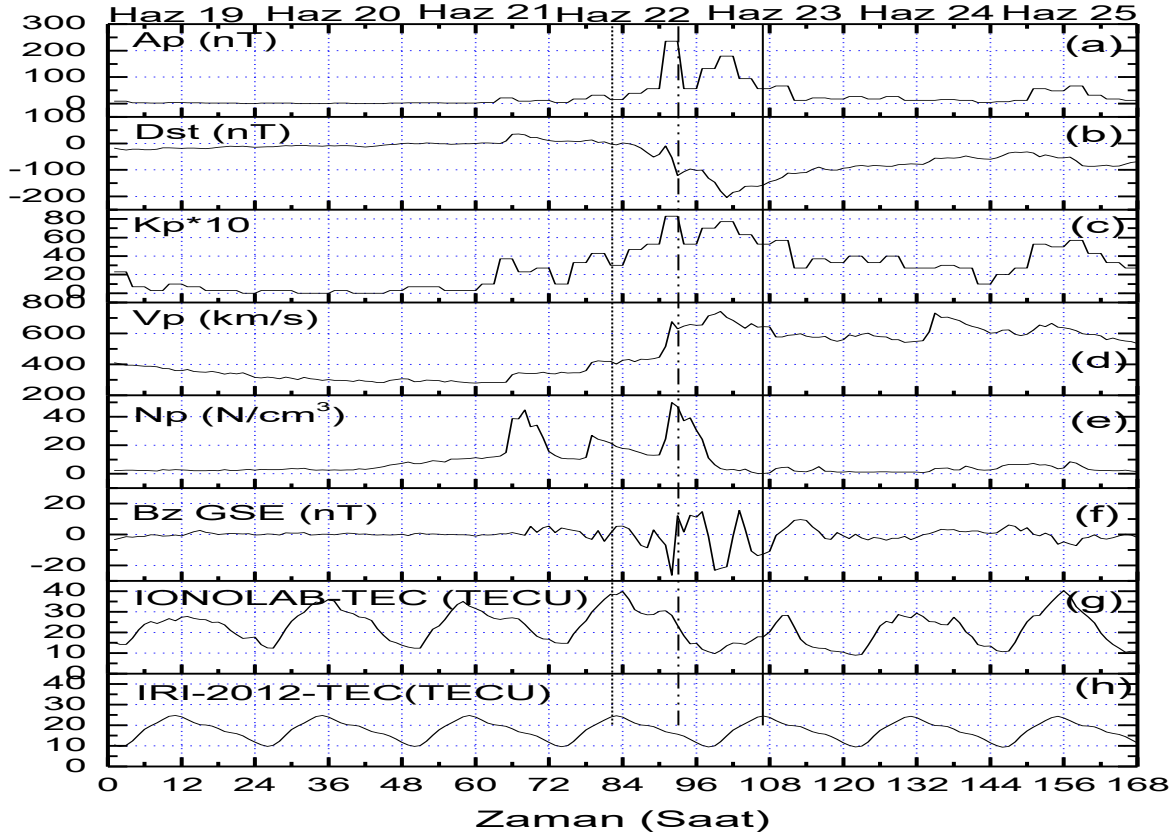
Fırtınanın geri dönüş fazında TEC değerleri 23 Haziran'da maksimum 28 TECU, 24

Haziran'da 29 TECU luk değerler almıştır. Bu değerlerin ardından 25 Haziran'da TEC değerleri önemli derecede yükselerek yaklaşık 40 TECU'luk bir değere ulaşmıştır. Fırtınanın geri dönüş fazında TEC değerlerindeki azalma, jeomanyetik fırtına olayları süresince negatif fırtına etkilerinin geri dönüş fazında meydana geleceğini ifade eden Adewale [49]'ün çalışmasını destekler.

Şekil 2-h 22-23 Haziran 2015 şiddetli jeomanyetik fırtınasını kapsayan 19-25 Haziran 2015 dönemi süresince IRI-2012-TEC değerlerinin değişimini gösterir. Şekilden de görüleceği üzere 22-23 Haziran 2015 jeomanyetik fırtınasının başlangıç, ana ve geri dönüş fazlarının hepsinde IRI-2012-TEC değerlerinde herhangi bir

tedirginlik meydana gelmemiştir. Tüm günler için TEC değerleri ortalama 25 TECU luk maksimum değerlere ulaşmıştır. Her iki fırtına süresince TEC değişimleri karşılaştırıldığında, 22-23 Haziran 2015 tarihindeki fırtına dönemindeki hem IRI-2012 hem de IONOLAB TEC değerlerinin 17 Mart 2015 deki TEC değerlerinden küçük olduğu görülmektedir. Her iki fırtına döneminde de IRI-2012 modelinin fırtına öncesinde TEC değerlerini eksik tahmin ederken fırtınanın geri dönüş fazında, 25 Haziran hariç, fazla tahmin ettiği görülmektedir.

17 Mart'taki fırtına sürecinde IONOLAB-TEC değerlerinin jeomanyetik fırtınaya tepkisinin 22-23 Haziran'dakilerden daha belirgin olduğu söylenebilir.



Şekil 2. 19-25 Haziran 2015 tarihleri arası jeomanyetik ve solar parametrelerin zamana göre değişimi. (a), (b) ve (c) panelleri sırasıyla jeomanyetik fırtınanın tanımlanması için kullanılan Ap, Dst ve Kp indislerini gösterir. Buna karşın (d), (e) ve (f) panelleri solar parametrelerden sırasıyla proton hızını (Vp), yoğunluğunu (Np) ve gezegenler arası manyetik alanı (Bz-GSE) temsil eder. (g) ve (h) IRI-2012-TEC ve IONOLAB-TEC değerlerinin zamanla değişimini gösterir.

Ayrıca, bu fırtınalar IONOLAB-TEC değerleri göre, benzer bir çalışmada da [9] ifade edildiği, pozitif iyonosferik fırtınaya bir örnektir. Pozitif iyonküreye ait fırtınalar uydu iletişimi ve navigasyonunda zaman gecikmesi, menzil hatası ve sintilasyon gibi ciddi problemlere sebep olabilir. Bu fırtınaların doğu yönlü aniden nüfuz eden elektrik alanlar (prompt penetration electric fields-PPEFs) ve ekvator yönündeki nötr rüzgarlardan kaynaklandığı bildirilmiştir [9]. Bununla birlikte, orta enlemlerde pozitif iyonküreye ait fırtınaların seyahat eden atmosferik tedirginlikler (TADs) tarafından üretildiğine inanılır [49]. Ayrıca, şiddetli jeomanyetik fırtınalar süresince kutup iyonküresine bir enerji girişi vardır ve fırtına boyunca iç manyetoküreye ait akımlar yüksek enlemlerden orta ve düşük enlemlere doğru perdelenmediğinden dolayı, elektrik alanları yüksek enlemlerden orta ve düşük enlemlere nüfuz ederler. Böyle bir enerji girişi ile orta enlemde meydana gelen fırtınadan sonraki günler TEC değerlerindeki azalma fırtınayla indüklenen kompozisyon değişikliklerinin iyonkürenin kimyasal türlerinin değişimine yol açmasından kaynaklanabilir [5]. Bu çalışmada elde edilen sonuç da benzer bir etkiye atfedilebilir.

IONOLAB-TEC ve IRI-2012-TEC değerleri arasındaki korelasyon analizi sonucunda korelasyon katsayıları fırtına öncesi (19 Haziran 00:00 UT-22 Haziran 16:00 UT)  $R = 0.93$ , fırtına sırasında (22 Haziran 17:00 UT-23 Haziran 20:00 UT)  $R = 0.44$  ve fırtına sonrasında (23 Haziran 21:00 UT-25 Haziran 23:00 UT)  $R = 0.92$  olarak bulunmuştur. Fırtına süresinde korelasyon katsayısının diğer durumlara (fırtına öncesi ve sonrası) nazaran azaldığı görülmektedir. Bu azalma fırtına süresince iyonkürede meydana gelen tedirginliklere IONOLAB-TEC değerlerinin duyarlılığını IRI-2012-TEC değerlerinin ise duyarsızlığını gösterir. Fırtına sırasında korelasyon katsayısının bu ani düşüşün ( $R$  değeri 0.93'dan 0.44'e düştüğü) fırtınanın etkisiyle IONOLAB-TEC değerlerinin değişmesinden kaynaklandığı söylenebilir. Çünkü Şekil 2'de gösterildiği gibi IRI-2012-TEC değerlerinde fırtına sırasında değişiklik olmamıştır.

#### 4. Sonuçlar

2015 yılının Mart ve Haziran aylarında meydana gelen şiddetli jeomanyetik fırtınaya TEC modellerinin hassasiyetini ve orta enlem iyonkürésinin tepkisini araştırdığımız bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Fırtına 1 ve 2 sırasında IONOLAB TEC değerleri şiddetli manyetik fırtınalar nedeniyle artar.
2. Her iki şiddetli manyetik fırtınadan önceki ve sonraki IONOLAB-TEC değerlerindeki değişiklikler, iyonküredeki pozitif fırtına etkilerinin fırtınaların başlangıç ve ana safhalarındayken negatif fırtına etkilerinin fırtınaların iyileşme safhalarında olduğunu göstermektedir.
3. IONOLAB tahmin yönteminin iyonküredeki bozulmalara karşı IRI-2012 modelinden daha duyarlı olduğu söylenebilir.
4. IRI modelinin fırtınanın başlangıç ve ana aşamasında IONOLAB tahmin yöntemine kıyasla TEC değerlerini daha düşük tahmin ettiği, fırtınanın iyileşme aşamasında ise daha yüksek tahmin ettiği söylenebilir. Bu sonuç önceki çalışma ile tutarlıdır [49].
5. IONOLAB-TEC değerlerinin fırtına sırasında meydana gelen değişikliklere IRI-2012-TEC değerlerinden daha duyarlı olduğu söylenebilir, zira her iki fırtınanın korelasyon analizinde fırtınadan önceki ve sonraki korelasyon katsayısının fırtına sırasındakinden daha büyük olduğu bulunmuştur.

Sonuç olarak, ampirik olarak iyonküreye ait birçok parametrenin, özellikle elektron yoğunluğunun, aylık ortalamalara dayalı olarak tahmin edildiği IRI-2012 modelinin ([www.iri.org](http://www.iri.org)) jeomanyetik fırtınada meydana gelen iyonosferik bozulmaları tespit etmesi için daha hassas bir hale getirilmesi gereklidir. Ayrıca, hem şiddetli jeomanyetik fırtınalar sırasında pozitif ve negatif iyonküresel fırtınalarının etkilerini hem de IRI modelinin ve IONOLAB tahmini yönteminin şiddetli jeomanyetik fırtınalarına tepkilerini belirlemek için farklı

enlemlerde daha fazla araştırmalar yapmak gereklidir.

### Teşekkür

Jeomanyetik ve güneş indeksleri için OMNIWeb servisine, IRI modelini sağladığı için IRI çalışma grubuna ve GPS verileri için IONOLAB grubuna teşekkür ederim.

### 5. Kaynaklar

1. Atıcı, R. and Sağır, S. (2017). The effect of QBO on foE. *Adv. Space Res.* **60**(2): 357-362.
2. Atıcı, R. and Sağır, S. (2016). The Effect on Sporadic-E of Quasi-Biennial Oscillation. *J. Phys. Sci. App.* **6**:10-7.
3. Atıcı, R., Güzel, E., Canyılmaz, M. and Sağır, S. (2016). The effect of lightning-induced electromagnetic waves on the electron temperatures in the lower ionosphere. *Kuwait J. Sci.* **43**:143-9.
4. Canyılmaz, M. Atıcı R, and Guzel E. (2013). The Effect of Earth's Magnetic Field on the HF Radio Wave Modes at the Heated Subionosphere. *Acta Phys.Pol. A* **123**:786-90.
5. Adebisi, S.J., Adimula, I.A., Oladipo, O.A., Joshua, B.W., Adebisi, B.O. and Ikubanni, S.O. (2014). Ionospheric response to magnetic activity at low and mid-latitude stations. *Acta Geophys.* **62**:973-89.
6. Lastovicka, J. (2002). Monitoring and forecasting of ionospheric space weather - effects of geomagnetic storms. *J Atmos Sol-Terr Phy* **64**:697-705.
7. Liu, L.B., Wan, W.X., Ning, B.Q., Yuan, H. and Liu, J.Y. (2002). Low latitude ionospheric effects near longitude 120 degrees E during the great geomagnetic storm of July 2000. *Sci China Ser A* **45**:148-55.
8. Liu, L.B., Wan, W.X., Zhang, M.L. and Zhao, B.Q. (2008). Case study on total electron content enhancements at low latitudes during low geomagnetic activities before the storms. *Ann Geophys-Germany*, **26**:893-903.
9. Lopez-Montes, R., Pérez-Enríquez, R., Araujo-Pradere, E.A. and Cruz-Abeyro, J.A.L. (2015). Fractal and wavelet analysis evaluation of the mid latitude ionospheric disturbances associated with major geomagnetic storms. *Adv. Space Res.* **55**:586-96.
10. Yue, X.N., Wang, W.B., Lei, J.H., Burns, A., Zhang, Y.L., et al. 2016. Long-lasting negative ionospheric storm effects in low and middle latitudes during the recovery phase of the 17 March 2013 geomagnetic storm. *J Geophys Res-Space*, **121**:9234-49.

11. Purohit, P., Mansoori, A.A., Khan, P.A., Atulkar, R., Bhawre, P., et al. Evaluation of geomagnetic storm effects on the GPS derived Total Electron Content (TEC). *Proc. Journal of Physics: Conference Series*, 2015, 640:012072: IOP Publishing.
12. Rastogi, R.G. (1977). Geomagnetic storms and electric fields in the equatorial ionosphere. *Nature*, **268**(5619): 422-424.
13. Kikuchi, T., Hashimoto, K., Kitamura, T.I., Tachihara, H. and Fejer, B. (2003). Equatorial counter-electrojets during substorms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **108** (A11).
14. Fejer, B.G., Jensen, J.W., Kikuchi, T., Abdu, M.A., and Chau, J.L. (2007). Equatorial ionospheric electric fields during the November 2004 magnetic storm. *J Geophys Res-Space* **112** (A10).
15. Joshua, B., Adeniyi, J., Adimula, I., Abbas, M. and Adebisi, S. (2011). The effect of magnetic storm of May 2010 on the F2 layer over the Ilorin ionosphere. *World J. Young Res* **1**:71.
16. Adeniyi, J.O. (1986). Magnetic Storm Effects on the Morphology of the Equatorial F2-Layer. *J Atmos Terr Phys* **48**:695-702.
17. D'ujanga, F., Baki, P., Olowendo, J. and Twinamasiko, B. (2013). Total electron content of the ionosphere at two stations in East Africa during the 24–25 October 2011 geomagnetic storm. *Adv. Space Res.* **51**:712-21.
18. Alçay, S. and Öztan, G. (2016). Manyetik Fırtınalı ve Fırtınasız Günlerde IRI-PLAS ve IRI-2012 Modellerinin TEC Kestirim Performanslarının İncelenmesi. *Electronic J. Map Technologies*, **8**(2): 131-140.
19. Rao, P.V.S.R., Krishna, S.G., Niranjan, K and Prasad, D.S.V.V.D. (2006). Temporal and spatial variations in TEC using simultaneous measurements from the Indian GPS network of receivers during the low solar activity period of 2004-2005. *Ann Geophys-Germany* **24**:3279-92.
20. Yizengaw, E., Moldwin, M., Galvan, D., Iijima, B., Komjathy, A. and Mannucci, A. (2008). Global plasmaspheric TEC and its relative contribution to GPS TEC. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* **70**:1541-8.
21. De Jesus, R., Sahai, Y., Guarnieri, F., Fagundes, P., De Abreu, A., et al. (2012). Ionospheric response of equatorial and low latitude F-region during the intense geomagnetic storm on 24–25 August 2005. *Adv. Space Res.* **49**:518-29.



22. de Jesus, R., Fagundes, P.R., Coster, A., Bolaji, O.S., Sobral, J.H.A., et al. (2016). Effects of the intense geomagnetic storm of September-October 2012 on the equatorial, low- and mid-latitude F region in the American and African sector during the unusual 24th solar cycle. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* **138**:93-105.
23. de Abreu, A., Martin, I., Fagundes, P., Venkatesh, K., Batista, I., et al. (2017). Ionospheric F-region observations over American sector during an intense space weather event using multi-instruments. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* **156**:1-14.
24. de Abreu, A.J., Fagundes, P.R., Gende, M., Bolaji, O.S., de Jesus, R. and Brunini, C. (2014). Investigation of ionospheric response to two moderate geomagnetic storms using GPS-TEC measurements in the South American and African sectors during the ascending phase of solar cycle 24. *Adv. Space Res.* **53**:1313-28.
25. Klimenko, M.V., Klimenko, V.V., Bessarab, F.S., Ratovsky, K.G., Zakharenkova, I.E., et al. 2015. Influence of geomagnetic storms of September 26-30, 2011, on the ionosphere and HF radiowave propagation. I. Ionospheric effects. *Geomagn Aeronomy+* **55**:744-62.
26. Mukherjee, S., Sarkar, S., Purohit, P., Gwal, A. 2010. Effect of geomagnetic storms in the Equatorial Anomaly Region observed from ground based data. *International J. Geomatics-Geosci.* **1**:477.
27. Manju, G., Pant, T.K., Ravindran, S. and Sridharan, R. (2009). On the response of the equatorial and low latitude ionospheric regions in the Indian sector to the large magnetic disturbance of 29 October 2003. *Proc. Ann. Geophys- Atmos. Hydr.* **27**:2539.
28. Bilitza, D. (2001). International Reference Ionosphere 2000. *Radio Sci.*, **36**:261-75.
29. Arikan, F., Nayir, H., Sezen, U. and Arikan, O. (2008). Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC. *Radio Sci.*, **43**.
30. Arikan, F., Erol, C.B. and Arikan, O. (2003). Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data. *J. Geophys. Res-Space*, **108**.
31. Eftaxiadis, K., Cervera, M.A. and Thomas, R.M. (1999). A Global Positioning System Receiver for Monitoring Ionospheric Total Electron Content, DTIC Document.
32. Bilitza, D. (2003). International reference ionosphere 2000: Examples of improvements and new features. *Description of the Low Latitude and Equatorial Ionosphere in the International Reference Ionosphere* **31**:757-67.
33. Nava, B., Coisson, P. and Radicella, S.M. (2008). A new version of the NeQuick ionosphere electron density model. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.* **70**:1856-62.
34. Coisson, P., Radicella, S.M., Nava, B. and Leitinger, R. (2008). Low and equatorial latitudes topside in NeQuick. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phy.*, **70**:901-6.
35. Tariku, Y.A. (2015). TEC prediction performance of the IRI-2012 model over Ethiopia during the rising phase of solar cycle 24 (2009-2011). *Earth Planets Space* **67**.
36. Kumar, S. (2016). Performance of IRI-2012 model during a deep solar minimum and a maximum year over global equatorial regions. *J Geophys Res-Space* **121**:5664-74.
37. Adebisi, S.J., Adimula, I.A., Oladipo, O.A. and Joshua, B.W. (2016). Assessment of IRI and IRI-Plas models over the African equatorial and low-latitude region. *J Geophys Res-Space* **121**:7287-300.
38. Chakraborty, M., Kumar, S., De, B.K. and Guha, A. (2015). Effects of geomagnetic storm on low latitude ionospheric total electron content: A case study from Indian sector. *J Earth Syst Sci* **124**:1115-26.
39. Themens, D.R. and Jayachandran, P.T. (2016). Solar activity variability in the IRI at high latitudes: Comparisons with GPS total electron content. *J Geophys Res-Space* **121**:3793-807.
40. Li, S.H., Li, L.H. and Peng, J.H. (2016). Variability of Ionospheric TEC and the Performance of the IRI-2012 Model at the BJFS Station, China. *Acta Geophys* **64**:1970-87.
41. Akala, A.O., Somoye, E.O., Adewale, A.O., Ojutalayo, E.W., Karia, S.P., et al. (2015). Comparison of GPS-TEC observations over Addis Ababa with IRI-2012 model predictions during 2010-2013. *Adv. Space Res.* **56**:1686-98.
42. Kurt, K., Yeşil, A., Sağır, S. and Atici, R. (2016). The Relationship of Stratospheric QBO with the Difference of Measured and Calculated NmF2. *Acta Geophys.* **64**:2781-93
43. Sezen, U., Arikan, F., Arikan, O., Ugurlu, O. and Sadeghimorad, A. (2013). Online, automatic, near-real time estimation of GPS-TEC: IONOLAB-TEC. *Space Weather* **11**:297-305.
44. Knyazeva, I.S., Makarenko, N.G., Kuperin, Y.A. and Dmitrieva, L.A. (2016). The new approach for dynamical regimes detection in geomagnetic time series. *J Phys Conf Ser.*, **675**.
45. Basu, S., Basu, S., Rich, F., Groves, K., MacKenzie, E., et al. (2007). Response of the equatorial ionosphere at dusk to penetration electric fields during intense magnetic storms. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* **112**.

46. Basu, S., Basu, S., Groves, K., Yeh, H.C., Su, S.Y., et al. (2001). Response of the equatorial ionosphere in the South Atlantic region to the great magnetic storm of July 15, 2000. *Geophys. Res. Lett.* **28**:3577-80.
47. Buonsanto, M.J. (1999). Ionospheric storms—A review. *Space Sci.Rev.*, **88**:563-601.
48. Adebisi, S., Adimula, I., Oladipo, O., Joshua, B., Adebisi, B. and Ikubanni, S. (2014). Ionospheric response to magnetic activity at low and mid-latitude stations. *Acta Geophys.* **62**:973-89.
49. Adewale, A. 2013. Ionospheric effects of geomagnetic storms at Hobart and comparisons with IRI model predictions. *J. Sci. Res. Dev.* **14**.
50. Knyazeva, I., Makarenko, N., Kuperin, Y., Dmitrieva, L. (2016). The new approach for dynamical regimes detection in geomagnetic time series. *Proc. J.Phys.: Conference Series*, **675**:032028: IOP Publishing.