

Yerdeğiştirme Tabanlı Deprem Erken Uyarı Sistemleri

Murat Doruk Şentürk^{1,*}, Bahadır Aktuğ²

¹T.C. İçişleri Bakanlığı, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, 06800, Ankara.

²Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 06830, Ankara.

Özet

Yerdeğiştirme tabanlı deprem gözlemleri giderek yaygınlaşmakta ve buna bağlı olarak kullanım alanları genişlemektedir. Deprem başladıktan kısa süre içerisinde meydana gelen depremin nihai büyüklüğünün belirlenmesi, hem Deprem Erken Uyarı Sistemleri (DEU) hem de depremden bittikten sonraki dönemde kayıpların kestirilmesi ve yardım faaliyetlerinin koordinasyonu için büyük önem taşımaktadır. 1999 Chi-Chi (Mw7.6), 1999 Hector Mine (Mw7.1) ve 2003 Tokachi-Oki (Mw8.3) gibi büyük depremler için yapılan testlerde kuvvetli yer hareketi ölçerlerden elde edilen yerdeğiştirmeye dayalı kestirimlerin daha duyarlı olmakla birlikte özellikle büyük depremler olması gerekenden daha küçük olarak kestirdiği gözlenmektedir (Brown vd. 2011; Crowell vd. 2013). Büyük depremler sırasında kaynağa yakın hızölçerlerin satüre olması, kaynağa uzak olmaları durumunda ise erken uyarı için yeterli zaman kalmaması nedeniyle hızölçerlerin erken uyarı amaçlı kullanımında sorunlar bulunmaktadır. Jeodezik ölçüler ve ivme kayıtlarının birlikte kullanımı ile elde edilen sismojeodezik dalga formları ise satürasyon sorunu içermemeleri nedeniyle kaynağa çok yakın mesafeden veri sağlamakta, GNSS alıcılarının inersiyal olmayan bir sistemde ölçüm yapmaları sayesinde doğrudan kalıcı yerdeğiştirmeler ve buna bağlı deprem büyüklüğü hesaplanabilmesine olanak sağlamaktadırlar. Günümüzde A.B.D. ve Japonya gibi depreme maruz kalan gelişmiş ülkelerde sismojeodezik verilere dayalı erken uyarı sistemleri kurulmuş ve yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada, ülkemizde yakın dönemde meydana gelen bazı büyük depremler için sadece GNSS dalgaformlarına dayalı olarak deprem büyüklükleri hesaplanmıştır. Gökova, Gökçeada ve Van depremlerinin GNSS yerdeğiştirme dalga formları ile tekrar hesaplanması sonucunda sırası ile 6.6, 6.9, 7.2 Mw olan deprem büyüklüğü 6.54, 7.21 ve 7.22 Mw olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlar, özellikle büyük depremler için GNSS dalgaformlarına dayalı olarak hesap edilen deprem büyüklüklerinin yüksek duyarlılık sağladığını ve deprem erken uyarı amaçlı kullanımındaki potansiyelini göstermektedir.

Anahtar Sözcükler

Deprem Büyüklüğü, GNSS, Hızölçer, İvmeölçer, Sismometre, Sismojeodezi

Displacement Based Earthquake Early Warning Systems

Abstract

Displacement based earthquake observations are becoming more common and application fields are becoming larger. The determination of the earthquake magnitude in a short time after the earthquake plays an important role both for Earthquake Early Warning Systems (EEW) and the estimation of the losses and coordinating the rescue efforts. However, magnitude estimation from the displacement waveforms for the 1999 Chi-Chi (Mw7.6), 1999 Hector Mine (Mw7.1) and 2003 Tokachi-Oki (Mw8.3) earthquake shows that while they are more precise, the earthquake magnitudes were underestimated (Brown et al. 2011; Crowell et al. 2013). There are well known bottlenecks with the velocity measuring seismometers due to the fact that they get saturated nearby large earthquakes or they do not provide sufficient time for early warning when they are away from the earthquake source. Geodetic measurements and accelerometer records provide data from the close vicinity of the earthquake source and enable to determine static offsets and the earthquake magnitude based on displacements since GNSS receivers operate in a non-inertial reference frame. Nowadays, earthquake early warning systems based on seismogeodetic observations are being established and becoming more common in countries subject to earthquake hazard such as USA and Japan. In this study, earthquake magnitudes were estimated for several recent earthquakes in Turkey only by using the GNSS displacement waveforms. GNSS based Re-estimation of the earthquake magnitudes for Gökova, Gökçeada and Van earthquakes resulted in the magnitudes of 6.54, 7.21 and 7.22 Mw, respectively, corresponding to the original magnitudes of 6.6, 6.9, 7.2. These results show that earthquake magnitudes based on GNSS waveforms provide high precision and their potential for use in earthquake early warning.

Keywords

Earthquake Magnitude, GNSS, Accelerometer, Seismometer, Seismogeodesy

1. Yerdeğiştirme Tabanlı Deprem Gözlemi ve Erken Uyarıya Dönük Kullanım Potansiyeli

Etkin bir Deprem Erken Uyarı (DEU) sisteminin kuşkusuz en önemli özelliği, kaynağa mümkün olduğunca yakın ama uyarı verilecek noktaya mümkün olduğunca uzak bir konumda büyük depremleri tespit edebilmesidir. Diğer önemli bir özelliği ise, tespit edilen depremin uyarı vermeyi gerektirecek büyüklükte olduğundan emin olunmasıdır.

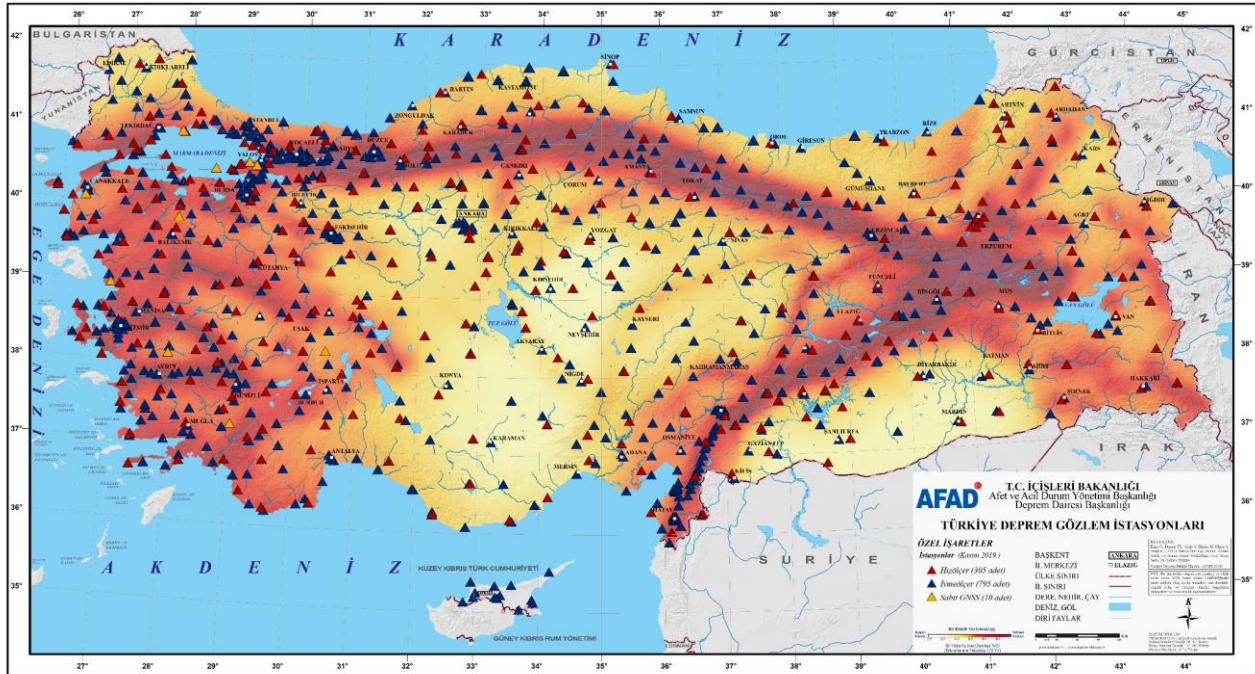
Büyük depremler sırasında kaynağa yakın hızölçerlerin satüre olması, kaynağa uzak olmaları durumunda ise erken uyarı için yeterli zaman kalmaması nedeniyle hızölçerlerin erken uyarı amaçlı kullanımında sorunlar mevcuttur. Diğer yandan, hızölçerler ile erken uyarı sisteminin en önemli bileşeni olan deprem büyüklüğünün çok hızlı ve yüksek hassasiyetle hesaplanması da oldukça güçtür.

Hızölçerlere göre satürasyon problemi bulunmayan ivmeölçerlerde ise zamana bağlı hataların giderilmesi önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu amaçla kullanılan düzeltme teknikleri (baz düzeltmesi, yüksek geçirgenli filtreler vs.) her kaynak-hedef ilişkisi hatta her kanal için ayrı ayrı yapılmak durumundadır ve kullanılan düzeltme teknikleri kullanıcı seçimine bağlı olduğundan objektif olmamaktadır (Bock vd. 2011a). Jeodezik ölçüler ve ivme kayıtlarının birlikte kullanımı ile elde edilen sismojeodezik dalga formları ise satürasyon sorunu içermemeleri nedeniyle kaynağa çok yakın mesafeden de veri sağlamaktadır.

Sismometrelerin aksine, GNSS alıcıların inersiyal olmayan bir sistemde ölçüm yapmaları sayesinde doğrudan kalıcı yerdeğiştirmeler ve buna bağlı deprem büyüklüğü hesaplanabilmesine olanak sağlamaktadırlar. Günümüzde A.B.D. ve Japonya gibi depreme maruz kalan gelişmiş ülkelerde sismojeodezik verilere dayalı erken uyarı sistemleri kurulmuş ve yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu çalışmada, sismojeodezik temelli deprem erken uyarı sistemleri tanıtılmakta, sismojeodezik dalga formlarının elde edilmesinde kullanılan veri işleme ve analiz yöntemleri tartışılmaktadır.

1.1. Mevcut Deprem Gözlem Sistemleri

Deprem gözlemi genel olarak kuvvetli (ivme ölçer) ve zayıf yer hareketi ölçerler (hız ölçer) ile yüksek örnekleme aralıklı (100-200 Hz) dalga formları kullanılarak yapılmaktadır. Buna karşın, yerdeğiştirmeye dayalı dalga formları, hız ve ivme dalga formlarına göre deprem büyüklüğüne daha duyarlıdır. Hız ve ivme dalga boylarından yerdeğiştirme elde edilmesinde önemli sorunlar mevcuttur. Özellikle, hız ve ivme dalga formlarındaki uzun dalga boylu hatalar (drift vb.) yüksek duyarlılıklı yerdeğiştirmelerin elde edilmesine izin vermemektedir. Diğer yandan, GNSS ile tek başına yüksek duyarlılıklı sonsuz dalga boyu (DC)'na kadar yerdeğiştirme dalga formları belirlenebilmekle birlikte, örnekleme aralığı sismometrelere göre oldukça düşüktür (≤ 50 Hz) ve küçük genlikli yerdeğiştirmelere sismometreler kadar duyarlı değildir.



Şekil 1: Türkiye deprem gözlem istasyonları

Mayıs 2020 İtibariyle AFAD Başkanlığı'nca 305 hızölçer istasyon kullanılarak depremin yerinin, büyüklüğünün, derinliğinin, oluş zamanının hesaplanması; 795 ivmeölçer istasyonu kullanılarak ise depremin fiziksel boyutunun anlaşılması, etki süresinin ve yer-yapı etkileşiminin belirlenmesi ve yıkıcı etkisinin kestirilmesi gibi çalışmalar yürütülmektedir.

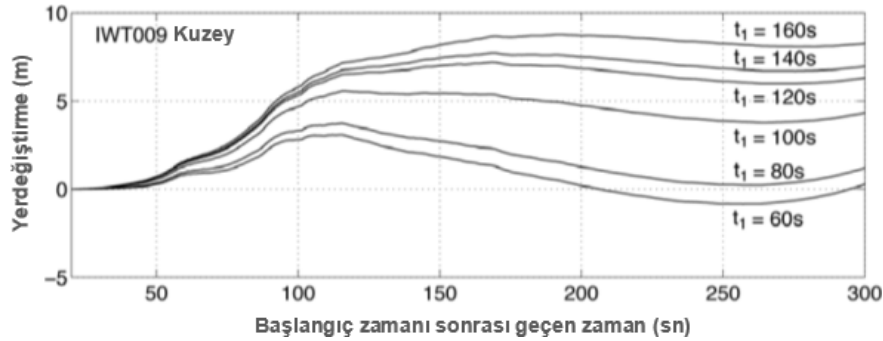
2018 ve 2019 senelerinde kurulan 10 sabit GNSS istasyonunun da dahil edilmesiyle ülkemizde deprem parametrelerinin belirlenmesi amacıyla oluşturulmuş 1110 istasyondan oluşan deprem gözlem ağı Şekil 1'de gösterilmektedir.

2. Sismojeodezik Dalga Formlarının Kullanım Alanları

Hız ve ivme dalga boylarından, büyük genlikli depremlerde, yerdeğiştirme elde edilmesinde önemli sorunlar mevcuttur. Özellikle, hız ve ivme dalga formlarındaki uzun dalga boylu hatalar (drift vb.) yüksek duyarlıklı yerdeğiştirmelerin elde edilmesine izin vermemektedir.

Bununla birlikte, son dönemdeki 1999 Chi-Chi (M_w 7.6), 1999 Hector Mine (M_w 7.1) ve 2003 Tokachi-Okı (M_w 8.3) gibi büyük depremler için yapılan testlerde kuvvetli yer hareketi ölçerlerden elde edilen yerdeğiştirmeye dayalı kestirimlerin daha duyarlı olmakla birlikte özellikle büyük depremleri olması gerekenden daha küçük olarak kestirdiği gözlenmektedir (Brown vd. 2011; Crowell vd. 2013). Bunun bir nedeni, kuvvetli yer hareketi verilerindeki rotasyon ve tiltlerine bağlı olarak meydana gelen düşük frekanslı hataların giderilmesi için yüksek geçirimli (0.075 Hz) (Wu ve Zhao 2006) veya band (0.075 Hz - 3 Hz) (Hoshiya ve Iwakiri 2011) geçirimli filtrelerin kullanılmasıdır. Yüksek geçirimli filtreleme, düşük frekanslı uzun periyotlu sürüklenme (drift) hataları yanında yerdeğiştirme büyüklüğünün (d_p) belirlenmesinde etkili olabilecek düşük frekanslı sinyalleri de filtrelemektedir. Diğer yandan, (d_p) belirlenmesinde kullanılacak yerdeğiştirmeler sismometrelerden elde edilen hız ve ivmeölçerlerden elde edilen ivme verilerinin zamana göre sırasıyla birinci ve ikinci integrasyonu ile elde edilmektedir ve ivme ve hız kayıtlarından yerdeğiştirmelerin elde edilmesinde sorunlar bulunmaktadır (Graizer 1979; Iwan vd 1985; Boore 2001; Boore vd. 2002).

Temel olarak, dönüklük ve ötelemelerin sismometreler ile ayırt edilememesi nedeniyle, dönüklüklerin bir kısmı öteleme olarak kaydedilmektedir (Graizer 2006; Pilet ve Virieux 2007). Şekil 2' de gösterildiği üzere sismometrelerde baz değişikliğine neden olan bu durum yüksek sürüklenme (drift) hatalarına neden olmaktadır. Bununla birlikte, inersiyel bir sistemdeki kuvvetli yer hareketi gözlemlerinden yerdeğiştirmelerin elde edilmesinde gecikme (hysteresis), kullanılan nümerik integralin görece olarak düşük duyarlılığı, sensör dönüklük ve eğim (tilt) hatalarına bağlı sürüklenmelerin giderilmesi önemli bir sorun oluşturmaktadır (Boore 2001).

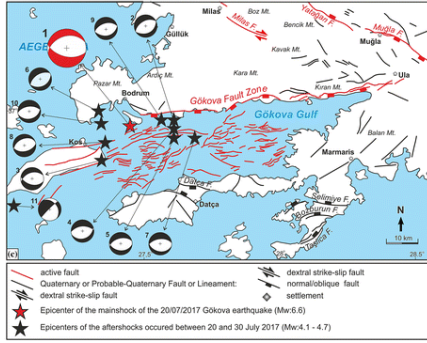


Şekil 2: İvme kayıtlarının düzeltilmesinde, Boore-Iwan (BI) yönteminde farklı düzeltme (zaman aralıkları) seçenekleri kullanılması durumunda elde edilen yerdeğiştirme dalga formları (Bock vd. 2011b)

İvme ve hızölçerler ile yüksek örnekleme aralıklı (100-200 Hz) dalga formları depremlerin izlenmesi ve anlaşılması için önemli bilgiler sağlamaktadır. Bununla birlikte, yüksek duyarlıklı genişbant yerdeğiştirmelerin birçok önemli kullanım alanı bulunmaktadır. Bunlar;

- Deprem büyüklüğünün kısa zamanda yüksek duyarlılıkta belirlenmesi
- Deprem Erken Uyarı Sistemleri (DEİ)'de ilk birkaç saniyedeki maksimum P-dalgası yerdeğiştirmesi ile moment büyüklüğünün kestirilmesi
- Fay geometri ve kayma değerlerinin çözümlenerek moment büyüklüğünün yüksek duyarlılıkla hesaplanması

şeklinde özetlenebilir.



Model	Boylam (°)	Enlem (°)	Düzlem 1			Düzlem 2			Derinlik (km)	M0 (dyn*m)	Mw
			Doğrultu (°)	Eğim (°)	Kayma (°)	Doğrultu (°)	Eğim (°)	Kayma (°)			
GPS	27.368	36.946	105	57	-62	-	-	-	8.8	1.09×10^{26}	6.6
USGS	27.414	36.925	84	53	-103	285	39	-73	11.5	1.13×10^{26}	6.6
KOERI	27.405	36.962	78	40	-112	286	53	-72	6	1.13×10^{26}	6.6
NOA	27.433	36.964	102	48	-79	265	43	-102	6	1.13×10^{26}	6.6
GFZ	27.51	36.96	270	56	-94	98	35	-82	11	9.70×10^{25}	6.6
AFAD	27.443	36.92	286	38	-80	82	53	-98	19.4	-	6.5

Şekil 3: 2011 GNSSGNSS ölçüleriyle deprem büyüklüğünün ve kaynak parametrelerinin belirlenmesi (Tiryakioğlu vd. 2017)

Genişbant hızölçerler ve ivmeölçerler yüksek frekanslarda çok duyarlı olmalarına karşın, 1 Hz civarındaki dinamik tepkiler ele alındığında sismometrelerin gürültü düzeyleri GNSS duyarlılığına yakındır (Genrich ve Bock 2006; Bock vd. 2011a). Bu şekilde, GNSS yüksek frekanslarda duyarlılığı düşen ama alçak frekanslarda sismometrelere göre daha yüksek duyarlılık sağlayan bir ölçme sistemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, GNSS, doğrudan büyüklük ölçümü yapmayan sismometreler ile elde edilmesi mümkün olmayan statik yerdeğiştirmelerin, yer merkezli sabit bir sistemde doğrudan hesaplanabilmesini sağlamaktadır. Güncel çalışmalar, P-dalgasının yerdeğiştirme büyüklüğüne bağlı olarak hesaplanan deprem büyüklük kestirimlerinin oldukça hassas sonuçlar verdiğini göstermektedir (Bock vd. 2011a).

Kısa zaman aralıklarında GNSS ile ~3 mm duyarlılığında yerdeğiştirme elde edilebilmektedir (Genrich ve Bock 2006; Bock vd. 2011a). 1 Hz örnekleme aralığında, birkaç saniyeden birkaç saate kadar görel olarak kısa süre içinde GNSS ile %99 ihtimalle dahi 6 mm'lik yatay duyarlılık edilebileceği Langbein ve Bock (2004) tarafından gösterilmiştir. Yüksek geçirgenli filtre uygulanmış sismometre verilerinden elde edilen yerdeğiştirmelerde ise duyarlılık ~1 mm civarındadır ve GNSS ve sismometrelerin birlikte kullanılması ile çok daha yüksek duyarlılıkta yerdeğiştirmeler elde edilebilmektedir (Bock vd. 2011b).

GNSS verilerinin sismolojide kullanımının ilk örnekleri Hirahara (1994), Ge (1999) ve Ge vd. (2000) tarafından verilmiştir. Söz konusu çalışmalarda, kısa bazlarda GNSS ile kısa zaman aralıklarındaki yer değiştirmelerin ölçülebileceği gösterilmiştir.

1999 yılında meydana gelen Hector Mine (Mw7.1) depreminde, ivme dalga formlarının dekonvolüsyonu için GNSS verileri kullanılmış ve her iki veri grubunun birleştirilmesiyle, GNSS ve ivmeölçerlerin ayrı ayrı kullanımından daha yüksek doğruluklu yerdeğiştirme dalga formları elde edilmiştir (Nikolaidis vd. 2001; Bock vd. 2011a). Ülkemizde de GNSS ve InSAR verilerinin birlikte analiz edilerek, İzmit Depremi (Reilinger vd. 2000) ve Düzce Depremi (Ayhan vd. 2001) deprem kaynağı modellenmesi yapılmıştır. Ülkemizde sadece GNSS ölçülerine dayalı olarak ilk deprem mekanizması modellenmesi Çay Depremi için yapılmıştır (Aktuğ vd. 2010). Benzer şekilde, sabit GNSS istasyonlarına dayalı ilk çözüm de 2014 yılında meydana gelen Gökçeada Depremi için yapılmıştır (Aktuğ vd. 2014). Yine sadece GNSS verileri kullanılarak deprem parametrelerinin hesaplandığı bir başka uygulama da Şekil 3' te verilmiştir.

Yüksek frekanslı (≥ 1 Hz) GNSS verileri ile sismik ölçülerin bağımsız olarak kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır (Ji vd. 2004; Rolandone vd. 2006; Kim ve Dreger 2008). Bununla birlikte, bu çalışmalarda her veri grubu (GNSS, zayıf, kuvvetli yer hareketi vb.) ayrı ayrı analiz edilerek sonuçları karşılaştırılmaktadır. Ayrıca, verilerin bağımsız analiz edildiği bu çalışmalar, depremden çok sonra derlenmekte ve depremden hemen sonra (depremin büyüklüğü ve buna bağlı olarak hasar tahmini) ihtiyaç duyulan bilgileri sağlayamamaktadır. Verilerin bağımsız olarak kullanılmasında yer alan bir diğer eksiklik ise, her iki sistemin (GNSS, sismometre) kuvvetli ve zayıf yanları olduğu gibi kalmakta, her iki sisteminin kuvvetli yanlarının birleştirildiği ve her birinden daha duyarlı genişbant yerdeğiştirmeler elde edilememektedir.

Bağımsız bir kullanımda, GNSS örnekleme aralığı 1 Hz ise, elde edilecek yerdeğiştirmeler 1 saniye aralıklı olacak, duyarlılığı sismometrelere göre daha düşük olduğundan, GNSS ile elden edilen yüksek frekanslarda yüksek duyarlılıklı yerdeğiştirmeler elde edilemeyecektir. Benzer şekilde, bağımsız olarak yapılacak bir analizde, sismometrelerin uzun dalga boylu (alçak frekans) hataları giderilemeyecek ve statik yerdeğiştirmeler sismometrelerden hesaplanamayacaktır. Buna karşın, optimal bir kombinasyon ile, uzun dalga boylu hatalardan arındırılmış, yüksek örnekleme aralıklı (100-200 Hz), genişbant (DC'den yüksek frekanslara kadar) yerdeğiştirme dalga formları elde edilmesi olanaklıdır. Elde edilecek, yüksek frekanslı, yüksek duyarlılıklı genişbant dalga formları ile depremlerin moment tensor çözümlerinin ve fay düzlemi üzerindeki kayma dağılımını dahi iyi elde edilebilmesi mümkün olacaktır. Bununla birlikte, GNSS, büyüklüğü küçük ve uzak depremlerde, tek başına deprem büyüklüğü ve yırtilma analizinde kullanılamamaktadır.

Sismometrelerin yüksek örnekleme aralığı (100-200 Hz) ve yüksek frekanslardaki duyarlılığı ile GNSS ile elde edilen yerdeğiştirmelerin optimal olarak birleştirilmesi ve bu şekilde yüksek örnekleme aralıklı (kullanılan sismometre örnekleme aralığında), yüksek duyarlılıklı (sismometrelerin uzun dalga boylu etkilerinin arındırıldığı) yerdeğiştirme dalga formlarının elde edilmesi çok güncel bir araştırma konusudur (Geng vd. 2013; Melgar vd. 2013; Crowell vd. 2013).

3. Deprem Erken Uyarı Sistemleri ve Dünyadaki Uygulamalar

Deprem başladıktan kısa süre içerisinde meydana gelecek depremin nihai büyüklüğünün belirlenmesi, hem Deprem Erken İkaz Sistemleri (DEİ) hem de deprem bittikten sonraki dönemde kayıpların kestirilmesi ve yardım faaliyetlerinin koordinasyonu için büyük önem taşımaktadır.

Nihai deprem büyüklüğünün, deprem dalgalarının ilk safhalarındaki veriler yardımıyla belirlenebileceği bir model “deterministik” (Olson ve Allen 2005) olarak tanımlanmakta ve bu modelde P-dalgasının farklı özelliklerinden yararlanılmaktadır: maksimum baskın periyot (τ_p^{max}) (Nakamura 1988), baskın periyot (τ_p) (Wu ve Kanamori 2005), yerdeğiştirme büyüklüğü (d_p) (Wu ve Zhao 2006), maksimum yerdeğiştirme büyüklüğü (d_p^{max}) (Crowell vd. 2013).

11 Mart 2011 Mw 9.0 Tohoku depremi için üretilen erken uyarı hem deprem büyüklüğünü hem de etki alanını olması gerekenden çok daha az kestirebilmiştir (Tablo 1). Buna rağmen, Deprem Erken Uyarı Sistemlerinin tek başarılı örneğinin bu deprem sırasında meydana geldiği söylenebilir. Bu deprem için üretilen erken uyarı sayesinde:

- Doğu Japonya Demiryolları Şirketi tarafından işletilen 11 adet Shinkansen hızlı treni deprem dalgaları ulaşmadan saniyeler önce durdurulmuştur.
- Otis firması tarafından bölgede işletilen 16.700 asansör otomatik olarak durdurulmuştur.
- Tokyo şehride 42-243 m yüksekliğe sahip kamu binalarının 40’ında asansöre en yakın katta durdurulmuştur.

Tablo 1: 11 Mart 2011 Mw 9.0 Tohoku depreminden sonra yapılan otomatik kestirimler (Yamasaki 2012)

Güncelleme Sayısı	Not	Zaman	P Dalgasının İlk Varışından Sonra Geçen Zaman	Kestirilen Büyüklük	Kestirilen En Büyük Sismik Şiddet	Enlem	Boylam
(#)		(hh:mm:ss.s)	(s)	(M)	(shindo)	(°)	(°)
-	İlk sismik tespit	14:46:40.2	-	-	-	-	-
1	İleriye yönelik ilk kestirim	14:46:45.6	5.4	4.3	1	38.2	142.7
2		14:46:46.7	6.5	5.9	3	38.2	142.7
3		14:46:47.7	7.5	6.8	4	38.2	142.7
4	Kamuoyu ile paylaşılan ilk uyarı	14:46:48.8	8.6	7.2	5-alt	38.2	142.7
5		14:46:49.8	9.6	6.3	4	38.2	142.7
6		14:46:50.9	10.7	6.6	4	38.2	142.7
7		14:46:51.2	11.0	6.6	4	38.2	142.7
8		14:46:56.1	15.9	7.2	4	38.1	142.9
9		14:47:02.4	22.2	7.6	5-alt	38.1	142.9
10		14:47:10.2	30.0	7.7	5-alt	38.1	142.9
11		14:47:25.2	45.0	7.7	5-alt	38.1	142.9
12		14:47:45.3	65.1	7.9	5-üst	38.1	142.9
13		14:48:05.2	85.0	8.0	5-üst	38.1	142.9
14		14:48:25.2	105.0	8.1	6-alt	38.1	142.9
15	Son uyarı	14:48:37.0	116.8	8.1	6-alt	38.1	142.9

Bunun yanında dünya geneline bakıldığında hem sismoloji hem de GNSS tabanlı birçok deprem erken uyarı sistemi olduğu görülmektedir. GNSS tabanlı erken uyarı sistemlerinin yeni yeni yaygınlaşmaya başladığını söylemek de mümkündür.

Sismolojik Deprem Erken İkaz Sistemleri (DEİ)’ne aşağıdaki örnekler verilebilir:

- ElarmS (Kuyuk vd. 2014)
- Virtual Seismologist (Cua ve Heaton 2007)
- OnSite (Böse vd. 2009)
- EEWS (JMA 2007)

GNSS-Tabanlı Erken İkaz Sistemleri ise çok hızlı bir şekilde yaygınlaşmaktadır:

- G-larmS (Grapenthin vd. 2014)
- GPSlip (Böse vd. 2013)
- BEFORES (Minson vd. 2014)
- G-FAST (Crowell vd. 2016)
- REGARD (Kawamoto vd. 2016)

4. GNSS Tabanlı Deprem Erken Uyarı Sistemleri

Sismojeodezik yerdeğiştirmeler iki şekilde Deprem Erken İkaz (DEİ) amaçlı kullanılabilirler. Birincisi, Deprem erken uyarı sinyali olarak kullanılacak P- dalgalarının ilk üç saniyesi ile elde edilen d_p değerleri, ikincisi deprem sona erdikten sonra deprem büyüklüğünün doğru şekilde hesaplanabilmesi için d_p^{max} değerleri. Sismojeodezik yerdeğiştirmeler ile deprem büyüklüğü arasındaki ilişki için azalım ilişkisi;

$$\log_{10}(d_p) = a_{d_p} + b_{d_p}M + c_{d_p}\log_{10}(R) \quad (1)$$

şeklinde olacaktır. Benzer şekilde maksimum yerdeğiştirme ile büyüklük arasındaki ilişki için de

$$\log_{10}(d_p^{max}) = a_{d_p^{max}} + b_{d_p^{max}}M + c_{d_p^{max}}\log_{10}(R) \quad (2)$$

şeklinde tanımlama yapılabilir.

Azalım ilişkisinde kullanılan deprem büyüklüğü M, Wu ve Zhao (2006) tarafından önerildiği şekilde $M_L < 6$ depremler için M_L olarak, daha büyük depremler için M_w olarak seçilebilir.

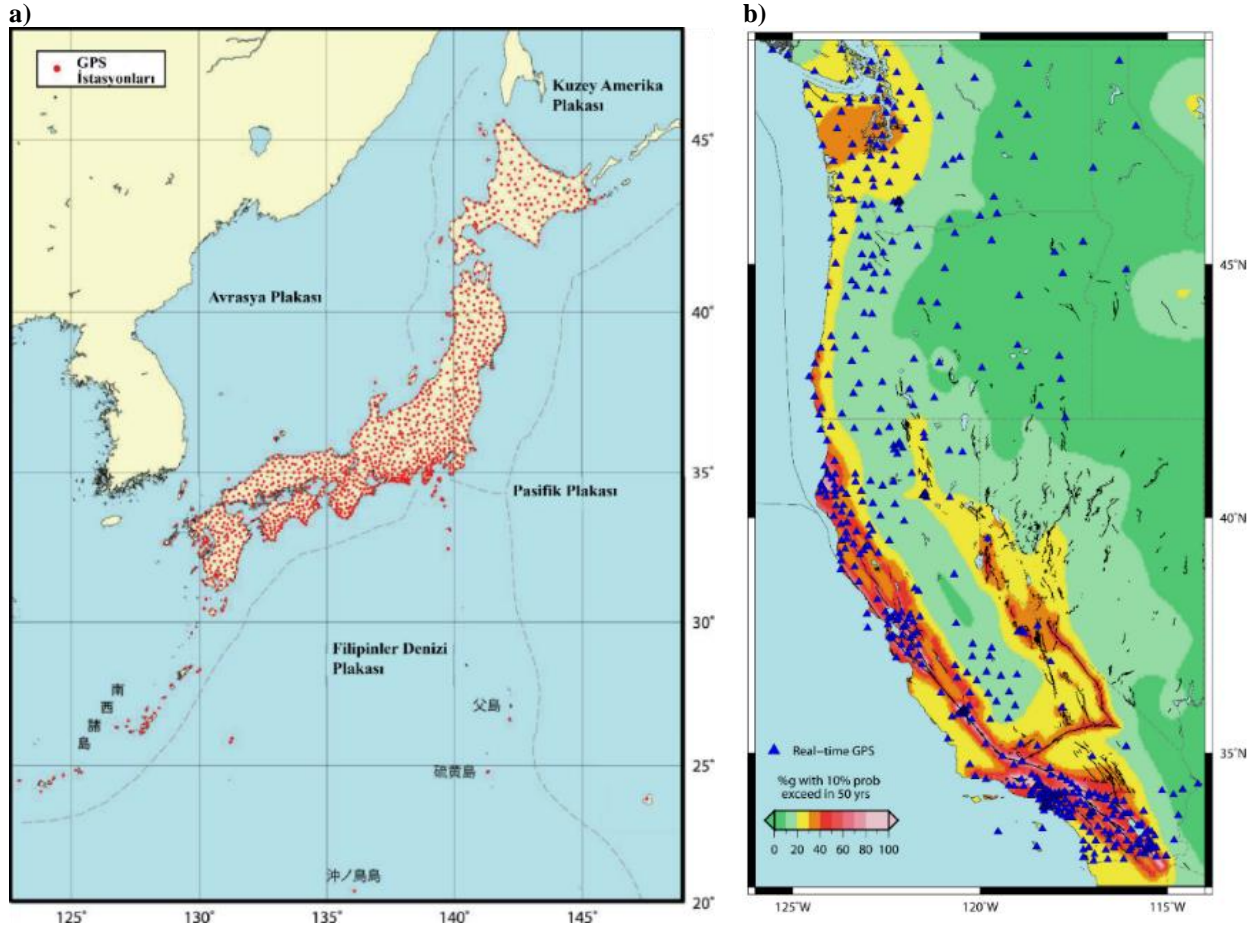
$$\log(P_d) = -0.893 + 0.562 M_w - 1.731 \log(R) \quad (3)$$

$$\log(PGD) = -5.013 + 1.219 M_w - 0.178 \log(R) \quad (4)$$

GNSS tabanlı yerdeğiştirmeler ile, günümüzde hem deprem sonrası ayrıntılı odak mekanizmasının çözümü hem de erken uyarı için de kullanılacak şekilde hızlı çözüm yapılabilmektedir. Jeodezik ölçüler ile depreme yönelik uygulamaların yanısıra bir de jeodezik ve jeofizik yöntemlerin birlikte kullanıldığı çalışmalar vardır ve iki farklı disiplinin güçlü yönlerinin birleştirilmesi mantığına dayanmaktadır. Sadece sismik ölçüler ile yapılan deprem büyüklüğü hesabında tam doğruluğun yakalanabilmesi için depremi alan tüm istasyonların hesaba dahil edilmesi ve faz okumalarının gözden geçirilmesi gerekmektedir. Bunun yanında sismojeodezik analizde ise hesaplanan yerin kalıcı yerdeğiştirmesidir. Ayrıca deprem büyüklüğünün hızlı ve yüksek doğrulukta hesaplanabildiğini gösteren çalışmalar mevcuttur.

Japonya' da Coğrafi Haritacılık Enstitüsü (GSI) depremlerin gözlenmesi amacıyla, Japon Meteoroloji Ajansının ülke sathına yayılmış sismometrelerinin yanında, 1300 den fazla GNSS istasyonu işletmektedir. GEONET olarak adlandırılan bu istasyon ağı dünyadaki en büyük sabit GNSS istasyon ağı durumundadır (Şekil 4.a).

Gerçek zamanlı bu ağ GNSS, Glonass, QZSS, Gellileo uygulamaları görmektedir. Bu ağ vasıtasıyla kabuk deformasyonları, gerilim transferi, gerçek zamanlı konumlama, deprem gözlemi ve tsunami erken uyarı işlemleri yapılmaktadır. 11 Mart 2011 Mw 9.0 Tohoku-Oki depremi (05:46:23 UTC) en çok GNSS kaydının alındığı depremdir. Bu depremden sonra multi-GNSS GEONET ağı, GSI VE Tohoku Üniversitesi işbirliğinde, büyük depremlerde ($M > 7$) gerçek zamanlı olarak deformasyon analizine olanak sağlaması bakımından geliştirilmiş ve ortaya Tsunami erken uyarısı için gerçek zamanlı kabuk gözlem ağı ortaya çıkmıştır (REGARD) ve gerçek zamanlı moment magnitud hesaplanabilir hale gelmiştir (Kawamoto vd. 2016). Amerika Birleşik Devletlerinde ise afetler için geliştirilen gerçek zamanlı deprem analiz ve zarar azaltma ağı (READI) vasıtasıyla, meydana gelen depremler otomatik olarak saptanmakta ve depremin büyüklüğü, derinliği, zamanı gibi parametreleri hesaplanmaktadır. Büyük depremlerde, yer hareketinin ölçüldüğü klasik sismolojik yöntemlerde, depremin özelliklerinin hızlı ve doğru belirlenmesinde, depremin büyüklüğü ile ters korelasyon bulunması sebebiyle başlatılan bu çalışmada, yüksek duyarlıkları yerdeğiştirmelerin ölçülmesiyle büyük depremlerde daha hızlı parametre belirlenmesi hedeflenmektedir.



Şekil 4: a) Japonya'da deprem gözleminde kullanılan sabit GNSS istasyonları (Tsuji 2016), b) A.B.D.'de gerçek zamanlı deprem analiz ve zarar azaltma amacıyla kullanılan sabit GNSS istasyonları

5. Uygulama

Dördüncü bölümde açıklandığı üzere, GNSS verilerinden elde edilen yerdeğiştirme dalgaformları kullanılarak deprem büyüklüğü yüksek duyarlıklı olarak hesaplanabilmektedir. Bu bölümde, bazı büyük depremler için mevcut olan GNSS yerdeğiştirme dalga formları kullanılarak deprem büyüklüğü hesaplanmıştır. Özellikle, birden fazla istasyondan veri alınması halinde deprem büyüklüğünün yüksek duyarlıklı hesaplanabildiği görülmektedir. Kullanılan istasyonlar ve ilgili depremlere ait bilgiler Tablo 2'de verilmektedir.

Tablo 2: Kullanılan Depremler ve İstasyonlar

Deprem					İstasyon			
Adı	Enlem	Boylam	Derinlik	Büyükklük	Adı	Enlem	Boylam	Yükseklik
GOKOVA	36.9283	27.4493	19.44	6.6	AYDI	37.8455	27.7996	101.9350
GOKOVA	36.9283	27.4493	19.44	6.6	DATC	36.7122	27.6860	61.8660
GOKOVA	36.9283	27.4493	19.44	6.6	DIDI	37.3767	27.2398	78.9319
GOKCEADA	40.2108	25.3073	25.02	6.9	CANA	40.1112	26.4143	141.5004
VAN	38.6890	43.4657	19.02	7.2	AGRD	39.7197	43.0164	68.8098
VAN	38.6890	43.4657	19.02	7.2	MALZ	39.1439	42.5307	1543.685
VAN	38.6890	43.4657	19.02	7.2	MURA	38.9901	43.7630	1734.650
VAN	38.6890	43.4657	19.02	7.2	SIRT	37.9120	41.9310	917.0052

GNSS yerdeğiştirme dalga formu kullanılarak deprem büyüklüğünün elde edilmesinde, Gökova depremi için AYDI, DATC, DIDI istasyonlarındaki, Gökçeada depremi için CANA istasyonunda ve Van depremi için AGRD, MALZ, MURA, SIRT istasyonlarındaki yerdeğiştirme dalgaformlarının ilk 3 saniye, ilk 5 saniye ve tüm dalga form boyunca maksimum yerdeğiştirmeler (PGD) hesaplanmıştır. Daha sonra (1) ve (2) eşitlikleri kullanılarak, mevcut veriler ile a_{dp} , b_{dp} , c_{dp} katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler Hesaplanan katsayılar Tablo 3’de verilmektedir. Daha sonra yine (1) eşitliği ve her bir istasyondaki yerdeğiştirme değerleri kullanılarak deprem büyüklükleri kestirilmiştir. Elde edilen deprem büyüklükleri Tablo 4’de gösterilmektedir.

Özellikle büyük depremlerde, belirli bir depremin birden fazla GNSS istasyonunda yerdeğiştirmeye neden olacağı değerlendirildiğinde, deprem büyüklüğünün birden fazla istasyondaki veriler kullanılarak daha duyarlı olarak hesaplanması mümkündür.

Tablo 3: Hesaplanan a_{dp} , b_{dp} , c_{dp} katsayıları

Regresyon Katsayıları	Global Regresyon Katsayıları	Dp (3 saniye) Hesaplanan Regresyon Katsayıları	Dp (5 saniye) Hesaplanan Regresyon Katsayıları	Dp (Tüm dalga formu) Hesaplanan Regresyon Katsayıları
a_{dp}	-4.434	-3.5874	-2.7097	-2.7969
b_{dp}	1.047	0.6716	0.6339	0.6548
c_{dp}	-0.138	-0.2117	-0.4268	-0.3938

Gökova ve Van Depremlerinin büyüklüğü birden fazla istasyondaki büyüklük kestirimlerinin ortalaması ile yeniden hesaplanmıştır. Tablo 4’ten de görüleceği üzere, birden fazla istasyondaki veriler ile deprem büyüklüğünün kestirimi çok daha duyarlı olarak yapılabilmektedir. Gökçeada depreminde sadece tek bir GNSS istasyonu kullanıldığından deprem büyüklüğü kestiriminin duyarlılığı diğerlerinden daha düşüktür.

Tablo 4: Tüm istasyon verileri kullanılarak hesaplanan deprem büyüklükleri

Deprem Adı	Dp (3 seconds) İçin Tekrar Hesaplanan Büyüklük	Dp (5 seconds) İçin Tekrar Hesaplanan Büyüklük	Dp (whole waveform) İçin Tekrar Hesaplanan Mw	Tüm istasyonlarla Tekrar Hesaplanan (Mw)	Mw	Kullanılan GNSS İstasyonları
GOKOVA	6.5373	6.5433	6.5625	6.5477	6.6	AYDI DATC DIDI
GOKCEADA	7.2761	7.2397	7.1247	7.2135	6.9	CANA AGRD
VAN	7.2356	7.2071	7.2448	7.2291	7.2	MALZ MURA SIRT

Sonuç olarak, Gökova, Gökçeada ve Van depremlerinin GNSS yerdeğiştirme dalga formları ile tekrar hesaplanması sonucunda sırası ile 6.6, 6.9, 7.2 Mw olan deprem büyüklüğü 6.54, 7.21 ve 7.22 Mw olarak hesaplanmıştır. Yerdeğiştirme verilerinden deprem büyüklüğünün kestirimi burada sınırlı sayıda veri ile yapılmasına rağmen oldukça iyi sonuçlar alınmıştır. Bu konuda eklenmesi gereken diğer bir ayrıntı ise deprem büyüklüğü arttıkça kestirim duyarlılığının da iyileştiğidir.

6. Sonuç ve Öneriler

Kamu kaynaklarıyla oluşturulmuş sabit GNSS istasyonlarından, aktif tektonizmaya sahip ülkemizde depreme yönelik çalışmalarda yeterince faydalanılmadığı değerlendirilmektedir. Bu istasyonların aynı zamanda birer deprem gözlem istasyonu olarak kullanılabilir hale getirilmesi gerekmektedir.

GNSS ve sismik verilerin birlikte kullanımı ile daha kısa sürelerde yüksek doğrulukta deprem büyüklüğü hesabı yapmak, deprem sonrası yürütülecek müdahale çalışmalarının etkinliğini arttıracaktır.

Hız ve ivme dalga formlarındaki uzun dalga boylu hatalar (drift vb.) yüksek duyarlılıklı yerdeğiştirmelerin elde edilmesine izin vermemektedir.

Diğer yandan, GNSS ile tek başına yüksek duyarlıklı sonsuz dalga boyu (DC)'na kadar yerdeğiştirme dalga formları belirlenebilmekle birlikte, örnekleme aralığı sismometrelere göre oldukça düşüktür (≤ 50 Hz) ve küçük genlikli yerdeğiştirmelere sismometreler kadar duyarlı değildir.

Kısa zaman aralıklı (10-30 saniye) GNSS çözümleri, ivmeölçer verileri ile karşılaştırıldığında duyarlıklarının hesaplanan hatalarından çok daha iyi olduğu görülmektedir.

Bu özelliği dikkate alınarak deprem analiz amaçlı GNSS istasyonlarının ve buna dayalı Erken İkaz Sistemlerinin sayısı artmaktadır.

GNSS teknolojisi son on yılda hiç olmadığı kadar gelişmiştir. Bununla birlikte, GNSS verilerinin işlenmesindeki yöntemler de o derece karmaşıklaşmaktadır. Tohoku Depremi ile birlikte, GNSS tabanlı deprem erken uyarı sistemleri yaygınlaşmaya başlamıştır. Tohoku Depreminde çalışan erken uyarı sistemi depremin büyüklüğünü ve etki alanını olması gerekenden daha az olarak tespit etmiştir. Bunun nedeni olarak noktasal kaynak kabulü olduğu yönünde görüşler mevcuttur.

GNSS tabanlı erken uyarı sistemlerine yönelmesinin nedenlerinden biri de, GNSS tabanlı erken uyarı sistemlerinde noktasal kaynak yerine düzlem kaynak fay geometrisinin kestirilebilir olmasıdır. Bununla birlikte, noktasal kaynak kabulünün deprem büyüklüğü ve kaynak geometrisiyle ilişkili olduğu unutulmamalıdır.

Ülkemizde, jeodezi ve haritacılık amaçlı sürekli GNSS istasyonları her gün artmakla birlikte, söz konusu istasyonların deprem amaçlı kullanımı oldukça sınırlıdır. Elde edilen sonuçlar, çok sınırlı sayıdaki GNSS istasyonu ile dahi deprem büyüklüğünün yüksek duyarlıkla kestirilebildiğini göstermektedir. Özellikle, sismometrelerin yetersiz kaldığı büyük depremlerde kaynağa yakın veri elde ederek deprem büyüklüğünün elde edilmesi için halihazırdaki jeodezik altyapının erken uyarı amaçlı kullanımında önemli bir potansiyelin mevcut olduğu değerlendirilmektedir.

Teşekkür

Bu çalışmadaki sonuçlar, TÜBİTAK tarafından 116Y199 numarası ile desteklenen “Jeodezik Ölçüler ile Yüksek Duyarlıklı Genişbant Sismik Yerdeğiştirmelerin Elde Edilmesi” başlıklı proje kapsamında elde edilmiştir.

Kaynaklar

- Aktuğ, B., Kaypak, B., & Çelik, R. N. (2010). *Source parameters of 03 February 2002 Çay earthquake Mw 6.6 and aftershocks from GPS data, southwestern Turkey*, Journal of Seismology, (14), 445-456.
- Aktuğ B., Ozener H., Turgut B., Doğru A., Georgiev I., (2014), *Preliminary results of 24 may 2014 Gökçeada earthquake, Ms6.5 as captured by continuous GNSS stations*, WEGENER 2014: Measuring and Modelling our Dynamic Planet, 1-4 Eylül, University of Leeds, UK.
- Ayhan M.E., Bürgmann R., McClusky S., Lenk O., Aktuğ B., Herece E., Reilinger R.E., (2001), *Kinematics of the Mw 7.2, 12 November 1999, Düzce, Turkey earthquake*, Geophysical Research Letter, 28(2), 367-370.
- Bock Y., Crowell B., Melgar D., (2011a), *Real time GNSS/seismic and eew results from el mayor cucupah and Tokoku-Oki earthquakes*, Earthquake Early Warning Summit: Delivering Earthquake Warnings to the U.S. West Coast, Berkeley.
- Bock Y., Melgar D., Crowell B.W., (2011b), *Real-time strong motion broadband displacements from collocated GNSS and accelerometers*, Bulletin of the Seismological Society of America, 101(6), 2904-2925.
- Boore D.M., (2001), *Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi Chi, Taiwan earthquake*, Bulletin of the Seismological Society of America, 91(5), 1199-1211.
- Boore D.M., Stephans C., Joyner B., (2002), *Comments on baseline correction of digital strong-motion data: examples from the 1999 Hector Mine, California earthquake*, Bulletin of the Seismological Society of America, 92(4), 1543-1560.
- Boore D.M., Bommer J., (2005), *Processing of strong motion accelograms: Needs, options and consequences*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, (25), 93-115.
- Böse M., Hauksson E., Solanki K., Kanamori H., Heaton T.H., (2009), *Real-time testing of the on-site warning algorithm in southern California and its performance during the July 29 2008 Mw5. 4 Chino Hills earthquake*, Geophysical Research Letters, 36(5), L00B03, doi:10.1029/2008GL036366.
- Böse M., Heaton T.H., Hudnut K.W., (2013), *Combining real-time seismic and GPS data for earthquake early warning*, American Geophysical Union, Fall Meeting 2013, abstract id. G51B-05.
- Brown H.M., Allen R.M., Hellweg M., Khainovski O., Neuhauser D., Souf A., (2011), *Development of the elarmsmethodology for earthquake early warning: realtime application in california and offline testing in Japan*, Soil Dynamics Earthquake Engineering, 31(2), 188-200.
- Crowell B.W., Melgar D., Bock D., (2013), *Earthquake magnitude scaling using seismogeodetic data*, Geophysical Research Letter, 40(23), 6089-6094.
- Crowell B.W., Schmidt D.A., Bodin P., Vidale J.E., Gomberg J., Renate Hartog J., Kress, V.C., Melbourne, T.I., Santillan, M., Minson, S.E., Jamison D.G., (2016), *Demonstration of the cascadia G-FAST geodetic earthquake early warning system for the Nisqually, Washington, earthquake*, Seismological Research Letters, 87(4), 930-943.
- Cua G., Heaton T., (2007), *The Virtual Seismologist (VS) method: A Bayesian approach to earthquake early warning*, Earthquake early warning systems, (Gasparini P., Manfredi G., Zschau J., Ed.), Springer, Berlin, Heidelberg, ss. 97-132.
- Ge L., (1999), *GPS seismometer and its signal extraction*, Proceedings of the 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS 1999), Nashville, TN, September 14 - 17, ss. 41-52.

- Ge L., Han S., Rizos C., Ishikawa Y., Hoshiba M., Yoshida Y., Izawa M., Hashimoto N., Himori S., (2000), *GPS seismometers with up to 20 Hz sampling rate*, Earth Planets Space, 52(10), 881-884.
- Geng J., Bock Y., Melgar D., Crowell B.W., Haase J., (2013), *A new seismogeodetic approach to GNSS and accelerometer observations of the 2012 Brawley seismic swarm: implications for earthquake early warning*, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 14(7), 2124-2142.
- Genrich J.F., Bock Y., (2006), *Instantaneous geodetic positioning with 10-50 hz GNSS measurements: Noise characteristics and implications for monitoring networks*, Journal of Geophysical Research, Vol. 111, B03403, doi:10.1029/2005JB003617.
- Graizer V.M., (1979), *Determination of the true ground displacement by using strong motion records*, Izvestiya Phys. Solid Earth, Earth Physics, 15(12), 875-885.
- Graizer V.M., (2006), *Tilts in strong ground motion*, Bulletin of the Seismological Society of America, 96(6), 2090-2102.
- Grapenthin R., Johanson I.A., Allen R.M., (2014), *Operational real-time GNSS-enhanced earthquake early warning*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(10), 7944-7965.
- Hirahara K., Nakano T., Hosono Y., Matsuo S., Obana K., (1994), *An experiment for GPS strain seismometer*, Japanese Symposium on GPS, December 15-16, Tokyo, Japan, ss. 67-75.
- Hoshiba M., Iwakiri K., (2011), *Initial 30 seconds of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake(Mw9.0)-amplitude and Tc for magnitude estimation for earthquake early warning*, Earth, Planets and Space, 63, 553-557.
- Iwan W.D., Mooser M.A., Peng C.Y., (1985), *Some observations on strong motion earthquake measurements using a digital accelerometer*, Bulletin of the Seismological Society of America, 75(5), 1225-1246.
- Ji C., Larson K.M., Tan Y., Hudnut K.W., Choi K., (2004), *Slip history of the 2003 San Simeon earthquake constrained by combining 1-Hz GNSS strong motion and teleseismic data*, Geophysical research letters, 31(17), L17608, doi:10.1029/2004GL020448.
- JMA, (2007), *Earthquake early warning system*, Japan Meteorological Agency, <https://www.jma.go.jp/jma/en/Activities/eew.html>, [Erişim 01 Haziran 2020].
- Kawamoto S., Hiyama Y., Ohta Y., Nishimura T., (2016), *First result from the GEONET real-time analysis system (REGARD): the case of the 2016 Kumamoto earthquakes*, Earth, Planets and Space, 68(1), 190, doi:10.1186/s40623-016-0564-4.
- Kim A., Dreger D., (2008), *Rapture process of the 2004 Parkfield earthquake from near fault seismic waveform and geodetic records*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 113, B07308, doi:10.1029/2007JB005115.
- Langbein J., Bock Y., (2004), *High-rate real-time GPS network at Parkfield: Utility for detecting fault slip and seismic displacements*, Geophysical Research Letters, 31(15), L15S20, doi:10.1029/2003GL019408.
- Melgar D., Bock Y., Sanchez D., Crowell B.W., (2013), *On robust and reliable automated baseline corrections for strong motion seismology*, Journal of Geophysics Research:Solid Earth, 118(3), 1177-1187.
- Minson S.E., Murray J.R., Langbein J.O., Gombert J.S., (2014), *Real-time inversions for finite fault slip models and rupture geometry based on high-rate GNSS data*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119(4), 3201-3231.
- Miyazaki S., Larson K., Choi K., Hikima K., Koketsu K., Bodin P., Bodin, P., Haase J., Gordon, E., Fukuda, J., Kato, T., Yamagiwa A., (2004), *Modelling the rapture process of the 2003 September 25 Tokachi-Oki earthquake using 1-Hz GNSS data*, Geophys. Res. Lett., 31(21), L21603, doi:10.1029/2004GL021457.
- Nakamura Y., (1988), *On the urgent earthquake detection and alarm system (UrEDAS)*, 9th World Conference on Earthquake Engineering, August 2-9, Tokyo-Kyoto, Japan, ss.673-678.
- Nikolaidis R., Bock Y., Jonge P.J., Shearer P., Agnew D.C., Doomselaar M., (2001), *Seismic wave observations with the global positioning system*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 106(B10), 21897-21916.
- Olson E.L., Allen R.M., (2005), *The deterministic nature of earthquake rupture*, Nature, 438(7065), 212-215.
- Park J., Song T.R., Tromp J., Okal E., Rault G., Clevede E., Laske G., Kanamori H., Davis P., Berger J., Braitenberg C., Camp M.V., Lei X., Sun H., Xu H., Rosat S., (2005), *Earthquakes free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake*, Science, 308(5725), 1139-1144.
- Pillet R., Virieux J., (2007), *The effects of seismic rotations on inertial sensors*, Geophysical Journal International, 171(3), 1314-1323.
- Reilinger R.E., Ergintav S., Bürgmann R., McClusky S., Lenk O., Barka A., Gurkan O., Hearn L., Feigl K.L., Cakmak R., Aktuğ B., Ozener H., Töksöz M.N., (2000), *Coseismic and coseismic fault slip for the 17 August 1999 $m=7.5$, Izmit, Turkey earthquake*, Science, 289(5484), 1519-1524.
- Rolandone F., Dreger D., Murray M., Bürgmann R., (2006), *Coseismic slip distribution of the 2003 Mw 6.6 San Simeon earthquake, California, determined from GNSS measurements and seismic waveform data*, Geophysical research letters, 33(16), L16315, doi:10.1029/2006GL027079.
- Kuyuk H.S., Allen R.M., Brown H., Hellweg M., Henson I., Neuhauser D., (2014), *Designing a network-based earthquake early warning algorithm for California: ElarmS-2*, Bulletin of the Seismological Society of America, 104(1), 162-173.
- Tiryakioğlu İ., Aktuğ B., Yiğit C.Ö., Yavaşoğlu H.H., Sözbilir H., Özkaymak Ç., Poyraz F., Taneli E., Bulut F., Dogru A., Özener H., (2018), *Slip distribution and source parameters of the 20 July 2017 Bodrum-Kos earthquake (Mw6. 6) from GPS observations*, Geodinamica Acta, 30(1), 1-14, doi: 10.1080/09853111.2017.1408264.
- Tsuji H., Matsuo K., Furuya T., Yamao H., Kamakari Y., (2016), *Development of a precise positioning technique using multi-GNSS*, FIG Working Week 2016 – Recovery from Disaster, May 2–6, Christchurch, New Zealand.
- Wu Y., Kanamori H., (2005), *Experiment on onsite early warning method for the taiwan early warning system*, Bulletin of the Seismological Society of America, 95(1), 347-353.
- Wu Y.M., Zhao L., (2006), *Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning*, Geophysical Research Letters, 33(16), L16312, doi:10.1029/2006GL026871.
- Yamasaki E., (2012), *What we can learn from japan's early earthquake warning system*, <https://www.semanticscholar.org/paper/What-We-Can-Learn-From-Japan's-Early-Earthquake-Yamasaki/e9b32bcd1a287a258432dcb7a338230851c7de5>, [Erişim 01 Haziran 2020].