

AKÜ FEMÜBİD 17(2017) 035504 (1030-1040)

AKU J. Sci. Eng. 17 (2017) 035504 (1030-1040)

DOI: 10.5578/fmbd.66278

Ağ RTK GNSS Yönteminin Yapı Sağlığı İzleme Çalışmalarında Kullanımı

Burak Akpınar¹, Nedim Onur Aykut¹, Ahmet Anıl Dindar², Koray Gürkan³, Engin Gülal¹¹ Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Harita Mühendisliği Bölümü, Esenler, İstanbul.³ Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gebze, Kocaeli.⁴ İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Avcılar, İstanbul.

e-posta: bakpinar@yildiz.edu.tr, oaykut@yildiz.edu.tr, adindar@gtu.edu.tr, kgurkan@istanbul.edu.tr,

egulal@yildiz.edu.tr

Geliş Tarihi:10.07.2017

; Kabul Tarihi:13.12.2017

Özet

Mühendislik yapılarının hareketlerinin izlenmesi, yapı sağlığı ve afet yönetimi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu yapıların sağlığı ve güvenilirliği, hareketlerinin izlenmesi, olası tehlikeli durumların zamanında tespit edilerek gerekli önlemlerin zamanında alınması ile sağlanabilir. Özellikle mühendislik yapıları başta olmak üzere tüm kritik yapıların inşası sırasında ve işletme evrelerinde durumlarının izlenmesi, bu yapılara etkiyen kuvvetlere karşı yapının verdiği tepkilerin ölçülerek analiz edilmesi ve düzensiz davranışların belirlenerek acil durum planlarının devreye sokulması afet yönetimi açısından da oldukça önem kazanmaktadır. Günümüzde mühendislik yapılarının izlenmesinde farklı ölçme ekipmanları kullanılmaktadır. Gelişen teknolojiye paralel olarak GNSS tekniği mühendislik yapılarındaki deplasmanların belirlenmesinde sağladığı yüksek doğruluk ve kullanım kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Bu çalışma GNSS ölçme yöntemlerinden Ağ RTK yönteminin yapı sağlığı izleme çalışmalarında kullanılabilirliğini incelemek amacıyla Tübitak projesi kapsamında geliştirilen ölçme sistemi ile sarsma tablasında testler yapılmıştır. Bu testler sırasında farklı yapı hareketlerine ilişkin senaryolar uygulanmış, geliştirilen sistemin Ağ-RTK yöntemi ile söz konusu hareketleri belirlemedeki performansı test edilmiş, sonuçlar sunulmuştur.

Anahtar kelimeler

GNSS; Ağ RTK; Yapı sağlığı izleme; Sarsma tablası

Use of the Network RTK GNSS Method in Structural Health Monitoring

Abstract

Monitoring the movements of engineering structures has a great importance in terms of structural health and disaster management. Health and reliability of these structures can be achieved by monitoring the structures, detecting the potentially dangerous situations and taking precautions on time. Monitoring the structures during the construction and operation stages, analyzing the responses of the structures to the external forces and determining the irregular behaviors of the structures is very important in terms of disaster management. Today, different types of measurement instruments are used for monitoring the structures. In parallel with the developing technologies, GNSS is being used for determining the displacements of the structures because of its high accuracy and easy to use characteristics. In this study, shake table tests were executed with the measurement system developed in the scope of Tübitak project for investigating the usability of the Network RTK GNSS measurement method. During these tests, scenarios related to different structural movements were applied with the shake table and the performance of the developed system was determined by using the Network RTK GNSS method and the results are presented.

Keywords

GNSS; Network RTK; Structural health monitoring, Shake table

© Afyon Kocatepe Üniversitesi

1. Giriş

Mühendislik yapılarının sağlığı ve güvenilirliği, bu yapıların hareketlerinin izlenerek olası tehlikeli durumların zamanında tespit edilmesi, bilgilerin karar vericilere ulaştırılması ve gereken önlemlerin

zamanında alınması ile sağlanabilir. Özellikle ülkemiz gibi deprem kuşağında bulunan ülkelerdeki mühendislik yapılarının imalat ve işletme evrelerindeki davranışlarının izlenmesi, yapı sağlığı ve afet yönetimi açısından önem kazanmaktadır.

Günümüzde mühendislik yapılarının hareketlerinin izlenmesinde jeodezik ölçme yöntemleri aktif olarak kullanılmakta, bu yöntemler ile yapıda meydana gelen deplasmanlar belirlenebilmektedir. Özellikle GNSS teknolojisinde yaşanan gelişmeler ile birlikte bu yöntem de yapı sağlığı izleme çalışmalarında aktif olarak kullanılmaya başlanmıştır. Statik, kinematik, klasik RTK ve PPP gibi GNSS ölçme ve değerlendirme yöntemlerinin yapı sağlığı izleme çalışmalarında kullanımı ile ilgili dünya genelinde ve ülkemizde pek çok örnek çalışma bulunmaktadır.

Çelebi (2000), Los Angeles' da 44 katlı bir bina üzerinde ivmeölçerler ve GPS sistemi ile rüzgâr ve trafikten kaynaklanan titreşimleri izleyerek ivmeölçer ve GPS sonuçlarını karşılaştırmıştır. Söz konusu çalışmada, GPS teknolojisindeki gelişmelerin uzun periyotlu yapıların gerçek zamanlı izlenmesine olanak sağladığını belirtmiş ve elde edilen rölatif yer değiştirmelerin, yapı dinamik özelliklerinin ve olası hasarların belirlenmesinde geleneksel olarak kullanılan ivmeölçerlere göre avantajlı olduğunu belirtmiştir.

Erdoğan ve ark. (2007) tarafından yapılan çalışmada, 2005 yılında gerçekleştirilen Avrasya Maratonu süresince, Boğaziçi Köprüsü'nün hareketlerini belirlemek amacıyla RTK GPS yöntemi ile ölçümler yapılmıştır. 75000 katılımcı ile gerçekleştirilen maraton süresince Boğaziçi Köprüsü hareketleri koşu, yürütüş, araç geçişi gibi aktiviteler karşısında köprü hareketleri RTK GPS verileri kullanılarak zaman serileri analizi ile incelenmiştir.

Meng ve ark. (2007) de Nottingham de bulunan Wilford Köprüsü'nün belirli yük altındaki hareketlerinin belirlenmesi için GPS ve ivme ölçer ile ölçümler yapılmış, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. GPS ile 10Hz frekansında toplanan veriler statik değerlendirme yöntemleri ile değerlendirilmiş, iki ölçme sisteminden elde edilen titreşimlerin frekanslarının uygun olduğu belirlenmiştir. İvme ölçer verilerinin çift integralinin alınması ile elde edilen deplasman miktarları, GPS verilerinden elde edilen deplasman miktarları ile karşılaştırılmıştır. GPS verilerinden elde edilen deplasman miktarlarının ivme ölçer verilerinden

elde edilen miktarlardan daha doğru olduğu tespit edilmiştir.

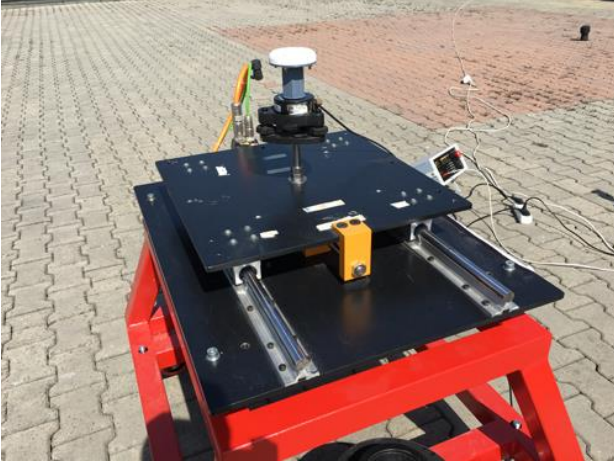
Yi ve ark. (2013) tarafından Dalian Beida Köprüsünde GPS alıcıları ve ivme ölçerler ile yapılan çalışmada statik ve kinematik GPS verileri toplanmış, ölçülerin değerlendirilmesi ise elde edilen titreşim frekansları ivme ölçer ölçülerinden elde edilen frekanslar ile karşılaştırılmış, GPS sonuçlarının ivme ölçer sonuçları ile uyumlu olduğu belirlenmiştir.

Moschas ve Stiros (2011) çelik bir yaya köprüsünün dinamik deplasmanları ve frekansları jeodezik GPS alıcıları ve force balance ivme ölçerinin kullanımı ile belirlenmiştir. Çalışmada iki GPS alıcısı kullanılmış ve kinematik post-process yöntemi ile verilerin değerlendirilmesi sonucu analiz yapılarak köprü orta noktasının düşey yöndeki hareketleri incelenmiştir.

Bu çalışmada ise, GNSS konum belirleme yöntemlerinden biri olan ve ülkemizde de TUSAGA-AKTİF ve İSKİ-UKBS gibi sabit GNSS ağlarının devreye girmesiyle aktif olarak mühendislik çalışmalarında kullanılmaya başlanılan Ağ RTK yönteminin yapı sağlığı izleme çalışmalarında kullanılabilirliği incelenmiştir. Tübitak 115Y250 nolu "Yapı Sağlığı İzlenmesine Yönelik Ulusal Ölçme Sistemi Geliştirilmesi" projesi kapsamında geliştirilen ölçme sistemi bileşenlerinden olan GNSS modül ile sarsma tablası üzerinde oluşturulan farklı tip ve nitelikteki hareketlerin Ağ RTK yöntemi ile tespit edilebilmesine yönelik testler uygulanmıştır (Akpınar ve ark. 2016).

2. Materyal ve Metot

Söz konusu proje kapsamında geliştirilen ölçme sistemi bileşenlerinden GNSS alıcısı ile mühendislik yapılarında meydana gelebilecek olası hareketlerin belirlenip belirlenemediğinin test edilmesi amacıyla İstanbul Kültür Üniversitesi bünyesinde bulunan sarsma tablası ile testler yapılmıştır. Bu testler sırasında olası farklı yapı hareketlerine ilişkin senaryolar uygulanmış, GNSS alıcısının söz konusu hareketleri belirlemedeki performansı test edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. GNSS alıcısı ile yapılan sarsma tablası testleri.

Sarsma tablası, tek eksen üzerinde harmonik ve rasgele genlikli ivme veya deplasman protokolü uygulanabilen, ± 9.5 cm yer değiştirme kabiliyeti bulunan, karşı ağırlıklı bir elektro-mekanik cihazdır (Şekil 2).



Şekil 2. Sarsma tablası ve karşı ağırlık düzeni.

Sarsma tablası, test alanında hareket eksenini yaklaşık olarak kuzey-güney doğrultusunda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Bu sayede GNSS verisinden elde edilecek koordinat değerlerinin dönüşümlerinde bir iç kontrolün yapılması hedeflenmiştir. Testler sırasında konum belirleme yöntemi olarak Ağ-RTK yöntemi kullanılmıştır ve çalışma 3 aşamada gerçekleştirilmiştir. 1. Aşamada TUSAGA-AKTİF (CORS-TR) ağından VRS yöntemi ile alınan düzeltme verilerine göre, 2. Aşamada İSKİ-UKBS ağından VRS yöntemi ile alınan düzeltme verilerine göre, 3. Aşamada ise YLDZ referans

noktasından alınan düzeltme verilerine göre elde edilen koordinatlar ile analizler yapılmıştır. Her üç aşamada aynı test protokolleri uygulanmış, bu sayede farklı sistemlerden elde edilen veriler için doğruluk analizleri yapılmıştır.

CORS-TR diğer adıyla TUSAGA-Aktif sistemi, Türkiye genelinde, yaklaşık baz kenarı 70-100 km olarak zincir şeklinde tesis edilmiş 146 istasyon ile KKTC' de 4 istasyon olmak üzere toplam 150 GNSS referans istasyonu yardımıyla 24 saat veri toplama ve tüm cihazların ilişkili olduğu ana bilgisayardan GSM iletişimi ile anlık RTK düzeltmeleri gönderme kapasitesine sahip ulusal sürekli gözlem yapan GNSS referans ağıdır. Bu ağın RTK çözüm doğruluğu yaklaşık yatayda 2-3 cm ve düşey yönde 3-4 cm kadardır (Eren et al. 2009, Kurt et al. 2013).

CORS-TR ağı yanında, İstanbul' da İSKİ tarafından Marmara Bölgesi'nde tesis edilen ve günümüzde aktif olarak çalışan İSKİ-UKBS bölgesel RTK ağı da bulunmaktadır (Gülal 2009).

Bunlarla birlikte Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Harita Mühendisliği Bölümü Jeodezik Metroloji Laboratuvarı bünyesinde işletilen ve halihazırda EUREF Avrupa Ağı aday istasyonlarından olan YLDZ referans istasyonu, bölgesinde tek baz RTK düzeltmeleri yapan ve 24 saat veri toplama özelliğine sahip bir referans istasyonudur. (Aykut ve ark. 2015, Gülal ve ark. 2015).

2.1. Zaman Serileri Analizi

Mühendislik yapılarının çevresel şartlar (sıcaklık, trafik gürültüsü vb.) ve dış kuvvetler (rüzgâr, deprem vb.) etkisi altındaki hareketleri (doğrusal, periyodik vb.) ve bu hareketlerin büyüklüğü, yapıda yapılan sürekli ölçümlerinin zaman serilerinin analizi ile açıklanabilir. Bu işlem hem zaman bölgesinde hem de frekans bölgesinde ele alınır ve her iki boyutta yapılan analizler birbirini tamamlayıcı niteliğe sahip olup aynı bilgi farklı şekillerde izlenen yapıya ait zaman serilerinin niteliği hakkında farklı fikirler verirler (Erdoğan ve Gülal, 2009).

Zaman serileri analizinde, ilk olarak serinin zaman eksenini grafiği çizilerek serideki olağan dışı ölçüler (örneğin; kaba hatalar) giderilir ve serinin genel bir yorumu yapılarak seriyi oluşturulan sinyal zaman bölgesinde filtrelendirir. Filtreleme sinyallerin belirli frekanslarını güçlendirmek ya da zayıflatmak, belirli frekanslarını tamamen bastırmak veya ortaya çıkarmak amacıyla kullanılmaktadır.

Filtreler geçirdikleri ve bastırdıkları frekans aralıklarına göre sınıflandırılmaktadır. Alçak-geçiren filtreler (low-pass filter), düşük frekansları geçirerek yüksek frekansları bastırmaktadır. Bunun için zaman serilerinde yumuşatma işlemi yapılarak serilerin uzun zamanlı ya da alçak frekansları elde edilmektedir.

Zaman serilerindeki periyodiklik ve trend gibi bileşenlerin daha belirgin bir şekilde ortaya çıkarılması ve bunun için seride var olan gürültü bileşeninin giderilmesi amacıyla yumuşatma işlemi için kayan ortalamalar yöntemi kullanılmaktadır (Erdoğan, 2006). Bu yöntemde her kaymada aritmetik ortalama işleminden geçmiş verilerden bir tanesi düşerken onun yerine sağ taraftan bir yenisi girmektedir. Böylece üst üste binen kısımları olan aritmetik ortalama değerler serisi elde edilmektedir. Kayan ortalama işlemine kaç tane veri alınacağından önceden tespit edilmesi gerekmektedir. En büyük ve en küçük veri değerlerinin etkilerinin daha da fazla yumuşatılmaması için kayan ortalamalarda tek dereceler (3,5,...) alınmaktadır. Ortada bulunan veri değerine diğerlerinden daha fazla ağırlığın verilmesi için ise kayan ağırlıkla ortalamalar kullanılmaktadır.

Bu ağırlıklı ortalama yöntemi, özellikle kısa gözlem süreli verilerdeki periyodikliklerin ortaya çıkarılmasında kullanılmaktadır. Şen (2002) de, beşinci dereceden ağırlıklı kayan ortalamaların verilerdeki gürültü bileşeninin giderilmesi için faydalı olduğu belirtilmektedir.

Yüksek-geçiren filtreler (high-pass filter) düşük frekansları bastırarak yüksek frekansları geçirmektedir. Bunun için de zaman serilerinde farklandırma yapılarak serilerin lokal değişimleri ya da yüksek frekansları elde edilmektedir.

Farklandırma aynı zamanda serilerde yapılan bir yumuşatma işlemidir. Bu yöntemde değişik zaman aralıklarına karşılık gelen veriler arasındaki ardışık farkların bulunması öngörülmektedir. Böylece art arda gelen verilerde bulunan gürültü bileşenlerinin birbirinden çıkarılması ile verilerden kısmen giderilmektedir (Erdoğan, 2006). Farklandırmanın kaçınıcı dereceye kadar yapılması gerektiğini belirlemek için, ardışık olarak yapılan her bir farklandırma sonucu elde edilen serinin ortalaması hesaplanmaktadır. Daha sonra, ortalaması birbirine yaklaşık eşit olan serilerden bir önceki serinin derecesi, farklandırmanın derecesi olarak seçilmektedir.

Bant-geçiren filtreler (band-pass filter) düşük ve yüksek frekansları bastırarak aradaki bir frekans bandını geçirmektedir. Bant-söndüren filtreler (band-stop filter) ise düşük ve yüksek frekansları geçirerek aradaki bir frekans bandını bastırmaktadır.

Zaman serileri analizinde sinyalin filtrelenmesinin ardından seride trend bileşeni olup olmadığının tespit edilmesi gerekir. Zaman serilerinde istatistiksel olarak trend bileşeni olup olmadığı, verilere doğrudan bağlı olmayan Mann-Kendall ve Kendall Sıra Korelasyon testi ile yapılmaktadır. Mann-Kendall testinde zamana göre sıralanmış y_1, y_2, \dots, y_n gözlemleri, H_0 hipotezine göre zamandan bağımsız ve benzer dağılmış rasgele değişkenlerdir. H_1 hipotezine göre ise ($k \neq j$) olmak üzere tüm ($k, j \leq n$) için seride y_k ve y_j değerlerinin dağılımı benzer değildir, yani seride lineer bir trend bulunmaktadır.

Mann-Kendal testinin istatistiği olan S , (1) ve (2) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır (Karabörk ve Kahya, 1999).

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(y_j - y_k) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(y_j - y_k) = \begin{cases} +1 & \text{eğer } (y_j - y_k) > 0 \\ 0 & \text{eğer } (y_j - y_k) = 0 \\ -1 & \text{eğer } (y_j - y_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Normal bir dağılıma sahip ve ortalaması sıfır olan test istatistiği S 'nin varyansı;

$Var(S) = n(n-1)(2n+5)/18$ şekilde hesaplanmaktadır.

Standart normal değişken (z) ise,

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{eğer } S > 0 \\ 0 & \text{eğer } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{eğer } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

eşitliği ile hesaplanmaktadır. Eğer öngörülen anlamlılık düzeyinde $|z| \leq z_{1-\alpha/2}$ ise H_0 hipotezi kabul edilir, aksi durumda reddedilir. Hesaplanan S değeri pozitif ise artan, negatif ise azalan bir trendin varlığına işaret eder. Bu teknik eksik verilerin varlığına müsaade ettiği ve verilerin belirli bir dağılıma uyma zorunluluğunu aramadığı için özellikle kullanışlıdır (Yu et al. 1993).

Zaman serilerinde trend bileşeni bulunduğu tespit edilirse, bu bileşenin seriden ayrıştırılması için En Küçük Kareler Yöntemi ile zamana bağlı uydurulan bir doğru denklemi elde edilmektedir. Elde edilen denklemin katsayıları ise regresyon analizi ile hesaplanmaktadır (Erdoğan ve Gülal, 2009).

Seride var olan periyodik hareketin belirlenebilmesi için bu hareketin frekanslarının bilinmesi gerekmektedir. Bunun için, öncelikle serideki trend bileşeninin belirlenmesi ve parametrelerinin anlamlı çıkması durumunda seriden giderilmesi gerekir. Aksi durumda serideki trend bileşeni spektral analiz sonuçlarını etkiler ve sıfır frekansında peak verir.

Trend bileşeni giderilmiş serinin zaman bölgesinden frekans bölgesine dönüşümü Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) ile yapılır. Ancak, HFD periyodik bir yapıya sahiptir ve spektrum hesabında, sinyal son örneğinin arkasından tekrar ilk örneği geliyormuş gibi işlem görür. Bu durumda sinyal enerjisinin diğer frekanslara sızması sonucu spektral sızma meydana gelir. Bu etkiyi azaltmak için sinyalin dönüşüm öncesi, genliği kenarlara doğru yavaşça sıfıra yaklaşan bir pencere fonksiyonu (örneğin; Hanning, Üçgen ve Hamming Pencereleme fonksiyonları gibi) ile çarpılması öngörülür (Erdoğan ve Gülal, 2013).

Hanning fonksiyonu

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N}\right) \quad (4)$$

eşitliği ile tanımlanmaktadır.

Böylece bir sinyalin enerjisinin hangi frekanslarda yoğunlaştığı tespit edilerek, seride var olan periyodik hareketlerin frekansları belirlenir. Bu frekanslar ile frekansa ait parametreler test edilir. Anlamsız çıkan parametreye ait frekans fonksiyondan çıkartılır ve bu işleme anlamlı frekanslar tespit edilene kadar devam edilir. Böylece, anlamlı periyodik hareketlerin ve trend bileşeninin toplamı ile serinin deterministik kısmı belirlenir. Ayrıca, periyodik hareketlerin genlik değerleri tespit edilir ve serinin lineer değişime olan katkısı dikkate alınır.

Bu çalışmada sarsma tablası üzerinde GNSS alıcısı ile farklı test protokollerinde toplanan veriler zaman serileri analizi yöntemlerine göre analiz edilerek Ağ RTK yöntemi ile elde edilen verilerden, hareketlerin frekans ve genlikleri hesaplanmıştır.

2.2. Test Prosedürleri

Sarsma tablası ile yapılan testlerde aşağıda listelenen test protokolleri uygulanmıştır. Bu protokollere göre hareket eden sarsma tablasında meydana gelen deplasmanlar ve frekanslar belirlenerek karşılaştırılmıştır. Ağ RTK GNSS yönteminin, farklı frekans ve genlikte meydana gelen hareketler karşısındaki performansını belirleyebilmek amacıyla 7 farklı protokol uygulanmıştır. Testler sırasında GNSS örnekleme aralığı 2Hz olarak alınmıştır.

- a- Statik Karakterli Hareket
- b- 0.01Hz. frekans ve 90 mm genlikli sinüs hareketi
- c- 0.05 Hz. frekans ve 90 mm genlikli sinüs hareketi
- d- 0.1 Hz. frekans ve 90 mm genlikli sinüs hareketi
- e- 0.5 Hz. frekans ve 50 mm genlikli sinüs hareketi
- f- 1 Hz. frekans ve 50 mm genlikli sinüs hareketi

g- 1 Hz. frekans ve 20 mm genlikli sinüs hareketi

Bu karşılaştırmalar için öncelikle GNSS alıcısı ile farklı RTK yöntemleri ile elde edilen koordinatlar sarsma tablası koordinat sistemine dönüştürülmüştür. Bu dönüşümde Y eksenini tablanın hareket eksenine ile çakıştırılmıştır. GNSS verilerine 3. Dereceden kayan ağırlık ortalamalar yöntemi ile filtreleme işlemi uygulanmıştır.

Sarsma tablasında uygulanan protokol kapsamında verilen hareketler aynı zamanda sarsma tablası üzerinde bulunan LVDT lineer yer değişim algılayıcısı ile ölçülerek, sarsma tablası tarafından oluşturulan gerçek deplasman değerleri de yüksek doğrulukla belirlenmiştir. GNSS verilerinden elde edilen sonuçlar ile LVDT verilerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3. Bulgular

3.1. Statik Karakterli Hareket

Statik karakterli hareket kapsamında sarsma tablası 3 dakika süresince sabit tutularak, hareketsiz halde 3 dk süresince GNSS verileri toplanmış ve sonuçlar irdelenmiştir.

CORS-TR, İSKİ-UKBS ve YLDZ olmak üzere 3 farklı yöntem ile elde edilen verilerin standart sapmaları da Çizelge 1 de verilmiştir.

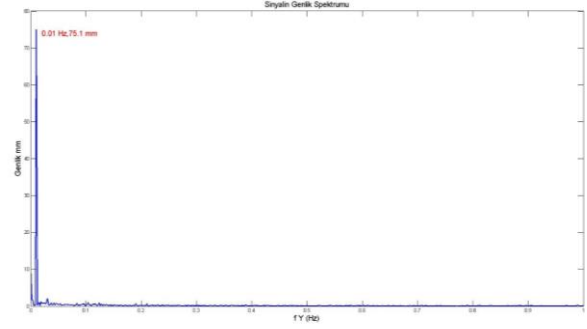
Çizelge 1. Durağan halde hesaplanan standart sapmalar

Yöntem	Eksen	Standart Sapma (mm)
CORS-TR	Y	1.0
	X	1.6
	h	4.0
İSKİ-UKBS	Y	1.0
	X	1.5
	h	3.4
YLDZ	Y	1.1
	X	1.3
	h	4.6

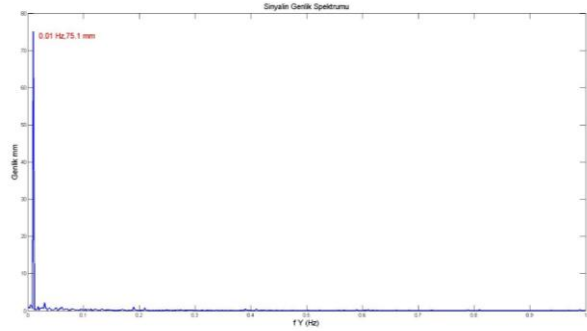
3.2. 0.01Hz. frekans ve 90 mm genlikli sinüs hareketi

Bu hareket sırasında LVDT ile elde edilen verilere uygulanan FFT dönüşümü ile **90 mm** genlik belirlenmiştir.

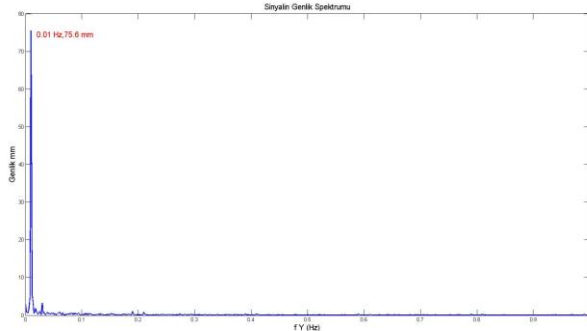
CORS-TR (VRS), İSKİ-UKBS (VRS) ve YLDZ yöntemleri ile elde edilen Y yönündeki GNSS verilerinin FFT dönüşümü sonucu hesaplanan genlik spektrumları sırasıyla Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 3. CORS-TR (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (0.01 Hz, 90 mm).



Şekil 4. İSKİ-UKBS (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (0.01 Hz, 90 mm).



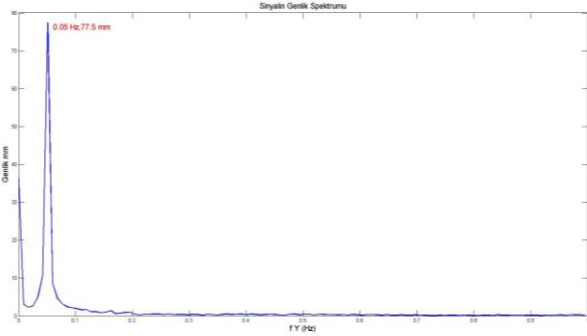
Şekil 5. YLDZ Y yönündeki genlik spektrumu (0.01 Hz, 90 mm)

Sarsma tablasında oluşturulan 0.01 Hz frekans ve 90 mm genliğindeki sinüs hareketinin CORS-TR (VRS) yöntemi ile frekansı 0.01 Hz, genliği ise 75.1 mm, İSKİ-UKBS (VRS) yöntemi ile frekansı 0.01 Hz, genliği ise 75.1 mm ve YLDZ yöntemi ile frekansı 0.01 Hz, genliği ise 75.6 mm olarak belirlenmiştir

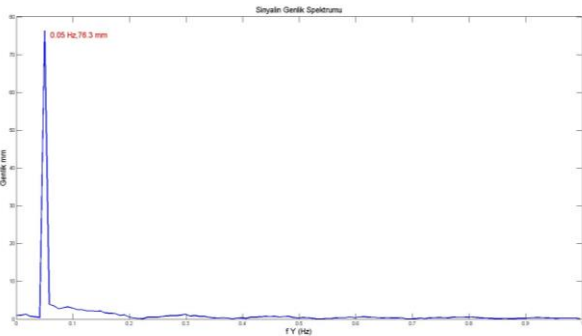
3.3. 0.05 Hz. frekans ve 90 mm genlikli sinüs hareketi

Bu hareket sırasında LVDT ile elde edilen verilere uygulanan FFT dönüşümü sonucunda **89.6 mm** genlik belirlenmiştir.

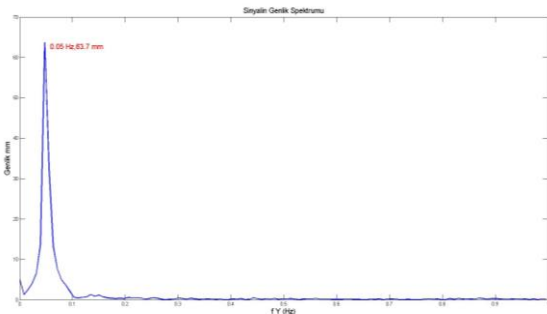
CORS-TR (VRS), İSKİ-UKBS (VRS) ve YLDZ yöntemleri ile elde edilen Y yönündeki GNSS verilerinin FFT dönüşümü sonucu hesaplanan genlik spektrumları sırasıyla Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 6. CORS-TR (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (0.05 Hz, 90 mm).



Şekil 7. İSKİ-UKBS (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (0.05 Hz, 90 mm).



Şekil 8. YLDZ Y yönündeki genlik spektrumu (0.05 Hz, 90 mm).

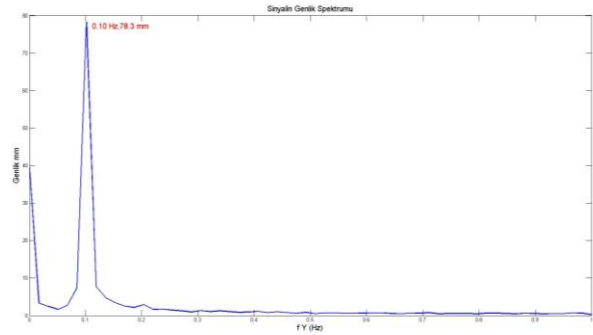
Sarsma tablasında oluşturulan 0.05 Hz frekans ve 90 mm genliğindeki sinüs hareketinin CORS-TR (VRS)

yöntemi ile frekansı 0.05 Hz, genliği ise 77.5 mm, İSKİ-UKBS (VRS) yöntemi ile frekansı 0.05 Hz, genliği ise 76.3 mm ve YLDZ yöntemi ile frekansı 0.05 Hz, genliği ise 63.7 mm olarak belirlenmiştir.

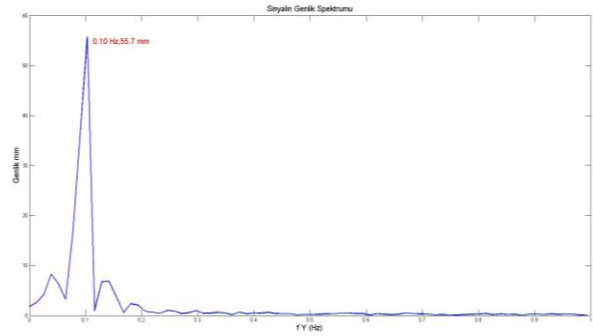
3.3. 0.1 Hz. frekans ve 90 mm genlikli sinüs hareketi

Bu hareket sırasında LVDT ile elde edilen verilere uygulanan FFT dönüşümü ile **88.7 mm** genlik belirlenmiştir.

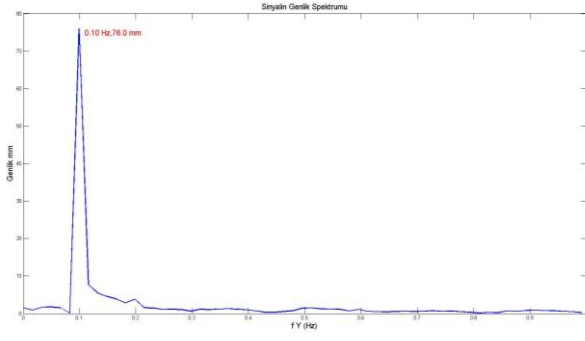
CORS-TR (VRS), İSKİ-UKBS (VRS) ve YLDZ yöntemleri ile elde edilen Y yönündeki GNSS verilerinin FFT dönüşümü sonucu hesaplanan genlik spektrumları sırasıyla Şekil 9, Şekil 10 ve Şekil 11'de verilmiştir.



Şekil 9. CORS-TR (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (0.1 Hz, 90 mm).



Şekil 10. İSKİ-UKBS (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (0.1 Hz, 90 mm).



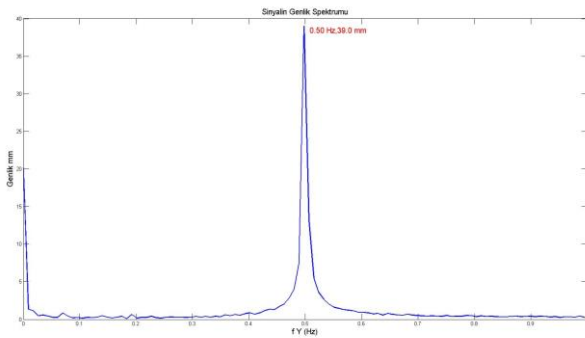
Şekil 11. YLDZ Y yönündeki genlik spektrumu (0.1 Hz, 90 mm).

Sarsma tablasında oluşturulan 0.1 Hz frekans ve 90 mm genliğindeki sinüs hareketinin CORS-TR (VRS) yöntemi ile frekansı 0.1 Hz, genliği ise 78.3 mm, İSKİ-UKBS (VRS) yöntemi ile frekansı 0.1 Hz, genliği ise 55.7 mm ve YLDZ yöntemi ile frekansı 0.1 Hz, genliği ise 76.0 mm olarak belirlenmiştir.

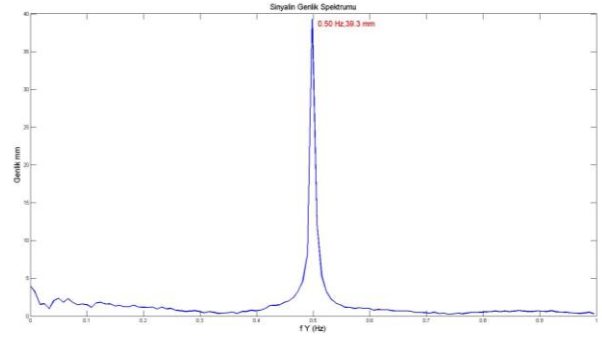
3.4. 0.5 Hz. frekans ve 50 mm genlikli sinüs hareketi

Bu hareket sırasında LVDT ile elde edilen verilere uygulanan FFT dönüşümü ile **49.3 mm** genlik belirlenmiştir.

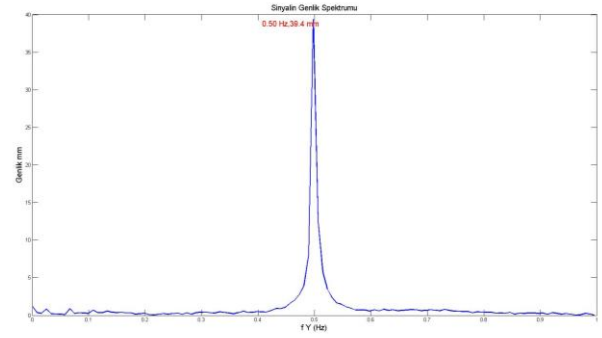
CORS-TR (VRS), İSKİ-UKBS (VRS) ve YLDZ yöntemleri ile elde edilen Y yönündeki GNSS verilerinin FFT dönüşümü sonucu hesaplanan genlik spektrumları sırasıyla Şekil 12, Şekil 13 ve Şekil 14'de verilmiştir.



Şekil 12. CORS-TR (VRS) ham ve filtrenilmiş veriler (0.5 Hz, 50 mm).



Şekil 13. İSKİ-UKBS (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (0.5 Hz, 50 mm).



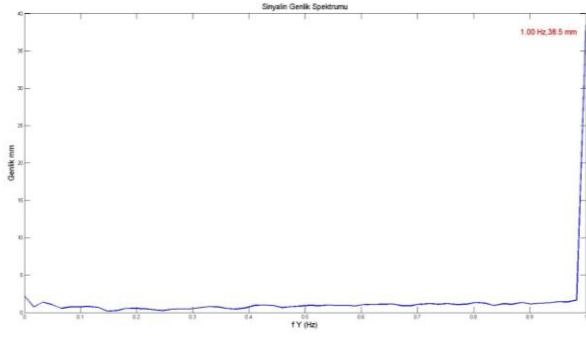
Şekil 14. YLDZ Y yönündeki genlik spektrumu (0.5 Hz, 50 mm)

Sarsma tablasında oluşturulan 0.5 Hz frekans ve 50 mm genliğindeki sinüs hareketinin CORS-TR (VRS) yöntemi ile frekansı 0.5 Hz, genliği ise 39.0 mm, İSKİ-UKBS (VRS) yöntemi ile frekansı 0.5 Hz, genliği ise 39.3 mm ve YLDZ yöntemi ile frekansı 0.5 Hz, genliği ise 39.4 mm olarak belirlenmiştir.

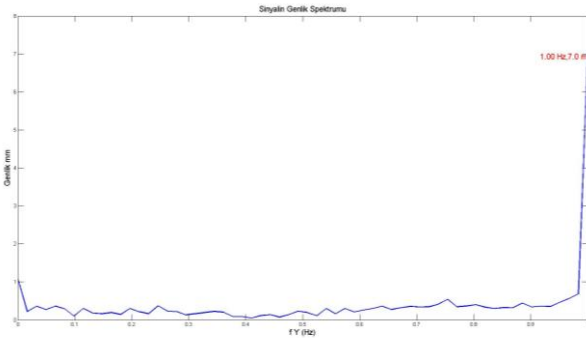
3.4. 1 Hz. frekans ve 50 mm genlikli sinüs hareketi

Bu hareket sırasında LVDT ile elde edilen verilere uygulanan FFT dönüşümü ile **47.8 mm** genlik belirlenmiştir.

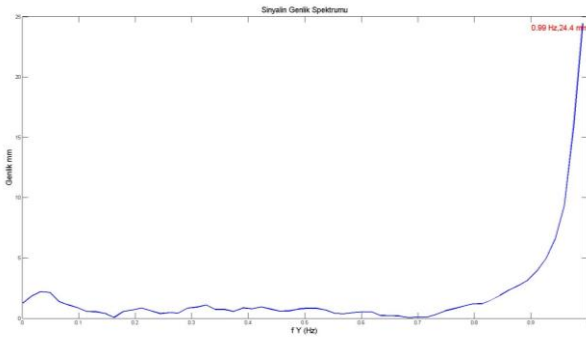
CORS-TR (VRS), İSKİ-UKBS (VRS) ve YLDZ yöntemleri ile elde edilen Y yönündeki GNSS verilerinin FFT dönüşümü sonucu hesaplanan genlik spektrumları sırasıyla Şekil 15, Şekil 16 ve Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 15. CORS-TR (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (1 Hz, 50 mm).



Şekil 16. İSKİ-UKBS (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (1 Hz, 50 mm).



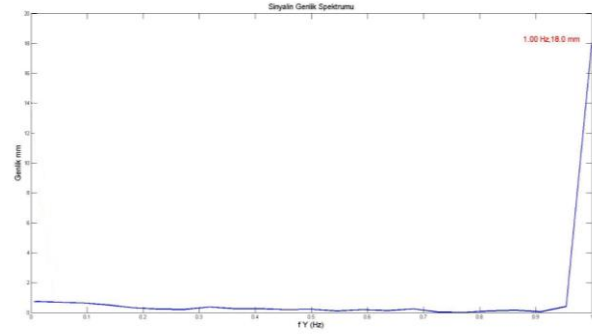
Şekil 17. YLDZ Y yönündeki genlik spektrumu (1 Hz, 50 mm).

Sarsma tablasında oluşturulan 1 Hz frekans ve 50 mm genliğindeki sinüs hareketinin CORS-TR (VRS) yöntemi ile frekansı 1 Hz, genliği ise 38.5 mm, İSKİ-UKBS (VRS) yöntemi ile frekansı 1 Hz, genliği ise 7 mm ve YLDZ yöntemi ile frekansı 0.99 Hz, genliği ise 24.4 mm olarak belirlenmiştir.

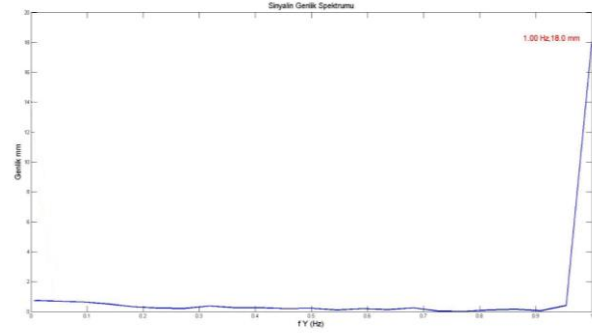
3.5. 1 Hz. frekans ve 20 mm genlikli sinüs hareketi

Bu hareket sırasında LVDT ile elde edilen verilere uygulanan FFT dönüşümü ile **19.0 mm** genlik belirlenmiştir.

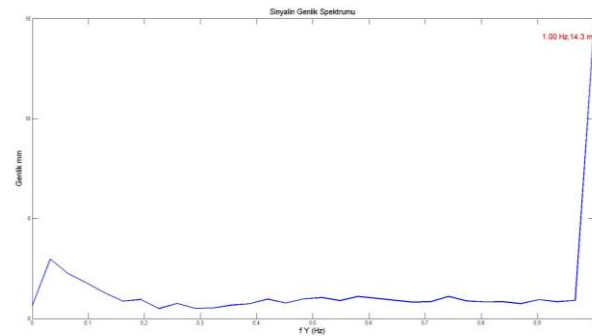
CORS-TR (VRS), İSKİ-UKBS (VRS) ve YLDZ yöntemleri ile elde edilen Y yönündeki GNSS verilerinin FFT dönüşümü sonucu hesaplanan genlik spektrumları sırasıyla Şekil 18, Şekil 19 ve Şekil 20'de verilmiştir.



Şekil 18. CORS-TR (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (1 Hz, 20 mm).



Şekil 19. İSKİ-UKBS (VRS) Y yönündeki genlik spektrumu (1 Hz, 20 mm).



Şekil 20. YLDZ Y yönündeki genlik spektrumu (1 Hz, 20 mm).

Sarsma tablasında oluşturulan 1 Hz frekans ve 20 mm genliğindeki sinüs hareketinin CORS-TR (VRS) yöntemi ile frekansı 1 Hz, genliği ise 18.0 mm, İSKİ-UKBS (VRS) yöntemi ile frekansı 1 Hz, genliği ise 18.0 mm ve YLDZ yöntemi ile frekansı 1 Hz, genliği ise 14.3 mm olarak belirlenmiştir.

Dinamik karakterli testlerde farklı GNSS düzeltmeleri ile elde edilen genlik değerlerinin LVDT ile ölçülen genlik değerlerinden olan farkları Çizelge 2 de özetlenmiştir.

Çizelge 2. Dinamik karakterli testlerde GNSS ile elde edilen genlik değerleri

	LVDT	CORS-TR		İSKİ-UKBS		YLDZ	
	Genlik (mm)	Genlik (mm)	Fark (mm)	Genlik (mm)	Fark (mm)	Genlik (mm)	Fark (mm)
0.01 Hz, 90mm	90.0	75.1	14.9	75.1	14.9	75.6	14.4
0.05 Hz, 90mm	89.6	77.5	12.1	76.3	13.3	63.7	25.9
0.1 Hz, 90mm	88.7	78.3	10.4	55.7	33.0	76.0	12.7
1 Hz, 20mm	19.0	18.0	1.0	18.0	1.0	14.3	4.7
0.5 Hz, 50mm	49.3	39.0	10.3	39.3	10.0	39.4	9.9
1 Hz, 50mm	47.8	38.5	9.3	7.0	40.8	24.4	23.4
		Ortalama	9.7	Ortalama	18.8	Ortalama	15.2

Çizelge 2'deki değerler incelendiğinde, test süresince CORS-TR ağından alınan düzeltmeler ile hesaplanan genlik değerleri ile LVDT ölçülerinden hesaplanan genlik değerleri arasındaki farkların diğer yöntemlere göre daha az olduğu görülmektedir. Tüm yöntemler ile hesaplanan genlik değerlerinin, LVDT ölçülerinden hesaplanan genlik değerlerinden olan farklarının ortalamalarına bakıldığında ise tüm yöntemler ile RTK GNSS konum belirleme doğruluğu olan $\pm 2-3$ cm' nin altında farkların olduğu görülmektedir. Bu durumda sarsma tablası ile simülasyonu yapılan yapı hareketleri nedeniyle oluşan deplasman değerlerinin Ağ-RTK GNSS yöntemi ile beklenen doğrulukta belirlenebildiği söylenebilir.

Bununla birlikte Ağ RTK yöntemi ile elde edilen verilere FFT uygulanması sonucu belirlenen frekans değerleri incelendiğinde sarsma tablası ile simülasyonu yapılan yapı hareketlerindeki frekans değerlerinin tümünün belirlenebildiği görülmüştür.

4. Tartışma ve Sonuç

Mühendislik yapılarının izlenmesinde GNSS ölçme yöntemlerinden biri olan Ağ RTK yönteminin performansının test edilmesi amacıyla yapılan bu çalışmada; CORS-TR, İSKİ-UKBS ve YLDZ çözümleri ile sarsma tablasında uygulanan farklı yapı hareketleri

altında elde edilen verilerin analizi ile hesaplanan genlik ve frekans değerleri, bilinen frekans ve LVDT ile ölçülen genlikler ile karşılaştırılmıştır. CORS-TR ve İSKİ-UKBS çözümlerinde VRS yöntemi kullanılmıştır. Bölüm 2'de açıklandığı üzere YLDZ çözümü tek baz RTK çözümdür. Çizelge 2 incelendiğinde CORS-TR çözümleri ile gerçeğe daha yakın deplasman değerleri elde edildiği görülmeye rağmen İSKİ-UKBS ve YLDZ çözümleri ile RTK GNSS konum belirleme doğruluğu içinde deplasman değerleri elde edildiği görülmektedir. YLDZ istasyonu ile testlerin yapıldığı yer olan İstanbul Kültür Üniversitesi arasındaki uzaklık yaklaşık 6 km dir. Tek baz RTK yöntemi ile de söz konusu baz uzunluğunda beklenen konum doğruluğu $\pm 2-3$ cm dir (Aykut ve ark. 2015). Bu çalışmada uygulanan üç yöntem ile farklı ancak beklenen doğruluklarda deplasman değerleri elde edilmesine karşın, üç yöntemde de farklı hareketlerin frekansları tam olarak elde edilmiştir. Bu durumda uygun örnekleme aralığı ile Ağ RTK GNSS yönteminin yapı sağlığı izleme çalışmalarında deplasman ve titreşim frekanslarının belirlenmesinde kullanımının uygun olduğu söylenebilir.

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK 115Y250 nolu “Yapı Sağlığı İzlenmesine Yönelik Ulusal Ölçme Sistemi Geliştirilmesi” projesi kapsamında yapılmıştır. Proje desteğinden dolayı TÜBİTAK’a teşekkür ederiz.

Bu çalışmaya sarsma tablası kullanımı ile verdiği destek için İstanbul Kültür Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

Akpınar, B., Gülal, E., Dindar, A.A., Gürkan, K., Aykut, N.O., 2016. Yapı Sağlığı İzlenmesine Yönelik Ulusal Ölçme Sistemi Geliştirilmesi Projesi: İlk Sonuçlar, 8. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 19-21 Ekim 2016, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Aykut, N.O., Gülal, E., Akpınar, B., 2015. Performance of Single Base RTK GNSS Method versus Network RTK, Earth Sciences Research Journal, 19(2), 135-139.

Çelebi, M. 2000. GPS in dynamic monitoring of long-period structures, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20, 477-483.

Erdoğan, H., 2006. Mühendislik Yapılarındaki Dinamik Davranışların Jeodezik Ölçmelerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, YTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Erdoğan, H., Akpınar, B., Gülal, E., Ata, E. 2007. Monitoring the dynamic behaviors of the Bosphorus Bridge by GPS during Esurasia Marathon, Nonlinear Processes in Geophysics, 14(4), 513-523.

Erdoğan, H., Gülal, E. 2009. The Application of Time Series Analysis To Describe The Dynamic Movements Of Suspension Bridges, Nonlinear Analysis; Real World Applications, 10, 910-927, doi: 10.1016/j.nonrwa.2007.11.013.

Erdoğan, H., Gülal, E. 2013. Ambient Vibration Measurements of the Bosphorus Suspension Bridge by Total Station and GPS, Experimental Techniques, 37:3,16–23, doi:10.1111/j.1747-1567.2011.00723.x.

Eren, K., Uzel, T., Gülal, E., Yıldırım, Ö, Cingöz, A. 2009. Results from a Comprehensive Global Navigation Satellite System Test in the CORS-TR Network: Case Study, Journal of Surveying Engineering, 135(1), pages 10-18.

Gülal, E., 2009. İSKİ Uydu Konum Belirleme Sistemi (UKBS) Kurulması ve Deformasyon Ölçmeleri Projesi Raporu, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Gülal, E., Dindar, A.A., Akpınar, B., Tiryakioğlu, İ., Aykut, N.O., Erdoğan, H., 2015. Analysis and Management of GNSS Reference Station Data, Technical Gazette, 22(2), 404-414.

Karabörk, M.Ç. ve Kahya, E., 1999. Sakarya Havzasındaki Aylık Akımların Çok Değişkenli Stokastik Modellemesi, J. Of Engineering and Environmental Science, 23, 133-147.

Kurt, A.İ, Cingöz, A. 2013. Birlikte Çalışabilirlik Kapsamında Türkiye Ulusal Sabit GNSS İstasyonları Ağı (TUSAGA-AKTİF), TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi, 11-13 Kasım 2013, ODTÜ Kongre ve Kültür Merkezi, Ankara.

Meng, X., Dodson, A.H., Roberts, G.W. 2007. Detecting bridge Dynamics with GPS and triaxial accelerometers, Engineering Structures, 29, 3178-3184, doi: 10.1016/j.enstruct.2007.03.2012.

Moschas, F., Stiros, S. 2011. Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer, Engineering Structures, 33, 10-17, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.09.013.

Şen, Z., 2002. İstatistik Veri İşleme Yöntemleri, Su Vakfı Yayınları, İstanbul.

Yi., T.H., Li, H.N., Gu, M. 2013. Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge, Measurement, 46, 420-432, doi: 10.1016/j.measurement.2012.07.018.

Yu, Y. S., Zou, S., Whittemore, D., 1993. Non-parametric Trend Analysis of Water Quality Data of Rivers in Kansas, Journal of Hydrology, 150, 61-80.