T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ALGILAYICI SİSTEMLERLE OBJE HAREKETLERİNİN BELİRLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Mehmet EREN

DOKTORA TEZİ

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Geomatik Programı

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Gürsel HOŞBAŞ

Kasım, 2022

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ALGILAYICI SİSTEMLERLE OBJE HAREKETLERİNİN BELİRLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA

Mehmet EREN tarafından hazırlanan tez çalışması 24.11.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Harita Mühendisliği Anabilim Dalı, Geomatik Programı DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Dr. Öğr. Üyesi Gürsel HOŞBAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Gürsel HOŞBAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Atınç PIRTI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Halil ERKAYA, Üye
Okan Üniversitesi _____

Prof. Dr. Doğan Uğur ŞANLI, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Mustafa YANALAK, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Gürsel HOŞBAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Hareketli Yapılarda GNSS-Yersel Jeodezik Yöntemler ve Video Kamera ile Düşey Hareketlerin İzlenmesi ve Modellenmesi: Unkapanı Köprüsü Örneği başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mehmet EREN

İmza

Aileme

çocuklarıma

ve

biricik eşime

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışması konusunda Tez İzleme Jüri Üyelerinin TİK toplantılarında yaptıkları katkılardan dolayı, Prof. Dr. Halil ERKAYA, Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Gürsel HOŞBAŞ ve Prof. Dr. Atınç PIRTI hocalarıma Teşekkür ederim. Çalışmalarıma yön veren, manevi desteğini esirgemeyen değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Gürsel HOŞBAŞ'a GNSS analizleri konusunda ve her türlü desteklerinden ötürü Prof. Dr. Atınç PIRTI hocama, yapıcı eleştirileri ile bana yön veren kıymetli hocam Prof. Dr. Halil ERKAYA'ya, MATLAB yazılım kodlarının geliştirilmesi konusunda ve ivmeölçer ile ilgili her türlü desteklerinden dolayı Dr. Öğr. Üyesi Fatih ALEMDAR ve Doç. Dr. Serkan BEKİROĞLU hocalarıma, ihtiyaç duyduğumda değerli vaktini bana ayıran değerli hocam Prof. Dr. Doğan Uğur ŞANLI'ya, tarafından geliştirilen MATLAB görüntü işleme kodlarının çalışma kapsamında kullanımına izin veren Neslihan AVCI'ya, her zaman ve her konuda desteğini esirgemeyen Öğr. Gör. Dr. M. Hilmi Erkoç'a ayrıca Arş. Gör. Dr. Hüseyin Duman'a desteğinden dolayı teşekkür ederim. Diğer taraftan, Harita Mühendisliği Ölçme Laboratuvar'ı sorumlusu Erhan YEŞİL'e ölçüm aşamasındaki yardımları nedeniyle teşekkür ederim.

İnşaat Fakültesi laboratuvarını kullanmama izin veren sorumlu hocam Prof. Dr. Güray ARSLAN'a sonsuz şükranlarımı sunarım.

Mehmet EREN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ viii
ŞEKİL LİSTESİ ix
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 14
1.3 Hipotez 16
2 YÖNTEMLER 17
2.1 Düşey Deplasman/Deformasyon Belirlemede Kullanılan Yöntemler 17
2.1.1 GNSS 19
2.1.2 İvmeölçer 23
2.1.3 Görüntü Tabanlı (Video Kamera) Ölçme 28
2.2 Verilerin İstatistiksel Olarak Uyumunun Araştırılması 30
2.2.1 Pearson Korelasyon Katsayısı Hesabı 31
3 UYGULAMA 32
3.1 Test Ölçümleri 32
3.1.1 Video Kameranın Kullanılabilirliğinin Araştırılması 32
3.1.2 Sarsma Masası Testi 50
3.1.3 Çekme Deneyi 52
3.1.4 Sıkıştırma Deneyi 53
3.2 Çelik Kiriş Deney Düzeneği Uygulaması 55
3.3 Davutpaşa Metro Köprüsü Ölçümleri 72
4 SONUÇ VE ÖNERİLER 76
KAYNAKÇA 79
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 85

SİMGE LİSTESİ

σ	Teorik standart sapma
s	Deneysel standart sapma
R	Pseudeorange uzunluğu gözlemleri
Φ	Taşıyıcı faz gözlemleri
F	Frekans
λ	Dalga boyu
ρ	İstasyondan uyduya olan geometrik mesafe
c	Işığın boşluktaki hızı
$\Delta\delta$	İstasyon alıcı saat düzeltmesi
ΔTrop	Troposferik gecikme
N	Tamsayı belirsizliği

KISALTMA LİSTESİ

CORS	Sürekli Gözlem Yapan GNSS İstasyonu
DMS	Dinamik İzleme İstasyonu
EDM	Elektronik Uzunluk Ölçer
FEM/SEY	Sonlu Elemanlar Yöntemi
FFT	Hızlı Fourier Dönüşümü
FKP	Alan Düzeltme Parametreleri
GNSS	Küresel Konumlama Sistemleri
GPS	Global Positioning System
IATS	Görüntü Destekli Total Station
INSAR	Interferometrik Yapay Açıklıklı Radar
LVDT	Lineer Değişken Diferansiyel Transformatörler
MAC	Ana Yardımcı Referans İstasyon Tekniği
MEMS	Mikro Elektro Mekanik Sistemler
N-RTK	Ağ RTK
PPK	Post Proses Kinematik
PPP	Hassas Nokta Konumlama
RTK	Gerçek Zamanlı Kinematik
RTS	Robotik Total Station
SAR	Yapay Açıklıklı Radar
VRS	Sanal Referans İstasyonu
YSİ	Yapı Sağlığı İzleme

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Yapıdaki hareketin sinüs dalga biçimi ve yer değiştirme - zaman grafiği2

Şekil 1.2 Düşey yönde salınım yer değiştirmelerini ölçmek için RTS'nin kullanılması Deney düzeneğinin şematik gösterimi (a) Deney verilerinden türetilen yer değiştirmelerin zaman serisi (b) [8]. 3

Şekil 1.3 Düşey yöndeki IATS ve ivmeölçer ölçümlerinden hesaplanan genlik spektral yoğunlukları: Tam spektrum (a). En baskın frekanslar f_1 ve f_2 ile spektrumun detayı (b) [10]..... 4

Şekil 1.4 Yapıya ait kısa ve uzun periyotlu yer değiştirme grafiği [11]..... 4

Şekil 1.5 Calgary Tower kulesinin yatay hareketi [12]. 5

Şekil 1.6 Köprü tabliyesinin düşey yer değiştirmesi [13]..... 6

Şekil 1.7 Normal kullanım yükleri altında Peder Bernatek yaya köprüsünün yer değiştirme yönü (a) ve yer değiştirme spektrumu (b) [18]..... 7

Şekil 1.8 Trafik nedeniyle orta açıklıkta düşey sapma [24]..... 9

Şekil 1.9 Açıklığın ortasına zıt yönlü olarak yaklaşan iki ağır araçla Dinamik İzleme İstasyonu ölçümü: D-SLR kamera ile yakalanan video karesi(A) düşey yer değiştirme(B) [1]. 10

Şekil 1.10 Dijital görüntü işleme tekniklerini kullanan gerçek zamanlı yer değiştirme ölçüm sistemi [26].....11

Şekil 1.11 Salınım sırasında çekilen fotoğraflar: ortadaki fotoğraf hareketsiz konumu, soldaki ve sağdaki fotoğraflar, salınım yaparken maksimum yer değiştirmeleri göstermektedir (a). Salınım olaylarından birinin PPP işlemesiyle elde edilen kuzey, doğu ve düşey bileşenlerine ve 3B zaman serilerine dayalı çizimdir (b) [27]. 12

Şekil 1.12 Deneysel kurulumun şematik görünümü [28]. 13

Şekil 1.13 Durum 1 için bağıl ve PPP yöntemlerinden elde edilen yer değiştirme zaman serileri ve FFT spektrumu [28].....14

Şekil 2.1 Çalışma kapsamında kullanılacak ölçüm ekipmanları.....18

Şekil 2.2 GNSS ölçme prensibi.....20

Şekil 2.3 Çalışmada kullanılan ivme ölçer ve android işletim sistemindeki deplasman grafiğine ait bir görüntü [45].....25

Şekil 2.4 İvme ölçer sistem konfigürasyonu 26

Şekil 2.5 Ham ivme verisinden elde edilen deplasman grafiği.....27

Şekil 2.6 İlk ve son verinin sıfır değerine sahip olan ölçülerden seçilmesi ile elde edilen deplasman grafiği.....27

Şekil 2.7 İvme verisinin her iki durumuna ait birleştirilmiş deplasman grafiği.....28

Şekil 2.8 Elektromanyetik spektrum ve görünür bölge [46].....29
Şekil 2.9 Işığın ortamlar arasında geçişte yön değiştirmesi [49].....30
Şekil 3.1 Ölçme işleminde kullanılacak kameranın belirlenmesi amacıyla test edilen kameralar.....34
Şekil 3.2 Özel tasarım triprah üzerine monte edilen aparata ait Autocad 3B çizimi.....35
Şekil 3.3 Özel tasarım, alet sehpasına entegre video kameranın titreşim önleyici tertibat.....36
Şekil 3.4 Ölçme noktasına yerleştirilen yapay hedefler.....37
Şekil 3.5 Testlerde kullanılan hareketli obje ve sabitlemede kullanılan mengene (A) ve ölçüm anına ait bir görüntü (B).....38
Şekil 3.6 Basit harmonik harekete ait deplasman grafiği.....38
Şekil 3.7 Refraksiyon kaynaklı deplasman grafiği.....39
Şekil 3.8 Sabit hedef üzerindeki eş dairelere ait standart sapma değerleri.....40
Şekil 3.9 Refraksiyon kaynaklı sapma miktarlarının mesafeye göre değişimi.....42
Şekil 3.10 65 m mesafeden alınan deplasman verisinin refraksiyon etkisi ile hareketin algılanmasında güçlük yaşanması.....43
Şekil 3.11 200 m mesafeden alınan deplasman verisindeki hareketin refraksiyon etkisi ile kaybolması.....43
Şekil 3.12 12.06.2019 tarihinde 1 saat aralıklarla yapılan video kayıtlarında refraksiyon kaynaklı bozulmalar.....49
Şekil 3.13 Sarsma Tablası ve kırmızı kare şeklindeki yapay hedefe ait bir görüntü.....51
Şekil 3.14 Değerlendirme sonucu elde edilen verilere ait zaman serisi.....52
Şekil 3.15 Yapılan çekme testinde 3 farklı zaman ait görüntü.....53
Şekil 3.16 MATLAB değerlendirme sonucu çelik çubuğa ait yer değiştirme zaman grafiği.....53
Şekil 3.17 apılan sıkıştırma testinde 3 farklı zaman ait görüntü.....54
Şekil 3.18 MATLAB değerlendirme sonucu çelik profile ait yer değiştirme zaman grafiği.....54
Şekil 3.19 Autocad 2021 ile çizilen çelik kiriş düzeneğine ait kesit.....56
Şekil 3.20 1. Ölçme işleminin yapıldığı çalışma sahası ve ölçüm yapılan noktalara ait uydu görüntüsü.....57
Şekil 3.21 Çelik kiriş düzeneğine kurulumuna ait görsel.....58
Şekil 3.22 GNSS alıcıları ve ivme ölçer yerleşim planı.....58
Şekil 3.23 CORS ve PPP verilerinde oluşan zaman farkı grafiği.....60
Şekil 3.24 Statik ölçme yönteminde genlik değeri 10 mm'den büyük olan bölgeye ait FFT analiz sonucu (a) ve dalga formu (b).....61

Şekil 3.25 Statik ölçme yönteminde genlik değeri 10 mm'den küçük olan bölgeye ait FFT analiz sonucu (a) ve dalga formu (b). 62
Şekil 3.26 Minimum genlikli deplasman değerine ait dalga formu. 63
Şekil 3.27 GNSS duyarlılığını araştırmak amacıyla gerçekleştirilen ölçüme ilişkin çelik kiriş düzeneği ölçüm sahasına ait görüntü 65
Şekil 3.28 GNSS duyarlılığını araştırmak amacıyla gerçekleştirilen ölçüme ait çelik kiriş düzeneği görüntüsü. 66
Şekil 3.29 Üç yönteme ait deplasman-zaman grafiği 68
Şekil 3.30 Genlik değerinin 10 mm'den büyük olduğu bölgeye ait frekans (a) deplasman-zaman grafiği (b). 69
Şekil 3.31 Yöntemlere ait standard sapma değerleri 70
Şekil 3.32 Genlik değerinin 10 mm'den küçük olduğu bölgeye ait FFT analizi (a) ve deplasman-zaman grafiği (b) 71
Şekil 3.33 YTÜ Kampüsü A Kapısı ile Davutpaşa Metrosu arasındaki çelik yaya köprüsü haritası 72
Şekil 3.34 Yıldız Teknik Üniversitesi A kapısı girişine entegre metro köprüsüne ait bir kesit 73
Şekil 3.35 Metro köprüsüne ait yer değiştirme-zaman grafiği 74
Şekil 3.36 köprüden yaya geçiş anına ait bölgenin yer değiştirme-zaman grafiği 74
Şekil 3.37 Köprünün FFT analizi ile bulunan frekans değerleri 75
Şekil 3.38 Köprünün minimum genlikli bölgesinin sinüs dalga formu 75

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 Ölçümlere ait istatistiksel hesaplamalar 51
Tablo 3.2 FFT analizinden elde edilen frekans değerleri 59
Tablo 3.3 Test işleminde kullanılan sistemlerin özellikleri. 66
Tablo 3.4 FFT analizinden elde edilen frekans değerleri 67

ÖZET

Farklı Algılayıcı Sistemlerle Obje Hareketlerinin Belirlenebilirliği Üzerine Bir Araştırma

Mehmet EREN

Harita Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Gürsel HOŞBAŞ

Bu tez kapsamında, yapı dinamiklerinin belirlenmesi için görüntü tabanlı ölçme yönteminin ek bir donanım veya algılayıcı sistem olmaksızın kullanılabilmesi ve GNSS ölçümleri ile küçük genlikli düşey hareketlerin farklı değerlendirme stratejisiyle belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, tarafımızca tasarlanan ve köprüyü temsil eden Çelik Kiriş Deney Düzeneğindeki ölçme işleminde kullanılması düşünülen algılayıcı sistemler (Mikro Elektro Mekanik Sistemler (MEMS) tipi ivme ölçer, GNSS ve video kamera) bir takım test ve kalibrasyon işlemine tabi tutulmuştur. İlk olarak kameranın düşey hareketi yakalamaktaki başarısını belirlemek amacıyla, kameranın veri toplayacağı hareketli nesnenin arkasına bire bir ölçekli mira ve benzeri yapay hedefler yerleştirilmiştir. Ardışık fotoğraf çerçeveleri üzerinden yapılan mira okumalarının, MATLAB 2018b yazılımında değerlendirilerek elde edilen yer değiştirmeleri ile diğer algılayıcı sistemlerin oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir. Daha sonra, sarsma masası deneyi ile tez kapsamında kullanılacak kamera ve MEMS'in (referans veri olması planlanan) kalibrasyon ölçümleri yapılmış elde edilen yer değiştirme verileri sarsma masası deneyine ait ölçüm işleminde referans olarak belirlenen Lineer Değişken Diferansiyel Transformatörler (LVDT) ölçümleri ile aralarındaki korelasyon %99

üzerinde ve her bir algılayıcı için tüm ölçüm verilerinden hesaplanan standard sapma (σ) değerleri LVDT, Mikro Elekro-Mekanik System (MEMS) ve kamera verileri için sırasıyla 70.64 mm, 70.26 mm ve 70.24 mm hesaplanmıştır. İki farklı zamanda gerçekleştirilen Çelik-Kiriş deneylerinden ilk ölçüme ait algılayıcı sistemler; ivme ölçer, biri CORS diğeri statik ölçüm yapan iki GNSS alıcısı ve kamera ile toplanan verilerin değerlendirilmesi ile elde edilen düşey yer değiştirmelerin genliğinin 10 mm veya daha büyük olduğu bölgede deplasman değerleri birbirleri ile uyumlu olarak belirlenmiştir. Hareketin 10 mm'den küçük genlikli olduğu bölgeye ait zaman serisindeki sinüs dalga formunun bozulduğu, video kamera verileri yardımı ile 1-2 mm deplasmanın algılanabildiği ancak verilerde refraksiyon kaynaklı kirlenmeler görülmüştür. İkinci ölçme işleminde ise ivme ölçer ve iki GNSS alıcısı (sadece GPS+GLONASS uydu sistemlerinden veri toplayan Topcon Hiper SR ve GPS+GLONASS+BEIDOU+GALLILEO uydularının verilerini toplayan Topcon Hiper VR GNSS alıcısı) ile veriler toplanmıştır. Verilerin değerlendirilme stratejisinde, her iki alıcının GPS+GLONASS uydu sistemiyle işlenmesi durumunda deplasman grafiği üzerinde fark edilebilir bir iyileşme görülmemektedir. Ancak SR'nin GPS+GLONASS, VR'nin ise GPS+GLONASS+BEIDOU+GALLILEO ile değerlendirilmesi durumunda zaman serisinde 5 mm ve üzeri genlikli hareketin dalga formunda önemli bir bozulma olmadığı değerlendirilmiştir. Referans algılayıcı olan ivme verilerinin zaman serisindeki sinüs dalga formunda 0.3 mm genlik değerinde bile bozulma olmadığı gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapı dinamikleri, düşey hareket, frekans, deplasman/deformasyon, GNSS, ivme ölçer, video kamera.

ABSTRACT

A Research on the Detectability of Object Movements Using Different Sensors

Mehmet EREN

Department of Geomatic Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assis. Prof. Dr. Ramazan Gürsel HOŞBAŞ

Within the scope of this thesis, it is aimed to use the image-based measurement method without any additional hardware or sensor system to determine the structure dynamics, and to determine the small amplitude vertical movements with different evaluation strategies by using GNSS measurements. In this context, the sensor systems (Microelectromechanical Systems (MEMS) type accelerometer, GNSS and video camera) designed by us and intended to be used in the measurement process in the Steel Beam Test Apparatus representing the bridge were subjected to a number of tests and calibrations. First of all, in order to determine the success of the camera in tracking vertical movement, a scaled artificial target similar to rod was placed behind the moving object from which the camera will collect data. It has been observed that the displacements obtained by evaluating the observed rod values on sequential photo frames in MATLAB 2018b software are quite compatible with other sensor systems. Then, the calibration measurements of the camera and MEMS (planned to be the reference data) to be used in the thesis with the shaking table experiment were performed, and the displacement data obtained were found to have a correlation of over 99% with the Linear variable differential transformer (LVDT) measurements determined as a

reference in the measurement process of the shaking table experiment, and each sensor (Standard Deviation) σ values computed from all measurement data for LVDT, Micro Electro-Mechanical System (MEMS) and camera data were calculated as 70.64 mm, 70.26 mm and 70.24 mm, respectively. The sensing systems of the first measurement from the Steel Beam experiment carried out at two different times; In the region where the amplitude of vertical displacements obtained by evaluating the data collected by two GNSS receivers, one of which is CORS and the other static measurement, accelerometer and camera, displacement values are compatible with each other and frequency values are calculated in the region where the amplitude of vertical displacements is 10 mm or greater. It has been observed that the sine waveform of the displacement in the time series of the region of motion with an amplitude of less than 10 mm is distorted, with the help of video camera data, motions of 1-2 mm displacement can be detected, but the data due to refraction is contaminated. In the second measurement, data were collected with an accelerometer and two GNSS receivers (Topcon Hiper SR GNSS receiver, which only collects data from GPS+GLONASS satellite systems, and Topcon Hiper VR, which collects data from GPS+GLONASS+BEIDOU+GALLILEO satellites). In the data evaluation strategy, if both receivers are processed with the GPS+GLONASS satellite system, there is no distinguishable distinction on the displacement graph. However, when SR was processed with GPS+GLONASS and VR with GPS+GLONASS+BEIDOU+GALLILEO, it was evaluated that there was no significant deterioration in the waveform of motion with an amplitude of 5 mm and above in the time series. It has been observed that there is no deterioration in the sine waveform in the time series of the acceleration data, which is the reference sensor, even at the amplitude value of 0.3 mm.

Keywords: Structural dynamics, vertical motion, frequency, displacement/deformation, GNSS, accelerometer, video camera.

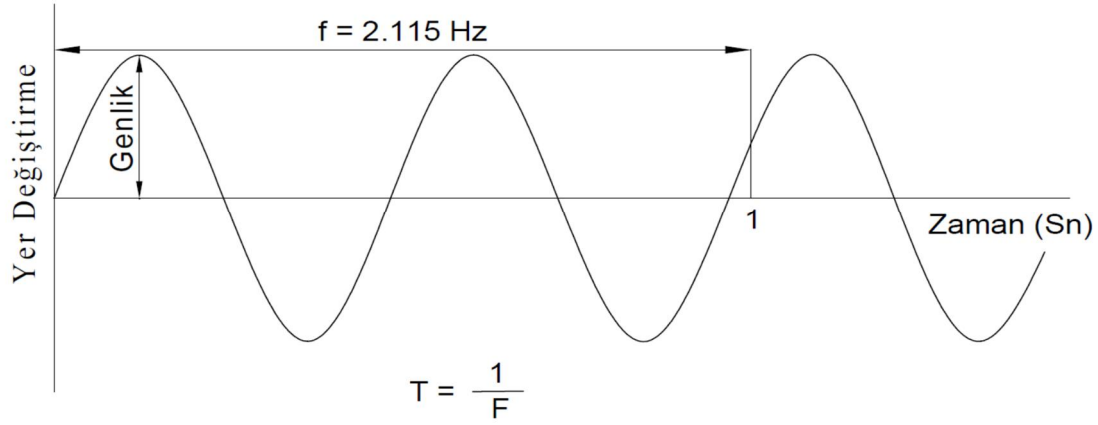
1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Barajlar, köprüler, tüneller, çok katlı binalar ve kuleler vb. yapılar, mühendislik yapıları olarak adlandırılmaktadır. Bir yapının maruz kaldığı iç veya dış kuvvetlere vermiş olduğu tepki yapıda çökme, yükselme, burulma v.b. şeklinde kendini gösterir. Bu kuvvetlere karşı yapının tepki kuvvetlerinin yıkıcı etkileri mühendislik yapılarının tasarımı aşamasında hesaplanan parametrelerinde sapmalara neden olmaktadır. Bu yapıların hizmet verdikleri süre boyunca uygun aralıklarla ve uygun yöntemler ile izlenmesi gerekmektedir. Bu gereklilik yapıların yüksek maliyetleri ve artan teknolojiye paralel olarak büyüyen boyutları ile hizmet ettikleri kitlenin artması dolayısıyla yapıda oluşabilecek hasarın kamu güvenliğini tehdit etmesinden ileri gelmektedir. Aşırı değerler ve aralıklar (aşırı titreşimler veya genleşme derzlerindeki hareketler), gibi kullanımı sınırlayabilecek sorunlar yapının izlenmesi ile belirlenebilir [1]. Hatta bu durum Çelebi (2000) tarafından yapının eşik yer değiştirmelerinin belirlenerek ve değişen dinamik özelliklerinin tanımlanması gibi bilgiler ışığında kamu güvenliğini sağlamak ve/veya yapının performansını iyileştirmek için adımlar atmak şeklinde ifade edilmektedir [2]. Yapılan bu ölçümler ile yapıya ait parametrelerde ortaya çıkan sapmalar karar mekanizmaları tarafından değerlendirilip gerekli önlemler alınmaktadır.

İnşaat aşamasında ve ilk işletme yılında, İngiltere'de Severn nehri üzerinde inşa edilen Severn köprüsünde kablo salınımları ile ilgili problemlerine ek olarak kablo sönümleme parametreleri ölçülmüş yapıda oluşan titreşimleri engellemek için ikincil kablo sistemi kurulmuştur [3]. Mühendislik yapılarının belirli periyotlar halinde veya 7/24 izlenmesi işlemi, Yapı Sağlığı İzleme (YSİ) şeklinde adlandırılmakta ve yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Dong ve Catbas 2021 YSİ'yi operasyonel durumu izleme, durum değerlendirme ve yapı hasarlarını tespit etme süreci olarak tanımlamaktadır [4]. Malzeme bozulması veya yapısal değişiklikler, hizmet kesintisine neden olabilir veya yapılar için potansiyel olarak güvenlik riski oluşturabilir.

Yapının maruz kaldığı yükler/kuvvetlere tepki olarak yapmış olduğu hareket zaman serisine döküldüğünde sinüzoidal hareket şeklinde olduğu görülmektedir (Şekil 1.1). Bir tam dalga; ardışık iki sinüs tepesi veya iki çukur arasını ifade etmektedir. Birim zamanda tamamlanan dalga sayısı, o yapıya ait hareketin frekans değerine eşittir. Yapının toplam yer değiştirme miktarı genliğin yaklaşık iki katı olarak hesaplanır. Hareketli bir objenin frekansının ölçülebilmesi için o objeye ait frekansın 2 katı örneklem aralığına sahip algılayıcı sistem kullanılması gerekmektedir (Nyquist frekansı). Bir yapının frekansını ölçmeden önce yapıya ait yaklaşık frekansın bilinmesi ve bu frekansın 2 katı veya daha fazla veri kayıt sıklığına sahip algılayıcı sistem kullanılması gerekmektedir. Yapıya gelen dış yüklerin sonucu olarak yapının doğal frekanslarında meydana gelen değişim eşik değeri aşarsa yapıda kalıcı hasara veya yapının tamamen kullanılamaz duruma gelmesine neden olabilir. Dolayısıyla bu parametrenin doğru belirlenmesi hayati önem taşımaktadır.

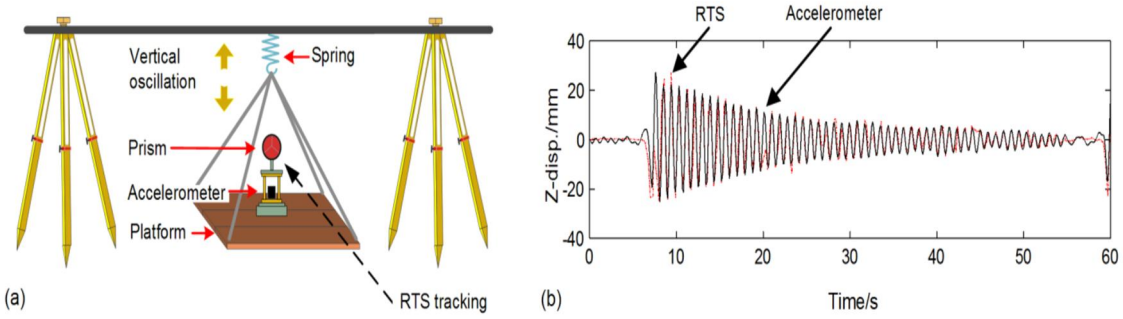


Şekil 1.1 Yapıdaki hareketin sinüs dalga biçimi ve yer değiştirme - zaman grafiği

Yapıya etkiyen; rüzgâr, trafik yükü, sıcaklık, su yüklemesi vb. kuvvetlere karşı gösterilen reaksiyonun belirlenmesinde oldukça farklı algılayıcı sistemler bulunmaktadır. YSİ'nin öncelikli amacı olan dinamik yapılara ait hareketlerin belirlenmesinde; LVDT ekstansometre, tiltmetre, mikrometre, ivmeölçer, GNSS (Statik, Kinematik, Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK) ve Hassas Nokta Konumlandırma (PPP)), teodolitler ve elektronik mesafe ölçerler (EDM), görüntü tabanlı ölçme, lazer vibrometre vb. olmak üzere birçok algılayıcı sistem kullanılmaktadır. Diğer taraftan, yapının karşı karşıya kaldığı yükler ve yapısal koşullar altında, ilgili yapının bilgisayarda tasarlanan bir modelinin sonlu elemanlar

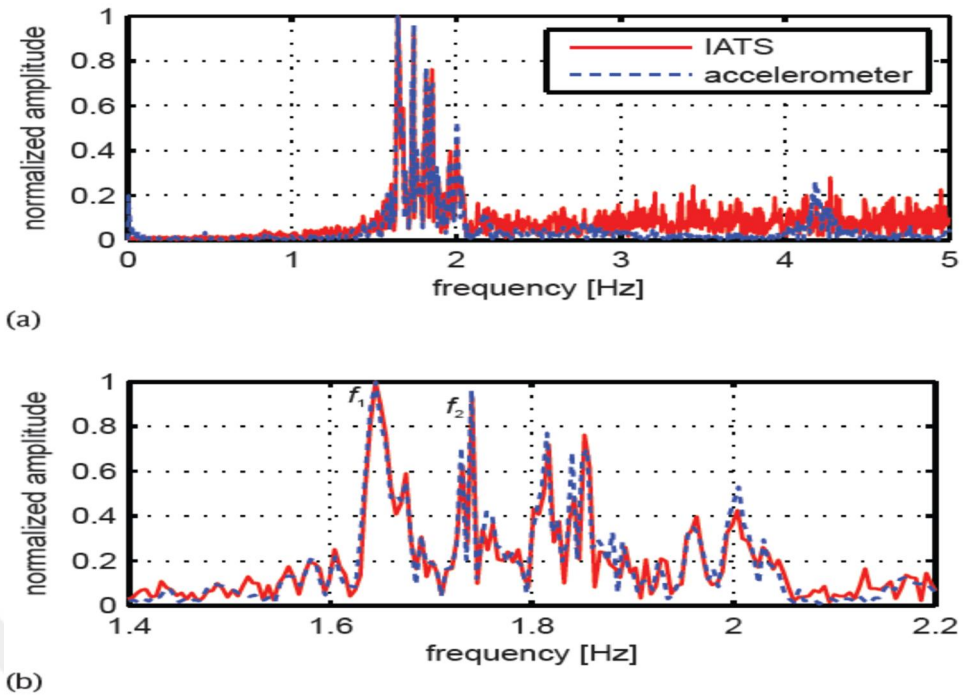
yöntemi (SEY) kullanılarak maruz kalınan kuvvetin yapı üzerindeki etkileri incelenmektedir. Bir diğer yöntem ise yapının belirli bir oranda küçültülmüş numunesine ait laboratuvar ortamında temaslı ya da temassız olarak toplanan veriler yardımı ile yapının reaksiyonları modellenmeye çalışılmaktadır.

Literatüre bakıldığında yapı dinamiklerinin belirlenmesinde oldukça farklı algılayıcı sistem ve sistemlerin kombinasyonları şeklinde çalışmalar bulunmaktadır. Dinamik yapıların ölçülmesinde [5]–[7] total station kullanmışlardır. Yu vd. (2017) platform üzerine prizma ve ivme ölçer yerleştirilip bu platformun bir yay aracılığı ile düşeyde salınım yapması sağlanmış (Şekil 1.2) ve hem ivme ölçer hem de Robotik Total Station'dan (RTS) elde edilen verilerden hesaplanan frekans değerleri arasındaki fark % 0.2 olarak gerçekleştiği görülmüştür [8]. Bu durumun oldukça uyumlu olduğu değerlendirilmiştir.



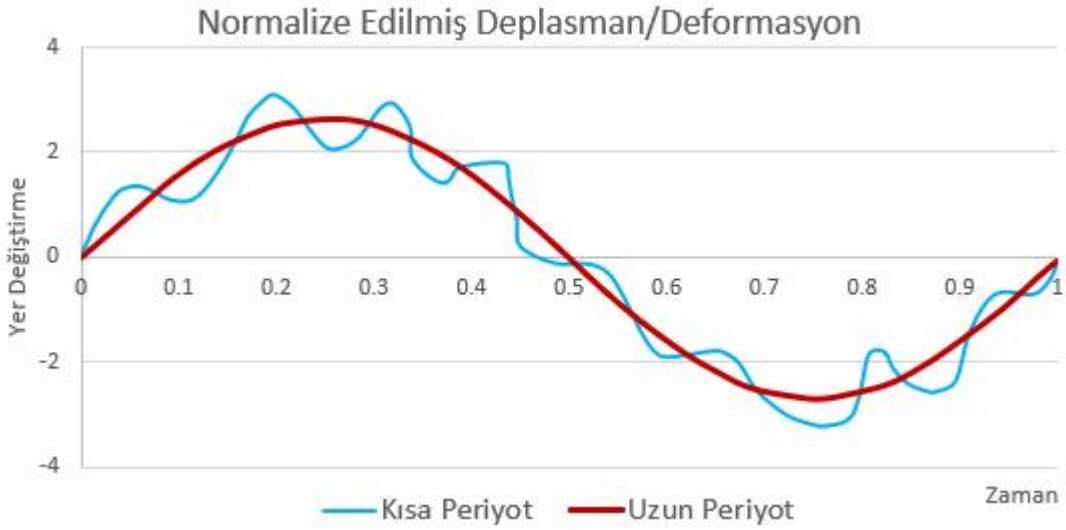
Şekil 1.2 Düşey yönde salınım yer değiştirmelerini ölçmek için RTS'nin kullanılması Deney düzeneğinin şematik gösterimi (a) Deney verilerinden türetilen yer değiştirmelerin zaman serisi (b) [8].

Moschas ve Stiros (2014), 150 kw'lık akım taşıyan elektrik iletim hattı kafes kulesinin dinamik hareketlerinin ölçümünde RTS kullanmışlardır [9]. Ehrhart ve Lienhart (2015), teodolitin dürbününün ekseninde 10 fps kayıt yapabilen görüntü destekli total station (IATS) ile Avusturya Graz'da yaya köprüsüne ait hareketleri belirlemiş, spektrumdaki (Şekil 1.3) baskın frekanslar (f1 = 1.65 Hz ve f2 = 1.74 Hz) için, IATS ölçümleri ivmeölçer ölçümleriyle oldukça uyumlu gerçekleştiğini gözlemlemişlerdir [10].



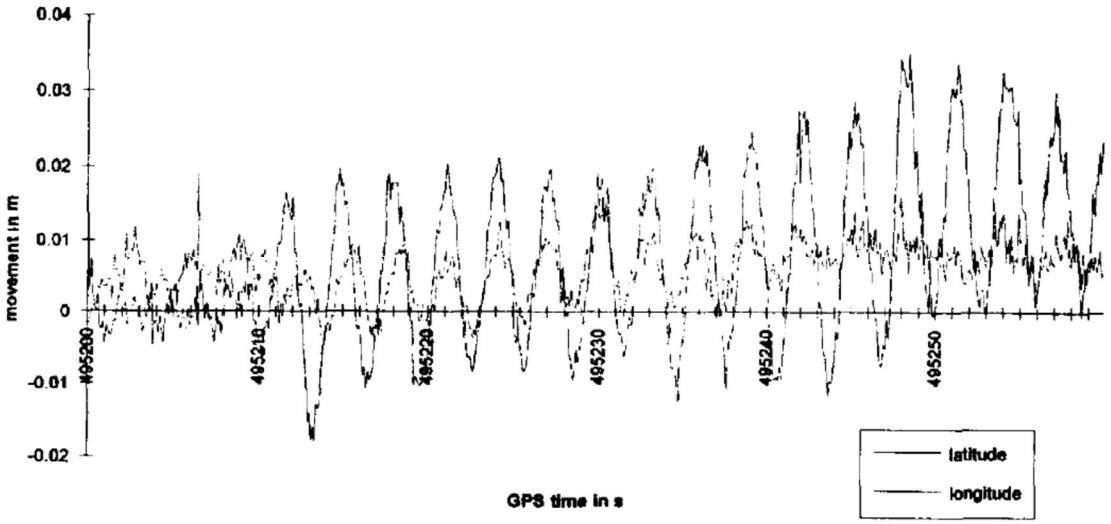
Şekil 1.3 Düşey yöndeki IATS ve ivmeölçer ölçümlerinden hesaplanan genlik spektral yoğunlukları: Tam spektrum (a). En baskın frekanslar f_1 ve f_2 ile spektrumun detayı (b) [10].

Yapı dinamiklerinin belirlenmesinde GNSS ile yapılan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Meng vd. (2011), GPS ile köprülerin izlenmesiyle, temel oturmasının neden olduğu uzun vadeli hareket ve genleşmeyle oluşan kısa vadeli hareketi algılama kapasitesine sahip olduğunu belirtmiştir [11] (Şekil 1.4).



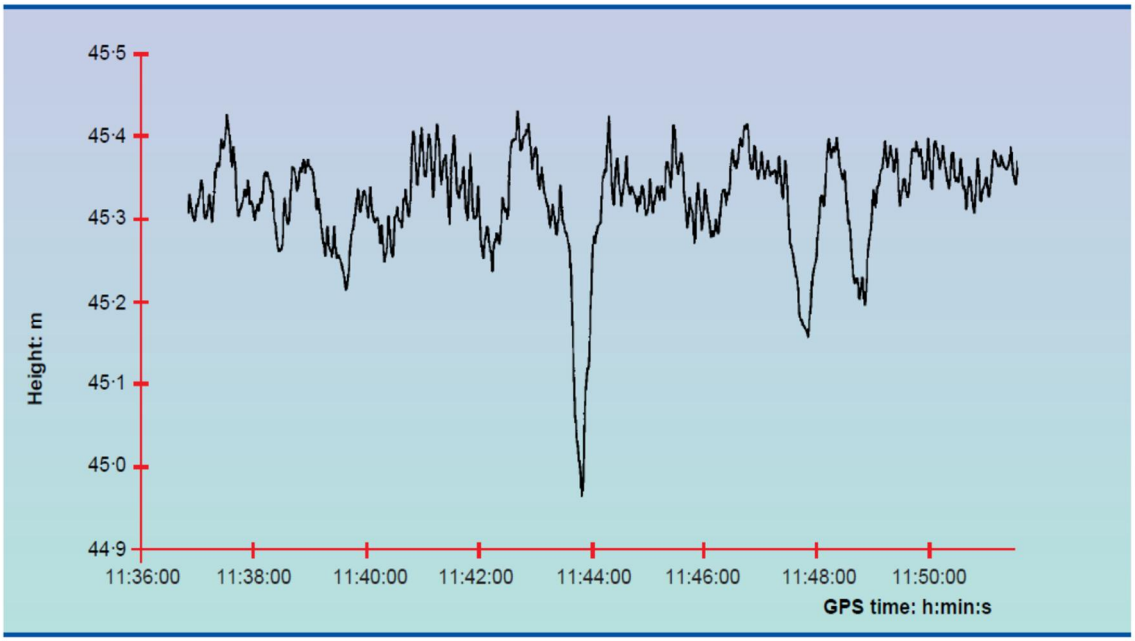
Şekil 1.4 Yapıya ait kısa ve uzun periyotlu yer değiştirme grafiği [11]

GPS ile yapı dinamiklerinin ölçülmesi ilk defa Kanada'da bulunan Calgary Tower kulesinde gerçekleştirilmiş ve yapıya ait 0.3 Hz'lik doğal frekans hesaplanmış ve kuzey-güney yönündeki genlik yaklaşık ± 15 mm, doğu-batı genliği ise yaklaşık ± 5 mm (Şekil1. 5) olarak hesaplanmıştır [12].



Şekil 1.5 Calgary Tower kulesinin yatay hareketi [12].

Dinamik yapılardan olan asma köprülerden İngiltere'de bulunan Humber Bridge köprüsünde 7 Mart 1996 tarihinde köprü tabliyesinin orta açıklığında ilk defa GPS ile ölçümler gerçekleştirilmiştir. 1 Hz'lik veri kayıt sıklığı ile RTK GPS verilerini toplayarak elde edilen verilerin analizi ile gerçekleştirilmiş ve köprünün düşey yöndeki hareketi ortalama 15 cm sadece 1 noktada 40 cm'lik hareket saptanmış (Şekil 1.6) ve bu büyük genlikli hareketin ağır tonajlı araç geçiş anına ait olduğu değerlendirilmiştir [13].



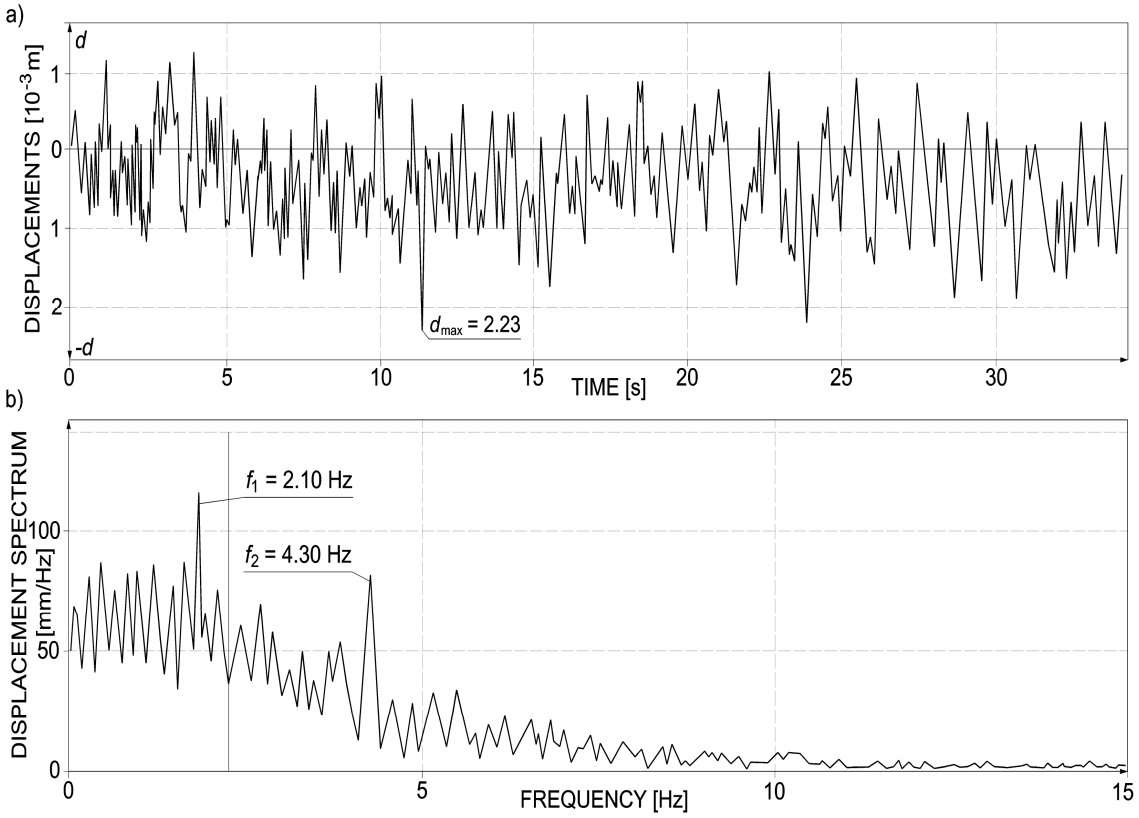
Şekil 1.6 Köprü tabliyesinin düşey yer değiştirmesi [13].

Yi vd. (2011), yüksek hızlı (1 Hz ve daha yüksek veri kayıt sıklığına sahip) GPS (50 Hz ve 100 Hz'lik iki alıcı ile) alıcısının hem çevresel koşullardan kaynaklı köprü titreşimlerini hem de araç yükünün neden olduğu yüksek frekanslı hareketi ölçmede başarılı olduğunu ifade etmişlerdir [14]. Diğer yandan Ogundipe vd. (2012), köprünün hareketlerinin genliğinin küçük olduğu durumlarda bile frekanslarını elde etme doğruluğunun yüksek olduğu ve 100Hz'e kadar veri sıklığı ile yapıların yüksek doğal frekanslarının da GPS ile saptanabildiğini rapor etmişlerdir [15]. Oku Topal ve Akpinar (2021), mini bir sarsma tablası yardımıyla yapının farklı frekans değerlerine sahip hareketlerinin farklı uydu sistemleri stratejisi ile belirlenmesi işleminde GNSS'i kullanmıştır [16].

GPS/GNSS ile ölçüm yapılması durumunda sistemin kullanımı ile ilgili bazı çevresel kısıtlar söz konusu olabilmektedir. Açık bir ufkun olmaması veya ölçüm noktası etrafında bulunan yansıtıcı yüzeyler nedeniyle sinyalin gecikmesi ve multipath olarak adlandırılan etkiden kaynaklı nokta konum belirleme doğruluğu üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Yapılara ait dinamiklerin GNSS ile belirlenmesi çalışmalarında Wieser ve Brunner (2002), kablolardan kaynaklı multipath'den söz ederken [17], Ashkenazı ve Roberts (1997), çok yüksek araçların sinyali engellemesinden kaynaklı nadiren gerçekleşen etkiyi dile getirmiştir [13]. Lovse vd.

(1995), choke-ring GPS antenlerini kullanmak gibi önlemlerle multipath etkisinin azaltılabileceğini ifade etmişlerdir [12].

Farklı tiplerdeki köprü yapılarının dinamik davranışının interferometrik radar uygulaması ile sırasıyla 60 m, 100 m ve 145 m mesafelerden toplanan veriler yardımı ile yer değiştirme ve frekanslarının elde edilmesinde (Şekil 1.7) mesafenin farklı olmasının sonuçlar üzerinde kayda değer bir farka neden olmadan belirlenebildiğini geleneksel sensörlere kıyasla yapılarının yer değiştirme ve frekanslarını hızlı ve yüksek doğrulukla elde ettiğini ifade etmiştir [18].



Şekil 1.7 Normal kullanım yükleri altında Peder Bernatek yaya köprüsünün yer değiştirme yönü (a) ve yer değiştirme spektrumu (b) [18].

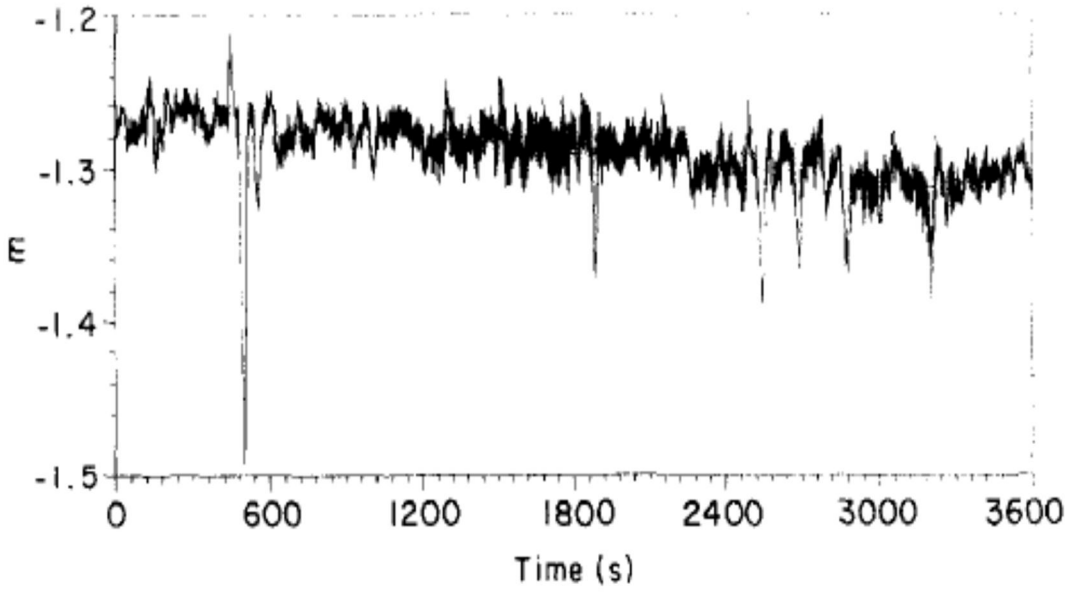
Yer değiştirmenin belirlenmesinde geleneksel ölçüm yöntemlerinden olan ivme ölçerler ile ilgili bir çok çalışma bulunmaktadır. Yunus vd. (2018), düşük frekanslı hareketlerin belirlenmesinde ivme ölçerin yetersizliğinden söz etmiştir [19]. Diğer taraftan, bir çok çalışmada çifte integrasyon ile yapılan hesaplamalarda "c" sabitinden kaynaklı bir gürültü olduğu ifade edilmektedir [2], [10], [14], [20], [21]. Ancak Yi (2013), integrasyon işlemi ile hesaplanan ve integrasyon sabitlerinden kaynaklı gürültüye neden olan bu işlem yerine çifte türevi ile hesaplanmasını

önermiştir [14]. Çifte integrasyondan kaynaklı hata gerekçesi ile Handayani vd. (2015); Yunus vd. (2018), yapının izlenmesinde GPS teknolojisi ve ivmeölçer arasındaki tamamlayıcı enstrüman olarak tanımlamışlardır [19], [22].

Lineer değişken diferansiyel transformatörler (LVDT'ler), yer değiştirme ölçümünde oldukça hassas sonuçlar vermektedir. Bu temaslı ölçüm yöntemi, yapısal testler için yer değiştirmeyi ölçme işlemini karşılamasına rağmen saha çalışmalarında ölçüm noktasına montajı için sabit bir referans noktasına ihtiyaç duymakta ve köprüler genellikle nehirler, deniz kanalları, dağlık araziler veya derin vadiler gibi zorlu arazi koşullarına sahip bölgelerde inşa edildiğinden bu algılayıcı sistemlerin kullanılması ya çok zor ya çok maliyetli veya zaman alıcı hatta başarılması imkansızdır [23].

Dinamik yapıların izlenmesinde, ardışık fotoğraf kareleri veya video kayıtları yardımıyla görüntü tabanlı algılayıcı sistemler de yaygın olarak kullanılmaktadır. Kolay kurulumu ve fazla iş gücü gerektirmeyen, hareketli nesneler üzerindeki doğal veya yapay hedefler yardımı ile temassız ölçüm olanağı tanıması sistemin sağlamış olduğu en büyük avantajlardır.

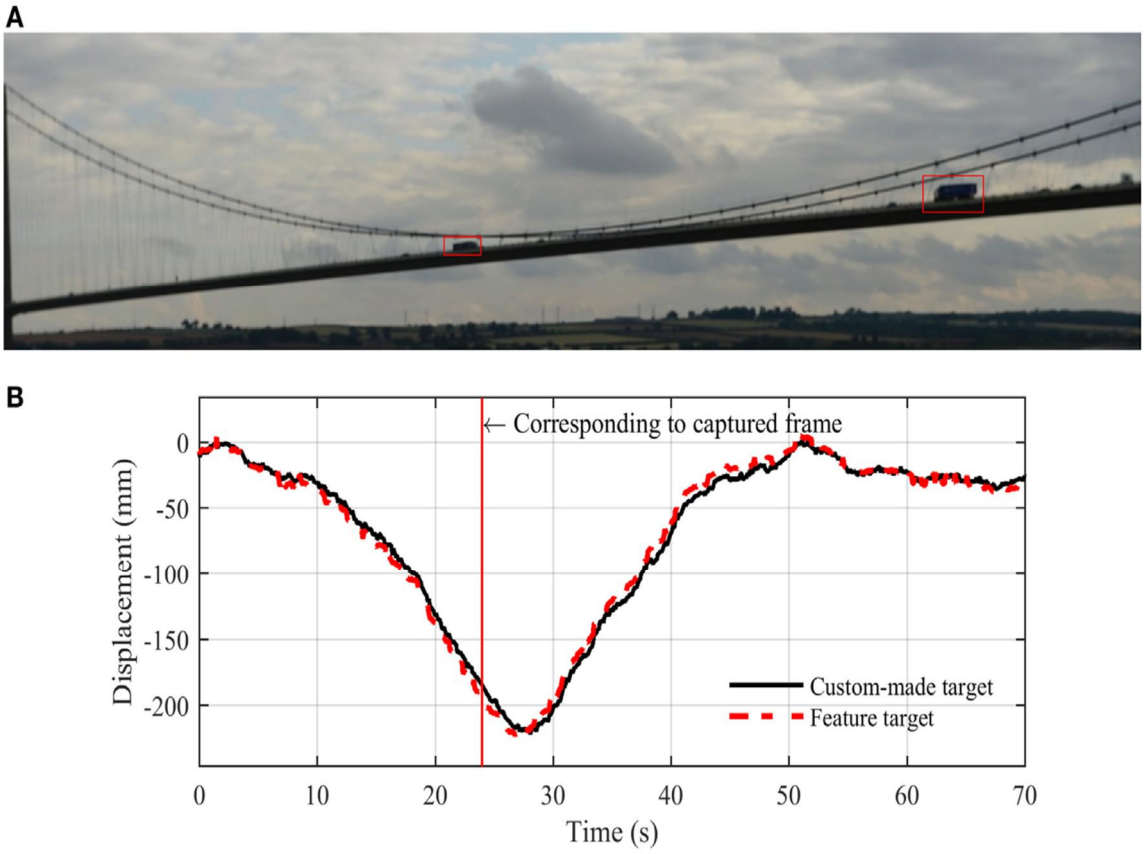
Görüntü tabanlı izlemenin en eski örneklerinden biri, video kamera yardımı ile Tacoma Narrows Bridge (Washington Üniversitesi, 1954) köprüsünde kullanılmıştır [1]. Stephen vd. (1993), Humber Bridge köprüsünde yaptıkları çalışmada 710 m mesafeden ve 25 Hz'lik (FPS) kamera ile kayıtları toplamışlardır. Hafıza probleminden dolayı 6 çerçevede bir olacak şekilde veriler seyreltilerek (4.17 Hz) işlenmiş köprünün orta açıklığındaki düşey bileşende toplamda 45 cm (Şekil 1.8) ve 0.12 Hz'lik bir hareketi belirlemişlerdir [24]. Daha sonra, Brownjohn vd. (1994) bu yapıya ait doğal frekansı 0.125 Hz bulmuşlardır [25].



Şekil 1.8 Trafik nedeniyle orta açıklıkta düşey sapma [24]

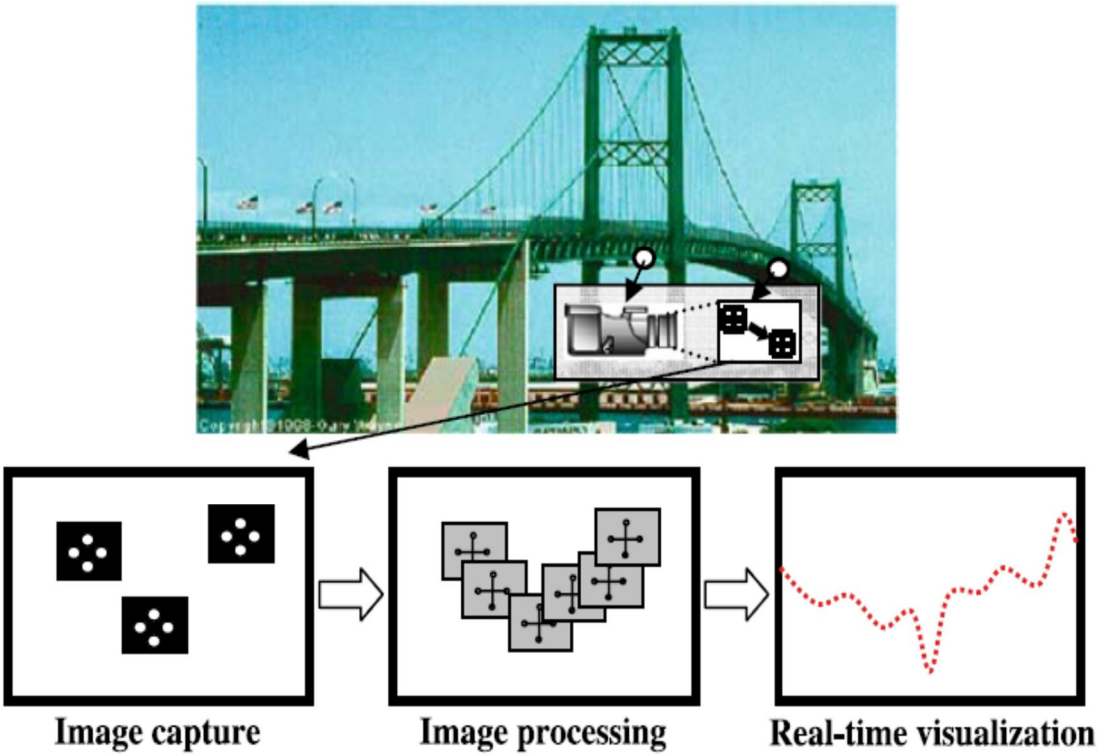
Macdonald vd. (1997), Severn Bridge köprüsünde yapılan ölçümlerden köprü elemanlarına ait (tabliye, pilon) mode şekilleri ve frekanslarını, SEY ile karşılaştırılmıştır [3].

Pan vd. (2016), tren yolu köprüsünden tren geçişi sırasında köprüde meydana gelen yer değiştirmeleri ve dijital görüntü korelasyonunun (DGK) doğruluğunu ve uygulama potansiyelini kanıtlamıştır [23]. Humber Bridge köprüsünde birbirine doğru hareket eden ağır tonajlı kamyon geçişi ile köprü performansını izleyerek yüke karşı köprü tepkisini fiziksel ve nicel olarak simüle etmiştir (Şekil 1.9). Bu işlemde köprü orta açıklığında (710 m mesafeden) video kamera ile hem yapay hem de doğal hedeften alınan yer değiştirmelerin bir birleri ile uyumlu olduğu görülmüştür [1].



Şekil 1.9 Açıklığın ortasına zıt yönlü olarak yaklaşan iki ağır araçla Dinamik İzleme İstasyonu ölçümü: D-SLR kamera ile yakalanan video karesi(A) düşey yer değiştirme(B) [1].

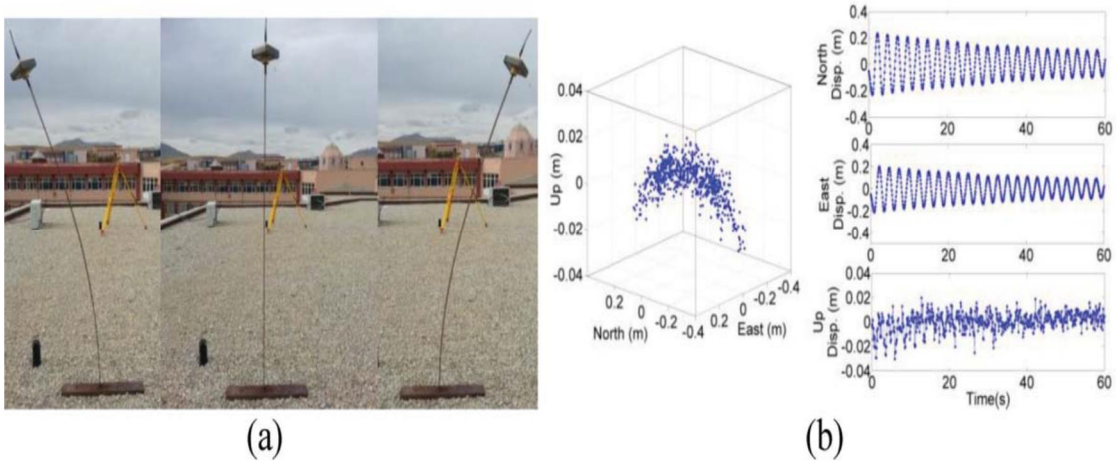
Kameralar yardımı ile görüş tabanlı ölçme sistemlerinin yaptığı ölçümler genellikle post- proses olarak işlense de eş zamanlı olarak işlendiği uygulamalarda vardır. Lee ve Shinozuka (2006), teleskopik bir mercek ile gerçek zamanlı köprü yer değiştirmelerini ölçebilen bir sistemi önermiştir [26] (Şekil 1.10).



Şekil 1.10 Dijital görüntü işleme tekniklerini kullanan gerçek zamanlı yer değiştirme ölçüm sistemi [26].

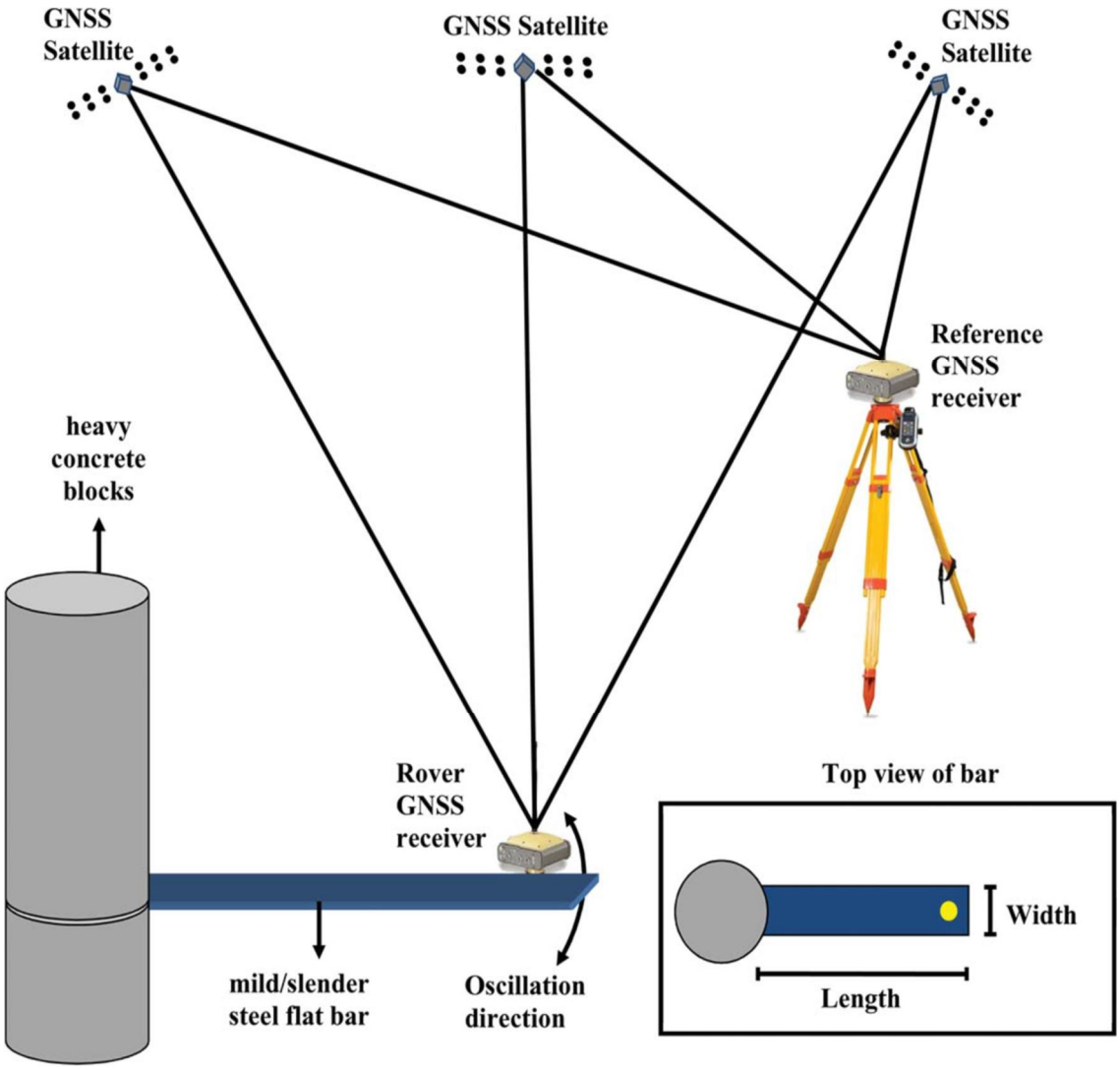
Çalışmalarda, dinamik yapılar üzerindeki uygulamalar ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Diğer taraftan yapıyı temsil eden küçültülmüş numuneler üzerinde yapının davranışları modellenebilir veya ölçü enstrümanın performansı test edilebilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar;

Mühendislik yapılarının kinematik PPP çözümünün yatay salınım algılama kapasitesi, esnek bir yapıyı simüle etmek için çelik bir çubuk üzerine kurulu GNSS alıcısı (Şekil 1.11) kullanılarak test edilmiştir [27].

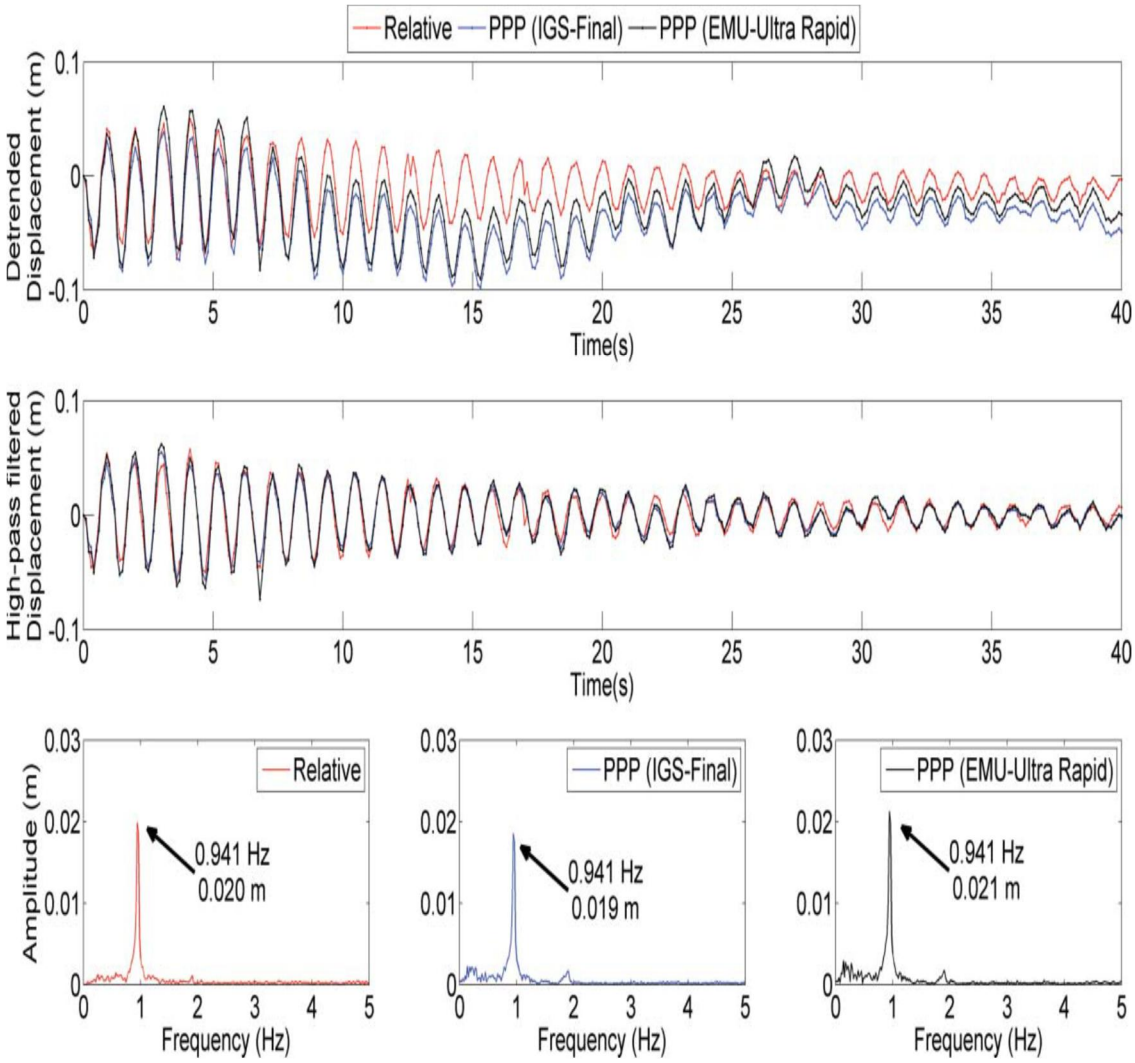


Şekil 1.11 Salınım sırasında çekilen fotoğraflar: ortadaki fotoğraf hareketsiz konumu, soldaki ve sağdaki fotoğraflar, salınım yaparken maksimum yer değiştirmeleri göstermektedir (a). Salınım olaylarından birinin PPP işlemesiyle elde edilen kuzey, doğu ve düşey bileşenlerine ve 3B zaman serilerine dayalı çizimdir (b) [27].

Yiğit ve Gürlek (2017), Şekil 1.12'de şematize edilen ölçü düzeneği ile düşeyde hareket edebilen farklı boyutlardaki çelik çubuklar ile yapının frekans ve yer değiştirmeleri ile ilgili 3 farklı değerlendirme stratejisi ve 4 farklı durum için işlenmiş, frekans ve yer değiştirmeler zaman serisine dökülmüştür (Şekil 1.13). Her 4 durumda elde edilen 3 farklı stratejide bulunan frekans değerleri aynı olarak gerçekleşmiştir. Diğer taraftan farklı değerlendirme stratejileri arasında yer değiştirme grafikleri tam bir uyum içerisinde değildir. Butterworth filtreleme kullanılarak uyum sağlanmıştır [28].



Şekil 1.12 Deneysel kurulumun şematik görünümü [28].



Şekil 1.13 Durum 1 için bağıl ve PPP yöntemlerinden elde edilen yer değiştirme zaman serileri ve FFT spektrumu [28].

1.2 Tezin Amacı

Kamunun kullanımına sunulan mühendislik yapılarının hizmet verdikleri süre içerisinde belirli periyotlar halinde veya sürekli (7/24) olarak sağlığının izlenmesi ve yapıya ait deplasman frekans gibi dinamiklerinin ölçülmesi, tasarım aşamasında belirlenen parametrelerinin takip edilmesi gerekmektedir. Bu dinamiklerin belirlenmesi amacıyla Yıldız Teknik Üniversitesi içerisinde geliştirilen 7 m açıklık ve 0.50 m genişlikli çelik kiriş test düzeneği üzerinde yapılan 3 (GNSS, İvmeölçer ve Video Kamera)farklı algılayıcı sistem ile toplanan verilerin işlenerek yapıya ait doğal frekans ile deplasman datalarının elde edilmesi hedeflenmiştir. Öncelikli olarak algılayıcı sistemlerin kalibrasyon ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Tez ile hedeflenen saha uygulamasında, MEMS tipi ivme ölçerin referans algılayıcı olarak kullanılması

benimsenmiştir. Kalibrasyon testlerinde sarsma masasına ait yüksek duyarlıkta deplasman ölçüsü yapabilen LVDT'nin verileri ile MEMS ve video kamera ölçüm sonuçları karşılaştırılarak MEMS'in referans veri olarak kullanılıp kullanılamayacağı araştırılmıştır. Sarsma masasına bünyesinde bulunan LVDT'ye ait verileri referans olarak kabul edilmiş ve LVDT, MEMS ve kamera verileri arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçmek için Pearson korelasyon katsayıları hesaplanmıştır. Referans verinin, BWT901CL ile korelasyon katsayısı 0.992, kamera ile arasındaki korelasyon katsayısı 0.997 olarak hesaplanmıştır. Dolayısıyla veri setleri arasında oldukça yüksek bir ilişki olduğu anlaşılmıştır. Diğer taraftan ölçü setlerine ait standard sapma değerleri LVDT, MEMS ve kamera verileri için sırasıyla 70.64 mm, 70.26 mm ve 70.24 mm bulunmuştur. Literatürde 0.2 Hz'lik hareketin belirlenmesinde sıkıntılar olduğundan yola çıkarak kullanılacak ivme ölçer ile sarsma masası 0.1 Hz değerine sahip bir hareket yapacak şekilde ayarlanmış, bu hızda hareket eden nesnenin takibinin rahatlıkla yapılabileceği sonucuna varılmıştır.

Ayrıca, video kamera kalibrasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Ölçme işleminde kullanılan ve bir tarafı mira şeklinde tasarlanmış yapay hedeften resim çerçevelerinde hareketli objenin mira üzerindeki konumlarına ait nivo benzeri okumaları yapılan ve MATLAB 2018b versiyonlu yazılımda işlenerek elde edilen deplasman verileri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan % 99 üzerinde başarı sağladığı tespit edilmiştir.

İki farklı tarihte gerçekleştirilen çelik kiriş deneyi ile yapıya ait frekans ve deplasman değerleri hesaplanmış ve verilerin istatistiki açıdan uyumlu veriler olduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı kamera görüntülerinin işlenmesiyle elde edilecek yapı dinamiklerinin doğru hesaplanması ve elde edilen sonuçların iyileştirilmesi ayrıca görüntü tabanlı tekniğin tek başına kullanılması, GNSS verileri için farklı veri değerlendirme stratejileri kulanılarak küçük genlikli hareketlerin (<10 mm) belirlenebilmesi hedeflenmiştir.

1.3 Hipotez

Çelik kiriş deney düzeneği ile yapı dinamiklerinin (Frekans ve yer değiştirme) belirlenmesi amacıyla görüntü tabanlı (Video kaydı) verilerin işlenerek;

- Başka algılayıcı sistem veya ekipmana gerek duymadan, dinamik yapıların parametrelerinin elde edilmesi,
- Görüntü tabanlı ölçmenin, genellikle elektromanyetik spektrumun görünür bölgesinde çalışması nedeniyle atmosferik koşullardan etkilenmesi, uygun ölçüm şartlarında yapılacak ölçümler ile deplasman büyüklüklerinin belirlenmesi noktasında sonuçları iyileştireceği düşünülmektedir.

GNSS ölçümlerinin işlenmesi aşamasında, farklı değerlendirme stratejilerinin kullanılması ile 10 mm veya daha küçük genlik değerine sahip hareketlerin belirlenmesine katkı sağlayacağı ön görülmektedir.

2
YÖNTEMLER

2.1 Düşey Deplasman/Deformasyon Belirlemede Kullanılan Yöntemler

Yapılarda; Trafik, rüzgâr, sıcaklık, deprem, sel vb. gibi maruz kaldıkları değişik yükler yapının yükselmesine, çökmesine veya dönmesine neden olmaktadır. Göstermiş oldukları bu reaksiyonlar yapıda kalıca hasarlara neden olabilecek boyutlara varabilmektedir. Yapının hizmet verdiği süre boyunca oluşabilecek hasarın doğuracağı ağır sonuçlar göz önünde bulundurularak ilgili yapıların izlenmesi gerekmektedir. İzleme sonucunda elde edilen bulgular, yapının tasarım aşamasında hesaplanan parametrelerinde anlamlı sapmalar olduğunu göstermesi durumunda karar mekanizmaları tarafından gerekli olan önlemler alınır. Bu önlemler, ortaya çıkan hasar/kusur'un giderilmesinden yapının tahliyesine kadar uzanır. YSİ işlemi gerçek zamanlı olarak ve 7/24 izlenebileceği gibi uygun periyotlar halinde de olabilmektedir. Tez kapsamında tek boyutlu (düşey yöndeki) deplasman/deformasyonun izlenmesi üzerine incelemeler yapılmış, çalışmalar kapsamında ivme ölçer, GNSS ve görüntü tabanlı (kamera) algılayıcı sistemler tarafından toplanan verilerin post proses olarak değerlendirilmesi/işlenmesi stratejisi benimsenmiştir. Düşey deplasman/deformasyonun izlenmesi için kullanılan çok farklı ölçüm enstrümanı bulunmaktadır. Bu ölçüm enstrümanları kendi aralarında sınıflandırılarak farklı isimlerde ölçüm yöntemleri ortaya çıkmaktadır. Handayani vd. (2015); Yunus vd. (2018), yer değiştirmenin belirlenmesinde kullanılan ölçme yöntemlerini, geoteknik ve jeodezik ölçme olarak tanımlamıştır [19], [22]. Bazı kaynaklarda ise fiziksel ölçme ve jeodezik ölçme yöntemleri şeklinde bahsedilmiştir. Çalışma kapsamında yapılacak ölçmeler; jeodezik ölçme ve jeodezik olmayan ölçme şeklinde kullanılması tercih edilmiştir.

Bu yöntemlerin sınıflandırılmasında;

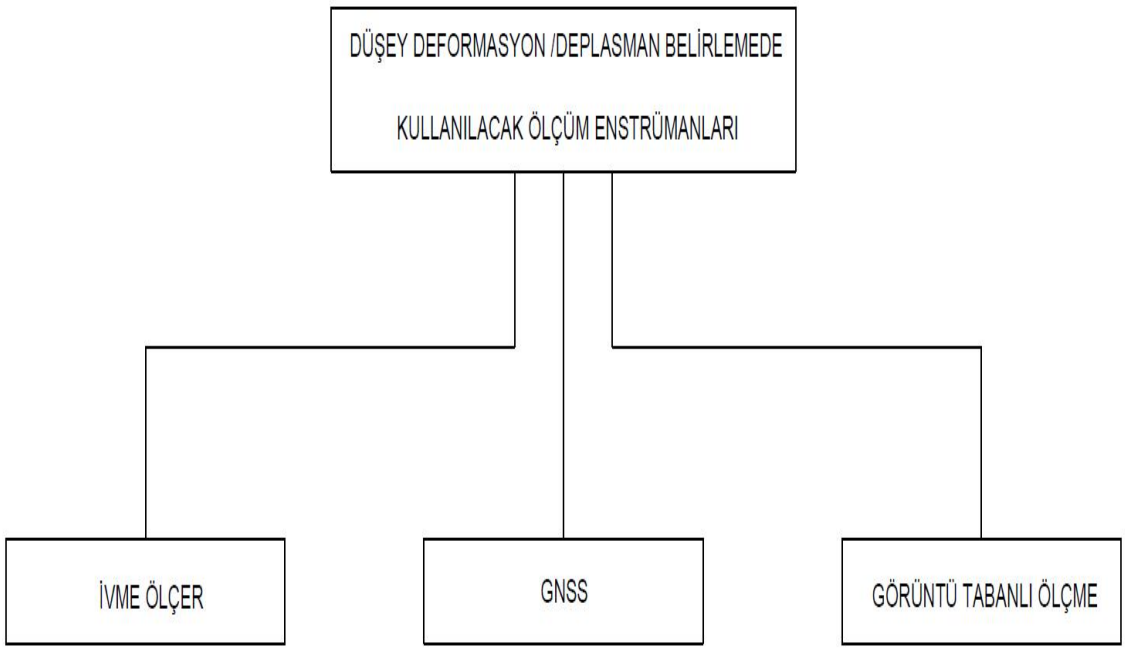
Jeodezik Ölçme Yöntemleri

- GPS / GNSS
- Hassas Geometrik nivelman yöntemi
- Hassas Trigonometrik nivelman yöntemi
- Hidrostatik nivelman yöntemi
- LİDAR
- Gravite ölçmeleri
- SAR/İNSAR teknik

Jeodezik Olmayan Ölçme Yöntemleri

- Görüntü tabanlı ölçümler (Video kamera)
- İvme ölçerler

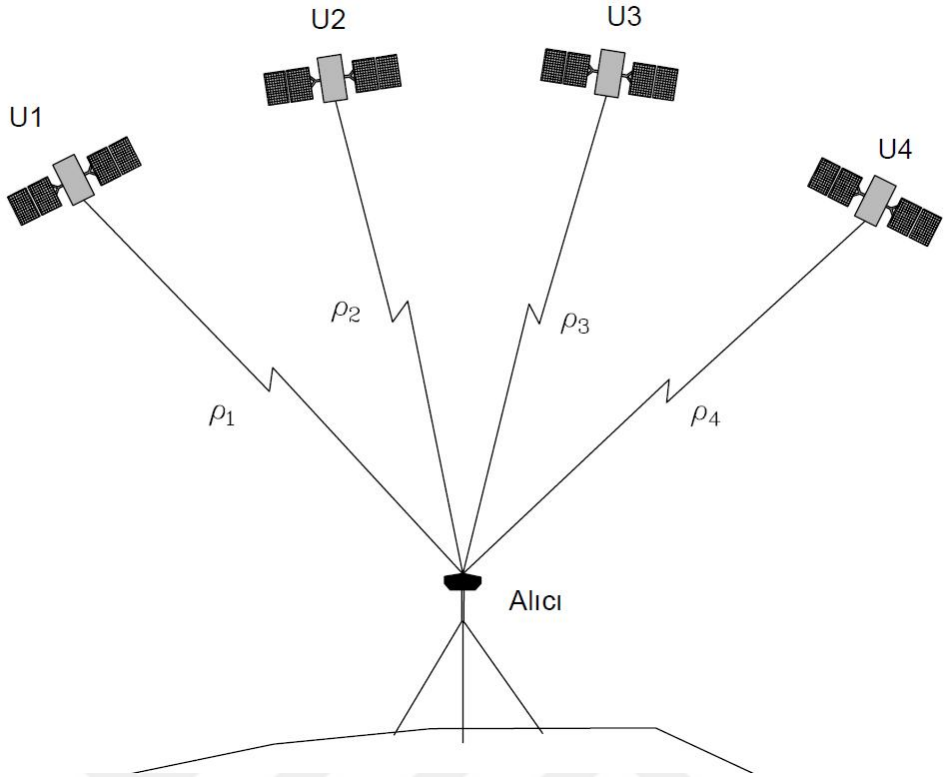
gibi birçok alet ve donanım bulunmaktadır. Tez kapsamında kullanılacak ölçüm donanımları/enstrümanları, Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Çalışma kapsamında kullanılacak ölçüm ekipmanları

2.1.1 GNSS

Küresel konumlama sistemleri (GNSS), başta askeri amaçlar için kullanılmak üzere hizmete alınmıştır. İlk konum belirleme uydusu (GPS) 1989 yılında devreye girmiştir. Daha sonra sivil kullanımına açılmış olup zamanla hizmet alanı genişlemiştir. GNSS; dünyanın herhangi bir yerinde, küresel bir koordinat sisteminde, yüksek duyarlılıkta, ekonomik olarak konum, hız ve zaman belirlenmesine olanak sağlayan büyük ölçüde hava koşullarından etkilenmeyen bir sistemdir. Temel prensibi; konumu bilinmeyen bir noktadan konumu bilinen en az üç noktaya yapılan gözlemler, yani jeodezideki "geriden kestirme hesabı" temeline dayanır (GNSS için zaman kavramı da önemli olduğu ve bu bilinmeyenin de çözülmesi gerektiği için en az dört konumu bilinen noktaya gereksinim duyulmaktadır (Şekil 2.2)). GNSS, navigasyon amaçlı birçok sektör tarafından kullanılmasına rağmen bilimsel anlamda en çok haritacılık sektöründe hizmet vermektedir. Hassas sonuçlar elde edilmesi gereken tektonik hareketler, deformasyonlar, kıta hareketleri, çökmeler, düşey hareketlerin belirlenmesi gibi bilimsel çalışmalar açısından oldukça önemli örnekler bulunmaktadır.



Şekil 2.2 GNSS ölçme prensibi

2.1.1.1 GNSS'in Yapı Sağlığı İzlemede Kullanımı

GNSS, başlangıçta askeri ve navigasyon amaçlı ortaya çıkmış olsa da günümüzde YSİ'nin en önemli teknolojilerden birisidir. Bu alanda literatürde birçok çalışma bulunmakta olup GPS'in ilk defa YSİ'de kullanılması, Lovse v.d. (1995) tarafından Kanada'nın Alberta eyaletinde bulunan 160 m yüksekliğindeki Calgary Kulesi'nin tepesine kurulan GPS alıcısının bağıl konum değişimlerinin izlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. GNSS kullanarak YSİ için farklı çözüm yaklaşımları ile desteklenmiş olup bunlar; Post Proses Kinematik (PPK), Gerçek Zamanlı Kinematik (RTK), Ağ RTK (NRTK) ve Hassas Nokta Konumlandırma (PPP) çözümleridir.

PPK, verilerin statik yöntem yardımıyla oturumlar vasıtası ile toplanıp elde edilen verilerin post-proses olarak analiz edildiği yöntemdir. Bu yöntemde gerçek zamanlı olarak doğru konumlandırma gerçekleşmez, tüm algoritmalar sonradan uygulanır. Hem sabit hem de gezici alıcılar tarafından ham GNSS verileri kaydedilir ve bunlar daha sonra doğru bir konumlandırmanın belirlenmesi için değerlendirme işlemine tabi tutulur.

RTK, yirmi yılı aşkın süredir YSİ'de en yaygın olarak kullanılan GNSS çözüm yaklaşımıdır. YSİ'de RTK için tipik uygulama senaryoları arasında baraj, köprü ve süper yüksek bina izleme yer alır. Konumu bilinen bir noktada en az bir baz istasyonu kurulması gerekir ve ölçülecek noktalarda gezici istasyonlar kurulur. Minimum dört uydudan sinyal ve baz istasyonu tarafından yayınlanan düzeltme verileri kullanılarak ölçüm noktalarının gerçek zamanlı koordinatları hesaplanabilir. Literatüre bakıldığında buradaki en önemli unsurlardan biri RTK tekniğinin kullanıldığı çalışmalarda izlenecek yapıya ait sonuçların daha hassas olması için sabit alıcı (referans) ile hareketli (yapı üzerindeki) alıcı arasındaki mesafenin oldukça kısa ve alıcıların çift frekanslı olması gerekmektedir [29], [30]. Ayrıca yapı çeşidine göre alıcıların veri kayıt sistemlerinin seçimi de önemli olup genel olarak 10-100 Hz arasındadır [31]. RTK yöntemi ile işlemler gerçekleştirilirken biri referans istasyonuna, diğeri deformasyon bölgesinde olmak üzere, referans ve gezici istasyonlarının eş zamanlı gözlemlenmesi, iki ayrı ekip ve ekipman gerekliliğinin sebep olduğu maliyet gibi bazı kısıtlamalar söz konusudur [29].

RTK teknolojisindeki bu kısıtlar ölçme ve SHM'deki bazı uygulamaların gereksinimlerini karşılayamaz. Bu yaklaşımın bir uzantısı olarak NRTK yaklaşımı, geleneksel RTK'nın eksikliklerini giderebilir. NRTK çözümü, RTK'ya benzer, ancak kendi kendine kurulmuş bir baz istasyonu yerine CORS'tan düzeltme verileri alır. Diğer bir ifadeyle NRTK, daha hassas, gerçek zamanlı, taşıyıcı faz tabanlı bir konumlandırma teknolojisidir. NRTK'da doğruluğun arttığı, gerçek zamanlı düzeltmelerin alınabildiği bölgesel hata düzeltme modeli, konum düzeltmesi sağlamak için sürekli çalışan referans istasyonlarından (CORS) alınan veriler kullanılarak hesaplanır [32]–[34]. Alan düzeltme parametresi olarak da bilinen FKP tekniği, ilk NRTK düzeltmelerinden biridir. FKP düzeltmelerinin içeriği, referans istasyonu etrafındaki doğrusal iyonosferik ve geometrik düzeltme parametreleridir [35]. Bu doğrusal düzeltmeler doğu-batı ve kuzey-güney yönündeki değişiklikleri ifade eder ve enterpolasyon yoluyla alıcının gerçek konumunun tam olarak hesaplanmasında kullanılır [36]. Sanal Referans İstasyonu (VRS) yaklaşımında prensip, geziciler için düzeltme verilerini elde etmek için birkaç referans istasyonunun verilerini enterpolasyon etmektedir, bu da RTK ölçümünün sistematik etkilerini kesin olarak azaltır. Sadece referans istasyonu ile gezici

arasında izin verilen mesafe arttırılmakla kalmaz, aynı zamanda sistemin güvenilirliği de yükseltilir. Ana Yardımcı Referans İstasyon Tekniği (MAC) tekniği, VRS tekniğini geliştirerek FKP'nin dezavantajlarını ortadan kaldırarak diğer iki yönteme göre daha doğru konum bilgisi elde eder. MAC, bir ana ve birkaç yardımcı referans noktasından oluşur [37].

Literatürdeki çalışmalarda genellikle göreli GNSS konumlama çözümleri kullanılırken 2010 yılından bu yana SHM'nin izlenmesinde sonuçları destekleyecek ve gerçek zamanlı olarak doğru düzeltmeleri ileten çok sayıda ticari PPP hesaplama araçları devreye alınmıştır. Bu, neredeyse gerçek zamanlı bir PPP'nin ortaya çıkmasına izin verirken PPP tarihsel olarak dinamik izlemeden ziyade sabit bir konumun hesaplanmasına yönelik olmuştur. Xu vd. (2013), PPP çözümünün genliği 1 cm'nin altında olan yatay titreşimleri veya genliği 1-1.5 cm civarında olan düşey titreşimleri büyük bir güvenilirlikle belirleyebildiği gözlemlenmiştir [38]. Hassas uydu yörüngesi ve saat bilgisi ile PPP, santimetre düzeyinde yüksek hassasiyette konumlandırma elde etmek için kullanılabilir [39], [40]. Kouba vd. (2001),tarafından önerilen ve iyonosferden bağımsız çözüm veren kombinasyonları içeren gözlem denklemleri Eşitlik-2.1 ile verilmiştir [41].

$$\ell p = \frac{R_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{R_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + c\Delta\delta + \Delta^{Trop} \quad (2.1)$$

$$\ell\phi = \frac{\lambda_{11}\phi_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2\phi_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} + \rho + c\Delta\delta + \Delta^{Trop} + \frac{\lambda_1 N_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \quad (2.2)$$

burada ℓP, pseudorange uzunluğunun iyonosferden bağımsız kombinasyonu, ℓΦ taşıyıcı fazların iyonosferden bağımsız kombinasyonu; R_1 ve R_2 pseudeorange uzunluğu gözlemleri; Φ_1 ve Φ_2, taşıyıcı faz gözlemleri; f_1 ve f_2 frekanslardır; λ_1 ve λ_2 dalga boylarını ifade eder; ρ istasyondan uyduya olan geometrik mesafe; c, ışığın boşluktaki hızı; Δδ, istasyon alıcı saat düzeltmesi; ΔTrop, troposferik gecikme; N_1 ve N_2 tamsayı belirsizlikler; ρ, uydu koordinatının (X^S,Y^S,Z^S) ve alıcı koordinatının (x,y,z) bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir.

$$\rho = \sqrt{(X^s - x)^2 + (Y^s - y)^2 + (z^s - z)^2} \quad (2.3)$$

PPP'nin doğruluğunu iyileştirmek ve PPP'nin hesaplama sonuçlarını optimize etmek için modelin bazı etkilerden arındırılması gerekir.

2.1.2 İvmeölçer

Hız vektörünün zamana göre değişimine ivme denir (birimi: m/sn^2). İvme ölçerler; üzerlerine düşen statik (yer çekimi) veya dinamik (anlık hızlanma veya durma) ivmeyi ölçmektedirler. Sensörlerin verdiği değer m/s2 veya standard yer çekimi ivmesi (g) cinsinden ifade edilir. Hareketli bir nesnenin ivmesinde meydana gelen değişimi ölçmek için kullanılan İvmeölçerler, navigasyon ve yönlendirme sistemlerinden askeri uygulamalara, biyomedikal uygulamalardan yapı sağlığı izleme (YSİ) kadar birçok uygulama alanı bulmaktadırlar. İvmeölçerlerin çalışma prensibi, Newton'un ikinci hareket yasasına dayanmaktadır [42]. İvme ölçümlerini yapmak amacıyla birçok türü geliştirilmiştir.

Bunların,

- Potansiyometreli ivmeölçerler
- Kapasitif ivmeölçerler
- Piezorezistif ivmeölçerler
- Değişken empedanslı ivmeölçerler
- Manyetorezistif ivmeölçerler
- Termal ivmeölçerler
- Rezonans ivmeölçerler
- Optik ivmeölçerler
- Piezoelektrik ivmeölçerler

gibi çeşitleri bulunmaktadır.

MEMS, mikro elektro mekanik sistem (microelectromechanical system) anlamına gelir ve nano teknoloji ile üretilen tüm sensörlerdir. Mikroelektronik devrelerle birleştirildiğinde, ivme gibi fiziksel parametreleri ölçmek için MEMS sensörleri kullanılabilir. MEMS kavram olarak ilk defa 1987 yılında bir mikrodinamik çalıştayı sırasında ortaya atılmış, fakat küçük boyutlu aygıtların yapılması konusunda ortaya atılan ilk fikir ünlü fizikçi, Dr. Richard Feynman (1918-1988) tarafından 1959 yılında dile getirilmiştir. MEMS ivme ölçerler 0 Hz'e kadar olan frekansları ölçebilecek yeteneğe sahiptirler. Değişken kapasitif (variable capacitive) ve piezoresistif (piezoresistive) iki tip MEMS ivmeölçer üretilmektedir.

Mühendislik uygulamalarında mekanik titreşimleri ölçmek için MEMS'e dayalı ivme ölçerlerin; düşük fiyatları, düşük güç tüketimi ve küçük boyutları sahip olmalarından dolayı kullanımında kayda değer bir artış olmuştur [43]. MEMS'lerin dile getirilen bu avantajlarına ek olarak dışarıdan enerjiye ihtiyaç duymaması ve kablolama gibi ekstra iş gücüne gereksinim duymaması nedeniyle tez çalışması kapsamında "bluetooth" ile veri aktarma yapan ve 200 Hz veri kayıt sıklığına sahip WIT marka ve BWT901CL model ivmeölçer tercih edilmiştir (Şekil 2.3).

İvme ölçer ölçüme başlamadan önce kalibrasyon işlemine tabi tutulur. Kalibrasyondan önce, farklı derecelerde bias hatası olacaktır. Kalibrasyon işlemi ile sıfır sapmasını ortadan kaldırmak amacıyla yapılır. Bu kalibrasyon işleminde;

- İvme ölçer yatay konumda sabit tutulur,
- Uygulamada İvmeölçer kalibrasyonunu tıklanır,
- "Kalibrasyona başla"ya tıklanır ve 3 saniye beklenir,
- İvme ölçer üç eksen etrafında döndürülerek eksenel ivme değeri 0,0,1, civarında olması sağlanır [44].

Çalışmalarda düşey deplasman/deformasyon hesaplanacağı için özellikle Z ekseninde yaklaşık 1 g yer çekimi ivmesine sahip olması gerekmektedir.

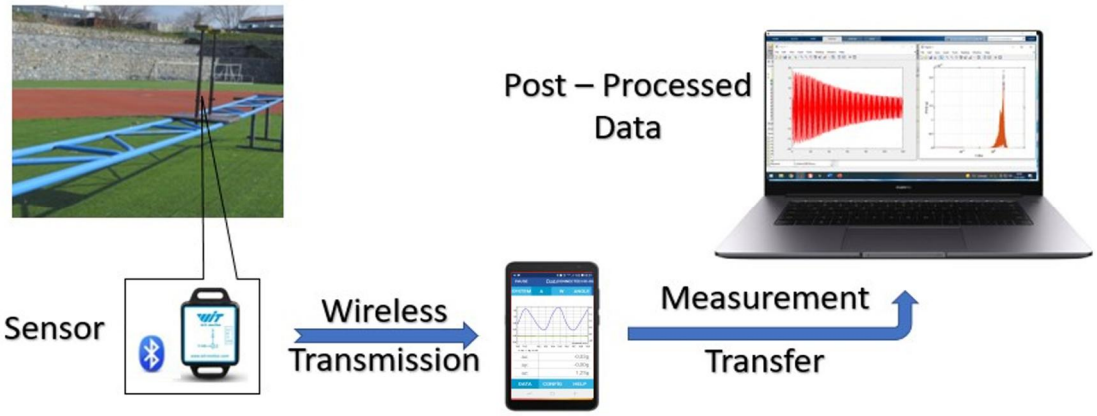
İvme ölçer ile toplanan verinin bluetooth ile aktarılma işlemi,

- İvme ölçer frekans, hız, yer değiştirme veya mod şekli belirlenecek nesne üzerine yerleştirilir,
- İvme ölçer üzerindeki güç düğmesi yardımıyla aktif hale getirilir,
- Daha sonra android işletim sistemine sahip tablet veya mobil telefondan bluetooth açılır ve cihaz ile bağlantısı gerçekleştirilir,
- Android sistemdeki yazılım çalıştırılarak Şekil 2.3'ün sol tarafındaki görseldeki ekrandan kayıt butonuna basılır.



Şekil 2.3 Çalışmada kullanılan ivme ölçer ve android işletim sistemindeki deplasman grafiğine ait bir görüntü [45]

Bu şekilde elde edilen veriler bilgisayara aktarılarak MATLAB kodları yardımıyla deplasman dataları ve frekans değeri elde edilir. Şekil 2.4 bu işlemdeki döngüyü özetlemektedir.



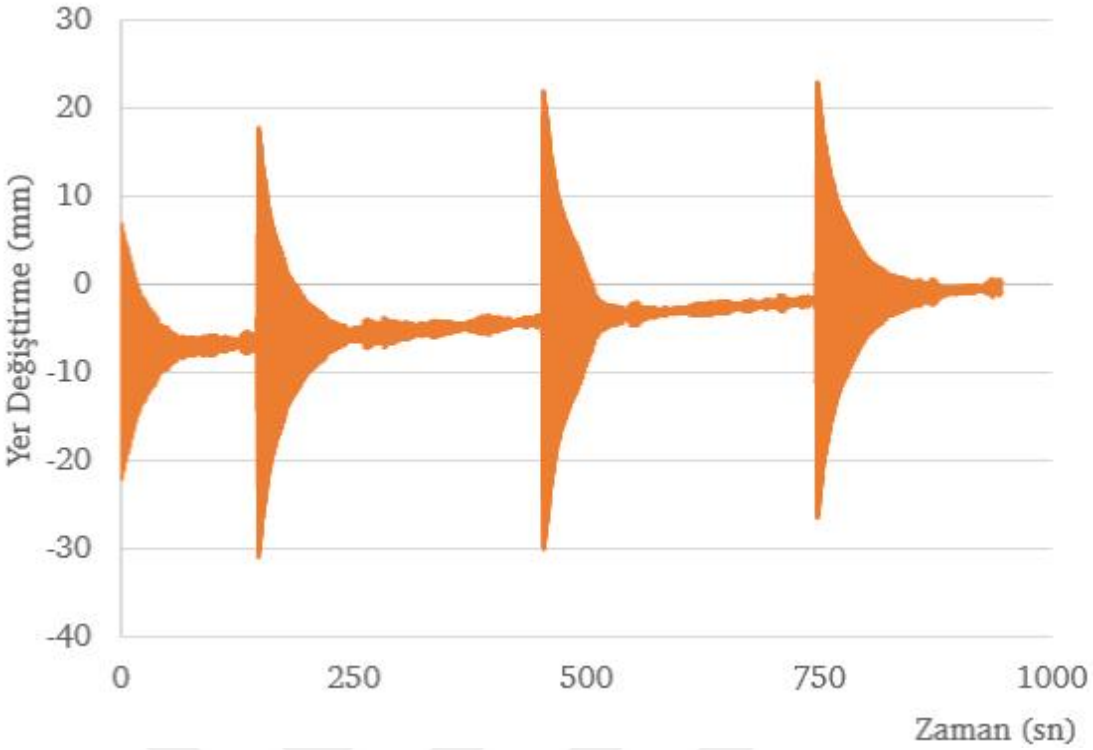
Şekil 2.4 İvme ölçer sistem konfigürasyonu

2.1.2.1 İvmeölçer Verilerinin İşlenme Stratejisi

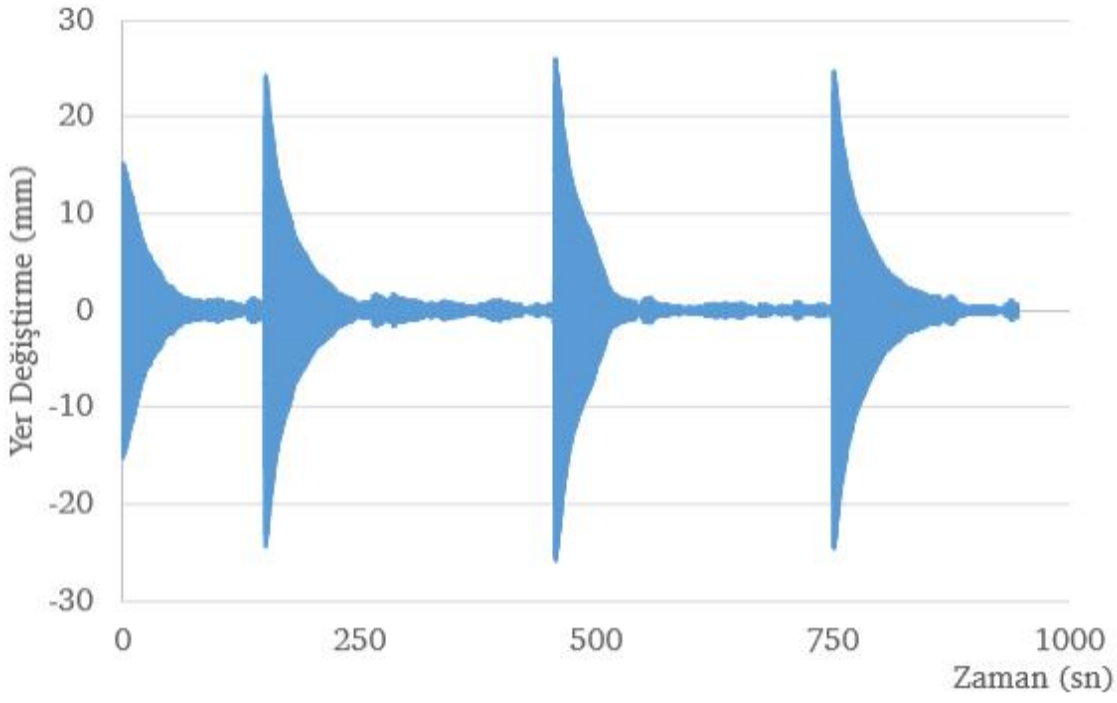
İvme ölçer tarafından kaydedilen ivme verilerinin MATLAB 2018b yazılımında analiz işlemleri gerçekleştirilmiş ve ivme verilerinden yer değiştirme verileri elde edilmiştir. Ölçülen ham ivme verileri bir dizi işleme tabi tutularak deplasman verisine dönüştürülmüştür. Bu işlemlerde "g" cinsinden ölçülen ivme dataları;

- İvme sıfır ile başlayan ve sıfır ile biten bir veri seti alınarak,
- Alınan bu veri setine, 4,5 ila 0,2 Hz (kesme frekansı) aralığı dışındaki frekanslar, high pass ve low pass filtresi (Butterworth pencereleme kullanılarak 6. derece polinom) ile filtrelenmiş,
- Filtrelenmiş veri seti, Mid-point Rule ile iki kez nümerik integrasyon kullanılarak yer değiştirme verisi olarak elde edilmiş,
- Bu verideki integrasyon sabitlerinden kaynaklı hatalar ayıklanmıştır. Bu ayıklama işlemi baseline correction işlemi ile gerçekleştirilmiştir.

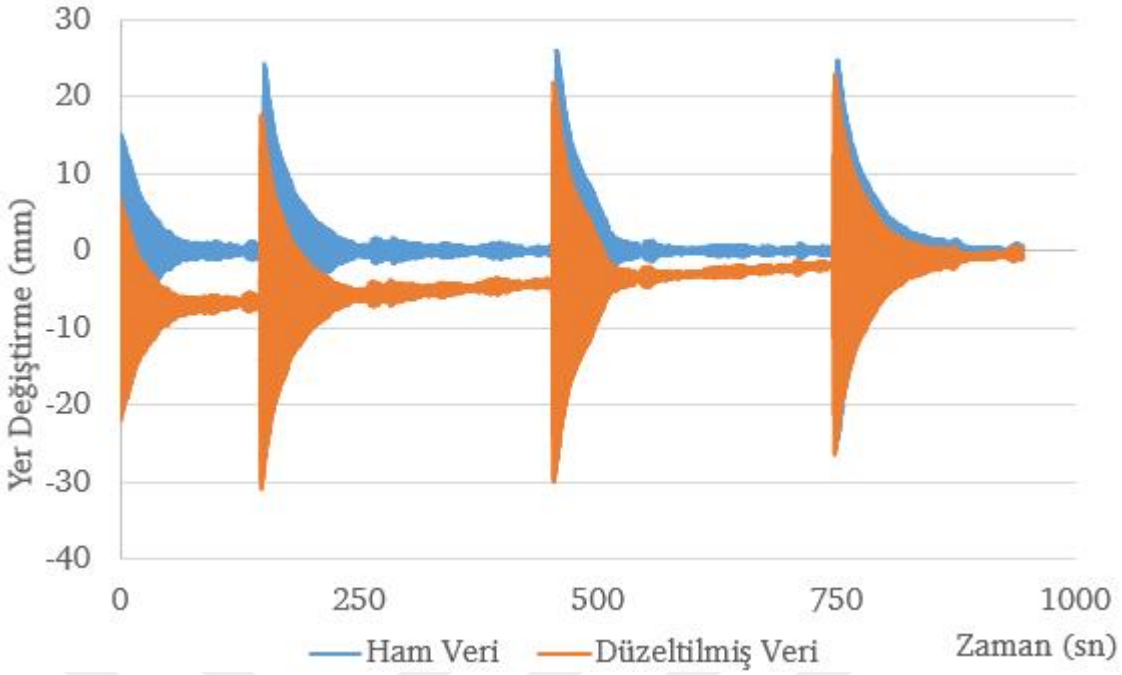
Yukarıda bahsedilen ivme verisinin başlangıç ve bitiş değerinin sıfır olmaması durumunda deplasman değerlerinde trend benzeri bir hareketin varlığı söz konusu olabilmekte ve deplasman değerleri hatalı olarak gerçekleşmektedir (Şekil 2.5). Ölçü setindeki uygun ölçüden başlayıp uygun ölçüde bitirildiğinde bu hata giderilecektir (Şekil 2.6). Şekil 2.7'de her iki veri aynı zaman serisinde daha belirgin bir şekilde görülmektedir.



Şekil 2.5 Ham ivme verisinden elde edilen deplasman grafiği



Şekil 2.6 İlk ve son verinin sıfır değerine sahip olan ölçülerden seçilmesi ile elde edilen deplasman grafiği



Şekil 2.7 İvme verisinin her iki durumuna ait birleştirilmiş deplasman grafiği

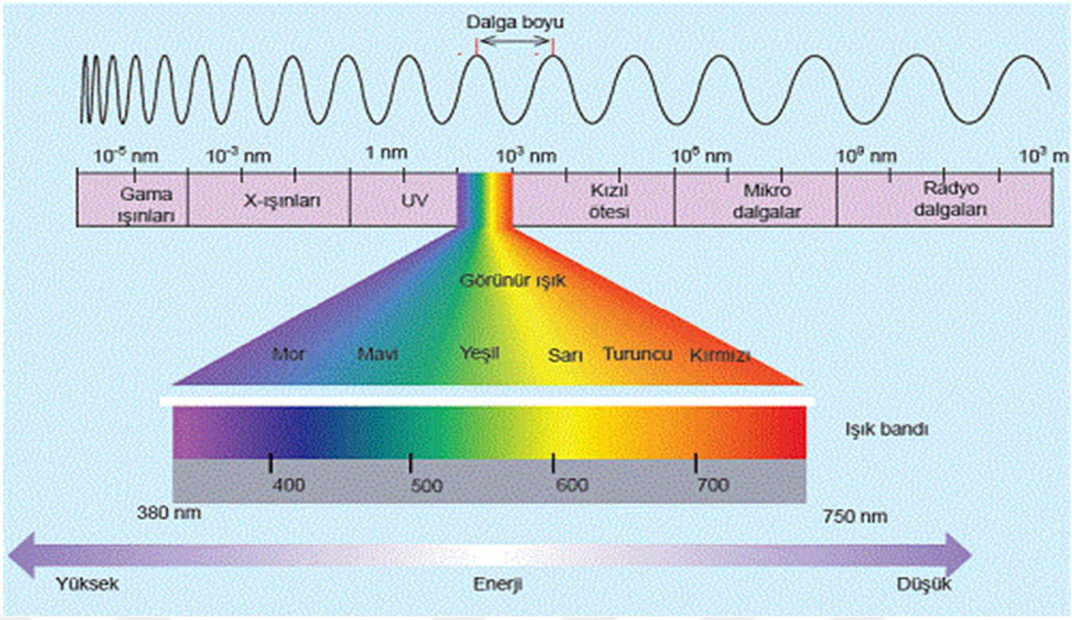
2.1.3 Görüntü Tabanlı (Video Kamera) Ölçme

Hareketli bir nesneye ait video veya ardışık olarak çekilen fotoğraflar arasında ölçülen objenin konumunda oluşan piksel koordinatları arasındaki farklar görüntü işleme tekniği yardımıyla belirlenebilmektedir. Bir görüntü çerçevesine giren objenin hareketinin tespit ve takibinde sağlamış olduğu,

- Uzak mesafelerden görüntü toplamak için kolay kurulum avantajı,
- Ölçülecek nesnelerden temassız bilgi elde etmesi,
- Çerçeveye giren tüm yapay ve doğal objelerden seçilen herhangi bir veya daha fazla nokta hakkında 2B veya kamera çifti yardımıyla 3B harekete ait bilgi edinebilmesi,
- Elde edilen nümerik bilgiler ışığında zaman serilerinin elde edilmesi,

gibi avantajları nedeniyle tercih edilmektedir.

Diğer yandan kullanılacak kameralar, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesine duyarlı ve kısıtlı bir bölgeyi kullanan (380 nm-750 nm) algılayıcı sisteme sahiptir (Şekil 2.8). Bu nedenle atmosferik koşullardan oldukça fazla etkilenmektedir. Refraksiyondan kaynaklı sınırlama sistemin zayıf tarafını oluşturmaktadır.



Şekil 2.8 Elektromanyetik spektrum ve görünür bölge [46]

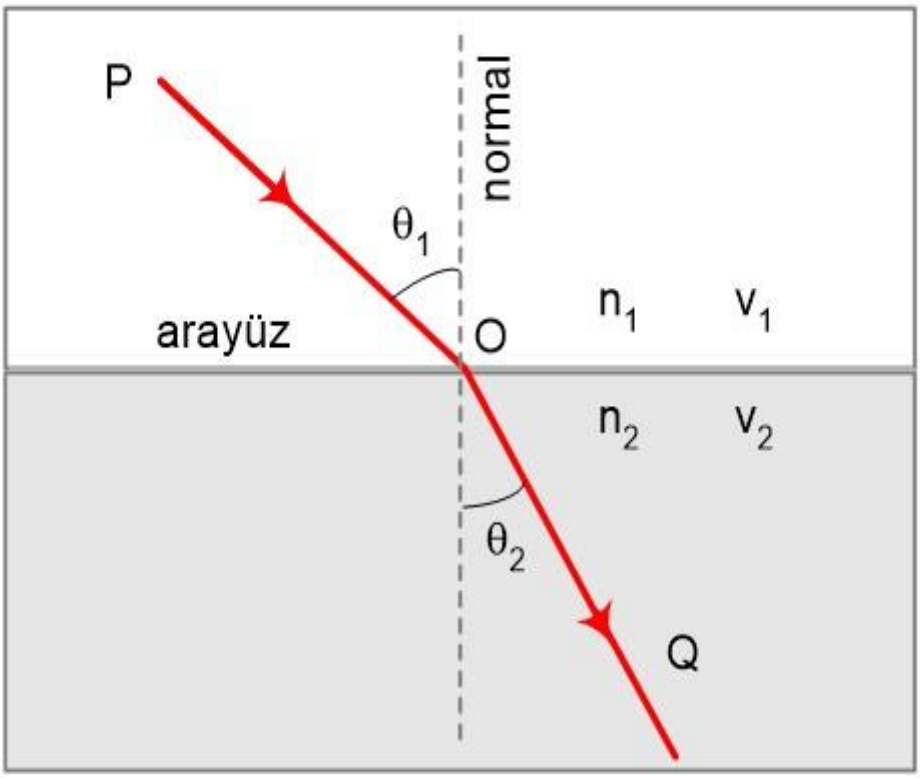
Kamera ile toplanan verilerin işlenmesinde Özellik Noktası Eşleştirme, Optik Akış Tahmini, Şablon Eşleştirme ve Arka Plan Çıkarma gibi yer değiştirmenin çıkarılmasında çok sayıda algoritma ve yöntemler kullanılmaktadır. Ölçülecek yarı statik ve dinamik yapı üzerinde bulunan doğal hedef veya yapıya sonradan eklenen yüksek kontrastlı yapay hedefleri tüm video çerçevesinde aramak yerine önceden tanımlanmış bir ilgi alanı (İA/ region of interest (ROI)) ile sınırlamak zaman kazandıracaktır. Bir sonraki çerçevedeki potansiyel konumunu kapsayacak kadar büyük olan ROI'ye dikkat edilmelidir. Bu çalışma kapsamında, yapı dinamiklerinin belirlenmesinde tüm video kaydı boyunca bir hedefi takip etme ilkesine dayanan Şablon Eşleştirme algoritması kullanılmıştır. Şablon eşleştirme; bir görüntü içinde bir model bulmayı amaçlayan çok yoğun bir hesaplama prosedürüdür [47].

2.1.3.1 Görüntü Tabanlı Ölçmede Refraksiyon Etkisi

Hem astronomik kırılmaya hem de seraba neden olan atmosferik kırılma, antik Yunan döneminden beri bilinmektedir. Batı dünyasında optik tarihi, klasik Yunan filozoflarıyla başlar [48].

Genel anlamda refraksiyon; farklı yoğunluk değerine sahip iki ortamın birinden diğerine geçiş yaparken ışığın sapmasıdır. Bu sapma işlemi az yoğun ortamdan çok yoğun ortama geçişte yüzey normaline yaklaşır (Şekil 2.9). Işığın kırılması; sıcaklık,

basınç ve nemden etkilenmesine karşın bu etki en çok sıcaklık ile kendini göstermektedir.



Şekil 2.9 Işığın ortamlar arasında geçişte yön değiştirmesi [49].

Elektromanyetik spektrumun görünür ışık bölgesi atmosferik koşullardan etkilenmektedir. Kameralar genellikle spektrumun bu bölgesinde çalışmaktadır. Işık seyahati süresince farklı yoğunluk değerine sahip bölgelerden geçmektedir. Bu yoğunluk farkı ışın yolunun sapmasına neden olmaktadır. Sıcaklık nem ve mesafeye bağlı olarak sapma değeri artmaktadır. Kamera ile yapılacak çalışmalarda ışığın sapmasına bağlı olarak gerçekte var olmayan bir hareket kendini gösterecek ve yapı dinamiklerinin belirlenmesinde ölçüm sonuçlarına olumsuz etkisi söz konusu olacaktır. Ölçümlerin yapılması aşamasında sağlıklı veri elde edebilmek için bu etki dikkate alınmalı uygun zaman aralığında veya ortamlarda ölçüm yapılması konusunda gereken özen gösterilmelidir.

2.2 Verilerin İstatistiksel Olarak Uyumunun Araştırılması

Verilerin işlenmesinden sonra birbirleri ile uyumlarının istatistiksel açıdan yorumlanması gerekmektedir. Yapılan çalışmalarda veriler arasındaki ilişki Pearson korelasyon katsayılarına göre değerlendirilmiştir.

2.2.1 Pearson Korelasyon Katsayısı Hesabı

İki değişken arasındaki doğrusal ilişkiyi ölçen Pearson korelasyon katsayılarının hesaplanması eşitlik 2.4'te verilmiştir.

$$r = \frac{n(\Sigma xy) - (\Sigma x)(\Sigma y)}{\sqrt{[n\Sigma x^2 - (\Sigma x)^2][(n\Sigma y^2 - (\Sigma y)^2}} \quad (2.4)$$

Kalibrasyon testlerinde kullanılan algılayıcı sistemler öncelikli olarak sarsma tablası deneyinde LVDT verileri referans alınarak hem MEMS hem de kamera verilerinin arasındaki ilişki istatistiksel olarak hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda veri sayılarının bir birine eşit olması gerekmektedir. Oysa ki LVDT datası 1000 Hz, ivme ölçer 100 Hz ve kamera 50 ile Hz'lik veri toplanmıştır. Bu veriler, video kamera verileri (en düşük veri kayıt sıklığına sahip olan algılayıcı olduğu için) ile eşitlenmiştir. Bu işlem MATLAB kodları yardımı ile veri setinden uygun aralıklı veri seçme işlemiyle gerçekleştirilmiştir.

3
UYGULAMA

3.1 Test Ölçümleri

Tez kapsamında yapılacak ölçümlerin gerçekleştirilmesinden önce düşey deformasyon/deplasman ölçümünde kullanılacak ölçü enstrümanları bir takım testlere tabi tutulmuştur. Bu test işlemlerinde amaç, çalışma sahasından toplanan verilerin elde edilmesi aşamasında bilgi eksikliği, çevresel şartlar ve aletten kaynaklı eksikliklerin giderilmesi veya engellenmesini sağlamak ve ölçme işlemlerinin eksiksiz olarak gerçekleşmesini temin etmektir. Bu bağlamda ölçme işleminde kullanılacak ölçüm aletleri tek tek veya ölçüm aletlerinin kombinasyonları şeklinde birçok test işleminden geçirilmiştir.

3.1.1 Video Kameranın Kullanılabilirliğinin Araştırılması

Literatürde cep telefonundan video kameraya kadar birçok görüntü tabanlı sistem kullanımına yönelik uygulamalar yapılmıştır. Çalışma kapsamında kullanılacak uygun kamera sistemi ve hedef ile ilgili çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda üzerlerinde mira benzeri ölçeklendirilmiş şekillere sahip yapay hedefler üretilmiştir. Bu ölçekli şekillere yardımıyla yazılım tarafından hesaplanan yer değiştirme değerlerinin fotoğraf çerçevesindeki yer değiştirmelerin gözle kontrol edilmesi ek bir hesap yapmadan mira okuması yapar gibi ardışık çerçeveler arasındaki yer değiştirme okumalarından elde edilen yer değiştirme verileri ile MATLAB 2018b versiyonlu yazılım tarafından hesaplanan veriler arasındaki uyuşumun kontrol edilerek görüntü işlemenin başarısının belirlenmesi hedeflenmiştir.

3.1.1.1 Uygun Kameranın Araştırılması

Bir yapıya ait hareketin (deplasman, hız, frekans veya mod şekillerinin çıkarılması gibi) belirlenmesinde ölçü duyarlığı kullanılacak algılayıcı sistemle ilişkilidir. Belirlenecek en küçük hareketin büyüklüğü kameranın sensör kalitesine, yapılacak ölçümün mesafesine, çözünürlük, atmosferik koşullara daha da önemlisi piksel

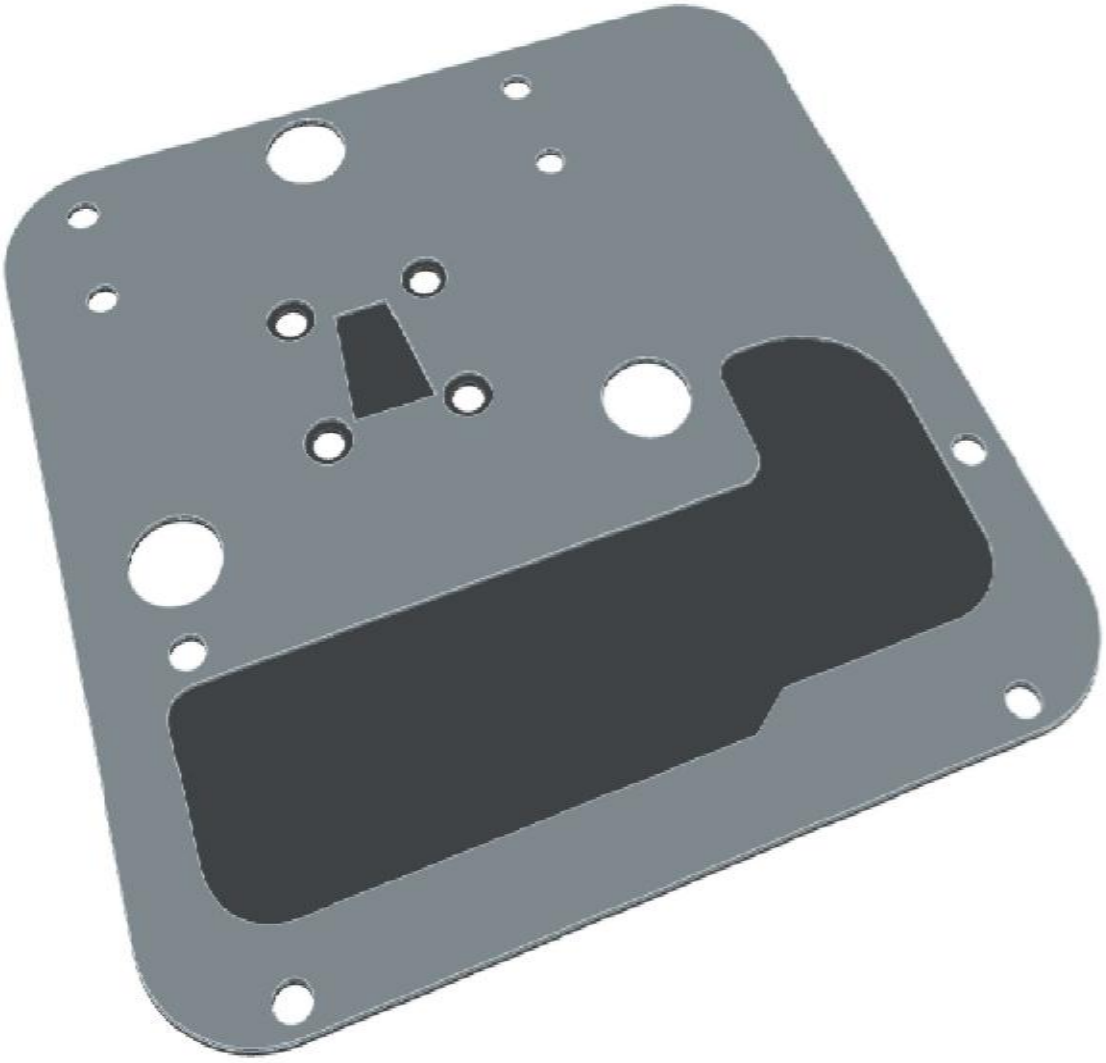
yoğunluğuna bağlıdır. Piksel yoğunluğu birim ölçü başına düşen piksel sayısını (çalışma kapsamında mm/piksel kullanılmıştır) ifade etmektedir. Literatür araştırmasında görüntü tabanlı algılama sistemi için kamera ile hedef arasındaki mesafenin birkaç metreden yüzlerce metreye kadar olan çalışmalar yapılmıştır. Tez kapsamında yapılacak uygulamamalarda uzak mesafe ölçümleri test edilmek istenmiştir. Bunun nedeni izlenecek yapı deniz üzerine kurulmuş bir asma köprü veya yüksek kule gibi yakından ölçüm yapmaya elverişli olmayan yapılar olabilir. Bundan dolayı ölçülecek obje ile algılayıcı arasındaki mesafe zorunluluktan dolayı sabit kalmaktadır. Bu problemi aşmanın en iyi yolu optik zum miktarı yüksek olan kamera tercih edilmesidir. Bu amaç doğrultusunda farklı marka ve modellere ait kameralar test edilmiştir. Şekil 3.1'de test aşamalarında kullanılan kameralar ve bu kameralara ait optik zum miktarları verilmiştir. Her bir kamera ölçme işleminde ayrı ayrı test edilmiştir. Yapılan test çalışmalarında kullanılan kameralar arasında gerek optik zum açısından gerekse çözünürlük bakımından Nikon P900 (83x Optik Zum) kullanmanın uygun olacağına karar verilmiştir.



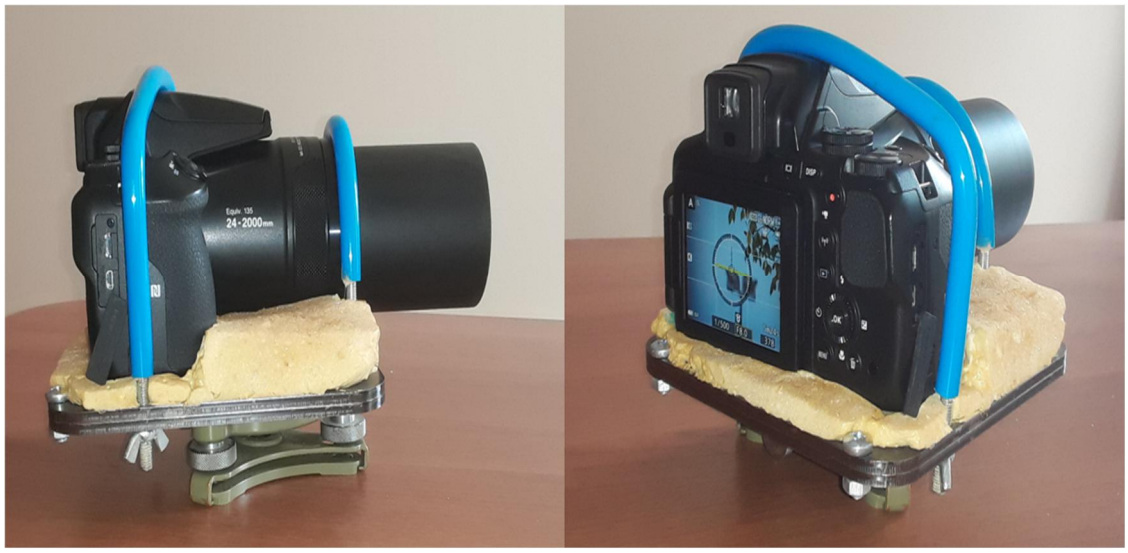
Şekil 3.1 Ölçme işleminde kullanılacak kameranın belirlenmesi amacıyla test edilen kameralar

Görüntü tabanlı veri elde etme aşamasında, sabit hedef üzerinde yapılan ölçümlerin zaman serisine dökülmesi ile deplasman verileri üzerinde küçük hareketlerin varlığına rastlanmıştır. Deplasman verilerinde gürültüye neden olan bu hareketler; rüzgar nedeniyle veya tripodun yapımında kullanılan malzemenin (Aliminyum) özelliğinden kaynaklı titreşime bağlı olacağı varsayımından titreşimlerin tamamen ortadan kaldırılması veya en aza indirilmesi yönünde araştırmalar yapılmıştır. Söz konusu hareketin ağır bir tripod kullanılarak giderilebileceği düşüncesinden yola çıkarak ahşap sehpanın daha az titreşim yapacağı değerlendirilip teodolit vb ölçüm aletlerinin kurulumunda kullanılan sehpanın uygun olduğuna karar verilmiştir. Ancak kamerayı sehpa üzerine direkt olarak sabitleyecek mekanizma olmaması ve sabitleme işleminde tek nokta üzerine basacağı için makinede bir miktar hareketin varlığını devam ettireceği öngörülmüştür. Olası bu hareketi engellemek için

makinenin alt tabanının tüm gövdenin tam olarak oturması için sehpaya entegre Autocad 2021 yazılımında 3 boyutlu olarak tasarlanan ve sanayide lazer kesimi yapılan özel aparat yaptırılmıştır (Şekil 3.2). Şekil 3.3'te görüldüğü gibi makinenin zarar görmesini engellemek için aparat üzerine köpük sıkılmış ve makine poşete sarılarak köpük üzerine bastırılıp kurumaya bırakılmıştır. Diğer taraftan makineyi sabitlemek için kameranın kalıbına göre bükülen çelik tij plastik boru ile kameraya zarar vermeyecek şekilde sabitlenmiştir. Bu aparat teodolit sehpası üzerine yerleştirilip testler yenilenmiştir. Yapılan testlerde titreşimin sebep olduğu hareketlerde fark edilir düzeyde iyileşme olduğu saptanmıştır.



Şekil 3.2 Özel tasarım triprah üzerine monte edilen aparata ait Autocad 3B çizimi.

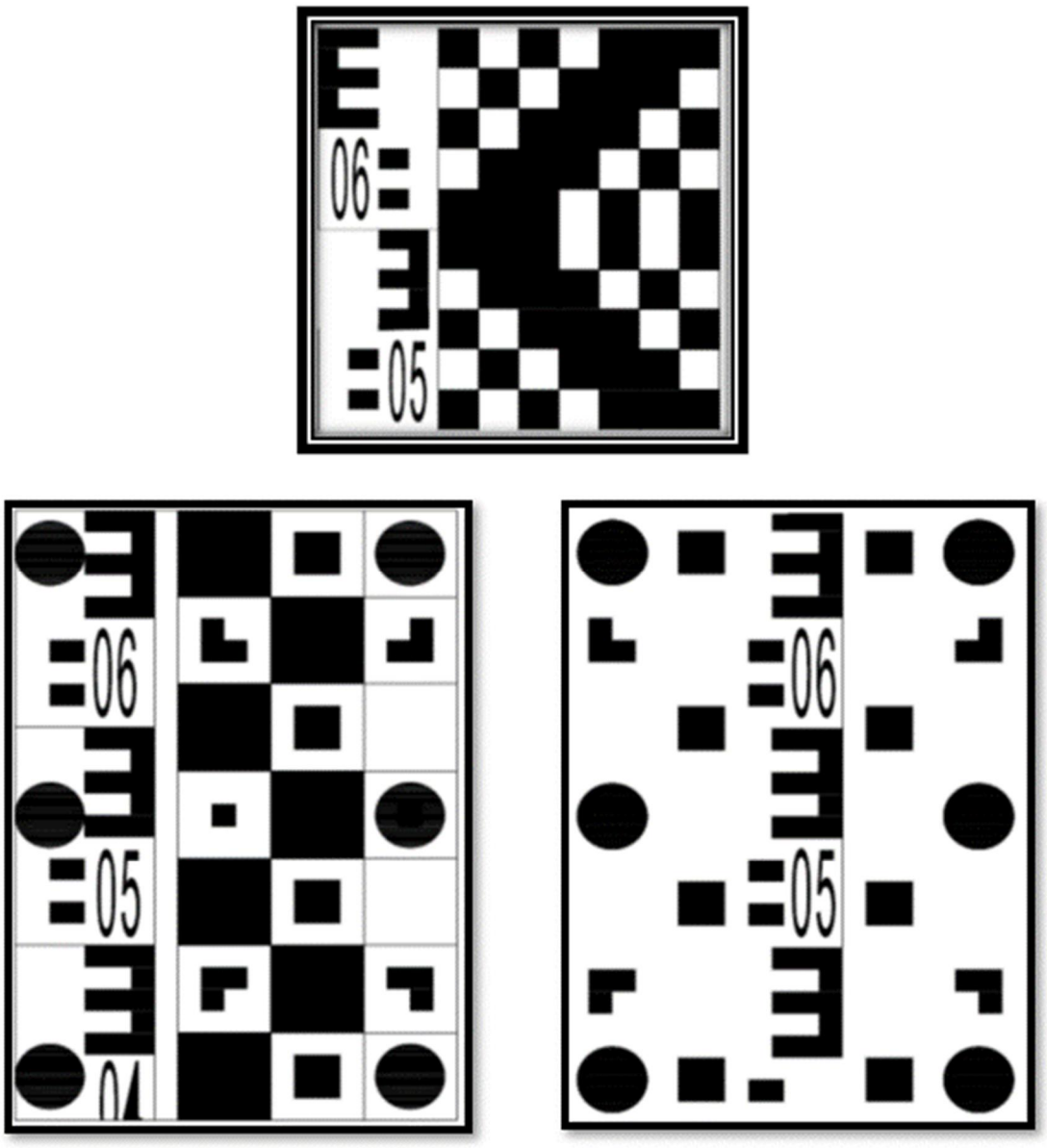


Şekil 3.3 Özel tasarım, alet sehpasına entegre video kameranın titreşim önleyici tertibat.

3.1.1.2 Uygun Yapay Hedef Tespiti

Yapılan çalışmalar kapsamında bir çok araştırmacı hem yapay hem de doğal hedef kullanmışlardır. Tez çalışmaları kapsamında yapay ve doğal hedefler ile ölçümler gerçekleştirilmiş olup doğal hedeflerin okunmasında ilgi noktası olarak seçilen alanın düşük kontrasından kaynaklı olan ve şablonun farklı alanlara kaydığı tespit edilmiştir. Ancak Busca vd. (2013) yapay hedef kullanmanın doğal hedeften daha başarılı sonuçlar verdiğini dahası geometrisi bilinen hedefin ölçekleme (mm/px) hesaplanmasının kolaylaştığını rapor etmiştir. Bu çalışmadan yola çıkarak yüksek kontrastlı yapay hedeflerin üzerine araştırmalar yapılmıştır (Şekil 3.4). Şekillerde görünen yapay hedef tasarımları Autocad yazılımında yapılmış ve A4 boyutunda kağıt ve karton üzerine baskıları yapılmıştır. Bu hedefler ile ilgili yapılan ölçümlerden hedef (a)'nın üzerinde birbirine benzer şekiller olması nedeniyle yanlış hedefe sapmanın sık karşılaşılan bir hata olduğu fark edilmiş, hedef (b)'nin kısmen başarılı olmasına karşın yüksek hızda hareket etmesi durumunda yine hatalı değerlendirme yaptığı gözlemlenmiştir. Hedef (c) diğer iki hedefe göre daha sade ve ilgi alanı çevresindeki objelerin birbirinden farklı olması nedeniyle daha yüksek başarı sağlamıştır. Hedefler üzerinde karmaşık ve benzer şekillerin yoğun olması program tarafından işlenirken yanlış objeyi yakalayabildiği için sade ve benzersiz şekillere sahip hedefler kullanılmasının faydalı olacağı değerlendirilmiş ve hedef üzerinde tek bir nokta olmasına karar verilmiştir. Tek noktalı hedefte yine takipte

zorlanılan durumlar söz konusu olabilmektedir. Bu durum yüksek hızla hareket eden objelerde görüntü yürümesine bağlı olarak hedefin kontrasını kaybetmesinden kaynaklı olarak ortaya çıkmaktadır.



Şekil 3.4 Ölçme noktasına yerleştirilen yapay hedefler

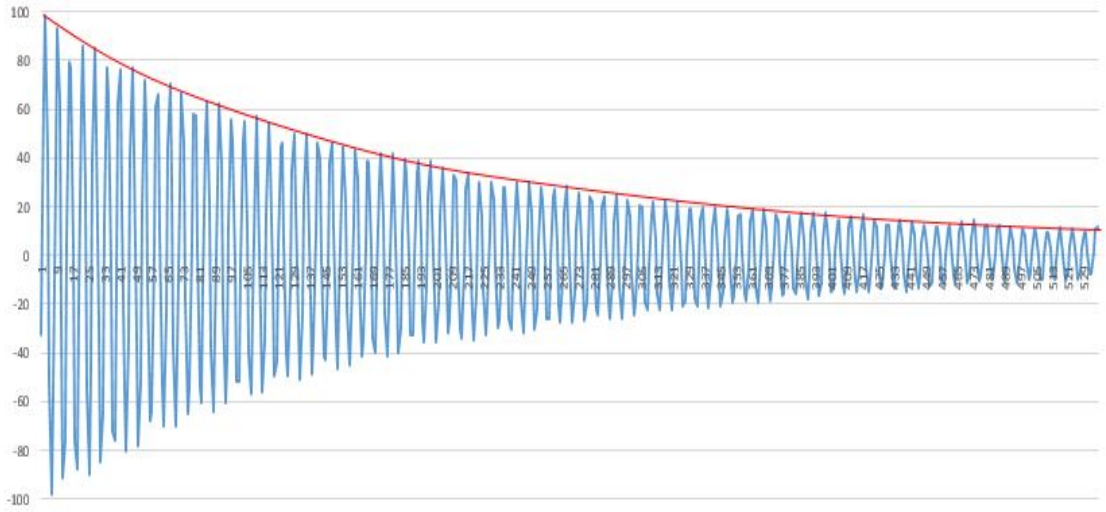
3.1.1.3 Harmonik Hareket Testi

Mengene yardımıyla sabitlenen çelik bir çubuk ve uç kısmına sabitlenen 30 mm çapındaki topa yaklaşık 100 mm genlikli hareket verilmiş ve harmonik hareket yapması sağlanmıştır (Şekil 3.5). Nikon Coolpix P900 marka kamera ile yaklaşık 100 m mesafeden 25 fps ile veri toplanmış elde eden görüntüler MATLAB 2018b programında yazılan kodlar yardımı ile işlenmiştir. Harmonik harekete ait yer

değiştirme grafiği şekil 3.6'daki gibi zaman serisine dökülmüştür. 3.6 Hz'lik hareketi başarılı bir şekilde takip edebildiği görülmüştür. Bir sinüs dalgası yaklaşık 7 çerçeveden elde edilen yer değiştirmeler yardımı ile çizildiğinden teorik olarak şekil üzerindeki kırmızı renk ile çizilen çizgiden genellikle çizginin altında kaldığı gözlemlenmiştir. Bu test daha yüksek frekans (FPS değeri) değeri ile kaydedilmesi durumunda teorik değer ile daha uyumlu gerçekleşecektir. Diğer yandan bu ölçümlerin yapıldığı saate ait refraksiyon değerine ait standart sapma değeri bilinmediğinden bu sapmanın ne kadarının refraksiyona ait olduğu da bilinememektedir.



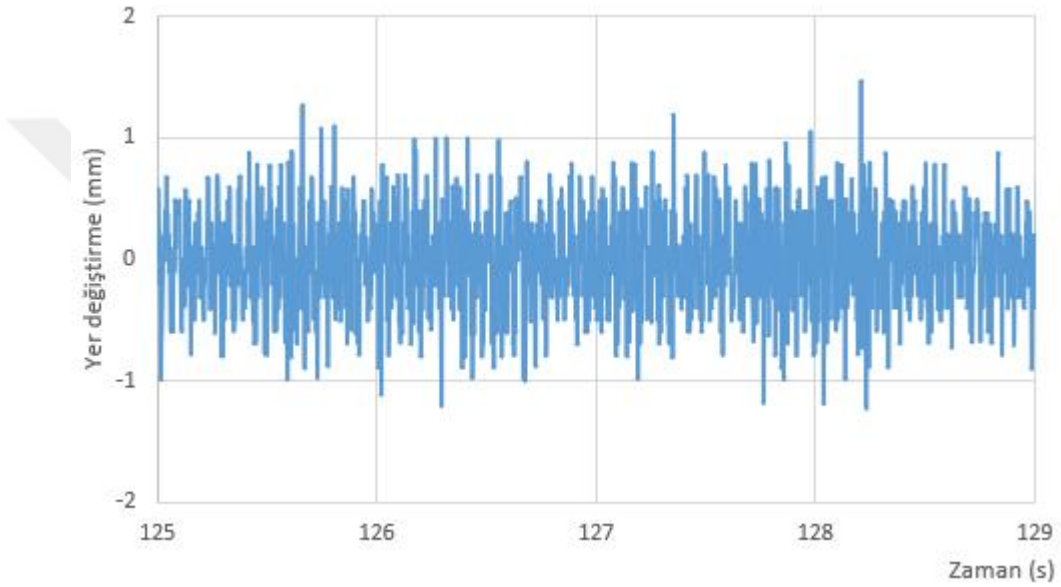
Şekil 3.5 Testlerde kullanılan hareketli obje ve sabitlemede kullanılan mengene (A) ve ölçüm anına ait bir görüntü (B)



Şekil 3.6 Basit harmonik harekete ait deplasman grafiği

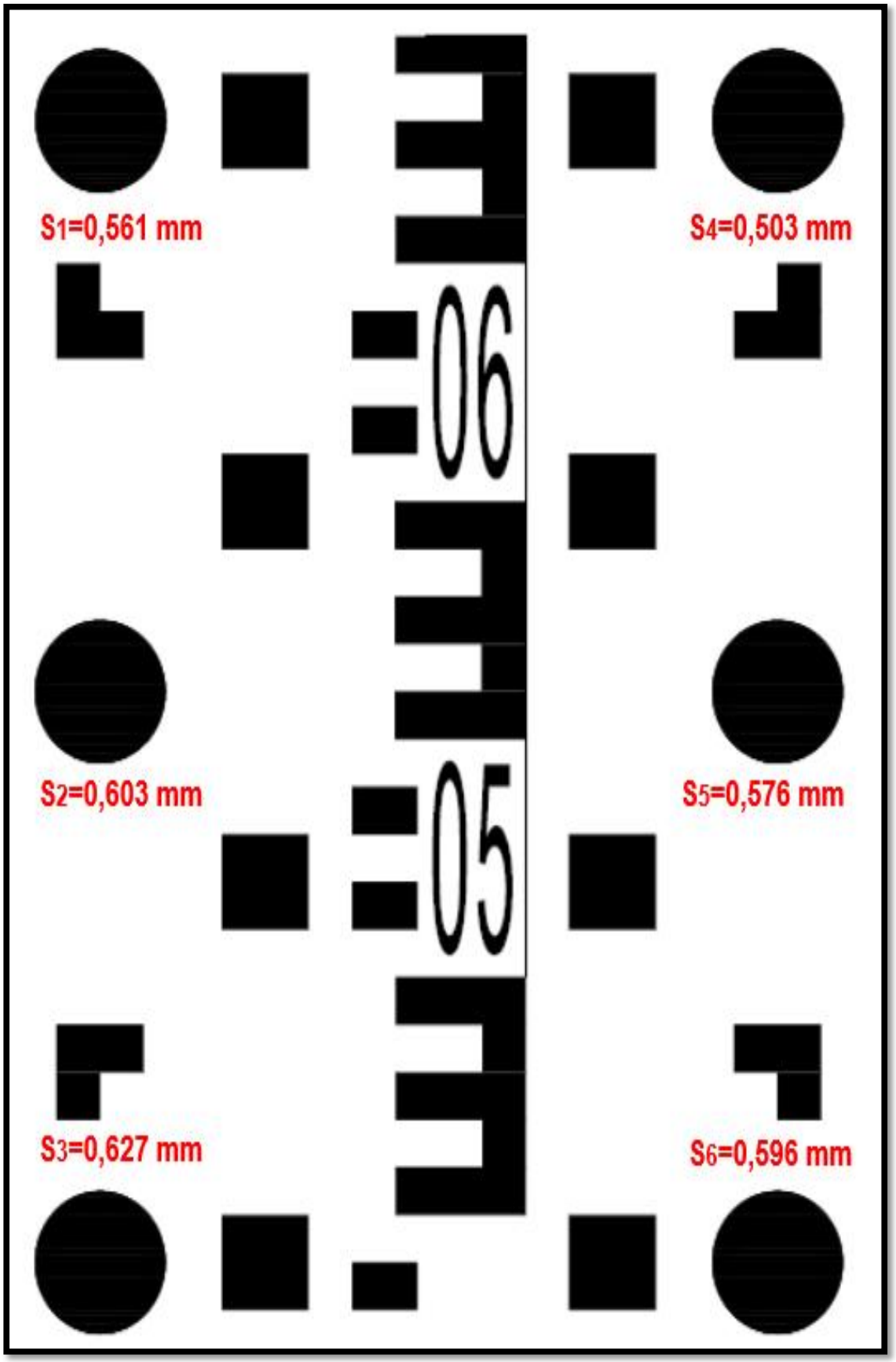
3.1.1.4 Refraksiyon Kaynaklı Etkinin Araştırılması

Işığın ortamdaki sürekli yoğunluk değişiminden kaynaklı olarak sapmasına bağlı olarak hedefin hareketli gibi algılanması ölçüm sonuçları üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Bu durum sabit hedef üzerine yapılan ölçümlerde fark edilmiş, aslında var olmayan ancak zaman serisinde kendini gösteren bu hareketin ölçü hatalarının bir sonucu olduğu değerlendirilmiştir. Günün sıcak saatlerinde yapılan ölçümlerde daha büyük yer değiştirme değeri verdiğinden refraksiyon kaynaklı olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7 Refraksiyon kaynaklı deplasman grafiği

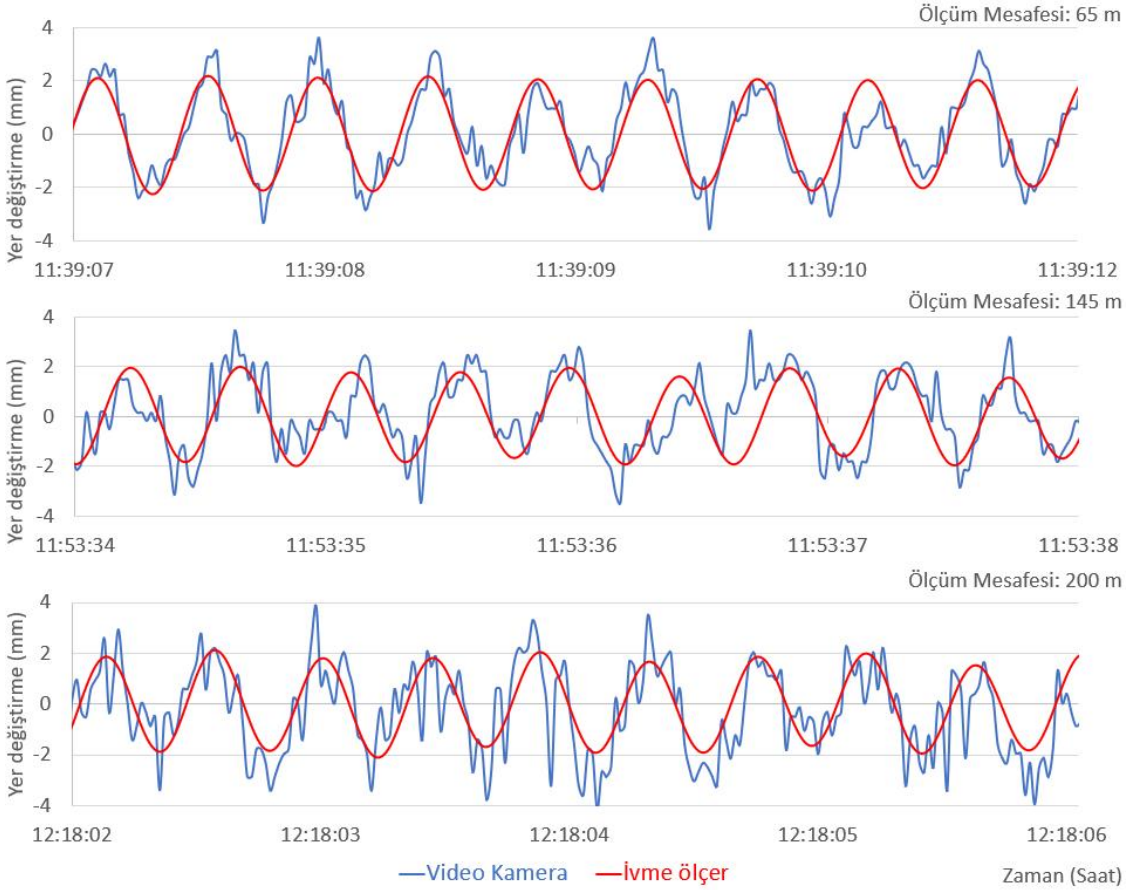
Bir başka deneyde ise, A4 boyutundaki sabit hedef üzerine yerleştirilen daire şeklindeki objelerin bir birlerinden 14 cm ile 25 cm arasında değişen mesafeye sahip olmasına rağmen refraksiyondan kaynaklı farklı hareketler gözlemlenmiştir (zaman serisindeki beklenen hareket yatay bir çizgi şeklinde). Bir birinden olan uzaklıkları oldukça yakın (neredeyse aynı sayılabilecek ortamlarda bile) olan mesafelerde farklılık göstermesi, standart sapma değerlerinin anlamlı farklar olmasa bile bir birinden farklı olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 3.8). Standart sapma değerleri hedefin zemine yakın olan kısmında daha büyük, üst kısmında daha küçük değerler olmaktadır ve bu durum hedefin yerden olan uzaklığı arttıkça kırılmanın etkisinin azaldığını açıklamaktadır (Refraksiyon, havanın yerle temas ettiği noktada daha büyüktür).



Şekil 3.8 Sabit hedef üzerindeki eş dairelere ait standart sapma değerleri

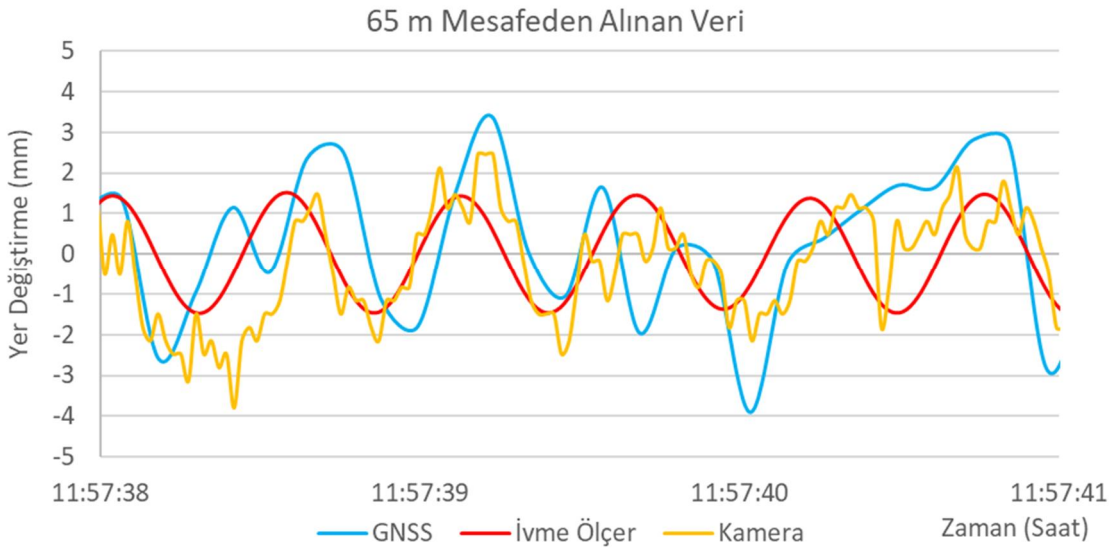
Refraksiyondan kaynaklı deneysel standard sapma (s) değerinin hava sıcaklığı, ölçüm yapılan nokta ile hedef arsındaki mesafeyle, zeminin cinsi ile doğru orantılı olduğu, hedefin ve ölçüm noktasının zeminden olan yüksekliği ile ters orantılı olduğu yapılan deneylerde ampirik olarak bulunmuştur. Ancak bu konu ayrı bir çalışma konusu olması nedeniyle burada içeriğine girilmeyecektir.

Şekil 3.9'da görülen grafikler mesafeye bağlı olarak refraksiyon etkisini gösteren güzel bir örnektir. 26.11.2021 tarihinde yapılan çelik kiriş düzeneğine ait ölçümlerin refraksiyon ile ilgili olan bu kısımda hedefin yerden olan yüksekliği ortalama 1 m dolaylarındadır. Ölçümlerin yapıldığı zaman aralığı atmosferik koşullarda ciddi bir değişime neden olacak kadar uzun olmayan aralıklarla yapılmıştır. Ölçümler 65, 145 ve 200 m mesafeden yapılmış ortamdan kaynaklı değişen tek parametre mesafe olarak değerlendirilmiştir. Referans veri olan kırmızı renkli ivme datası ile video kayıtları incelendiğinde yaklaşık 2 mm genlik değerine sahip deplasman verileri ile kamera verileri oldukça uyumlu ancak referans veri gibi düzgün bir sinüs grafiği çizmesi beklenirken referans veriden sapmalar olduğu, mesafe arttıkça sapma değerinin de arttığı gözlemlenmiştir.

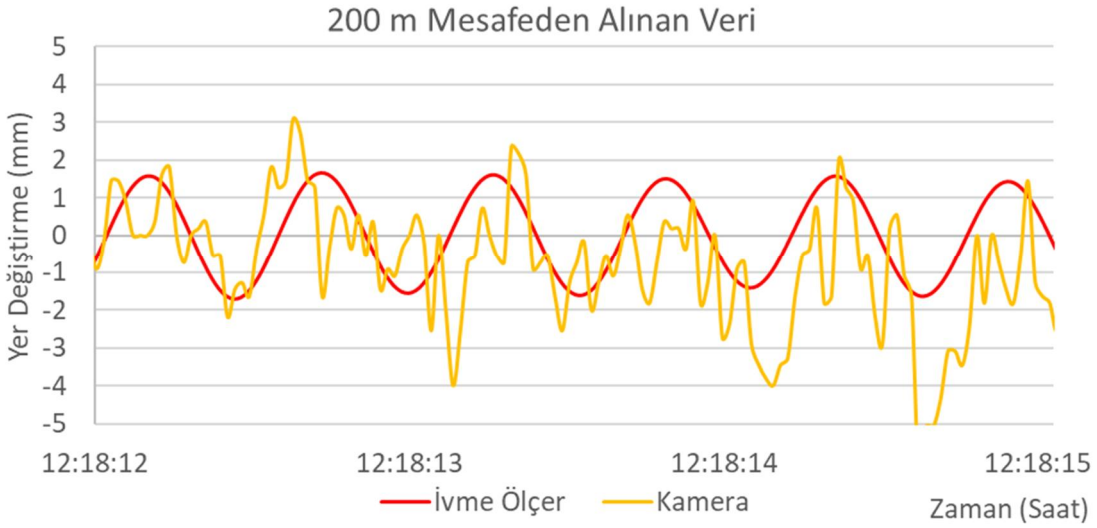


Şekil 3.9 Refraksiyon kaynaklı sapma miktarlarının mesafeye göre değişimi.

Hareketin 1.5 mm dolaylarında olduğu zamana ait grafik (Şekil 3.10) incelendiğinde 65 m mesafeden alınan kamera verisinin refraksiyon kaynaklı küçük sapmalarına rağmen referans veriyi takip ettiği görülmektedir. Aynı grafikte GNSS verilerinde hareket belirleme yeteneği daha düşük olarak gözlemlenmektedir. Aynı genlik değerine sahip ve 200 m mesafeden toplanan veride ise refraksiyon kaynaklı sapmalar ± 1 mm dolaylarında olup hareketin algılanması neredeyse olanaksızdır (Şekil 3.11).



Şekil 3.10 65 m mesafeden alınan deplasman verisinin refraksiyon etkisi ile hareketin algılanmasında güçlük yaşanması



Şekil 3.11 200 m mesafeden alınan deplasman verisindeki hareketin refraksiyon etkisi ile kaybolması

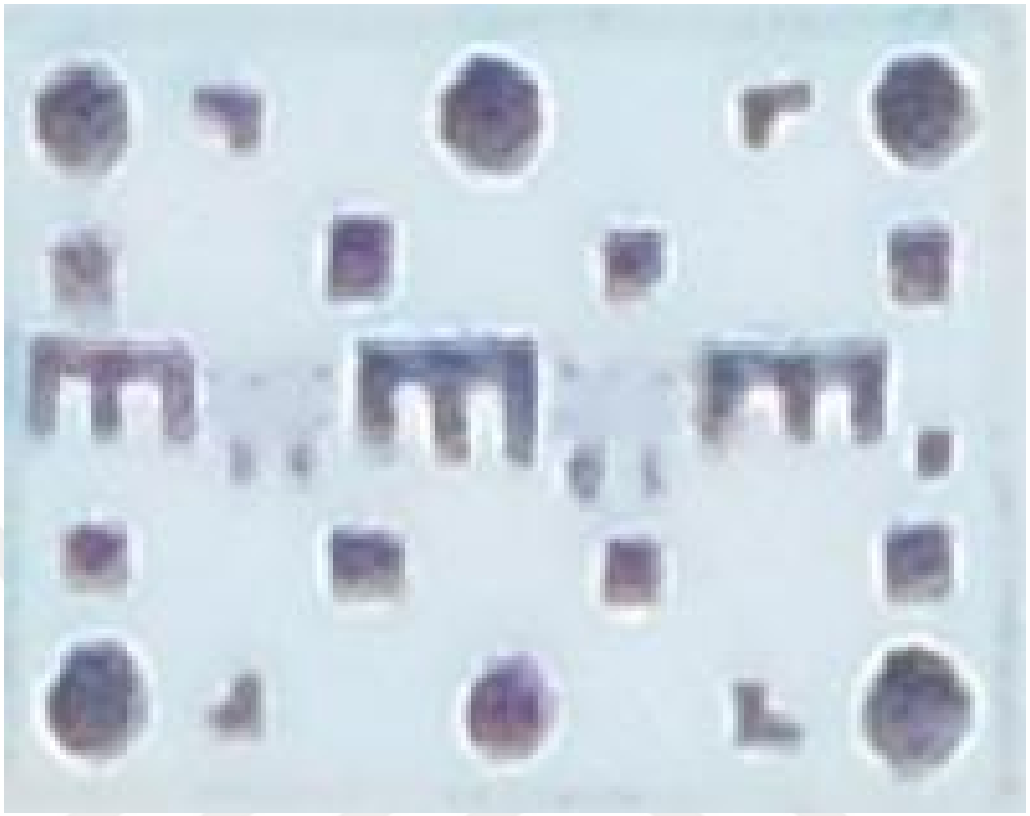
Diğer bir test işleminde kamera verileri ile değişen atmosferik koşullar altında refraksiyon kaynaklı şekil bozulmalarının görüntü üzerindeki etkisini ortaya çıkarmak amacıyla ile 70 m ve 145 m mesafeden birer saat arayla veri toplanmıştır (Şekil 3.12). Bu ölçme işleminde saat 9.00 - 13.00 arasında saat başlarında yapılan ölçümlerin yanında sıcaklık, nem miktarı, gökyüzünün durumu ve UV indeksi gibi atmosferik veriler de kaydedilmiştir. Amaç hangi parametrenin refraksiyon üzerine etkisinin en büyük olduğunun belirlenmesidir. Anılan zaman içerisinde hava sıcaklığında ciddi bir değişiklik olmamasına karşın öğle saatine yakın zamanda UV

indeksinin artması gelen ışının yeryüzüne vurma açısının yüzey normaline yaklaşması (dik açıya yaklaşması) nedeniyle yeryüzünün daha fazla ısınmasına sebep olmaktadır. Isı arttığında ortam yoğunluğundaki değişkenlikte artmakta dolayısıyla da kırılma miktarı artmaktadır. Saat 13.00 civarı havanın bulutlu ve yağışlı olması ile kırılma miktarında bir düşüş göze çarpmaktadır.

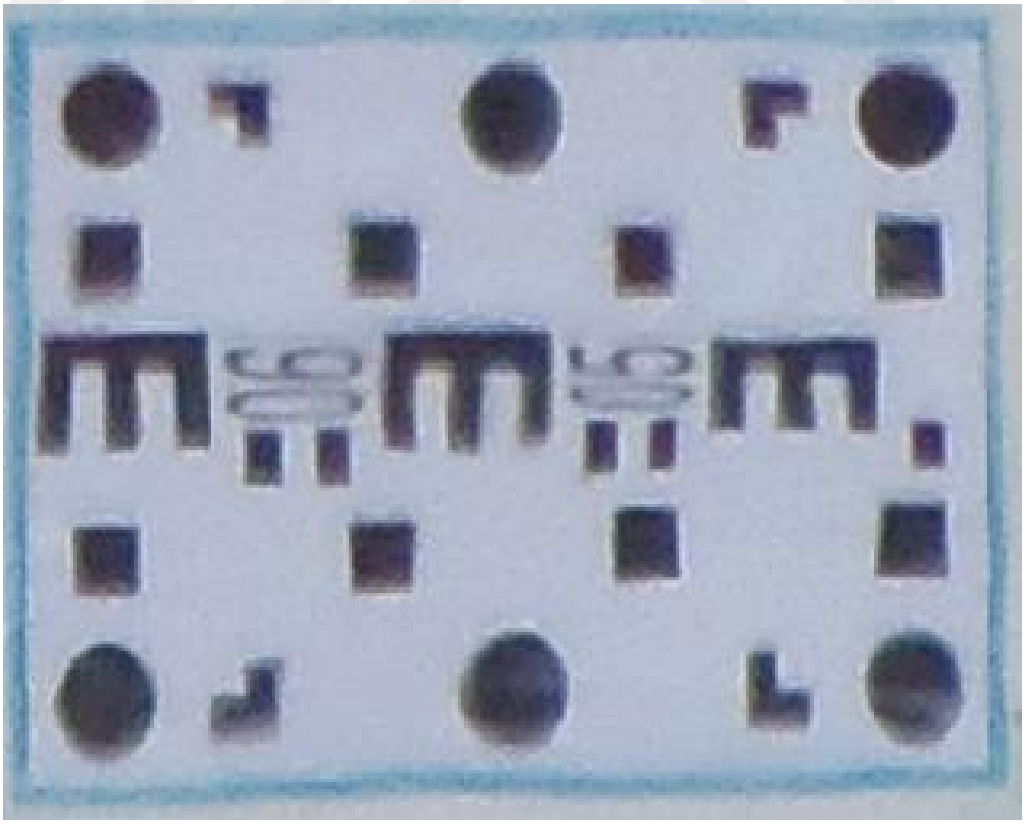
Görseller incelendiğinde mesafenin etkisi açıkça görülmektedir. Diğer taraftan yerin ısısının ışığın kırılması üzerindeki etkisinin diğer parametrelere göre daha etkili olduğu göze çarpmaktadır. Aynı şekilde A4 kağıdı üzerinde yapılan kırılma kaynaklı ölçümlerin σ değerlerinin zemine yaklaştıkça arttığı ifade edilmişti. Bir diğer durum ise yağmurla birlikte soğuyan zeminde kırılma etkisinin azalması ön görülmüş ancak refraksiyon etkisinin istenilen düzeyde hissedilmemesi havadaki su buharı artışından kaynaklı olarak değerlendirilmiştir.

Saat: 9:00	Sıcaklık: 24 º	Nem (%): 75	UV İnd.: 4	Gökyüzü: bulutlu

145 m Mesafeden

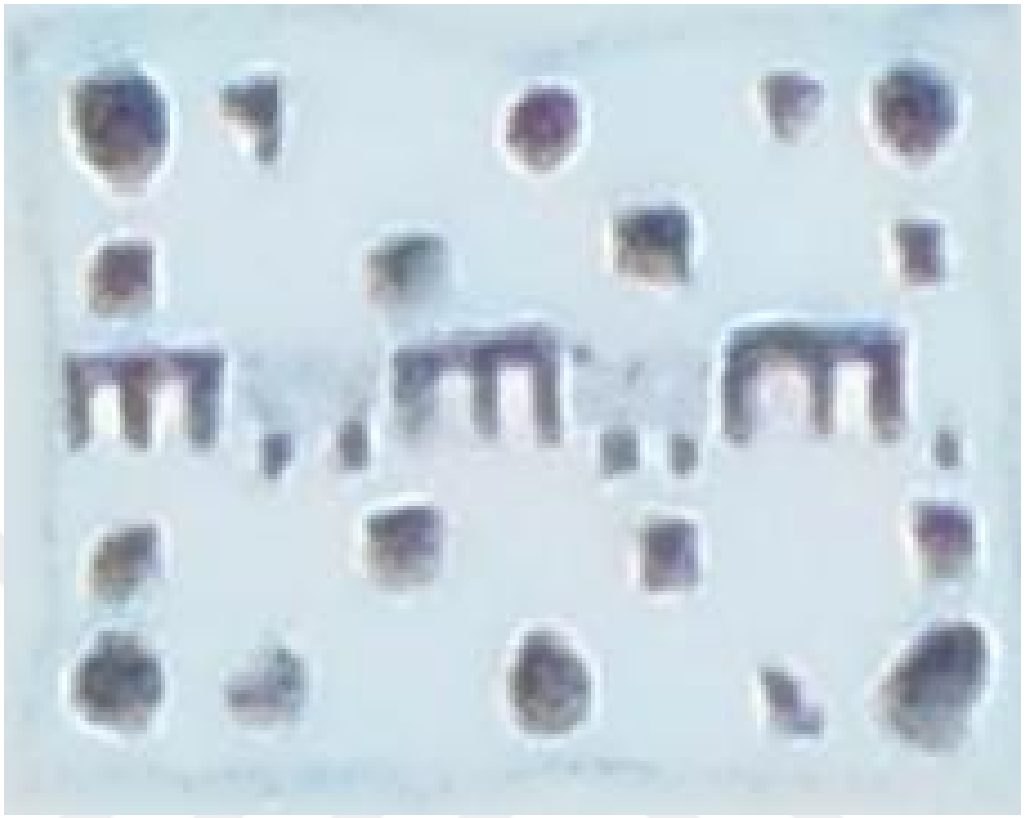


70 m Mesafeden

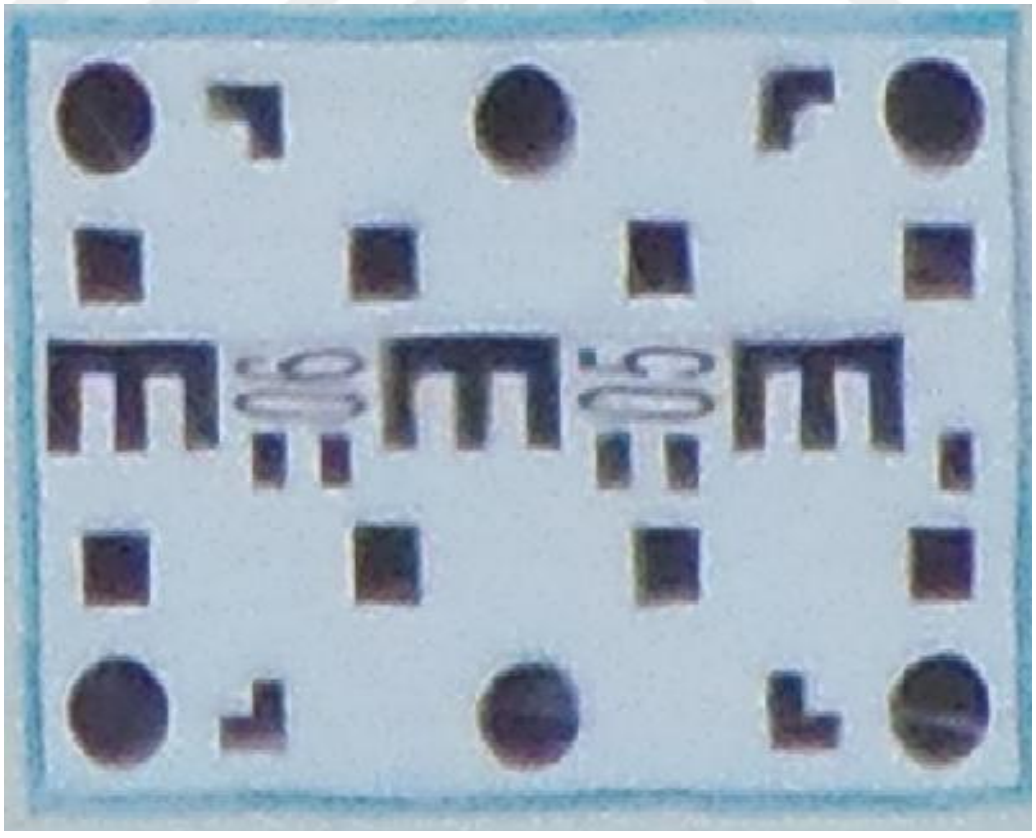


Saat: 10:00	Sıcaklık: 24 º	Nem (%): 70	UV İnd.: 6	Gökyüzü: bulutlu

145 m Mesafeden

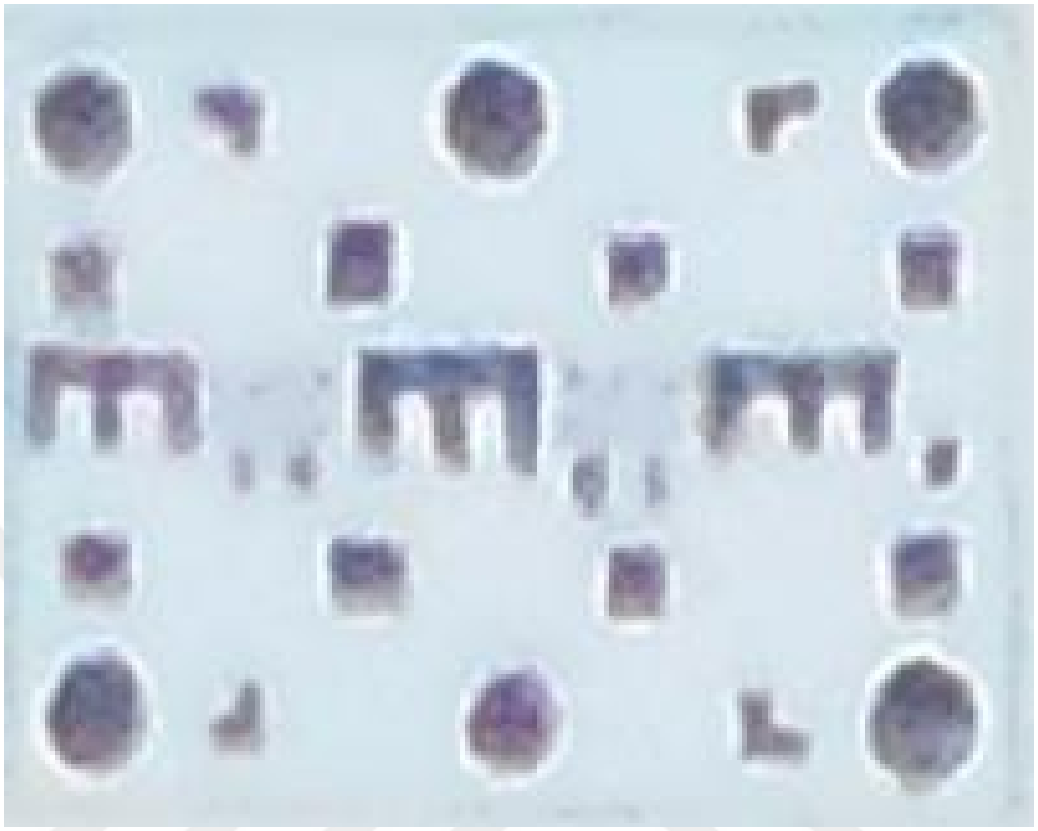


70 m Mesafeden

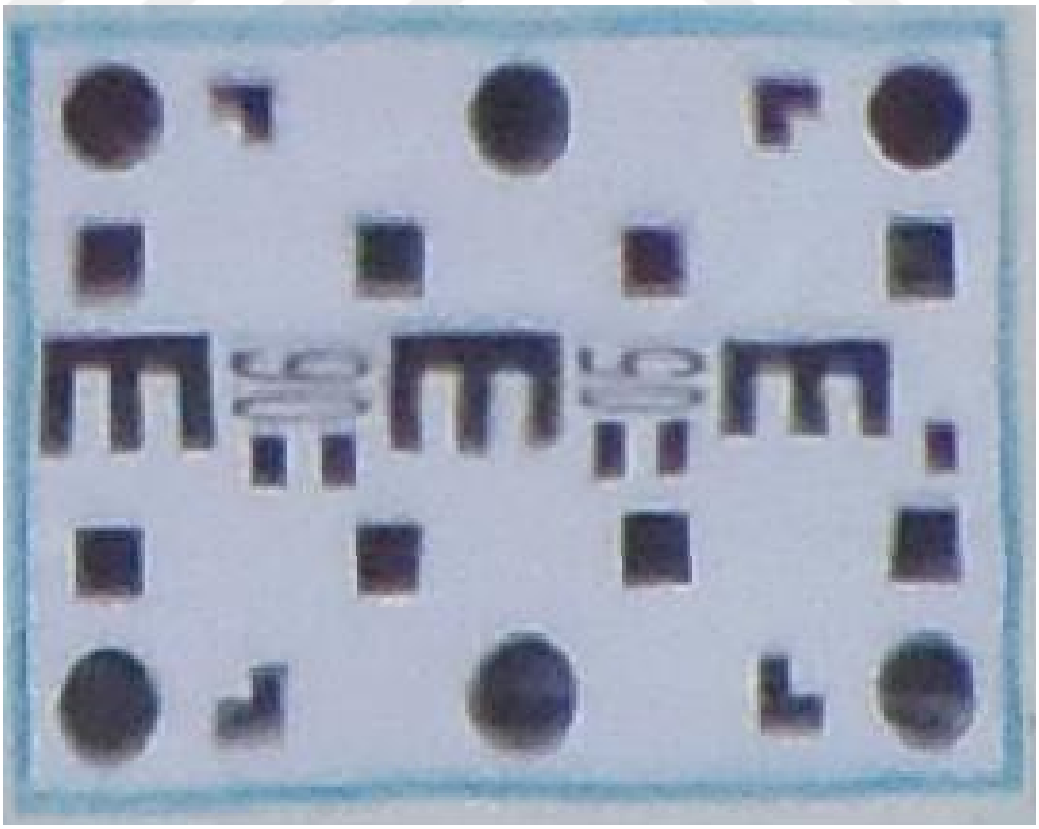


Saat: 11:00	Sıcaklık: 25 º	Nem (%): 70	UV İnd.: 8	Gökyüzü: bulutlu

145 m Mesafeden

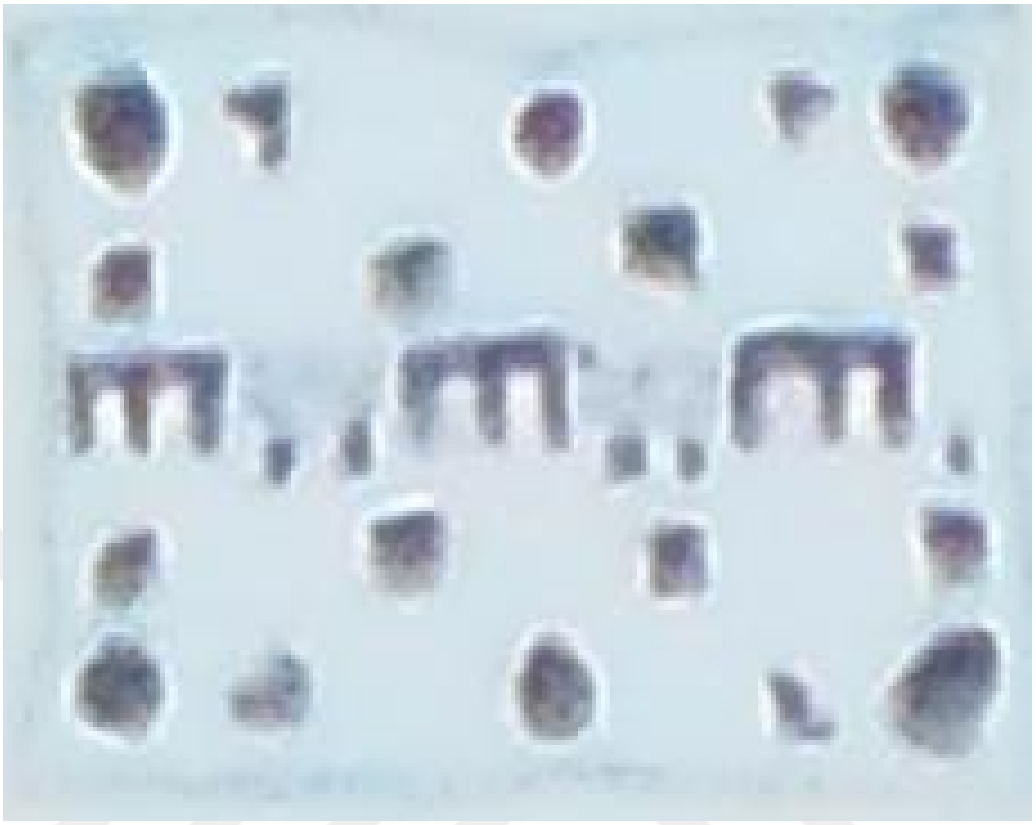


70 m Mesafeden

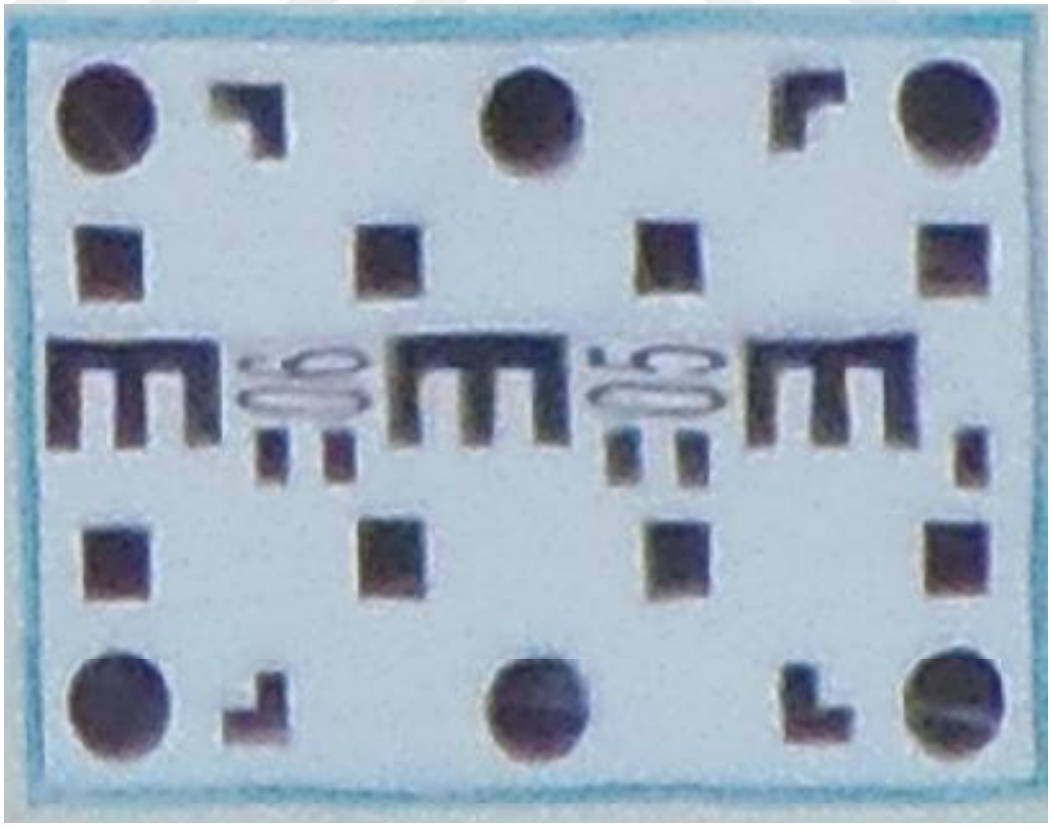


Saat: 12:00	Sıcaklık: 25 ^{o}	Nem (%): 70	UV İnd.: 4	Gökyüzü: Çok bulutlu

145 m Mesafeden

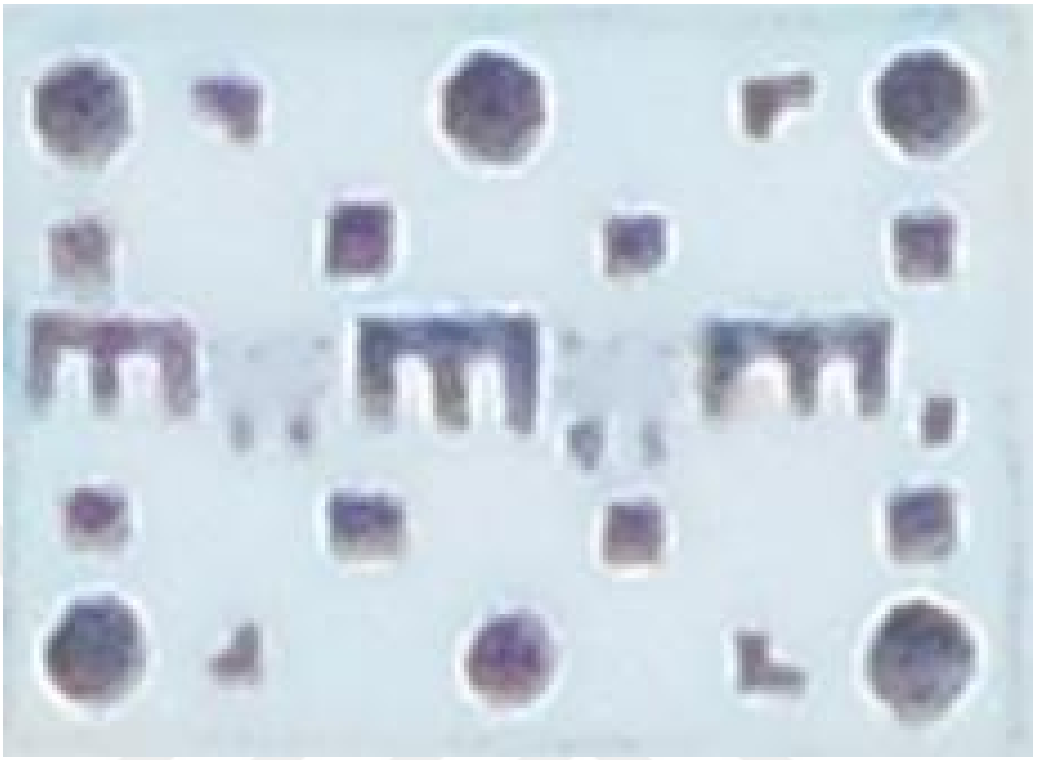


70 m Mesafeden

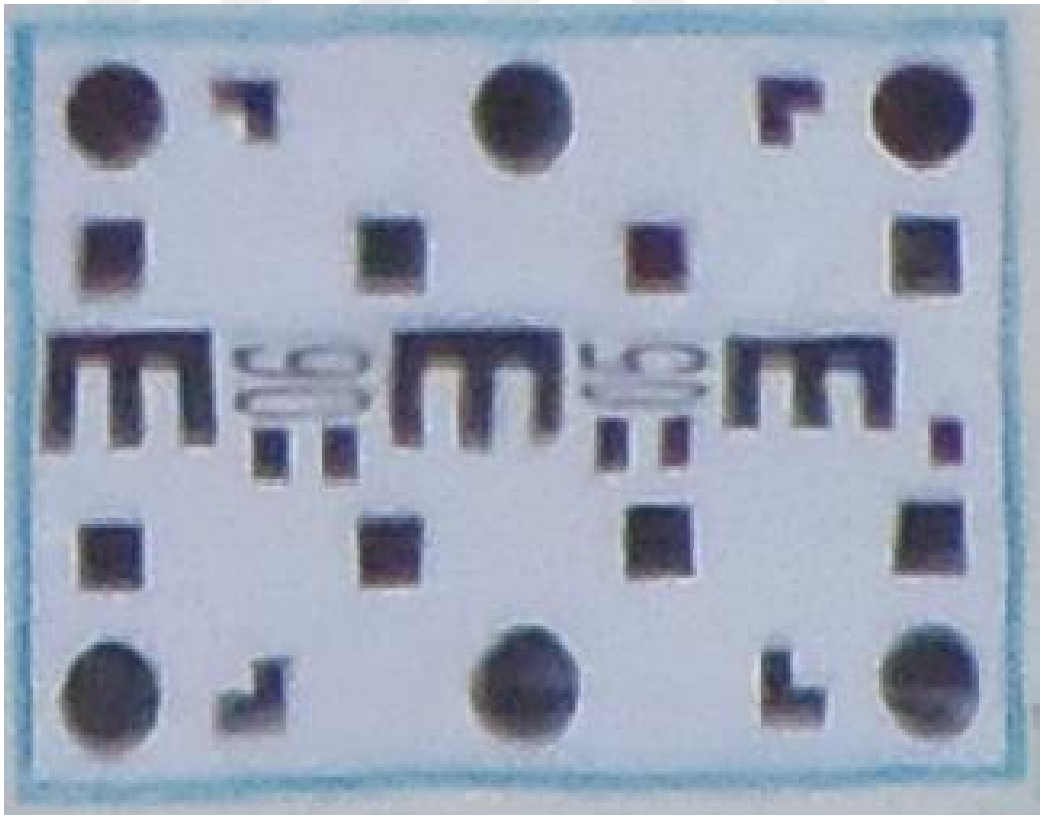


Saat: 9:00	Sıcaklık: 23 °	Nem (%): 85	UV İnd.: 3	Gökyüzü: Yağmurlu

145 m Mesafeden



70 m Mesafeden



Şekil 3.12 12.06.2019 tarihinde 1 saat aralıklarla yapılan video kayıtlarında refraksiyon kaynaklı bozulmalar.

3.1.2 Sarsma Masası Testi

Kalibrasyon testleri için en sıkça başvurulan uygulamalardan olan sarsma tablası testleri tarafımızca gerçekleştirilmiştir. Burada amaç ölçümlerde kullanılacak olan kamera ve MEMS'in sarsma masası testinin referans algılayıcı sistemi olan LVDT verileri ile uyuşumunun araştırılmasıdır.

Saha ölçümlerinde kullanılacak olan ivme ölçer için her zaman dışarıdan enerji temin edilemeyeceği varsayımından yola çıkarak bluetooth ile veri aktarabilen ve dışarıdan sağlanacak enerjiye gereksinim duymayan WIT marka ve BWT 901CL model MEMS'in kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu bağlamda, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait Yapı Laboratuvarındaki sarsma masasında test ölçümleri yapılmıştır. Sarsma masasının kendi bünyesinde barındırdığı ve referans olarak kullanılan LVDT'nin 1000 Hz veri kayıt sıklığına sahip olup yine sarsma masası üzerine tarafımızdan monte edilen 50 Hz'lik veri kayıt sıklığına sahip olan MEMS ve video kamera ile yapılan ölçümler yaklaşık 60 m mesafeden kaydedilmiş ve veri kayıt aralığı 25 Hz olarak ayarlanmıştır. Sarsma masasının yapacak olduğu harekete ait ilgili tüm parametreler bilgisayara girilip bütün kontroller buradan sağlanmaktadır. Bilgisayarın kontrol ünitesinden yatayda +100 mm -100 mm ve 0.1 Hz'lik frekans bilgisi sisteme girilmiştir (Şekil 3.13). Sarsma tablası harekete başlamadan önce video kamera ve ivmeölçer kayıt yapmaya başlamıştır. Tüm sistemlerin veri toplamaya başlamasından sonra sarsma masası çalışmış ve sarsma tablası üzerine monte edilen LVDT tarafından harekete ait deplasman verileri yine bilgisayar tarafından toplanmaya başlamıştır.



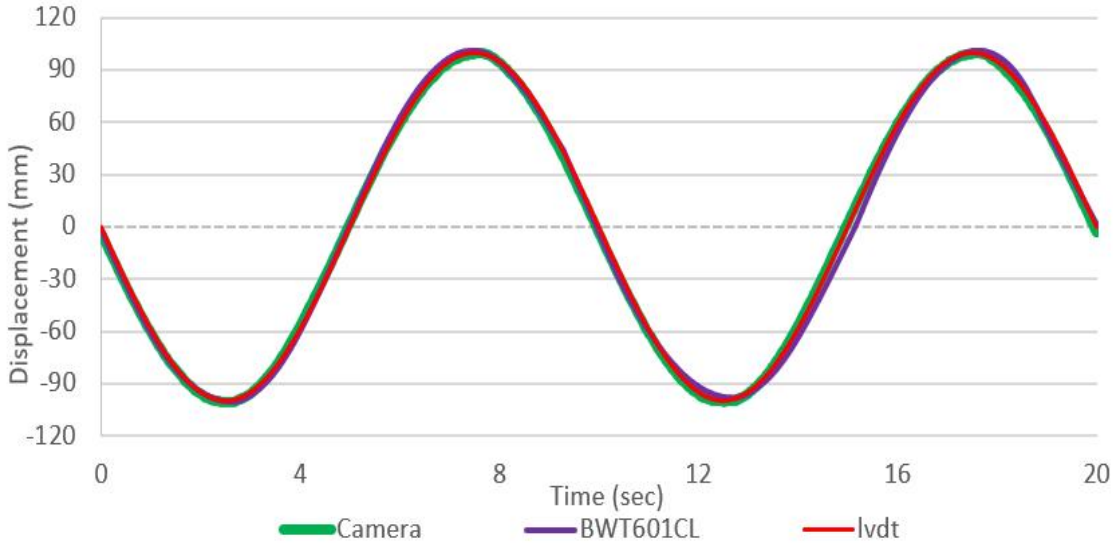
Şekil 3.13 Sarsma Tablası ve kırmızı kare şeklindeki yapay hedefe ait bir görüntü

LVDT verileri sarsma masasını kontrol eden bilgisayardan, deplasman verileri direkt olarak alınmıştır. Kamera verileri ile ivme ölçer tarafından "g" değerleri ile kaydedilen veriler MATLAB tarafından post-proses olarak değerlendirilmiştir. Tüm algılayıcı sistemlerin verileri senkron hale getirildikten sonra zaman serisine dökülmüştür (Şekil 3.14). Elde edilen veriler sinüzoidal bir harekete sahip olduğu ve bilgisayara giriş değerleri ile LVDT'den elde edilen verilerin son derece uyumlu olduğu saptanmıştır. Bu uyum Pearson korelasyon katsayıları hesaplanarak nümerik anlamda da kanıtlanmıştır (Tablo 3.1). Diğer taraftan, harekete ait deplasman değerlerinden standard sapma değerleri (s) hesaplanmıştır

Tablo 3.1 Ölçümlere ait istatistiksel hesaplamalar

Veri Toplama Yöntemi	Korelasyon katsayısı	s (mm)
LVDT	Referans algılayıcı	70.64
BWT901CL	0.992	70.26
Camera	0.997	70.24

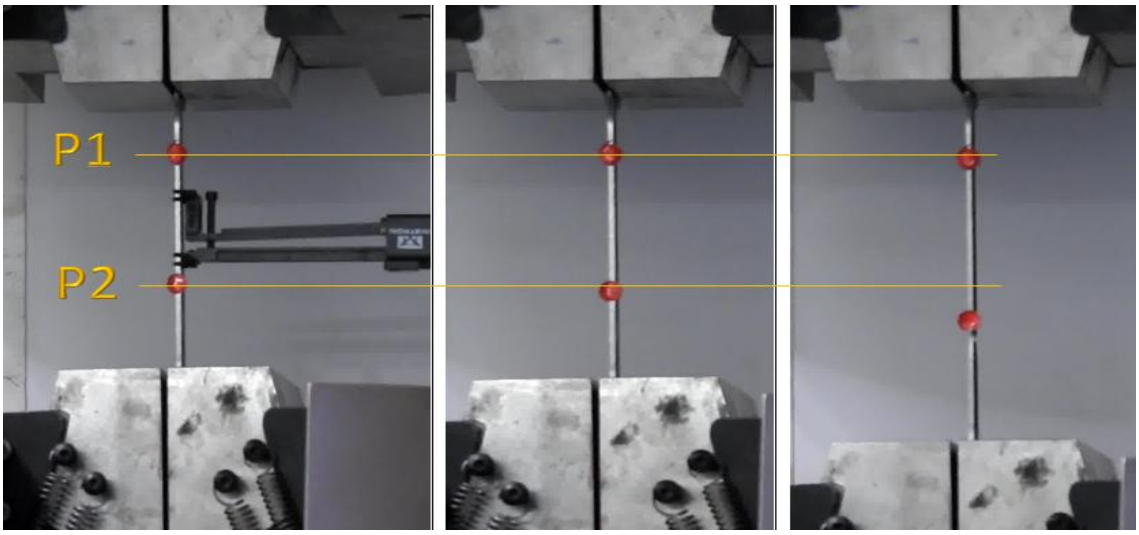
Bu testten elde edilen veriler ışığında BWT901CL ivme ölçerin saha çalışmalarında kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.



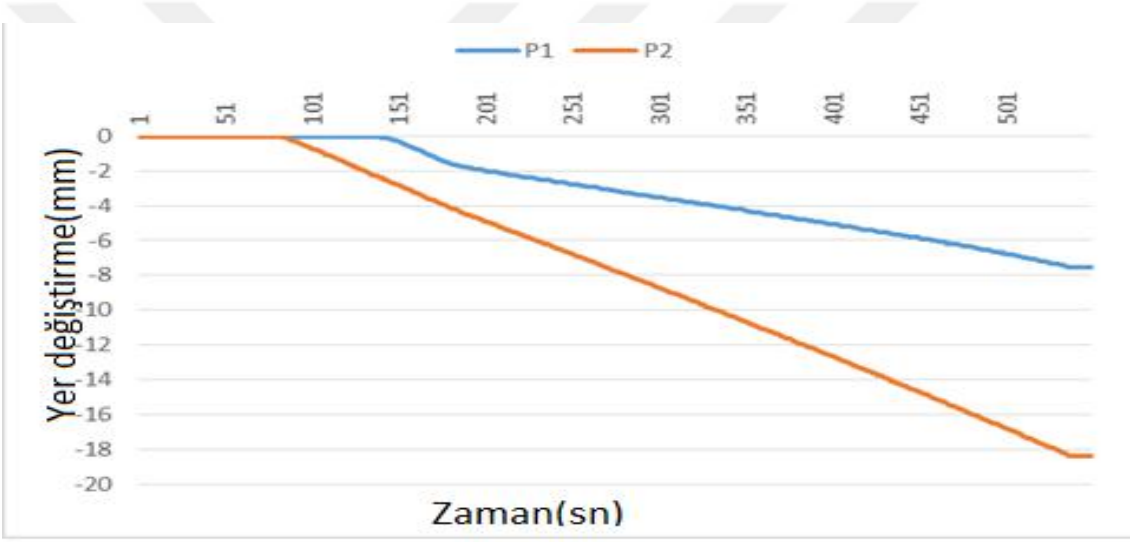
Şekil 3.14 Değerlendirme sonucu elde edilen verilere ait zaman serisi

3.1.3 Çekme Deneyi

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait Yapı Laboratuvarında bulunan 8803 Yorulma Yüklemesi aleti yine bilgisayar tarafından kontrol edilmekte olup hidrolik olarak çalışmakta ve üst çene sabit olup alt hareket kabiliyetine sahiptir. Bu testlerde numune olarak hazırlanan çelik çubukların dayanımı test edilmektedir (Şekil 3.15). 8803 Yorulma Yüklemesi aletiyle yapılan çekme testi işleminin video kamera yardımıyla kayıtları yapılmıştır. Çelik çubuk numuneleri çekme işlemi ile bir süre sonra uzayarak elastik bölgeden plastik bölgeye geçip daha sonra kopmaktadır. Bu süre ortalama 9 dakikadır. Video kayıtlarının değerlendirilmesi sonucunda çelik çubuk üzerine yerleştirilen hedeflerden yer değiştirme zaman grafiği aşağıdaki gibi elde edilmiştir. Şekil 3.15'te görselleştirildiği gibi sabit tarafta bulunan P1 noktasındaki hareket oldukça sınırlı iken P2 noktasında daha büyük olarak gerçekleşmektedir. Bu durum grafikteki değerler ile desteklenmiştir (Şekil 3.16). Grafik incelendiğinde 9. Dakikadan sonra grafik yatay olarak devam etmektedir. Bu durum çubuğun P2 noktasının altından koptuğunu açıklamaktadır. Bazı numunelerde kopma işleminden sonra P1 noktası sabit olurken P2 noktasındaki hareketin daha büyük olduğu yani eğimin daha büyük olduğu gözlemlenmiştir. Burada çelik çubuğun P1 ile P2 noktası arasından koptuğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu test ile video kameranın sanayide kullanılabilirliğine güzel bir örnek teşkil etmektedir.



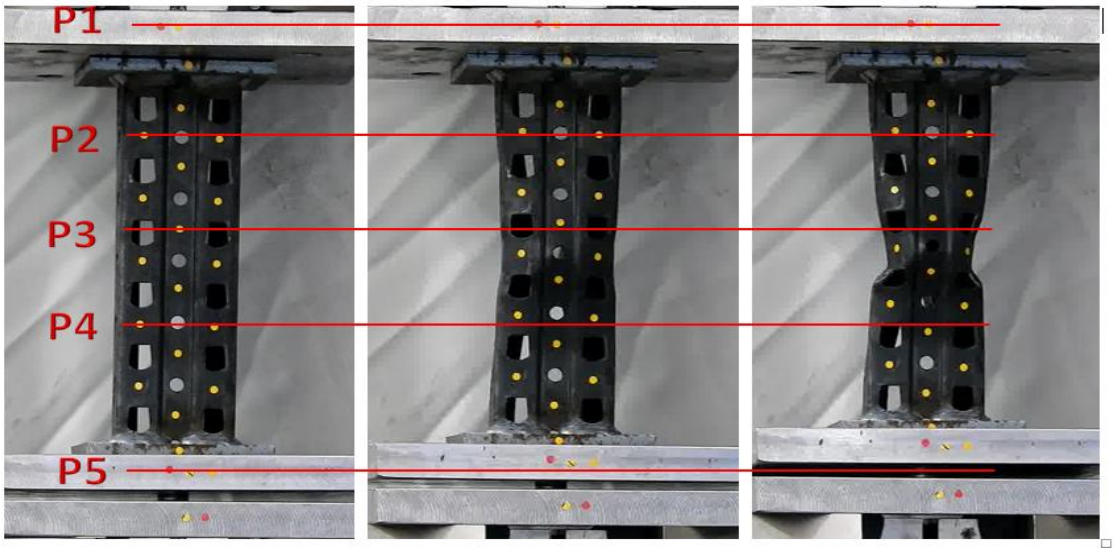
Şekil 3.15 Yapılan çekme testinde 3 farklı zaman ait görüntü.



Şekil 3.16 MATLAB değerlendirme sonucu çelik çubuğa ait yer değiştirme zaman grafiği.

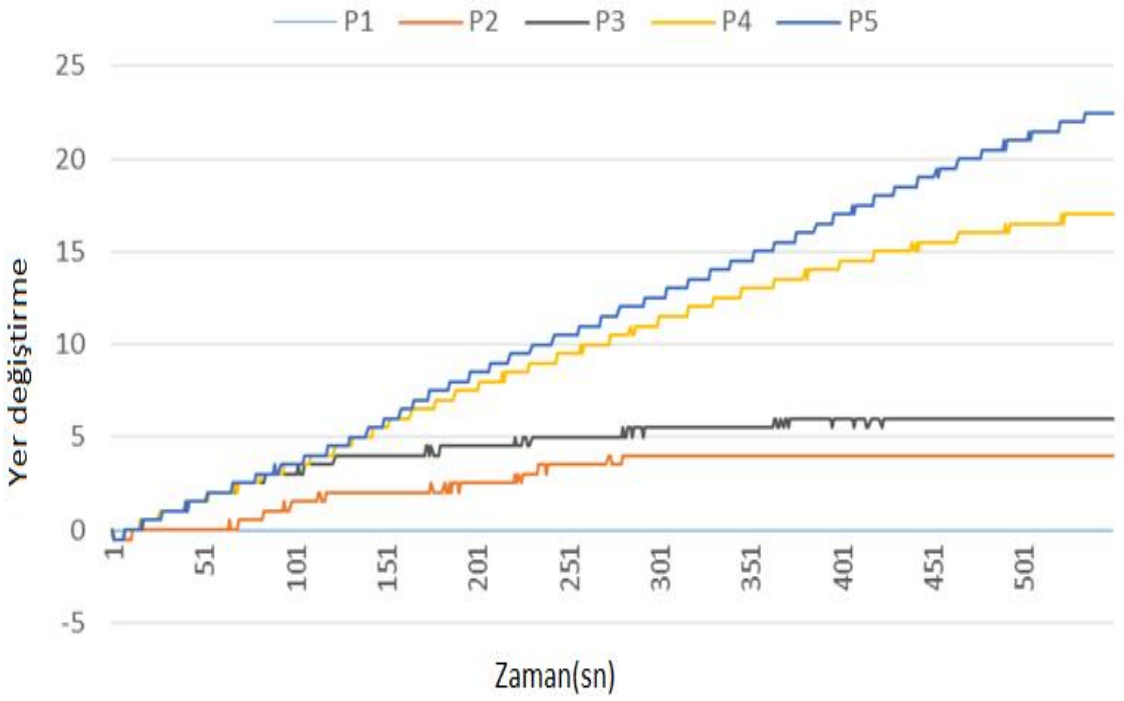
3.1.4 Sıkıştırma Deneyi

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait Yapı Laboratuvarında bulunan 8803 Yorulma Yüklemesi aletiyle gerçekleşen diğer bir deneyde ise çelik profil numunelerin dayanım testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.17). 6 m mesafeden video kamera ile yaklaşık 10 dakika devam eden kayıtlar alınmıştır. Kayıt sırasında bazı obje noktalarının basıncın etkisiyle burulma yaşayan numune üzerinde görüntüde kaybolması veya belirginliğinin azalması nedeniyle takibi yapılamamaktadır. Bu durum en sağdaki görselde açıkça görülmektedir.



Şekil 3.17 Yapılan sıkıştırma testinde 3 farklı zaman ait görüntü.

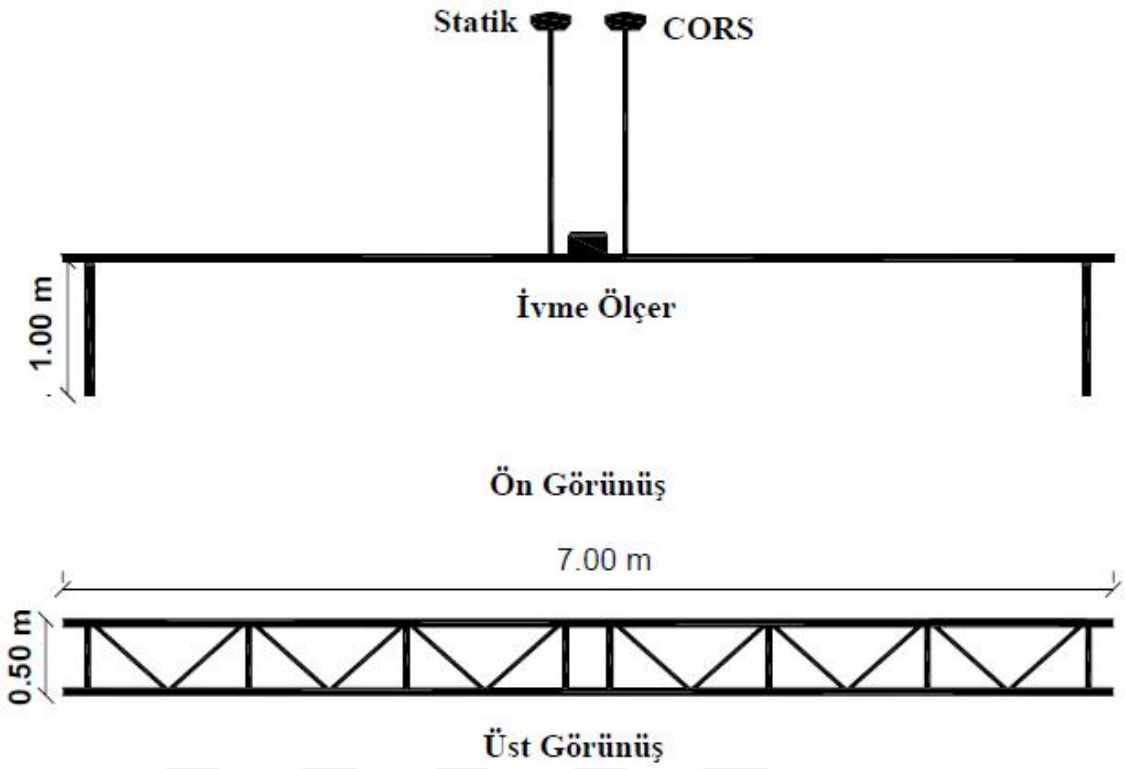
Yapılan değerlendirmeler sonucunda sıkıştırılan profilin yer değiştirme zaman grafiği aşağıdaki gibi elde edilmiştir (Şekil 3.18). Grafikteki noktaların hareketli olan çene tarafında daha büyük hareketler yaptığı, sabit olan tarafta daha sınırlı ve harekete ait eğimlerinin daha düşük olarak gerçekleştiği açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.18 MATLAB değerlendirme sonucu çelik profile ait yer değiştirme zaman grafiği.

3.2 Çelik Kiriş Deney Düzeneği Uygulaması

Yapıya ait yarı statik ve dinamik hareketleri belirlemek amacıyla köprü ve kule gibi yapılar üzerinde ölçüler yapılabileceği gibi bu yapıların bilgisayarda hazırlanan modellerinin sonlu elemanlar yöntemiyle (SEY) davranışları incelenebilir veya küçük bir modeli tasarlanarak araştırmalar yapılabilmektedir. Yapılan bu çalışma kapsamında köprü benzeri yapıya sahip bir çelik kiriş test düzeneği geliştirilmiştir. Bu düzenekte 2 GNSS alıcısı simetrik olacak şekilde plywood (ahşap) malzemeye uygun delikler açılmıştır. 7 m uzunluk ve 50 cm eninde ana taşıyıcı elemanları 50 mm çapında ve 3 mm et kalınlığına sahip iken çapraz olarak kaynatılan elemanlar 35 mm çapında ve 3 mm et kalınlığına sahiptir (Şekil 3.19). Plywood malzeme cırtlı klipslerle 4 noktadan sabitlenmiş daha sonra çelik kiriş, yerden yaklaşık 1 metre yükseklikteki çelik ayaklar üzerine yerleştirilmiştir. İki GNSS alıcısının jalonları plywood'da açılan delikten vidalar yardımı ile sabitlenmiş ve simetrik olacak şekilde yerleştirilmiştir. Simetri ekseni üzerine vida ile sabitlenen MEMS'in üzerine yapıştırılan ve video kamera ile yapılacak ölçümlerde kullanmak için yüksek kontrastlı yapay hedef yapıştırılmıştır. Daha sonra bu düzenek üzerinde 26.11.2021 tarihinde YTÜ Davutpaşa Yerleşkesinde yer alan futbol sahasında ve 01.06.2022 tarihinde İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait Yapı Laboratuvarı yakınında GNSS ölçümlerinin multipath'ten etkilenmeyeceği mesafe kadar uzağında uygun yerlerde 2 ayrı test ölçümü gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.19 Autocad 2021 ile çizilen çelik kiriş düzeneğine ait kesit

26.11.2021 tarihli Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Yerleşkesinin batı tarafında yer alan futbol sahası (Harita 3.1) içinde yapılan ölçümlerde çelik kiriş üzerinde BWT901CL ivme ölçer ve biri CORS diğeri statik ölçüm yapan 2 adet TOPCON HiPer SR GNSS alıcısı, BWT901CL ivme ölçer veri kaydına başlamıştır (Şekil 3.20, 3.21 Şekil 3.22). Çelik kirişten yaklaşık 50 m mesafede sabit alıcı yerleştirilmiş kinematik çözümler sabit istasyona dayalı olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.20 1. Ölçme işleminin yapıldığı çalışma sahası ve ölçüm yapılan noktalara ait uydu görüntüsü



Şekil 3.21 Çelik kiriş düzeneğine kurulumuna ait görsel



Şekil 3.22 GNSS alıcıları ve ivme ölçer yerleşim planı

Çelik kiriş üzerine monte edilen ivme ölçer üzerindeki hedeften 65 m, 145 m ve 200 m mesafeden video kayıtları yapılmıştır. Veriler toplanmaya başlandıktan sonra çelik kiriş dışardan düşey yönde serbest salınım yapacak şekilde hareket ettirilmiş ve bu hareketler belirli aralıklarla (hareket sönümlendikten sonra) tekrarlanmıştır. GNSS ile veri kayıt işlemi biri CORS diğeri Statik ve kinematik ölçü modunda 2 adet TOPCON HiPer SR GNSS alıcısı ile yapılmıştır. Veri kayıt işleminde; BWT901CL ve Nikon marka video kamera ile 50 Hz, CORS ve Statik ölçüler ise 10 Hz veri sıklığına ayarlanarak veriler toplanmıştır.

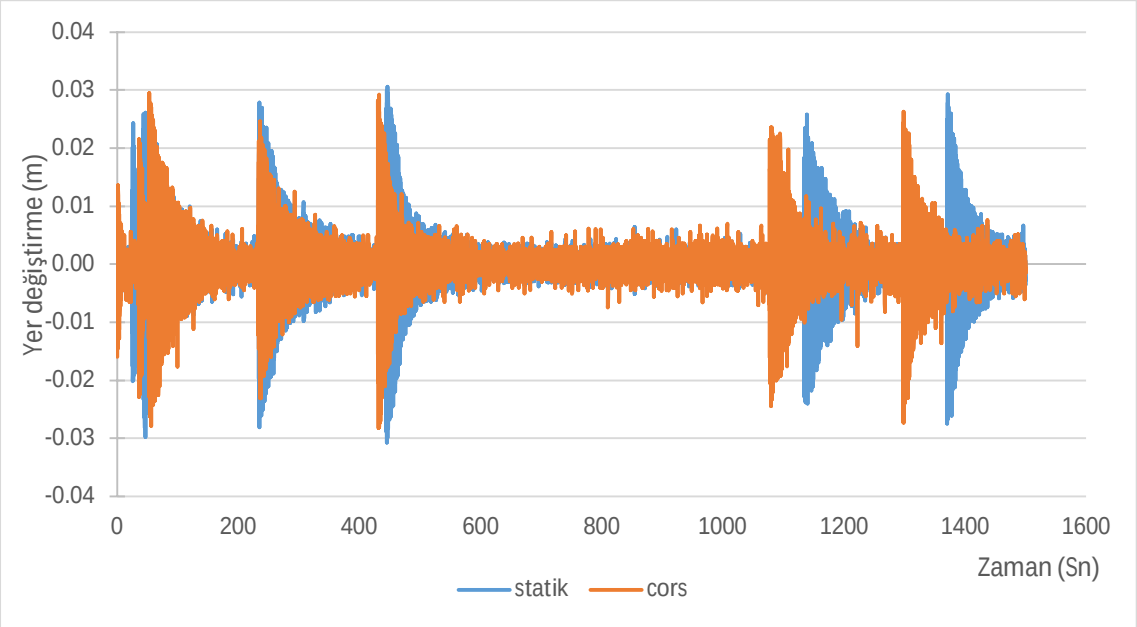
CORS yönteminden direkt olarak elde edilen yükseklik verileri ile Statik ölçüden elde edilen verinin Topcon Magnet Tools 7.2.0 yazılımında post-proses kinematik yöntemi ile değerlendirilmesiyle yükseklik verileri elde edilmiştir. BWT901CL ivme ölçerden elde edilen veriler yine post-proses olarak MATLAB 2018b versiyonlu yazılımda yazılmış olan kodlar yardımıyla değerlendirilmiş ve yer değiştirme verileri elde edilmiş, diğer taraftan video verileri MATLAB 2018b versiyonlu yazılımda post proses olarak görüntü işleme yardımı ile yer değiştirme verilerine dönüştürülmüştür. İvme ölçer ile elde edilen veriler referans veri olarak ele alınmıştır. Her dört yönteme ait deplasman verilerinin MATLAB 2018b versiyonlu yazılımda FFT analizi yapılmıştır. FFT analizinden elde edilen değerlerden her bir yönteme ait doğal frekans değerleri hesaplanmış ve Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 FFT analizinden elde edilen frekans değerleri

Veri toplayan algılayıcı sistem	Frekans (Hz)
BWT901CL ivmeölçer	2,112
CORS	2,225 (2,119)
PPP Kinematik	2,115
Video kamera	2,115

Frekans değerleri karşılaştırıldığında BWT901CL ivme ölçer, video kamera ile PPP yöntemiyle bulunan frekans değeri ile oldukça uyumlu, CORS'tan elde edilen frekansın farklı olduğu görülmektedir. Bu farkın neden kaynaklanmış olduğu

üzerine araştırma yapılmıştır. Öncelikli olarak her iki yöntemin veri kayıt sıklıkları aynı olduğu için senkron olarak zaman serisine dökülmüştür. Şekil 3.23'de görüleceği gibi iki veri zamanla birbirinden uzaklaşmaktadır. CORS tekniği ile elde edilen verinin statik ölçüm verisinden zamanla uzaklaşarak gecikmeye uğradığı görülmektedir.

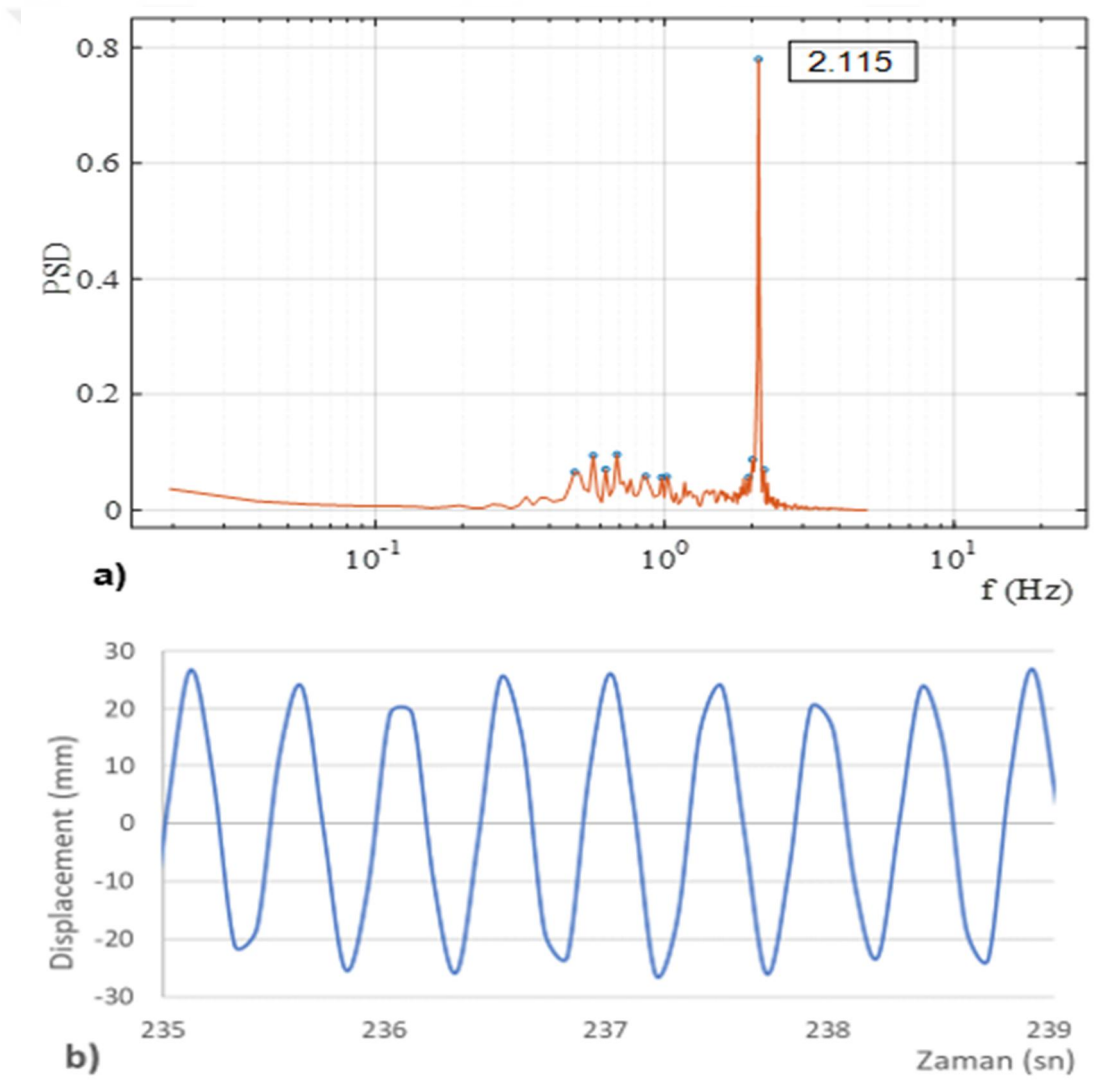


Şekil 3.23 CORS ve PPP verilerinde oluşan zaman farkı grafiği.

Bunun sebebinin CORS verisinin 10 Hz veri kaydedememesi, bluetooth ile veri aktarmada veri kayıplarının yaşanması veya fix ölçü modundan kaynaklı farklardan olabileceği değerlendirilmiştir. Yapılan araştirma ile veri kaybının ne kadar olduğunun belirlenmesi amacıyla epok sayısının belirlenmesi üzerine yoğunlaşılmıştır. CORS ölçü başlangıç ve bitiş zamanı kaydedilip epok sayısının kaç olması gerektiği hesaplanmış ve 32790 epok olması gerektiği tespit edilmiştir. Oysaki ölçüm sonucunda gerçekleşen epok sayısının 30963 olduğu belirlenmiştir. Ölçülen epok sayısı, olması gereken epok sayısına bölündüğünde 0,94428 katsayısı elde edilmiş olup %5.6 veri kaybının olduğu bulunmuştur. Bu katsayı MATLAB'te FFT analizinde kullanılan veri kayıt sıklığı parametresi kısmında 10 Hz yerine 9,4428 Hz değerinin kullanılması durumunda elde edilen yeni Eigen frekansı 2,119 Hz olarak gerçekleşmiştir. Bu değerin, diğer yöntemlerden elde edilen değerlerle daha uyumlu olduğu görülmektedir.

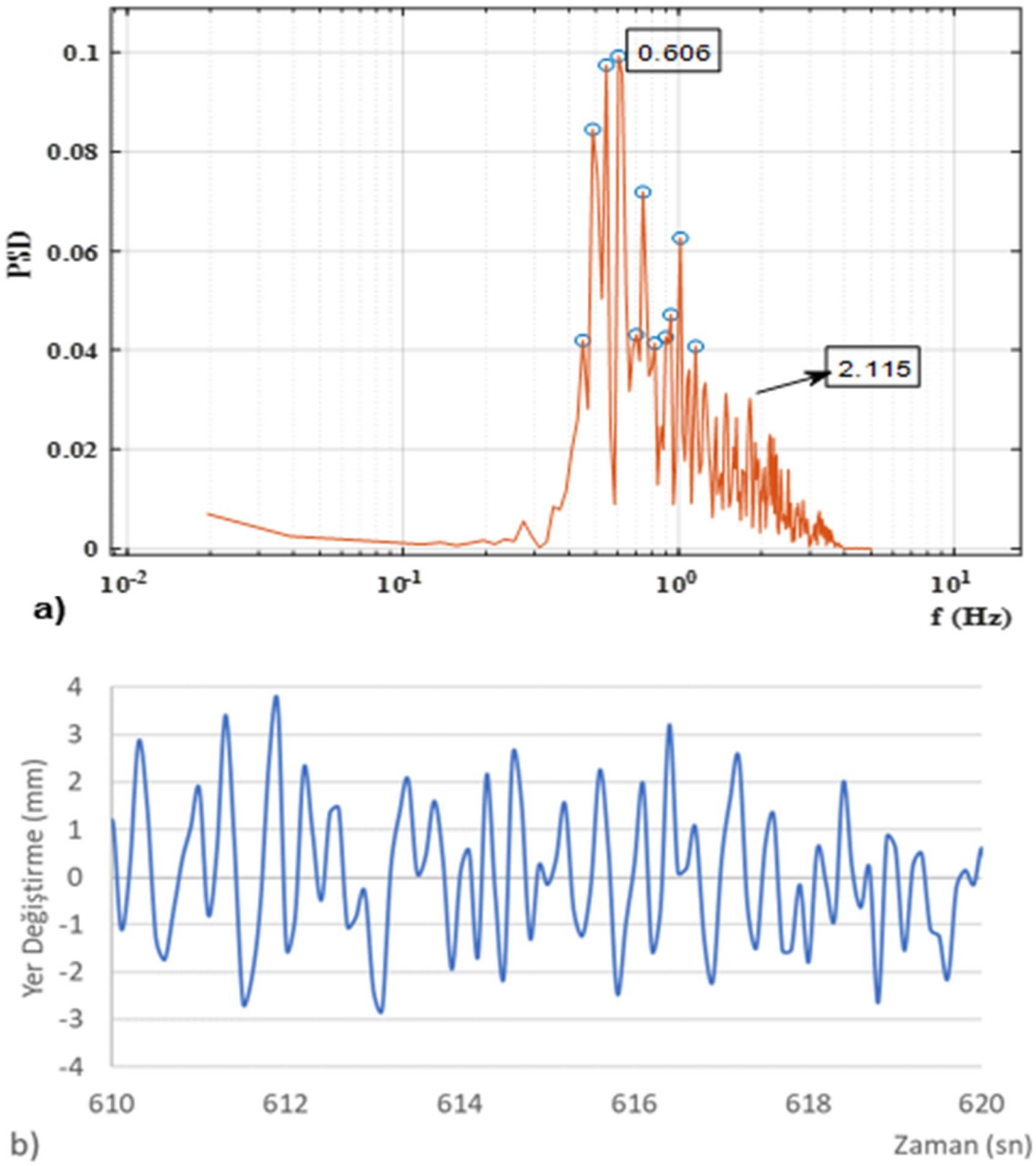
CORS tekniğine ait veri kaydındaki problemler nedeniyle çalışmalar statik ölçü moduna ait veriler üzerinde yoğunlaştırılmıştır. Statik ölçü modundan elde edilen yer değiştirme verileri yardımı ile düşey deplasman/deformasyon verileri arasındaki uyuşum araştırıldığında, sinüs dalgasına ait genlik değeri büyüklüğünün dalga yapısı ve baskın frekansın belirlenmesi üzerinde durulmuştur.

Statik ölçme yönteminden elde edilen veri üzerinden alınan ve genlik değerinin 10 mm veya daha büyük olduğu bölgelerde (235. sn ve 239. sn arasında) hem sinüs formunun düzgün geometriye sahip olduğu hem de FFT analizinden elde edilen frekans değerinin oldukça baskın olarak kendisini gösterdiği gözlemlenmiştir (Şekil 3.24).



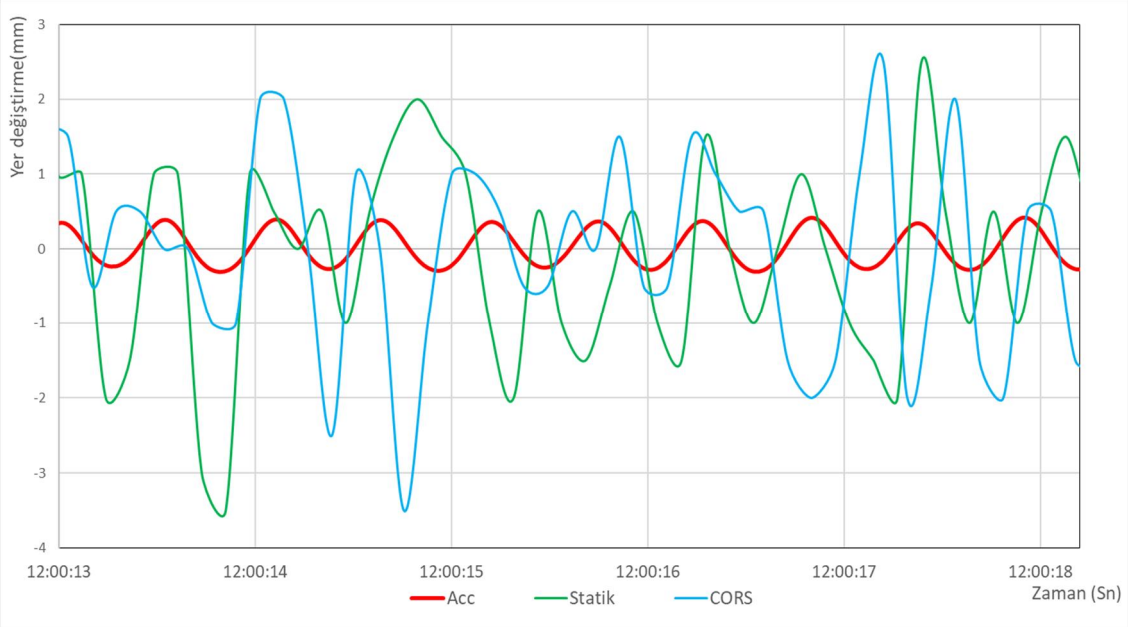
Şekil 3.24 Statik ölçme yönteminde genlik değeri 10 mm'den büyük olan bölgeye ait FFT analiz sonucu (a) ve dalga formu (b).

Diğer taraftan genlik değeri 10 mm'den küçük olması durumunda (FFT analiz parametreleri 10 mm'den büyük olan bölgedeki ile aynı olacak şekilde ayarlanmıştır.) FFT analizi yapıldığında Eigen (Doğal) frekans değerinin grafikte belirlenebilmesine rağmen hem baskın frekans olarak görülmediği hem de sinüs dalga formunda bozulmalar olduğu görülmüştür (Şekil 3.25). Dalga formuna ait bu bozulma ve frekansı belirlemedeki güçlüklerin nedeni GNSS ölçü hatalarından kaynaklı anlamsız hareketin bir sonucu olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 3.25 Statik ölçme yönteminde genlik değeri 10 mm'den küçük olan bölgeye ait FFT analiz sonucu (a) ve dalga formu (b).

Deplasman/deformasyonun genlik değeri incelendiğinde, serideki en küçük değere sahip olduğu zaman diliminin saat 12.00 civarında olduğu belirlenmiştir. Bu zamana ait 5 saniyelik veri incelendiğinde referans veri olan ivme ölçer verileri 0.3 mm genliğe sahip olmasına rağmen sinüs formunda herhangi bir bozulma olmadığı yani en az 0.3 mm'lik deplasman değerlerini belirleyebildiğini ortaya koymaktadır (Şekil 3.26). Aynı grafikte CORS ve kinematik PPP yöntemiyle elde edilen deplasman değerlerinin 3-5 mm civarında görünmesine rağmen sinüs formu bozuk ve frekans değerleri hatalı olarak hesaplanmaktadır. Bu çalışma kapsamında GNSS ile elde edilen deplasmanın genlik büyüklükleri 10 mm'den küçük olması durumunda alıcının belirlediği ve gerçek değerden oldukça büyük ve rastgele hesaplanmış bir değer olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 3.26 Minimum genlikli deplasman değerine ait dalga formu.

Ayrıca çelik kiriş düzeneği testinde, GNNS ölçümlerinde 2 farklı ölçüm tekniği (CORS ve Statik) ile veri toplanmıştır. Elde edilen statik veri kinematik yöntem ile değerlendirilmiş, CORS'tan elde edilen yükseklik verileri ile uyumlulukları araştırılmıştır. Grafik incelendiğinde statik mod ölçüm verilerinin referans veriyle olan uyumu CORS verisine göre daha yüksek olarak gerçekleşmiştir.

GNSS alıcısından kaynaklı veri kalitesinin test edilmesi amacıyla çelik kiriş düzeneği üzerinde 01.06.2022 tarihinde ikinci bir ölçüm yapılmıştır. Bu ölçme işlemi de Şekil 3.27'de görülen İnşaat Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait Yapı

Laboratuvarının yanında gerçekleştirilmiştir. İlk ölçüm işleminden farklı olarak ölçü duyarlılığı ve ölçme işleminde kullanılan uydu sistemi farklı olan ve her iki GNSS alıcısının aynı yöntem ile topladığı statik ölçümlerin performansı test edilmiştir. Farklı uydu sistemindeki sözü ile anlatılmak istenen şey, alıcılardan bir tanesi Topcon Hiper SR GPS+GLONASS uydu sistemlerini diğeri ise Topcon Hiper VR GPS+GLONAS+BEIDOU+GALLILEO uydularını kullanıyor olmasıdır.



Şekil 3.27 GNSS duyarlılığını araştırmak amacıyla gerçekleştirilen ölçüme ilişkin çelik kiriş düzeneği ölçüm sahasına ait görüntü.

Bu amaçla çelik kiriş düzeneği üzerine Tablo 3.3'te özellikleri verilen biri Topcon Hiper SR diğeri Topcon Hiper VR olmak üzere iki farklı GNSS alıcısı ve bu iki alıcının tam ortasına ivmeölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.28). Bir önceki ölçümden farklı olarak her iki alıcı statik ve kinematik modda ölçüm yapmışlardır.

Tablo 3.3 Test işleminde kullanılan sistemlerin özellikleri.

Ölçme Cihazı	Ölçüm duyarlılığı
Topcon Hiper SR	H.:3 mm+1.0 ppm V.:5 mm+1.0 ppm
Topcon Hiper VR	H.:3 mm+0.1 ppm V.:3.5 mm+0.4 ppm



Şekil 3.28 GNSS duyarlılığını araştırmak amacıyla gerçekleştirilen ölçüme ait çelik kiriş düzeneği görüntüsü.

Daha önce yapılan ölçümlerde her iki ölçüm cihazı Hiper SR GNSS ve alıcılar GPS+GLONASS uydu sistemlerini kullanılmaktaydı. Bu ölçümlerde ise alıcılardan bir

tanesi GPS+GLONASS+GALILEO ve BEIDOU uydularını kullanan Hiper VR diğer alıcısı ise yalnızca GPS+GLONASS uydu sistemini kullanan Hiper SR ile gerçekleşmiştir. Birinci ölçümde kullanılan stratejiye uygun olarak kiriş düzeneğinin hemen yakınında sabit alıcı kurulmuştur. Hiper VR'nin hem daha çok uydu sistemini kullanması hem de alıcının daha hassas ölçüm yapmasından kaynaklı olarak daha iyi sonuçlar elde edilmesi öngörülmektedir. Farklı GNSS alıcılarının statik ölçüm yönteminden elde ettiği veriler Topcon Magnet Tools 7.2.0 yazılımında farklı değerlendirme stratejisi ile post-proses kinematik yöntem ile değerlendirilip yükseklik bilgileri elde edilmiştir. Bu strateji, her iki alıcının GPS+GLONASS uyduları kullanarak yapıldığında düşey deplasman belirleme sonuçları üzerinde kayda değer farklara neden olmadığı gözlemlenmiştir. Bu durum referans alıcıyla gezici alıcı arasındaki baz uzunluğunun kısa olması ile açıklanmıştır. Veriler, GPS+GLONASS+GALILEO ve BEIDOU ile uydu sistemleri ile değerlendirildiğinde sonuçlarda gözle görülür düzeyde iyileşmeler kendini göstermektedir.

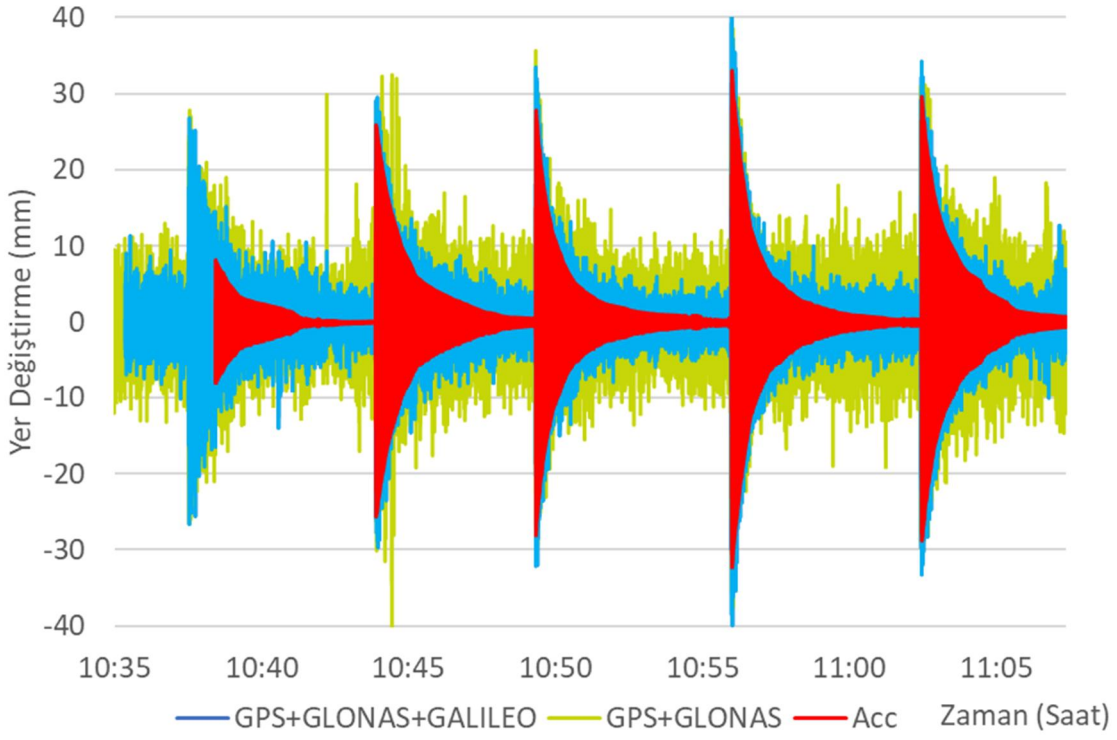
BWT901CL ivme ölçerden elde edilen veriler yine post-proses olarak MATLAB 2018b versiyonlu yazılımda değerlendirilmiş ve yer değiştirme verileri elde edilmiştir. İlk ölçümde olduğu gibi ivme ölçer ile elde edilen veriler referans veri olarak ele alınmıştır. Her üç yöntemle elde edilen deplasman verilerinin MATLAB 2018b yazılımında FFT analizi yapılmıştır. FFT analizinden elde edilen değerlerden her bir yönteme ait doğal frekans değerleri Tablo 3.4'teki gibi elde edilmiştir.

Tablo 3.4 FFT analizinden elde edilen frekans değerleri

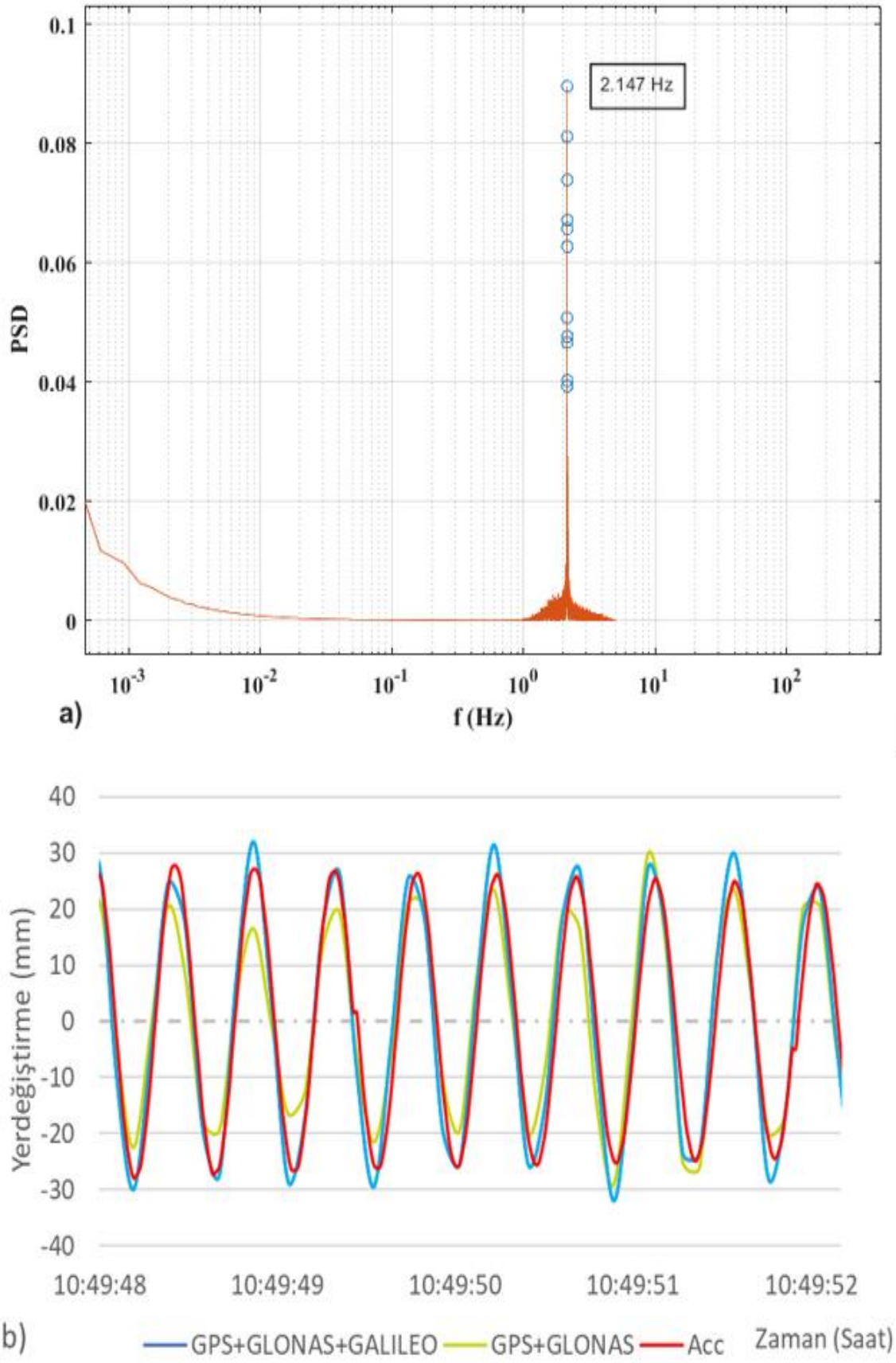
Veri toplama yöntemi	Frekans (Hz)
BWT901CL ivmeölçer	2,142
Topcon Hiper SR	2,147
Topcon Hiper VR	2,147

Her üç yöntemle elde edilen yer değiştirme değerleri zaman serisine dökülmüştür (Şekil 3.29). Zaman serisinde genlik değerinin 10 mm'den büyük olduğu zaman aralığı incelendiğinde; verilerin birbirleriyle uyumlu olduğu göze çarpmaktadır

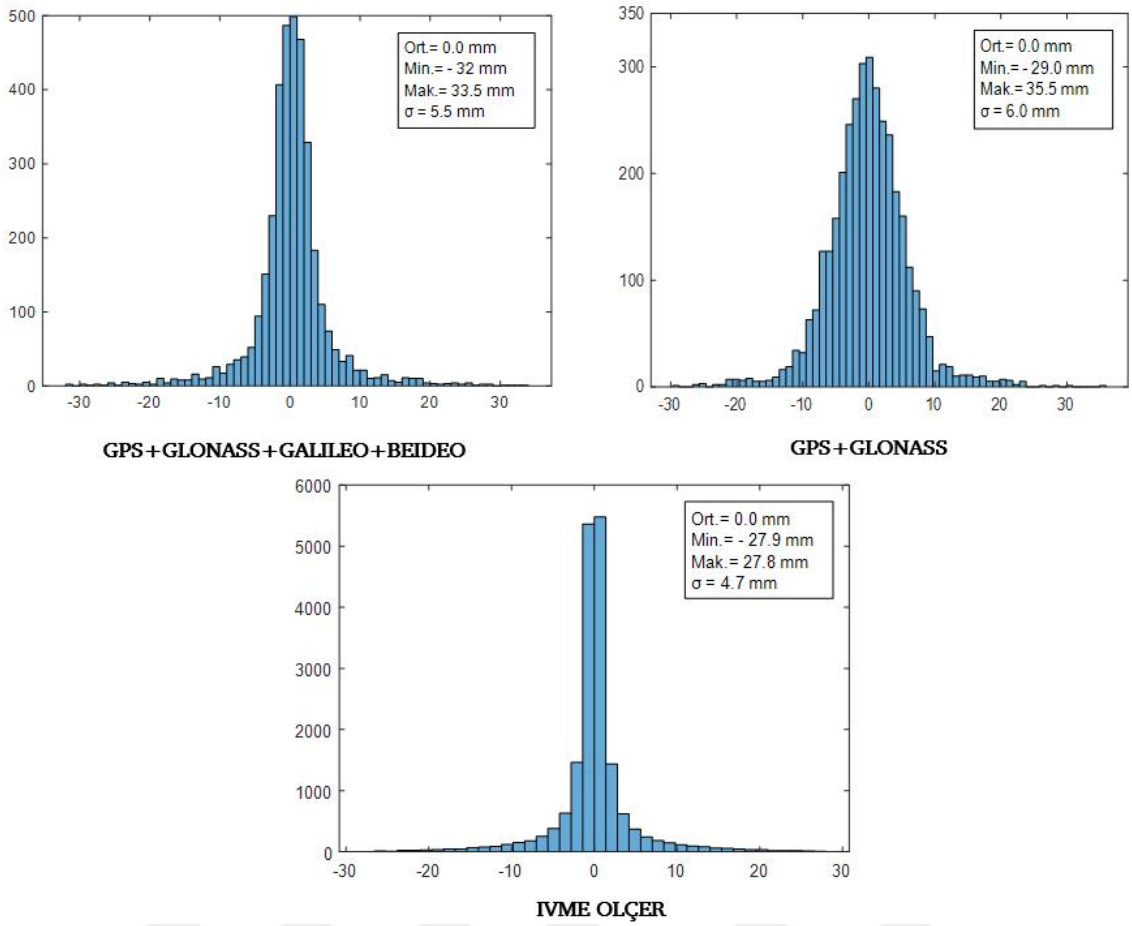
(Şekil 3.30). Frekans değerlerinin belirlenmesinde herhangi bir sıkıntı yaşanmamaktadır. Çelik kirişe dışarıdan verilen yaklaşık 20 mm genlikli hareket, saat 10:44:49'te başlamış 10:49:26'da hareket sönümlenmiştir. Bu süre içerisindeki harekete ait ölçüler için normal dağılım grafikleri ve istatistiksel büyüklükler hesaplanmıştır (Şekil 3.31). Topcon Hiper SR ile toplanan ve GPS+GLONASS uydularına ait verilerine ait standard sapma değerinin Topcon Hiper VR'nin GPS+GLONASS+GALILEO+BEIDEO uydu sistemlerinden elde edilen verilerine göre daha yüksek olarak gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu durum VR'nin SR'ye göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir.



Şekil 3.29 Üç yönteme ait deplasman-zaman grafiği

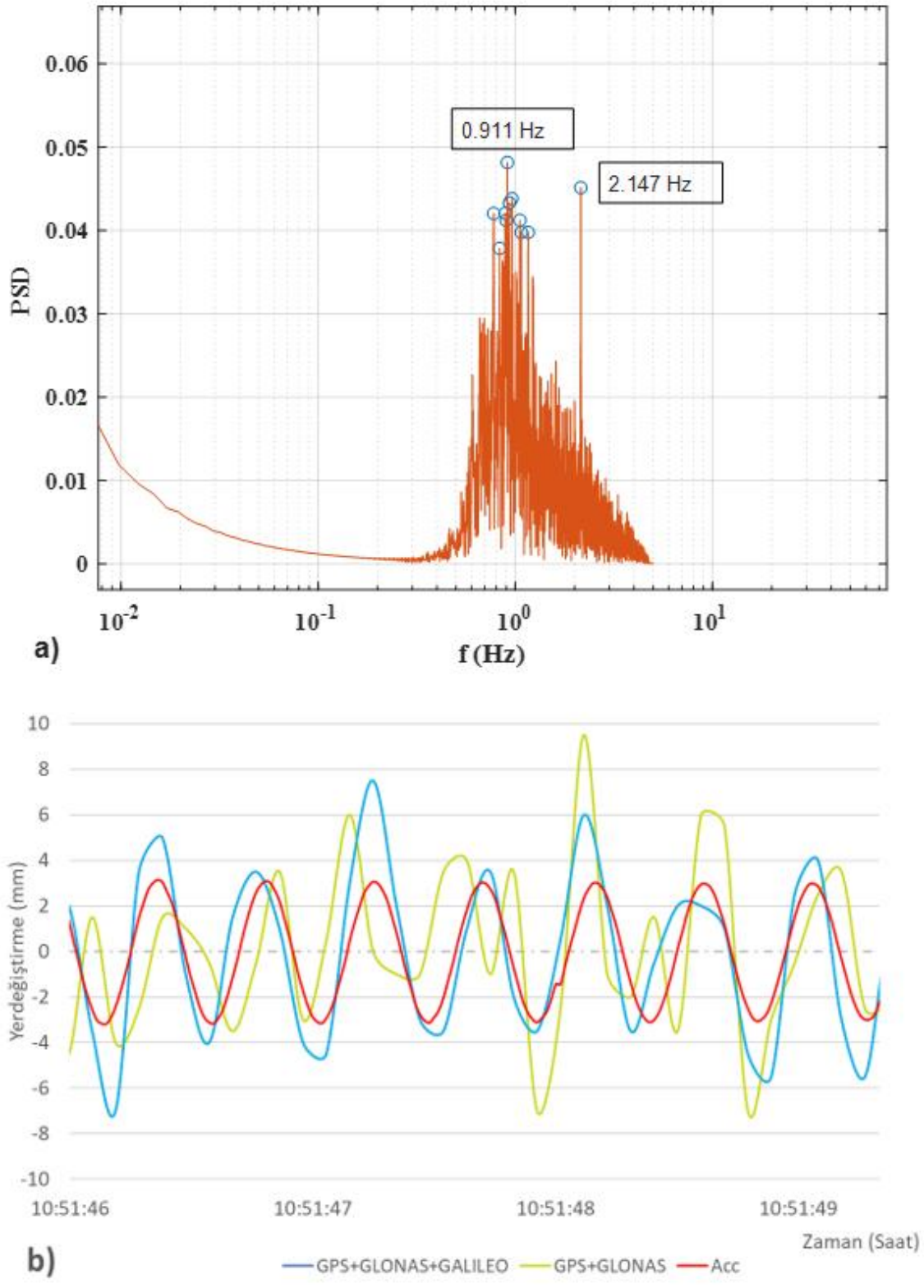


Şekil 3.30 Genlik değerinin 10 mm'den büyük olduğu bölgeye ait frekans (a) deplasman-zaman grafiği (b).



Şekil 3.31 Yöntemlere ait standard sapma değerleri

Zaman serisinde 10 mm'den daha küçük genlik değerine sahip hareketin olduğu bölgeye ait deplasman-zaman grafiği incelendiğinde Hiper SR'den elde edilen verilerde bozulmalar kendini gösterirken Hiper VR'nin GPS+GLONASS+GALILEO ve BEIDOU kullanılarak değerlendirme stratejisi ile 5 mm civarındaki genlik değerine sahip ölçümlerde bile düşey deplasman değeri ve frekansın bulunabildiğini ortaya koymuştur (Şekil 3.32). Ancak yapıya ait doğal frekans değerinin baskın olarak bulunabilmesi için FFT analizinde kullanılan parametrelerin uygun değerler olması konusunda hala oldukça dikkatli olunması gerekmektedir.



Şekil 3.32 Genlik değerinin 10 mm'den küçük olduğu bölgeye ait FFT analizi (a) ve deplasman-zaman grafiği (b)

3.3 Davutpaşa Metro Köprüsü Ölçümleri

Yıldız teknik üniversitesi Davutpaşa Kampüsü A kapısı girişinde bulunan ve metro çıkışına entegre çelik yaya köprüsünden alınan video kayıtları yardımı ile köprünün doğal frekans ve deplasman büyüklüklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır (Şekil 3.33) Ölçüm yapılan zamana ait atmosferik koşullar; kapalı bir hava, rüzgarsız, sıcaklık 10-12 derece arası ve UV indeksi 0 şeklindedir. Atmosferik koşullar, refraksiyon kaynaklı hataların oldukça az olduğu koşullarda yapılmıştır.

Köprü ayaklarının orta açıklığına gelecek şekilde köprü güvertesinin yan tarafına kırmızı ve sarı renkli yapay ölçü hedefleri yapıştırılmıştır. Farklı renkli yapay hedef kullanılması ile ortamdaki ışığının yetersiz olmasına bağlı olarak kontrast üzerinde olumsuz etkisinin kendisini göstermesi durumunda hangi renk daha uygun ise onun kullanılmasıdır (Şekil 3.34).

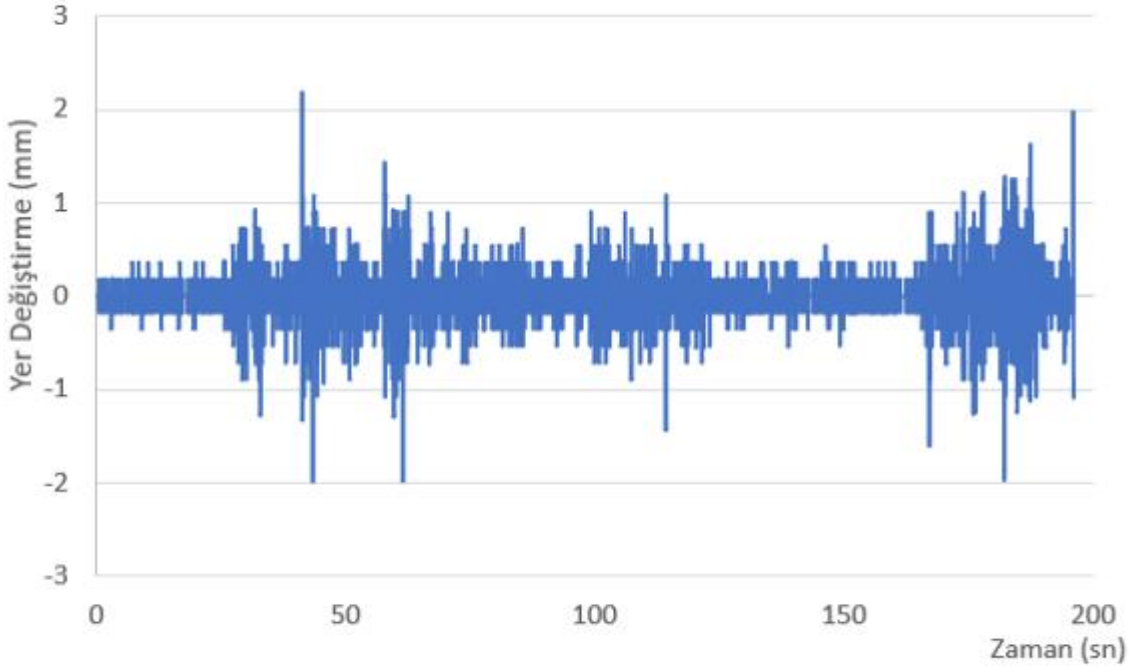


Şekil 3.33 YTÜ Kampüsü A Kapısı ile Davutpaşa Metrosu arasındaki çelik yaya köprüsü haritası

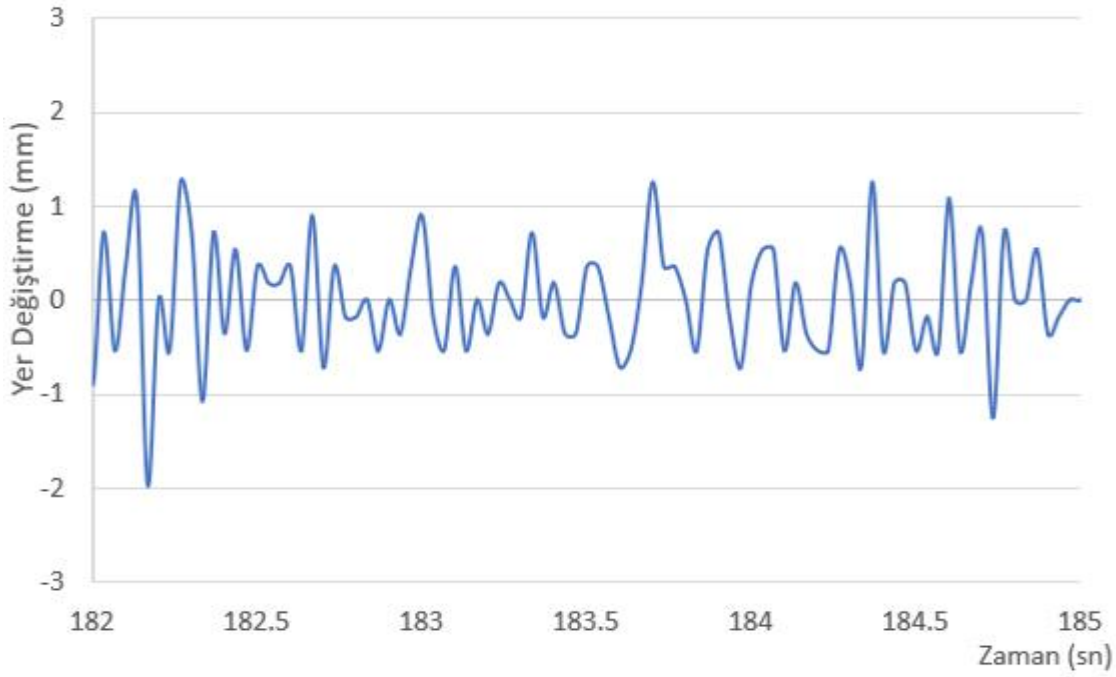


Şekil 3.34 Yıldız Teknik Üniversitesi A kapısı girişine entegre metro köprüsüne ait bir kesit

Yapay hedef ayarlandıktan sonra köprüden 40 m uzakta video kamera konumlandırılmıştır. Bu mesafeden alınan kayıtlardan hesaplanan piksel yoğunluğu yaklaşık 1.4 olarak hesaplanmıştır. Köprü üzerinde yayaların yürümesinden kaynaklı ve yapıda yer değiştirmeye neden olan hareketler video kamera ile kaydedilmiştir. Bu video kayıtlarının MATLAB yazılımında görüntü işleme yardımıyla değerlendirilmiş elde edilen yer değiştirme değerleri grafiğe dökülmüştür (Şekil 3.35). Grafik incelendiğinde yayaların geçiş zamanında köprüye ait maksimum genlik 2.2 mm değerinde gerçekleşmektedir. Yayaların yoğun olarak geçiş yaptığı zaman olan 182-185 saniyeler arası deplasman-zaman grafiğinde harekete ait sinüs dalga formunun grafiği görülmektedir (Şekil 3.36).



Şekil 3.35 Metro köprüsüne ait yer değiştirme-zaman grafiği

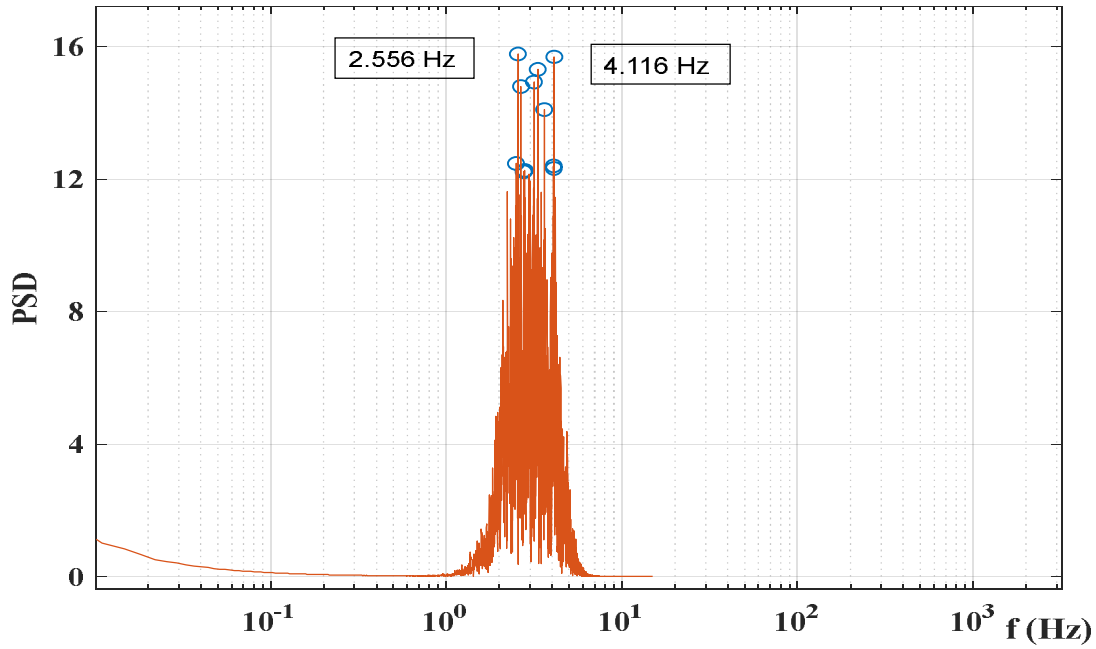


Şekil 3.361 köprüden yaya geçiş anına ait bölgenin yer değiştirme-zaman grafiği

Köprüde meydana gelen hareketin frekansı hesaplandığında frekans değerlerinin 2.556 Hz ve 4.116 Hz olduğu gözlemlenmektedir. Bu aralığa giren daha bir çok frekans olduğu görülmektedir (Şekil 3.37).

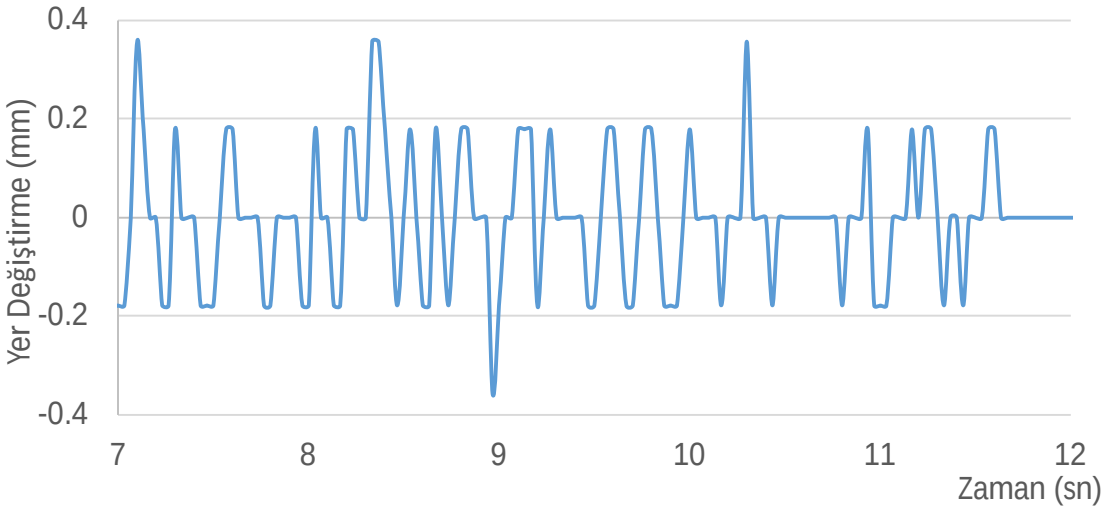
Frekans değerleri yapının türüne göre farklılık göstermektedir. Genellikle askı halatlı köprülerin frekans değerleri, 1 Hz dolaylarında hatta daha küüçük değerler

almaktadır.–Roberts vd. 2014, Humber Bridge köprüsünde düşey yöndeki hareketin frekansını 0.116 Hz bulmuştur [50]. Oysaki davutpaşa köprüsündeki frekans değerleri >2 Hz şeklinde hesaplanmıştır.



Şekil 3.37 Köprünün FFT analizi ile bulunan frekans değerleri

Minimum harekete sahip olan bölgede video kameranın belirleyebildiği hareketin genlik değerinin 0.2 mm'den daha küçük hareketi belirleye bildiği ancak bazı bölgelerde yatay bir çizgi şeklinde olduğu yani hareketin belirlenmesinde zorluklar yaşadığı görülmektedir (Şekil 3.38).



Şekil 3.38 Köprünün minimum genlikli bölgesinin sinüs dalga formu

4
SONUÇ VE ÖNERİLER

Çelik kiriş deney düzeneğinde yapılan ilk ölçümlerde, üç farklı ölçüm aleti ve dört farklı yöntemle toplanan eş zamanlı veriler değerlendirilmiş, elde edilen bu veriler yardımıyla düşey deformasyon/deplasman değerleri analiz edilmiştir.

GNSS ile yüksek frekanslı veri toplarken Statik (değerlendirme kinematik) yöntemden elde edilen veri sıklığı ile CORS yöntemden elde edilen veri sıklığı arasında farklar oluşmaktadır (Her iki yöntem için cihazların 10 Hz veri kayıt sıklığına ayarlanmasına rağmen). Bu farkın bir sonucu olarak frekans büyüklükleri üzerinde kendini göstermektedir. Bu farkın sebebi Fix ölçü modunda kayıt yapması, bluetooth ile veri aktarma veya verinin kaydedilmesi aşamasında veri kayıplarının olduğu değerlendirilmektedir. BWT901CL ivmeölçer, CORS, statik ve Video kamera verilerinden sırasıyla 2.112, 2.225, 2.115 ve 2.115 Hz'lik frekans hesaplanmıştır. Referans veri olan ivme ölçerin ferkans değeri ile belirlenen frekans değerleri kıyaslandığında Statik ölçü yönteminin CORS ölçü yöntemine göre daha uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.

Yapıya etki eden kuvvete tepki olarak meydana gelen titreşimlerin frekansında oluşacak değişim, yapıda oluşabilecek hasarın bir parametresidir. Dolayısıyla bu titreşimlerin belirlenmesi için CORS yöntemiyle veri elde edilirken frekans doğru olarak belirlenmeli veri toplama aşamasında oluşan bu veri kayıplarının dikkate alınması gerekmektedir. CORS'a ait verilerdeki kayıplardan yararlanarak hesaplanan 9.4428 Hz'lik veri kayıt sıklığı, FFT analizinde kullanılan ve teorik değeri 10 Hz ile değiştirildiğinde yeni hesaplanan değer 2.119 ile daha uyumlu hale gelmiştir.

Yapılan Çelik kiriş testinde GNSS verileri ile ivme ölçer verilerinden elde edilen genlikler arasında farklar oluşmaktadır. Hatta aynı uydu geometrisine sahip ve eş zamanlı gerçekleştirilen CORS ve statik veriler arasında bile bu farklar karşımıza çıkmaktadır. GNSS verileri ile deplasman belirlenirken, yapıda oluşan hareketin genliği 10 mm'nin altına düştüğünde -özellikle düşeyde- deplasman büyüklükleri ile ilgili doğru sonuçlar elde edilememekte, FFT ile grafiğe dökülen frekans değeri

baskın olarak görülmemektedir. Bu durum frekans tahmininde hatalara yol açabilmektedir.

Her üç yöntem için elde edilen deplasman verileri incelendiğinde; referans veri olan ivme ölçer ile 0.3 mm veya daha küçük genlik değerine sahip sinüs dalga formu bozulmadan izlenebilirken, GNSS ile elde edilen ve çok daha büyük genlik değerini göstermesine rağmen anlamlı olmayan hareket olarak karşımıza çıkmaktadır.

İkinci ölçüm işleminde üç farklı ölçüm aleti ve 2 farklı ölçü yöntemiyle toplanan eş zamanlı veriler değerlendirilmiş, toplanan bu veriler yardımıyla düşey deformasyon/deplasman değerleri analiz edilmiştir.

Yapıya dışarıdan uygulanan kuvvet sonucu oluşan harekete ait veriler analiz edilerek doğal frekans ve deplasman değerleri hesaplanmış ve BWT901CL ivme ölçer, Topcon Hiper SR ve Topcon Hiper için sırasıyla VR 2.142, 2.147 ve 2.147 Hz olarak gerçekleşmiştir. Değerlendirme sonucu elde edilen frekans değerleri son derece uyumlu olarak bulunmuş, deplasman değerleri sinüs dalga tepelerinde oluşan farklara rağmen uyumlu olarak gerçekleşmiştir.

Deneye ait bir diğer bulgu ise Topcon Hiper VR GNSS alıcısının ölçüm duyarlılığının yüksek olması verilerde bir miktar iyileştirme yapmakla birlikte istenen düzeyde gerçekleşmemiştir. Ölçüm cihazından elde edilen asıl iyileşme Hiper VR'nin GPS+GLONASS+GALILEO ve BEIDOU uydu sistemlerinden veri alabilmesi ile sonuçları iyileştirmektedir. Bu iyileşme, genliğin 10 mm'nin altına düştüğü bölgede bile kendini göstermektedir.

Diğer taraftan ilk ölçümde 65, 145 ve 200 m mesafeden toplanan görüntü tabanlı veri işlendiğinde elde edilen ver değiştirme verilerinin referans veriyle uyuşumu GNSS'e göre daha yüksek olarak gerçekleşmiştir. Ancak veri toplama aşamasında refraksiyondan kaynaklı ve mesafeye bağlı olarak birkaç mm'lik hataya neden olmaktadır. Gün doğuöundan hemen sonra yapılan ölçümler ile bu etkinin en az inecek ve ölçüm sonucunu iyileştirecektir. Bu ölçümlerin iyileştirilmesi hem ölçüm yapılan nokta hem de hedefin yerden olabildiğince yüksekte seçilmesiyle sağlanacaktır. Çünkü refraksiyonun en fazla olduğu alan havanın yerle temas ettiği noktadadır (yoğunluk değişiminin en fazla olduğu bölge olması nedeniyle).

Yıldız Teknik Üniversitesi Davutpaşa Kampüsü A kapısı girişi metro entegrasyonunu sağlaya çelik yaya köprüsündeki çalışmalarda yapılan ölçümler ile köprüdeki 0.2 mm genlikli hareketi yakalayabildiğinin ortaya koymuştur.

Görüntü tabanlı veriler yardımı ile yapı hareketlerinin belirlenmesi başka algılayıcı sistem desteği olmadan da gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum ölçülecek yapı elemanın bir kamera yardımı ile yapının frekans ve yer değiştirme değerlerini belirleyebildiği sonucunu doğurmaktadır. Ölçüm koşullarına bağlı olarak oldukça küçük hareketleri belirleyebildiği metro köprüsüne ait ölçümler ile bu hareketin boyutu 0.2 mm olarak gerçekleşmiştir.

Görüntü tabanlı sistemler yardımı ile deplasman belirlemede karşımıza çıkan zorluk ise ölçeğin tam olarak belirlenmesi ile ilgilidir. MATLAB ile veri işlemede 1 pikselin metrik değerinin iyi saptanması gerekmektedir. Bu problemin çözümü için kamera çerçevesine giren ve boyutu bilinen olabildiğince büyük bir nesne seçilmelidir. Böylece nesnenin piksel yoğunluğu daha hassas olarak belirlenecek ve ölçek daha duyarlı olarak kestirilebilecektir.

KAYNAKÇA

[1] J. M. W. Brownjohn, Y. Xu, and D. Hester, "Vision-based bridge deformation monitoring," *Front Built Environ*, vol. 3, 2017, doi: 10.3389/fbuil.2017.00023.

[2] M. Çelebi, "GPS in dynamic monitoring of long-period structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 20, no. 5–8, 2000, doi: 10.1016/S0267-7261(00)00094-4.

[3] J. H. G. Macdonald, E. L. Dagless, B. T. Thomas, and C. A. Taylor, "Dynamic measurements of the Second Severn Crossing," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Transport*, vol. 123, no. 4, 1997, doi: 10.1680/itran.1997.29978.

[4] C. Z. Dong and F. N. Catbas, "A review of computer vision–based structural health monitoring at local and global levels," *Structural Health Monitoring*, vol. 20, no. 2. 2021. doi: 10.1177/1475921720935585.

[5] C. D. Hill and K. D. Sippel, "Modern Deformation Monitoring : A Multi Sensor Approach," *FIG XXII International Congress*, 2002.

[6] R. C. dos Santos, A. P. C. Larocca, J. O. de Araújo Neto, A. C. B. Barbosa, and J. V. M. Oliveira, "Detection of a curved bridge deck vibration using robotic total stations for structural health monitoring," *J Civ Struct Health Monit*, vol. 9, no. 1, 2019, doi: 10.1007/s13349-019-00322-1.

[7] E. Cosser, G. W. Roberts, X. Meng, and A. H. Dodson, "Measuring the dynamic deformation of bridges using a total station," in *Proceedings of 11th FIG symposium on deformation monitoring*, 2003.

[8] J. Yu, P. Zhu, B. Xu, and X. Meng, "Experimental assessment of high sampling-rate robotic total station for monitoring bridge dynamic responses," *Measurement (Lond)*, vol. 104, 2017, doi: 10.1016/j.measurement.2017.03.014.

[9] F. Moschas and S. Stiros, “High accuracy measurement of deflections of an electricity transmission line tower,” *Eng Struct*, vol. 80, 2014, doi: 10.1016/j.engstruct.2014.09.007.

[10] M. Ehrhart and W. Lienhart, “Monitoring of Civil Engineering Structures using a State-of-the-art Image Assisted Total Station,” *Journal of Applied Geodesy*, vol. 9, no. 3, 2015, doi: 10.1515/jag-2015-0005.

[11] X. Meng, N. Gogoi, A. H. Dodson, G. W. Roberts, and C. J. Brown, “Using Multi-constellation GNSS and EGNOS for Bridge Deformation Monitoring,” *Proceedings of the joint international symposium on deformation monitoring*, 2011.

[12] J. W. Lovse, W. F. Teskey, G. Lachapelle, and M. E. Cannon, “Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology,” *Journal of Surveying Engineering*, vol. 121, no. 1, 1995, doi: 10.1061/(asce)0733-9453(1995)121:1(35).

[13] V. Ashkenazi and G. W. Roberts, “Experimental monitoring of the Humber bridge using GPS,” *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Civil Engineering*, vol. 120, no. 4, 1997, doi: 10.1680/icien.1997.29810.

[14] T. H. Yi, H. N. Li, and M. Gu, “Experimental assessment of high-rate GPS receivers for deformation monitoring of bridge,” *Measurement (Lond)*, vol. 46, no. 1, 2013, doi: 10.1016/j.measurement.2012.07.018.

[15] O. Ogundipe, G. W. Roberts, and C. J. Brown, “GPS monitoring of a steel box girder viaduct,” *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 10, no. 1, 2014, doi: 10.1080/15732479.2012.692387.

[16] G. Oku Topal and B. Akpinar, “High rate GNSS kinematic PPP method performance for monitoring the engineering structures: Shake table tests under different satellite configurations,” *Measurement (Lond)*, vol. 189, 2022, doi: 10.1016/j.measurement.2021.110451.

[17] A. Wieser and F. K. Brunner, “Analysis of Bridge Deformations using Continuous GPS Measurements,” *Conference of Engineering Surveying*, 2002.

[18] D. Beben, “Application of interferometry method for dynamic continuous testing of bridges,” *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 60, no. 3, 2016, doi: 10.3311/PPci.8679.

[19] M. Z. M. Yunus, N. Ibrahim, and F. S. Ahmad, “A review on bridge dynamic displacement monitoring using global positioning system and accelerometer,” in *AIP Conference Proceedings*, 2018, vol. 1930. doi: 10.1063/1.5022933.

[20] S. B. Im, S. Hurlebaus, and Y. J. Kang, “Summary Review of GPS Technology for Structural Health Monitoring,” *Journal of Structural Engineering*, vol. 139, no. 10, 2013, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0000475.

[21] J. Borenstein and L. Ojeda, “Heuristic drift elimination for personnel tracking systems,” *Journal of Navigation*, vol. 63, no. 4, 2010, doi: 10.1017/S0373463310000184.

[22] H. H. Handayani, Yuwono, and M. Taufik, “Preliminary Study of Bridge Deformation Monitoring Using GPS and CRP (Case Study: Suramadu Bridge),” *Procedia Environ Sci*, vol. 24, 2015, doi: 10.1016/j.proenv.2015.03.035.

[23] B. Pan, L. Tian, and X. Song, “Real-time, non-contact and targetless measurement of vertical deflection of bridges using off-axis digital image correlation,” *NDT and E International*, vol. 79, 2016, doi: 10.1016/j.ndteint.2015.12.006.

[24] G. A. Stephen, J. M. W. Brownjohn, and C. A. Taylor, “Measurements of static and dynamic displacement from visual monitoring of the Humber Bridge,” *Eng Struct*, vol. 15, no. 3, 1993, doi: 10.1016/0141-0296(93)90054-8.

[25] J. M. W. Brownjohn, M. Bocciolone, A. Curami, M. Falco, and A. Zasso, “Humber bridge full-scale measurement campaigns 1990-1991,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 52, no. C, 1994, doi: 10.1016/0167-6105(94)90047-7.

[26] J. J. Lee and M. Shinozuka, “Real-time displacement measurement of a flexible bridge using digital image processing techniques,” *Exp Mech*, vol. 46, no. 1, 2006, doi: 10.1007/s11340-006-6124-2.

[27] C. ozer Yigit, “Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring,” *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 7, no. 1, 2016, doi: 10.1080/19475705.2014.917724.

[28] C. O. Yigit and E. Gurlek, “Experimental testing of high-rate GNSS precise point positioning (PPP) method for detecting dynamic vertical displacement response of engineering structures,” *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, vol. 8, no. 2, 2017, doi: 10.1080/19475705.2017.1284160.

[29] N. Shen *et al.*, “A review of Global Navigation Satellite System (GNSS)-based dynamic monitoring technologies for structural health monitoring,” *Remote Sensing*, vol. 11, no. 9. 2019. doi: 10.3390/rs11091001.

[30] X. Wang, Q. Zhao, R. Xi, C. Li, G. Li, and L. Li, “Review of Bridge Structural Health Monitoring Based on GNSS: From Displacement Monitoring to Dynamic Characteristic Identification,” *IEEE Access*, vol. 9. 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083749.

[31] J. Yu, X. Meng, B. Yan, B. Xu, Q. Fan, and Y. Xie, “Global Navigation Satellite System-based positioning technology for structural health monitoring: a review,” *Structural Control and Health Monitoring*, vol. 27, no. 1. 2020. doi: 10.1002/stc.2467.

[32] H. Landau, U. Vollath, and X. Chen, “Virtual Reference Station Systems,” *Journal of Global Positioning Systems*, vol. 1, no. 2, 2002, doi: 10.5081/jgps.1.2.137.

[33] M. Pepe, “Cors architecture and evaluation of positioning by low-cost gnss receiver,” *Geodesy and Cartography*, vol. 44, no. 2, 2018, doi: 10.3846/gac.2018.1255.

[34] W. Stempfhuber, “3D-RTK CAPABILITY OF SINGLE GNSS RECEIVERS,” *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XL-1/W2, 2013, doi: 10.5194/isprsarchives-xl-1-w2-379-2013.

[35] H. Pehlivan, M. Bezcioğlu, and M. Yılmaz, “PERFORMANCE OF NETWORK RTK CORRECTION TECHNIQUES (FKP, MAC and VRS) UNDER LIMITED SKY VIEW

CONDITION," *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2019, doi: 10.26833/ijeg.492496.

[36] Pırtı A., "The seasonal effects of deciduous tree foliage in CORS-GNSS measurements (VRS/FKP)," *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, vol. 23, no. 3, 2016, doi: 10.17559/tv-20150301214046.

[37] B. Park and C. Kee, "The compact network RTK method: An effective solution to reduce GNSS temporal and spatial decorrelation error," *Journal of Navigation*, vol. 63, no. 2, 2010, doi: 10.1017/S0373463309990440.

[38] P. Xu *et al.*, "High-rate precise point positioning (PPP) to measure seismic wave motions: An experimental comparison of GPS PPP with inertial measurement units," *J Geod*, vol. 87, no. 4, 2013, doi: 10.1007/s00190-012-0606-z.

[39] S. Bisnath and Y. Gao, "Precise point positioning a powerful technique with a promising future," *GPS World*, vol. 20, no. 4, 2009.

[40] J. F. Zumberge, M. B. Heflin, 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," *J Geophys Res Solid Earth*, vol. 102, no. B3, 1997, doi: 10.1029/96jb03860.

[41] J. Kouba and P. Héroux, "Precise Point Positioning Using IGS Orbit and Clock Products," *GPS Solutions*, vol. 5, no. 2, 2001, doi: 10.1007/PL00012883.

[42] S. Soyoz and M. Q. Feng, "Long-term monitoring and identification of bridge structural parameters," *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, vol. 24, no. 2, 2009, doi: 10.1111/j.1467-8667.2008.00572.x.

[43] A. J. Cardini and J. T. DeWolf, "Long-term structural health monitoring of a multi-girder steel composite bridge using strain data," *Struct Health Monit*, vol. 8, no. 1, 2009, doi: 10.1177/1475921708094789.

[44] User Manual BWT901CL, https://fcc.report/FCC-ID/2AZAR-BWT901CL/5176673.pdf, 22.11.2022

[45] WitMotion Bluetooth 2.0 Mult-Connect BWT901CL 9 Axis IMU Sensor Angle Inclinometer + Acceleration + Gyro + Mag on PC/Android/MCU,

https://www.wit-motion.com/9-axis/witmotion-bluetooth-2-0-mult.html, 22.11.2022

[46] Elektromanyetik Spektrum, https://prosafety.com.tr/elektromanyetik-spektrum-radyoaktivite/, 22.11.2022

[47] D. Feng and M. Q. Feng, "Computer vision for SHM of civil infrastructure: From dynamic response measurement to damage detection – A review," *Engineering Structures*, vol. 156. 2018. doi: 10.1016/j.engstruct.2017.11.018.

[48] W. H. Lehn and S. der van Werf, "Atmospheric refraction: A history," in *Applied Optics*, 2005, vol. 44, no. 27. doi: 10.1364/AO.44.005624.

[49] https://en.wikipedia.org/wiki/Snell%27s_law.

[50] Roberts, G. W., Brown, C. J., Tang, X., Meng, X., & Ogundipe, O. (2014). A Tale of Five Bridges; the use of GNSS for Monitoring the Deflections of Bridges. Journal of Applied Geodesy, 8(4). doi:10.1515/jag-2014-0013

Konferans Bildirileri

1. Eren M. , Hoşbaş R. G., 2022. Yapı Dinamiklerinin; İvmeölçer ve GNSS Kullanılarak Belirlenmesi, International Ankara Congress on Scientific Research VI, Ankara, Türkiye, 01-03 Nisan 2022, ss.693-694

Makaleler

1. Eren M. , Hoşbaş R. G., 2023. Testing the Performance of the Video Camera to Monitor the Vertical Movements of the Structure via a Specially Designed Steel Beam Apparatus, This is to certificate for Reviewer's Acknowledge of your paper in the International journal: Measurement Science Review. Doi:10.2478/msr-2023-0004 in MSR Nol/2023