



# Ülkemizdeki Sismojeodezik Gözlem Altyapısı ve Analiz Uygulamaları

Recai Feyiz Kartal<sup>1, \*</sup>, Murat Doruk Şentürk<sup>1</sup>, Filiz Tuba Kadırioğlu<sup>1</sup>, Eren Tepeuğur<sup>1</sup>, Bahadır Aktuğ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Deprem Dairesi Başkanlığı, 06800, Ankara.

<sup>2</sup>Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeofizik Mühendisliği Bölümü, 06830, Ankara.

## Özet

Teknolojik gelişmeler, farklı bilim dallarının ortak bir amaç için birlikte kullanılabilceğini göstermiştir. Son yıllarda, deprem parametrelerinin belirlenmesine yönelik, sismolojik ve jeodezik gözlemlerin birlikte kullanılması anlamına gelen sismojeodezi ortaya çıkmıştır. İvme ve hız ölçümlerine dayalı sismolojik gözlemler ile yerdeğiştirmeye dayalı jeodezik gözlemlerin birlikte kullanımı çoğunlukla, hız ve ivme kayıtlarının yer değiştirme dalga formlarına dönüştürülerek, jeodezik yer değiştirme verileri ile filitrelenmesi ile yapılmaktadır. Bu şekilde elde edilen yüksek duyarlılık yer değiştirme verileri mevcut gözlem sistemlerine göre önemli avantajlar sağlamaktadır. Bunlardan bazıları: (1) büyük depremlerin deprem büyüklüğü kısa zamanda hesaplanabilmektedir, (2) 0.01 sn örnekleme aralığına sahip milimetre hassasiyetinde gerçek zamanlı gözlem yapılabilmektedir, (3) sinyal gürültü oranının düşük olduğu, uzun dalga boylu hatalardan ayıklanmış genişbant dalga formu elde edilebilmektedir, (4) satüre olmayan jeodezik veriler ile kaynağın çok yakınında gözlem yapma olanağı bulunduğundan, büyük depremler için yer değiştirme tabanlı etkin bir erken uyarı sistemi geliştirilebilmesi mümkün olmaktadır, (5) sadece deprem gibi kısa periyotlu olaylar değil, uzun dönemli tektonik deformasyon ve postsismik etkilerin izlenmesinin yanı sıra, nokta kaynak yerine sonlu fay geometrisi ve kaymalar hesaplanabilmektedir. Bu çalışmada, öncelikle ülkemizdeki sismojeodezik gözlem altyapısı tanıtılmakta ve daha sonra 116Y199 no'lu "Jeodezik Ölçüler ile Yüksek Duyarlılık Genişbant Sismik Yer Değiştirmelerin Elde Edilmesi" başlıklı TÜBİTAK projesi kapsamında elde edilen yer değiştirme dalga formları ve kullanım alanları paylaşılmaktadır.

## Anahtar Sözcükler

Sismojeodezi, deprem büyüklüğü, GPS, hız ölçer, ivme ölçer, yer değiştirme

## 1. Giriş

Günümüzde deprem gözlemleri, sismometrelerden elde edilen hız ve ivme dalga formları ile yapılmaktadır. Buna karşın, yüksek duyarlılık genişbant sismik yer değiştirmelerin birçok önemli kullanım alanı bulunmaktadır: (1) Deprem etki alanının kestirilmesi için deprem büyüklüğünün kısa zamanda belirlenmesi, (2) Deprem Erken İkaz Sistemleri (DEİS) için ilk birkaç saniyedeki verilerle sismik moment büyüklüğünün kestirilmesi ve (3) depremden sonra fay geometri ve kayma değerlerinin çözülerek moment büyüklüğünün yüksek duyarlılık hesaplanması.

Genel olarak, sismometrelerden elde edilen hız verileri ile ivme ölçerlerden elde edilen ivme verilerinin zamana göre sırası ile birinci ve ikinci integrasyonu ile yer değiştirmeler elde edilmektedir. Buna karşın, ivme ölçerler inersiyal bir sistemde ölçüm yapmakta ve ivme ölçerlerin zamana bağlı hatalarının giderilmesi önemli bir sorun oluşturmaktadır. Bu amaçla kullanılan düzeltme teknikleri (baz düzeltmesi, yüksek geçirgenlik filitreler vs.) her kaynak-hedef ilişkisi hatta her kanal için ayrı ayrı yapılmak durumundadır ve kullanılan düzeltme teknikleri kullanıcı seçimine bağlı olduğundan objektif olmamaktadır. Özellikle, sismometre ve ivme ölçerlerden düşük frekanslı yer değiştirmelerin yüksek duyarlılık olarak elde edilmesinde önemli sorunlar bulunmaktadır. Buna karşın GPS yüksek frekanslarda duyarlılığı görece olarak düşük olan ama alçak frekanslarda ivme ölçerlere göre daha yüksek duyarlılık sağlayan bir ölçme sistemi olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, GPS, ivme ölçerler ile elde edilmesi mümkün olmayan statik yer değiştirmelerin, yer merkezli sabit bir sistemde doğrudan hesaplanabilmesini sağlamaktadır.

Sunulan bu çalışma, TÜBİTAK 1001-Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında 116Y199 numarası ile desteklenen "Jeodezik Ölçüler ile Yüksek Duyarlılık Genişbant Sismik Yer Değiştirmelerin Elde Edilmesi" başlıklı projede yapılan çalışmaları kapsamaktadır.

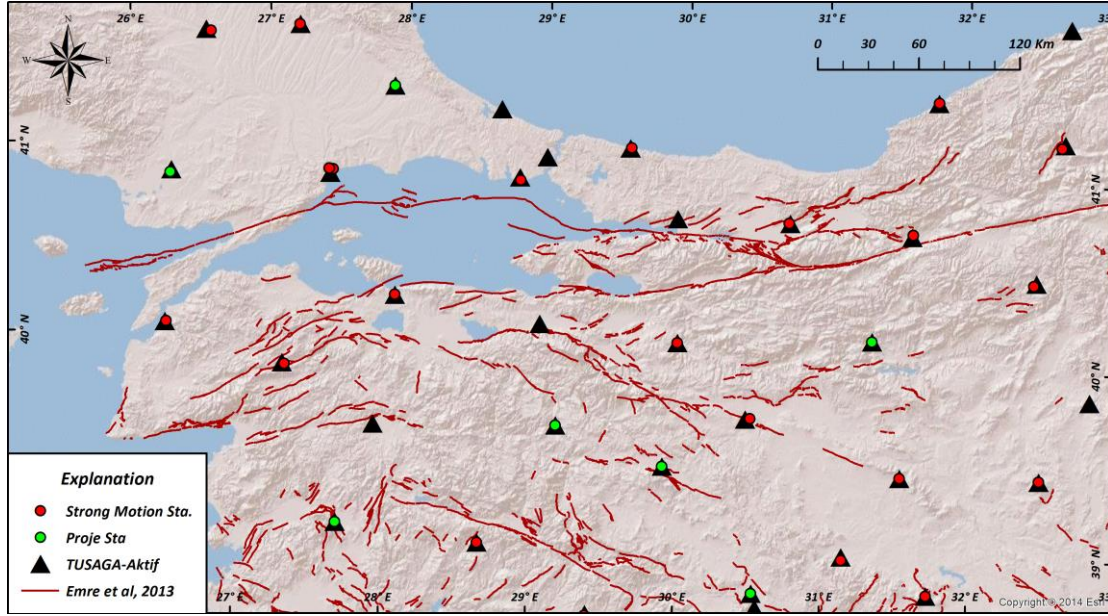
### 1.1. Amaç ve Hedefler

Projede, sismometre ve GPS verilerinin birlikte analizi ile her iki sistemin kuvvetli yanlarının birleştirilmesi ve bu amaçla ülkemizdeki mevcut zayıf ve kuvvetli yer hareketi ağları ile sabit GPS istasyonları ağlarından azami derecede istifade edilerek somut çıktı ve öneriler üretilmesi amaçlanmaktadır. Çalışma alanı, 25.50 – 33.00 doğu boylamları ve 38.50 – 42.00 kuzey enlemleri ile sınırlanan bölge olarak belirlenmiştir. Çalışmanın yapılabilmesi için, aynı lokasyonda kurulmuş, yüksek örnekleme aralığında ölçüm yapan GPS alıcıları ( $\geq 1$  Hz) ve kuvvetli veya zayıf yer hareketi ölçerlere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, çalışma alanındaki mevcut TUSAGA-Aktif istasyonları ile Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı tarafından işletilen Kuvvetli ve Zayıf Yer Hareketi Ağlarına ait istasyonlardan birbirine yakın olanlar

\* Sorumlu Yazar: Tel: (0312)2582153

E-posta: rfkartal@gmail.com (Kartal R. F.)

(< 3 km) seçilmiştir. Bölgede boşluk kalan kısımlar için ise mevcut Türkiye Ulusal GPS İstasyonları Aktif (TUSAGA-Aktif) istasyonları yakınlara 7 adet genişbant hız ölçer kurulmuştur (Şekil 1).



Şekil 1: Projede kullanılan istasyonların çalışma alanındaki dağılımı.

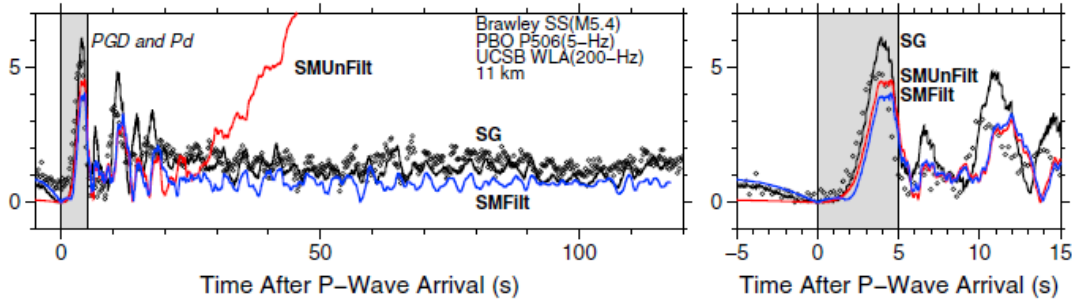
Deprem gözlemleri genel olarak kuvvetli (ivme) ve zayıf yer hareketi (hız) ölçerler ile yüksek örnekleme aralıklı (100-200 Hz) dalga formları kullanılarak yapılmaktadır. Buna karşın, yer değiştirmeye dayalı dalga formları, hız ve ivme dalga formlarına göre deprem büyüklüğüne daha duyarlıdır. Hız ve ivme dalga formlarından yer değiştirme elde edilebilmektedir. Ancak, hız ve ivme dalga formlarından yer değiştirme elde edilmesinde önemli sorunlar mevcuttur. Özellikle, hız ve ivme dalga formlarındaki uzun dalga boyu hatalar (drift vb.) yüksek duyarlılık yer değiştirmeler elde edilmesine izin vermemektedir. Diğer yandan, GPS ile tek başına yüksek duyarlılık sonsuz dalga boyu (DC)'na kadar yer değiştirme dalga formları belirlenebilmekle birlikte, örnekleme aralığı sismometrelere göre oldukça düşüktür ( $\leq 50$  Hz) ve küçük genlikli yer değiştirmelere sismometreler kadar duyarlı değildir. Projede;

- Göreli olarak yüksek frekanslara duyarlı sismometreler (hem kuvvetli hem de zayıf yer hareketi ölçerler) ile örnekleme aralığı sismometrelere göre 5-100 kat daha az olan ancak uzun dalga boylarında daha duyarlı sonuç veren GPS verilerinin, optimal birleştirme yöntemlerinin geliştirilmesi,
- Bu şekilde sismometre verilerindeki uzun dalga boyu hataların (drift vb.) giderilerek ve yüksek duyarlılık genişbant yer değiştirme dalga formlarının elde edilmesi,
- Uzun dalga boyu hataların elimine edildiği ve deprem tehlike analizi için gerekli azalım modellerinin geliştirilmesinde doğrudan kullanılacak ivme dalga formları oluşturmak,
- Ülkemizde yer değiştirmeye dayalı deprem gözlem sisteminin ilk örneğinin oluşturulması,
- Optimal birleştirme sonucunda elde edilecek yüksek duyarlılık genişbant yer değiştirmeler ile özellikle, deprem büyüklüğünün her iki sistemin bağımsız kullanılmasından daha iyi yüksek duyarlılıkla kestirilmesi,
- Yüksek duyarlılık yer değiştirme kestirimi amacıyla, hem zayıf hem de kuvvetli yer hareketi dalga formlarının GPS ile birlikte kullanılabilmesinin örneğinin oluşturulması nedeniyle gelecekteki GNSS, KYH, ZYH Ağlarının Entegrasyonu için öneriler geliştirilmesi,
- Mevcut GPS, kuvvetli ve zayıf yer hareketi izleme altyapılarından azami ölçüde istifade edilecek olması nedeniyle ilgili kurumlara somut çıktı üretilebilmesi,
- GPS ve sismometre verilerinin bütünlük analizleri için uzman personel yetiştirilmesi,
- Marmara Bölgesinde, proje süresince meydana gelecek depremler için yüksek duyarlılık genişbant yer değiştirme dalga formlarının oluşturulması hedeflenmektedir.

## 2. Sismojeodezi

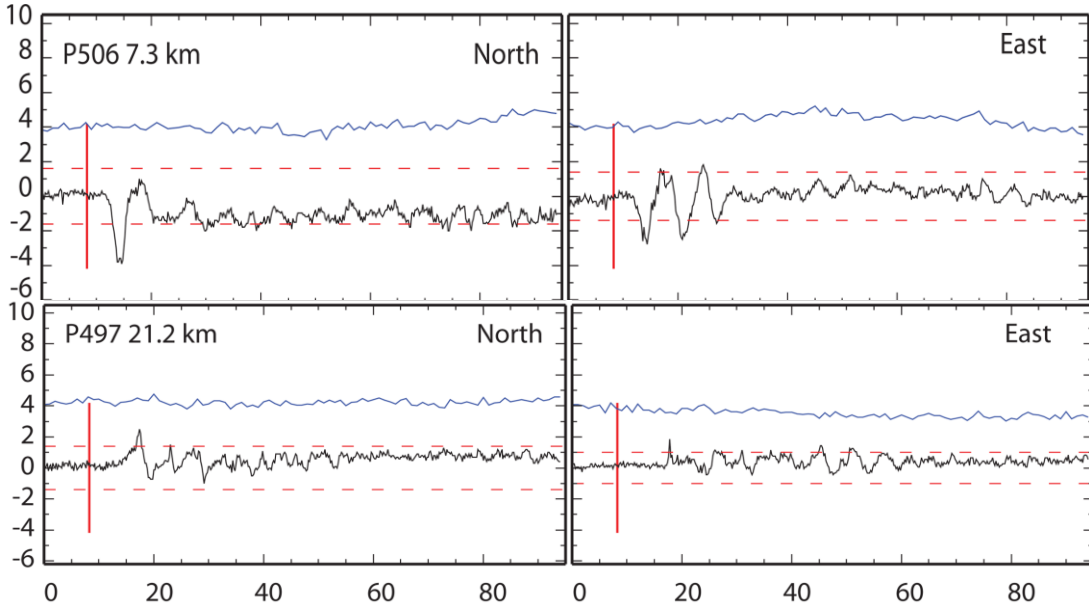
Sismometrelerin yüksek örnekleme aralığı (100-200 Hz) ve yüksek frekanslardaki duyarlılığı ile GPS ile elde edilen yer değiştirmelerin optimal yöntemlerle birleştirilmesi ve bu şekilde yüksek örnekleme aralıklı (kullanılan sismometre örnekleme aralığında), yüksek duyarlılık (sismometrelerin uzun dalga boyu etkilerinin arındırıldığı) yer değiştirme dalga formlarının elde edilmesi çok güncel bir araştırma konusudur (Geng ve diğ., 2013; Melgar ve diğ., 2013; Crowell ve diğ., 2013). GPS ve sismik verilerin birlikte analizi ve optimal kombinasyonu ile elde edilen dalga formları "sismojeodezik"

dalga formları olarak isimlendirilmektedir. GPS ve sismometre verilerinin optimal kestirimi ile elde edilen yer değiştirme ve hız dalga formlarının, yakın alanda 4.5-5.5 ve daha büyük depremlere ait P-dalgasının tespit edilmesi için yeterli olduğu ortaya konmuştur (Geng ve diğ., 2013; Crowell ve diğ., 2013). Şekil 2’de, Brawley depreminde (Mw 5.4) elde edilen GPS ve ivme ölçer verileri ile bunların optimal kombinasyonu ile elde edilen dalga formları gösterilmektedir.



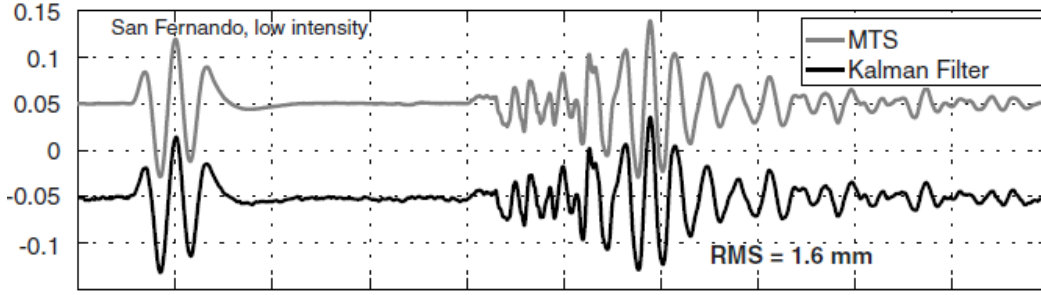
Şekil 2: Brawley depreminde (Mw 5.4) elde edilen GPS ve ivmeölçer dalga formları. SG, SMUnFilt ve SMFilt, sırasıyla sismojeodezik, filtrelenmemiş ve filtrelenmiş ivmeölçer dalga formlarını göstermektedir. Sağ eksen cm cinsinden yatay değişimi göstermektedir (Crowell ve diğ., 2013).

Sismik dalga formlarından elde edilen yer değiştirmeler, özellikle büyük depremlerde, uzun dalga boylu etkilere bağlı olarak olması gerekenden daha küçük bulunmaktadır. Sismik dalga formlarını uzun dalga boylu etkilerden arındırmak için yüksek geçirgen filtrelere tabi tutulmaktadır. Bu şekilde uzun dalga boylu hataların bir bölümü giderilmekle birlikte, Şekil 3’den kolayca görüleceği üzere, tüm uzun dalga boylu sinyaller elimine edildiğinden bu defa sismometrelerden elde edilen yer değiştirmelerin olması gerektiğinden daha da küçük çıkmasına neden olmaktadır.



Şekil 3. 2012 yılında A.B.D.’de meydana gelen Mw5.4 büyüklüğündeki Brawley depreminde, kaynağa 7.3 ve 21.2 km uzaklıktaki GPS istasyonlarında meydana gelen yerdeğiştirmeler. X-ekseni saniye cinsinden zaman Y eksenine ise cm cinsinden yerdeğiştirmelerdir (Geng ve diğ., 2013). Düşey kırmızı çizgi deprem anını, mavi yatay dalga formu ise depremden bir gün öncesine ait zaman serisini, kırmızı kesikli çizgiler ise 2s GPS hata sınırlarını göstermektedir.

GPS verileri ve sismometrelerin birlikte kullanımının sağlayacağı doğruluk ile ilgili, San Diego’da sarsma tablası ile çeşitli testler yapılmıştır (Bock ve diğ., 2011a.). Sarsma tablasında MTS 469DU Dijital Kontrolör kullanılarak yapılan simülasyonlarda, GPS ve ivme ölçerler kullanılmıştır. GPS ve ivme kayıtlarının optimal birleştirilmesi sonucunda elde edilen yer değiştirme dalga formları ile sarsma tablasını kontrol eden gerçek yer değiştirme değerleri karşılaştırılmıştır. Sonuçlar GPS/ivme ölçerlerin birlikte kullanılmasıyla elde edilen yer değiştirme dalga formlarıyla, sarsma tablasının gerçek değerleri arasındaki farkın karesel ortalama hatası 1.6 mm ile 3.6 mm arasında değişmektedir (Şekil 4).



Şekil 4. Sismojeodezik dalga formlarının sarsma tablasında yapılan sentetik deprem deneylerinde elde edilen doğruluğu. Yatay eksen saniye cinsinden zamana karşılık gelmektedir. Doğruluk için sarsma tablosunun MTS dijital kayıt değerleri referans alınmıştır. Değerlerin pozitif ve negatif olmaları sadece gösterim içindir (Bock ve diğ., 2011 b).

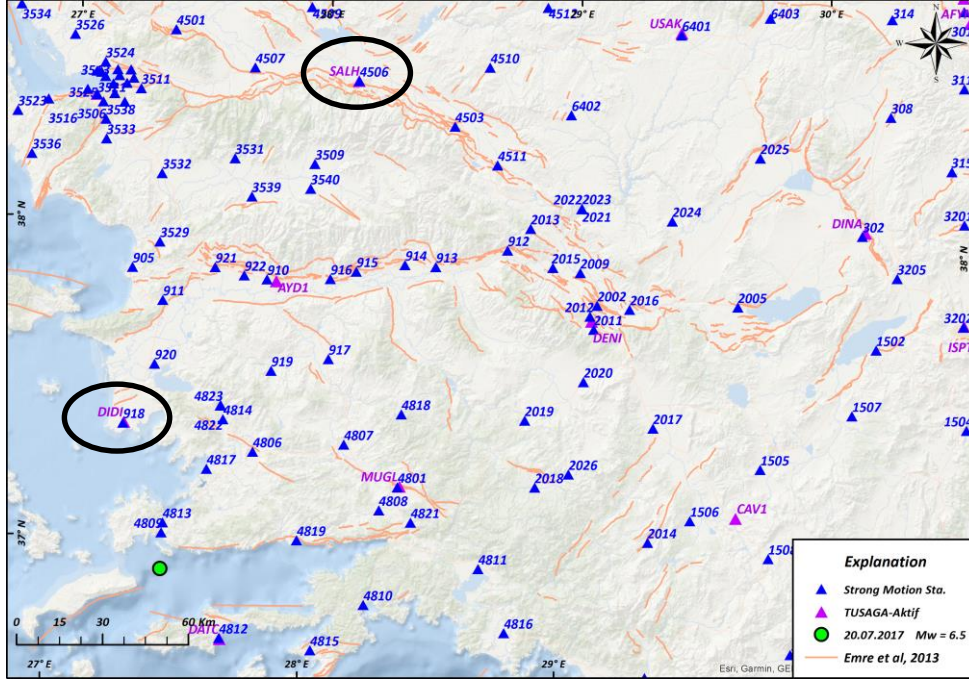
Her ne kadar iki sistemin güçlü yönleri kullanılsa da, sismojeodezi olarak ortaya çıkan yöntemin de bazı avantajları ve dezavantajları bulunmaktadır (Tablo 1).

Tablo 1: Sismometreler, GPS ve sismojeodezinin avantaj ve dezavantajları.

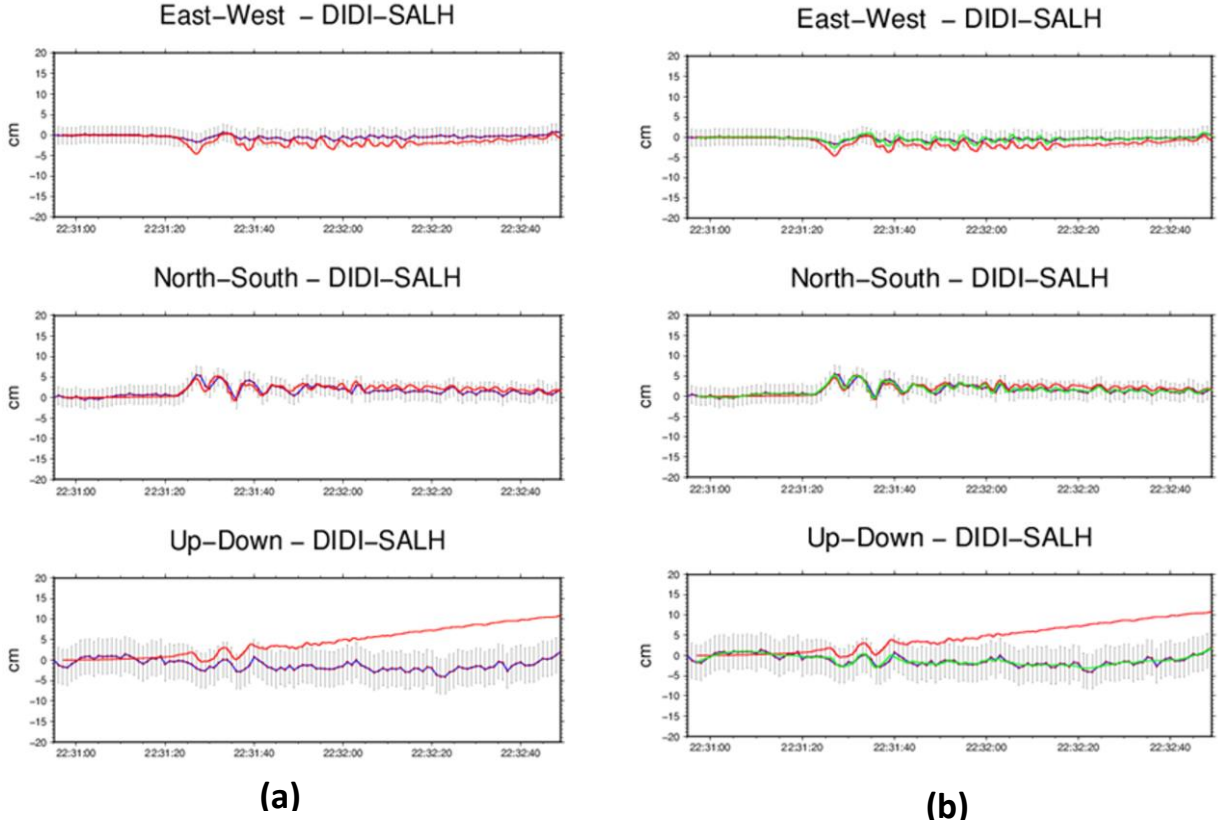
Yöntem	Avantajlar	Dezavantajlar
Sismometreler (Hız, İvme)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Örnekleme aralığı yüksek (<math>\geq 0.01</math> sn)</li> <li>• Küçük genlikli yer değiştirmelere duyarlı</li> <li>• Her bileşende aynı hassasiyet</li> <li>• Deprem kaynağına yakın olmak zorunlu değil</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uzun dalga boylu hatalar</li> <li>• Yer değiştirmeye dönüştürülmüş dalga formunda saçılım</li> <li>• Yakın istasyonlarda doyuma ulaşma</li> <li>• Düşük frekanslara duyarlı değil</li> </ul>
GPS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tek başına yüksek duyarlıklılı yer değiştirme dalga formu elde edebilme</li> <li>• Büyük depremlere daha duyarlı</li> <li>• Deprem sonrası kalıcı yer değiştirme hesabı</li> <li>• ~ 3 mm hassasiyet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Örnekleme aralığı sismometrelere göre düşük (1 sn)</li> <li>• Küçük genlikli yer değiştirmelere duyarlı değil</li> <li>• Düşey bileşende hassas değil</li> <li>• Deprem kaynağına yakın olmalı</li> <li>• Sinyal/gürültü oranı yüksek</li> </ul>
Sismojeodezi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek duyarlıklılı yer değiştirmeler ile yüksek doğrulukta büyüklük hesabı (kısa zamanda)</li> <li>• Gerçek zamanlı gözlem</li> <li>• &lt; 1 mm hassasiyet</li> <li>• 0.01 sn örnekleme aralığı</li> <li>• Uzun dalga boylu hatalardan ayıklanmış, genişbant dalga formu</li> <li>• Sinyal/gürültü oranı düşük</li> <li>• Erken uyarı altyapısı için uygun</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• GPS istasyon ağının gerekli noktalarda sıklaştırılması ve fay hattı üzerindeki GPS istasyonlarına ilave sismik cihaz yerleştirilmesi gerekliliği</li> <li>• Sistemin işler hale gelmesi için yazılım ihtiyacı</li> <li>• Uzman personel olmadığı için personel yetiştirilmesi ihtiyacı</li> </ul>

## 2.1. 20 Haziran 2017 Bodrum-Kos Depremi (Mw 6.5) Örneği

Proje süresi içerisinde çalışma alanında  $M \geq 4.5$  olan bir deprem meydana gelmediğinden, projede geçmiş tarihli depremler ile çalışılmıştır. Burada, 20 Haziran 2017 Bodrum-Kos Depremi için yapılan çalışma verilmiştir. 20 Haziran 2017 Bodrum-Kos Depreminde, SALH GPS istasyonu referans alınıp DIDI istasyonu ile çözüm yapılmıştır (Şekil 5). Şekil 6a'da depreme ait GPS (mavi çizgi) ve ivme (kırmızı çizgi) dalga formları verilmiştir. Up-Down bileşeninde ivme verisinde dirift gözlenmesine rağmen GPS dalga formunda herhangi bir dirift söz konusu değildir. Şekil 6b'de ise yeşil çizgi ile her iki sistemin birleştirilmesi ile elde edilen dalga formu verilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, sismojeodezi dalga formu oldukça hassas olarak karşımıza çıkmakta ve Up-Down bileşeninde gözlenen dirift söz konusu değildir.



Şekil 5. 20 Haziran 2017 Bodrum-Kos Depremi için yapılan hesaplamalardan kullanılan GPS ve ivme ölçer istasyonlarının dağılımı.



Şekil 6. (a) 20 Haziran 2017 Bodrum-Kos Depremine ait DIDI ve SALH GPS istasyonu kayıtları (mavi çizgi) ve ivme kayıtları (kırmızı çizgi), (b) ivme ve GPS kayıtlarının birleştirilmesi ile elde edilen dalga formu (yeşil çizgi).

### 3. Sonuç ve Öneriler

Deprem büyüklüğünün yüksek duyarlıklı belirlenmesi halen önemli bir sorundur. Satüre olmayan gözlem sistemleri (ivme ölçerler, GNSS Dalga formları) bu anlamda önemli katkılar sağlayabilmekte ve güvenli sonuçlar vermektedir. Büyük depremler için deprem büyüklüğünün kısa zaman içinde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Ülkemizde halihazırda farklı amaçlarla tesis edilmiş GNSS gözlem ağları bulunmakta ancak, bunların deprem amacıyla gerçek zamanlı olarak kullanımı henüz çok yenidir.

Hız ve ivme dalga formlarındaki uzun dalga boylu hatalar (drift vb.) yüksek duyarlıklı yer değiştirmelerin elde edilmesine izin vermemektedir.

Diğer yandan, GPS ile tek başına yüksek duyarlıklı sonsuz dalga boyu (DC)'na kadar yer değiştirme dalga formları belirlenebilmekle birlikte, örnekleme aralığı sismometrelere göre oldukça düşüktür ( $\leq 50$  Hz) ve küçük genlikli yer değiştirmelere sismometreler kadar duyarlı değildir.

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

Bu sistemler ile ilk birkaç saniyedeki maksimum P-dalgası yerdeğiştirmesi ile fay geometri ve kayma değerlerinin çözümlenerek moment büyüklüğünün yüksek duyarlıklı hesaplanması, Deprem Erken İkaz Sistemleri (DEİS)'nde kullanılabilir.

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

Bu çalışmada verilen bazı büyük depremler için elde edilen yerdeğiştirme dalga formları örnekleri, söz konusu dalga formlarının bu amaçla kullanılabilceğini göstermektedir.

### Kaynaklar

- Bock Y., Melgar D., Crowell B.W., (2011b), *Real-time strong Motion broadband displacements from collocated GPS and accelerometers*, Bull. Seismol. Soc. Am., (101), 2904-2925.
- Crowell B.W., Melgar D., Bock Y., (2013), *Earthquake magnitude scaling using seismogeodetic data*. Geophysical Research Letter, 40 (23), 6089-6094.
- Geng J., Bock Y., Melgar D., Crowell B.W., Haase J., (2013), *A new seismogeodetic approach to GPS and accelerometer observations of the 2012 Brawley seismic swarm: Implications for earthquake early warning*. Geoch. Geophy. Geosyst., (14), 2124-2142.
- Melgar D., Bock Y., Sanchez D., Crowell B.W., (2013), *On robust and reliable automated baseline corrections for strong motion seismology*. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 118:1177-1187.