

# Türkiye İyonküresinin Kısa Süreli Değişimlerinin İncelenmesi

## Investigation of Short-Period Ionospheric Variation over Turkey

Muhammet Necat Deviren, Feza Arıkan  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Hacettepe Üniversitesi  
mnecatdeviren@gmail.com  
arikan@hacettepe.edu.tr

Orhan Arıkan  
Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Bilkent Üniversitesi  
oarikan@ee.bilkent.edu.tr

**Özetçe**—Bu çalışmada Türkiye üzerinde ionküre tabakasındaki kısa dönemli değişimlerin özgün bir metrik yardımıyla istatistiksel olarak karakteristiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Çalışma yapılırken 2011 yılı için orta enlem ionküresindeki değişimlerin KAYAN Pencere İstatistiksel Analiz yöntemiyle ortanca değeri ve standart sapmaları hesaplanmış ve özgün bir metrik ile ionküredeki değişimler incelenmiştir. Çalışma 2009-2013 yılları için de yapılarak Türkiye ve KKTC üzerinde ionküre katmanındaki fırtınaların karakteristiği çıkarılacaktır.

**Anahtar Kelimeler**—İyonküre, Toplam Elektron İçeriği (TEİ), KAYAN Pencere istatistiksel Analizi (KAPA).

**Abstract**—In this paper, characteristic of short-period ionospheric variability over Turkey is determined statistically by a novel metric. First and second moment of the variability of ionospheric variations is calculated by Sliding Window Statistical Analysis (SWSA) method in 2011, and the ionospheric variations are investigated using this novel metric. Ionospheric storms will be characterized over Turkey and North Cyprus Turkish Republic between 2009 and 2013.

**Keywords**—Ionosphere, Total Electron Content (TEC), Sliding Window Statistical Analysis (SWSA).

### I. GİRİŞ

İyonküre, güneşten gelen yüksek enerjili mor ötesi ve X ışınları ile iyonize olmuş gazlardan oluşan, yeryüzünden yaklaşık olarak 90 km ve 1100 km arasındaki yükseklikte yer alan nötr bir plazma katmanıdır [1]. Radyo dalgalarının yayılımını sağlayarak iletişim ortamı oluşturan bu atmosfer tabakası özellikle sivil ve askeri Kısa Dalga (KD) uygulamalarında radyo dalgalarını yansıtarak uzak bölgeler ile haberleşme sağlanması açısından önemli bir yere sahip olmasının yanında, seyir, güdüm ve konumlama sistemleri içinde önem arz etmektedir. Şiddetli güneş patlamaları sebebiyle güneşten dünyaya doğru gelen elektromanyetik dalgalar ve parçacıklar ionküredeki serbest elektron miktarını artırarak, ionküre fırtınaları olarak bilinen kısa süreli karışıklığa yol açarlar. İyonküre katmanındaki bu kısa süreli değişimler, haberleşme

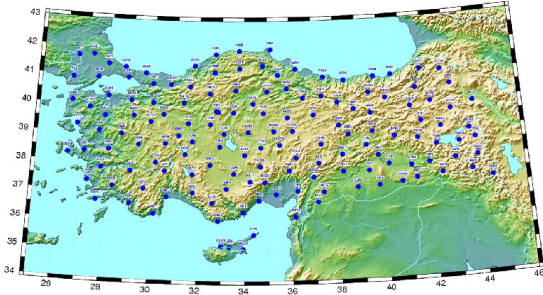
sistemlerindeki etkiler. Dolayısıyla ionküre tarafından etkilenen tüm bu sistemlerin etkilerinin incelenmesi ve ionkürenin uzay-zaman değişimine göre gürbüz sistemlerin oluşturulması açısından, ionküre katmanının yapısı anlaşılmalı ve bu katmandaki değişimler gözlemlenebilmelidir.

İyonküre karakteristiğini ifade eden en önemli parametrelerden biri elektron yoğunluğunun bir fonksiyonu olan Toplam Elektron İçeriği (TEİ)'dir. TEİ, uydu ile alıcı arasındaki 1 m<sup>2</sup> kesitli bir silindir boyunca toplam serbest elektron miktarını ifade eder. Birimi TECU olup 1 TECU, 10<sup>16</sup> el/m<sup>2</sup>'dir. Uydu ve haberleşme sistemleri için önemli bir parametre olan TEİ, konum, zaman, dünyanın manyetik alanı, güneş lekeleri sayısı gibi pek çok etmenin fonksiyonudur. İyonküre katmanındaki kısa ve uzun dönemli değişimler TEİ değerlerinin uzaya ve zamanda değişimleri incelenerek takip edilebilir [2].

İyonküredeki TEİ incelemeleri için yer tabanlı ve uydu tabanlı çeşitli teknikler kullanılmaktadır. Yertabanlı sistemlere ionosonda ve evreyuysuz geri saçılım radarı örnek olarak verilebilir. Yaygın olarak kullanılan uydu sistemlerinden bazıları ise Global Positioning System (GPS), GLONASS ve TOPEX/Poseidon sistemleridir [3]. İyonkürenin yapısının anlaşılması ve TEİ kestirimi için fazla maliyet gerektirmeyen ve en yaygın yöntem olan GPS kayıtlarından elde edilen verilerden yararlanılır.

Harita Genel Komutanlığı (HGK) tarafından Türkiye ve Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti'ne (KKTC) yerleştirilmiş TUSAGA-Aktif GPS alıcı ağı, Mayıs 2009'dan bu yana düzenli olarak çalışmaktadır. Şekil 1'de aktif olarak çalışan çift frekanslı 146 GPS istasyonundan oluşan TUSAGA-Aktif ağı gösterilmektedir. Bu istasyon ağı kullanılarak 2009'dan bu yana IONOLAB grubu tarafından özgün ve gürbüz TEİ kestirimleri yapılmaktadır [2], [4], [5].

Bu çalışma kapsamında ionküre katmanındaki kısa süreli değişimlerin istatistiksel olarak karakteristiğinin belirlenmesi amacıyla öncelikle herhangi bir günün TEİ değeri ile geçmiş yedi gününün ortanca değeri arasındaki farka üç farklı metrik ile bakılmıştır. Daha sonra bu metriklerden hesaplanan fark değerleri üzerinden KAYAN Pencere İstatistiksel Analiz (KAPA) yöntemi kullanılarak özgün bir metrik ile Türkiye



Şekil 1: TUSAGA-Aktif GPS alıcı ağındaki istasyonların Türkiye ve KKTC üzerindeki dağılımı

ve KKTC üzerinde iyonküre bozulmalarının etkileri incelenmiştir. Çalışma 2011 yılı için TUSAGA-Aktif istasyonlarına uygulanmış ve, Türkiye ve KKTC üzerindeki iyonküre katmanındaki yerel ve bölgesel değişimler incelenmiştir. Bu çalışmanın devamında TUSAGA-Aktif GPS ağı üzerinde bulunan istasyonlar kullanılarak 2009-2013 yılları arasında Türkiye iyonküre katmanındaki kısa süreli değişimlerin karakteristiği belirlenecektir.

## II. İYONKÜREDEKİ DEĞİŞİKLİKLERİN İSTATİSTİKSEL ANALİZ YÖNTEMLERİ İLE BELİRLENMESİ

Güneş ve yerküre kaynaklı jeomanyetik etkinlikler TEİ üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Güneşin etkinliğinin artması ile dünya üzerine yönelen parçacıklar ve elektromanyetik dalgalar iyonküre üzerinde karışıklığa yol açar. İyonküre fırtınaları olarak bilinen bu kısa süreli karışıklıkların etkilerinin tek tek gözlemlenmesi zor olduğundan, bu değişiklikler istatistiksel yöntemlerle incelenir.

Bir GPS ağı üzerinden seçilen belirli bir  $u$  istasyonu için  $d$ . gündeki TEİ vektörü:

$$\mathbf{x}_{u;d} = [x_{u;d}(1) \cdots x_{u;d}(n) \cdots x_{u;d}(N_{u;d})]^T \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $N_{u;d}$  seçilmiş  $u$  istasyonunun  $d$ . gün için TEİ değerlerinin ölçüm sayısını vermektedir.  $[\cdot]^T$  ise matematiksel devriği operatörünü tanımlar. TEİ değerlerinin farklı günlerdeki değişimlerini kıyaslayabilmek amacıyla, veri seti düzgelendirilmiştir. Herhangi bir  $u$  istasyonunun  $d$ . gündeki düzgelendirilmiş TEİ değeri aynı zamanda günlük deneysel Olasılık Yoğunluk Fonksiyonu (OYF) olarak tanımlanır ve:

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d} = \frac{\mathbf{x}_{u;d}}{\sum_{n=1}^{N_{u;d}} x_{u;d}(n)} \quad (2)$$

şeklinde hesaplanır.

Bir  $u$  istasyonunun  $d$ . gün için  $N_d$  geçmiş gün üzerinden hesaplanan ortalanca vektörü:

$$\mathbf{x}_{u;d;N_d} = med \{ \mathbf{x}_{u;d-N_d} \cdots \mathbf{x}_{u;d-1} \} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada  $med\{\cdot\}$  matematiksel ortalanca operatörünü temsil eder. Denklem (3) ile ifade edilen ortalanca vektörünün düzgelendirilmiş değeri ise:

$$\hat{\mathbf{P}}_{u;d;N_d} = \frac{\mathbf{x}_{u;d;N_d}}{\sum_{n=1}^{N_{u;d}} x_{u;d;N_d}(n)} \quad (4)$$

ile hesaplanabilir.

İyonküredeki değişimler istasyonun o günkü TEİ değeri ile o gün için hesaplanmış ortalanca değeri arasındaki farka bakılarak bulunabilir. Denklem (2) ve (4) ile verilen düzgelendirilmiş dağılımlar arasındaki fark, (5) ile verilen Çapraz İliinti Katsayısı (Cross Correlation, CC), (6) ile verilen Düzgelendirilmiş Karekök Ortalama Karesel Hata (Normalized Root Mean Square Error, NRMSE) ve (7) ile verilen Simetrik Kullback-Leibler Mesafesi (SKLD) metrikleri kullanılarak belirlenebilir [6], [7].

$$s_1(u; d; N_d) = \frac{\sum_{n=1}^{N_{u;d}} (\hat{P}_{u;d}(n) - \bar{P}_{u;d}) (\hat{P}_{u;d;N_d}(n) - \bar{P}_{u;d;N_d})}{N_{u;d} \sigma_{u;d} \sigma_{u;d;N_d}} \quad (5)$$

$$s_2(u; d; N_d) = \frac{\|\hat{\mathbf{P}}_{u;d} - \hat{\mathbf{P}}_{u;d;N_d}\|_2}{\|\hat{\mathbf{P}}_{u;d}\|_2} \quad (6)$$

$$s_3(u; d; N_d) = KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d;N_d}) + KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d;N_d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) \quad (7)$$

$$KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d;N_d}) = \sum_{n=1}^{N_{u;d}} \hat{P}_{u;d}(n) \ln \left( \frac{\hat{P}_{u;d}(n)}{\hat{P}_{u;d;N_d}(n)} \right) \quad (8)$$

$$KLD(\hat{\mathbf{P}}_{u;d;N_d} \setminus \hat{\mathbf{P}}_{u;d}) = \sum_{n=1}^{N_{u;d}} \hat{P}_{u;d;N_d}(n) \ln \left( \frac{\hat{P}_{u;d;N_d}(n)}{\hat{P}_{u;d}(n)} \right) \quad (9)$$

Denklem (5)'te verilen  $\bar{P}_{u;d}$  ile  $\bar{P}_{u;d;N_d}$  ve  $\sigma_{u;d}$  ile  $\sigma_{u;d;N_d}$  sırasıyla  $\hat{\mathbf{P}}_{u;d}$  ve  $\hat{\mathbf{P}}_{u;d;N_d}$  düzgelendirilmiş dağılımlarının ortalanca değerleri ve değişimlerini tanımlamaktadır.  $\|\cdot\|_2$  ise metrik uzaklığı ifade eden  $\mathcal{L}_2$  normunun gösterimidir.

Herhangi bir  $u$  istasyonunun  $d$ . gündeki düzgelendirilmiş TEİ değeri ve o gün için hesaplanmış düzgelendirilmiş ortalanca değerinin arasındaki fark istatistiksel olarak incelenerek iyonküredeki bozulmaların etkisi gözlemlenebilmektedir.

### A. İyonküredeki Bozulmaların Etkisinin KAPA Yöntemi ile Belirlenmesi

Konuma ve zamana bağlı değişiminden ötürü TEİ, durağan olmayan uzay-zaman rassal fonksiyonları olarak modellenmektedir. Standart istatistiksel modeller, durağan olmayan rassal fonksiyonlar ile ilgili yeterli bilgileri sağlayamamaktadır. Bu nedenle iyonkürenin kısa süreli değişimini modelleyebilmek amacıyla KAYAN Pencere İstatistiksel Analiz (KAPA) yöntemi kullanılmaktadır [6]–[10].

$s_k(u; d; N_d)$ , belirli bir  $u$  istasyonu için  $d$ . gündeki düzgelendirilmiş TEC değeri ile o gün için  $N_d$  geçmiş gün üzerinden hesaplanmış düzgelendirilmiş ortalanca değeri arasındaki farkın  $k$ . metrik ile hesaplanmış değeri olarak tanımlanmaktadır. Bu metrik üzerinden kayan pencere içerisinde hesaplanan ortalanca değer ve standart sapma aşağıdaki denklemler ile hesaplanabilir.

$$\mu_k(u; d; N_d; N_w) = med \{ s_k(u; d - N_w; N_d) \cdots s_k(u; d - 1; N_d) \} \quad (10)$$

$$\sigma_k(u; d; N_d; N_w) = \sqrt{\frac{1}{N_w} \sum_{d_n=d-N_w}^{d-1} (s_k(u; d_n; N_d) - \mu_k(u; d; N_d; N_w))^2} \quad (11)$$

Denklem (10) ve (11) ile hesaplanan ortalanca değer ve standart sapma kullanılarak herhangi bir  $u$  istasyonunun  $d$ . gün için ortalanca değerden bir standart sapma uzaklıktaki mesafe sınırı olarak hesaplanmıştır. Hergün için hesaplanmış  $s_k(u; d; N_d)$  değerlerinden bu sınırı aşan değerler çıkartıldığında, herhangi bir  $u$  istasyonu için  $d$ . günde elde edilen indirgenmiş metrik değerleri  $\tilde{s}_k(u; d; N_d)$  olarak tanımlanmıştır ve kalan günler üzerinden yeni bir standart sapma hesaplanmıştır.

$$\tilde{\sigma}_k(u; d; N_d; N_w) = \sqrt{\frac{1}{N_w} \sum_{d_n=d-N_w}^{d-1} (\tilde{s}_k(u; d; N_d) - \mu_k(u; d; N_d; N_w))^2} \quad (12)$$

Böylece iyonküredeki değişimlerin etkilerini daha iyi gözlemleyebilmek amacıyla özgün bir metrik oluşturulmuştur. Belirli bir  $u$  istasyonunun  $d$ . günde TEC değerindeki değişimin miktarı  $\gamma_k(u; d; N_d; N_w)$  olarak tanımlanmış ve (13) ile verilmiştir.

$$\gamma_k(u; d; N_d; N_w) = \frac{2|s_k(u; d; N_d) - \mu_k(u; d; N_d; N_w)|}{\tilde{\sigma}_k(u; d; N_d; N_w) + \sigma_0} \quad (13)$$

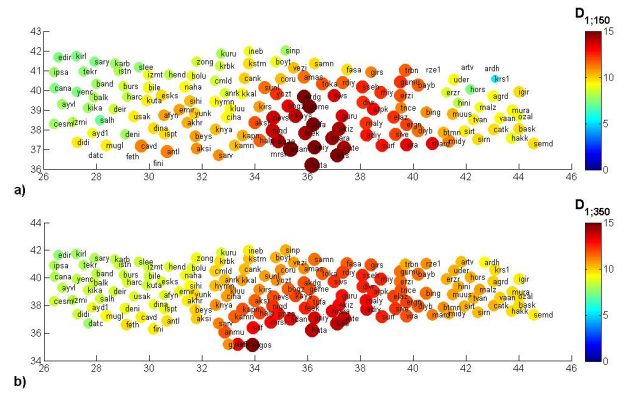
Burada  $\sigma_0$ ,  $u$  istasyonunun ortalamadaki değişimini tanımlamaktadır. Belirlenmiş bir  $u$  istasyon merkezli  $R_r$  yarıçaplı bir çember oluşturularak, çember içerisinde kalan istasyonlar belirlenir ve belirlenen istasyonlar  $u$  istasyonunun  $R_r$  komşuluğundaki istasyonlar olarak adlandırılır. Herhangi bir  $u$  istasyonunun  $d$ . günde  $R_r$  yarıçaplı komşulukları için (13) ile hesaplanmış değerlerin ortalaması alınarak (14) ile verilen daha gürbüz bir metrik oluşturulmuştur.

$$D_{k;R_r}(u; d; N_d; N_w) = \frac{1}{N_{u;R_r}} \sum_{v=1}^{N_{u;R_r}} \gamma_k(v; d; N_d; N_w) \quad (14)$$

Burada  $N_{u;R_r}$ , belirlenmiş  $u$  istasyonunun  $R_r$  yarıçapı içerisindeki komşuluk sayısını tanımlamaktadır. Böylece yukarıdaki denklem kullanılarak yarıçapa bağlı olarak iyonküredeki yerel veya bölgesel değişimlerin daha belirginleştirilmesi amaçlanmıştır.

### III. BULGULAR

Bu çalışmada özgün bir metrik ile Türkiye ve KKTC üzerinde iyonküre fırtınalarının karakteristiğinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma yapılırken TUSAGA-Aktif GPS ağı üzerinde bulunan istasyonların verileri kullanılarak IONOLAB gurubu tarafından özgün bir şekilde kestirilmiş gürbüz, güvenilir ve yüksek çözünürlüklü IONOLAB-TEC değerleri kullanılmıştır [2], [4], [5]. İyonküre fırtınalarını incelemek amacıyla geliştirilen  $W$  indisi, fırtınalı bir günü belirlerken incelenecek günün yedi gün öncesine kadar olan TEİ değerlerinin ortalanca değeri ile karşılaştırma yapmaktadır [11]. Bu çalışmada, fırtınalı günlerin analizi yapılırken o günkü TEİ değeri ile (3) ile verilen denklemde  $N_d = 7$  alınarak hesaplanan medyan vektörü karşılaştırılmıştır. Farklı iki gündeki TEİ değerlerini karşılaştırabilmek amacıyla (2) ve (4) kullanılarak TEİ değerlerinin OYF'leri hesaplanmıştır. Daha sonra bu iki OYF arasındaki farka (5), (6) ve (7) denklemleriyle verilen sırasıyla CC, NRMSE ve SKLD metrikleri ile bakılmıştır. Çalışmanın devamında her bir istasyonun 2011 yılı için üç farklı metrik ile hesaplanmış farkları üzerinden KAPA yöntemi kullanılarak, (10) ve (11) ile verilmiş hareketli ortalanca değer ve standart sapmaları hesaplanmıştır. KAPA yöntemi uygulanırken,  $N_w$  pencere boyunun en iyi istatistiksel karakterizasyonu sağlayacak kadar uzun ve yerel değişkenliği



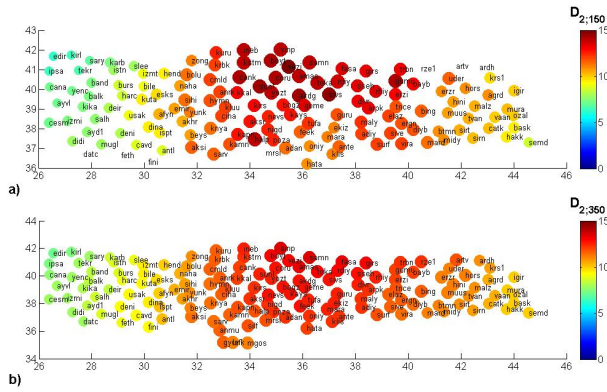
Şekil 2: 15 Şubat 2011 tarihinde iyonküredeki fırtınanın Türkiye ve KKTC üzerinde etkisinin Çapraz İlinti Katsayısı Metriği kullanılarak gösterimi; (a)  $D_{1;150}$ , (b)  $D_{1;350}$

yakalayacak kadar da kısa olacak şekilde seçilmesi gerekmektedir [6]–[10]. Pencere boyunu belirlemek amacıyla yapılan çalışmada  $N_w = 9$  olarak belirlenmiş ve çalışmaya bu değer baz alınarak devam edilmiştir. Hesaplanan hareketli ortalanca değer etrafına bir standart sapma mesafesi sınır konulmuş ve bunun dışında kalan metrik değerleri çıkartılarak, OYF değerlerinin arasındaki farkın değişiminin daha az olduğu metrik değerleri üzerinden (12) ile verilmiş yeni bir standart sapma hesaplanmıştır. Daha sonra (13) kullanılarak 2011 yılı için her bir istasyonun iyonküredeki günlük değişim miktarı özgün bir metrik ile hesaplanmış ve, Türkiye ve KKTC üzerindeki iyonkürenin yerel ve bölgesel değişimini belirlemek amacıyla her bir istasyon için  $R_r$  yarıçapı içerisinde kalan komşulukların ortalamaları (14) ile bulunarak sonuçlar incelenmiştir.

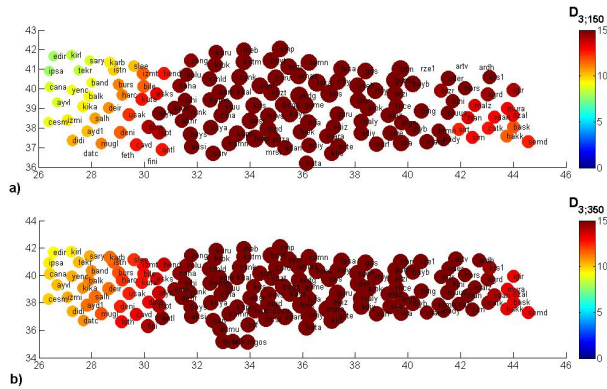
Şekil 2a, Şekil 3a ve Şekil 4a'da sırasıyla CC, NRMSE ve SKLD metrikleri kullanılarak, iyonkürenin ortalama 5 büyüklüğünde ve 13 saat boyunca fırtınalı olduğu [12] 15 Şubat 2011 tarihinde 150 km komşuluktaki istasyonların ortalamalarından; Şekil 2b, Şekil 3b ve Şekil 4b'de ise 350 km komşuluktaki istasyonların ortalamalarından hesaplanan  $D$  metriğinin değerleri gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde fırtınanın özellikle kuzey-güney doğrultusunda Orta Anadolu bölgesinde etkisinin daha belirgin olduğu görülmektedir. Komşuluk yarıçapı arttırıldığında bu etkinin Türkiye geneline yayıldığı ve  $D$  metriğinin büyüklüğünün azaldığı görülmektedir. Üç metrik kıyaslandığında karşılaştırma yapılırken kullanılan SKLD metriğinin fırtınaya daha duyarlı olduğu görülmektedir. Şekil 5'te ise sırasıyla CC, NRMSE ve SKLD metrikleri kullanılarak, iyonkürenin ortalama 5.7 büyüklüğünde ve 35 saat boyunca fırtınalı olduğu [12] 26 Ekim 2011 tarihinde 150 km komşuluktaki istasyonların ortalamalarından hesaplanan  $D$  metriğinin değerleri gösterilmektedir. Şekiller incelendiğinde iyonküredeki fırtınanın daha çok Güney Anadolu bölgesinde doğu-batı ekseninde etkili olduğu gösterilmiştir. Aynı zamanda CC ve NRMSE metrikleri incelendiğinde bu fırtınanın etkileri gözlemlenemezken, SKLD metriği fırtınanın karakteristiği hakkında bilgi vermektedir.

### IV. SONUÇLAR

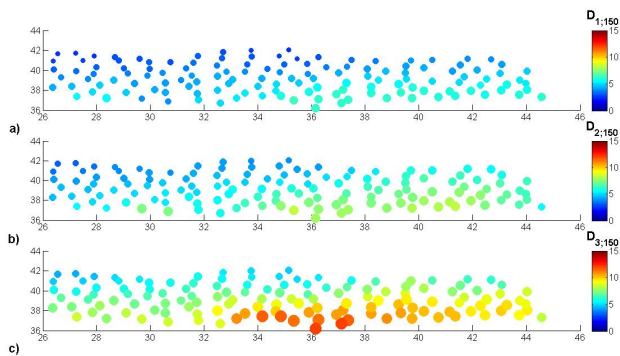
Bu çalışmada iyonkürenin fırtınalı olduğu günlerde Türkiye ve KKTC üzerindeki iyonküre katmanındaki değişimleri



Şekil 3: 15 Şubat 2011 tarihinde iyonküredeki fırtınanın Türkiye ve KKTC üzerinde etkisinin NRMSE Metriği kullanılarak gösterimi; (a)  $D_{2;150}$ , (b)  $D_{2;350}$



Şekil 4: 15 Şubat 2011 tarihinde iyonküredeki fırtınanın Türkiye ve KKTC üzerinde etkisinin SKLD Metriği kullanılarak gösterimi; (a)  $D_{3;150}$ , (b)  $D_{3;350}$



Şekil 5: 26 Ekim 2011 tarihinde iyonküredeki fırtınanın Türkiye ve KKTC üzerinde etkisinin üç farklı metrik kullanılarak gösterimi; (a)  $D_{1;150}$ , (b)  $D_{2;150}$ , (c)  $D_{3;150}$

inceleyebilmek amacıyla uzay-zaman boyutunda özgün bir metrik geliştirilmiştir. İlk aşamada yedi günlük ortalama değer vektörü ile günlük TEİ değeri farklı metrikler ile karşılaştırılmıştır. Bu metrik değerleri üzerinden KAPA yöntemi ile istatistiksel analiz yapılmış ve özgün bir metrik kullanılarak Türkiye iyonküresindeki değişimin nasıl olduğu gösterilmiştir. Bunun sonucunda iyonküredeki bozulmaların Türkiye ve KKTC üzerinde aynı olmadığı bazen belirli bir bölge ile sınırlı kalırken, bazen de tüm Türkiye'yi etkilediği gözlemlenmiştir. D metriği hesaplanırken, yarıçap artırıldığında fırtınanın belirli bir bölgeye olan etkisi gözlemlenmiştir. SKLD metriğinin diğer iki metriğe göre fırtınalara karşı daha duyarlı olduğu gösterilmiştir. Çalışmanın devamında TUSAGA-Aktif GPS ağı üzerinde bulunan istasyonlar kullanılarak 2009-2013 yılları arasında Türkiye iyonküre katmanındaki fırtınaların karakteristik özellikleri belirlenecektir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma TUBITAK 109E055, Ortak TUBITAK 110E296 ve RFBR 11-02-91370-CTa, ve Ortak TUBITAK 112E568 ve RFBR 13-02-91370-CTa numaralı projeler tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKÇA

- [1] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan, O., "Regularized estimation of vertical total electron content from Global Positioning System data," *Journal of Geophysical Research*, 108(A12), 1469-1480, 2003.
- [2] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan, O., "Regularized estimation of vertical total electron content from GPS data for a desired time period," *Radio Science*, 39, RS6012, 2004.
- [3] Komjathy, A., "Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System," Doktora Tezi, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, University of New Brunswick, Kanada.
- [4] Nayir, H., "Yerküresel Konumlama Sistemi İşaretleri Kullanılarak İyonosfer Toplam Elektron İçeriği Kestirimi," Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2007.
- [5] Arıkan, F., Nayir, H., Sezen, U., Arıkan, O., "Estimation of Single Station Inter-frequency Receiver Bias Using GPS-TEC," *Radio Science*, 43, RS4004, doi:10.1029/2007RS003785, 2008.
- [6] Karatay, S., "Deprem ile İyonküre Toplam Elektron İçeriği Arasındaki İlişkinin Araştırılması," Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, Türkiye, 2010.
- [7] Deviren, M.N., "Türkiye Üzerinde Toplam Elektron İçeriği (TEİ) İçin Uzay-Zaman Rassal Alan Kestirimi," Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2013.
- [8] Köroğlu, O., "TUSAGA ve TUSAGA-Aktif Ağı Verileri ile Toplam Elektron İçeriğinin İstatistiksel Analizi," Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2012.
- [9] Deviren, M.N., Arıkan, F., Arıkan, O., "Türkiye İyonküre Yönmesinin Kayan Pencere İstatistiksel Analiz Yöntemi ile İncelenmesi," IEEE 21. Sinyal İşleme ve Uygulamaları Kurultayı, SIU 2013, Girne, KKTC, 2012.
- [10] Arıkan, F., Erol, C.B., Arıkan, O., "Statistical Characterization of Time Variability in Midlatitude Single-Tone HF Channel Response," *Radio Science*, 39, RS01889, 1429-1443, 1998.
- [11] Gulyaeva, T.L., Stanislawska, I., "Derivation of a planetary ionospheric storm index," *Ann. Geophys.*, 26, 2008.
- [12] Planetary Ionosphere-Plasmasphere Storms from JPL GIM-TEC IONEX maps, <http://www.izmiran.ru/ionosphere/weather/storm/tecstorm.txt> (Accessed: 2014).