



## Precision of Global Navigation Satellite Systems Based Earthquake Observations

Murat Doruk Senturk<sup>1</sup> and Bahadır Aktug<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Disaster and Emergency Management (AFAD) Authority, Presidential of Earthquake Department, Çankaya 06800 Ankara

<sup>2</sup> Ankara University, Geophysical Engineering Department, Golbasi 06830 Ankara

ORCID: 0000-0001-5035-0728, 0000-0002-7995-4477

### Keywords:

GNSS, acceleration, displacement, coherence, RMS

### Highlights:

- \* Different earthquake data are used on the shaking table
- \* Accelerometer and GNSS observations have been performed
- \* Differences between observations and real input were investigated using signal coherence analysis

### Acknowledgements:

The results of this study were obtained from the project titled 'Determination of High Precision Broadband Displacements from Geodetic Measurements' which is supported by TUBITAK.

### Aim:

Testing the precision of broadband displacements, combined from the strongest aspects of Global Positioning System (GPS) and seismometer data.

### Methods:

Kalman filter and coherence have been used for computing broadband displacements and determining the dominant frequencies, respectively.

### Results:

Determination of earthquake magnitude in high sensitivity in a short time. Estimation of moment magnitude from maximum P-wave displacement in the few seconds and high precision calculation of moment magnitude by solving fault geometry and slip values.

### Supporting Institutions:

AFAD, Ankara University, TUBITAK-116Y199

### Manuscript

Research Article

Received: 16.05.2019

Revised: 30.05.2019

Accepted: 06.06.2019

Printed: 30.06.2019

### DOI

Doi.

### Corresponding Author

Bahadır Aktug

Email: aktug@ankara.edu.tr

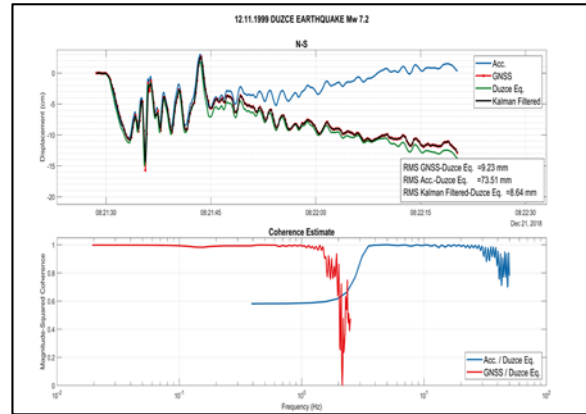


Figure  
RMS error between broad-band displacements and Duzce Earthquake (input), and coherence estimate between GNSS-input and Acc-input

### How to cite

Senturk M.D., Aktug B., 2019. Precision of Global Navigation Satellite Systems Based Earthquake Observations, Turk. J. Earthq. Res. 1 (1), 48-62



## Küresel Konumlama Uydu Sistemleri Tabanlı Deprem Gözlemlerinin Duyarlılığı

Murat Doruk Şentürk<sup>1</sup> ve Bahadır Aktug<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Afet ve Acil Durum Yönetimi (AFAD) Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, Çankaya 06800 Ankara

<sup>2</sup> Ankara Üniversitesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı 06830 Ankara

ORCID: 0000-0001-5035-0728, 0000-0002-7995-4477

### ÖZET

Bu çalışmada, sarsma tablası üzerinde farklı depremler için ivmeölçer ve Küresel Konumlama Uydu Sistemleri (KKUS) gözlemleri yapılmış ve gözlemler ile gerçek girdi arasındaki farklar zaman ve frekans ortamında incelenmiştir. Ölçülen KKUS yer değiştirme dalga formları ve ivme kayıtlarından elde edilen dalga formları gerçek girdi ile karşılaştırıldığında KKUS'un Karekök Ortalama (RMS) hata değerleri 4-9 mm arasında değişirken, ivme kayıtlarından elde edilen yer değiştirme dalga formlarının RMS değerleri 1-110 mm arasında değişmektedir. KKUS yer değiştirme dalga formlarının ortalama RMS değerleri ~6 mm civarındadır. Yapılan sinyal tutarlılık analizlerinde, ivme kayıtları ile gerçek girdi sinyali arasındaki tutarlığın 2-3 Hz'den daha yüksek frekanslarda gözlemlendiği, düşük frekanslarda tutarlığın düşük olduğu buna karşın KKUS ile gerçek girdi sinyali arasındaki tutarlığın 1 Hz'e kadar olan düşük frekanslarda düz olduğu gözlemlenmektedir.

### Anahtar kelimeler

KKUS, İvmeölçer, Yer değiştirme, RMS hata, Sinyal tutarlılık analizi

### Öne Çıkanlar

- \* Sarsma tablası üzerinde farklı deprem verileri kullanılmıştır
- \* İvmeölçer ve KKUS gözlemleri yapılmıştır
- \* Gözlemler ve gerçek girdi arasındaki farklar sinyal tutarlılık analizi kullanılarak araştırılmıştır

### Makale

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.05.2019

Düzeltilme: 30.05.2019

Kabul: 06.06.2019

Basım: 30.06.2019

### DOI

doi.

### Sorumlu yazar

Bahadır Aktug

Eposta:

aktug@ankara.edu.tr

## Precision of Global Navigation Satellite Systems Based Earthquake Observations

Murat Doruk Senturk<sup>1</sup> and Bahadır Aktug<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Disaster and Emergency Management (AFAD) Authority, Presidential of Earthquake Department, Çankaya 06800 Ankara

<sup>2</sup> Ankara University, Geophysical Engineering Department, Gölbaşı 06830 Ankara

ORCID: 0000-0001-5035-0728, 0000-0002-7995-4477

### ABSTRACT

In this study, accelerometer and GNSS observations were carried out for different earthquakes on the shake table and the differences between the observations and the actual input were examined in both time and frequency domains. When the waveforms obtained from the measured GNSS and acceleration displacement waveforms are compared with the actual input, the Root Mean Square (RMS) error values of GNSS vary between 4 and 9 mm while the RMS values of the displacement waveforms obtained from the acceleration records vary between 1 and 110 mm. Besides, the average RMS values of the GNSS displacement waveforms are around ~6 mm. In the signal coherence analysis, the coherence between the acceleration measurements and the actual input signal is observed only at frequencies higher than 2-3 Hz verifying that the coherence at lower frequencies is low for accelerometers whereas the coherence between GNSS and the actual input signal is observed to be flat at low frequencies up to 1 Hz.

### Keywords

GNSS, Acceleration, Displacement, RMS error, Signal coherence analysis

### Highlights

- \* Different earthquake data are used on the shake table
- \* Accelerometer and GNSS observations have been performed
- \* Differences between observations and real input were investigated using signal coherence analysis

### Manuscript

Research Article

Received: 16.05.2019

Revised: 30.05.2019

Accepted: 06.06.2019

Printed: 30.06.2019

### DOI

doi.

### Corresponding Author

Bahadır Aktug

Email:

aktug@ankara.edu.tr

## 1. GİRİŞ

Deprem gözleminden çok daha farklı amaçlarla oluşturulan Küresel Konumlama Uydu Sistemleri (KKUS) son 30 yılda oldukça gelişmiş ve gerek örnekleme aralığı gerek konum belirleme duyarlılığı önemli ölçüde artmıştır. KKUS atalet (inertial) olmayan bir sistemde ölçüm yaptığından tek başına yüksek duyarlılıklı sonsuz dalga boyu (DC)'na kadar yer değiştirme dalga formlarının belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bununla birlikte, KKUS örnekleme aralığı genel olarak sismometrelere göre oldukça düşük ( $\leq 50$  Hz) olup çok küçük genlikli ( $< 1$  cm) yer değiştirmelere sismometreler kadar duyarlı değildir. KKUS verilerinin doğrudan DC ölçme yeteneği dışında sunduğu diğer önemli bir avantaj ise satüre olmamasıdır. 2011 Van depreminde 500 km, 2017 Bodrum Depreminde ise 200 km'ye kadar satürasyon yaşanmıştır. Çalışma aralığı itibarıyla satürasyona girmesi daha güç olan ivmeölçerlerde ise zemin etkisine bağlı olarak satürasyon sorunları yaşanabilmektedir.

Deprem gözlemi genel olarak hız ve ivmeölçerler ile yüksek örnekleme aralıklı (100-200 Hz) dalga formları kullanılarak yapılmaktadır. Tüm dalga formunun ters çözümü de sadece sismik verilerle yapılmaktadır. Sismik ölçümlere dayalı modellerde özellikle büyük depremlere ilişkin statik ofset belirlenemediğinden, sismik moment, sadece yırtılma modeline bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle, özellikle büyük depremlerde, deprem büyüklüğü olduğundan daha küçük çıkmaktadır (Kedar ve diğ.1994, Park ve diğ. 2005).

Büyük genlikli depremlerde hız ve ivme dalga formlarından yer değiştirme elde edilmesinde önemli sorunlar mevcuttur. Özellikle, hız ve ivme dalga formlarındaki uzun dalga boylu hatalar (drift, vb.) yüksek duyarlılıklı yer değiştirmelerin elde edilmesine izin vermemektedir. 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 ( $\tau_p^{max}$ ) (Nakamura 1988), baskın periyot ( $\tau_p$ ) (Wu ve Kanamori 2005), yer değiştirme büyüklüğü ( $d_p$ ) (Wu ve Zhao 2006), maksimum yer değiştirme büyüklüğü ( $d_p^{max}$ ) (Crowell ve diğ. 2013). Bununla birlikte, son dönemdeki 1999 Chi-Chi ( $M_w=7.6$ ), 1999 Hector Mine ( $M_w=7.1$ ) ve 2003 Tokachi-Oki ( $M_w=8.3$ ) gibi büyük depremler için yapılan testlerde kuvvetli yer hareketi ölçerlerden elde edilen yer değiştirmeye dayalı kestirimlerin daha duyarlı olmakla birlikte özellikle büyük depremleri olması gerekenden daha küçük olarak kestirdiği gözlenmektedir (Brown ve diğ. 2011, Crowell ve diğ. 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) (Hoshiba ve Iwakiri 2011) geçirimli filtrelerin kullanılmasıdır. Yüksek geçirimli filtreleme, düşük frekanslı, uzun periyotlu sürüklenme (drift) hataları yanında yer değiştirme büyüklüğünün ( $d_p$ ) belirlenmesinde etkili olabilecek düşük frekanslı sinyalleri de filtrelemektedir. Diğer yandan, ( $d_p$ ) belirlenmesinde kullanılacak yer değiştirmeler sismometrelerden elde edilen hız ve ivme verilerinin zamana göre sırasıyla birinci ve ikinci integrasyonu ile elde edilmektedir. İvme ve hız kayıtlarından yer değiştirmelerin elde edilmesinde ise sorunlar bulunmaktadır (Graizer 1979, Iwan ve diğ. 1985, Boore 2001, Boore ve diğ. 2002).

Temel olarak, dönüklük ve ötelemelerin sismometreler ile ayırt edilememesi nedeniyle, dönüklüklerin bir kısmı öteleme olarak kaydedilmektedir (Graizer 2006, Pilet ve Virieux 2007). Sismometrelerde baz değişikliğine neden olan bu durum yüksek sürüklenme (drift) hatalarına da neden olmaktadır. Bununla birlikte, inersiyal bir sistemdeki kuvvetli yer hareketi gözlemlerinden yer değiştirmelerin elde edilmesinde gecikme (hysteresis), kullanılan nümerik integralin görelisi olarak düşük duyarlılığı, sensör dönüklük ve eğim (tilt) hatalarına bağlı sürüklenmelerin giderilmesi önemli bir sorun oluşturmaktadır (Boore 2001).

Sismometre verilerindeki düşük frekanslı driftlerin giderilmesi için kullanılan yöntemler genel olarak "baz düzeltmesi" olarak adlandırılmaktadır. En yaygın baz düzeltmesi yöntemi, verilere yüksek geçirgenli filtre uygulamaktır (Graizer 2006). Bu yöntem orta ve yüksek frekanslı sinyalleri filtrelemekle birlikte düşük frekanslı (statik ofset dâhil) sinyalleri ise tamamen kaldırmaktadır. İvme kayıtlarındaki uzun dalga boylu hatalarının giderilmesi için önerilen diğer bir yöntem ise ivme kayıtlarının integrasyonu ile elde edilecek hız kayıtlarına eğri geçirmektir (Boore ve Bommer 2005). Baz düzeltme yöntemleri arasında en güvenilir olanlarından biri ise, Iwan ve diğ. (1985) tarafından ilk hali önerilen daha sonra Boore (1999, 2001) tarafından geliştirilen Boore-Iwan (BI) düzeltme yöntemidir. Bu yöntemde, ivme kayıtlarının integrali alınarak bulunacak hız zaman serilerine, sarsıntı başlangıcındaki hız değeri sıfır olacak şekilde kısıt uygulayarak parçalı doğrusal bir fonksiyon geçirilmekte ve elde edilen hız verilerinin tekrar türevi alınarak ivme kayıtlarından çıkarılmaktadır. Statik ofset dâhil yer değiştirme dalga formları bu yöntemle elde edilebilmekle birlikte, yöntemde hangi zaman aralıklarında nasıl ve kaç parametrelili bir fonksiyon kullanılması gerektiği gibi önemli tercihler kullanıcıdan kullanıcıya değişmekte ve otomatik olarak yapılmasında pratik sorunlar bulunmaktadır (Bock ve diğ. 2012). 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 seçime bağlı olduğundan objektif olmamaktadır. Ayrıca, hız ve ivmelerin yer değiştirmeye dönüştürülmesinde kullanılan nümerik integrasyon sırasında duyarlık kaybı söz konusudur (Bock ve diğ. 2011).

KKUS gözlemleri, uydu alıcı arasında yer alan farklı hata kaynaklarından etkilenmektedir. Özellikle, zamana bağlı yüksek değişkenlik gösteren saat hataları ve atmosferik parametreler mutlak doğruluğu sınırlamaktadır. Buna karşın, KKUS gözlemleri kısa zaman aralıklarında (1-30 sn) birçok hata kaynağının durağanlığı nedeniyle yüksek duyarlık sağlamaktadır. Deprem, bu tür kısa zaman aralıklı önemli uygulama alanlarından birini oluşturmaktadır. Bununla birlikte KKUS gözlemlerinin kısa zaman aralıklarından duyarlığı ile ilgili ülkemizde henüz kapsamlı bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada, farklı depremler ile oluşturulan girdiler ile hem ivmeölçerler hem de KKUS için zaman ve frekans ortamında duyarlık analizi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, KKUS tabanlı deprem gözlemlerinin 1 Hz ve daha düşük frekanslarda oldukça yüksek duyarlık (6 mm) sağladığını ve  $M_w > 7$  depremlerde yer değiştirme dalgaformlarının birkaç metreye ulaştığı dikkate alındığında gerek deprem büyüklüğünün belirlenmesi gerekse deprem erken uyarı sistemleri için önemli potansiyele sahip olduğunu göstermektedir.

## 2. YÖNTEM

### 2.1) Kalman Filtresi

Sürekli bir fiziksel sistem çoğu zaman diferansiyel denklem sistemleri şeklinde ifade edilir (Gelb 1974, Schwarz ve Krynski 1989). Buna bağlı olarak parametrelerin farklı epoklardaki değerleri arasındaki ilişkiler de diferansiyel denklem sistemleri şeklinde elde edilir. Hareket denklemlerinin diferansiyel denklem sistemi olarak ifade edilmesinin bir faydası da, sürekli olan denklemin kesikli olarak ifade edilebilmesi, dolayısıyla modellenebilmesini olanaklı hale getirmesidir (Aktuğ 2005). Genel olarak konumlama ve jeodezik uygulamalarda, sistem girdisi bulunmamakta, farklı epoklardaki durum yöneyleri arasındaki ilişki sadece geçiş dizeyi ile sağlanmaktadır (Aktuğ 2005). Bu çalışmada, deprem öncesi ve deprem sırasındaki verilerin filtrelenmesi için ivme verilerinin sistem girdisi olarak verilmesine ihtiyaç vardır. Bu nedenle, aşağıda açıklanan eşitlikler, Aktuğ (2005)'te verilen genel jeodezik modellerden farklı olarak sistem girdisini de içermektedir. Zaman korelasyonlu modelde korelasyon zamanı  $T \rightarrow \infty$ , diğer bir ifade ile  $\alpha \rightarrow 0$  olduğunda ivme drifti korelasyonsuz beyaz gürültüye sahip olacaktır. Buna bağlı olarak da, ivme

üzerinde rasgele yürüyüş, hız üzerinde ikinci mertebe rasgele yürüyüş, konum üzerinde de üçüncü mertebe rasgele yürüyüş oluşacaktır. Uygulamada korelasyon zamanı sonsuz olmasa bile ölçü aralığına göre oldukça büyükse, yine aynı durumdan söz edilebilir. Buna göre geçiş dizeyi  $\Phi_{t,t+\Delta t}$  ;

$$\Phi_{t,t+\Delta t} = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t & \frac{\Delta t^2}{2} \\ 0 & 1 & \Delta t \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

biçimine, gürültü kovaryans dizeyi ise;

$$Q_{\varepsilon\varepsilon} = \begin{bmatrix} \frac{\Delta t^5}{20} & \frac{\Delta t^4}{8} & \frac{\Delta t^3}{6} \\ \frac{\Delta t^4}{8} & \frac{\Delta t^3}{3} & \frac{\Delta t^2}{2} \\ \frac{\Delta t^3}{6} & \frac{\Delta t^2}{2} & \Delta t \end{bmatrix} \quad (2)$$

biçimine dönüşür. Bu şekilde sabit ivme modeli ile gürültünün zaman korelasyonlu ve rasgele yürüyüşe sahip olduğu iki örnek verilmiş olmaktadır. Bu örnekler kullanılarak çalışmanın bütünlüğü amacıyla kinematik modelleri üç boyutlu bir sistem için, sırasıyla sabit hız, zaman korelasyonlu sabit hız, sabit ivme, zaman korelasyonlu sabit ivme varsayımı için kinematik model hesaplanmış ve aşağıda özetlenmiştir:

- Kinematik Modelden Parametre değerlerinin kestirimi:

$$\bar{x}_{t+1} = \Phi_{t,t+1} \hat{x}_t + Bu \quad (3)$$

- Kinematik Modelden Kovaryans dizeyinin kestirimi:

$$\bar{Q}_{t+1} = \Phi_{t,t+1} \hat{Q}_t \Phi_{t,t+1}^T + Q_{\varepsilon\varepsilon} \quad (4)$$

- Kazanç dizeyinin hesaplanması:

$$G_{t+1} = \bar{Q}_{t+1} A_{t+1}^T (Q_{ll} + A_{t+1} \bar{Q}_{t+1} A_{t+1}^T)^{-1} \quad (5)$$

- Yenilik yöneyinin hesaplanması:

$$v_{t+1} = l - A_{t+1} \bar{x}_{t+1} \quad (6)$$

- Filtrelenmiş Parametre Değerlerinin Hesaplanması:

$$\hat{x}_{t+1} = \bar{x}_{t+1} + G_{t+1} v_{t+1} \quad (7)$$

- Filtrelenmiş Parametre Kovaryans dizeyinin Hesaplanması:

$$\hat{Q}_{t+1} = \bar{Q}_{t+1} - G_{t+1} (Q_{ll} + A_{t+1} \bar{Q}_{t+1} A_{t+1}^T) G_{t+1}^T \quad (8)$$

(Liebelt 1967, Gelb 1974, Merminod 1989, Schwarz ve Krynski 1989, Strang ve Borre 1997).

İvme ve küresel konumlama sistemi (KKS) verilerinin analizi için durum yöneyi ( $x$ ) yer değiştirme ve hız olarak seçilebilir. Bu şekilde, Kalman Filtresi ile elde edilen yer değiştirmeler, hızlar ve ivmeler, sismojeodezik yer değiştirmeler, hızlar ve ivmeler olarak isimlendirilmektedir. Epoklar arasındaki ivmenin sabit olduğu ve sistem gürültüsünün sadece sistem girdisinden kaynaklandığı düşünülürse;

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$H = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

olarak yazılabilir. Sürekli bir sistem için diferansiyel olarak ifade edilen bu dizeler, zaman kesikli bir sistemde;

$$\Phi_{t,t+\Delta t} = e^{F\Delta t} = I + \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Delta t + \frac{1}{2!} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}^2 \Delta t^2 = \begin{bmatrix} 1 & \Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$B = \int_t^{t+\Delta t} e^{F\Delta t} H dt = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta t + \frac{1}{2!} \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \Delta t^2 = \begin{bmatrix} \Delta t^2/2 \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (12)$$

şeklinde bulunur. Sistem gürültüsünün sadece sistem girdisi olan ivmelerden kaynaklandığı düşünülürse İvme değerlerinin kovaryans dizeyi

$$C_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & q \end{bmatrix} \quad (13)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada,  $q$  ivme verilerinin varyansıdır. Bu durumda, sistem gürültü dizeyi;

$$Q_{ee} = \begin{bmatrix} q \Delta t^3/3 & q \Delta t^2/2 \\ q \Delta t^2/2 & q \Delta t \end{bmatrix} \quad (14)$$

elde edilmiş olur.

## 2.2) Tutarlık

Sinyal işlemede tutarlık (coherence) iki sinyal veya veri kümesi arasındaki ilişkiyi incelemek için kullanılan bir yöntemdir ve genellikle doğrusal bir sistemin giriş ve çıkış arasındaki güç aktarımını tahmin etmek için kullanılır (Bendat ve Piersol 1986, Penny 2000).  $x(t)$  ve  $y(t)$  sinyalleri arasındaki gerçek değerli bir fonksiyon olan tutarlık;

$$C_{xy}(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad (15)$$

$G_{xy}(f)$ ,  $x$  ve  $y$  arasındaki çapraz spektral yoğunluk iken,  $G_{xx}(f)$  ve  $G_{yy}(f)$  ise sırasıyla  $x$  ve  $y$  'nin otospektral yoğunluğudur. Spektral yoğunluğun magnitudü ise  $|G|$  olarak ifade edilir. Yukarıda belirtilen kısıtlamalar göz önüne alındığında (ergodiklik, doğrusallık) tutarlık fonksiyonu,  $y(t)$ ' nin  $x(t)$ ' den optimum doğrusal en küçük kareler fonksiyonu ile ne kadarını tahmin edebileceğini belirler. Tutarlık değerleri her zaman  $0 < C_{xy}(f) \leq 1$  aralığındadır. Tek girişi  $x(t)$  ve tek çıkışı  $y(t)$  olan ideal bir sabit parametre doğrusal sistem için, tutarlık bire eşittir. Dürtü yanıtı  $h(t)$  olan bir doğrusal sistem, \* evrişimi simgelemek üzere;

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (16)$$

şeklinde tanımlanabilir. Frekans ortamında ise bu eşitlik  $Y(f)$ ,  $y(t)$ ' nin Fourier transformu ve  $H(f)$  sistemin transfer fonksiyonu olmak üzere;

$$Y(f) = H(f)X(f) \quad (17)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bu durumda  $G_{xx}(f)$  gerçek iken,  $G_{yy} = |H(f)|^2 G_{xx}(f)$  ve  $G_{xy} = H(f)G_{xx}(f)$  olduğu durumda (15) eşitliği;

$$C_{xy}(f) = \frac{|H(f)G_{xx}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} = \frac{|H(f)G_{xx}(f)|^2}{G_{xx}^2(f)|H(f)|^2} = \frac{|G_{xx}(f)|^2}{G_{xx}^2(f)} = 1 \quad (18)$$

şeklini alır.

Bununla birlikte, fiziksel dünyada ideal bir lineer sistem nadiren gerçekleşir, gürültü sistemin doğal bir bileşenidir ve tek giriş ve tek çıkışlı bir lineer sistemin tüm sistem dinamiklerini yakalamak için yetersiz kalması muhtemeldir. İdeal lineer sistem varsayımlarının yetersiz kaldığı durumlarda, Cauchy – Schwarz eşitsizliği  $C_{xy} \leq 1$  değerini garanti eder.

### 3. SARŞMA TABLASI TESTLERİ

Test çalışması T.C. İÇİŞLERİ BAKANLIĞI Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığının Eskişehir Yolundaki kampüsünde gerçekleştirilmiştir. Test için Testbox marka sarsma tablası, Stonex S8 Plus model KKUS alıcısı ve Güralp CMG-5T model ivmeölçer kullanılmıştır (Şekil 1).





Şekil 1: Sarsma tablası testi çalışmaları ve kullanılan ekipman

Sarsma tablası testleri, gerçek veriler ile ölçülen verilerin doğrudan karşılaştırılmasına imkân vermektedir. Bu çalışmada, 12.11.1999 Düzce Depremi, 16.01.1995 Kobe Depremi, 18.05.1940 Elcentro Depremi ve 21.07.2017 Gökova Körfezi Depreminden birer dalga formu olmak üzere 4 deprem incelenmiştir. Sarsma tablası testinde 100 Hz örnekleme ve 5 Hz örnekleme KKUS verileri kullanılmıştır.

Toplanan KKUS verileri göreceli kinematik moda analiz edilmiştir. Analiz için referans istasyonu olarak Ankara ve çevresinde yer alan TUSAGA-Aktif istasyonlarından HYMN, KKAL, CMLD, NHAL istasyonları ayrı ayrı kullanılmıştır. Farklı referans istasyonunun kullanılması nedeniyle oluşan farkların 1 mm altında bulunmuştur. KKUS verilerinin işlenmesinde iyonsferden bağımsız model, Uluslararası KKUS Servisi aşırı hızlı yörünge bilgileri ve Saastamoinen troposfer modeli kullanılmıştır.

#### 4. BULGULAR

Gerçek girdi ile ölçülen KKUS yer değiştirme dalgaformları ve ivme kayıtlarından elde edilen dalga formları karşılaştırıldığında KKUS'in gerçek girdiye göre Karekök Ortalama Hata (RMS) değerleri, Şekil 3' te görülebileceği üzere, 4 ila 9 mm arasında değişirken, ivme kayıtlarından elde edilen yer değiştirme dalga formlarının RMS hataları 1 ila 73 mm arasında değişmektedir. 1940 El Centro Depremi dışında, ivme kayıtlarından elde edilen RMS değerlerinin KKUS RMS değerlerinden daha büyük olduğu görülmüştür (Tablo 1). Genel KKUS yer değiştirme dalga formlarının ortalama RMS değerleri ~6 mm civarındadır. Söz konusu değer, KKUS yer değiştirme dalga formlarının sağladıkları yüksek duyarlılıkla deprem gözlemine büyük katkı sağlayacağını göstermektedir.



*Tablo 1: Sarsma tablası testlerinde kullanılan deprem verilerinden elde edilen yer değiştirme dalgaformları ile farklı alıcı türleri ile toplanan ölçülerden elde edilen yer değiştirme dalgaformları arasında hesaplanan RMS değerleri*

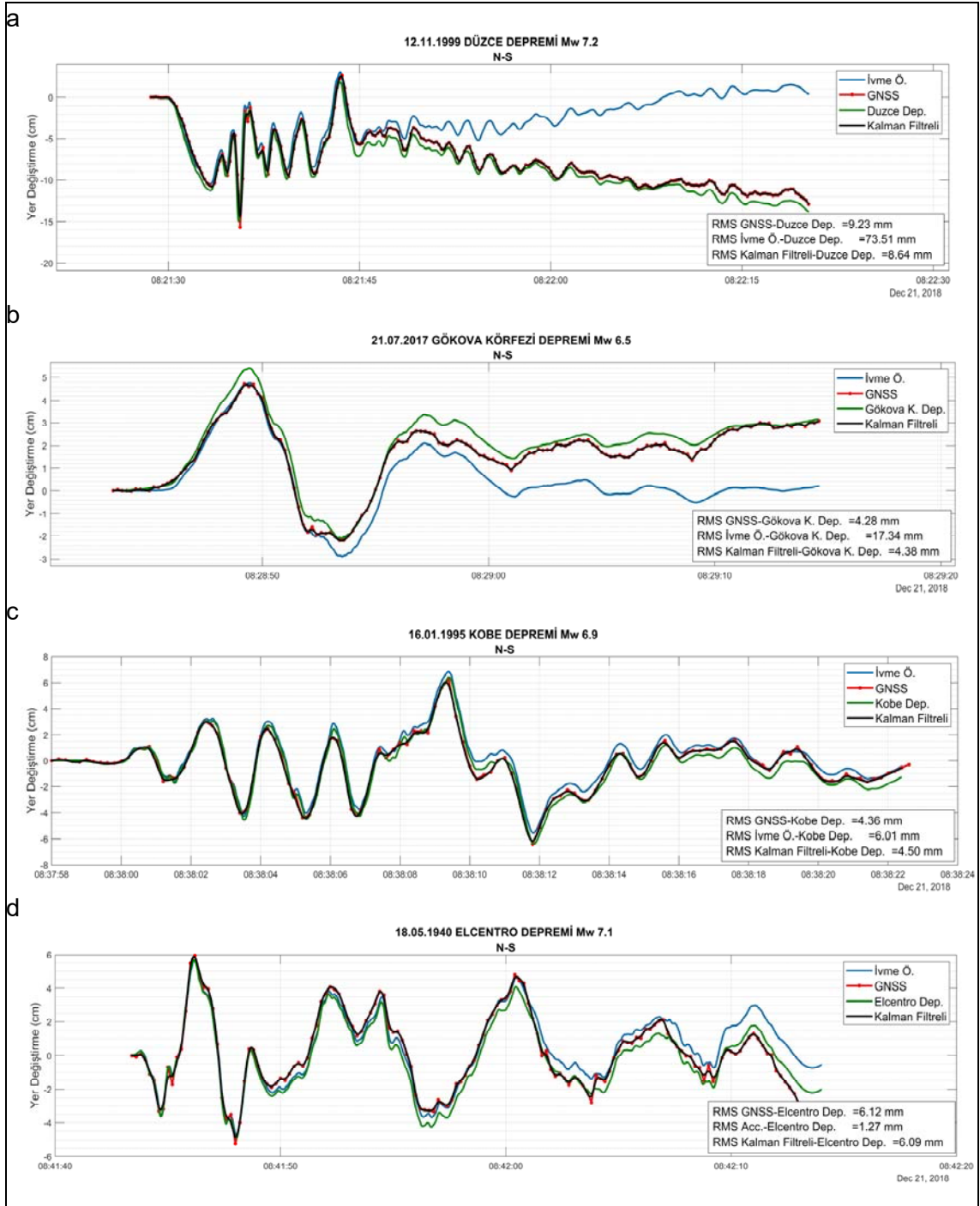
| Deprem               | AFAD İstasyon | Örnekleme Frekansı (hz) | Uygulanma % | KKUS RMS (mm) | İvme RMS (mm) | Kalman RMS (mm) |
|----------------------|---------------|-------------------------|-------------|---------------|---------------|-----------------|
| 12.11.1999 Düzce     | 1401          | 100                     | 65          | 9.23          | 73.48         | 8.64            |
| 21.07.2017 Gökova K. | 4812          | 100                     | 100         | 4.28          | 17.34         | 4.38            |
| 16.01.1995 Kobe      | -             | 100                     | 100         | 4.36          | 6.01          | 4.50            |
| 18.05.1940 Elcentro  | -             | 50                      | 100         | 6.12          | 1.27          | 6.09            |

İki dalgaformunun tutarlılıklarının anlaşılmasında, zaman içerisinde gösterdikleri ortalama değişimin bir ifadesi olan RMS değerlerinin yanı sıra, frekans ortamındaki örtüşmeyi irdelemek için tutarlık analizi de yapılmıştır. Tutarlık değerleri 1' e yakınsadıkça ilgili frekans bileşenlerinin tutarlılığın arttığı, 0' a yakınsarken ise tutarlılığın azaldığı söylenebilir.

Görel olarak yüksek frekanslara duyarlı ivme kayıtları ile örnekleme aralığı ivmeölçerlere göre 5-100 kat daha az olan ancak uzun dalga boylarında daha duyarlı sonuç veren KKUS verilerinin duyarlılığı için zaman serisi üzerinden yapılan RMS analizi dışında ayrıca frekans ortamında tutarlık analizi yapılmıştır. Tutarlık analizi, sarsma tablasındaki gerçek girdiler ile ölçülen veriler arasında yapılmıştır.

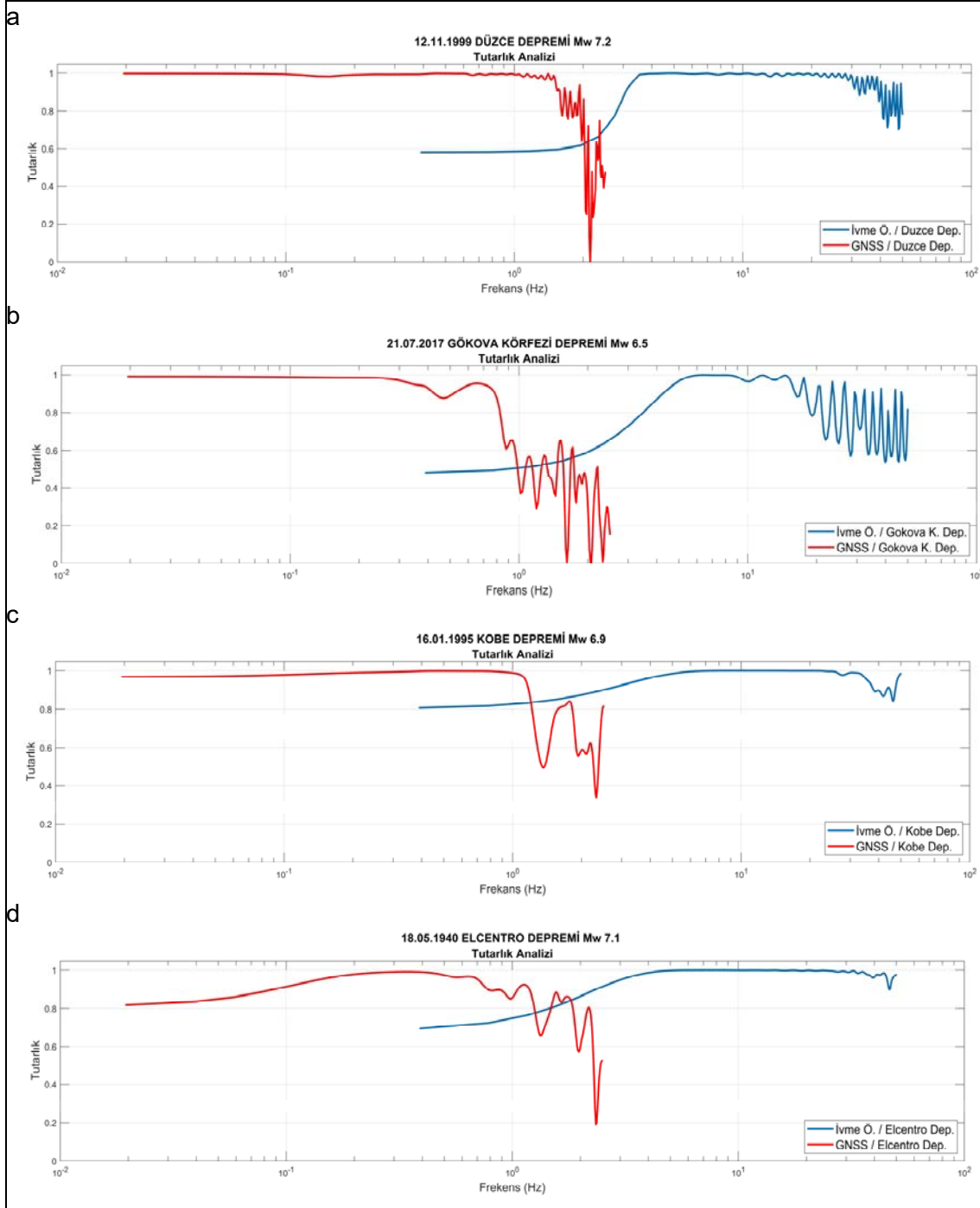
Elde edilen sonuçlar, ivme kayıtları ile gerçek girdi sinyali arasında ancak 2-3 Hz'den daha yüksek frekanslarda yüksek tutarlık olduğu, 1 Hz ve daha düşük frekanslarda tutarlığın çok hızlı bir şekilde düştüğünü göstermektedir. Buna karşın, KKUS yer değiştirme dalga formları ile gerçek girdi sinyali arasındaki tutarlığın 1 Hz'e kadar olan düşük frekanslarda "düz" bir şekilde tam tutarlık gösterdiği gözlenmektedir. Tutarlık analizi ivme kayıtlarının sahip olduğu uzun dalga boylu hataları ortaya koyduğu gibi, KKUS' un söz konusu hatalara sahip olmadığını da göstermektedir.

Gerek zaman ortamındaki RMS değerleri (Şekil 2) gerek frekans ortamındaki tutarlık değerleri (Şekil 3), özellikle düşük frekanslarda olmak üzere KKUS tabanlı yer değiştirme dalgaformlarının sağladığı yüksek duyarlılığı göstermektedir.



Şekil 2: Sarsma tablası ivme, KKUS ve Kalman süzgeci ile elde edilen dalgaformlarının gerçek girdi ile karşılaştırılması

Deprem büyüklüğü arttıkça, uzun dalga boylu etkilerin daha da arttığı ve bu durumun deprem büyüklüğünün duyarlı olarak belirlenmesini etkilediği dikkate alındığında, uzun dalga boylu etkileri duyarlı olarak ölçebilen KKUS tabanlı yer değiştirme dalgaformlarının deprem büyüklüğünün belirlenmesine katkısı daha iyi değerlendirilebilir.



Şekil 3: Sarsma tablası üzerinde konuşlu ivmeölçer ve KKUS dalgaformlarının gerçek girdi ile olan tutarlık analizi

## 5. SONUÇLAR

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. Bununla birlikte her iki gözlem genellikle farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Depreme ilişkin temel parametreler (büyüklük, konum vb.) ve deprem büyüklük türleri ( $M_i$ ,  $M_b$ ,  $M_s$  vb.) hız

kayıtlarındaki genlik ve faz değerlerine bağlı olarak hesaplanırken, ivme kayıtları ise daha çok şiddet haritalarının hazırlanmasında kullanılmaktadır. Buna karşın, yer değiştirmeye dayalı dalga formları, hız ve ivme dalga formlarına göre deprem büyüklüğüne daha duyarlıdır. Yer değiştirme dalga formları, hız ve ivme kayıtlarından da elde edilebilmekle birlikte, yer değiştirme dalga formlarının elde edilmesinde önemli teorik ve pratik sorunlar mevcuttur. Söz konusu sorunların başında ise hız ve ivme dalga formlarındaki uzun dalga boylu hatalar (drift vb.) gelmekte, uzun dalga boylu hatalar ise yüksek duyarlıklı yer değiştirmelerin elde edilmesine izin vermemektedir.

Deprem gözleminden çok daha farklı amaçla geliştirilen Küresel Konumlama Uydu Sistemleri (KKUS) ise son 30 yılda oldukça gelişmiş ve gerek örnekleme aralığı gerek konum belirleme duyarlığı önemli ölçüde artmıştır. KKUS inersiyal olmayan bir sistemde ölçüm yaptığından tek başına yüksek duyarlıklı sonsuz dalga boyu (DC)'na kadar yer değiştirme dalga formlarının belirlenmesi mümkündür. Bununla birlikte, örnekleme aralığı sismometrelere göre oldukça düşük ( $\leq 50$  Hz) olup küçük genlikli yer değiştirmelere sismometreler kadar duyarlı değildir. Yer değiştirme dalga formunun ve buna bağlı deprem büyüklüğünün doğru olarak belirlenmesine özellikle büyük depremlerde ihtiyaç olacağı dikkate alındığında, KKUS tabanlı yer değiştirme dalga formlarının büyük depremlerde önemli bir boşluğu doldurması beklenmektedir. İnersiyal olmayan bir sistemde ölçü yapmasının KKUS' un sismometrelere göre sağladığı diğer bir avantaj ise satürasyon sorunu bulunmamasıdır. Bu şekilde kaynağa çok yakın bir noktada veri alma olanağı olan KKUS alıcıları sayesinde deprem erken uyarı sinyallerinin üretilmesi olanaklıdır. Erken uyarı sistemlerinde özellikle sismojeodezik dalgaformunun en büyük yer değiştirme (PGD) değerine bağlı ampirik ölçek faktörleri kullanılmaktadır (Ruhl ve diğ. 2019). Sismojeodezik erken uyarı sistemlerinin etkinliği farklı çalışmalarda gösterilmiştir (Hartog ve diğ. 2016, Ruhl ve diğ. 2019, Crowell ve diğ. 2018a, b). Örneğin Amerika Birleşik Devletleri'nin batı kıyısı için hazırlanan erken uyarı sisteminin önemli bir kısmını sismojeodezik bileşen oluşturmaktadır (Murray ve diğ. 2018).

Yer değiştirme dalga formlarının sağladığı diğer bir avantaj ise deprem mekanizma çözümünde nokta kaynak yerine doğrudan sonlu (finite) kaynak ile çalışılabilmesidir. Sonlu kaynak deprem kaynak mekanizması çözümünde odak mekanizması çözümündekinin aksine tek bir fay düzlemi elde edilmekte bu da depremin meydana geldiği fayın karakteri bilinmeden de tek anlamlı çözüm yapılabilmesine olanak sağlamaktadır. Sonlu kaynak çözümünde, depremin tüm moment tensör bileşenleri yanında, fay düzleminin uzunluğu, genişliği ve kayma miktarları gibi nokta kaynak odak mekanizması çözümünde elde edilemeyen parametreleri de elde edilebilmektedir. Nokta kaynak yaklaşımı özellikle büyük depremlerde deprem büyüklüğünün olması gerekenden daha düşük bulunmasına neden olmaktadır. Yakın zamanda 2011 Tohoku Depreminde nokta kaynak yaklaşımı ile gerçekte  $M_w=9.1$  deprem büyüklüğü en fazla  $M_w=8.1$  olarak bulunabilmiştir.

KKUS yer değiştirme dalga formlarının uzun dalga boylu etkileri belirlemedeki gücü ve buna karşın düşük örnekleme aralığı ile ivme kayıtlarının kısa dalga boylu etkileri belirlemedeki üstünlüğü ve yüksek örnekleme aralığı dikkate alınarak her iki sistemin güçlü yanlarını birleştiren ve bunun sonucunda yüksek duyarlıklı ve yüksek örnekleme genişbant (hem düşük hem yüksek frekanslar) yer değiştirme dalgaformları belirlenebilmektedir. Bu amaçla kullanılacak en uygun yöntem Kalman Süzgecidir. Kalman Süzgeci ile yeni bir yer değiştirme dalga formu elde edilmekte ve elde edilen yeni dalga formu yüksek frekanslarda ivme kayıtlarından gelen duyarlığa, düşük frekanslarda ise KKUS yer değiştirme dalgaformlarından gelen duyarlılığı sahiptir. Kalman Süzgeci ile süzgeçlenmiş yeni yer değiştirme dalgaformu ivme kayıtları gibi yüksek örnekleme duyarlığına sahiptir. Yapılan testlerde, sarsma tablası üzerinde kullanılan ivmeölçer ve KKUS alıcısına ait verilerden

Kalman Süzgeci ile yeni yer değiştirme dalgaformları hesaplanmıştır. Kalman Süzgeci ile süzgeçlenmiş veriler genel olarak KKUS' a yakın RMS değerlerine sahip olmakla birlikte, KKUS' un 20 katı örnekleme frekansına sahiptir.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ülkemizde yer değiştirmeye dayalı deprem gözlem sisteminin duyarlılığı ile ilgili ilk örnek çalışmayı oluşturmaktadır. Ülkemizde farklı kurumlar tarafından işletilen KKUS ve ivmeölçer ağları bulunmaktadır. Söz konusu ağların deprem gözlemi amacıyla birlikte kullanımının hem kurumsal hem de kamu kaynaklarının etkin kullanımına yönelik yararları bulunmaktadır. Her iki ağın deprem amacıyla birlikte kullanımı başta deprem büyüklüğünün satureyona sahip olmayan sistemler ile belirlenebilmesi olmak üzere çeşitli kullanım alanları bulunmaktadır.

- Deprem büyüklüğünün kısa zamanda yüksek duyarlılıkta belirlenmesi
- Deprem Erken İkaz (DEİ) Sistemlerinde ilk birkaç saniyedeki maksimum P-dalgası yer değiştirmesi ile moment büyüklüğünün kestirilmesi
- Fay geometri ve kayma değerlerinin çözülerek moment büyüklüğünün yüksek duyarlılıkta hesaplanması

## TEŞEKKÜR

Sarsma tablası testleri için yardımlarını esirgemeyen AFAD Deprem Dairesi Başkanlığı personellerinden Jeofizik Yüksek Mühendisleri Erkan ATEŞ, Recai Feyiz KARTAL ve Sami ZÜNBÜL' e şükranlarımızı sunarız. Bu çalışmadaki sonuçlar, TÜBİTAK tarafından 116Y199 numarası ile desteklenen "Jeodezik Ölçüler ile Yüksek Duyarlılıkta Genişbant Sismik Yer Değiştirmelerin Elde Edilmesi" başlıklı proje kapsamında elde edilmiştir. Sarsma tablasının kullanımına imkân sağladığı için AFAD Deprem Dairesi Başkanlığına teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

Aktuğ B., 2005. Uyarlamalı filtrelerle gerçek zamanlı navigasyon, *HKM Jeodezi Jeoinformasyon ve Arazi Yönetimi* 92, 29-37.

Bendat J.S., Piersol A.G., 1986. Random data. Wiley-Interscience.

Bock Y., Crowell B., Melgar D., 2011. Real time GPS/Seismic and EEW Results from El Mayor Cucapah and Tohoku-oki Earthquakes. Earthquake Early Warning Summit: Delivering Earthquake Warnings to the U.S. West Coast. Berkeley.

Bock Y., Restrepo J., Melgar D., Offield D.G., 2012. Low-cost, strong motion sensor packages to obtain full spectrum waveforms for earthquake early warning and structural monitoring applications, NSF Final Report.

Boore D.M., 1999. Effect of Baseline Corrections on Response Spectra for Two Recordings of the 1999 Chi Chi, Taiwan Earthquake, Reston, USGS.

Boore D.M., 2001. Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi Chi, Taiwan earthquake, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 91, 1199-1211.

Boore D.M., Bommer J., 2005. Processing of strong motion accelograms: Needs, options and consequences, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 25, 93-115.

- 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, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 92, 1543-1560.
- Brown H. M., Allen R. M., Hellweg M., Khainovski O., Neuhauser D., Souf A., 2011. Development of the elarms methodology for earthquake early warning: Realtime application in California and offline testing in Japan, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 31, 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., Baker B., Barrientos S., Geng J., 2018a. G-FAST earthquake early warning potential for great earthquakes in Chile, *Seism. Res. Lett.* 89, 542-556.
- Crowell B.W., Melgar D., Geng J., 2018b. Hypothetical real-time GNSS modelling of the 2016 Mw 7.8 Kaikoura Earthquake: Perspectives from ground motion and tsunami inundation prediction, *Bull. Seism. Soc. Am.* 108, 1736-1745, doi: 10.1785/0120170247.
- Gelb A., 1974. Applied optimal estimation. Massachusetts, MIT Press, USA.
- Graizer V.M., 1979. Determination of the true ground displacement by using strong motion records, *Earth Physics* 15 (12), 875-885.
- Graizer V.M., 2006. Tilts in strong motion, *Bull Seism. Soc. Am.* 96(6) 2090-2102.
- Hartog J.R., Kress V.C., Malone S.D., Bodin P., Vidale J.E., Crowell B.W., 2016. Earthquake early warning: ShakeAlert in the Pacific Northwest, *Bull. Seism. Soc. Am.* 106, 1875-1886, doi: 10.1785/0120150261.
- Hoshiba M., Iwakiri K., 2011. Initial 30 seconds of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake (Mw 9.0)-amplitude and Tc for magnitude estimation for earthquake early warning, *Earth, Planet and Space* 63, 553-557, 2011.
- Iwan W.D., Mooser M.A., Peng C.Y. 1985. Some observations on strong motion earthquake measurements using a digital accelerograph, *Bull. Seism. Soc. Am.* 75(5), 1225-1246. ISSN 0037-1106.
- Kedar S., Watada S., Tanimoto T. 1994. The 1989 Macquarie Ridge earthquake: Seismic moment estimation from long period free oscillations, *J. Geophys. Res.* 99,17893-17908.
- Liebelt P.B., 1967. An Introduction to Optimal Estimation. Massachusetts: Addison-Wesley.
- Merminod B., 1989. The Use of Kalman Filters in GPS Navigation, UNISRV, New South Wales, Australia.
- Murray J.R., Crowell B.W., Grapenthin R., Hodgkinson K., Langbein J.O., Melbourne T., Melgar D., Minson S.E., Schmidt D.A., 2018, Development of a geodetic component for the U. S. West Coast earthquake early warning system, *Seism. Res. Lett.* 89, 2322-2336, doi: 10.1784/0220180162.

Nakamura Y., 1988. On the Urgent Earthquake Detection and Alarm System (UrEDAS), 9th world conference on earthquake engineering, Vol. VII, 673-678, 2-9 August 1988, Tokyo-Japan.

Olson E., Allen M., 2005. The deterministic nature of earthquake rupture, *Nature* 438, 212-215.

Park J., Song T., Tromp J., Okal E., Stein S., Rault G., Clevede E., Laske G., Kanamori H., Davis P., Berger J., Braitenberg C., Van Camp M., Lei X., Sun H., Xu H., Rosat S., 2005. Earthquakes frss oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science* 308, 1139-1144, 20 May 2005.

Penny W.D., 2000. Signal Processing Course, Institute of Neurology, University College London, UK.

Pillet R., Virieux J. 2007. The effects of seismic rotations on inertial sensors, *Geophysical Journal International* 171(3), 1314-1323, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03617.x

Ruhl C.J., Melgar D., Geng J., Goldberg D.E., Crowell B.W., Allen R.M., Bock Y., Barrientos S., Riquelme S., Baez J.C., Cabral-Cano E., Perez-Campos X., Hill E.M., Protti M., Ganas A., Ruiz M., Mothes P., Jarrin P., Nocquet J.M., Avouac J.P., D'Anastasio E., 2019. A global database of strong motion displacement GNSS recordings and an example application to PGD scaling, *Seism. Res. Lett.* 90(1), 271-279, doi: 10.1785/0220180177.

Schwarz K.P., Krynski J., 1989. Fundamentals of Geodesy, University of Calgary, Department of Surveying Engineering, 177p.

Strang G., Borre K., 1997. Linear algebra, geodesy, and GPS, Wellesley Press, ISBN 978-0961408862, Cambridge, 624p.

Wu Y., Kanamori H., 2005. Experiment on Onsite Early Warning Method for the Taiwan Early Warning System, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 95(1), 347-353, doi: 10.1785/0120040097

Wu Y.M., Zhao L., 2006. Magnitude estimation using the first three seconds P-wave amplitude in earthquake early warning, *Geophys. Res. Lett.* 33, L16312. doi:10.1029/2006GL026871