Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi

Afyon Kocatepe University Journal of Science and Engineering

AKÜ FEMÜBİD **20** (2020) 065501 (1014-1023) AKU J. Sci. Eng. **20** (2020) 065501 (1014-1023)

DOI: 10.35414/akufemubid.823640

Araştırma Makalesi / Research Article

Deprem ve Troposfer İlişkisi: Şili Örneği

Gökhan GÜRBÜZ[1], Kübra KOÇYİĞİT[1]

[1] *Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Geomatik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak.*

Sorumlu yazar e-posta: gokhan.gurbuz@beun.edu.tr ORCID ID: https://orcid.org/0000-0001-5491-4623
kocyigitkubra01@gmail.com ORCID ID: https://orcid.org/0000-0002-2805-0777

Geliş Tarihi: 09.11.2020 Kabul Tarihi: 23.12.2020

Anahtar kelimeler
GNSS;
Şili Depremleri;
Troposfer; Troposferik Zenit Gecikmesi

Öz

Depremler ile ilgili yapılan çalışmalarda yer ve uydu tabanlı birçok teknik kullanılmakta ve deplasman miktarları, fay karakteristikleri, gerilim aktarımları gibi konular araştırılmaktadır. Ayrıca, deprem uyarı sistemleri kurulmakta ve deprem tahmini konusunda tüm Dünya'da adımlar atılmaktadır. Örnek olarak; GNSS çalışmaları için önemli hata kaynaklarından biri olan atmosferin üst katmanındaki (iyonosfer) değişimler, deprem öncesi, deprem sırası ve deprem sonrası sürekli incelenmektedir. Ancak, GNSS ölçümlerinde oluşturduğu hata miktarı iyonosfere göre daha az olan atmosferin alt katmanındaki (troposfer) değişimler ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmada, 2010 Maule ve 2015 Illapel depremlerinin ardından troposferdeki değişimler, GNSS gözlemlerinden hesaplanan troposferik zenit gecikmeleri (Zenith Total Delay - ZTD) kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, depremlerin merkez üssüne en yakın GNSS istasyonlarında, ana şok sırasında ve sonrasında ciddi troposferik anomaliler olduğunu göstermektedir. Deprem öncesi ve deprem sonrasındaki günlerde atmosferik parametreler incelendiğinde, ZTD değerlerindeki bu değişimlerin atmosferik basınçtaki değişimlerle doğrudan ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Nazca tektonik plakasının Güney Amerika plakasının altına doğru hareketi sonucu oluşan fay kırılması, atmosferde ölçülen basınç değerlerinde değişime sebep olmuş ve dolayısı ile ZTD değişimlerini tetiklemiştir. Şili'de gerçekleşen iki farklı depremde de benzer sonuçlara rastlanması, fay kırılması sonucu çalışma bölgesini düşeyde etkileyen depremler ile ilgili yapılan çalışmalarda, troposferik parametrelerin incelenmesinin önemini ortaya çıkarmıştır.

Relation Between Earthquake and the Troposphere: Chile Example

Keywords
GNSS; Chile Earthquakes;
Troposphere;
Zenith Tropospheric Delay

Abstract

In studies related to earthquakes, many ground and satellite-based techniques are used and subjects such as surface displacements, fault characteristics, stress transfers are investigated. In addition, earthquake warning systems are established and steps are taken all over the world about earthquake prediction. As an example, changes in the upper layer of the atmosphere (ionosphere), which is one of the important error sources for GNSS studies, are continuously examined before, during, and after the earthquakes. In this regard, the changes in the ionosphere before the earthquake have been frequently examined and anomalies have been found before some of the earthquakes. However, there is a limited number of studies on the changes in the lower layer of the atmosphere (troposphere), which causes less amount of error in GNSS measurements than the ionosphere. In this study, the changes in the troposphere following the 2010 Maule and 2015 Illapel earthquakes, using zenith tropospheric delays (ZTD) calculated from GNSS observations, were investigated. The results showed that the GNSS stations closest to the epicenter of the earthquakes experienced severe tropospheric anomalies during and after the mainshock. Further investigations carried out using atmospheric parameters before and after the earthquake, it was found that these changes in ZTD values were directly related to changes in atmospheric pressure. Finding similar results in two different earthquakes in Chile has revealed the importance of tropospheric parameters in studies related to earthquakes that affect the study area vertically as a result of fault rupture.

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Şili, Nazca ve Güney Amerika tektonik plakalarının kesiştiği hat üzerinde bulunmaktadır. Nazca levhası ve Güney Amerika levhası arasındaki eğimli arayüz boyunca 7 mm/yıl hızı ile oluşan kayma nedeniyle levhalar arasında sık sık depremler meydana gelmektedir. Bu sebeple, geçmişte bölgede büyük ve yıkıcı depremler yaşanmıştır. Yaşanan bu depremlerin ortak özellikleri, 0 – 70 km aralığında sığ derinliklerde, yüz kilometre ve daha uzun fayların kırılması ile oluşmasıdır (Heidarzadeh et al. 2016). Bu depremlere örnek olarak; 2010 (8.8 Mw) ve 2015 (8.3 Mw) yıllarında yaşanan Şili depremleri gösterilebilir. Belirtilen depremler ile ilgili Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR) verileri ve Global Navigation Satellite System (GNSS) gözlemleri kullanılarak farklı türlerde jeodezik çalışmalar yapılmıştır (Ho et al. 2013, Oikonomou et al. 2016, Ye et al. 2016, Klein et al. 2017). Gerçekleşen depremler sırasında ve sonrasında yüzeyde oluşan deformasyonların belirlenmesine ek olarak, deprem bölgesinde atmosfer ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır (Akhoondzadeh et al. 2009, Afraimovich et al. 2010). GNSS sinyalleri, uydudan alıcıya ulaşana kadar atmosfer katmanlarında (iyonosfer ve troposfer) gecikmeye uğramaktadır. İyonosferde yaşanan gecikme, iyonosferde bulunan toplam elektron içeriği ile ilişkili iken troposferik gecikme, havadaki partiküllerin hareketleri ve troposferik koşullardaki değişimler (örnek olarak; sıcaklık, basınç, nemlilik ve su buharı) ile ilişkilidir (Gurbuz et al. 2015, Gurbuz and Jin 2017, Jin et al. 2008a, 2008c, 2011). Her GNSS uydusundan alıcıya ulaşan sinyallerin, troposferde izlediği yol boyunca maruz kaldıkları eğik gecikmeler, izdüşüm fonksiyonları kullanılarak zenit yönü doğrultusunda hesaplanmaktadır. Bu değer, troposferik zenit gecikmesi (ZTD) olarak adlandırılmaktadır (Saastamoinen 1972, Askne and Nordius 1987, Davis et al. 1985).

Maule depremi olarak bilinen 2010 Şili depremi, 27 Şubat Cumartesi günü yerel saatle 03:34:14'te (06:34:14 UTC) Concepcion yakınlarında (35.909°G, 72.733°B) 8.8 Mw büyüklüğünde meydana gelmiştir. Şili'de gerçekleşen bu deprem, 9.5 Mw büyüklüğündeki 1960 Valdivia depreminden 9.0 Mw büyüklüğündeki 2011 Tōhoku depremine kadar dünya çapında yaşanmış en güçlü depremdir (Castaños and Lomnitz 2012). Büyük ölçüde açık denizde yaşanan fay kırılması, 100 km genişliğini aşmakla birlikte kıyıya paralel olarak yaklaşık 300 km uzunluğunda gerçekleşmiştir (Jin et al. 2011). Kırılma, kıyıların derinliklerinde başlamış ve batıya, kuzeye ve güneye doğru yayılmıştır. Fayın kırılması sonucunda geniş bir bölgede deprem hissedilmiştir. Fayın kırılması aynı zamanda okyanus tabanını da bükerek fay kırılma alanı boyunca tsunami yaratmıştır. GNSS gözlem sonuçları, maksimum yatay yer değiştirmelerin 35°G ve 37°G arasında oluştuğunu ve 5 metreden fazla olarak hesaplanan zirve değerlerinin, Constitucion'un kuzeyinde ve Santa Maria adasında gerçekleştiğini göstermektedir (Heidarzadeh et al. 2016). Deprem merkezi çevresinde oluşan genel yatay deplasman miktarı 3 m olarak hesaplanmıştır. Yüzeyde gerçekleşen deplasmanlara ek olarak 2010 Şili depremi ile ilgili yapılan birkaç çalışmada deprem sırasında ve öncesinde gerçekleşen iyonosferik anomaliler saptanmıştır. Bunun sebebinin yerküre ve atmosfer arasındaki etkileşim olduğu öne sürülmüştür (Jin et al. 2011). Yapılan araştırmalar, kimi depremler için sismo-iyonosferik anomalilerin depremlerden 1-6 gün önce ortaya çıktığını göstermektedir (Liu et al. 2000, 2001, 2004a, 2004b, 2006, Chen et al. 2004, Akhoondzadeh et al. 2010a, 2010b, Le et al. 2011). Ancak, Pisa vd. (2011) 2010 Şili depremi ile ilgili çalışmalarında Detection of Electro-Magnetic Emissions Transmitted from Earthquake Regions (DEMETER) ile edilen sismo-iyonosferik anomalilerin diğer çalışmalarında belirtilenden farklı olarak depremden 10-20 gün önce ortaya çıktığını savunmuşlardır. Ho vd. (2013) çalışmasında 1999-2011 yılları arasında Şili ve çevresinde gerçekleşen depremlerde GNSS ile elde edilen toplam elektron içeriği değerlerindeki anomalileri araştırmış ve bölgedeki toplam elektron içeriğindeki anomalilerin depremlerden 18-26 gün önce ortaya çıktığını göstermişlerdir.

Illapel depremi olarak bilinen 2015 Şili depremi, 16 Eylül günü yerel saat ile 19:54:32'de (16 Eylül, 22:54:32 UTC) Coquimbo yakınlarında (31.573°G, 71.674°B) 22.4 km derinliğinde 8.3 Mw

büyüklüğünde yaşanmıştır. Depremde kırılan fayın, 100 km genişliğinde ve yaklaşık 230 km uzunluğunda olduğu belirtilmiştir (Klein et al. 2017). Deprem sonrasında bölgede heyelanlar gerçekleşmiş ve boyu 4.5 metreyi aşan tsunami dalgaları deprem merkezinin kuzey ve güney kıyılarında etkili olmuştur (Heidarzadeh et al. 2016). 2010 yılında gerçekleşen 8.8 Mw büyüklüğündeki depremden sonra ülkede yaşanan en büyük deprem 2015 depremi olarak kayıtlara geçmiştir. GNSS gözlem sonuçları, deprem sırasındaki maksimum yatay yer değiştirmelerin 30.2°G ve 32°G arasında oluştuğunu ve 2 metreden fazla olarak hesaplanan maksimum değerlerinin, Lingua de Vaca yarımadasında gerçekleştiğini ortaya koymaktadır. Deprem merkezi çevresinde oluşan genel yatay deplasman miktarı 7 m olarak hesaplanmıştır (Ye et al. 2016). Deprem sırasında gözlemlenen maksimum düşey yer değiştirmenin yaklaşık 20 cm olduğu belirtilmiştir (Klein et al. 2017). Zhang vd. (2016) InSAR verilerinden yararlanarak yaptıkları çalışmada fayın kuzeybatısında gerçekleşen toplam atımı oluşturan parametrelerin, 1.5 m sağ yanal atım, yaklaşık 8 m eğim atım şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Yüzeyde gerçekleşen deplasmanlar dışında 2015 Illapel depremi ile ilgili yüzeydeki stres birikimi, tsunami ve atmosferde gerçekleşen anomaliler ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Heidarzadeh vd. (2016) çalışmalarında 2015 Illapel depremi sonrasında Japonya kıyılarında 1 m dalga boyuna ulaşan tsunami görüldüğünü; Coquimbo'da ise bu değerin 4-5 m arasında olduğunu belirtmişlerdir. Oikonomou vd. (2016) çalışmalarında GNSS verilerinden yararlanarak depremin merkez üssü ve etrafındaki toplam elektron içeriği değerlerini incelemişlerdir. 2015 Illapel depreminden 1-5 gün önce iyonosferde gözlemlenen anomalilerin yanında depremden birkaç saat önce 2-5 dakikalık periyota sahip anomalilerin tespit edildiğini belirtmişlerdir. Reddy vd. (2016) çalışmalarında 2015 Illapel depreminden 10 dakika sonra GNSS ile elde edilen toplam elektron içeriği değerlerinde yaklaşık 1.4 TECU'luk anomalilere rastlandığını belirtmişlerdir. Daneshvar ve Freund (2017) yaptıkları çalışmada 2015 Illapel depreminden 35-40 gün önce atmosferik parametrelerde (bulutluluk oranı, yağış miktarı, atmosfer basıncı ve rüzgar vektörleri) 25-30 gün önce iyonosferde anomalilerin bulunduğunu belirtmişlerdir.

Deprem sırasında ve sonrasında meydana gelen hava dalgalarının yerden üst atmosfere yayılmaları durumunda, alt atmosferi de (troposfer) etkileme olasılıkları olduğu düşünülmektedir. Ancak, troposfer üzerindeki bu tür olası etkiler yalnızca bir kez incelenmiş ve deprem sırası ve sonrası gerçekleşen troposferik anomalilerin atmosferik basınç ile ilişkili olduğu belirtilmiştir (Jin et al. 2011).

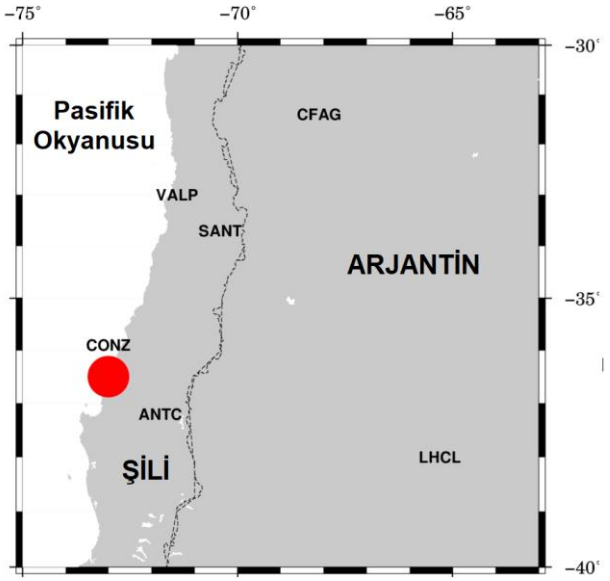
Bu çalışma kapsamında 2010 ve 2015 yıllarında gerçekleşen Maule ve Illapel depremleri sırasında ve sonrasında meydana gelen olası troposferik değişimler GNSS gözlem verileri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca elde edilen sonuçlar, GNSS istasyonlarına en yakın meteorolojik istasyonlardan elde edilen atmosferik basınç ve sıcaklık verileri ile ilişkilendirilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2010 Maule ve 2015 Illapel depremleri ile troposfer arasındaki ilişkinin incelenebilmesi için deprem tarihlerinden beş gün önceki ve sonraki GNSS verileri elde edilerek (2010 için yılın 53-63 günleri, 2015 için yılın 255-265 günleri), toplam zenit gecikmesi (ZTD) ve diğer parametreleri en küçük kareler yöntemine göre çözümleyen GAMIT/GlobK yazılımı kullanılarak değerlendirme yapılmıştır (Herring et al. 2015). Yapılan değerlendirmede sadece Global Positioning System (GPS) uydu sistemine ait veriler kullanılmıştır. Değerlendirme sürecinde kullanılan 30 saniye kayıt aralıklı GNSS gözlem verileri, Centro Sismológico Nacional (CSN), Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) ve International GNSS Service (IGS) ağına ait istasyonlardan elde edilmiştir. 2010 Maule depremi için yapılan değerlendirmede SANT, CONZ, COPO, COYQ, LHCL, VALP, CFAG ve ANTC istasyonlarına ait veriler kullanılmıştır (Şekil 1). 2015 Illapel depremi değerlendirmesinde ise, IGS ağına ait SANT istasyonu ve Şili ulusal GNSS ağına ait CNBA, LVIL ve ZAPA istasyonlarına ait veriler kullanılmıştır.

Değerlendirme kapsamında IGS hassas yörünge bilgileri, International Earth Rotation and Reference Systems Service (IERS) Dünya dönüklük parametreleri, 2014 IGS anten faz merkezi modeli

kullanılmış ve uydu yükseklik açısı 10° olarak alınmıştır. Okyanus yüklenme etkisi için FES2004 modeli (Lyard et al. 2006) kullanılırken, yüzey modeli için Saastamoinen (Saastamoinen 1972) ve kuru-ıslak zenit gecikmesi için Vienna izdüşüm fonksiyonu (VMF1) kullanılmıştır (Boehm et al. 2006). İyonosferik gecikmenin giderilmesi için iyonosferden bağımsız baz çözümü kullanılırken, yüksek dereceli iyonosferik etki göz ardı edilmiştir. Değerlendirme sonucunda 10 dakika zamansal çözünürlüğe sahip ZTD değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 1. 2010 Maule depremi değerlendirme aşamasında kullanılan GNSS istasyonları (Şekildeki kırmızı nokta depremin merkezini ve 4 harflik kısaltma isimler değerlendirmede kullanılan GNSS istasyonlarını göstermektedir).

GAMIT/GlobK yazılımı toplam zenit gecikmesi (T_d) değerlerinin kestiriminde kullandığı formülasyon Denklem 1'deki gibidir (Herring et al. 2015).

$$T_d = T_{Wd} + T_{Dd} = T_{ZWd}\, MF_{wet}(\varepsilon) + T_{ZDd}\, MF_{dry}(\varepsilon) + A_{d(\varepsilon,\alpha)} \quad (1)$$

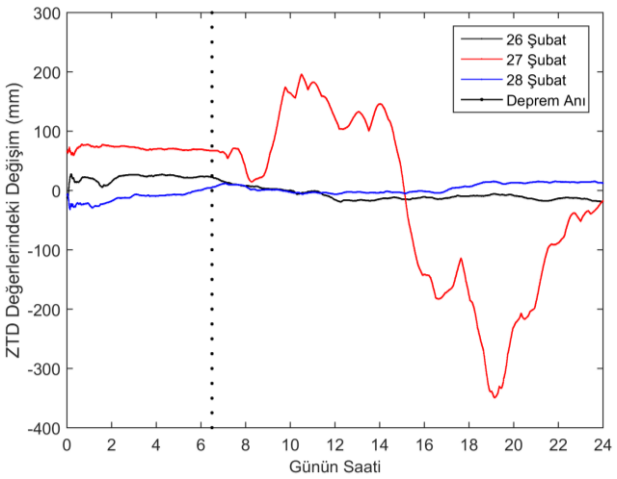
Denklem 1'de verilen T_{Wd} ıslak troposferik gecikmeyi ve T_{Dd} kuru troposferik gecikmeyi göstermektedir. MF_{wet} ve MF_{dry} sırasıyla ıslak ve kuru gecikme için kullanılan izdüşüm fonksiyonlarına karşılık gelmekte ve ε ise uydu yükseklik açısı olarak kullanılmaktadır. $A_{d(\varepsilon,\alpha)}$ ise atmosferik gecikmenin azimutsal asimetrisi etkisi olarak modele eklenmiştir. Kuru troposferik gecikme Denklem 2'de verilen formül kullanılarak elde edilmektedir (Saastamoinen 1972).

$$T_d = \frac{0.0022767 * P}{1 - 0.0026 * cos2\varphi - 0.00028 * h} \quad (2)$$

Denklem 2'de verilen φ elipsoidal enlem, h km cinsinden elipsoidal yükseklik ve P ise hPa cinsinden toplam yüzey basıncı olarak kullanılmaktadır. Denklem 2'de işleme çarpan olarak giren basınç parametresi doğrudan kuru zenit gecikmesini etkilemektedir.

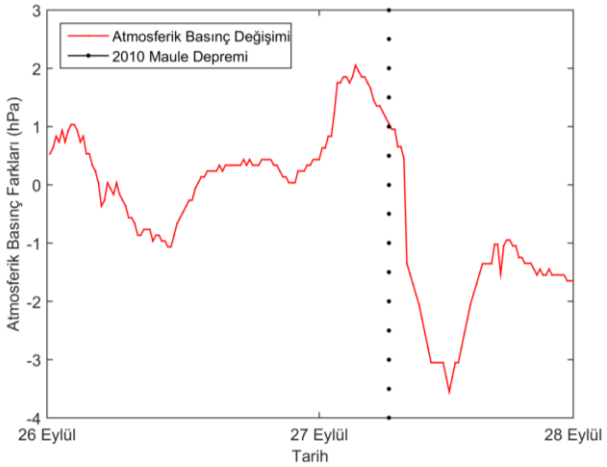
3. 2010 Maule Depremi Bulguları

2010 yılı 53-63 günlerini kapsayan 11 günlük değerlendirme kapsamında 10 dakika aralıklarla tüm GNSS istasyonları için ZTD değerleri elde edilmiştir. Deprem öncesi ve sonrasına ait 5 günlük veri değerlendirmesi sonucunda ZTD değerlerinin gün içindeki değişimlerinin aynı karakterde olduğu görülmüş, dolayısı ile deprem gününe ek olarak, depremden önce ve sonra birer güne ait sonuçlar paylaşılmıştır. Değerlendirme sonucunda elde edilen ZTD değişimleri (ZTD – günlük ortalama) ve gün içindeki basınç değişimi (basınç – gün içi ortalama) Şekil 2'de gösterilmiştir. Şekil 2'deki düşey kesikli çizgi deprem anını gösterirken, kırmızı çizgi deprem gününe (27 Şubat) ait sonuçları göstermektedir. 2010 Maule depremi ana şoku sonrası sahil şeridinde bulunan CONZ istasyonuna ait ZTD değerlerinde artış gözlenirken, deprem sonrası ZTD miktarında önemli miktarda dalgalanma görülmektedir. 26 Şubat tarihinde CONZ istasyonu ZTD değerlerinde herhangi bir anomali görülmemektedir (Şekil 2).



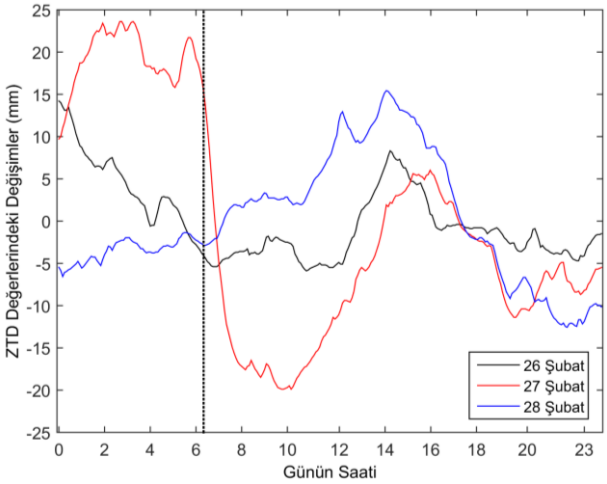
Şekil 2. 2010 Maule depremi değerlendirmesinde kullanılan CONZ istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

CONZ istasyonuna en yakın Comodoro Arturo Merino Benítez Havalimanı meteoroloji istasyonundan alınan atmosferik basınç verileri de depremden önceki gün ve deprem günü için incelenmiştir. Depremden önceki gün içindeki basınç değişimlerinde anomali görülmezken, deprem günü saatlik atmosferik basınç miktarları incelendiğinde deprem öncesi atmosferik basınç miktarında 3 hPa'lık bir artış olmuş ve depremin gerçekleşmesinin peşi sıra atmosferik basınç değerlerinde 6 hPa'lık ani bir düşüş olduğu görülmektedir. (Şekil 3). CONZ GNSS istasyonunun yaklaşık 1 km yakınındaki meteoroloji istasyonunun depremin merkezine çok yakın (yaklaşık 30 km) olması ve depremin büyüklüğü sebebiyle oluşan elektrik kesintileri sonucunda deprem sonrası gün (28 Şubat) veri toplanamamıştır.



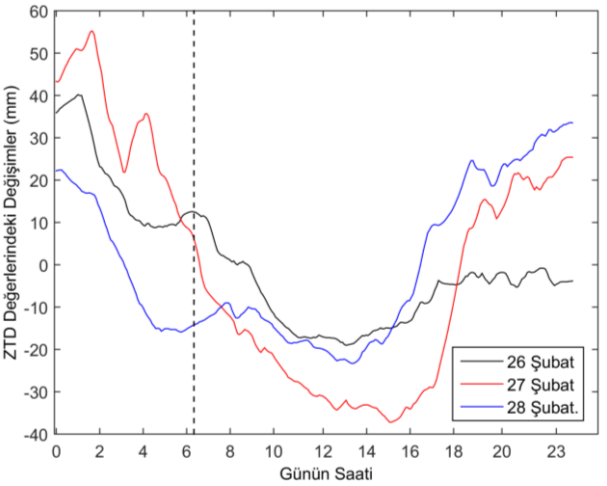
Şekil 3. 2010 Illapel depremi değerlendirmesinde kullanılan Comodoro Arturo Merino Benítez havalimanı meteoroloji istasyonuna ait saatlik atmosferik basınç verileri (Basınç – gün içi ortalama).

Aynı şekilde Concepcion şehrinin yaklaşık 400 km kuzeyindeki Valparaiso şehrinde bulunan sahil şeridine yakın VALP GNSS istasyonuna ait ZTD farklarına ait değerler Şekil 4'te görselleştirilmiştir. Deprem öncesi ve sonrası günlerde (26 Şubat ve 28 Şubat) ZTD değerleri aynı karakteristiğe sahipken, depremin gerçekleşmesinin ardından önemli derecede düşüş yaşamıştır. VALP GNSS istasyonunun yaklaşık 15 km yakınındaki meteoroloji istasyonundan elde edilen veriler incelendiğinde, deprem sonrası atmosferde 2 hPa'lık ani basınç artışı yaşandığı ve ancak saatler sonra basınç seviyesinin gün içi normal seviyelere düştüğü görülmüştür.



Şekil 4. 2010 Maule depremi değerlendirmesinde kullanılan VALP istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

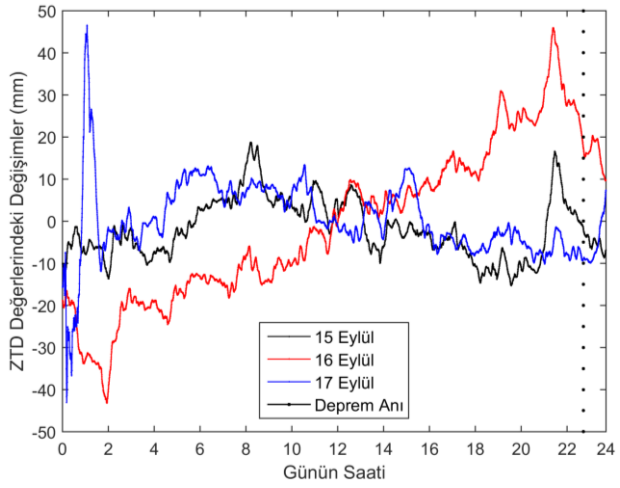
CONZ ve VALP istasyonlarına ek olarak deprem merkezine yaklaşık 120 km uzaklıktaki ANTC istasyonuna ait ZTD değişimleri Şekil 5'te verilmiştir. ANTC GNSS istasyonuna ait ZTD değerleri incelendiğinde, deprem öncesi ve sonrası günlere yakın ZTD değerleri görülmüş olup deprem sebebi ile büyük bir değişime rastlanmamıştır. ANTC GNSS istasyonunun yaklaşık 3 km yakınındaki meteoroloji istasyonu verileri incelendiğinde basınç değerlerinde de önemli bir değişim görülmemiştir.



Şekil 5. 2010 Maule depremi değerlendirmesinde kullanılan ANTC istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

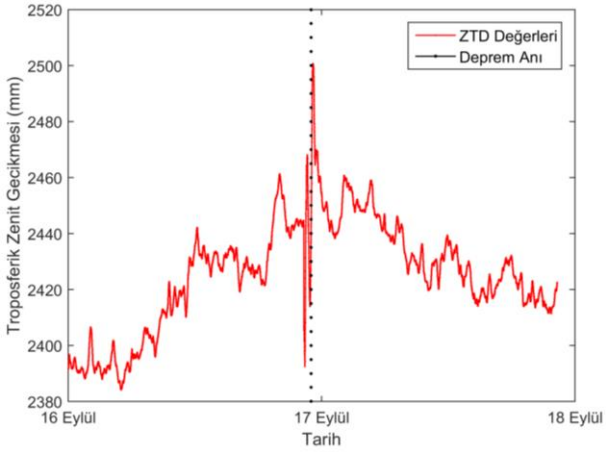
4. 2015 Illapel Depremi Bulguları

2015 yılı 255-265 günlerini kapsayan 11 günlük değerlendirme kapsamında deprem merkezine 45 km uzaklıktaki LVIL, 70 km uzaklıktaki ZAPA ve 80 km uzaklıktaki CNBA GNSS istasyonları ve diğer istasyonlara göre deprem merkezine daha uzakta bulunan (yaklaşık 200 km) SANT IGS istasyonu kullanılarak 10 dakika aralıklarla tüm GNSS istasyonları için ZTD değerleri elde edilmiştir. Deprem öncesi ve sonrasına ait 5 günlük veri değerlendirmesi sonucunda ZTD değerlerinin gün içindeki değişimlerinin aynı karakterde olduğu görülmüş, dolayısı ile deprem gününe ek olarak, depremden önce ve sonra birer güne ait sonuçlar paylaşılmıştır. Değerlendirme sonucunda deprem merkezi yakınındaki istasyonlarda depremin ardından ZTD değerlerindeki değişim açıkça görülürken, deprem merkezinden uzaktaki SANT istasyonunda etkinin düşük seviyede olduğu görülmüştür. Depremin merkezine en yakın Los Vilos'ta bulunan LVIL istasyonuna ait ZTD sonuçları incelendiğinde, deprem günü ZTD değerlerinin deprem öncesi ve sonrası günlere göre farklı davranış sergilediği görülmüştür (Şekil 6). Depremin gerçekleşmesinin ardından ZTD değerlerinde ani bir düşüş ve bir sonraki günün ilk saatlerinde ZTD değerlerinde yaklaşık 90 mm'lik dalgalanma görülmüştür. 16 Eylül'de gerçekleşen depremin ardından, ZTD değerleri depremden önceki güne göre yüksek devam etmesine rağmen, günlük ZTD davranışları aynıdır (Şekil 6).



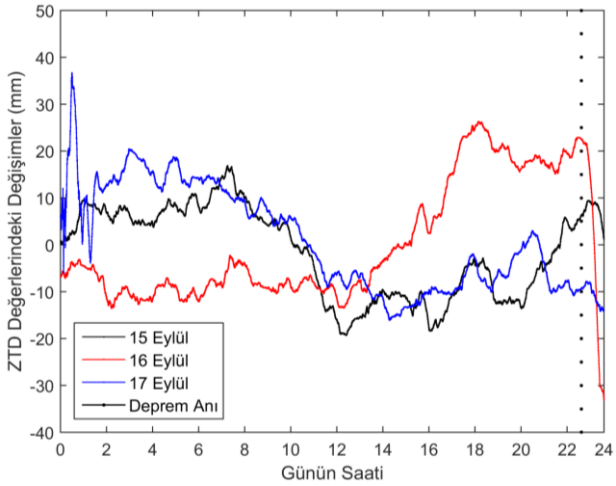
Şekil 6. 2015 Illapel depremi değerlendirmesinde kullanılan LVIL istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

Deprem merkezinin güneyindeki Zapallar'da bulunan ZAPA istasyonu ZTD değerleri, LVIL istasyonlarındaki ZTD davranışı ile aynı davranışı göstermiştir. Depremin gerçekleşmesinin ardından ZTD değerlerinde ani düşüş ve bir sonraki gün ZTD değerlerinde yaklaşık 100 mm'lik dalgalanma görülmüştür. Depremden sonraki gün boyunca, ZTD değerleri normalden yüksek seyretmiş ve günün sonuna doğru normal değerlere inmiştir (Şekil 7).



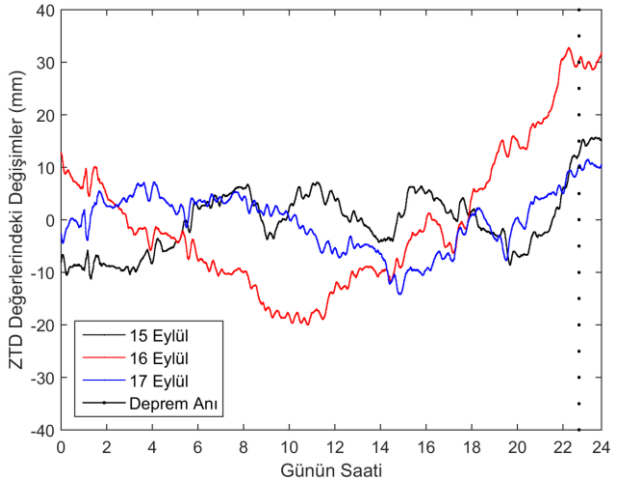
Şekil 7. 2015 Illapel depremi değerlendirmesinde kullanılan ZAPA istasyonuna ait ZTD değerleri.

Sahil şeridinde bulunan LVIL ve ZAPA istasyonlarına göre, iç kesimlerdeki Canela Baja'da bulunan CNBA istasyonuna ait ZTD değerleri incelendiğinde, deprem sonrası ZTD değerlerindeki değişimin aynı karakterde olduğu ancak, LVIL ve ZAPA istasyonlarına göre ZTD değerlerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Deprem sonrası ZTD değerlerinde ani düşüş ve bir sonraki günün ilk saatlerinde yaklaşık 40 mm'lik dalgalanma görülmüştür (Şekil 8).



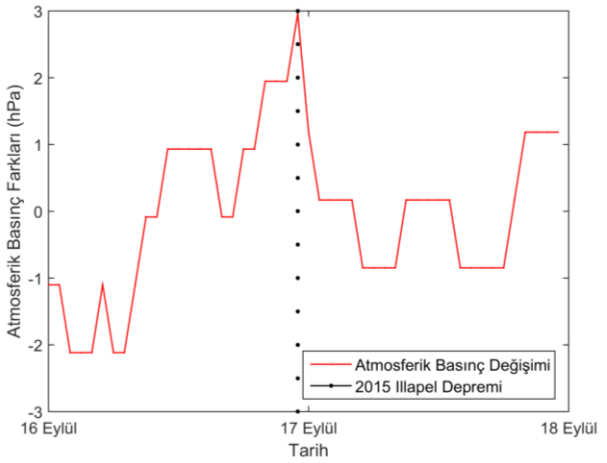
Şekil 8. 2015 Illapel depremi değerlendirmesinde kullanılan CNBA istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

Depremin merkezine uzak ve iç kesimlerde bulunan SANT IGS istasyonu ZTD değerleri incelendiğinde, deprem sırasında ve sonrasında bir anomali görülmemiştir. Ancak, deprem günü ana şok öncesinde ZTD değerlerinde normalden farklı artışlar gözlemlenmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. 2015 Illapel depremi değerlendirmesinde kullanılan SANT istasyonuna ait ZTD değişimleri (ZTD – gün içi ortalama).

Deprem sırası ve sonrası gerçekleşen ZTD davranışlarındaki farklılıklarının ortaya çıkartılmasının ardından, bu anomalilerin sebepleri araştırılmıştır. ZTD değerleri ile doğrudan ilişkili atmosferik parametrelerin incelenmesiyle, ZTD değişimlerinin atmosferik basınç değişimleri ile doğru orantılı olduğu ortaya çıkmıştır. 2015 Illapel depreminin Nazca ve Güney Amerika plakalarının hareketleri sonucunda oluşan eğimli fayda olduğu düşünülürse, deprem sırasındaki 100 km genişliğinde ve yaklaşık 230 km uzunluğundaki fay kırılmasının yüzeyde yarattığı etki sebebiyle atmosferik basınç değerlerinde anomaliler oluşturması normal bir beklentidir. Deprem merkezine en yakın ve aktif olarak veri toplayabilen meteoroloji istasyonu olarak Concón şehrindeki Vina del Mar havalimanına ait atmosferik veriler incelenmiştir. 16-17 Eylül 2015 (yılın 259. ve 260. günleri) tarihlerindeki saatlik atmosferik basınç miktarları incelendiğinde deprem öncesi 16 Eylül tarihinde atmosferik basınç miktarında 5 hPa'lık bir birikimin ardında depremin gerçekleştiği ve basınç değerlerinde 4 hPa'lık ani bir düşüş olduğu görülmektedir (Şekil 10). Deprem öncesi ve sonrasında gerçekleşen bu atmosferik basınç anomalisi, ZTD değerlerini doğrudan etkilemiştir.



Şekil 10. 2015 Illapel depremi değerlendirmesinde kullanılan Vina del Mar havalimanı meteoroloji istasyonuna ait saatlik atmosferik basınç verileri (Basınç – gün içi ortalama) (Int Kyn. 1).

5. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında 2010 Maule ve 2015 Illapel'de gerçekleşen depremler sonrası troposferde gerçekleşen değişimler GNSS ile elde edilmiş ZTD değerleri kullanılarak incelenmiştir. Değerlendirmeler kapsamında her iki deprem için de deprem öncesi ve sonrasını kapsayan 11 günlük veri değerlendirilmiştir. Deprem öncesi ve sonrasına ait 5 günlük veri değerlendirmesi sonucunda ZTD değerlerinin gün içindeki değişimlerinin aynı karakterde olduğu görülmüş, dolayısı ile bulgular kısmında deprem gününe ek olarak, depremden önce ve sonraki birer güne ait sonuçlar paylaşılmıştır.

2010 Maule depremi sonrası CONZ, VALP ve ANTC istasyonlarına ait ZTD verileri incelenmiş ve deprem merkezi yakınlarındaki CONZ istasyonunda 500 mm'ye ve VALP istasyonunda 40 mm'ye varan troposferik anomaliler görülmüştür. CONZ istasyonu yakınlarındaki meteoroloji istasyonundan alınan atmosferik basınç değerleri incelendiğinde deprem anında oluşan basınç değişimlerinin ZTD değerlerini etkilediği fark edilmiştir. Depremden kaynaklanan ülke çapında yaşanan elektrik kesintileri sebebiyle VALP ve ANTC istasyonu yakınlarındaki meteorolojik

istasyonlardan deprem sonrası gününe ait veri elde edilememiştir.

2015 Illapel depremi sonrası LVIL, ZAPA, CNBA ve SANT istasyonlarına ait veriler değerlendirilerek ZTD değerleri incelenmiştir. Deprem sonrası, deprem merkezi yakınlarındaki LVIL ve ZAPA istasyonlarında 100 mm'ye varan troposferik anomaliler oluşurken, iç kesimlerindeki CNBA istasyonunda 40 mm'lik dalgalanmalar görülmüştür. 2015 Illapel depremi merkezine en uzak konumdaki SANT istasyonuna ait ZTD verileri incelendiğinde deprem sırası ve sonrasında ZTD anomalilerine rastlanmamıştır.

Şili Meteoroloji Ofisi (Dirección Meteorológica de Chile) verilerine göre, 2010 Maule ve 2015 Illapel deprem değerlendirmeleri kapsamında kullanılan verilerin ait olduğu günlerde çalışma bölgesinde yağış görülmemiştir. Çalışma kapsamında değerlendirme yapılan günlerdeki sıcaklık değerleri incelendiğinde bir anomaliye rastlanmamıştır. Dolayısı ile deprem sırasında ve sonrasında meydana gelen ZTD anomalileri, atmosferik basınç değerleri ile ilişkilendirilmiş ve atmosferik basınç değerlerinde ZTD değerleri ile doğru orantılı değişimler olduğu görülmüştür. Ancak, her iki depremde de depremden bir önceki gün gerçekleşen atmosferik basınç artışı incelenmeli ve sebepleri araştırılmalıdır.

Her iki deprem sonucunda elde edilen ZTD ve atmosferik basınç anomalileri Jin vd. (2011)'nin yaptığı çalışma ile uyumlu sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Depremler sırasında ve sonrasında gerçekleşen ZTD anomalilerinin, değerlendirme sırasında kullanılan GNSS istasyonlarının, deprem merkezine yakınlığı ile doğrudan ilişkili olduğu ve iyonosferden farklı olarak, troposferik anomalilerin daha küçük çaptaki bir alanı etkilediği gözlemlenmiştir.

Tüm bu sonuçlara ek olarak yazarlar, deprem ile ilişkili tüm GNSS çalışmalarında, deprem sırası ve sonrası veri değerlendirmeleri yapılırken atmosferik basınç kaynaklı ZTD değişimlerinin göz ardı edilmemesini önermektedir.

Teşekkür

Çalışma Kübra Koçyiğit'in "Troposfer ve depremlerin ilişkilendirilmesi" isimli lisans tezi kapsamında hazırlanmıştır. Yazarlar çalışma kapsamında kullanılan sıcaklık, basınç ve nem verileri için Şili meteoroloji istasyonlarının bağlı bulunduğu Dirección Meteorológica de Chile'ye, GNSS istasyonu verileri için Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) ve International GNSS Service (IGS)'e teşekkür eder.

6. Kaynaklar

Afraimovich, E., Feng, D., Kiryushkin, V., Astafyeva, E., Jin S. G., Sankov, V., 2010. TEC response to the 2008 Wenchuan earthquake in comparison with other strong earthquakes. *International Journal of Remote Sensing*, **31(13**), 3601–3613.

Akhoondzadeh, M., Parrot, M., Saradjian, M. R., 2010a. Electron and ion density variations before strong earthquakes (M > 6.0) using DEMETER and GPS data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 7– 18.

Akhoondzadeh, M., Parrot, M., Saradjian, M. R., 2010b. Investigation of VLF and HF waves showing seismo-ionospheric anomalies induced by the 29 September 2009 Samoa earthquake (Mw = 8.1). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **10**, 1061–1067.

Askne J., Nordius H., 1987. Estimation of tropospheric delay for microwaves from surface weather data. *Radio Science*, **22(3)**, 379–386.

Böhm, J., Werl, B., Schuh, H., 2006. Troposphere mapping functions for GPS and VLBI from ECMWF operational analysis data. *Journal of Geophysical Research*, **111(B02406)**, 1-9.

Castaños H., Lomnitz C., 2012. The 2010 Chile Earthquake. Earthquake Disasters in Latin America. Springer Briefs in Earth Sciences, Springer, Dordrecht, 47-53.

Chen, Y. I., Liu, J. Y., Tsai, Y. B., Chen, C. S., 2004. Statistical Tests for Preearthquake Ionospheric Anomaly. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, **15 (3)**, 385–396.

Daneshvar, M. R. M., Freund, F. T., 2017. Remote sensing of atmospheric and ionospheric signals prior to the Mw 8.3 Illapel earthquake, Chile 2015. The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami, Birkhäuser, Cham, 157-191.

Davis J. L., Herring T. A., Shapiro I. I., Rogers A. E. E., Elgered G., 1985. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. *Radio Science*, **20(6)**, 1593–1607.

Gurbuz, G., Jin, S. G., Mekik, C., 2015. Sensing precipitable water vapour (PWV) using GPS in Turkey: validation and variations. Satellite Positioning: Methods, Models and Applications, InTech-Publisher, Rijeka, Croatia, 117-129.

Gurbuz, G., Jin, S., 2017. GPS observations of tropospheric disturbances following the 2010 Mw 8.8 Chile earthquake. In 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 4718-4721.

Heidarzadeh, M., Murotani, S., Satake, K., Ishibe, T., Gusman, A. R., 2016. Source model of the 16 September 2015 Illapel, Chile, Mw 8.4 earthquake based on teleseismic and tsunami data. *Geophysical Research Letters*, **43(2)**, 643-650.

Herring, T. A., King, R. W., McClusky, S. C., 2010. Introduction to GAMIT/GLOBK 10.6. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 0-50.

Ho, Y. Y., Jhuang, H. K., Su, Y. C., Liu, J. Y., 2013. Seismoionospheric anomalies in total electron content of the GIM and electron density of DEMETER before the 27 February 2010 M= 8.8 Chile earthquake. *Advances in Space Research*, **51(12),** 2309–2315.

Jin, S. G., Li, Z., Cho, J., 2008a. Integrated Water Vapor Field and Multiscale Variations over China from GPS Measurements. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **47(11)**, 3008–3015.

Jin, S. G., Luo, O. F., Gleason, S., 2008c. Characterization of diurnal cycles in ZTD from a decade of global GPS observations. *Journal of Geodesy*, **83(6)**, 537–545.

Jin, S. G., Han, L., Cho, J., 2011. Lower atmospheric anomalies following the 2008 Wenchuan Earthquake observed by GPS measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **73(7-8)**, 810–814.

Klein, E., Vigny, C., Fleitout, L., Grandin, R., Jolivet, R., Rivera, E., Métois, M., 2017. A comprehensive analysis of the Illapel 2015 Mw 8.3 earthquake from GPS and InSAR data. *Earth and Planetary Science Letters*, **469**, 123-134.

Le, H., Liu, J. Y., Liu, L., 2011. A statistical analysis of ionospheric anomalies before 736 M6.0+ earthquakes during 2002-2010. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **116(A2).**

Liu, J. Y., Chen, Y. I., Pulinets, S. A., Tsai, Y. B., Chuo, Y. J., 2000. Seismo-ionospheric signatures prior to M≥6.0 Taiwan earthquakes. *Geophysical Research Letters*, **27(19),** 3113–3116.

Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J., Tsai, H. F., 2001. Variations of ionospheric total electron content during the Chi-Chi Earthquake. *Geophysical Research Letters*, **28(7)**, 1383–1386.

Liu, J. Y., Chuo, Y. J., Shan, S. J., Tsai, Y. B., Chen, Y. I., Pulinets, S. A., Yu, S. B., 2004a. Pre-earthquake ionospheric anomalies registered by continuous GPS TEC measurements. *Annales Geophysicae*, **22(5)**, 1585–1593.

Liu, J. Y., Chen, Y.I., Jhuang, H.K., Lin, Y.H., 2004b. Ionospheric foF2 and TEC anomalous days associated with Mp 5.0 earthquakes in Taiwan during 1997–1999. *Journal of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **15(3)**, 371–383.

Liu, J. Y., Chen, Y. I., Chuo, Y. J., Chen, C. S., 2006. A statistical investigation of preearthquake ionospheric anomaly. *Journal of Geophysical Research*, **111(A5),** 1–5.

Lyard, F., Lefevre, F., Letellier, T., Francis, O., 2006. Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004. *Ocean Dynamics*, **56(5-6)**, 394-415.

Oikonomou, C., Haralambous, H., Muslim, B. 2016. Investigation of ionospheric TEC precursors related to the M7. 8 Nepal and M8. 3 Chile earthquakes in 2015 based on spectral and statistical analysis. *Natural Hazards*, **83(1)**, 97-116.

Pisa, D., Parrot, M., Santolik, O., 2011. Ionospheric density variations recorded before the 2010 Mw 8.8 earthquake in Chile. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, **116(A8)**, 1–8.

Reddy, C. D., Shrivastava, M. N., González, G., Baez, J. C., 2017. Ionospheric plasma response to M w 8.3 Chile

Illapel earthquake on September 16, 2015. The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami, Birkhäuser, Cham, 145-155.

Saastamoinen, J., 1972. Contributions to the theory of atmospheric refraction. *Bulletin Géodésique (1946-1975)*, **105(1)**, 279-298.

Ye, L., Lay, T., Kanamori, H., Koper, K. D., 2017. Rapidly estimated seismic source parameters for the 16 September 2015 Illapel, Chile M w 8.3 earthquake. The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami, Birkhäuser, Cham, 11-22.

Zhang, Y., Zhang, G., Hetland, E. A., Shan, X., Wen, S., Zuo, R., 2017. Coseismic fault slip of the September 16, 2015 Mw 8.3 Illapel, Chile earthquake estimated from InSAR data. The Chile-2015 (Illapel) Earthquake and Tsunami, Birkhäuser, Cham, 73-82.

İnternet kaynakları

1-https://weatherspark.com/h/d/147252/2015/9/17/Historical-Weather-on-Thursday-September-17-2015-at-La-Florida-Airport-Chile#Figures-Pressure, (05/11/2020)