

Depremi Kaynaklı Olabilecek İyonosferik Değişimlerin Belirlenmesi Üzerine Yeni Bir Yaklaşım Geliştirilmesi

Samed İnyurt^{1*}, Çetin Mekik¹, Ömer Yıldırım²

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, 67100, Zonguldak.

²Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 60150, Tokat.

Özet

İyonosfer tabakası yapısı gereği güneş aktivitesi, mevsimsel değişim, gece-gündüz, konum, jeomanyetik aktivite, deprem gibi etmenlere bağlı olarak değişim göstermektedir. Bu tabakada meydana gelen değişim çoğunlukla güneş kaynaklı olsa da sözü edilen diğer etkiler göz önünde bulundurulmalıdır.

Günümüzün en büyük sorunlarından biri olan deprem dünya genelinde çok sayıda can ve mal kaybına sebep olmaktadır. Depremle ilgili geçmişten bugüne çok sayıda bilim insanı çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda; deprem öncesi, anı veya sonrasında iyonosfer tabakasında bazı değişimler meydana geldiği, bu sebeple deprem tahmini çalışmalarında iyonosfer tabakasının incelenmesi gerekliliği ortaya konulmuştur. Bu çalışma kapsamında deprem kaynaklı iyonosferik anomalilerin belirlenebilmesi için deprem öncesi, anı ve sonrasında kapsayacak şekilde toplam 60 günlük TEC verisi kullanılmıştır. LB ve UB sınırlarının hassas şekilde belirlenebilmesi için ilk 30 güne ilişkin TEC verilerinden faydalanarak deprem analizi için kullanılacak k değeri belirlenmiştir. Deprem analizi için kullanılacak k değeri elde edildikten sonra deprem kaynaklı iyonosfer anomalilerinin belirlenebilmesi için LB ve UB değerleri her epok için üretilmiştir. Bu sayede iyonosfer tabakasına etki eden mevsimsel değişim ile küçük ve orta seviyedeki jeomanyetik etkilerin deprem kaynaklı iyonosferik değişim analiz sonuçlarına olan etkisinin azaltılması sağlanmış olacaktır.

14 Kasım 2016 (yılın günü 319) tarihinde meydana gelen Yeni Zelanda depreminin merkez koordinatları -42,75 N, 173,07 E olan depremin büyüklüğü Mw 7,8'dir. Analizde k sabiti 2,50 olarak belirlenmiştir. Yapılan analiz sonucunda 315 ve 317. günlerde pozitif anomaliler görülmüş ve anomali miktarları verilmiştir. Söz konusu anomalilerin depremle ilgili olup olmadığının anlaşılabilmesi için anomali görülen günlerde iyonosferik şartlar detaylı olarak irdelenmiştir. Söz konusu günlerde iyonosferik şartların oldukça sakin olduğu, dolayısıyla söz konusu anomalilerin deprem kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Anahtar Sözcükler

GPS, İyonosfer, Deprem

1. Giriş

Günümüzün en büyük sorunlarından biri olan deprem dünya genelinde çok sayıda can ve mal kaybına sebep olmaktadır. Depremle ilgili geçmişten bugüne çok sayıda bilim insanı çalışma yapmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda; deprem öncesi, anı veya sonrasında iyonosfer tabakasında bazı değişimler meydana geldiği, bu sebeple deprem tahmini çalışmalarında iyonosfer tabakasının incelenmesi gerekliliği ortaya konulmuştur. İyonosfer-deprem ilişkisine yönelik çalışmalarda dünya genelinde büyüklükleri farklılık gösteren depremler incelenmiş ve TEC miktarı değişimi ile ilişkisi ortaya konulmuştur. Plotkin (2003) çalışmasında 13 Şubat 2001 tarihinde El Salvador'da meydana gelen Mw 6,6 büyüklüğündeki depremi incelemiş ve depremden 2 gün önce GPS alıcısından elde edilen TEC değerlerinde düşüş yaşandığı kaydedilmiştir. Çalışmada söz konusu değişimin jeomanyetik aktivite veya solar rüzgar kaynaklı olabileceği belirtilmiştir.

Pulinets vd. (2003) yapmış olduğu çalışmada Mw>5 olan depremlerinde %73'ünde Mw>6 olan depremlerin %100'ünde depremden önceki 5 gün içerisinde iyonosferik anomaliler meydana geldiğini saptamıştır. Liu vd. (2004) yapmış olduğu çalışmada Tayvan'da 1999-2002 yılları arasında meydana gelen 20 adet depremi hareketli medyan yöntemi ile irdelenmiştir. Çalışmanın sonucunda $Mw \geq 6$ depremleri için söz konusu metodun depremden önceki 5 gün içerisinde deprem kaynaklı iyonosfer değişimlerini saptamada %80 oranında başarı sağladığını belirtmiştir. Fujiwara vd. (2004) yapmış olduğu çalışmada $Mw \geq 4,8$ olan depremlerde deprem öncesi iyonosferik anomalileri hareketli medyan yöntemi ile irdelenmiştir. Çalışma sonucunda depremden önceki 5 gün içerisinde iyonosferde ciddi değişimler meydana geldiğini saptamıştır. Liu vd. (2006) Tayvan bölgesinde 1994-1999 yılları arasında $Mw \geq 5$ olan 184 adet depremin, iyonosferin F2 tabakasının yüksekliği ve f_0F_2 kritik frekansı değişimleri ile olan ilişkisini irdelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda f_0F_2 kritik frekansındaki anormal düşüşlerin %25'lik kısmının depremden önceki 5 gün içerisinde yerel zamanda 12:00-18:00 saatleri arasında gerçekleştiği anlaşılmıştır. Bunun yanında deprem öncesi iyonosferik değişimlerin depremin büyüklüğü ile doğru orantılı olduğu, deprem merkezinden uzaklaştıkça iyonosferik anomalilerin düşüş gösterdiği anlaşılmıştır. Söz konusu durumun deprem kaynaklı enerji salınımı ile ilgili olduğu düşünülmektedir.

Liu vd. (2009) yapmış olduğu çalışmada GPS alıcıları kullanılarak üretilmiş olan GIM haritaları yardımıyla 01.05.1998-30.04.2008 yılları arasında Çin'de gerçekleşen $Mw \geq 6,0$ olan 35 adet deprem irdelenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda $Mw \geq 6,3$ olan 17 adet depremden önce 3-5 gün içerisinde TEC değerlerinde ciddi azalmalar meydana geldiği anlaşılmıştır. Çalışmanın diğer bölümünde 12.05.2008 tarihinde Çin'in Wenchuan bölgesi yakınlarında meydana gelen Mw=7,9 büyüklüğündeki depremin iyonosfer tabakasında meydana getirdiği olası değişim hem GIM-

* Sorumlu Yazar: Tel: (0372)2911100 (2579) Faks: (0372)2911100

E-posta: samed_inyurt@hotmail.com (İnyurt S)

TEC değerleriyle hem de FORMOSAT3/COSMIC (F3C) uydularından elde edilen elektron yoğunluğu değerleriyle izlenmiştir. Çalışma sonucunda GIM-TEC değerlerinde deprem öncesi azalma görüldüğü, F3C uydularından elde edilen sonuçlar irdelendiğinde $N_m F_2$, $h_m F_2$ değerlerinde yaklaşık %40 düşüş yaşandığı kaydedilmiştir. Saroso vd. (2008) yapmış olduğu çalışmada 1993-2002 yılları arasında büyüklüğü $M_w \geq 5,9$ olan Sulawesi depremleri ve 26.12.2004 tarihinde gerçekleşen Sumanda-Andaman depremi irdelenmiştir. Deprem kaynaklı TEC değişimlerinin tespit edilmesi amacıyla deprem öncesi ve sonrası 15 günlük TEC değerleri kullanılarak üst ve alt sınırlar oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda depremden 2-7 gün öncesinde TEC değerlerinde ciddi düşüşler yaşandığı görülmüştür. Özellikle Sumanda-Andaman depreminde meydana gelen deprem kaynaklı anomalilerin deprem merkezinden 1.600 km uzaklıkta tespit edilebildiği belirtilmiştir.

Bu çalışmada 14 Kasım 2016 tarihinde Yeni Zelanda'da meydana gelen depreme ilişkin deprem öncesi ve sonrası iyonosferik değişimler GPS ölçüleri kullanılarak elde edilen TEC değerleri üzerinden irdelenmiştir. Söz konusu depremin merkez koordinatları (-42,75 N, 173,07 E), depremin derinliği 15 km, büyüklüğü $M_w 7,8$ olarak belirlenmiştir.

2. Metot

Deprem kaynaklı iyonosferik anomalilerin belirlenmesinde çok sayıda istatistiksel yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemlerden biri Liu vd. (2009) önermiş olduğu çeyrekler arası fark bazlı hareketli medyan istatistik analizidir. Bu yöntemde, ilk olarak hareketli ortanca (M), birinci çeyrek (LQ) ve üçüncü çeyrek(UQ) değerleri elde edilir. Daha sonra kestirilen GPS-TEC değerlerinin ortalama değeri (m) ve standart sapması (σ) olan normal dağılımda oldukları varsayımı ile m ve $1,34 \sigma$ aralığında kabul aralığı olarak seçilmektedir. Sonuç olarak GPS-TEC değerlerinin deprem öncesi ve sonrası 15 gün için hareketli alt sınır ve üst sınır elde edilmektedir. Kullanılan yöntem bir örnekle anlatılacak olursa, ilk 15 güne ait TEC verileri kullanılarak üretilecek medyan, LQ ve UQ değerleri 16. gündeki TEC değerlerinin analizinde referans veri olarak kullanılacaktır. Yine benzer biçimde 2 ile 16'ncı gün arasındaki TEC verileri 17. güne ait LB ve UB sınırlarının oluşturulmasında kullanılacaktır. Bu durumda ilgili epoktaki TEC değeri %60-65 güvenilirlik seviyesi ile söz konusu sınır değerlerin arasında olacaktır (Liu vd. 2009). Eğer analiz edilen güne ilişkin TEC değerlerinin 1/3 ve daha fazlası üst sınır değerden fazla veya alt sınır değerden az ise bugün anomalinin yaşandığı gün olarak ifade edilmektedir (Liu vd. 2004). Örnek verecek olursak CODE merkezinin yayınlamış olduğu 1 saat zamansal çözünürlüklü TEC değerleri kullanılarak yapılan analizde toplam 24 adet veri bulunmaktadır. Bunlardan sekiz ve daha fazlası üst sınırın üstüne veya alt sınırın altına inmişse o gün anomalinin yaşandığı gün olarak ifade edilmektedir. Eğer bu veriler üst sınırın üstüne çıkmışsa pozitif anomali, alt sınırın altına inmişse negatif olarak adlandırılmaktadır.

Akhoondzadeh vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada, Liu vd. (2009)'da önermiş olduğu yöntemdeki LB ve UB sınırlarını belirlemede kullanılan k değerinin sabit olduğunu bu nedenle k değerinin her deprem için farklı olması gerekliliğini ortaya koymuştur. Diğer yandan, UB ve LB değerlerinin belirlenmesinde yaklaşık 55 günlük veri kullanılmasının iyonosfer tabakasında var olan sezonsal değişim etkilerinden arındırılması açısından uygun olacağı düşünülmüştür. Akhoondzadeh vd. (2010) yapmış oldukları çalışmada LB ve UB sınırlarını aşağıdaki denklemler aracılığıyla belirlemiştir.

$$LB = M - k * IQR \quad (1)$$

$$UB = M + k * IQR \quad (2)$$

$$LB < x < UB \quad -k < \frac{x-M}{IQR} < k \quad D_x = \frac{x-M}{IQR} \quad (3)$$

Burada x, t zamanına ait gözlemlenen TEC değerini, LB alt sınır TEC değerini, UB üst sınır TEC değerini, M medyan değerini, IQR çeyrekler arası açıklığı, D_x gözlemlenen TEC değerinin farkını ifade etmektedir.

Söz konusu çalışmada k değerinin depremin büyüklüğüyle orantılı seçilmesi gerektiğini vurgulanmış ve eğer herhangi bir zamana ait hesaplanan D_x değeri seçilen k değerinden büyük ise, bu zamana ait TEC değerinin anomaliye sebep olduğu düşünülmektedir. Fakat burada k değerinin elde edilmesiyle ilgili herhangi bir matematiksel ifade ortaya konulmamıştır. Diğer yandan Liu vd. (2009) çalışmasında m ortalama ve σ sapmasına sahip GPS-TEC ölçüleri için beklenen m ve $1,34\sigma$ kabul aralığının iyonosferin alt ve üst sınırlarının belirlenmesi için yetersiz kaldığı düşünülmektedir. Bilindiği üzere iyonosfer tabakası orta enlem bölgesinde ekvatorial ve kutup bölgelerine göre daha sakin davranış göstermektedir. Dolayısıyla her iki bölge için kestirilen TEC değerleri için üst ve alt sınırlarının oluşturulmasında m ve $1,34\sigma$ kullanılması doğru bir tasvir olmayacaktır. Yine benzer şekilde iyonosferi etkileyen jeomanyetik etki, solar aktivite gibi etkenler iyonosfer tabakasında farklı bölgelerde farklı etki göstermektedir. Bu sebeple GPS-TEC değerlerinin alt ve üst sınırlarını oluştururken bölgeye uygun olacak şekilde sınırların belirlenmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır. Eğer analiz edilen bölgeye ilişkin alt ve üst sınır değerler doğru şekilde oluşturulursa, deprem kaynaklı oluşabilecek iyonosferik anomalilerin

belirlenmesi daha kolay olacaktır. Sonuç olarak deprem kaynaklı iyonosferik anomalilerin doğru bir şekilde tespiti için öncelikle sınırları oluşturacak k değerinin hassas bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında deprem kaynaklı iyonosferik anomalilerin belirlenebilmesi için deprem öncesi, anı ve sonrasında kapsayacak şekilde toplam 60 günlük TEC verisi kullanılmıştır. LB ve UB sınırlarının hassas şekilde belirlenebilmesi için ilk 30 güne ilişkin TEC verilerinden faydalanarak deprem analizi için kullanılacak k değeri aşağıda açıklandığı şekilde belirlenmiştir. Deprem analizi için kullanılacak k değeri elde edildikten sonra deprem kaynaklı iyonosfer anomalinin belirlenebilmesi için LB ve UB değerleri her epok için üretilmiştir. Bu sayede iyonosfer tabakasına etki eden mevsimsel değişim ile küçük ve orta seviyedeki jeomanyetik etkilerin deprem kaynaklı iyonosferik değişim analiz sonuçlarına olan etkisinin azaltılması sağlanmış olacaktır.

Çalışmada Liu et al. (2009) yönteminde UB ve LB değerlerinin belirlenmesi için kullanılan formülde yer alan 1.5 sabit değeri Akhoondzadeh vd. (2010) yönteminde olduğu gibi k değeri olarak düşünülmüştür. Dolayısıyla LB ve UB için oluşturulacak yeni denklem aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir. Yazarların çalışmada belirttiği D_x değeri gözlemlenen TEC değerinin sapmasını belirtmektedir. Dolayısıyla her epok için gözlemlenen TEC değeri için (Liu et al. 2009) yönteminde olduğu gibi bir sapma değeri elde edilebilir.

$$LB=M-k(M-LQ) \quad (4)$$

$$UB=M+k(UQ-M) \quad (5)$$

$$k_i = \frac{x_i - M_i}{IQR_i} \quad (6)$$

(6) denkleminde k_i ilgili epoka ait sapma değerini, x_i gözlemlenen TEC değerini, M_i medyan değerini, IQR_i kartiller arası farkı ifade etmektedir. Her saate ilişkin k değeri analiz edilen günlerden önceki 30 güne ait TEC verisi kullanılmıştır. (6) denklemini kullanılarak her saat için 30 adet k değeri elde edilmiş ve bunların maksimum değeri alınmıştır. Daha sonra her saate ilişkin elde edilen k değerlerinin ortalaması alınarak deprem analizi için kullanılacak tek bir k değeri elde edilmiştir. Bu sayede iyonosferi etkileyen sezonsal değişim, solar etki, jeomanyetik aktivite gibi etkenlerin anomali olarak analiz sonuçlarına olan etkisinin önüne geçileceği düşünülmektedir. Daha sonra (4) ve (5) denklemleri kullanılarak sırasıyla LB ve UB değerleri elde edilmiştir. Tüm bu işlemler için gerekli verilerin indirilmesi, analiz edilmesi gibi işlemler MATLAB ortamında hazırlanan program ile elde edilmiştir.

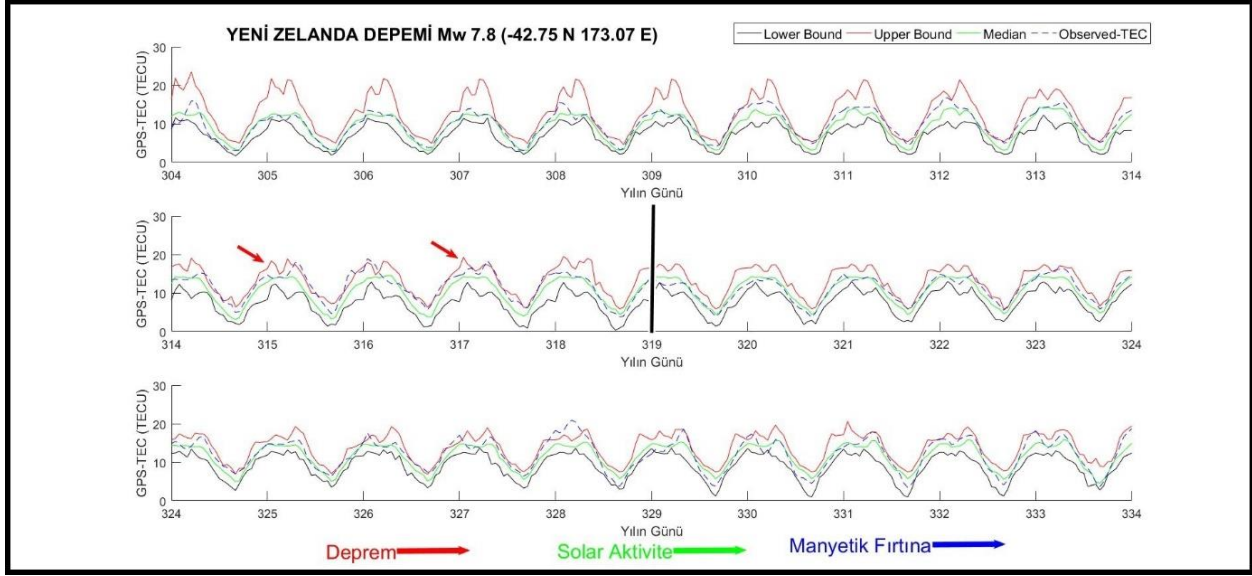
Çalışmada ikinci yöntem olarak, deprem kaynaklı anomalilerin tespit edilebilmesi amacıyla deprem öncesi ve sonrasında kapsayan 60 günlük gerçek TEC değerlerinden faydalanılarak model oluşturulmuş, bu model aracılığıyla TEC değerlerinin genel davranışı belirlenmiştir. Model sonucunda üretilen TEC değerleri, gerçek TEC değerlerinden çıkarılmış ve elde edilen farklar istatistiksel teste tabi tutularak anomali tespiti yapılması amaçlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda analiz için kullanılacak elde edilen modele ilişkin denklem aşağıda sunulmuştur.

$$TEC(x) = a1*\sin(b1*x+c1) + a2*\sin(b2*x+c2) + a3*\sin(b3*x+c3) \quad (7)$$

Burada $a1, a2, a3$ genliği; $b1, b2, b3$ açısız frekansı; $c1, c2, c3$ fazı; x ise zamanı temsil etmektedir. Bu tez çalışmasında yukarıda anlatılan iki model kullanılarak her deprem için ayrı ayrı uygulanacak ve ortaya çıkan sonuçlar detaylı olarak irdelenecektir.

3. Uygulama

14 Kasım 2016 tarihinde meydana gelen Yeni Zelanda depreminin GPS-TEC değişimleri gösterilmiştir. Merkez koordinatları -42,75 N, 173,07 E olan depremin derinliği 15 km, büyüklüğü M_w 7,8'dir. Analizde k sabiti 2,50 olarak belirlenmiştir.



Şekil 1: Yeni Zelanda Depremi öncesi, anı ve sonrası GPS-TEC Değişimleri

Tablo 1: Yeni Zelanda Depremi Anomali Miktarı ve Türü

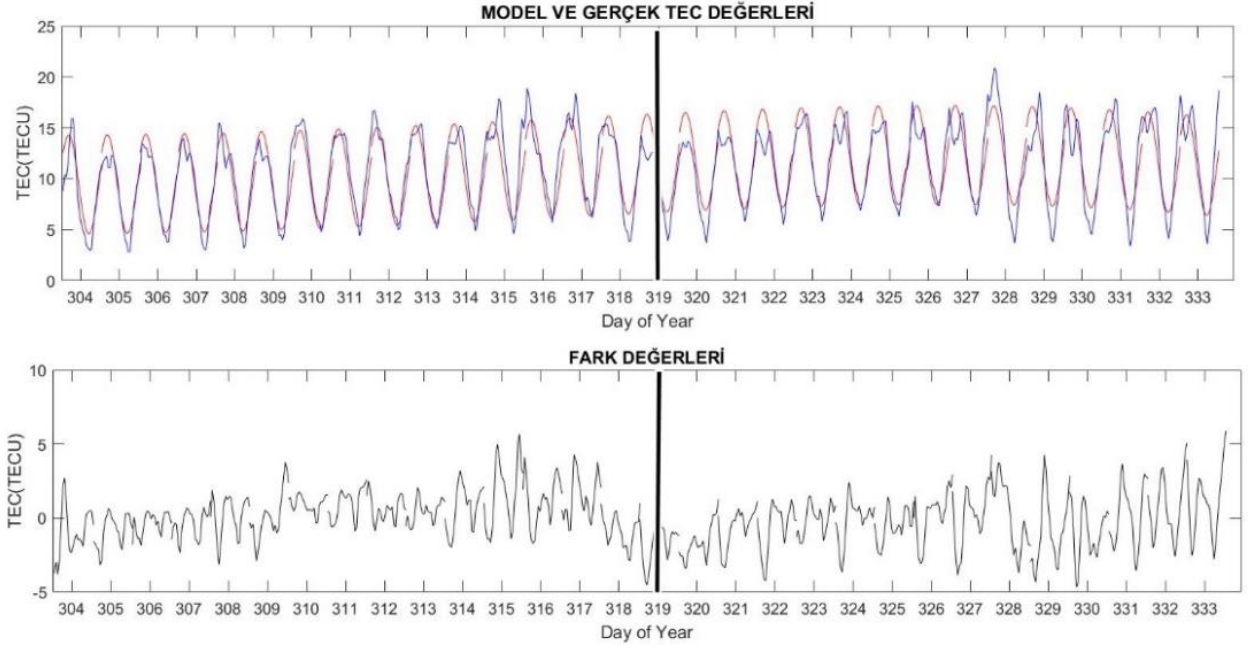
Gün	Saat	TEC-Farkı (TECU)	Anomali Türü
315	7	0,60	Pozitif
315	8	1,60	Pozitif
315	9	1,10	Pozitif
315	10	0,85	Pozitif
315	11	1,65	Pozitif
315	12	0,30	Pozitif
315	20	2,50	Pozitif
315	21	2,85	Pozitif
317	7	1,10	Pozitif
317	8	0,24	Pozitif
317	9	0,50	Pozitif
317	10	1,00	Pozitif
317	11	0,25	Pozitif
317	16	0,25	Pozitif
317	17	0,10	Pozitif
317	19	0,25	Pozitif
317	20	0,25	Pozitif
317	21	1,10	Pozitif

İlk yöntemle yapılan analiz sonucunda 315 ve 317. Günlerde pozitif anomaliler tespit edilmiş ve Şekil 1’de gösterilmiştir. Bu günlere ilişkin görülen anomalilerin miktar ve zamanına ilişkin bilgiler Tablo 1’de verilmiştir.

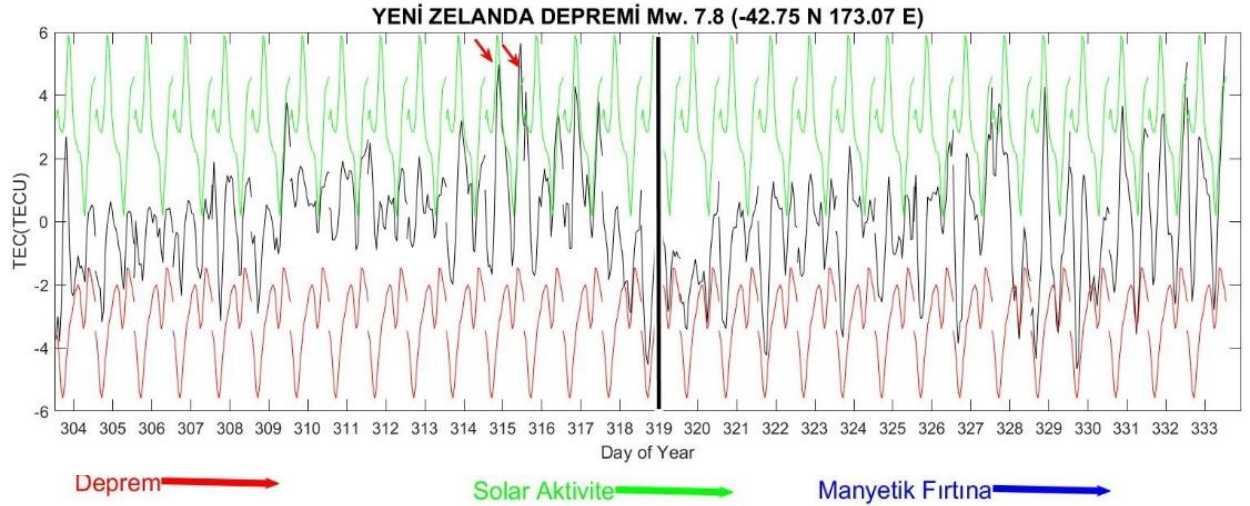
İkinci yöntemde kullanılacak olan model TEC değerlerinin ortaya çıkarılmasını sağlayacak olan denklem aşağıda verilmiştir.

$$TEC(x)=34,30*\sin(0,058*x-0,359)+24,74*\sin(0,074*x+2,304)+4,877*\sin(6,28*x+0,509) \quad (8)$$

Söz konusu denklem aracılığıyla elde edilen TEC değerleri ve gerçek TEC değerleri aşağıda gösterilmiştir. Devamında her epoğa ilişkin elde edilen iki TEC değeri arasındaki fark üzerinden yukarıda daha önce açıklanan alt ve üst sınırın oluşturulması için istatistiksel test uygulanmış ve sonuçları gösterilmiştir.



Şekil 2: Yeni Zelanda Depremi öncesi, anı ve sonrası GPS-TEC Değişimleri

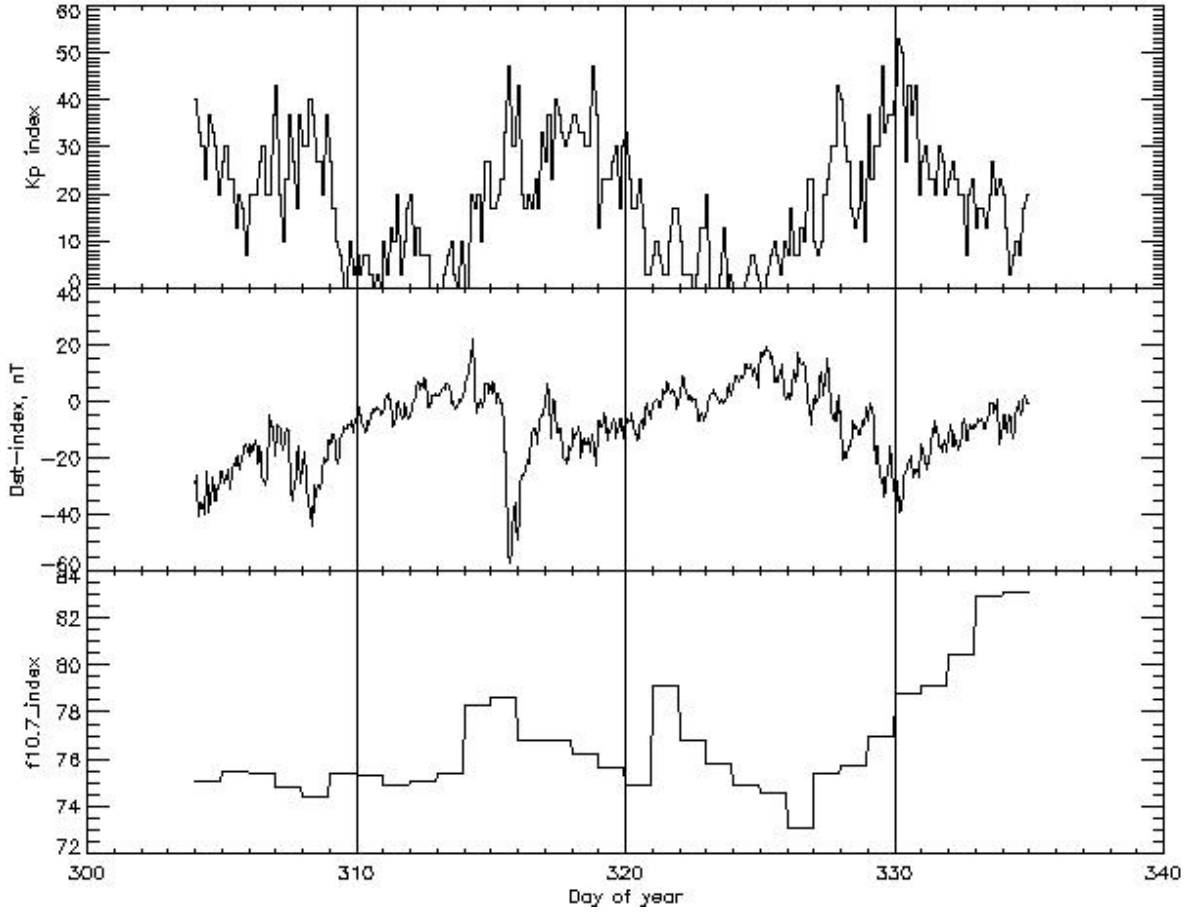


Şekil 3: Fark değerleri üzerinden yapılan analiz gösterimi

Tablo 2: Yeni Zelanda Depremi Anomali Miktarı ve Türü

Gün	Saat	TEC-Farkı. (TECU)	Anomali Türü
315	21	1,71	Pozitif
315	22	1,37	Pozitif
316	19	1,10	Pozitif
316	20	1,12	Pozitif

İkinci yöntem kullanılarak yapılan analiz sonucunda 315 ve 316. Günlerde anomali tespit edilmiş ve Şekil 3'te gösterilmiştir. Tespit edilen anomalilerin miktar ve türüne ilişkin bilgiler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 4: Analizi Yapılan Günlere İlişkin (Kp*10), Dst ve F10.7 İndislerinin Gösterimi

Elde edilen anomalilerin deprem ile ilişkisinin olup olmadığının anlaşılabilmesi için analiz edilen günlere ilişkin uzay iklim koşulları hakkında bilgi veren Kp, DsT ve F10.7 cm indisleri Şekil 4'de verilmiştir.

Yapılan analiz sonucunda uzay iklim koşullarının 316 ve 317. günlerde oldukça sakin olduğu, 315. günün belirli bölümlerinde jeomanyetik aktivite gerçekleştiği görülmektedir (DsT: -59 nT, Kp*10: 47). Bu nedenle 316 ve 317. günlerde tespit edilen anomalilerin deprem kaynaklı olabileceği, 315. güne ilişkin görülen pozitif anomalilerin manyetik fırtına ve deprem kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada 14 Kasım 2016 tarihinde meydana gelen Yeni Zelanda depremine ilişkin olası iyonosfer değişimlerin tespit edilebilmesi için iki farklı yöntem uygulanmış ve sonuçları detaylı şekilde irdelenmiştir.

TEC değerlerinin çeyrekler arası fark bazlı hareketli medyan yöntemi ile alt ve üst sınır değerleri deprem öncesi ve sonrası 15 gün için elde edilmiştir. Toplamda 60 günlük TEC verisinin kullanıldığı bu çalışmada deprem bölgesine ilişkin istatistiksel analizde kullanılacak özel bir k değeri belirlenmiştir. Bu değer belirlenmesinden sonra uygulanan istatistiksel test sonucunda elde edilen pozitif anomaliler verilmiştir. Söz konusu anomalilerin deprem ile ilişkisinin daha iyi irdelenebilmesi amacıyla iyonosferik koşullar hakkında bilgi veren Kp, DsT ve F10.7cm indisleri detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma sonucunda 315 ve 317. günlerde pozitif anomali elde edilmiştir.

İkinci yöntemde ise her bir depreme ilişkin analizde kullanılan toplam 60 günlük TEC verisinin genel davranışının belirlenmesi amacıyla matematiksel model oluşturulmuştur. Elde edilen bu model aracılığıyla üretilen TEC değerleri gerçek TEC değerlerinden çıkarılmış ve kalan TEC değerlerinin alt ve üst sınır değerleri her epoktaki TEC değeri için elde edilmiştir. Bu yöntem sonucunda 315 ve 316. günlerde pozitif anomali elde edilmiştir.

Her iki yöntem kullanılarak yapılan analiz sonuçları, literatür araştırması sonucunda 15 gün öncesi ve sonrası iyonosfer öncüllerinin yakalanabileceği sonucunu desteklemektedir. Diğer yandan her iki yöntemin uygulanması sonucunda 315. günde pozitif anomali tespit edilmiş, buna ek olarak ilk yöntemde 317. günde ikinci yöntemde ise 316. günde pozitif anomali tespit edilmiştir. Söz konusu bu değişkenliğin istatistiksel yaklaşımların farklı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Kaynaklar

- Akhoondzadeh M., Parrot M., Saradjian M. R., (2010), *Electron and ion density variations before strong earthquakes ($M > 6.0$) using DEMETER and GPS data*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 10(1): 7-18.
- Fujiwara H., Kamogawa M., Ikeda M., Liu J. Y., Sakata H., Chen Y. I., Ohtsuki Y. H., (2004), *Atmospheric anomalies observed during earthquake occurrences*. Geophysical Research Letters, 31(17): 1-5.
- Liu J. Y., Chuo Y. J., Shan S. J., Tsai Y. B., Chen Y. I., Pulinets S. A., Yu S. B., (2004), *Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements*. In Annales Geophysicae, 22: 1585-1593.
- Liu J. Y., Chen Y. I., Chuo Y. J., Chen C. S., (2006), *A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly*. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 111 (A5): 1-4.
- Liu J. Y., Chen Y. I., Chen C. H., Liu C. Y., Chen C. Y., Nishihashi M., Lin C. H., (2009), *Seismoionospheric GPS total electron content anomalies observed before the 12 May 2008 $M_w 7.9$ Wenchuan earthquake*. Journal of Geophysical Research, 114 (A4): 1-15.
- Plotkin V. V., (2003), *GPS detection of ionospheric perturbation before the 13 February 2001, El Salvador earthquake*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 3 (3/4): 249-253.
- Pulinets S A, Leyva Contreras A, Bisiacchi-Giraldi G and Ciralo L, (2003), *Total electron content variations in the ionosphere before the Colima, Mexico, earthquake of 21 January 2003*. Geofisica Internacional, 4: 369-377.
- Saroso S., Liu J. Y., Hattori K., Chen C. H., (2008), *Ionospheric GPS TEC Anomalies and $M \geq 5.9$ Earthquakes in Indonesia during 1993-2002*. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, 19: 481-488.