

Tarihsel sismogramların yeniden değerlendirilmesi: 1912 depremleri örneği

Murat Ersen AKSOY*, **Ziyadin ÇAKIR**, **Martin VALÉE**, **Mustapha MEGHRAOUI**

İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, Yer Sistem Bilimi Programı, 34469, Ayazağa, İstanbul

Özet

Modern sismolojik yöntemlerle gerçekleştirilen deprem kayıtları son 40 yıllık dönemi kapsamaktadır, ancak aletsel sismolojik gözlemlerin başlangıcı 1880'lere dayanmaktadır. 1960'larda dünya standart sismograf ağının (WWSSN) kurulmasına kadar geçen süre içinde depremler ilksel mekanik sismograflar tarafından kaydedilmiştir. Bu deprem kayıtlarının modern metotlarla yeniden incelenmesi sismolojinin aletsel dönemini belirgin bir oranda genişletecektir. Bu çalışmada Ganos Fayı üzerinde meydana gelen 9 Ağustos ($M_s = 7.4$), 10 Ağustos ($M_s = 6.2$ ve 5.3) ve 13 Eylül 1912 ($M_s = 6.9$) depremlerinin sismogramları toplanmış ve çalışılmıştır. O tarihte 143 deprem istasyonunun faal olduğu tespit edilmiş ve araştırmalar sonucunda bu depremlere ait 73 adet tarihsel sismogram elde edilmiştir. Sismogramlardan Bergen, Ebro ve Taranto istasyonlarına ait kayıtlar TESEO² yazılımıyla sayısallaştırılmış, geometrik düzeltmeye tabii tutulmuş ve SAC (sismik analiz kodu) formatına dönüştürülmüştür. Toplamda 15 adet deprem kaydı, cihaz parametrelerine ihtiyaç duymayan Green Fonksiyonu hesabı yöntemiyle incelenmiştir. Taranto istasyonu kaydından elde edilen göreceli kaynak-zaman fonksiyonu 9 Ağustos depremi için 40 saniyelik bir kaynak süresi vermiştir ki bu süre 3 km/sn'lik ortalama kırılma hızıyla yaklaşık 120 km'lik bir kırık uzunluğu ifade eder. Bununla birlikte, düşey bileşen kaydı yapan Göttingen Toledo Ebro Pulkovo ve Hongo istasyonlarının P dalgası ilk varışları incelenmiş ve saha gözlemleriyle birleştirilerek 9 Ağustos 1912 şoku için bir fay mekanizması çözümü verilmiştir. Bu çalışmada tarihsel deprem kayıtları ve saha gözlemlerinin birleştirilmesi sonucunda 1912 depremleri için toplamda 150 km'lik bir fay kırığı hesaplanmıştır. Bu kırık boyu Marmara denizindeki sismik boşluğun boyutunun belirlenmesinde önemli bir sınır teşkil etmektedir. 9 Ağustos 1912 ve Kuzey Anadolu fayı üzerinde meydana gelen tarihsel depremlere ait tarihsel sismogramların yeniden incelenmesi bu depremler hakkında yeni parametreler sağlayacak ve deprem olgusunun anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Sismoloji, tarihsel sismogram, 1912 depremi, Ganos Fayı, Kuzey Anadolu Fayı.

*Yazışmaların yapılacağı yazar: Murat Ersen AKSOY. aksoymur@itu.edu.tr; Tel: (533) 240 20 49.

Bu makale, birinci yazar tarafından İTÜ Avrasya Yer Bilimleri Enstitüsü, Yer Sistem Bilimi Programı'nda tamamlanmış olan "Active tectonics and paleoseismology of the ganos fault segment and seismic characteristics of the 9 August 1912 Mürefte Earthquake of the North Anatolian Fault (Western Turkey)" adlı doktora tezinden hazırlanmıştır. Makale metni 30.10.2009 tarihinde dergiye ulaşmış, 05.02.2010 tarihinde basım kararı alınmıştır. Makale ile ilgili tartışmalar 30.09.2010 tarihine kadar dergiye gönderilmelidir.

The usage of historical seismograms: The 1912 earthquake records

Extended abstract

Large earthquakes ($M > 7$) occur with intervals more than hundreds of years. Quantitative data of large earthquakes are available through recordings of modern (digital) seismographs since the last 40 years. However historical (analog) seismograms encompass nearly 100 years of seismicity and document significant large earthquakes of the world. Contemporary analyses of old seismograms predate fundamental developments in quantitative seismology, while present techniques and methods in modern seismology allow comprehensive analysis of the earthquake phenomena (Kanamori and Brodsky, 2004). A reanalysis of old seismograms, integrated with modern methods will expand considerably the instrumental period of earthquake seismology and may provide key information for regional tectonics, kinematics of faults, earthquake parameters, recurrence intervals and seismic hazard (Batlló et al., 2008).

In this work, it is here provided a short guideline how to collect and process historical seismograms by presenting a case study of the 1912 earthquake sequence along the North Anatolian Fault. The 9 August 1912 Mürefte earthquake ($M_s = 7.4$) occurred at an early stage of seismological research. At that time, at least one primitive seismograph was active at 143 stations. 73 seismic records have been collected for the 9 August, 10 August and 13 September 1912 shocks, which occurred along the Ganos Fault. The majority of the records are from European stations located northwest and west of the epicentre. However, other recordings from Japan, Australia and Russia were also obtained. The SISMOS online database was the major source of the collected seismograms.

The TESEO software has been used to vectorize and correct the waveforms and to convert them to SAC files. Signals were processed using the Empirical Green Function approach proposed by Vallee (2004), which avoids complexities due to unknown instrument parameters. The method uses the signal of a smaller event to model the Green function of the main earthquake. Comparable signal pairs 9 August and 13 September shocks from the Bergen, Ebro, and Taranto stations were digitized and corrected. 15 digital seismic signals have been modelled with

the related method. Due to limitations by the applied method and majorly because of inadequate signal corrections our modelling revealed reliable results only for the Taranto station.

The modelling of the 9 August and 13 September shocks provide a relative source time function and indicate that the moment ratio between the two shocks is about 30 which corresponds to 1 degree difference in magnitude and infer 40 second source duration for the 9 August. In addition to the modelling, we use the P-wave polarities at 5 stations to construct a focal mechanism. The vertical component seismograms from Göttingen, Toledo, Ebro, Pulkovo and Hongo and field based $N68^\circ E$ fault strike allow us to construct the focal mechanism solution for the 9 August 1912. The pure strike slip solution we obtained is in agreement with the known fault kinematics and slip measurements.

The 40 second source duration implies ~ 120 km coseismic rupture length if a unilateral rupture propagation at 3 km/sec is attributed to the 9 August earthquake. On the other hand, the size of the 9 August shock corresponds to 1.5×10^{27} dyn*cm seismic moment which also suggests a 120 ± 20 km rupture length, assuming an average slip of 2.5 m and a fault width of 15 km. The size of the 13 September shock ($M_s = 6.9$) implies 30 ± 10 km of surface rupture with similar fault parameters.

As a result, the combined analysis of seismology, field observation and historical data suggest that the 1912 sequence caused a 150 km of surface faulting. This length is equal to the distance of the two major geometrical complexities of the Ganos Fault on its east and west; the Central Marmara Basin and the Saros Trough respectively. Therefore, it may be concluded that the eastern rupture end of 9 August 1912 Mürefte earthquake is located in the Central Marmara Basin and defines the western limit of the seismic gap in the Sea of Marmara.

The comprehensive reanalysis of historical seismograms for the large earthquakes along the North Anatolian Fault will considerably extend our knowledge of the characteristics each earthquake and will provide new constraints to understand the earthquake behaviour along this large continental strike slip fault.

Keywords: Seismology, historical seismogram, 1912 earthquake, Ganos Fault, North Anatolian Fault.

Giriş

Deprem esnasında meydana gelen salınımlar sismograflarla kaydedilir. Son 30 yıldır bu kayıtları elektronik/sayısal sismograflar gerçekleştirir. Büyük depremler ($M > 7$) aynı fay veya bir bölge içinde birkaç yüzyılda bir tekrarlandığından modern sismoloji henüz çok az sayıda büyük depremi kayıt altına alabilmiştir. Dünya çapında standart sismograf ağı (WWSSN) sadece son 40 yılı kapsar, oysa sismolojik araştırmalar bundan daha eskiye dayanmaktadır. İlk mekanik sismograflar yaklaşık günümüzden 100 yıl önce inşa edilmiştir. Dolayısıyla modern cihazlardan daha uzun bir zaman dilimine tanıklık etmiştir. Bu cihazlara ait analog sismogramlar 19. ve 20. yüzyılın birçok büyük depremini belgelemektedir. Bu dönemlerde gerçekleştirilen sismogram okumaları, modern sismolojinin bilgi ve teknolojisinden yoksun olarak gerçekleştirilmiştir. Günümüzde depremler hakkında daha fazla bilgi sahibiyiz ve mevcut teknik ve yöntemler sayesinde bir depremi kapsamlı olarak irdelenebilmektedir (Kanamori ve Brodsky, 2004). Tarihsel sismogramların güncel yöntemlerle yeniden incelenmesi sismolojinin aletsel dönemini büyük ölçüde genişletecektir. Bu durum bir bölgenin genel tektonizması, fay kinematığı, deprem parametreleri, deprem tekrarlanma aralığı ve deprem riski konusunda önemli bilgiler sağlayacaktır (Batlo vd., 2008).

Eski deprem kayıtlarının yeniden incelenmesi dünya genelinde yeni bir araştırma konusu olup ilgili yayın sayısı oldukça azdır. Ancak mevcut araştırmalar tarihsel depremlerle ilgili önemli bilgiler sağlamaktadır. Örneğin Schlupp (1996) ve Schlupp ve Cisternas (2007), 1905 Moğolistan depremlerinin dört Avrupa istasyonuna ait Wiechert sismogramlarını yeniden sayısallaştırılıp modellemiştir. Her iki deprem için büyüklük, sismik moment ve süreyi yeniden hesaplayarak oluşan kırıklarla ilgili yeni parametreler sunmuştur. Bu veriler sonucunda ilk depremin yüzey kırığının önceki araştırmalara göre 60 km daha uzun olduğu tespit edilmiştir. Aynı işlem 1906 San Francisco (A.B.D), 1909 Benavente (Portekiz), 1909 Lambesc (Fransa) ve 1910 Adra (İspanya) depremleri için de gerçekleştirilmiş ve yeni veriler elde edilmiştir (Wald vd., 1993; Stich, 2003 ve 2005). Zahmetli ve uzun

soluklu bir süreç olmasına rağmen, tarihsel deprem kayıtlarının sayısallaştırılması, çözümlenmesi ve modellenmesi, deprem parametreleri ve deprem kırığı özellikleri açısından çok ciddi bir bilgi kaynağı sağlayacaktır (Kikuchi ve Kanamori, 1982 ve 1991; Schlupp, 1996; Stich, 2003).

9 Ağustos 1912 Mürefte depremi ($M_s = 7.3$) sismoloji biliminin çok erken bir evresinde meydana gelmiştir (Ambraseys ve Finkel, 1987). Bu dönemde, sismograflar bugünküne kıyasla daha ilkel bir mekanizmayla çalışmakta ve sürekli olarak geliştirilmekteydi. Ayrıca günümüz sismometreler standart özelliklere sahip iken, o dönemde birbirinden oldukça farklı cihazlar faaliyet göstermekteydi; örneğin Milne, Ewing, Omori, Bosch-Omori, Imamura, Vasca sismica, Rebeur-Ehlert, Agamennone, Galitzin, Wiechert, Vincentini, Grablovitz ve Mainka sismografları. Bu cihazların her biri farklı özelliklerle çalışmış olsa da deprem kaydetmekteydi. Bu kayıtlar o depremlerin sismolojik parametrelerine ulaşabileceğimiz tek kaynak olduğundan çok değerlidir.

Bu çalışmada 9 Ağustos 1912 Mürefte depremi ve bunu takip eden büyük sarsıntuların sismogramlarının toplanarak yeniden okunması amaçlanmıştır. Çalışmada öncelikle 1912 yılına ait deprem istasyonlarının durum ve dağılımı sunulmuştur. Ayrıca, deprem kayıtlarının toplanması konusunda izlenebilecek başlıca yollar verilmiştir. Ardından sismogramların ve üzerinde yer alan deprem kaydının sayısallaştırılması için mevcut yazılımlar özetlenmiştir. Sayısallaştırılan sinyallerin düzeltme aşaması bu bölümü takiben verilmiştir. 1912 depremleri örnek uygulama olarak sunulmuştur.

1912 yılı deprem istasyonları ve sismogramların toplanması

1912 depremleri sismogramlarının toplanabilmesi için o dönem faal olan istasyonlar ve bunların bağlı bulunduğu kurumların belirlenmesi gerekmektedir. Bu konuda yakın zamanda yayınlanmış herhangi bir çalışma bulunmadığından güvenilir bilgilere ulaşmak güçtür. Bu konudaki en önemli kaynaklardan biri Wood

(1921)'in çalışmasıdır. Wood, o dönem dünya-daki tüm faal istasyonların konumu, coğrafi özellikleri ve cihazları hakkında bilgi vermektedir. Daha güncel bir çalışma, IASPEI (International Association of Seismology and Physics of Earth Interior)'in Sismolojik Arşivler çalışma grubunun hazırladığı yayınlanmamış bir listedir (Musson, 2005). Excel formatında bir dosya olarak internet sayfalarında yayınlanan listede 1889 ila 1920 yılları arasında faaliyet gösteren istasyonlar verilmektedir. Bu listeye göre 1912 yılında dünya üzerinde toplam 143 istasyonda en az bir sismograf deprem ölçmekteydi (Şekil 1).

İstasyonların azimutsal dağılımına bakıldığında özellikle Avrupa ve Amerika'da ciddi bir yoğunluk göze çarpmaktadır. Bu istasyonlar, 1912 depremleri merkez üstü bölgesinin kuzeybatısı ve batısında yer almaktadır. Merkez üstünün doğu ve güney doğusundaki sismograf sayısı çok daha azdır.

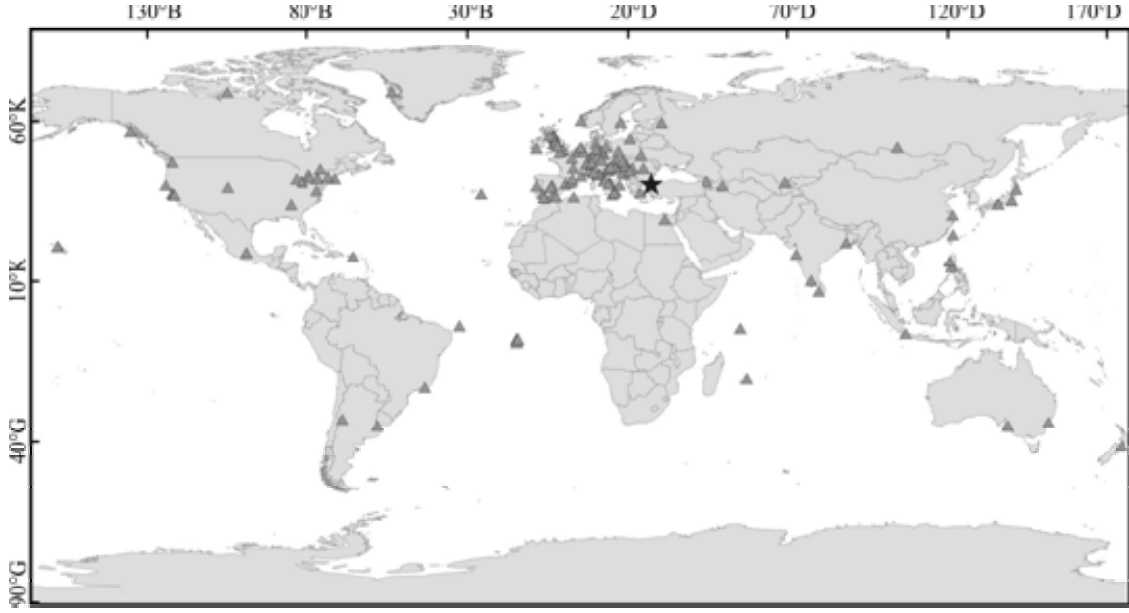
İstasyonlarda kaydedilen sismogramlar o dönemlerde sistematik olarak arşivlenmiştir. I ve II. Dünya savaşları bu arşivleri önemli oranda zarara uğratmış olmasına rağmen bazı kamu kuruluşları, üniversiteler ve araştırma merkezleri ellerindeki kayıtları günümüze kadar korumayı başarmıştır. Tarihsel sismogramları, bu arşivlerden sorumlu birim veya kişilere doğrudan ulaşarak temin etmek mümkündür; örneğin Ebro - Ebro Gözlemevi, Bergen - Bergen Üniversitesi, Riverview - Geoscience Australia ve Strasbourg - IPGS. İngiltere, A.B.D. ve İtalya'da çok geniş kapsamlı birer sismogram koleksiyonu bulunmaktadır. A.B.D.'deki arşiv Birleşik Devletler Jeoloji Servisi (USGS) tarafından hazırlanmıştır ve dünyadaki birçok istasyonun sismogramlarına ait mikrofilm kopyalarından oluşmaktadır. İngiltere'deki arşiv ulusal olup bugün faal olmayan istasyonların kayıtlarını barındırmaktadır. İtalya'da, İNGV önderliğinde yürütülen SISMOS projesi sayesinde, 1880-1980 yılları arası Avrupa istasyonlarına ait 105.000 adet deprem kaydına raster resim dosyası olarak ulaşmak mümkün hale gelmiştir.

Yukarıda adı geçen tüm kuruluş ve arşivlerle temasa geçerek Tablo 1'de verilen depremlerin sismogramları talep edilmiştir. Bunun sonucun-

da, 9 Ağustos, 10 Ağustos ve 13 Eylül 1912 depremleri için toplam 73 adet tarihsel deprem kaydı toplanmıştır. Sismogramların çoğunluğu merkez üstünün kuzeybatısında kalan Avrupa istasyonlarına aittir; ancak Japonya, Avustralya ve Rusya'dan da sınırlı sayıda kayıt elde edilerek daha geniş bir azimutsal dağılım sağlanmıştır. Avrupa kayıtlarının çoğu sanal SISMOS veritabanından 600 dpi'lık TIFF dosyaları halinde temin edilmiştir. Bu veritabanındaki 1912 yılının Ağustos ve Eylül aylarına ait yaklaşık 100 adet sismogram kaydı incelenerek ilgili depremler ayırtlanmıştır.

Toplanan kayıtlar ve özellikleri

Kayıt toplama çalışması sonucunda 9 Ağustos depremi için 56, 10 Ağustos için 4 ve 13 Eylül depremi için ise 13 adet sismogram elde edilmiştir. Kayıtlar Wiechert, Galitzin, Mainka, Grablovitz, Imamura, Vasca sismica, Bosch-Omori, Omori, Bosch, Ewing, Vincentini, Agamenone, Rebeur-Ehlert, ve Milne sismograflarına aittir. 14 farklı model sismografa ait bu sismogramlardaki dalga şekli cihazların kayıt özelliklerine bağlı olduğundan birbirleriyle karşılaştırmak veya aynı modellemeye tabi tutmak mümkün değildir. Bu tür bir durumun aynı model cihazlar arasında da söz konusu olması mümkündür. Tarihsel sismogramlardan deprem parametrelerini en doğru şekilde elde edebilmek için her cihazın karakteristik özelliklerini bilmek gerekmektedir. Bu özellikler cihazın çalışma prensiplerini ifade etmektedir. Eski sismografların çoğunda deprem standart mekanik bir sistemle kaydedilmekteydi. Deprem dalgaları bir sarkacın ucunda yer alan iğnenin isli bir kâğıt üzerinde salınmasıyla kayıt altına alınmaktaydı. Bu kâğıt sabit hızda dönen bir silindir üzerinde yer almaktaydı. Kaydedici kol/iğne aynı zamanda yanal olarak (silindirin dönme yönüne dik olarak) hareket ederek kâğıdın bir kenarından diğer kenarına helezonik bir sinyal kaydetmekteydi. Ancak yukarıda belirtildiği gibi bu sisteme ait bazı parametreler aynı model cihazlar arasında bile değişkenlik gösterebilmektedir. Tarihsel deprem kayıtlarını en az hatayla kullanabilmek için aşağıdaki parametrelerin bilinmesi gerekmektedir.



Şekil 1. 1912 yılında faal olan 143 deprem istasyonlarının (üçgen) dünyadaki dağılımı (9 Ağustos Mürefte depremi merkez üstü kırmızı yıldız olarak gösterilmiştir)

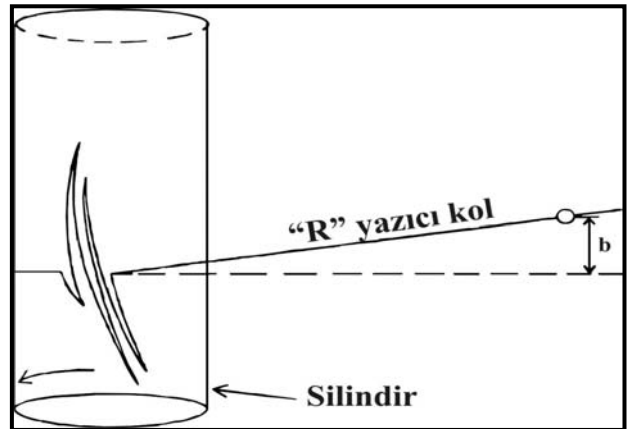
Tablo 1. 9 Ağustos 1912 depremini takiben meydana gelen diğer büyük depremler ve yaklaşık yerleri (Ambraseys, 2002; Tan vd., 2008)

Tarih	Saat (GMT)	Ms	Enlem	Boylam
1912.08.09	01:29	7.4	40.70	27.20
1912.08.10	09:23/23:31	6.2	40.80	27.50
1912.08.10	18:30	5.3	40.60	27.10
1912.09.13	09:23	6.9	40.70	27.00

- T = Sarkacın doğal periyodu (saniye)
- V = Sismografin büyütmesi
- ϵ = Tamponlama sabiti
- r = Kaydedici iğnenin statik sürtünmesi (milimetre)
- Silindirin dönme hızı (mm/sn)
- Kaydedici kolun yatay hızı
- Diğer

Ancak bu bilgiler sinyali modellemek için yeterli değildir. Yukarıda özetlendiği gibi bir sismograf, depremleri bir kolun ucunda yer alan bir yazıcı iğnenin bir silindir üzerinde salınmasıyla kaydetmektedir. İğnenin çizebileceği mesafe kolun uzunluğuna bağlıdır ve hareketi bir silin-

dir ile kürenin kesişimini temsil eder. Bu geometri deprem sinyali üzerinde bir deformasyona sebep olur (Şekil 2; Schlupp, 1996). Deformasyon büyük genlikli dalgalarda daha da belirginleşmektedir. Ayrıca yazıcı kol genellikle sismogram kaydıyla aynı doğrultuda bulunmadığından bu kayıtlara aynı zamanda bir eğim açısı eklenmektedir (Şekil 2). Deprem sinyalinin güncel metotlarla incelenebilmesi için bu eğriliklerin geometrik düzeltmelere tabii tutulması zorunludur.



Şekil 2. Standart mekanik bir sismografin kayıt sırasında oluşturduğu eğrilik ve ana yazma ekseninden olan sapmayı gösteren taslak çizim (Schlupp, 1996)

Kayıtların sayısallaştırılması, düzeltilmesi ve işlenmesi

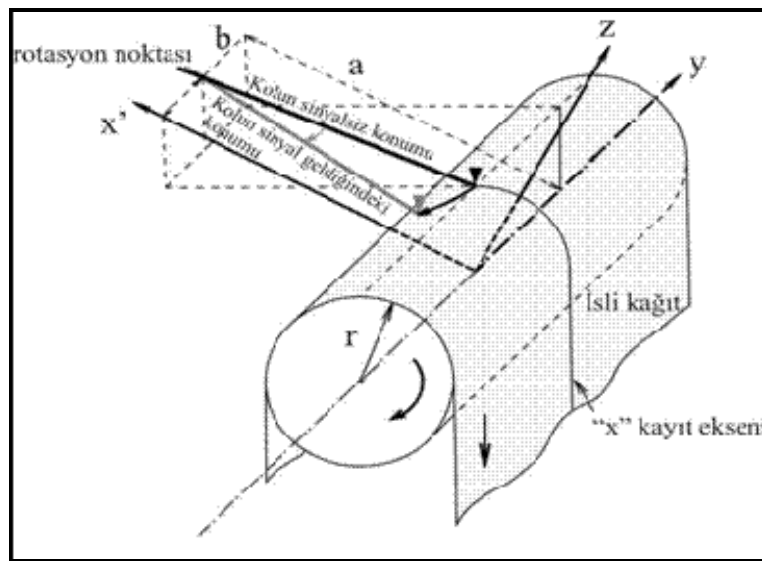
Tarihsel dalga şekillerini modern sismolojik yöntemlerle inceleyebilmek için sinyal öncelikle sayısal veri formatına dönüştürülmelidir. Bu amaçla geliştirilmiş bazı yazılımlar bulunmaktadır (Baskoutas vd., 2000; Bromirski ve Chuang, 2003; Pintore vd., 2005). Scripps Oşinografi Enstitüsünde geliştirilen DigiSeis yazılımı taranmış analog sismogramların sayısallaştırılmasına olanak sağlamaktadır (Bromirski ve Chuang, 2003). Program Matlab tabanlı olup grafik bir arayüze sahiptir ve deprem sinyallerini etkileşimli bir biçimde çizme imkânı sunmaktadır. Sayısallaştırma işlemi tamamlandığında sinyal SAC (Seismic Analysis Code) formatında kayıt edilebilmektedir. Diğer bir yazılım ise TESEO²'dir (Pintore vd., 2005). INGV'de geliştirilen bu program ücretsiz olarak temin edilebilen GIMP (GNU Image Manipulation Program) programının bir eklentisi olarak tasarlanmıştır. Programın algoritimi Cadec (1987)'den alınmıştır ve ilk sürümü FORTRAN'da Schlupp (1996) tarafından yazılmıştır. TESEO², SeisDig'e benzer işlevler sunmakta, ancak programda ilave olarak ağırlıklı renk ortalamasına dayanan otomatik/yarı otomatik bir çizim algoritması bulunmaktadır. Bu özellik sayesinde sinyalin belirgin ve sürekli olduğu sismogramlarda sayısallaştırma işlemi oldukça hızlanmaktadır. Yazılımın sunduğu diğer önemli bir işlev ise sayısallaştırılmış kayıt analizidir. Bu işlev büyük genliklerde meydana gelen eğrilikleri ve kayıttaki zaman kayması gibi sorunları düzeltmektedir. Düzeltmeyi uygulamak için program bazı parametreler sunmaktadır ancak bazı ek değerlerin girilmesi de gerekmektedir (Şekil 3).

laştırılmış kayıt analizidir. Bu işlev büyük genliklerde meydana gelen eğrilikleri ve kayıttaki zaman kayması gibi sorunları düzeltmektedir. Düzeltmeyi uygulamak için program bazı parametreler sunmaktadır ancak bazı ek değerlerin girilmesi de gerekmektedir (Şekil 3).

Bu değerler:

- Silindirin dönme hızı (mm/sn)
- Kaydedici kolun yatay hızı
- R = Yazıcı kolun uzunluğu (iğne ucundan rotasyon merkezi eksenine kadar)
- r = İslî kağıdı döndüren silindirin yarı-çapı
- a = Yazıcı kolun ekseninden silindir eksenine olan mesafe
- b = Kol eksenindeki kayma miktarı milimetre cinsinden,
- d = Orijinal kayıttaki dakika uzunluğu (milimetre cinsinden)
- x(i) = Zaman eksenini için saniyeye dönüştürecek koordinat
- y(i) = Amplitüd eksenini için milimetreye dönüştürecek koordinat

Bu değerlerin bazıları sismogramın kendisinden ölçülebilmektedir. Örneğin, silindirin dönme hızı sismogram üzerindeki dakika işaretleri arasındaki mesafeden hesaplanabilir ve kolun yataydaki kayma hızı da paralel iki sinyal çizgi arasındaki mesafeden elde edilir. Sismogramdan okunamayan değerler için ilgili istasyona ait



Şekil 3. Mekanik bir sismografin şeması ve cihazla ilgili önemli parametreler

bültenlere başvurulmalıdır. Ancak deprem ne kadar eskiyse bu verilere ulaşmak da o kadar güçleşmektedir. Özellikle cihazın periyodu, büyümesi ve tamponlama sabiti gibi dalga şeklini doğrudan etkileyen değerlerin eksiliği depremin kaynak parametreleri analizini güçleştirmektedir. Bu bilgi eksikliklerinden doğabilecek hata paylarını en aza indirmek için Vallee (2004) tarafından önerilen Green Fonksiyonu hesaplamasından faydalanılması düşünülmüştür (Bouchon sözlü görüşme, 2005). Bu yöntemde, ana şok ile aynı yer ve mekanizmaya sahip ikinci bir şok nokta kaynağı olarak kullanılarak, ana şok modellenenmektedir. Her iki depremin dalgaları aynı jeolojik ortamdan geçerek aynı sismograf tarafından kaydedildiği için zemin ve cihaz etkileri filtrelenmektedir. Böylece ikinci şoku kullanarak ilk şokun kaynak-zaman fonksiyonunu elde etmek mümkün hale gelir.

9 Ağustos depremini müteakip meydana gelen 10 Ağustos ve 13 Eylül'deki büyük depremler bu yöntemi uygulamayı mümkün kılmaktadır. Bu amaçla toplanan 73 adet kayıt içinden bu tür deprem çiftleri seçilmiş ve çiftler kayıt kalitesine göre sınıflandırılmıştır. Bunun sonucunda üç istasyona ait kaydın, sayısallaştırma ve modelleme için uygun olduğu tespit edilmiştir. Bu kayıtlar, Bergen (BER), Ebro (EBR) ve Taranto (TA1H) istasyonlarına aittir.

Bergen BER - Norveç

Bergen istasyonundan Bosch sismografına ait 3 deprem kaydı alınmıştır. Kayıtlardan iki tanesi 9 Ağustos depreminin Doğu ve Kuzey yatay bileşen kayıtlarıdır. Üçüncü kayıt ise 13 Eylül depreminin yatay bileşenlerinden birine aittir. Her üç sismogramdaki kayıt belirgin ve düzgün bir dalga şekline sahiptir, sinyal baştan sona kadar sürekli olarak takip edilebilmektedir. Kaydın dakika işaretleri de oldukça belirgin ve düzenlidir.

Ebro EBR – İspanya

9 Ağustos ve 13 Eylül depremleri bu istasyonda faal olan Grablovitz ve Vincentini sismografları tarafından kaydedilmiştir. Grablovitz cihazı Kuzeybatı ve Kuzeydoğu bileşenleri kaydetmiştir. Her iki depremin dalga şekli okunaklı ve süreklidir. 9 Ağustos depreminin dalgaları her iki bi-

leşende de neredeyse tamamen kayıt altına alınmıştır. Ancak 13 Eylül depreminin sarsıntıları sadece bir bileşende ve çok zayıf bir sinyal olarak kaydedilmiştir. Vincentini sismografı üç bileşeni kaydedebilen bir cihazdır. Bunlar Kuzey, Doğu ve düşey bileşenlerdir. 9 Ağustos depremi kaydının Kuzey ve Doğu bileşenlerindeki dalga şekli iyi okunabilmektedir, ancak düşey bileşendeki sinyal çok küçük genliklere sahiptir. 13 Eylül depremi kaydının Kuzey ve Doğu bileşenleri sayısallaştırmaya uygun olup, düşey bileşende herhangi bir salınım görülmemektedir. Sismogramlardaki dakika çizgileri her iki deprem kaydında da düzenlidir.

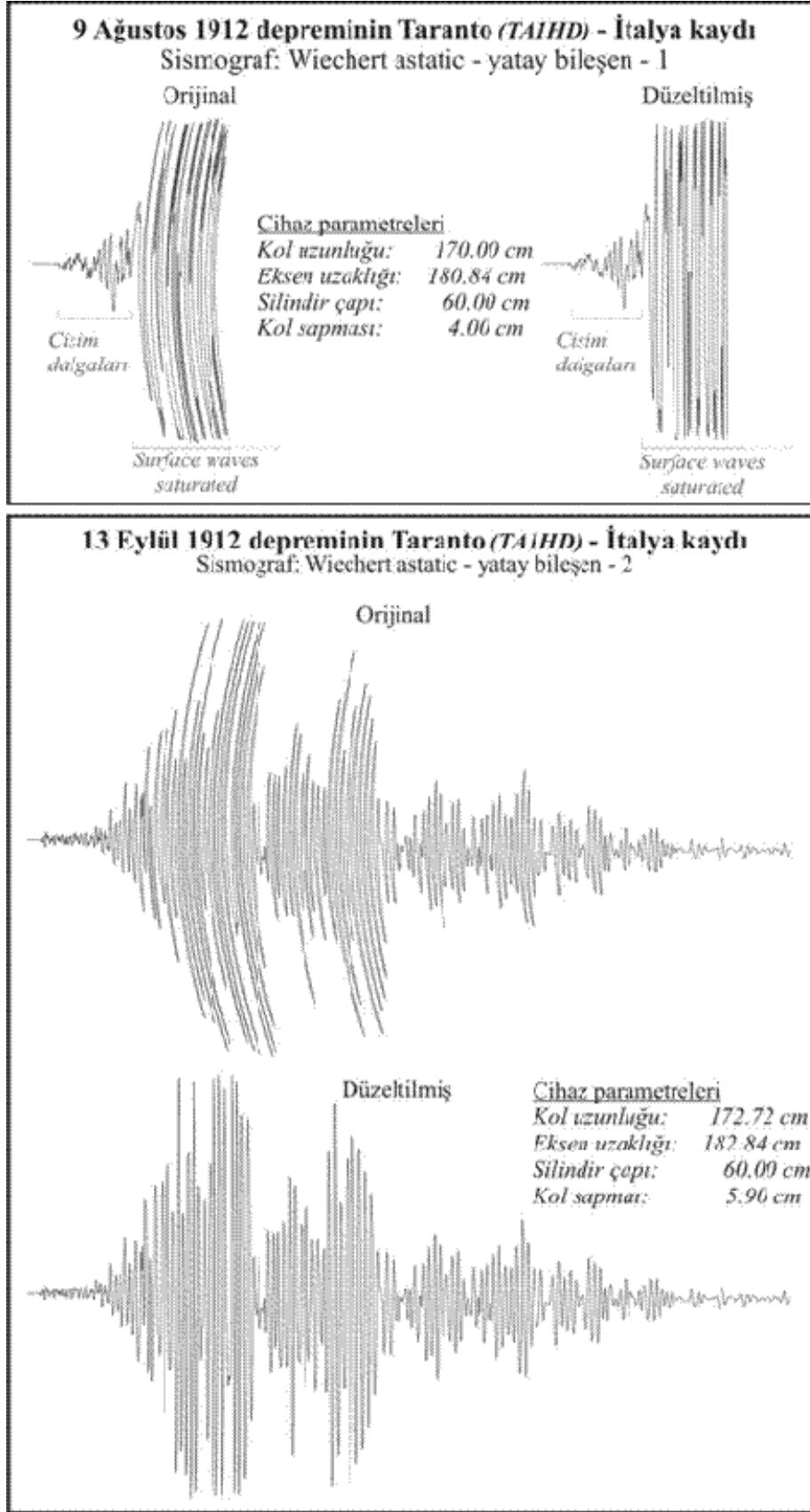
Taranto TA1H – İtalya

Taranto istasyonundan elde edilen kayıtlar bir Wiechert sismografına aittir. Bu istasyondan 3 depreme ait kayıt toplanmıştır; bunlar 9 Ağustos, 10 Ağustos ve 13 Eylül depremleridir. Tüm sismogramlarda sinyal belirgin ve süreklidir. 9 Ağustos kaydı yüksek genliklerde doygunluğa eriştiğinden kesilmiştir. Bu durum, salınım halindeki iğne ucunun cihazın kayıt sınırlarına eriştiğinde meydana gelmektedir. Yüksek genlikli kesim yüzey dalgalarına karşılık gelmektedir. Sinyalin doygunluğa erişmeden önceki kesimi ise cisim dalgalarına aittir (Şekil 4).

Toplanan tüm sismogramlar 600 ila 1200 dpi'lık bir çözünürlük kullanılarak sayısallaştırılmıştır. Sismogramların sayısallaştırılmasında TESEO yazılımı tercih edilmiştir. Dalga şekli vektör olarak yeniden çizilmiştir. Vektör çizgisi daha sonra TESEO² içindeki eğrilik düzeltme işlemine tabii tutulmuştur (Şekil 4). Bunun için her sismogram için ayrı ayrı cihaz parametreleri tespit edilmiş ve programa girilmiştir. Düzeltme işlemleri tamamlandığında sinyaller 1 piksel aralıkla yeniden örneklenerek SAC formatına çevrilmiştir.

Kayıtların analizi

Toplamda, 9 Ağustos, 10 Ağustos ve 13 Eylül 1912 depremlerine ait, 15 adet deprem kaydı sayısallaştırılarak SAC formatına çevrilmiştir. Bu kayıtlar Green Fonksiyonu hesabı kullanılarak analize tabii tutulmuştur (Vallee, 2004). Bu yöntemde 13 Eylül depremi, 9 Ağustos 1912



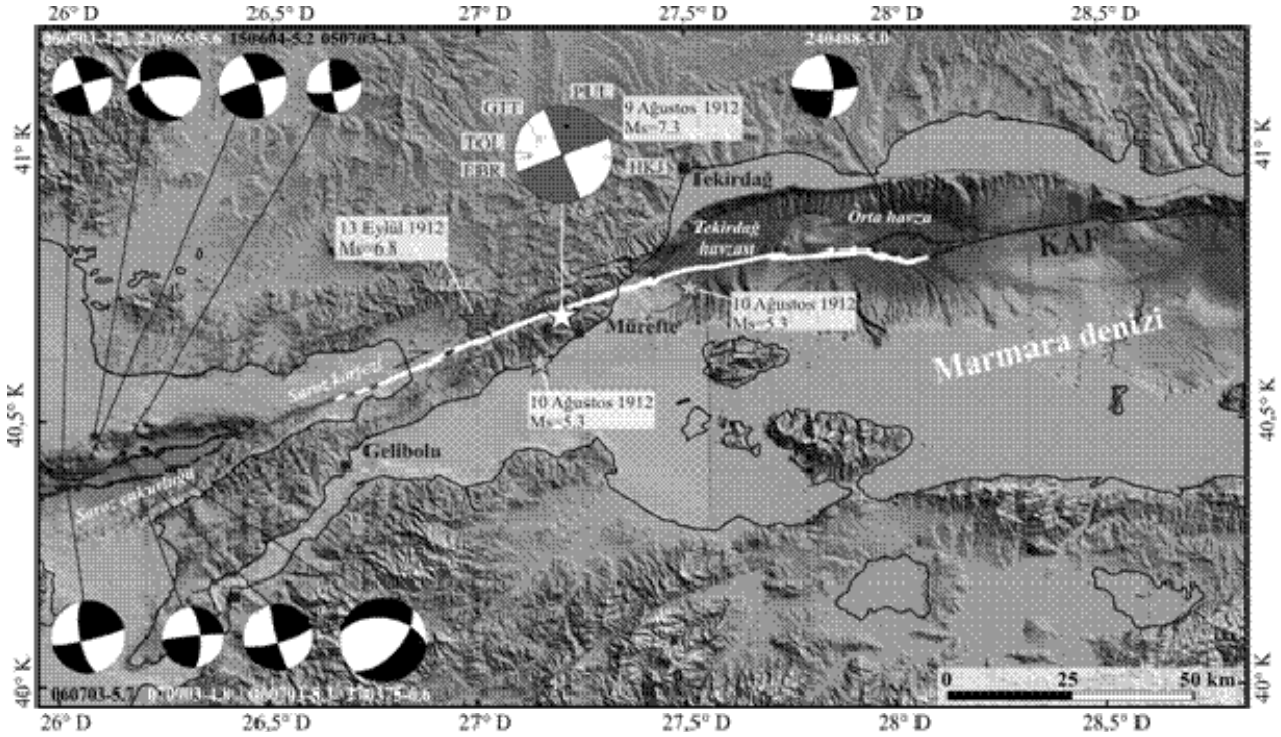
Şekil4. 9 Ağustos ve 13 Eylül 1912 depremlerinin Taranto istasyonundaki kayıtları (Dalga şekli sayısallaştırılarak ve geometrik düzeltmeye tabii tutularak SAC dosyaları haline getirilmiştir)

şoku için bir nokta kaynak kabul edilerek göreceli bir kaynak – zaman fonksiyonu elde edilmiştir. Green Fonksiyonu hesabı sonucunda 3 istasyondan sadece Taranto'ya ait deprem sinyalleri kullanılabilir sonuçlar vermiştir. Bu durum diğer istasyonlara ait sinyallerin yeterli oranda ve doğru biçimde düzeltilememesinden kaynaklanmaktadır. Bilinen cihaz parametreleri düzeltme için yeterli gelmemiştir. Sonuç olarak, Taranto kayıtları analizinden elde edilen kaynak-zaman grafiği 9 Ağustos depreminin yaklaşık olarak 40 sn sürdüğünü göstermiştir.

Kullanılan yöntem nedeniyle 9 Ağustos şoku için doğrudan bir büyüklük elde etme imkânı olmamıştır. Ancak Ambraseys ve Finkel (1987) İngiltere istasyonlarına ait Ewing sismograf kayıtlarını kullanarak depremin büyüklüğünü $M_s = 7.4$ olarak vermiştir. Daha sonraki çalışmalarda Ambraseys (2002) depremin büyüklüğünü $M_s = 7.3$ olarak revize etmiştir. Bu büyüklük yaklaşık olarak 1.5×10^{27} dyn*cm'lik bir sismik momente karşılık gelmektedir. Pulkova istasyonuna ait

kayıtları inceleyen Emile Okal G_2 kayıtlarından 1.6×10^{27} dyn*cm'lik benzer bir sismik moment hesaplamıştır (Okal, 2009).

Toplanan sismogramlardan düşey bileşenli kayıtlar kullanılarak 9 Ağustos depremi için bir odak mekanizması çözümü üretilmeye çalışılmıştır. Saha gözlemlerine dayanan $K68^\circ D$ yönlü, doğrultu atım fay geometrisinden yararlanılarak oluşturulan odak mekanizması çözümü üzerine Göttingen (GTT), Toledo (TOL), Ebro (EBR), Pulkovo (PUL) ve Hongo (HGJ) olmak üzere toplam 5 istasyon kaydının ilk P dalgası varışları işlenmiştir. Önerilen çözümlenenin 5 istasyon verisiyle uyumlu olduğu gözlenmiştir (Şekil 5). Okal (2009) Pulkovo istasyonu kayıtlarından sismik moment dışında bir odak mekanizması çözümü hesaplamıştır ve doğrultusu 250° , eğim 82° ve atım 185° 'lik bir mekanizma elde etmiştir. Her iki çözümleme birbirine çok yakın olup bölgedeki genel fay kinematığı ve gözlenen atım karakteriyle de uyumludur.



Şekil 5. 1912 depremler serisi Ganos Fayı üzerinde meydana gelmiştir. 9 Ağustos ve 13 Eylül depremleri yaklaşık 150 km'lik bir yüzey kırığı oluşturmuştur (sırasıyla beyaz ve gri çizgiler). Bu kırık doğuda Marmara sismik boşluğunun batı sınırını oluşturur. 5 istasyona ait sismogram okumaları ve saha gözlemleri değerlendirilecek 9 Ağustos 1912 depremi için bir odak mekanizması çözümü önerilmiştir

Tartış ma ve sonuç

Yukarıda da özetlendi ğ i gibi, 1912 depremler serisine ait 73 adet tarihsel sismogram toplanmış olsa da bu kayıtların tümünden doğ rudan yararlanmak oldukça güçtür. Bazı eski sismograflardaki kayıt mekanizması karakteri itibariyle bu istasyon kayıtlarını kullanma imkânı olmamıştır. Ancak baş ta Wiechert olmak üzere Bosch, Galitzin ve Vincentini sismograflarının deprem dalgalarını oldukça dü zğ ün dalga şek illeri halinde kaydetti ğ i ve sayısallaştırılıp kullanılmasının diğ er model sismogramlara göre daha kolay oldu ğ u gözlenmiştir.

Sayısallaştırılan kayıtlar daha sonra geometrik dü zeltmelere tabii tutularak modern sismolojide kullanılan SAC dosya formatına dönü ş türülmü ş tür. Eski kayıtlarının analizi için cihaz parametrelerin iyi bilinmesi gerekmektedir ki bu parametreleri elde etmek güçtür. Güncel sismolojik metotlar bu parametrelerden bağı msız bir şekilde sismogram analizini mümkün kı lmaktadır. Green Fonksiyonu hesabı kullanılarak elde edilen 40 saniyelik deprem süresi, 9 Ağ ustos depreminin kırık uzunlu ğ uyla ilgili önemli bilgiler sağlamıştır. Doğ ru altı mlı bir fay kırığı nın deprem anında ilerleme hızı ortalama 3 km/sn'dir; 17 Ağ ustos 1999 ($M_w = 7.4$) depreminde de kırılma hızı yer yer 6 km/sn' ye çı kmış olsa da ortalama kırık hızı 3 km/sn olarak belirlenmiştir (Bouchon ve Karabulut, 2008). 9 Ağ ustos 1912 depreminin süresinin 40 saniye oldu ğ u dikkate alındı ğ ında 3 km/sn en az 120 km'lik bir kırık uzunlu ğ una karş ılık gelir. Bu uzunluk depremin büyüklü ğ ü ile de orantılıdır. 9 Ağ ustos ş oku için hesaplanan 1.5×10^{27} dyn*cm'lik sismik moment, 2.5 m'lik ortalama atım ve fay yüzeyinin eni 15 km kabul edildi ğ inde yine 120 ± 20 km'lik bir kırık uzunlu ğ u vermektedir (Kanamori, 1977). 13 Eylül depreminin $M_s = 6.9$ 'luk büyüklü ğ ü ise aynı de ğ erlerle yaklaşık 30 ± 10 km'lik bir kırık uzunlu ğ u ifade eder. Bu veriler arazi gözlemleri ve hasar dağı lımlarıyla birleştirildi ğ inde toplamda 150 km'lik bir fay kırığı nın oldu ğ u sonucuna varılmış tır (Aksoy, 2009). 150 km, Saros çukurlu ğ undan Orta Marmara Havzasına kadar uzanan mesafeye eş ittir ve her iki morfolojik yapı Ganos Fayı üzerindeki en büyük fay engellerine karş ılık

gelmektedir. Bu yapılar 1912 depremlerinin kırık ilerlemesini durdurabilecek büyüklükte oldu ğ u düşünölmektedir (Wesnousky, 2006).

Bununla birlikte, 5 istasyona ait P dalgası ilk varış geometrisi, saha gözlemleriyle birleştirilerek 9 Ağ ustos ş oku için ilk kez bir fay mekanizması çözü mü üretilmiştir.

Sonuç olarak, Ganos Fayı üzerinde meydana gelen 9 Ağ ustos ve 13 Eylül depremlerinin tarihsel sismolojik kayıtları bu depremlerle ilgili yeni veriler sağlamıştır. Bu bilgiler saha bilgileriyle birleştirildi ğ inde 9 Ağ ustos 1912 depreminin kırık boyu ve dolayısıyla Marmara'da yer alan sismik boş lu ğ un boyuyla ilgili veriler sunmaktadır.

Kullanılan Green Fonksiyonu hesabında bir deprem çifti analizi sayesinde ş imdilik 9 Ağ ustos depreminin kaynak süresi belirlenebilmiştir. Analizin tek bir sismogram çiftiyle sınırlı kalması daha fazla veri elde etmeyi mümkün kı lmamıştır. Ancak sayısallaştırılmış ve dü zeltmiş kayıt sayısının artırılması 9 Ağ ustos ve diğ er depremler için yeni kaynak parametrelerinin belirlenmesine olanak sağlayacaktır.

Tarihsel deprem, Kuzey Anadolu Fayı'nda, aletsel dönem içinde meydana gelen depremlerin kayıtlarının yeniden de ğ erlendirilmesi, bu depremlerle ilgili önemli ve yeni kaynak parametreleri sağlayacaktır.

Semboller

M : Büyüklük
 M_s : Yüzey dalgası büyüklü ğ ü
 M_w : Moment büyüklü ğ ü

Kaynaklar

Aksoy, M.E., (2009). Active tectonics and paleoseismology of the Ganos fault segment and seismic characteristics of the 9 August 1912 Mürefte Earthquake of the North Anatolian Fault (Western Turkey), *Doktora tezi*, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
Ambraseys, N.N., (2002). The seismic activity of the Marmara Sea Region over the Last 2000 Years, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **92**, 1, 1-18.

- Ambraseys, N.N. ve Finkel, C.F., (1987). The Saros-Marmara earthquake of 9 August 1912, *Earthquake engineering & structural dynamics*, **15**, 2, 189-211.
- Baskoutas, I.G., Kalogeras, I.S., Kourouzidis, M. ve Panopoulou, G., (2000). A modern technique for the retrieval and processing of historical seismograms in Greece, *Natural Hazards*, **21**, 1, 55-64.
- Batllo, J., Stich, D. ve Macia, R., (2008). Quantitative analysis of early seismograph recordings, Fréchet, J., Meghraoui, M. ve Stucchi, M., *Historical Seismology, Interdisciplinary Studies of Past and Recent Earthquakes*, 385-402, Springer Verlag.
- Bromirski, P.D. ve Chuang, S., (2003). SeisDig software to digitize scanned analog seismogram images, User's Manual, Scripps Institution of Oceanography Technical Report, **28**, UC San Diego.
- Cadec, O., (1987). Studying earthquake ground motion in Prague from Wiechert seismograph records, *Gerlands Beitrage Zur Geophysik*, **96**, 438-447.
- Kanamori, H. ve Brodsky, E.E., (2004). The physics of earthquakes, Reports on Progress in Physics/Secondary The physics of earthquakes, **67**, 1429-1496.
- Kanamori, H., (1977). The Energy release in great earthquakes, *Journal of Geophysical Research*, **82**, 2981-2987.
- Kikuchi, M. ve Kanamori, H., (1982). Inversion of complex body waves, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **72**, 2, 491-506.
- Kikuchi, M. ve Kanamori, H., (1991). Inversion of complex body waves-III, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **81**, 6, 2335-2350.
- Musson, R.M.W., (2005). Reports from working groups for the period March 2004 to March 2005, British Geological Surveys Internal Report, **6**.
- Okal, E., (2009). Recent tsunamigenic earthquakes in the Aegean Sea, in Taymaz, T., eds, *International Symposium on Historical Earthquakes and Conservation of Monuments and sites in the eastern Mediterranean Region; 500th Anniversary of the 1509 September 10, Marmara Earthquake*, 10-12 September 2009, Istanbul Technical University, İstanbul.
- Pintore, S., Quintiliani, M. ve Franceschi, D., (2005). Teseo: A vectoriser of historical seismograms, *Computers & Geosciences*, **31**, 10, 1277-1285.
- Schlupp, A., (1996). Neotectonique de la Mongolie Occidentale analysee a partir de donnees de terrain, sismologiques et satellitaires, *Doktora Tezi*, Université Louis-Pasteur, Strasbourg.
- Schlupp, A. ve Cisternas, A., (2007). Source history of the 1905 great Mongolian earthquakes (Tsetserleg, Bolnay), *Geophysical Journal International*, **169**, 3, 1115-1131.
- Stich, D., Batllo, J., Maci, R., Teves-Costa, P. ve Morales, J., (2005). Moment tensor inversion with single-component historical seismograms: The 1909 Benavente (Portugal) and Lambesc (France) earthquakes, *Geophysical Journal International*, **162**, 3, 850-858.
- Stich, D., Batllo, J., Morales, J., Maci, R. ve Dineva, S., (2003). Source parameters of the Mw = 6.1 1910 Adra earthquake (southern Spain), *Geophysical Journal International*, **155**, 2, 539-546.
- Tan, O., Tapırdamaz, M.C. ve Yörü k, A., (2008). The Earthquake Catalogues for Turkey, *Turkish Journal of the Earth Sciences* **17**, 2, 405-418.
- Vallee, M., (2004). Stabilizing the empirical green function analysis: Development of the projected landweber method, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **94**, 2, 394-409002E.
- Wald, D.J., Kanamori, H., Helmberger, D.V. ve Heaton, T.H., (1993). Source study of the 1906 San Francisco earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, **83**, 4, 981-1019.
- Wesnousky, S.G., (2006). Predicting the endpoints of earthquake ruptures, *Nature*, **444**, 7117, 358-360.
- Wood, H.O., (1921). A list of seismologic stations of the world, National Research Council of the National Academy of Sciences, Washington, D.C.