



Yüksek zamansal çözünürlüklü çoklu-GNSS PPP-AR yönteminin yatay yönlü dinamik davranışları tespit edebilme yeteneğinin değerlendirilmesi

Evaluation of the ability of the high-rate multi-GNSS PPP-AR method to detect dynamic behaviors in horizontal direction

Mert Bezcioglu¹ , Cemal Özer Yiğit^{2,*} , Ahmet Anıl Dindar³ , Özgür Avcı⁴ 

^{1,2} Gebze Teknik Üniversitesi, Harita Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli Türkiye

³ Gebze Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 41400, Kocaeli Türkiye

⁴ Sistem A.Ş. Sürekli İzleme ve Referans İstasyonu Sistemleri Bölümü, Ataşehir, İstanbul

Öz

Bu çalışma geleneksel-Hassas Nokta Konumlama (PPP: Precise Point Positioning) ve PPP-AR (Ambiguity Resolution) yöntemlerinin yapı sağlığı izlemeleri ve Global Navigation Satellite Systems (GNSS)-sismolojisi uygulamalarındaki etkinliğini ve ilgili tekniklere çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını araştırmaktadır. Yöntemlerin performanslarını değerlendirmek için yatay yönde hareket edebilme kabiliyetine sahip bir sarsma tablası kullanılarak olası yapısal hareketleri temsil eden 5 mm ila 10 mm arasında değişen genliklere ve 0.3 Hz ila 1.2 Hz arasında frekanslara sahip harmonik salınımlar üretilmiştir. Ayrıca, 1989 Loma Prieta depremi, PPP tekniklerinin GNSS-sismolojisi uygulamalarındaki performanslarını incelemek için simüle edilmiştir. 20 Hz örneklem aralığında toplanan veriler sadece-Global Positioning System (GPS) ve GPS/Galileo uydusu gözlemleri kullanılarak geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile değerlendirilmiş, elde edilen sonuçlar frekans ve zaman alanında Linear Variable Differential Transformer (LVDT) verileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar frekans alanında farklı uydusu kombinasyonları ile iki yöntemden de elde edilen frekans ve genlik değerlerinin benzer olduğunu ifade ederken, zaman alanında PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine olan üstünlüğünü ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açık bir şekilde ortaya koymaktadır.

Anahtar kelimeler: GPS, Galileo, PPP, PPP-AR, Dinamik deplasman

1 Giriş

Yüksek zamansal çözünürlüklü GNSS (Global Navigation Satellite Systems) tekniği, insan yapımı yapıların dinamik deplasmanlarını ve büyük depremlerin neden olduğu yüzey dalgası formlarını izlemek için oldukça güçlü bir yöntemdir. Dinamik deplasmanların tespiti uygulamalarında en az iki GNSS alıcısı gerektiren gerçek-zamanlı ve sonradan-değerlendirme rölatif (bağıl) konum belirleme tekniği yaygın olarak kullanılmaktadır. İnsan yapımı mega yapıların [1-6] ve uzun veya kısa açıklıklı köprülerin [7-10] dinamik deplasman tepkilerinin belirlenmesinde rölatif konum belirleme tekniği kullanılarak çok sayıda çalışma yapılmış ve yöntemin etkinliği

Abstract

This study investigates the ability of traditional-PPP (Precise Point Positioning) and PPP-AR (Ambiguity Resolution) techniques in structural health monitoring and Global Navigation Satellite Systems (GNSS)-seismology applications, and the contribution of multi-GNSS observations to both methods. To evaluate the performances of the methods, harmonic oscillations with amplitudes ranging from 5 mm to 10 mm and frequency between 0.3 Hz and 1.2 Hz, representing possible structural motions, were generated using a shake table. Furthermore, the 1989 Loma Prieta earthquake was simulated to examine the performance of PPP techniques in GNSS-seismology applications. The data collected at 20 Hz sampling rate were evaluated employing the traditional-PPP and PPP-AR techniques using only-Global Positioning System (GPS) and GPS/Galileo satellite observations, and the results were compared with Linear Variable Differential Transformer (LVDT) data in the frequency and time domain. Although the outcomes revealed that the frequency and amplitude values obtained from both methods with different satellite combinations in the frequency domain were comparable to each other, they clearly demonstrate that the superiority of the PPP-AR technique over the traditional-PPP technique in the time domain and the contribution of multi-GNSS observations.

Keywords: GPS, Galileo, PPP, PPP-AR, Dynamic displacement

kanıtlanmıştır. Ayrıca, dinamik deplasmanların tahmin edilmesinde rölatif konum belirleme tekniğinin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek için birkaç deneysel çalışma da gerçekleştirilmiştir [11-14]. Ancak bu çalışmalarda kullanılan rölatif konum belirleme tekniği, sabit bir yerde bulunan en az bir GNSS referans istasyonunun kullanılmasını gerektirmekte ve yöntemin bu bağımlılığı, büyük/mega depremler sırasındaki güçlü yer sarsıntıları nedeniyle referans istasyonunun da meydana gelen deplasmanlar sebebiyle gezici istasyondan elde edilen deplasman bilgilerinin hatalı olmasına yol açmaktadır [15]. Son yıllarda, tek bir GNSS alıcısı ile hassas yörünge ve saat bilgilerini kullanarak santimetre düzeyinde konum elde

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: cyigit@gtu.edu.tr (C. Ö. Yiğit)

Geliş / Received: 07.02.2022 Kabul / Accepted: 03.10.2022 Yayımlanma / Published: 14.10.2022

doi: 10.28948/ngumuh.1141383

etmeye olanak sağlayan geleneksel-PPP (Precise Point Positioning) tekniği ortaya çıkmış ve oldukça uygun maliyetli bir teknik olarak bilim dünyasında popüler bir hale gelmiştir [16-19]. Yüksek zamansal çözünürlüklü geleneksel-PPP tekniğinin deformasyonların izlenmesi, GPS (Global Positioning System)-sismolojisi, deprem erken uyarı sistemleri ve yapı sağlığı izleme uygulamaları için etkili bir yöntem olduğu kanıtlanmış durumdadır [20-30]. Ancak, geleneksel-PPP tekniğinde başlangıç faz belirsizliği değerinin tam sayı değerine yakınsaması için ölçü süresinin yeterli uzunlukta olması gerekmektedir [31]. Geleneksel-PPP yönteminin aksine ise PPP-AR (Ambiguity Resolution) tekniğinde başlangıç faz belirsizliği tam sayı olarak çözümlenmekte ve bu durum, PPP-AR tekniğini özellikle kısa ölçü sürelerinde geleneksel-PPP tekniğine göre daha avantajlı kılmaktadır. Li vd. [32] statik ve kinematik-PPP/PPP-AR tekniklerini, GPS ve BeiDou uydu kombinasyonları ile değerlendirerek yakınsama süresi ve konum doğruluğu açısından incelemiş ve çoklu-GNSS PPP-AR tekniğinin üstünlüğünü açıkça ifade etmişlerdir. Li vd. [33] GPS, GLONASS, Galileo ve BeiDou uydu kombinasyonlarını kullanarak çoklu-GNSS PPP-AR yöntemini tekli ve ikili uydu kombinasyonları ile elde edilen PPP-AR tekniği ile karşılaştırmıştır. Sağa, yukarı ve yükseklik bileşenlerinde ilk sabitleme zamanı ve en hassas konum bilgisinin çoklu GNSS PPP-AR tekniği ile elde edildiğini açıkça vurgulamışlardır. Geng vd. [34] PPP-AR tekniği ile başlangıç faz belirsizliğinin ne kadar hızlı çözüldüğünü incelemek için GPS, BeiDou, Galileo ve QZSS uydu sistemleri ile üçlü frekans gözlemlerini kullanmışlardır. Elde edilen sonuçlar, üçlü frekans PPP-AR tekniğine ne kadar çok uydu sayısı dahil edilirse başlangıç faz belirsizliğinin tam sayı olarak elde edilme süresinin kısalttığını göstermiştir. Katsigianni vd. [35] sadece-Galileo, sadece-GPS ve çoklu-GNSS uydu gözlemlerinin kinematik PPP ve PPP-AR yöntemlerine olan katkısını incelemişlerdir. Çalışmada sadece-Galileo ve sadece-GPS tekniklerinden elde edilen konum hassasiyetinin aynı mertebede olduğu, fakat GPS uydu sistemine Galileo sisteminin dahil edilmesiyle PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde edilecek konum bilgisi hassasiyetinin yükseleceği ifade edilmiştir. Psychas vd. [36] farklı frekans ve uydu kombinasyonlarının konum doğruluğu ve başlangıç faz belirsizliği çözümüne olan etkisini incelemişlerdir. Çalışmada frekans sayısındaki artışın konum hassasiyetini ve başlangıç faz belirsizliği çözümünü iyileştirdiği açıkça ortaya konmuştur. Bezcioglu vd. [37] Antarktika'da gerçekleştirdikleri kinematik ve statik bir deneyde geleneksel-PPP tekniği ve PPP-AR tekniklerini karşılaştırmış ve PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine olan üstünlüğünü vurgulamışlardır. Bezcioglu vd. [38] Antarktika Yarımadasında bulunan Livingston Island'da bir Zodyak botu ile iki farklı günde statik ve kinematik GNSS ölçmeleri gerçekleştirmiş ve geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniği ile işlenen GNSS verileri rölatif konum belirleme tekniği ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP yöntemine olan üstünlüğünü açıkça ifade etmiştir. Yiğit vd. [39] GPS/GLONASS uydu kombinasyonlarına dayalı PPP-AR ve geleneksel-PPP tekniklerinin dinamik davranışları

belirleyebilme kabiliyetini araştırmış ve PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine olan üstünlüğünü açıkça ifade etmişlerdir.

Mevcut literatür incelendiğinde görülmektedir ki, kısa süreli dinamik davranışların tespiti çalışmalarında PPP-AR tekniğinin performansı oldukça az incelenmiştir. Buna ek olarak yukarıda tartışılan çalışmalardan Yiğit vd [39] hariç çoğu, genellikle 1 Hz örneklem aralığına sahiptir ve bu durum 1 Hz örneklem aralığından daha sık bir zamansal çözünürlükte PPP-AR tekniğinin 0.5 Hz'den daha yüksek frekans değerine sahip yapı hareketlerini veya kuvvetli yer hareketlerinden kaynaklanan deprem dalgalarını yakalama kabiliyetinin araştırılması gereken bir alan olduğunu göstermektedir. Ayrıca erişilen literatür çalışmalarında PPP-AR tekniğinin yapı sağlığı izlemeleri alanındaki etkinliği GPS/GLONASS uydu kombinasyonuna dayalı olarak incelenmiş, Galileo uydu takımıyla geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerine olan katkısından henüz söz edilmemiştir. Bu çalışma kapsamında literatürde bulunanlardan farklı olarak, 20 Hz örneklem aralığına sahip GPS ve GPS/Galileo gözlemlerine dayalı geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin çeşitli dinamik davranışları tespit edebilme yeteneği değerlendirilmiştir. Çalışmada olası yapısal hareketleri temsil ettiği düşünülen 5 mm-10 mm arasında değişen genlik ve 0.30 Hz ila 1.20 Hz arasında değişen frekans değerlerine sahip harmonik salınımlar, tek eksenli bir sarsma tablası kullanılarak üretilmiştir. Bu deneylere ek olarak, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin deprem dalga formlarını tespit edebilme yeteneklerini test etmek için 1989 Loma Prieta depremi simülasyonu yine aynı sarsma tablasında üretilmiştir. Çalışma kapsamında tasarlanan her iki deneyde de çoklu-GNSS gözlemlerinin geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerine olan katkısı değerlendirilmiştir. Bu çalışmayı, mevcut literatürde tartışılan çalışmalarından farklı kılan bir diğer özellik, yöntemlerin ve çoklu-uydu kombinasyonlarının her iki yöntemde de olan katkısının doğruluğunun GNSS'den bağımsız bir sensör olan ve mekanik olarak bağlandığı bir nesnenin hareketlerini algılayıp, milimetre-altı bir mertebede bir hassasiyetle deplasman bilgisi üretebilen Linear Variable Differential Transformer (LVDT) verilerine dayanarak ortaya çıkarılmış olmasıdır.

2 Materyal ve metot

Kısa süreli çeşitli dinamik hareketleri izlemek için GPS ve GPS/Galileo geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin elde edilmesi ve gerçekleştirilen dinamik hareketlerin tasarımı çalışmanın bu bölümünde özetlenmiştir. Çalışma kapsamındaki deneyler 27 Temmuz 2021 tarihinde Gebze Teknik Üniversitesi kampüsünde gerçekleştirilmiştir. Harmonik salınım ve deprem simülasyonu testlerinde, toplam deplasmanı 190 mm ile sınırlı olan ve hareketleri 100 Hz örneklem aralığında bir LVDT sensörü ile doğrulanmış tek eksenli bir sarsma tablası kullanılmıştır. Sarsma tablasının üzerine Şekil 1'de görülen ve 20 Hz örneklem aralığına sahip Leica GR30 alıcısı için gözlem toplayan Leica CGA60 GNSS anteni monte edilmiştir. Deneyler sırasında GPS/Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen

gözlem verileri deney sonrasında sadece-GPS ve GPS/Galileo uydu kombinasyonlarına dayalı olarak geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile değerlendirilmiştir. Geleneksel-PPP tekniği için Net_diff yazılımı kullanılırken, PPP-AR yöntemi için PRIDE PPP-AR yazılımı kullanılmıştır. Geniş ve dar bant aralıklarında GPS uyduları için sırasıyla %96.4 ve %50 oranında tam sayı belirsizliği elde edilirken, bu değerler Galileo uyduları için %66.7 ve %23.3 değerlerindedir. Çözüm parametrelerine ilişkin bilgiler ise Tablo 1'de ifade edilmiştir. Deneylerde geleneksel-PPP tekniğindeki başlangıç faz belirsizliğinin yakınsaması için alıcı açık bir konumda yaklaşık olarak 30 dakika hareketsiz olarak bekletilmiştir. Harmonik salınım deneylerinde Tablo 2'de ifade edilen frekans ve genlik değerine sahip, 50 saniyeden kısa süreli harmonik salınımlar ve detayları ilerleyen bölümlerde açıklanacak olan 1989 Loma Prieta depremi simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Tablo 2. Geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri için veri değerlendirme parametreleri

Seçenek	Geleneksel-PPP	PPP-AR
Örnekleme Aralığı	0.05 sn/20 Hz	0.05 sn/20 Hz
Uydu Yükseklik Açısı	10°	10°
Gözlemler	Kod+Faz	Kod+Faz
Troposferik Düzeltme	GPT2w+VMF1	GPT3+VMF3
Ağırlık Modeli (W)	a+b/sin(ele) "ele:yükseklik"	W = 1, ele > 30° W = 4 sin(ele)², ele < 30°
İyonosferik Düzeltme	İyonosfer-bağımsız Lineer Kombinasyon	İyonosfer-bağımsız Lineer Kombinasyon
Uydu Yörünge ve Saat	WUHAN	WUHAN
AR Ürünleri	-	WUHAN
Uydu ve Alıcı Faz Merkezi Ofseti ve Değişimi	Düzeltildi	Düzeltildi
Parametre Dengeleme Yöntemi	Kalman Filtre	En Küçük Kareler
Çözüm	İleri+Geri	İleri+Geri



Şekil 1. Çalışmada kullanılan GNSS anteni, alıcısı ve sarsma tablası

Geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile elde edilen çözümlerde alıcının koordinatları Uluslararası Yersel Referans Çerçevesinde (ITRF) belirlenmiştir. Ancak, dinamik hareketlerin tespit edilmesinin doğası gereği, yer merkezli kartezyen koordinatın doğrudan kullanımı, yapının yatay yönlü deplasman tepkilerini analiz etmek için uygun değildir. Bu sorunu çözmek için jeosentrik koordinatlar, toposentrik koordinat sistemine dönüştürülmelidir. Ayrıca, toposentrik sistem bileşenleri sırasıyla Kuzey ve Doğu yönlerini gösterdiğinden, sarsma tablasının yatay düzlemdeki deplasman bilgilerinin GNSS alıcısı ile elde edilmesi için, çalışmada tartışılan geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde EDİLEN deplasman bilgileri iki boyutlu benzerlik dönüşümü uygulanarak sarsma tablasının yönüne dönüştürülmüştür. Bu işlemler detaylı olarak Yiğit vd. [39]'de bahsedilmiştir.

Tablo 2. Harmonik salınım deneylerinde üretilen genlik ve frekans değerleri

Durum No	Salınım Frekansı (Hz)	Salınım Genliği (mm)
1	0.3	5.0
2	0.3	10.0
3	0.7	5.0
4	0.7	10.0
5	1.2	5.0
6	1.2	10.0

2.1 Net_diff yazılımı

Net_diff yazılımı Uluslararası GNSS Servisi (IGS) gibi diğer sunuculardan GNSS gözlem verileri ve bunun yanı sıra hassas yörünge/saat ya da bias (kayıklık) gibi ürünlerin indirilebildiği, ayrıca konumlandırma ve elde edilen sonuçların analizlerinin yapılabildiği bir programdır. Dr. Yize Zhang tarafından geliştirilmiş olan bu yazılım, kullanıcılara PPP, PPP-AR, RTK (Real-Time Kinematic), PPP-RTK gibi konum belirleme yöntemleriyle GNSS verilerini işleyebilme imkânı vermektedir. Küresel çapta aktif olarak kullanıcılara hizmet veren 4 GNSS (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) uydu takımıyla tüm sinyallerini tekli-, çiftli- ve üçlü-frekansa kadar desteklemektedir [40]. Konumlandırma kısmında yapılan işlemler sonrasında herhangi bir ek yazılıma gerek duymadan noktaya ait ITRF koordinat sisteminde üç koordinat bileşeninin konum-zaman grafiğini, noktaya ait karesel ortalama hata (KOH), standart sapma (STD) gibi istatistiksel parametrelerini vermektedir. Ayrıca uydu sayısı, uydu görünürlükleri, uyduların gökyüzündeki dağılımı gibi birçok bilgiyi görsel olarak sağlamaktadır.

2.2 PRIDE PPP-AR yazılımı

Wuhan Üniversitesi GNSS Araştırma Merkezi'ndeki PRIDE Laboratuvarı tarafından geliştirilen ve geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile çözüm elde etmeye olanak sağlayan Pride PPP-AR, açık kaynak kodlu bir yazılımdır. PRIDE PPP-AR yazılımı, okunabilirlik, modülerlik, genişletilebilirlik ve sürdürülebilirlik ilkelerine göre tasarlanmış olup, bu ilkeler çerçevesinde PRIDE PPP-AR yazılımı daha esnek ve rahat bir şekilde kullanılmaktadır. PRIDE PPP-AR, Linux, Mac OS işletim sistemini desteklemekle birlikte Windows işletim sisteminde çalışan bir modülü de bulunmaktadır. PRIDE PPP-AR yazılımı

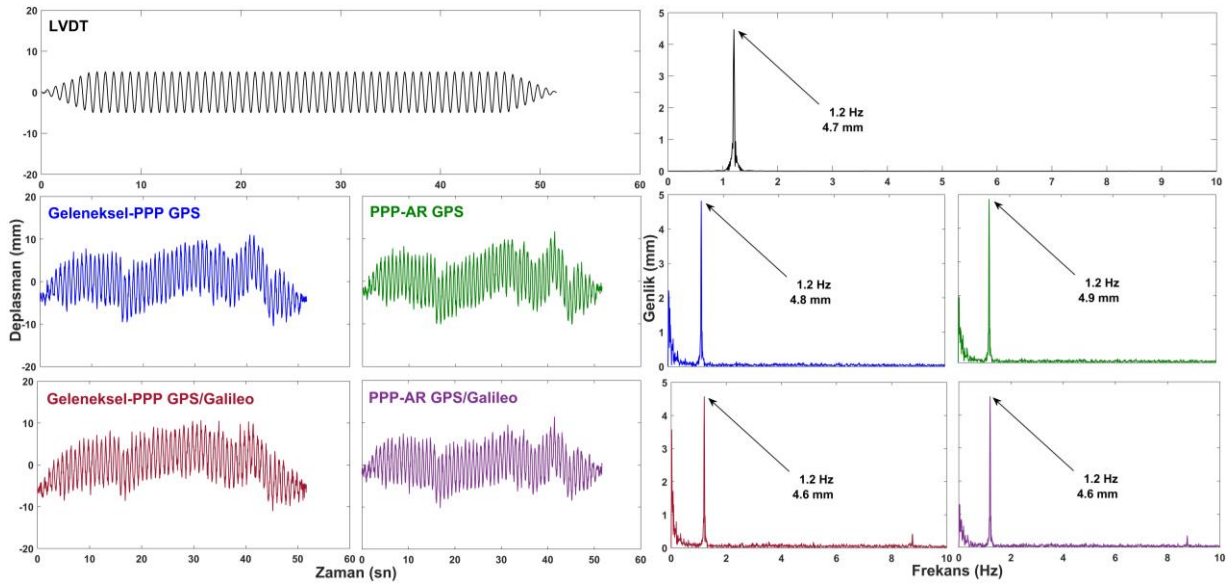
temel olarak farkları alınmamış işlem ve başlangıç faz belirsizliği modüllerinden oluşmaktadır. Farkları alınmamış işlem modülü, veri temizleme ve parametre tahminlerini içermekte ve geniş/dar banttaki faz belirsizliklerini belirlemekten sorumludur. Geleneksel-PPP çözümleri bu aşamadan sonra elde edilebilir ve bu belirsizlik tahminleri kullanılarak başlangıç faz belirsizliği modülü daha sonrasında bu belirsizlikleri tam sayı olarak çözmek ve sabitlemek için faz saati bias ürünlerini kullanmaktadır [41]. Geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin detaylı matematiksel modeli Atiz vd. [42]'de detaylı olarak ifade edilmiştir.

3 Bulgular ve tartışma

Geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin kısa süreli dinamik davranışları tespit edebilme performansı ve bu yöntemlere çoklu-GNSS gözlemlerinin katkıları çalışmanın bu bölümünde değerlendirilecektir. Geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin performanslarını incelemek için tasarlanan deneylerde LVDT verileri referans olarak kullanılmıştır. Daha önce belirtildiği gibi, LVDT verileri 100 Hz örnekleme aralığına sahip olduğundan karşılaştırmayı eşit şartlarda gerçekleştirmek için LVDT verileri 20 Hz örnekleme aralığına düşürülmüştür.

Deneylerden 1.2 Hz frekans ve 5 mm genliğe sahip olan 5. durum, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin

harmonik salınımları yakalamadaki etkinliğini incelemek ve çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını değerlendirmek için örnek olarak seçilmiş ve LVDT, geleneksel-PPP ve PPP-AR yaklaşımlarından sadece-GPS ve GPS/Galileo uydu kombinasyonlarına dayalı olarak türetilen zaman serileri ve zaman serilerinden elde edilen Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) spektrumu Şekil 2'de ifade edilmiştir. İlgili şekilden de görüleceği üzere, GNSS tabanlı zaman serileri birbirleri ile oldukça tutarlı ve tüm yöntemlerden elde edilen salınım frekansları eşittir. Ek olarak, sadece-GPS gözlemlerine dayalı olarak elde edilen geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin kısa süreli dalgalanmaları birbirlerine benzerken, GPS/Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen zaman serilerinin birbirlerinden kısmen ayrıştığı net olarak fark edilebilmektedir. Şekil 2'deki zaman serileri dikkate alındığında, GPS/Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen PPP-AR tekniğinden elde edilen zaman serisi geleneksel-PPP tekniğine kıyasla daha tutarlı olduğu da açıkça görülmektedir. Bu durum çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açıkça ifade etmektedir. Frekans alanında elde edilen bulgular dikkate alındığında, tepe frekansına karşılık gelen genlik değerlerinde oldukça küçük farklılıklar göze çarpmaktadır.



Şekil 2. Örnek durumun zaman serileri (sol) ve FFT spektrumları (sağ)

Tablo 3. Tüm durumlar için FFT spektrumu değerleri

Durum No	LVDT		Geleneksel-PPP GPS		PPP-AR GPS		Geleneksel-PPP GPS/Galileo		PPP-AR GPS/Galileo	
	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)	Frek. (Hz)	Gen. (mm)
1	0.3	3.9	0.3	4.0	0.3	4.0	0.3	3.9	0.3	3.9
2	0.3	7.8	0.3	7.9	0.3	7.9	0.3	7.9	0.3	7.8
3	0.7	3.9	0.7	3.9	0.7	3.9	0.7	3.8	0.7	3.8
4	0.7	7.7	0.7	8.1	0.7	8.1	0.7	7.9	0.7	7.9
5	1.2	4.7	1.2	4.8	1.2	4.9	1.2	4.6	1.2	4.6
6	1.2	8.9	1.2	9.5	1.2	9.5	1.2	9.2	1.2	9.2

Geleneksel-PPP tekniği ile LVDT arasındaki farklılıklar sadece-GPS ve GPS/Galileo uydu kombinasyonu içinde 0.1 mm iken, PPP-AR tekniği için bu farklar sırasıyla 0.2 mm ve 0.1 mm'dir. Frekans alanında elde edilen bu bulgular, harmonik salınımların baskın frekans ve buna karşılık gelen genlik değerlerinin ilgili yöntem ve uydu kombinasyonları ile benzer bir şekilde elde edilebileceğine işaret etmektedir.

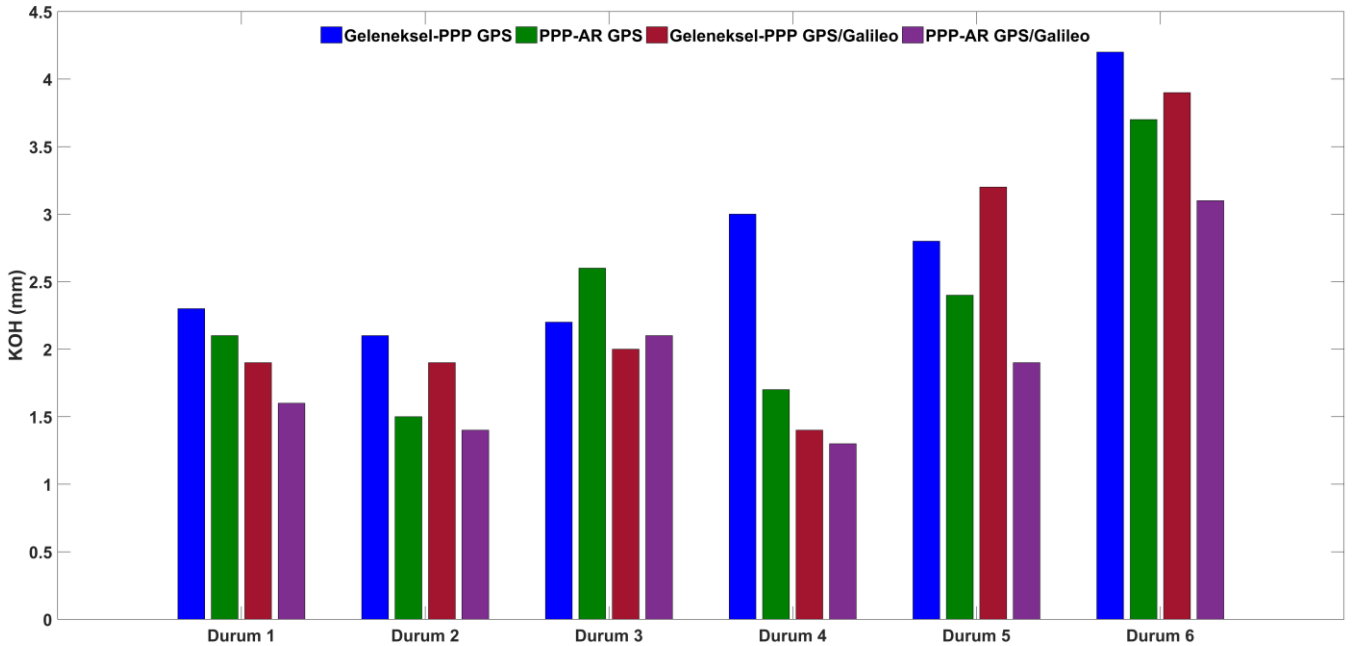
Tablo 2'de belirtilen her bir durum için çalışmanın amacı doğrultusunda tartışılan geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinden türetilen zaman serilerinin FFT analizlerinin sonucu Tablo 3'te ifade edilmiştir. Her iki uydu kombinasyonu için geleneksel-PPP ve PPP-AR metodlarının çalışma kapsamında sarsma tablası kullanılarak üretilen salınım frekanslarını başarılı bir şekilde yakaladığı açıkça görülmektedir. Bununla birlikte, baskın frekansa karşılık gelen genlik değerlerinde mm düzeyinde farklılıklar bulunmaktadır. Sadece-GPS uydu kombinasyonu için geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinden elde edilen genlik değerleri ile LVDT arasındaki farklar 0.0 mm ile 0.6 mm

arasında değişirken, GPS/Galileo uydu kombinasyonu için bu değerler 0.0 mm ile 0.3 mm arasında değişmektedir. Bu sonuçlar, harmonik salınımların tepe frekansına karşılık gelen genlik değerlerinin elde edilmesinde geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin benzer performans sergilediğini ifade ederken, çoklu-GNSS tekniği ile kısmen daha başarılı genlik değerlerinin elde edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Frekans alanındaki tartışmalara ek olarak geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin zaman alanındaki başarısını incelemek ve yöntemlere çoklu-GNSS ölçümlerinin etkisini daha da detaylandırmak için GNSS-tabanlı yöntemlerden elde edilen zaman serilerinin referans LVDT sensörü ile olan farklarının maksimum ve KOH değerleri hesaplanmış ve elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmuştur. Maksimum hata değerleri göz önüne alındığında çoklu-GNSS PPP-AR tekniğinin diğer yaklaşımlardan kısmen daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Sadece-GPS gözlemlerine dayalı olarak geleneksel-PPP tekniğinden elde edilen değerler 5.4

Tablo 4. Tüm durumlar için LVDT ve GNSS tabanlı yöntemler arasındaki farkların maksimum ve KOH değerleri

Durum No	Geleneksel-PPP GPS		PPP-AR GPS		Geleneksel-PPP GPS/Galileo		PPP-AR GPS/Galileo	
	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)	Maks. (mm)	KOH (mm)
1	6.5	2.3	6.0	2.1	6.1	1.9	4.7	1.6
2	6.2	2.1	4.4	1.5	6.7	1.9	4.2	1.4
3	5.4	2.2	6.1	2.6	5.1	2.0	5.0	2.1
4	7.8	3.0	5.3	1.7	4.1	1.4	4.4	1.3
5	7.1	2.8	6.8	2.4	7.9	3.2	6.5	1.9
6	9.7	4.2	8.5	3.7	8.5	3.9	7.4	3.1



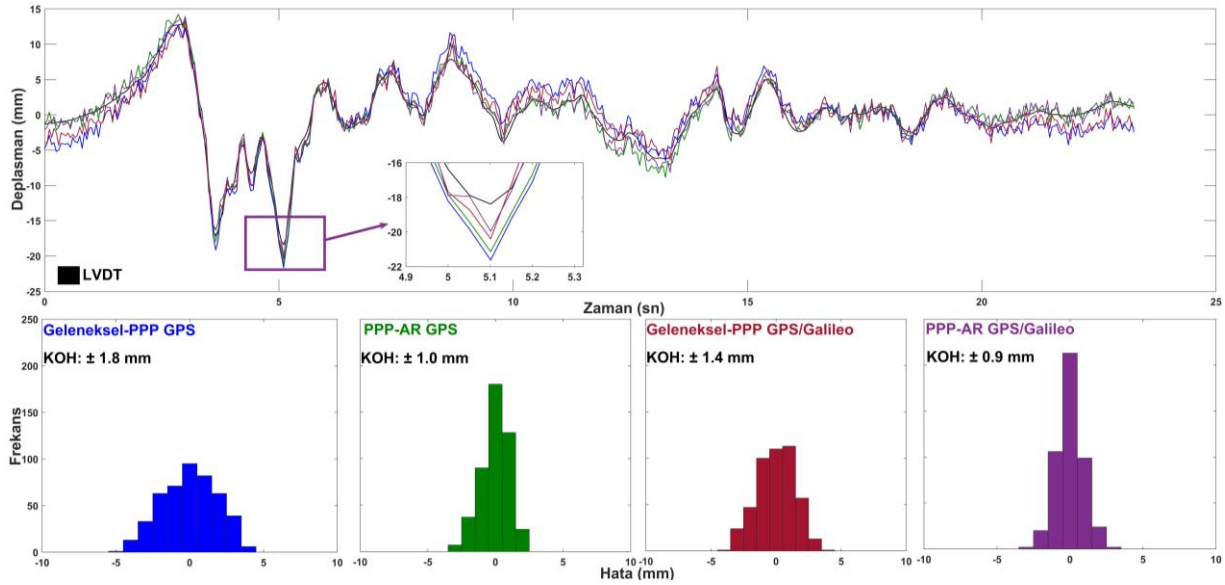
Şekil 3. Tüm durumlar için GNSS tabanlı yöntemler ve LVDT arasındaki farkların KOH değerleri

mm ile 9.7 mm arasında değişirken iken, PPP-AR tekniği için bu değerler 4.4 mm ile 8.5 mm arasında değişmektedir. GPS/Galileo uydu kombinasyonu için elde edilen maksimum hata değerlerinin ortalaması ise geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri için sırasıyla 6.4 mm ve 5.4 mm'dir. Tablo 4'te ifade edilen KOH değerlerinin bar grafiği ise Şekil 3'te görselleştirilmiştir. İlgili şekil ve tabloda da belirtildiği gibi Durum 1, 2, 4, 5 ve 6 için GPS/Galileo uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen PPP-AR tekniği diğer tüm yöntemlerden daha düşük KOH değerlerine sahiptir. Söz konusu bu beş durum için PPP-AR tekniğinden elde edilen KOH değerleri geleneksel-PPP tekniğinden elde edilen KOH değerlerinden ortalama olarak %15 daha düşüktür. Durum 3'te geleneksel-PPP tekniğinin tüm uydu kombinasyonları için daha düşük KOH değerine sahip olması, o zaman aralığında PPP-AR çözümüne dahil olan bias ürünlerinin düzensizliği ile ilgili olabilir. Ayrıca sadece-GPS gözlemleri ve GPS/Galileo gözlemleri ile elde edilen sonuçlar incelendiğinde çoklu-GNSS gözlemlerinin daha düşük KOH değeri sağladığı açıktır. Zaman alanındaki değerlendirme sonuçları, PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP yönteminden daha üstün bir performans gösterdiğini açıkça vurgulamakta ve çoklu-GNSS gözlemlerinin her iki yönetime olan katkısını net olarak ortaya koymaktadır.

Daha önce de bahsedildiği gibi, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin şiddetli yer sarsıntıları kaynaklı deprem dalga formlarını tespit edebilme yeteneği de ayrıca değerlendirilmiştir. Yöntemlerin performansının incelenmesi için sarsma tablası üzerinde 6.9 Mw Loma Prieta depremi üretilmiştir. LVDT verileri, harmonik salınım deneylerine benzer bir şekilde sismik dalga formlarının tespit edilmesinde geleneksel-PPP ve PPP-AR yaklaşımlarının etkinliğini doğrulamak için referans olarak kullanılmıştır.

San Andreas fay hattı üzerindeki Mw 6.9 Loma Prieta depremi, 17 Ekim 1989'da meydana gelmiştir. Deprem yüzeye oldukça yakın ve mekanizması yanallıdır. Deprem merkez üssü kırsal kesimde olmasına rağmen, kuvvetli yer hareketleri nedeniyle eyaletler arası otoyollar büyük ölçüde etkilenmiş, çok sayıda köprü, üst geçit ve viyadük kısmen veya tamamen çökmüştür. Bu çalışmada kullanılan deplasman verileri California Geological Survey (CGS) tarafından işletilen Gilroy#1 istasyonunda kaydedilmiştir. Kayıt istasyonu, merkez üssünden yaklaşık 30 km uzaktadır ve deprem sırasında kaydedilen verilerin Doğu-Batı bileşeni kullanılmıştır.

Şekil 4, Loma Prieta depreminin seçilen bir kaydının simülasyonu ile geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinden elde edilen deplasman zaman serilerinin yanı sıra, LVDT ve çalışma kapsamında tartışılan yöntemler arasındaki farkların histogram grafiklerini ve bu farkların KOH değerlerini içermektedir. Her iki uydu kombinasyonuna dayalı olarak elde edilen yöntemlerin LVDT ile oldukça iyi bir uyum sergilediği açıkça görülmektedir. Elde edilen farkların histogramlarına bakıldığında, tüm yöntemlerin Gauss hata dağılımına uygun olduğu ve KOH değerlerinin GPS ve GPS/Galileo için sırasıyla 1.8 mm, 1.0 mm, 1.4 mm ve 0.9 mm olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını açıkça göstermekle birlikte PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğine olan üstünlüğünü açık bir şekilde vurgulamaktadır. Loma Prieta deprem simülasyonu deneyi sonuçları güçlü yer sarsıntılarının neden olduğu sismik dalga formlarının geleneksel-PPP ve PPP-AR teknikleri ile başarılı bir şekilde karakterize edilebileceğini ve ayrıca, çoklu-GNSS PPP-AR tekniği ile kısmen daha doğru deplasman bilgisi elde edilebileceğine işaret etmektedir.



Şekil 4. Loma Prieta depremi simülasyondan elde edilen zaman serileri (üst) ve LVDT ile GNSS tabanlı yöntemler arasındaki hataların histogram ve KOH değerleri (alt)

4 Sonuçlar

Bu çalışma, geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin 50 saniyeden kısa süreli ve yatay yönlü dinamik hareketleri ve sismik dalga formlarını tespit edebilme yeteneklerini ve her iki yöntemde de çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısını içermektedir. Çalışmanın amacı doğrultusunda, 5 mm-10 mm arasında değişen genlik ve 0.30 Hz ile 1.20 Hz arasında değişen salınım frekansına sahip 6 adet harmonik salınım deneyi ve 6.9 Mw büyüklüğündeki 1989 Loma Prieta depreminin simülasyonu tek eksenli bir sarsma tablası kullanılarak üretilmiştir. Gerçekleştirilen deneylerde geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerinin dinamik hareketleri tespit edebilme kabiliyetlerinin doğrulanması GNSS-bağımsız LVDT sensörü ile gerçekleştirilmiştir. Frekans alanındaki harmonik salınım deneylerinin analizi, dinamik deplasmanların baskın frekans değerlerinin GPS ve GPS/Galileo uydu kombinasyonları kullanılarak her iki yöntemle de başarılı bir şekilde elde edilebileceğini ifade etmektedir. Buna ek olarak tespit edilen baskın frekansın genlik değerlerinde mm-altı düzeyde farklar vardır. Bu farklılıkların tüm uydu kombinasyonları ve her iki yöntem için de 0.6 mm'nin altında kaldığı düşünülürse söz konusu tekniklerin frekans alanındaki başarısı oldukça açıktır. Geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin harmonik salınımları algılama performansını daha da detaylandırmak amacıyla zaman alanında da analizler gerçekleştirilmiştir. Bu alanda elde edilen bulgular, PPP-AR tekniğinin geleneksel-PPP tekniğinden biraz daha iyi performans gösterdiğini ve iki yaklaşıma da çoklu-GNSS gözlemlerinin katkısı açıkça ortaya çıkarmıştır. Geleneksel-PPP ve PPP-AR yöntemlerinin şiddetli depremler sırasında meydana gelen kuvvetli yer hareketlerinin neden olduğu sismik dalga formlarını tespit etme performansı 6.9 Mw büyüklüğüne sahip 1989 Loma Prieta depremi simülasyonu ile değerlendirilmiştir. Bu simülasyon deneyinde de çoklu-GNSS PPP-AR yaklaşımı geleneksel-PPP tekniğinden biraz daha iyi performans gösterirken, çoklu-GNSS gözlemlerinin geleneksel-PPP ve PPP-AR tekniklerine olan olumlu katkısı bir kez daha görülmüştür.

Teşekkür

Yazarlar Net_diff yazılımı için Dr. Yize Zhang'a, PRIDE PPP-AR yazılımı için Wuhan Üniversitesindeki PRIDE Laboratuvarına, saha çalışmalarındaki desteği için Arş. Gör. Barış Karadeniz'e, çalışmada kullanılan alıcı/anten desteği için Sistem A.Ş. ve LeicaGeosystems AG firmalarına teşekkür eder.

Çıkar çatışması

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %11

Kaynaklar

[1] M. Celebi, GPS in pioneering dynamic monitoring of long-period structures, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 20(5-8), 477-483, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(00\)00094-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(00)00094-4).

- [2] X. Li, L. Ge, E. Ambikairajah, C. Rizos, Y. Tamura and A. Yoshida, Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system, *GPS Solution*, 10(4), 233-247, 2006. <https://doi.org/10.1007/s10291-006-0023-y>.
- [3] P. Breuer, T. Chmielewski, P. Gorski, E. Konopka and L. Tarczynski, The Stuttgart TV tower—Displacement of the top caused by the effects of sun and wind, *Engineering Structures*, 30(10), 2771-2781, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.03.008>.
- [4] H.S. Park, H.G. Sohn, I.S. Kim and J.H. Park, Application of GPS to monitoring of wind-induced responses of high-rise buildings, *Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17(1), 117-132, 2008. <https://doi.org/10.1002/tal.335>.
- [5] C.O. Yigit, X. Li, C. Inal, L. Ge and M. Yetkin, Preliminary evaluation of precise inclination sensor and GPS for monitoring full-scale dynamic response of a tall reinforced concrete building, *Journal of Applied Geodesy*, 4(2), 103-113, 2010. <https://doi.org/10.1515/jag.2010.010>.
- [6] P. Gorski, Dynamic characteristic of tall industrial chimney estimated from GPS measurement and frequency domain decomposition, *Engineering Structures*, 148, 277-292, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.066>.
- [7] G.W. Roberts, X. Meng and A. Dodson, Integrating a global positioning system and accelerometers to monitor deflection of bridges, *Journal of Surveying Engineering*, 130(2), 65-72, 2004. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2004\)130:2\(65\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:2(65)).
- [8] X. Meng, A.H. Dodson and G.W. Roberts, Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers, *Engineering Structures*, 29(11), 3178-3184, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.03.012>.
- [9] F. Moschas and S. Stiros, Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer, *Engineering Structures*, 33(1), 10-17, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.09.013>.
- [10] Y. Xu, J.M.W. Brownjohn, D. Hester and K.Y. Koo, Long-span bridges: Enhanced data fusion of GPS displacement and deck accelerations, *Engineering Structures*, 147, 639-651, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.06.018>.
- [11] W.S. Chan, Y.L. Xu, X.L. Ding, Y.L. Xiong and W.J. Dai, Assessment of dynamic measurement accuracy of GPS in three directions, *Journal of Surveying Engineering*, 132(3), 108-117, 2006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2006\)132:3\(108\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2006)132:3(108)).
- [12] A. Nickitopoulou, K. Protopsalti and S.C. Stiros, Monitoring dynamic and quasi-static deformations of large flexible engineering structures with GPS: Accuracy, limitations and promises, *Engineering Structures*, 28(10), 1471-1482, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.02.001>.
- [13] P.A. Psimoulis and S.C. Stiros, Experimental assessment of the accuracy of GPS and RTS for the

- determination of the parameters of oscillation of major structures, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(5), 389-403, 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8667.2008.00547.x>.
- [14] G. Wang, F. Blume, C. Meertens, P. Ibanez and M. Schulze, Performance of high-rate kinematic GPS during strong shaking: Observations from shake table tests and the 2010 Chile earthquake, *Journal of Geodetic Science*, 2(1), 1-15, 2011. <https://doi.org/10.1186/BF03352300>.
- [15] P. Xu, C. Shi, R. Fang, J. Liu, X. Niu, Q. Zhang and T. Yanagidani, High-rate Precise Point Positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units, *Journal of Geodesy*, 87, 361-372, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0606-z>.
- [16] J.F. Zumberge, M.B. Hefflin, D.C. Jefferson, M.M. Watkins and F.H. Webb, Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research*, 102(B3), 5005-5017, 1997. <https://doi.org/10.1029/96JB03860>.
- [17] J. Kouba and P. Héroux, Precise Point Positioning using IGS orbit and clock products, *GPS Solutions*, 5, 12-28, 2001. <https://doi.org/10.1007/PL00012883>.
- [18] T. Li, J. Wang and D. Laurichesse, Modeling and quality control for reliable Precise Point Positioning integer ambiguity resolution with GNSS modernization, *GPS Solutions*, 18(3), 429-442, 2014. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0342-8>.
- [19] B. Karadeniz, M. Bezcioglu, Ö.F. Bilgen ve C.Ö. Yiğit, GPS/Galileo PPP-AR ve PPP yöntemlerinin doğruluklarının gözlem süresi ve uydu kombinasyonları açısından incelenmesi, *AKÜ FEMÜBİD*, 21(6): 1377-1392, 2021. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1003382>.
- [20] J.C. Savage, W. Gan, W.H. Prescott and J.L. Svarc, Strain accumulation across the coast ranges at the latitude of San Francisco 1994–2000, *Journal of Geophysical Research*, 109 (B3), B03413, 2004. <https://doi.org/10.1029/2003JB002612>.
- [21] E. Calais, J.Y. Han, C. Demets and J.M. Nocquet, Deformation of the North American plate interior from a decade of continuous GPS measurements, *Journal of Geophysical Research*, 11(6), 1-23, 2006. <https://doi.org/10.1029/2005JB004253>
- [22] J. Kouba, Measuring seismic waves induced by large earthquakes with GPS, *Studia Geophysica et Geodaetica*, 47, 741-755, 2003. <https://doi.org/10.1023/A:1026390618355>.
- [23] A. Avallone, M. Marzario, A. Cirella, A. Piatanesi, A. Rovelli, C. Di Alessandro, E. D’Anastasio, N. D’Agostino, R. Giuliani and M. Mattone, Very high rate (10 Hz) GPS seismology for moderate-magnitude earthquakes: The case of the Mw 6.3 L’Aquila (central Italy) event, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B2), B02305, 2011. <https://doi.org/10.1029/2010JB007834>.
- [24] P. Xu, C. Shi, R. Fang, J. Liu, X. Niu, Q. Zhang and T. Yanagidani, High-rate Precise Point Positioning (PPP) to measure seismic wave motions: an experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units, *Journal of Geodesy*, 87, 361-372, 2013. <https://doi.org/10.1007/s00190-012-0606-z>.
- [25] Z. Nie, R. Zhang, G. Liu, Z. Jia, D. Wang, Y. Zhou and M. Lin, GNSS seismometer: Seismic phase recognition of real-time high-rate GNSS deformation waves, *Journal of Applied Geophysics*, 135, 328-337, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2016.10.026>.
- [26] J. Paziewski, R. Sieradzki and R. Baryła, Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: Application to precise dynamic displacement detection, *Measurement Science and Technology*, 29(3), 035002, 2018. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aa9ec2>.
- [27] P. Xu, Y. Shu, X. Niu, W. Yao and Q. Chen, High-rate multi-GNSS attitude determination: Experiments, comparisons with inertial measurement units and applications of GNSS rotational seismology to the 2011 Tohoku Mw9.0 earthquake, *Measurement Science and Technology*, 30(2), 024003, 2019. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/aaf987>.
- [28] F. Moschas, A. Avallone, V. Saltogianni and S.C. Stiros, Strong motion displacement waveforms using 10-Hz Precise Point Positioning GPS: an assessment based on free oscillation experiments, *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, 43(12), 1853-1866, 2014. <https://doi.org/10.1002/eqe.2426>.
- [29] M. Bezcioglu, B. Karadeniz, C.Ö. Yiğit, A.A. Dindar, F. Bezir ve Ö. Avci, Gerçek Zamanlı GNSS VADASE yaklaşımının dinamik deplasmanları yakalayabilme kabiliyetinin incelenmesi, *Harita Dergisi*, 167, 1-11, 2022
- [30] X. Li, M. Ge, X. Zhang, Y. Zhang, B. Guo, R. Wang, J. Klotz and J. Wickert, Real-time high-rate co-seismic displacement from ambiguity-fixed precise point positioning: Application to earthquake early warning, *Geophysical Research Letters*, 40(2), 295-300, 2013. <https://doi.org/10.1002/grl.50138>.
- [31] S. Choy, S. Bisnath, and C. Rizos, Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS Solutions*, 21, 13-22, 2017. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0545-x>.
- [32] P. Li, X. Zhang, and F. Guo, Ambiguity resolved precise point positioning with GPS and BeiDou. *Journal of Geodesy*, 91, 25-40, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0935-4>.
- [33] X. Li, X. Li, Y. Yuan, K. Zhang, X. Zhang, and J. Wickert, 2018. Multi-GNSS phase delay estimation and PPP ambiguity resolution: GPS, BDS, GLONASS, Galileo. *Journal of Geodesy*, 92, 579-608, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1081-3>.
- [34] J. Geng, J. Guo, X. Meng, and K. Gao, Speeding up PPP ambiguity resolution using triple-frequency GPS/BeiDou/Galileo/QZSS data, *Journal of Geodesy*, 94(6), 1-15, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00190-019-01330-1>.
- [35] G. Katsigianni, S. Loyer, and F. Perosanz, PPP and PPP-AR Kinematic Post-Processed Performance of

- GPS-Only, Galileo-Only and Multi-GNSS, Remote Sensing, 11, 2477, 2019. <https://doi.org/10.3390/rs11212477>.
- [36] D. Psychas, S. Verhagen and P.J.G. Teunissen, Precision analysis of partial ambiguity resolution-enabled PPP using multi-GNSS and multi-frequency signals, Advances in Space Research, 66, 2075–2093, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2020.08.010>.
- [37] M. Bezcioglu, C.O. Yigit, and A. El-Mowafy, Kinematic PPP-AR in Antarctic: Comparing Methods for Precise Positioning, Sea Technology, 60(2), 20-23, 2019.
- [38] M. Bezcioglu, C.Ö. Yiğit ve M.N. Bodur, Kinematik PPP-AR ve Geleneksel PPP Yöntemlerin Performanslarının Değerlendirilmesi: Antarktika Yarımadası Örneği, AKÜ FEMÜBİD, 19(1), 162-169, 2019. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.467336>.
- [39] C.O. Yigit, A. El-Mowafy, A.A. Dindar, M. Bezcioglu and I. Tiryakioglu, Investigating performance of high-rate GNSS-PPP and PPP-AR for structural health monitoring: Dynamic tests on shake table, Journal of Surveying Engineering, 147(1), 05020011:1-14, 2021. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000343](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000343).
- [40] https://github.com/YizeZhang/Net_Diff, Accessed 05 July 2022.
- [41] J. Geng, X. Chen, Y. Pan, S. Mao, C. Li, J. Zhou and K. Zhang, PRIDE PPP-AR: An Open-Source Software for GPS PPP Ambiguity Resolution, GPS Solutions, 23, 91, 2019. <https://doi.org/10.1007/s10291-019-0888-1>.
- [42] O.F. Atiz, S. Ogutcu, S. Alcaay, P. Li and I. Bugdayci, Performance investigation of LAMBDA and bootstrapping methods for PPP narrow-lane ambiguity resolution, Geo-Spatial Information Science, 24(4), 604-614, 2021. <https://doi.org/10.1080/10095020.2021.1942236>.

