

GSJ JOURNALS SERIE C: ADVANCEMENTS IN INFORMATION SCIENCES AND TECHNOLOGIES

Volume: 2, Issue: 1, p. 23-39, 2019

ÇOK DÜŞÜK FREKANSLI (VLF) RADYO ALICILARI İLE $M \geq 6.0$ + DEPREM ÖNCÜLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF $M \geq 6.0$ + EARTHQUAKE PRECURSORS WITH VERY LOW FREQUENCY (VLF) RADIO RECEIVERS

Mustafa Ulukavak¹

İsmail Demiryeye²

(Received 26.07.2019 Published 05.08.2019)

Özet

Depremler sismik faaliyetler olduğu için meydana gelmeden önce çeşitli belirtiler ortaya çıkmaktadır. Sismik aktivitelerin meydana getirdiği etkilerinden birisi de alt iyonosfer tabakası üzerinde olduğu bilinmektedir. Bu sebeple iyonosfer tabakası üzerindeki değişimler gözlemlenerek muhtemel sismik olaylar tespit edilmeye çalışılmaktadır. Yerkürede meydana gelen kabuk hareketlerinin oluşturduğu titreşimler, insanlar üzerinde sadece sarsıntı olarak değil insanların doğrudan algılayamadığı bazı çevresel değişimlere de yol açmaktadır. Bu değişimler farklı yöntem ve cihazlarla tespiti yapılacak şekilde modellenenmektedir. Bu yöntemlerin incelenmesindeki temel parametrelerden birisi de Çok Düşük Frekans (VLF) sinyal değerlerindeki değişimdir. Bu amaçla deprem öncesi ve sonrası alt iyonosfer tabakasında meydana gelen değişimlerin VLF sinyallerinden elde edilen değişimlerle modellenerek aralarındaki ilişkinin ortaya çıkarılması deprem öncesi iyonosferik değişimlerin belirlenmesinde kullanılabilir. İyonosferin bu bölgesinde gerçekleşen geçici karışıklıkların VLF sinyalleri ile uzaktan algılama sistemlerinde kullanılması birçok araştırmanın konusu olmuştur. Yapılan çalışmalarda VLF dalgalarının iyonosferin alt tabakasından (D bölgesinden) yansması kuralı üzerine kurulu olduğu görülmektedir. İyonosferin, depremlerden önceki birkaç gün içerisinde, yansıtılmasını sağladığı elektromanyetik dalgalar üzerinde bazı analiz edilebilir değişiklikler göstermektedir. Bu değişiklikleri belirli matematiksel ve istatistiksel modellerle anlamlandırabilmek, depremlerin gerçekleşmeden önce ortaya çıkabilecek muhtemel öncülerini ortaya koymaktadır. Bu çalışmada, 17 Ocak 1995 Kobe ($M=7.2$), 6 Ocak 2008 ($M=6.2$) Yunanistan

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63300, Şanlıurfa, mulukavak@harran.edu.tr

² Yük. Lis. Öğr., Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 63300, Şanlıurfa, ismaildemiryeye@harran.edu.tr

Ulukavak, M. & Demiryeye, İ. (2019). Investigation of $M \geq 6.0$ + Earthquake Precursors with Very Low Frequency (VLF) Radio Receivers. GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies (AIST), 2 (1): 23-39.

Depremi, 25 Nisan 2015 (M=7.8) Nepal-Gorkha depremi ve bu depremin 12 Mayıs 2015 (M=7.3) tarihinde gerçekleşen artçı depreminin, 12 Ocak 2010 (M=7.0) Haiti ve 11- 21 Kasım 2016'da Japonya'nın açık denizlerinde meydana gelen sırasıyla M=6.1 ve M=6.9 büyüklüklerindeki iki depremin alt iyonosfer tabakasında meydana gelen sinyal yayılımları sonucunda ortaya çıkan deprem öncülü sonuçlarının incelenmesi gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok Düşük Frekans, Deprem, Deprem Öncülü, VLF

Abstract

Since earthquakes are seismic activities that various symptoms appear before they occur. One of the effects of seismic activity is known to be on the lower ionosphere layer. For this reason, changes on the ionosphere layer are observed and possible seismic events are tried to be determined. Vibrations caused by crustal movements in the earth cause not only concussion on humans but also some environmental changes that people cannot perceive directly. These changes can be modelled in such a way that different methods and devices can detect them. One of the main parameters in the examination of these methods is the change in Very Low Frequency (VLF) signal values. For this purpose, the changes in the lower ionosphere layer before and after the earthquake can be modelled with the changes obtained from VLF signals and the relationship between them can be used to determine the pre-earthquake ionospheric changes. The use of transient disturbances in this region of the ionosphere in VLF signals and remote sensing systems has been the subject of many studies. In the studies, it is seen that the VLF waves are based on the reflection rule of the ionosphere substrate (from the D region). It shows some observable changes on the electromagnetic waves that the ionosphere provides to be reflected within a few days before earthquakes. Understanding these changes with specific mathematical and statistical models reveals the possible precursors of earthquakes before they occur. In this study, January 17, 1995 Kobe ($M = 7.2$); January 6, 2008 ($M=6.2$) Greece Earthquake; April 25, 2015 ($M=7.8$) Nepal-Gorkha and the aftershocks of this earthquake on May 12, 2015 ($M=7.3$) Earthquake; January 12, 2010 ($M=7.0$) Haiti and 11-21 November 2016 Japan ($M=6.1$ and $M=6.9$) earthquakes in the lower ionosphere layer emitted as a result of the earthquake precursor results examination was carried out.

Keywords: Very Low Frequency, Earthquake, Earthquake Precursor, VLF

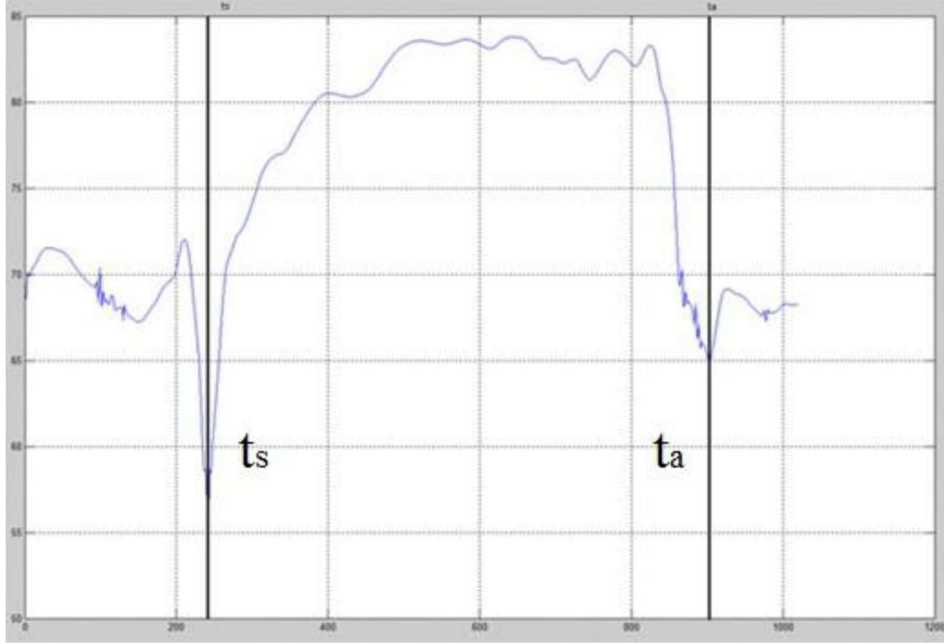
1. GİRİŞ

Yerkabuğu içindeki kırılmalar nedeniyle ani olarak ortaya çıkan titreşimlerin dalgalar halinde yayılarak geçtikleri ortamları ve yer yüzeyini sarsma olayına deprem denir (URL-1, 2019). Dünyanın oluşumundan beri, sismik yönden aktif bulunan bölgelerde depremlerin art arda olduğu ve sonucundan da milyonlarca canlının ve yaşam alanlarının yok olduğu bilinmektedir. Depremlerin meydana geliş aşamalarındaki belirsizliklerden dolayı, depremlerin ne zaman, nerede ve hangi büyüklüklerde meydana geleceği günümüzde halen keşfedilebilmiş değildir. Bunun yerine deprem konusunda çalışan bilim adamları tarafından deprem öncülerinin belirlenmesi ve deprem tahmininde bu öncülerin kullanılması üzerine birçok araştırma yapılmaktadır. Deprem öncesi öncülerinin tahmini konusunda yapılan çeşitli araştırmalar farklı disiplinlerin çalışmaları altında devam etmektedir. Çok Düşük Frekanslı (VLF) işaretler ile İyonküre ilişkisi, deprem Toplam Elektron İçeriği İlişkisi (TEC), Radon Gazı Ölçümü ve Kayaç Gerginliği Metodu başta olmak üzere birçok araştırma alanı bulunmaktadır (Ulas, 2011). Bu yöntemlerin tamamı derin olmayan (<100 km) fay kırıklarında kullanılan yöntemlerdir ve 100km'den daha az derinliklerde oluşan depremler yüzeysel depremler olarak nitelendirilmektedir (M Hayakawa vd., 2011).

Depremlerin önceden tahmin edilebilmesi için deprem etki alanı çevresinde meydana gelen değişimlerin incelenmesi gerekmektedir (Dobrovolsky, Zubkov, & Miachkin, 1979). Bu amaçla yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bilim adamları insanlığın doğal afetlerden zarar görmemesi veya bu zararı en aza indirgeyebilmek adına tedbirler almakta ve bu yönde yapılan çalışmalarını sürdürmektedirler. Doğal afetlerden en yıkıcısı olan depremin meydana geliş zamanını tam anlamıyla kestirebilmek şu an için mümkün olmamaktadır ama çevresel değişimler üzerinde yarattığı etkilerin incelenmesi ve analizi bu yönde yapılan çalışmaların başlangıcı olarak kabul görmektedir.

Bir depremin oluşumundan önceki süreçlerde, iyonosferin dalgaları yansıtma özelliğini değiştirecek etkilerde bulunmaktadır (Biagi vd., 2009; Molchanov & Hayakawa, 1998). Depremler dünyanın elektromanyetik alan değişimlerini etkileyebilmektedirler (Catherine vd., 2017). Depremler meydana gelmeden önceki süreç içerisinde, iyonosferin yansıtılmasını sağladığı elektromanyetik dalgalar üzerinde analiz edilebilir bazı değişiklikler göstermektedir (Hayakawa vd., 2011). Bu değişiklikleri belirli matematiksel ve istatistiksel modellerle anlamlandırabilmek, depremlerin gerçekleşmeden önceki süreçte tahminini sağlama olasılığını yükseltmektedir. Literatürde Çok Düşük Frekanslı (VLF) radyo sinyali izlemesi yapılan ve iyonosfer radarı denilen iyonosondalardan elde edilen iyonosferdeki değişimlerin incelenmesinin yanı sıra yine GNSS gözlemleri ile elde edilen GPS-TEC değişimlerinden deprem öncesi iyonosferik öncülerin belirlenmesi yapılmaktadır (Ulukavak & Yalcinkaya, 2017).

VLF işaretlerinin değişimi ile yapılan birçok çalışma depremlerin öncesinde ortaya çıkan muhtemel öncülerinin belirlenmesinde bir araç olarak kullanılabilir. İstatistiksel veri dağılımı uygulaması kolay bir hesaplama yöntemi olmakla beraber elektromanyetik dalga üzerindeki deprem bilgisinin belirginleştirilmesi açısından da başarılı çalışmalara konu olmuştur. Araştırmalarda genellikle VLF sinyallerine ait kayıtların değişimleri istatistiksel olarak incelenerek, sinyallerin elektromanyetik dalgalarına üzerinden analizler yapılmaktadır. İşlemlerde kullanılacak veriler VLF işaretlerinin faz ve genlikleri olabilmektedir. Faz veya genlik değerlerinin ortalama değere olan farklarının belirli bir seviyenin üzerine çıkması, muhtemel deprem öncülü olarak kabul edilmektedir. Ayrıca sinyalin kesim zamanı (gün doğumu ve gün batımı) değişimleri veya gece sürelerinin dalgalanmalarının ortalama değerlerine göre 2σ testlerinden geçirildiği yapılan birçok çalışmada açıklanmıştır (Hayakawa vd., 2011; Masashi Hayakawa vd., 2012; Muto vd., 2009). Şekil 1’de sinyal kesim sürelerinin işaretlendiği bir uygulama görülmektedir (Molchanov & Hayakawa, 1998).



Şekil 1. Elektromanyetik dalga üzerindeki kesim zamanı tespiti

Şekil 1’de bir gün içerisindeki gün doğumu (t_s) ve gün batımı (t_a) anlarına denk gelen yerel saatleri göstermektedir. Bu çalışma için günlük kaydedilen sinyal değişimleri boyunca ortalama değerler hesaplanmış ve ortalama değer ile anlık farklara bağlı anomaliler eşitlik (1)’den elde edilmiştir.

$$dt_i = t_i - t_{i-1} \quad (1)$$

dt_i , eşitlik (1)’e göre hesaplanan, sinyalin faz veya genliklerden ölçülmüş olan kesim zamanı değerlerinin ortalama kesim zamanı ile olan farkıdır. Bu eşitlik ile kesim zamanı ve depremin olduğu aralıktaki kesim zamanlarının ortalama değerlerinden olan farkları alınmaktadır (Horie, Maekawa, Yamauchi, & Hayakawa, 2007).

$$\sigma = \sqrt{(t_i - t_{i-1})^2} \quad (2)$$

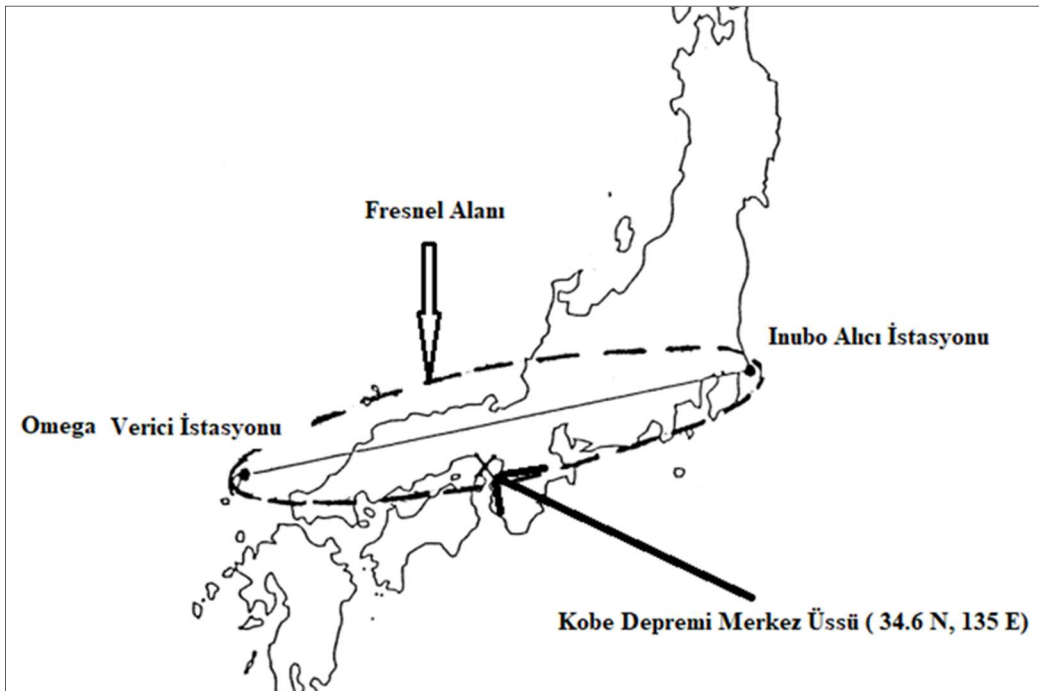
Eşitlik (2)' den elde edilen değerler ile çizilen grafiğin 2σ seviyesini aşan değerlere sahip olan günler için deprem öncesi anomalilerin gerçekleştiği günler bulunulacaktır (Molchanov, Hayakawa, Oudoh, & Kawai, 1998).

2. VLF SİNYALLERİ VE DEPREM İLİŞKİLERİNİN ARAŞTIRILMASINA YÖNELİK YAPILAN ÇALIŞMALAR

Son yıllarda, deprem öncesi iyonosferde meydana gelen değişimler ile VLF sinyallerindeki değişimlerin depremlerle arasındaki ilişkisi üzerine çeşitli araştırmalar yapılmıştır.

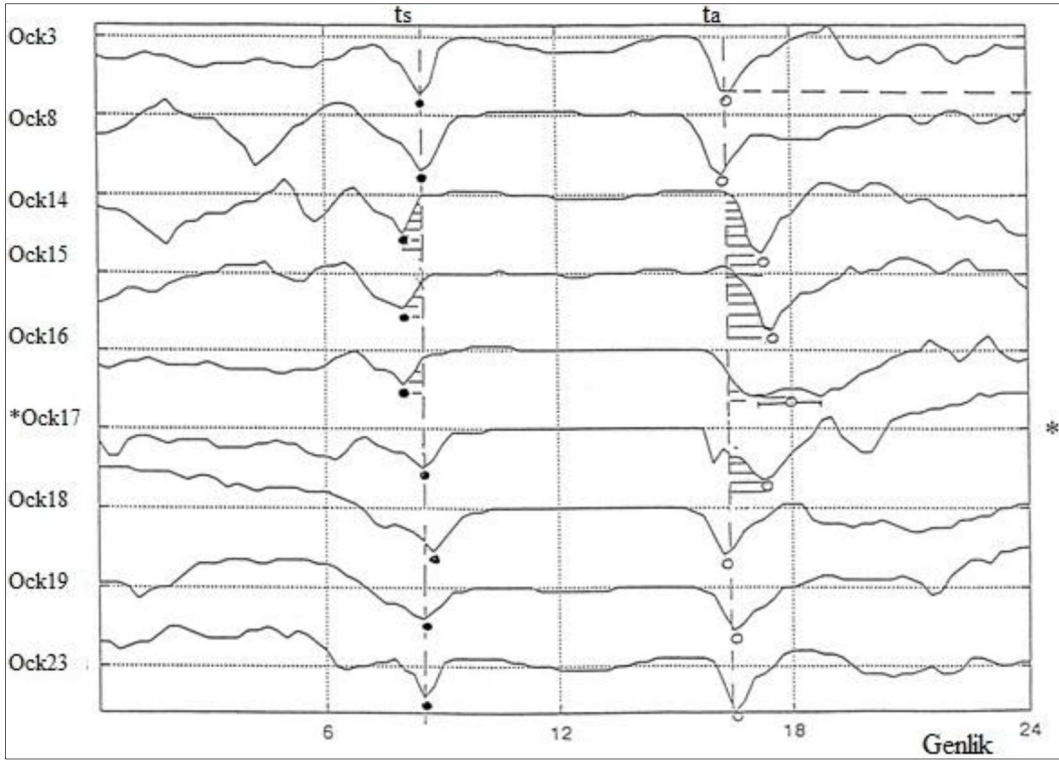
2.1. 17 Ocak 1995 Kobe Depremi (M=7.2)

Molchanov vd., (1998)'in yapmış olduğu çalışmada, depremlerin gerçekleşmeden önceki zaman dilimlerinde haberci olabilecek bazı değişimlerin var olduğunu ifade etmektedir. Bu çalışmada Kobe/Japonya yakınlarında 17 Ocak 1995'te M=7.2 büyüklüğünde gerçekleşen depremde elde edilen veriler kullanılmıştır. Gerçekleşen depremler sırasında kaydedilmiş olan VLF sinyallerinin üzerinde kesim zamanı (gündoğumu ve günbatımı) ile veri işleme teknikleri kullanılarak bir çalışma yapılmıştır. Sinyallerin yayılım yolu üzerinde gerçekleşen bu deprem aynı zamanda etkilerin en iyi şekilde olduğu Fresnel Alanının içerisindedir. Depremin gerçekleştiği bölge ve elektromanyetik dalgaların yayılım ağı Şekil 2'de gösterilmiştir. Fresnel Alanı, VLF alıcıları ve VLF vericilerinin odak noktaları için eliptik bir alanı temsil etmektedir.



Şekil 2. Alıcı-Verici istasyonları, Fresnel Alanı ve depremin merkez üssü

Kobe depreminin merkez üssü ile Omega verici istasyonu (12.8 kHz) arasındaki mesafe yaklaşık 525km, Inubo alıcı istasyonu arasındaki mesafe ise yaklaşık 550km'dir. VLF alıcılarının, Fresnel Alanı içerisinde yer alması sismolojik karışıklıkların alt iyonküreden yansıyan VLF sinyal yayılımına etkisini artıracaktır. Daha önce de belirtilen, kesim zamanları üzerine yapılan istatistiksel bir çalışmanın daha güvenilir sonuçlar ürettiği bilgisi yapılan araştırmada ortaya koyulmuştur (Molchanov vd., 1998). Şekil 3'te verilen grafikte faz genlikleri depremin önceki ve sonraki günleri için çizilmiştir. Kesim zamanları fazın en düşük seviyeye inmiş olduğu anları göstermektedir. Gün doğumu ve batımı için araştırıldığında deprem olmadan birkaç gün öncesinde işaretlerin en düşük seviyeye indikleri ve kesim zamanlarında kaymaların gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 3'te de görüldüğü gibi deprem oluşumundan önceki üç gün boyunca gündoğumu ve gün batımı zamanlarının kesim zamanları kayıklık göstermektedir.



Şekil 3. Deprem öncesi gündoğumu ve gün batımı zamanlarının kesim zamanı kayıklıkları

Buradaki (t_s) ve (t_a) değerlerinin eşitlik (1) ve (2) deki denklem ile istatistiksel olarak yapılan analizlerinde, (t_i) değerinin kesim zamanı kayıklığı daha net bir biçimde gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada kesim zamanı depremden yaklaşık 2σ seviyesini aştığı görülmüştür. İncelemeler sonunda, VLF sinyallerinin üzerinde, depremden birkaç gün önce başlayan ve birkaç gün sonrasına kadar devam eden karakteristik belirtiler gözlemlenmiştir. Bu çalışma ile karakteristik değişim

periyodunun yaklaşık 10 gün olduğu bilgisine ait sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada Inubo alıcısından kaydedilen ve Omega vericisinden gönderilen veriler göz önünde bulundurulmuştur. Faz genliklerinin üzerinden yapılan bir inceleme yerine kesim zamanları üzerinde yapılan inceleme, daha fazla güvenilir istatistiksel sonuçlar verdiği açıkça görülmüştür (Molchanov vd., 1998).

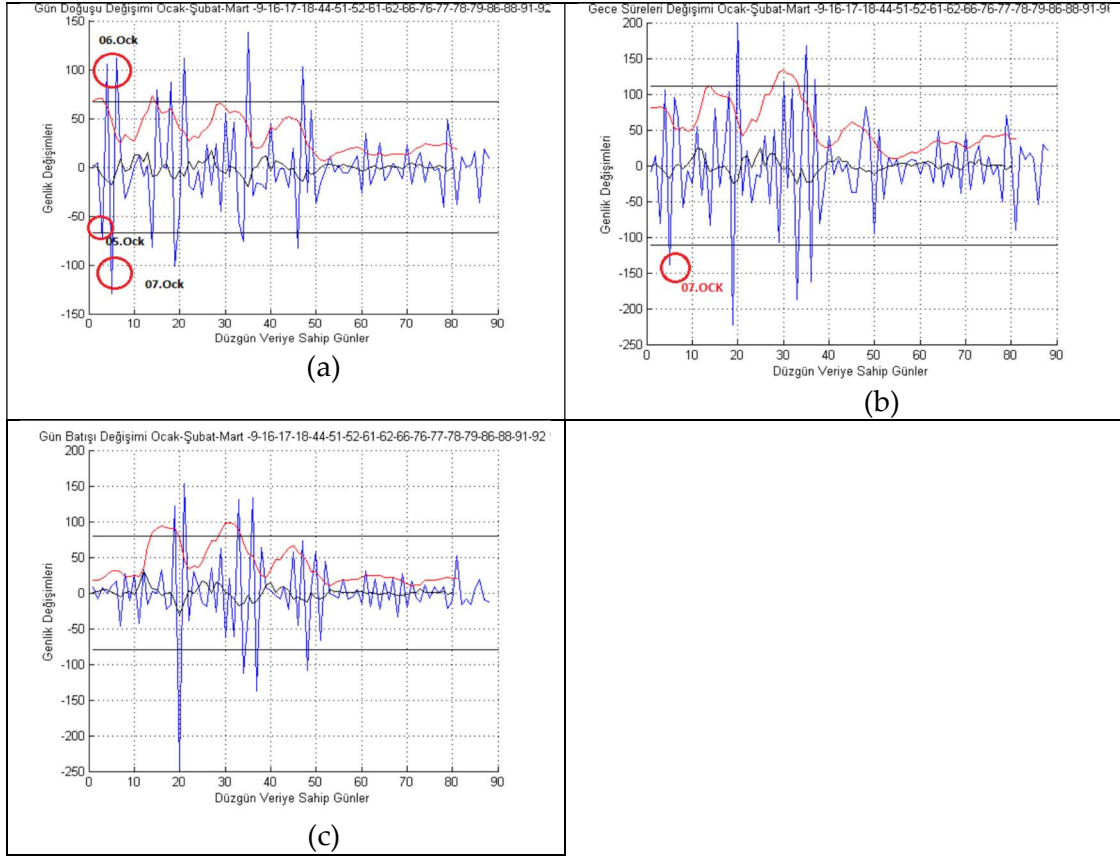
2.2. 06 Ocak 2008 Yunanistan Depremi (M=6.2)

Yunanistan Depremi, M=6.2 büyüklüğünde ve 75 km derinlikte meydana gelmiştir. VLF alıcısı ve vericisi konumlarının deprem merkez üssüne göre çizilen Fresnel Alanı içinde olduğu gösterilmiştir (Ulaş 2011). VLF alıcısı Fırat Üniversitesi Fen Fakültesi çatısında kurulmuş olup, deprem merkez üssüne olan uzaklığı 1500km'dir. VLF verici istasyonu olarak İtalya'daki NSC (Palermo şehrinde) istasyonu kullanılmış olup, deprem merkez üssüne olan uzaklığı yaklaşık 700km'dir (Şekil 4).



Şekil 4. VLF Alıcısı ve VLF Vericisi istasyonları, Fresnel Alanı ve depremin merkez üssü

Çalışmada kullanılan VLF sinyallerine ait değişimler 3 ay süre boyunca yapılan ölçümlerden elde edilmiştir. 5, 6 ve 7 Ocak 2008 tarihleri arasında öncül belirtilerine ait salınımlar gün doğuşu (a), gece süresi değişimi (b) ve gün batımı (c) olarak görülmektedir (Şekil 5).

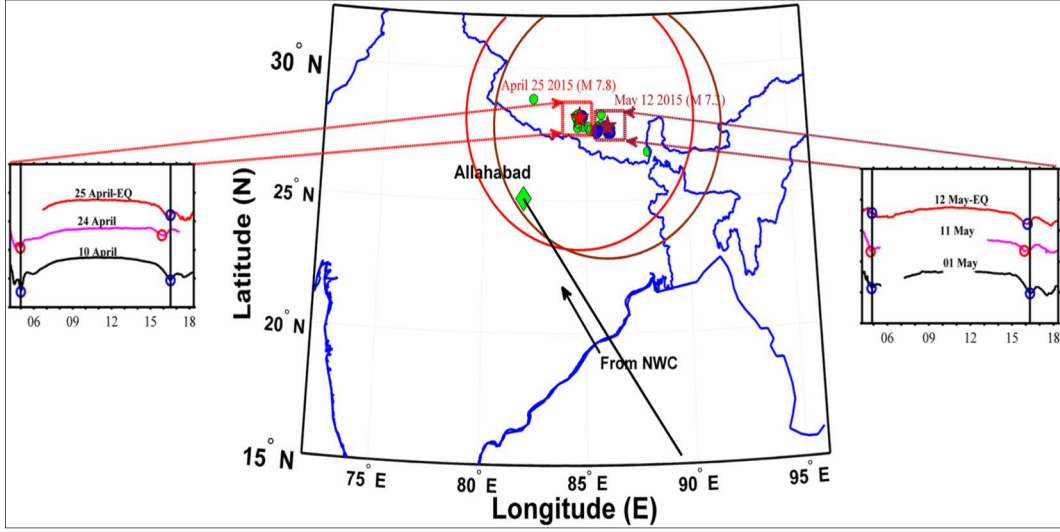


Şekil 5. 3 Aylık periyotta ölçülen zaman kayması üzerinden öncül tahmini

Şekil 5 incelendiğinde gün doğuşu (5a) üzerinde 5, 6 ve 7 Ocak 2008 tarihlerinde deprem öncülleri görülürken, gece süresi değişimi (5b) içinde sadece 7 Ocak 2008 deprem öncülü olarak kabul edilmiştir. Gün batımı (5c) üzerinde yapılan analizler sonucunda deprem öncülüne rastlanmamıştır.

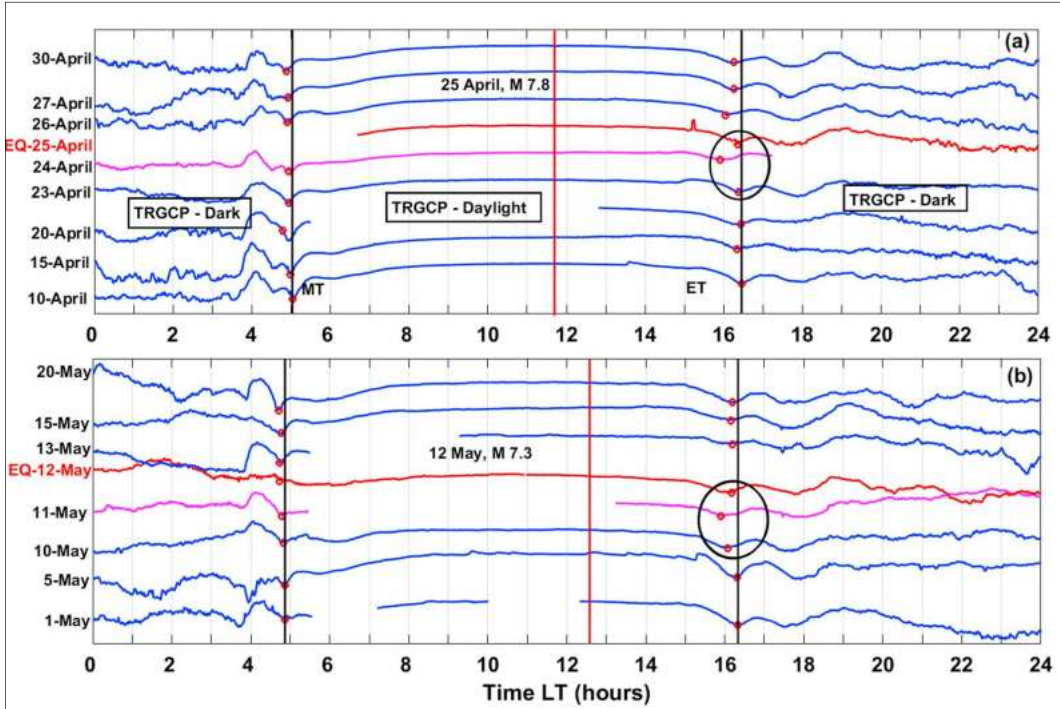
2.3. 25 Nisan 2015 (M=7.8) 12 Mayıs 2015 (M=7.3) Gorkha (Nepal) Depremleri

Nepal Depremleri Nisan ve Mayıs aylarında Himalayalar Bölgesinde gerçekleşmişlerdir (Şekil 6). 25 Nisan 2015 Gorkha Depremi kırmızı yıldız ile 12 Mayıs 2015 tarihinde gerçekleşen büyük bir artçı şoku da kahverengi yıldız ile gösterilmiştir. VLF sinyallerinin alıcı istasyonu da (Allahabad) harita üzerinde yeşil elmas ile gösterilmiştir. Yeşil daireler $M_w \geq 5.0$ ve mavi daireler de $M_w \geq 6.0$ olan depremleri göstermektedir. Seçilen üç günün günlük sonlanma süresi (TT) değişimi (10, 24 ve 25-Nisan 2015 ve 01, 11 ve 12-Mayıs 2015) Şekil 6'nın sol ve sağ panellerinde çizilmiştir (Phanikumar et al., 2018).



Şekil 6. Alıcı, Verici istasyonları ve Gorkha depremlerin merkez üssü

VLF alıcısı Allahabad (Hindistan) ile VLF verici istasyonu NWC arasındaki uzaklık yaklaşık 6250km'dir. NWC istasyonu ile Gorkha Depremi merkez üssü arasındaki uzaklık yaklaşık 6400km'dir. Allahabad istasyonu ile deprem merkez üssü arasındaki uzaklık ise yaklaşık 450km'dir. Çalışmada Allahabad istasyonundan Nisan ayında 24 saat boyunca (LT=UT+5:30) NWC istasyonundan alınan 19.8kHz frekansındaki sürekli sinyaller kaydedilmiştir (Şekil 7).

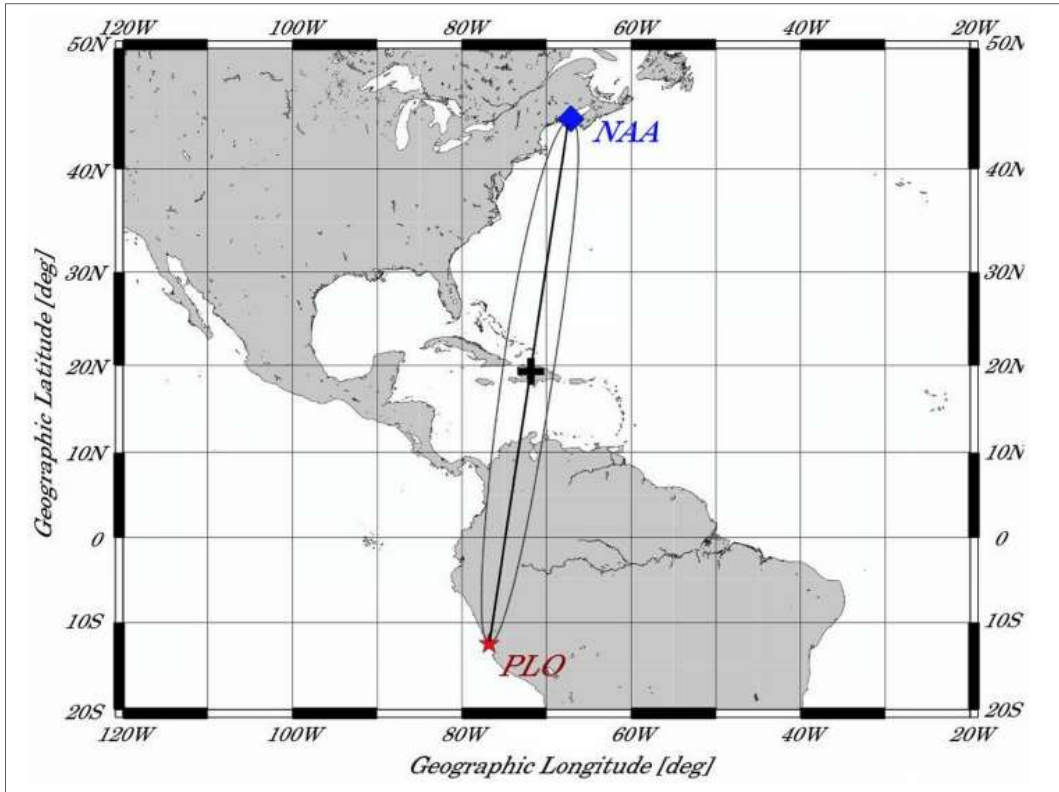


Şekil 7. Nisan-Mayıs arasında günlerin kesim zamanları

Şekil 7'de Nisan ve Mayıs ayları boyunca yapılan sürekli ölçümlere ait kayıtlar gösterilmektedir. Siyah dikey çizgiler sabah (MT) ve akşam (ET) saatlerine ait kesim zamanını gösterir (Şekil 7a). 24 Nisan 2015 akşam kesim zamanındaki (ET) anormal kayma, pembe çizgili siyah dairenin içinde gösterilmiştir. Deprem günü olan değişim ise kırmızı yatay çizgi ile işaretlenmiş olup, 12 Mayıs 2015 depremi için benzer gözlem Şekil 7b'de gösterilmektedir. Nisan-Mayıs 2015 aylarındaki gece kesim zamanının günlük varyasyonları, Şekil 7'deki kırmızı dairelerin işaret ettiği gibi akşam saatlerinde minimum VLF sinyal genliğine karşılık geldiği tahmin edilmektedir. Şekil 7'de 24 Nisan ve 11 Mayıs 2015 tarihlerindeki anormal dalgalanmalar görülmektedir. Bu dalgalanmalar depremlerden 1 gün önce değişim göstermiştir.

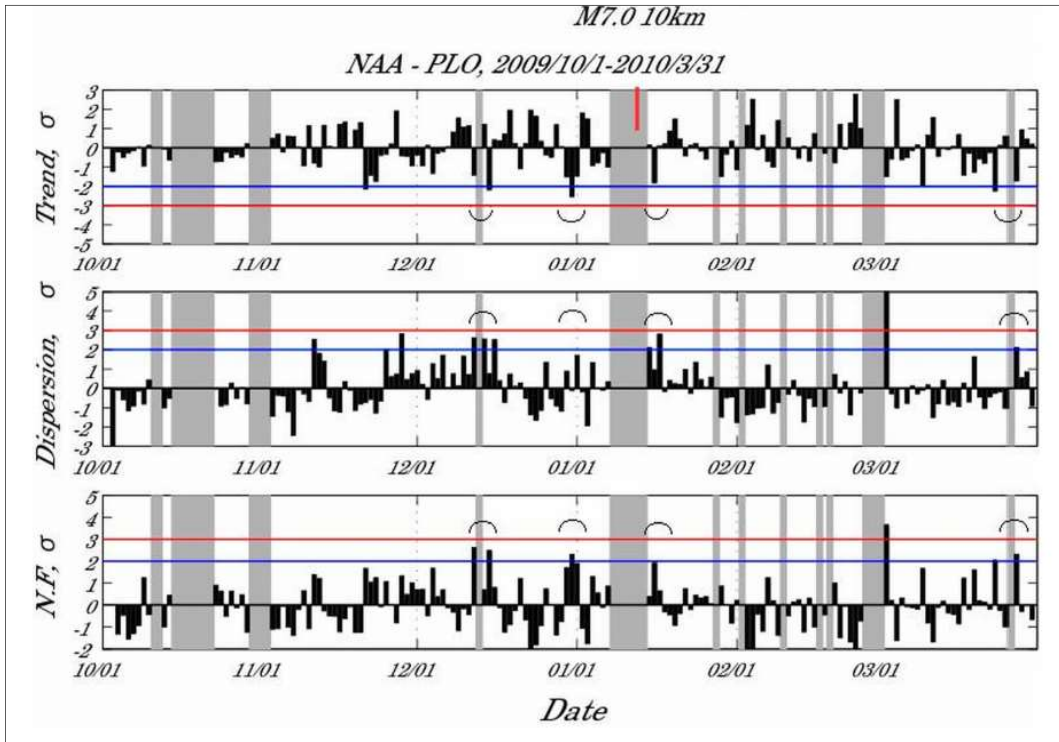
2.4. 12 Ocak 2010 Haiti Depremi (M=7.0)

12 Ocak 2010 tarihinde meydana gelen 2010 Haiti depremiyle (M=7.0 ve $\text{dept} \leq 10 \text{ km}$) olası bir ilişki içinde olan iyonosferik bozulmalar ABD'nin doğu kıyısındaki NAA VLF verici istasyonundan, Peru'daki PLO VLF alıcı istasyonuna alt-iyonosfer yayılımı verileri yardımıyla incelenmiştir (Hayakawa vd., 2011). PLO VLF alıcısı ile deprem merkez üssü arasındaki uzaklık yaklaşık 3250 km'dir. NAA VLF verici istasyonu ile deprem merkez üssü arasındaki uzaklık yaklaşık 2900 km'dir. PLO VLF alıcısı ile NAA VLF verici istasyonu arasındaki uzaklık ise yaklaşık 6430 km'dir (Şekil 8).



Şekil 8. Alıcı istasyonu (PLO), Verici istasyonu (NAA), Fresnel Alanı ve depremin merkez üssü (+)

Ekim 2009'un başından Mart 2010'un sonuna kadar olan süre boyunca kapsamlı bir şekilde incelenen veriler için yerel gece saatlerindeki VLF genlik verileriyle trendi (ortalama gece genlik değerleri), dağılımı ve gece dalgalanmasına ait değişimler analiz edilmiştir (Şekil 9). Depremden yaklaşık 12 gün önce, trenddeki eşzamanlı düşüş ve dağılıma ile gece dalgalanmalarındaki artış karakterize edilerek net bir öncü iyonosferik bozulmanın tespiti gerçekleştirilmiştir (Hayakawa vd., 2011).

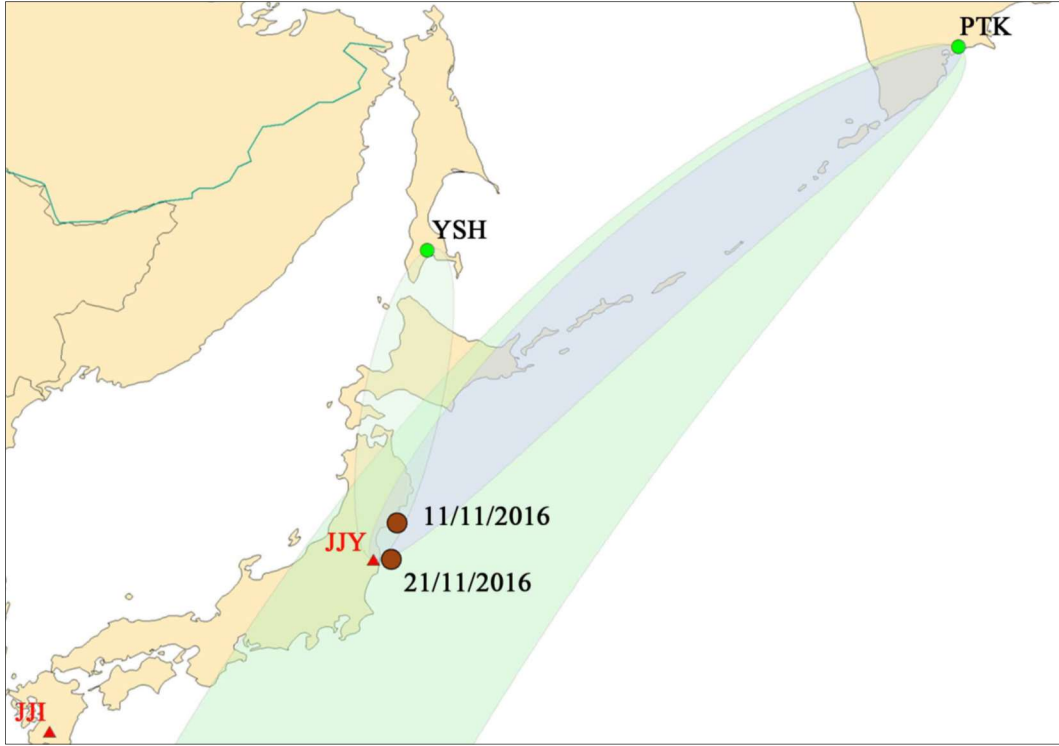


Şekil 9. Trend, Dağılım ve Gece-Dalgalanma Analizi

Şekil 9 incelendiğinde, VLF yayılma özelliklerinin üç fiziksel parametresinin zamansal evrimi, trendi (ortalama gece genliği), dağılım (dispersion) ve gece dalgalanması (NF) görülmektedir. Bu parametrelerin tümü, geçerli günden önceki standart sapma (σ) ile normalize edilmiştir (1-30 gün arasında). Gri parçalar sistemdeki bakım veya arıza nedeniyle gerçekleşen gözlem eksikliğine ait dönemlerini göstermektedir. Verilere Ekim 2009'un başından Nisan 2010'un başlarına (yedi ay boyunca) kadar bir ön analiz yapılmıştır. Her fiziksel parametrenin zamansal varyasyonlarına ayrı ayrı bakmak yerine, bunlara global olarak bakmak daha uygundur ve deprem oluşum günü yaklaşık olarak süremizin ortasında yer almaktadır (düşey kırmızı çizgi). Özellikle bakılması gereken trendin azaldığı dönemlerdir (yukarı ve aşağı yönlü gri yaylar) ve dağılım ile gece dalgalanması neredeyse aynı anda artış göstermektedir (Hayakawa vd., 2011).

2.5. 11 Kasım 2016 (M=6.1) ve 21 Kasım 2016 (M=6.9) Japonya Depremleri

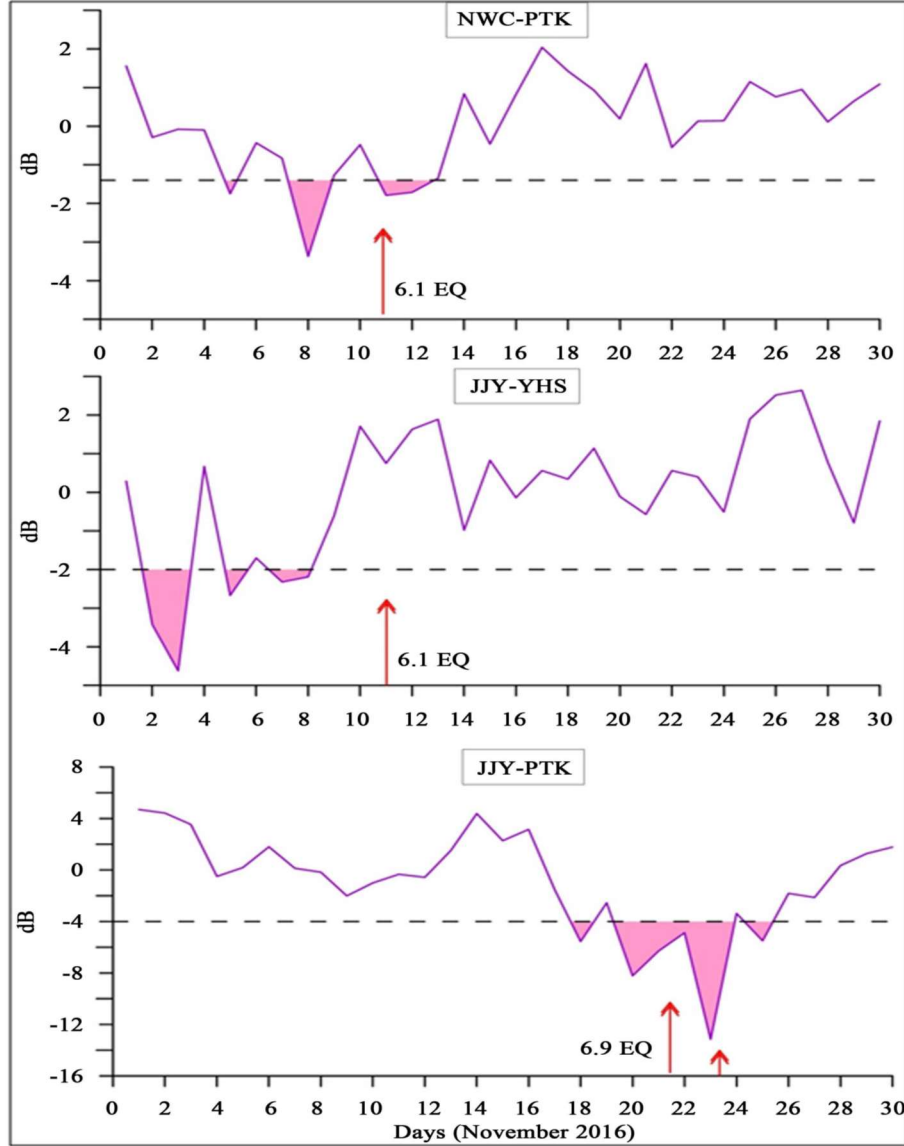
Bu çalışmada, Kasım 2016'da Japonya'nın Pasifik Okyanusu açıklarında meydana gelen 2 depremin VLF anomalilerine ait incelemesi gerçekleştirilmiştir. 11 Kasım 2016'da (M=6.1, dept=42km) gerçekleşen depremin merkez üssü sahil şeridinde yakın bir bölgededir. Rusya'daki Petropavlovsk-Kamchatsky (PTK) ve Yuzhno-Sakhalinsk (YSH) VLF alıcı istasyonlarında ve Japonya'daki JJY ve JJI verici gözlem istasyonunda çok düşük frekans / düşük frekans (VLF / LF) sinyallerinin ölçümü, olası düşük güçteki iyonosferik bozulmaların analizi için kullanılmıştır. İkinci deprem 21 Kasım 2016 (M=6.9, dept 11km) tarihinde denizde meydana gelmiştir ve sonrasında magnitüdü 5.6'ya kadar olan artçı şoklar gerçekleşmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Alıcı istasyonları (Yeşil Daire), Verici istasyonu (Kırmızı Üçgen), Fresnel Alanı ve depremlerin merkez üsleri (Kahverengi Daire)

YSH alıcısı ile JJY verici istasyonu arasındaki uzaklık yaklaşık 1000km'dir. PTK alıcısı ile JJY verici istasyonu arasındaki mesafe yaklaşık 2200km'dir. Deprem merkez üssü ile alıcı istasyonlar arasındaki mesafe yaklaşık olarak JJY istasyonu ile aralarındaki uzaklıklar kadardır. NWC vericisi ile PTK alıcısı arasındaki uzaklık ise yaklaşık 9400km'dir. Alıcıların (PTK ve YSH) ve verici istasyonunun JJY'nin (40 kHz) konumu Şekil 10'da gösterilmiştir. Avustralya'daki NWC vericisi (19.8 kHz) sınırların ötesinde olduğundan dolayı çizdirilememiştir. Dolu elipsler analiz edilen sinyal yolların bölgelerini göstermektedir. Şekil 10'da görüldüğü gibi, Rusya'nın VLF istasyonları

Japonya'nın Pasifik Okyanusu tarafındaki deprem merkez üssünden uzaktadırlar. Bununla birlikte, üç yayılım yolu (NWC-PTK, JJY-YSH, JJY-PTK) ve bu yollara ait analiz sonuçlarını görebiliriz (Şekil 11).



Şekil 11. NWC-PTK, JJY-YHS ve JJY-PTK istasyonları arasındaki yayılımlara ait analizler

Şekil 11'de üç alt-iyonofere ait yayılma yolu (üst panel: NWC-PTK, orta panel: JJY-YHS ve alt panel, JJY-PTK) için analiz sonuçlarını görülmektedir. Her panelde, yatay noktalı çizgiler konvansiyonel 2σ eşliğini gösterir ve pembe doldurulmuş alanlar VLF sinyallerindeki yayılma anormalliklerini belirtmektedir. Yatay eksen 1 Kasım 2016'dan başlayarak günleri göstermektedir. İlk panel, 5 ve 8 Kasım 2016'da $M=6.1$ depreminden

üç gün önceki anomalileri göstermektedir. JY-YHS'nin yayılması için 2-3 Kasım ve 5-8 Kasım 2016 tarihlerinde gerçekleşen ikinci panelde daha belirgin anomaliler tespit edilmiştir. Ancak, JY-PTK yayılma yolu için herhangi bir anormallik gözlemlenmemiştir. Daha büyük olan $M=6.9$ depremi için NWC-PTK ve JY-YHS'nin yayılma yollarında herhangi bir anormallik olmadığı (gece genliğinde bir azalma olduğu) anlaşılmaktadır. Bununla birlikte, depremden birkaç gün önce net bir öncü anomali (pembe renkte gölgeli) ve 23 Kasım'da da başka bir anomali gözlemlenmiştir. 23 Kasım 2016'daki anomalinin ana şokun bir etkisi olarak değil, 23 Kasım 2016'daki artçı şokun öncüsü olup olmadığı tam olarak anlaşılamamıştır.

3. SONUÇLAR

Yıkıcı etkileri büyük, doğal afetlerden biri olan depremin maddi ve manevi kayıplarını en aza indirebilmek için yapılan çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Depremin meydana gelme zamanının kesin olarak belirlenebilmesi günümüz teknolojisinde mümkün olmadığı için değerlendirme yöntemi olarak lokal iyonosfer değişkenliği yöntemini önermiştir. Bu çalışmada, 17 Ocak 1995 Kobe ($M=7.2$), 6 Ocak 2008 ($M=6.2$) Yunanistan, 25 Nisan 2015 ($M=7.8$) Gorkha depremi ve bu depremin 12 Mayıs 2015 ($M=7.3$) tarihinde gerçekleşen artçı depremi, 12 Ocak 2010 ($M=7.0$) Haiti ile 11 ve 21 Kasım 2016'da Japonya'nın açık denizlerinde meydana gelen sırasıyla $M=6.1$ ve $M=6.9$ büyüklüklerindeki iki depremin olduğu bölgelerdeki VLF verici istasyonlarından elde edilen verilerle, deprem öncesi VLF işaretçilerin oluşturduğu anomaliler araştırılmıştır. Deprem öncesinde meydana gelen VLF işaretçilerinin değişimleri karakteristik olarak anlamlandırılarak, depremin meydana gelme zamanının tahminini yapma çalışmalarına ağırlık verilmektedir. Günümüzde depremlerin meydana gelmesinden önce ortaya çıkan VLF işaretçilerinin iyonosferdeki değişimlerine bağlı olarak depremlerin önceden kestirilmesi üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Araştırmaların çoğu deprem olduktan sonra, depremin meydana geldiği bölgede bulunan VLF verici istasyonlarından elde edilen verilerin anlamlandırılması ve değerlendirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Deprem tahmini çalışmalarında küçük bir hataya bile tahammül edilemeyeceği gerçeği, bu konunun ne kadar hassas ve önemli olduğunu göstermektedir. Muhtemel hatayı azaltmak için bilinen yöntemlerin tamamının ortak oluşturacağı bir cevap üzerinden tahmin yürütülmelidir. Birden fazla yöntem üzerinden tahmin üretebilmeyi sağlayan birleştirilmiş karar mekanizması yapılacak olan diğer çalışmalara önemli bir katkı sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

Biagi, P. F., Castellana, L., Maggipinto, T., Maggipinto, G., Minafra, A., Ermini, A., ... Hayakawa, M. (2009). Anomalies in VLF radio signals related to the seismicity during November-December 2004: A comparison of ground and satellite results. *Physics and Chemistry of the Earth*, 34(6-7), 456-463.

<https://doi.org/10.1016/j.pce.2008.03.008>

- Catherine, J. K., Uma Maheshwari, D., Gahalaut, V. K., Roy, P. N. S., Khan, P. K., & Puviarasan, N. (2017). Ionospheric disturbances triggered by the 25 April, 2015 M7.8 Gorkha earthquake, Nepal: Constraints from GPS TEC measurements. *Journal of Asian Earth Sciences*, 133, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.07.014>
- Dobrovolsky, I. P., Zubkov, S. I., & Miachkin, V. I. (1979). ESTIMATION OF THE SIZE OF EARTHQUAKE PREPARATION ZONES. *Pure and Applied Geophysics*, 117(5), 1025–1044. <https://doi.org/10.1007/bf00876083>
- Hayakawa, M., Raulin, J. P., Kasahara, Y., Bertoni, F. C. P., Hobara, Y., & Guevara-Day, W. (2011). Ionospheric perturbations in possible association with the 2010 Haiti earthquake, as based on medium-distance subionospheric VLF propagation data. *Natural Hazards and Earth System Science*. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-513-2011>
- Hayakawa, M., Kasahara, Y., Nakamura, T., Muto, F., Horie, T., Maekawa, S., ... Molchanov, O. A. (2011). A statistical study on the correlation between lower ionospheric perturbations as seen by subionospheric VLF/LF propagation and earthquakes. *2011 30th URSI General Assembly and Scientific Symposium, URSIGASS 2011, 115*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/URSIGASS.2011.6050946>
- Hayakawa, M., Hobara, Y., Yasuda, Y., Yamaguchi, H., Ohta, K., Izutsu, J., & Nakamura, T. (2012). Possible precursor to the March 11, 2011, Japan earthquake: Ionospheric perturbations as seen by subionospheric very low frequency/ low frequency propagation. *Annals of Geophysics*, 55(1), 95–99. <https://doi.org/10.4401/ag-5357>
- Horie, T., Maekawa, S., Yamauchi, T., & Hayakawa, M. (2007). A possible effect of ionospheric perturbations associated with the Sumatra earthquake, as revealed from subionospheric very-low-frequency (VLF) propagation (NWC-Japan). *International Journal of Remote Sensing*, 28(13–14), 3133–3139. <https://doi.org/10.1080/01431160601094476>
- Molchanov, O. A., & Hayakawa, M. (1998). Subionospheric VLF signal perturbations possibly. *Journal of Geophysical Research*, 103, 17489–17504.
- Molchanov, O. A., Hayakawa, M., Oudoh, T., & Kawai, E. (1998). Precursory effects in the subionospheric VLF signals for the Kobe earthquake. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(97\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(97)00095-2)
- Muto, F., Kasahara, Y., Hobara, Y., Hayakawa, M., Rozhnoi, A., Solovieva, M., & Molchanov, O. A. (2009). Further study on the role of atmospheric gravity waves on the seismo-ionospheric perturbations as detected by subionospheric VLF/LF propagation. *Natural Hazards and Earth System Science*, 9(4), 1111–1118. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1111-2009>
- Phanikumar, D. V., Maurya, A. K., Kumar, K. N., Venkatesham, K., Singh, R., Sharma, S., & Naja, M. (2018). Anomalous variations of VLF sub-ionospheric signal and

Ulukavak, M. & Demiryeye, İ. (2019). Investigation of $M \geq 6.0$ + Earthquake Precursors with Very Low Frequency (VLF) Radio Receivers. *GSI Journals Serie C: Advancements in Information Sciences and Technologies (AIST)*, 2 (1): 23-39.

Mesospheric Ozone prior to 2015 Gorkha Nepal Earthquake. *Scientific Reports*.
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-27659-9>

Ulas, M. (2011). *Vlf sinyalleri kullanılarak depremlerin önceden tahmin edilmesine yönelik algoritma geliştirilmesi*. Fırat Üniversitesi, Elazığ.

Ulukavak, M., & Yalcinkaya, M. (2017). Precursor analysis of ionospheric GPS-TEC variations before the 2010 M7.2 Baja California earthquake. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 8(2), 295–308. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1208684>

URL-1: <http://www.koeri.boun.edu.tr/sismo/Personel/comoglu/depremnedir/index/>
Deprem Tanımı ve İstatistikleri. 14 Mayıs 2019.