

Uzun Periyotlu bir Yapıda Çatı Yer Değiştirmelerinin GPS ile İzlenmesi

İrfan SAYIM*

Bülent AKBAŞ**

Bilge DORAN***

ÖZ

Rölatif yer değiştirmeler, göreceli kat ötelemelerinin değerlendirilmesinde ve yapılardaki hasar dağılımının belirlenebilmesinde oldukça önemli bir rol oynarlar. Uzun periyotlu yapılarda, yapısal izleme yardımıyla çatı yer değiştirmelerin statik ve dinamik olarak ölçülmesinde alternatif bir yöntem olarak GPS teknolojisi son 10 yılda oldukça önem kazanmaya başlamıştır. Bu çalışmada Maslak, İstanbul’da bulunan uzun periyotlu toplam 31 katlı bir yüksek binada gerçek zamanlı kinematik (RTK) diferansiyel GPS (DGPS) teknolojisi kullanılarak rüzgâr ve diğer binaya etkileyen yüklerden dolayı oluşan çatı yer değiştirmeleri izlenmiştir. DGPS sistemi, bir prototip üzerinde yeterliliği denendikten sonra binaya yerleştirilmiştir. Bina ayrıca yapısal olarak modellenmiş ve modal analiz sonucu hesaplanan periyot değerleri GPS ölçümleri ile elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: DGPS, yapısal izleme, rölatif yer değiştirme, yüksek binalar

ABSTRACT

Monitoring Roof Displacements with GPS in a Long Period Structure

Relative displacements play an important role in assessing drift and damage distribution in structures. GPS technology has gained great attention in the last decade for static and dynamic structural monitoring of displacements in long-period structures as an alternative. In this study, roof displacements of a long-period structure with a total of 31-story located at Maslak, Istanbul were monitored under deforming effects such as wind using real-time kinematic (RTK) differential GPS (DGPS) technology. The DGPS system was first tested on a prototype, and then assembled on the building. The structural model of the building was also constructed and periods were estimated and the compared with GPS related estimation results due to the modal analysis of building.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 08.03.2010 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2012 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Bölümü, Kocaeli - i.sayim@gyte.edu.tr

** Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Deprem ve Yapı Müh. Anabilim Dalı, Kocaeli - akbasb@gyte.edu.tr

*** Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - doran@yildiz.edu.tr

Keywords: DGPS, structural monitoring, relative displacements, roof displacement, high-rise buildings

1. GİRİŐ

Rölatif yer değiştirmeler, görelü kat ötelemelerinin değerlendirilmesinde ve yapılardaki hasar dağılımlarının belirlenebilmesinde oldukça önemli bir rol oynarlar. Bir bina için rölatif yer değiştirme, binanın en üst katının (çatı) yere göre olan yer değiştirmesi olarak tanımlanabilir. Amerika'da özellikle 17 Ocak 1994 Northridge depreminden sonra yapıların rölatif yer değiştirmesi ve uzun periyotlu yapılarda (yüksek katlı binalar, uzun açıklıklı köprüler, tüneller, nükleer güç santralleri, vb.) muhtemel hasar değerlendirme çalışmaları oldukça önem kazanmıştır. Bir yapının yük (rüzgar, deprem vs.) etkilerine karşı rölatif yer değiştirmesi, yapısal izleme yoluyla elde edilebilir. Yapısal izleme, ayrıca yapının dinamik özelliklerinin ve bunlardaki değişimlerle birlikte yapının uzun süreli performansının izlenerek servis dışı kalmasına yol açacak hasarın belirlenmesini de sağlar. Bu bilgiler yardımıyla binanın şiddetli depremler ve rüzgârlar karşısındaki performansları ve binanın güvenliği için eşik yer değiştirme veya görelü kat ötelmesi değerleri belirlenebilir. Ayrıca son yıllarda giderek artan bir hızla kullanılan performans dayalı tasarımda çatı yer değiştirmeleri, kapasite diyagramının çizilmesinde kullanılmaktadır. Bu nedenle, çatı yer değiştirmelerinin hafif, orta ve şiddetli rüzgâr ve deprem etkileri altında izlenebilmesi performans dayalı tasarım yöntemiyle ilgili de birçok veri elde edilmesini, yönetmeliklerin kontrolünü ve gözden geçirilmesiyle ilgili de birçok bilgiyi sağlayacaktır.

Geleneksel olarak ivmeölçerlerle elde edilen rölatif yer değiştirmelerin, gerek gerçek zamanlı gerekse verilerin sonradan işlenmesi yoluyla elde edilmesinde önemli zorluklar ve problemler mevcuttur. İvmeölçerlerden elde edilen değerlerin çift entegrasyonla yer değiştirmelere çevrilmesinde cm seviyesinde hassasiyete ulaşmak oldukça zordur. Bu entegrasyon sırasında filtrelerin seçilmesi, baz çizgisinin (baseline) uzunluğu ve kaydın düzgün olmaması direkt olarak bu entegrasyonun yapılmasını ve doğruluğunu engellemektedir. Uzun periyotlu yapılarda, yapısal izleme yardımıyla rölatif yer değiştirmelerin statik ve dinamik olarak ölçülmesinde alternatif bir yöntem olarak GPS teknolojisi son 10 yılda oldukça önem kazanmaya başlamıştır. İvmeölçer sadece dinamik performans için kullanılırken, GPS hem dinamik hem de statik yapı performansını aynı zamanda izleme için kullanılabilir. Son 10 seneden beri, yüksek kayıt frekans ve ~10 ms gecikme gibi hassasiyetle pozisyon üreten gerçek-zamanlı kinematik (real-time kinematic RTK) GPS işlemci algoritmaları geliştirilmiştir. GPS teknolojisi, günümüzde 20 Hz'e kadar (özel alıcılarda daha da yüksek) kayıt alabilmekte ve doğruluk yatayda 1 cm (CEP- Circular Error Probability – 1 Sigma) ve düşeyde 2 cm'ye kadar çıkabilmektedir. Bu ölçüm hassasiyetleri bu çalışmada kullanılan ekipman için de geçerli olan değerlerdirki binaya takılmadan önce ölçüm analizi (benchmark) yapılarak bu değerler doğrulanmıştır. Mevcut bu teknoloji özellikle uzun periyotlu yapıların izlenmesinde oldukça büyük avantaj sağlamaktadır. Gelişen GPS teknolojisi yardımıyla gelecekte gerçek zamanlı olarak daha da fazla veri elde etmek mümkün olabilecektir ve bu da kısa periyotlu yapıların izlenmesine imkân sağlayacaktır. GPS teknolojisiyle yapısal izleme, özellikle Çin, Singapur, Japonya, Amerika ve Avrupa'da çok yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Roberts vd. [1], İngiltere'de 1,410 m uzunluğundaki Humber köprüsü üzerinde geçici olarak yerleştirilen GPS sistemi yardımıyla rüzgâr etkisiyle oluşan yer değiştirmeleri ölçmüşlerdir. Toriumi vd.

[2], dünyanın en uzun asma köprüsü olan Akashi köprüsü üzerinde GPS teknolojisiyle birkaç m mertebelerindeki yer değiştirmeleri ölçmüşlerdir. Çelebi [3], Los Angeles'da 44 katlı bir bina üzerinde ivmeölçerler ve geçici olarak yerleştirilen bir GPS sistemi ile ambient titreşimleri (rüzgâr ve trafikten kaynaklanan) izleyerek karşılaştırmıştır. Çelebi [3] çalışmasında, GPS teknolojisindeki gelişmelerin uzun periyotlu yapıların gerçek zamanlı izlenmesine olanak sağladığını belirtmiş ve elde edilen rölatif yer değiştirmelerin, yapı dinamik özelliklerinin ve muhtemel hasarların geleneksel olarak kullanılan ivmeölçerlere göre avantajlı olduğunu belirtmiştir. Çelebi ayrıca, GPS teknolojisiyle yapılan yapısal izlemenin binanın dinamik özelliklerini belirleyebilecek kadar yeterli doğrulukta olduğunu göstermiştir. Wong ve Chan [4], Hong Kong'daki dünyanın en uzun açıklıklı asma köprüsü olan Tsing Ma köprüsü üzerinde GPS teknolojisiyle yapılacak olan bir gerçek zamanlı izleme sisteminin sahip olması gereken özellikleri ve böyle bir sistemin avantajlarını incelemişlerdir. Breuer vd. [5], 155 m yüksekliğindeki Stuttgart TV kulesi ve 250 m yüksekliğindeki bir endüstri bacası üzerinde ambient titreşim ölçümleri yapmışlardır ve GPS teknolojisi yardımıyla küçük yer değiştirmelerin de ölçülebilirliğini araştırmışlardır. Breuer vd. [5], bu çalışma sonucu GPS yardımıyla hafif rüzgâr etkisi sonucu yapıda oluşacak küçük yer değiştirmelerin de ölçülebileceğini göstermişlerdir. Çelebi ve Sanlı [6], San Francisco'da 34 katlı bir binada dünyada ilk olarak hem ivmeölçerler hem de GPS teknolojisiyle yüksek katlı bir binada gerçek zamanlı dinamik izleme yaparak rölatif yer değiştirmeleri izlemişlerdir. Çelebi ve Sanlı [6] bu çalışmalarında, rüzgârlı bir günde elde ettikleri kayıtlar yardımıyla binanın dinamik özelliklerini incelemişler ve binanın şiddetli rüzgâr veya deprem hareketine maruz kalması durumunda, bu tip ölçümlerin yapıdaki rölatif yer değiştirmeleri anında göstereceği ve binanın dinamik özelliklerindeki değişimin de belirlenebileceği sonucuna varmışlardır. Çelebi ve Şanlı [6] ayrıca, GPS teknolojisiyle yapılan ölçümlerin gerçek zamanlı olarak yeterli doğrulukta sonuç sağladığını da belirtmişlerdir. Kijewski ve Kareem [7], Chicago'da üç yüksek katlı bina üzerinde ivmeölçerler ve GPS sistemi yardımıyla ölçümler yapmışlardır. Çalışmalarında, yüksek katlı bir binada GPS sistemi yerleştirilmeden önce sistemin bir prototip üzerinde denemesi gerekliliğini belirtmişlerdir. Brownjohn [8], 280 m yüksekliğinde 66 katlı Republic Plaza'da (Singapur) GPS teknolojisiyle yanal yer değiştirmeleri izlemiştir.

Literatürde GPS teknolojisi yardımıyla yapısal izleme yapılan binalar genelde ülkemizdeki binalardan çok daha yüksek ve genelde çelik malzemeyle yapıldığından daha uzun periyoda sahiptirler. Ülkemizde de uzun periyotlu binalar özellikle büyük şehirlerde giderek artmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de ilk kez uzun periyotlu betonarme bir yüksek binada gerçek zamanlı kinematik (RTK) diferansiyel GPS (DGPS) teknolojisi kullanılarak rüzgâr etkilerinden dolayı çatıda oluşacak rölatif yer değiştirmeler izlenmiştir. Çalışmanın kapsamı aşağıda özetlenmiştir:

- Yeni bir prototip tasarımı ile GPS sisteminin yapısal izlemede kullanılabilirliğinin doğrulanması,
- Uzun periyotlu mevcut bir yapıda rölatif yer değiştirmelerinin gerçek zamanlı olarak DGPS teknolojisi yardımıyla izlenmesi,
- Yapısal modelde elde edilen periyot değerlerinin GPS verilerinden elde edilen periyot sonuçları ile karşılaştırılması ve uzun dönem değişiminin belirlenmesi,

Bu amaçla, İstanbul'da yüksek katlı binaların yoğunlukla bulunduğu Levent bölgesindeki bir banka genel müdürlük merkez yönetim binasında DGPS sistemi kurulmuştur. Rölatif yer değişikliklerinin ölçülmesinde kullanılan DGPS sistemi iki adet hareketli ve bir adet sabit olmak üzere 3 adet 24 kanallı ve çift frekanslı GPS alıcısı ve anteninden oluşmuştur. Hareketli olarak kurulan iki adet GPS alıcısı ve anteni (Reference Receiver1-RR1 ve Reference Receiver2-RR2), binanın çatısında uygun yerlere monte edilmiştir. Sabit olarak kullanılan GPS alıcısı (BASE) ise binanın bahçesine monte edilmiştir. DGPS sisteminin teknik olarak çalışırlığını test etmek için ilk olarak bir prototip deney düzeni kurulmuştur.

2. YAPISAL İZLEMENİN GERÇEKLEŞTİRİLDİĞİ BİNAYA AİT ÖZELLİKLER

Projenin hayata geçirildiği bina özel bir şirkete ait Genel Müdürlük binası olarak hizmet vermekte olan, 1994 yılında projelendirilmiş, 7 bodrum kat + 1 zemin kat + 23 normal kat olmak üzere toplam 31 katlı betonarme bir yapıdır ve Maslak, İstanbul'da bulunmaktadır (Şekil 1).



Şekil 1. Yapısal İzleme Yapılan Bina

Yapının taşıyıcı sistemi perde-çerçeve sistem, döşeme sistemi 1.bodrum katın bir bölümü kaset döşeme olup, diğer katlar plak döşeme ve temel sistemi kademeli radye temeldir.

Binanın modal analizi sonucu elde edilen değerler aşağıda özetlenmiştir. Çizelge 1’de Probina-Orion [9] yapısal analiz programı yardımıyla yapılan bu modal analiz sonuçlarından elde edilen binanın ilk 3 Mod’una ait periyot değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 1. Modal Periyotlar

| Mod | 1 | 2 | 3 |
|--------------|-------|-------|-------|
| Periyot (sn) | 2.066 | 1.630 | 1.349 |

Bilindiği üzere GPS, rölatif yer değiştirmelerde en iyi performansı uzun periyot veya düşük frekans ölçümlerinde sağlamaktadır. Bu çalışmada yapısal izleme süresince en uzun periyodu temsil eden 1. mod üzerinde durulmuştur.

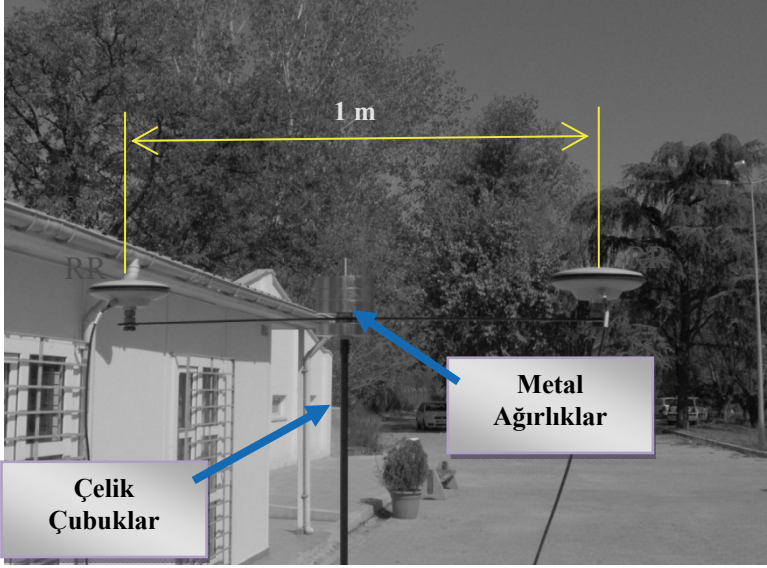
3. GPS İLE YAPISAL İZLEME TEKNİĞİ

3.1 Test Prototipinin Hazırlanması

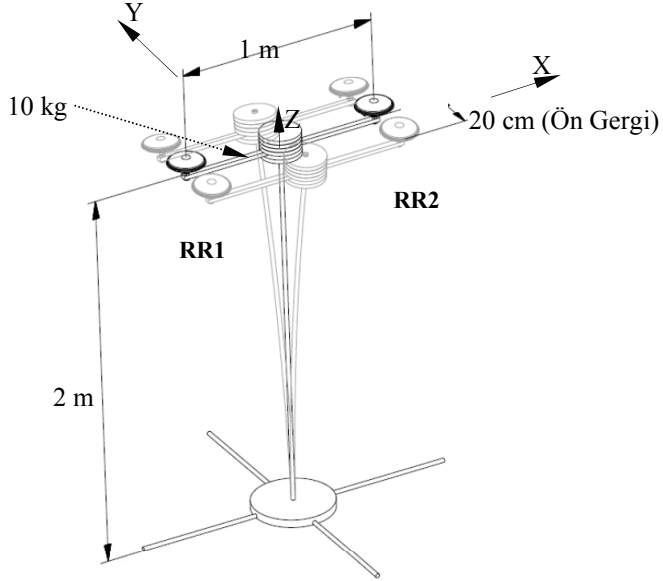
Binada kurulumu yapılacak DGPS sisteminin; 1) kendi ölçüm performans uygunluğu, 2) periyot ölçme yeterliliği, yapısal izleme için kritik öneme sahiptir. DGPS sistemi GPS sisteminin özel bir uygulamasıdır. Sabit (BASE) GPS alıcısının ölçümlerinin (düzeltici değer) kablosuz yayımla gezici GPS alıcılara (Referans Receiver 1-RR1 ve Referans Receiver 2-RR2) ulaştırılarak bu alıcıların kendi hatalarını azaltmaları ve performanslarını artırma yöntemidir. Sistemin yapıda kullanılabilmesi için gerekli performans ve yeterliliği belirlemek için ilk önce DGPS sisteminin deneneceği bir prototip tasarlanmıştır (Şekil 2 ve 3). Prototip, tek serbestlik dereceli modüler bir sistem olarak düzenlenmiştir. Bu sistemde çubuk boyu (binayı temsilen) ve üzerindeki kütle (bina yükünü temsilen) değiştirilebilmektedir. Ön gergi ile kütle/çubuğa başlangıç yer değiştirmesi verilen sisteme, daha sonra ani olarak kaldırılan gergi ile serbest hareket verilmiştir (Şekil 3). Antenler arası mesafe 1 m özel olarak seçilmiştir (Şekil 2 ve 3). Literatürde yapılan benzer çalışmalardan farklı olarak, prototip üzerinde yapılan ölçümlerde üçlü DGPS seti kullanılmıştır (Şekil 3). İki adet hareketli GPS anteni, (RR1 ve RR2), deney düzeneği üzerindeki kütlelerin yatay seviyesine yerleştirilmiştir. Bu tasarım ile DGPS sisteminin binaya takılmadan önce gerçek bina modeline yakın olarak denenmesi amaçlanmıştır.

İlk olarak, ölçüm performansı için RR1 ve RR2 arasında statik ve dinamik durumdaki pozisyon verileri incelenmiştir. Bunun amaçla ilk önce, hassas olarak aralarındaki mesafe tam 1 m olan hareketli GPS antenlerinden testler boyunca elde edilen veriden iki anten arasındaki 1 m’lik mesafenin hem statik hem de dinamik durumda korunup gerekli GPS ölçüm performansının elde edilip edilemeyeceği araştırılmıştır. Bu ölçümün sonucu sistem performansı için bir referans olarak kabul edilmiştir. İkinci olarak, DGPS sisteminin deneneceği deney düzeneğinin periyodu yaklaşık 1.35 s’den büyük sistemleri (modal analiz sonucu elde edilen binanın ilk üç modal periyodunu ölçebilecek yeterlilikte, Çizelge 1) ölçüm yeteneğine sahip olup olmadığı araştırılmıştır. Prototip üzerinde kütle ve çubuk

boyu değiştirilerek birçok test yapılmış olup bunlardan bir tanesine ait analizler ilerleyen paragraflarda özetlenmiştir.



Şekil 2. Test prototipi ve hareketli GPS alıcıları (Yer: Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü)



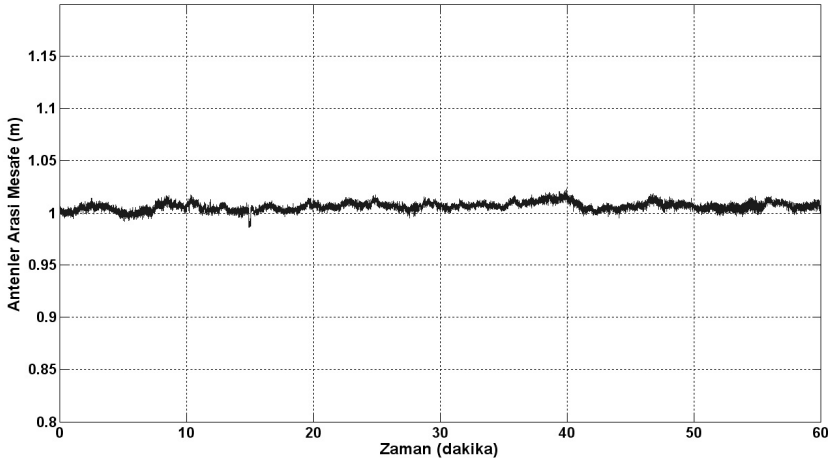
Şekil 3. Test prototipinin şematik görünüşü (Not: sabit GPS alıcısı şekilde gösterilmemiştir)

3.2 Ölçüm Performansı

Prototip üzerinde yapılan testte GPS antenin yerden yüksekliği (çubuk boyu) 2 m ve ağırlık 2 kg olarak seçilmiştir. Şekil 4'te RR1 ve RR2 arasındaki mesafe ölçüm kayıtları verilmiştir. Daha sonra, prototipe başlangıç yer değiştirmesi 20 cm verilerek (ip gerdirilerek ve sabitlenerek) test yapılmaya başlanmıştır. Yaklaşık 28 dakika sonra ip kesilerek sistem serbest titreşim durumunda bırakılmıştır. Serbest titreşimin sonunda sistemin dengeye gelmesi beklenmiş ve yaklaşık 30 dakika daha kayıt alınmaya devam edilmiştir. Şekil 5'te sistemin serbest titreşim yaptığı süreye ait yer değiştirmeleri görülmektedir.

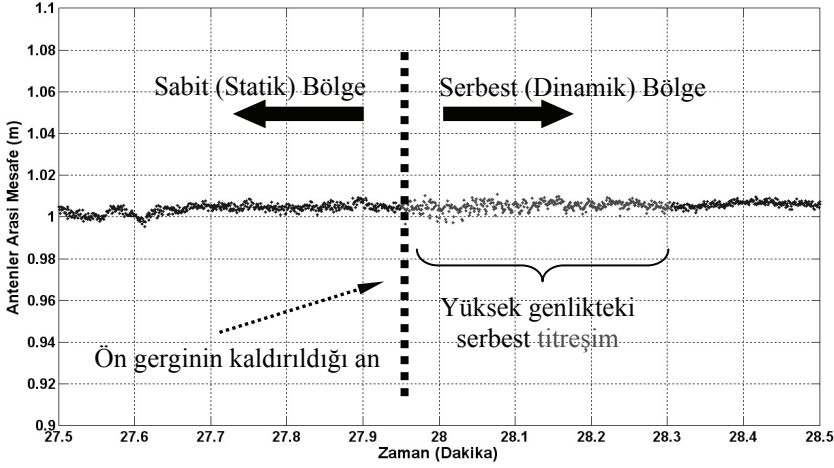
Prototipte, aralarındaki mesafe hassas olarak 1 m olan çelik çubuğun uçlarına monte edilen hareketli GPS antenlerinden (RR1 ve RR2) elde edilen pozisyon bilgileri (lokal koordinat olarak: East-North-Down grafiklerde X-North, Y-East ve Z-Down olarak gösterilmiştir) test süresince kayıt edilmiştir. İki anten faz merkezleri arasındaki mesafe, bu eksenler arasındaki fark alınarak (2-Norm) hesaplanmıştır. Test sonuçları Şekil 4'de gösterilmiştir. Bu ölçüme ait standart sapma 0.455 cm olarak ölçülmüştür. Bu hatanın iki adet aynı özellikte alıcıdan/antenden elde edildiği ve yaklaşık aynı oranda hata payına sahip olduğu varsayılırsa, her bir anten için standart sapma 0.321 cm seviyesinde olmaktadır. Bir saatlik testin sonucunda hem dinamik hem de statik haldeki hareketli GPS alıcıları arasındaki mesafenin çok iyi bir performans ile ölçülebildiği böylece kanıtlanmıştır.

Bu uygulama sonucunda, genel olarak GPS performansında statik ve dinamik durumda cm altı seviyesine ulaşıldığı görülmüştür. Şekil 4'te de görüleceği üzere yaklaşık bir saat boyunca alınan ve 3'lü GPS setinin iki hareketli alıcısı (RR1 ve RR2) arasındaki 1 metrelik mesafe beklenen performansa uygun bir şekilde elde edilmiştir. Bu çalışma birçok defa test düzeneği üzerinde değişik kütleler ve anten yüksekliklerinde denenerek elde edilen benzer sonuçlarla GPS ölçüm performansı uygunluğu kanıtlanmıştır.



Şekil 4. GPS antenleri RR1 ve RR2 arasındaki mesafe ölçümü

Şekil 5’te sabit (statik) bölge ve ön gerginin kaldırılmasından sonraki serbest (dinamik) titreşim bölgesi ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Sistemin serbest titreşim yaptığı başlangıç süresinde yüksek olan titreşim genliğine rağmen RR1 ve RR2 arasındaki 1 metrelik mesafenin başarılı bir şekilde korunduğu görülmüştür. Bu durum sistemin dinamik performansına bir kanıttır.

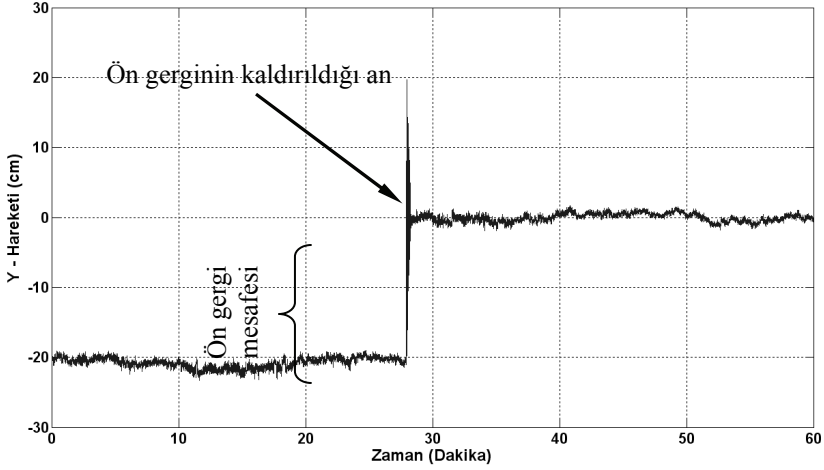


Şekil 5. GPS antenleri RR1 ve RR2 arasındaki mesafe ölçümü – serbest titreşim kısmı

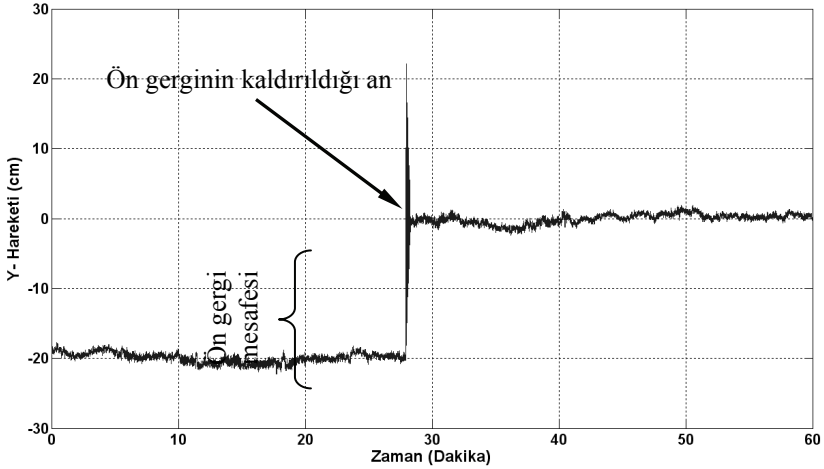
3.2 Periyot Ölçüm Yeterliliği

Prototip üzerinde elde edilen periyot ölçümlerinin binanın periyot ölçümünde yeterli olup olmadığı, bu bölümde değinilen testler ile incelenmiştir. Burada amaç, GPS sisteminin binaya takılmadan önce periyot ölçüm yeterliliğinin test edilmesidir. Yapılan testler ile gerçek zamanlı diferansiyel GPS (DGPS) verisinden elde edilen sonuçlar, uygulamanın yapılacağı binanın periyodunun (1.35 ~ 4.0 sn) yeterli hassasiyette ölçülebileceğini göstermiştir.

Şekil 6 ve 7’de serbest titreşim sırasında elde edilmiş iki hareketli GPS alıcısına ait (RR1 ve RR2) ölçüm sonuçları ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekil 8’de her iki alıcının (RR1 ve RR2) serbest titreşim sırasında E- yönündeki hareketi birlikte verilmiştir. Görüleceği üzere her iki alıcı birlikte ve eşzamanlı olarak hareket etmiş bulunmaktadır (Şekil 8). Titreşim sırasında oluşan dalğanın genlikleri de aynı performansı göstermektedir. Test düzeneğinde değişik senaryolar altında (yukarıdaki örnekte de verildiği gibi) yapılan deneysel çalışmalarda (yükseklik ve kütleli değiştirerek düzeneğin periyodu 1.25–5.0 s aralığında olacak şekilde ayarlanarak) sonuçların test edilmesi sağlanmıştır. Bu bölümde sadece bir teste ait sonuçlar yer almaktadır.

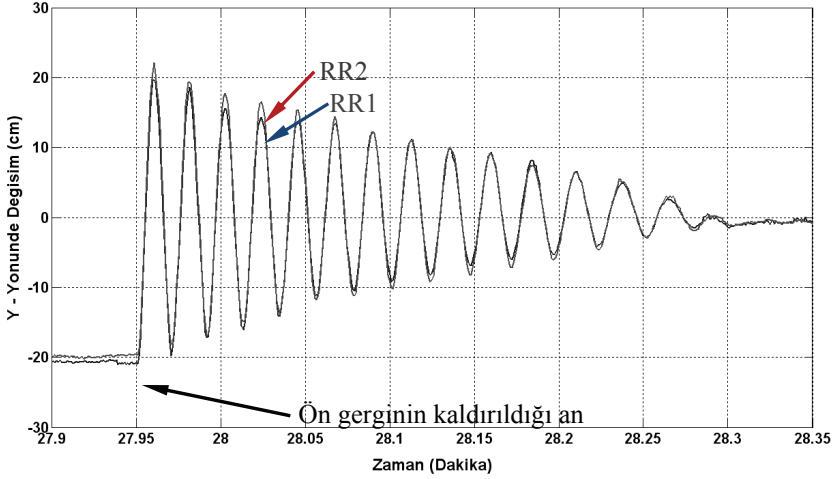


Şekil 6. RR1'nin Y - doğrultusundaki hareketi

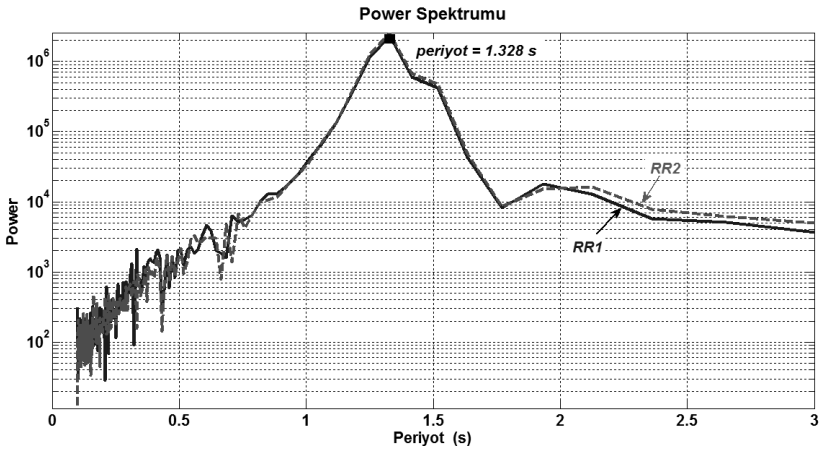


Şekil 7. RR2'nin Y - doğrultusundaki hareketi

Şekil 9'da RR1 ve RR2'nin Y- yönündeki pozisyon verisinden elde edilen periyot bilgileri görülmektedir. Grafikler, anlaşılabilir olması açısından yatay eksenlerde frekans yerine periyot dönüşümü yapılarak çizilmiştir. Her iki alıcının da aynı sonucu verdiği söylenebilir. Hesaplanan periyot 1.328 s'dir. Elde edilen bu sonuçlardan görülebileceği üzere binaya kurulması planlanan DGPS sistemi 1.328 saniyeden daha uzun periyotları rahatça ölçebilecek yetenektir ve bu durum uygulamanın hedeflendiği yüksek binada gerçek zamanlı DGPS ile dinamik davranışların izlenmesinin güvenilir bir şekilde yapılabileceğini göstermektedir.



Şekil 8. RR1 ve RR2'nin Y - yönünde serbest titreşimi



Şekil 9. RR1 ve RR2'nin Y - yönünde elde edilen periyodu

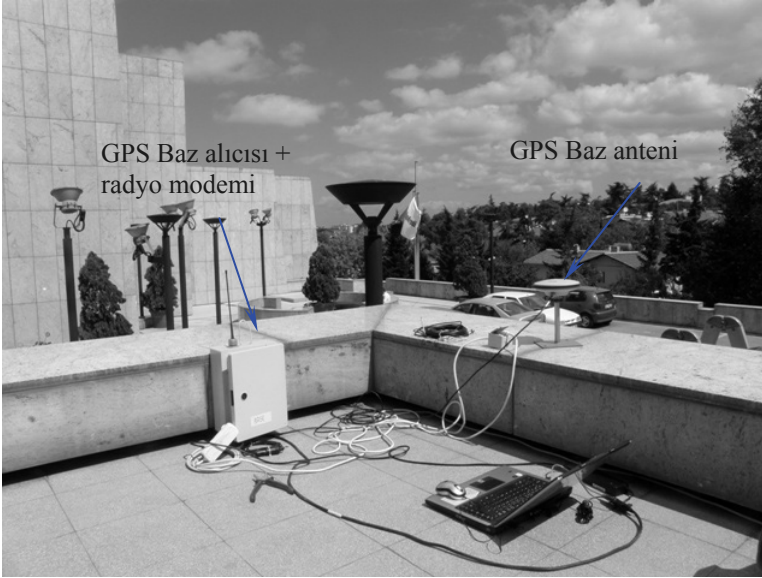
4. YAPISAL İZLEME

4.1 DGPS Sisteminin Binaya Yerleştirilmesi

Prototip üzerinde performans yeterliliği test edilen gerçek zamanlı DGPS sistemi binaya yerleştirilmiştir. Yerleştirme işlemleri; bina üzerinde yapılan yer tespitleri, alıcılar için kesintisiz güç kaynağından sağlanması işlemi, GPS antenleri bağlama braketlerinin yapılması, bilgisayar ünitesi, GPS Alıcı ve kablosu ve bunların korumaları gibi fiziksel şartların sağlanması ve örnek ölçüm alınması gibi çalışmaları içermektedir.

GPS Sabit (BASE) İstasyonu. DGPS'in sabit istasyonu, binanın yanında bulunan ve binadan bağımsız tek katlı bir küçük yapı üzerine kurulmuştur. Bu yerin seçiminde řu

kriterler göz önüne alınmıştır: a) sistemin en fazla uydu görmesine (gökyüzünü görme) uygun bir yerde kurulması, b) ana yapıdan bağımsız bir konumda olması, c) sistem uzun süre dışarıda kalacağından dolayı güvenli konumda olması, d) sürekli enerji sağlamaya (kesintisiz güç kaynağından beslenme gibi) elverişli bir konumda olması. Bu kriterler göz önüne alınarak yerleştirilen GPS baz istasyonuna ait GPS anteni ve alıcı donanımı (Radyo modem + GPS alıcısı) ile birlikte Şekil 10'de gösterilmiştir. Bu resim, GPS sistemine bağlı dizüstü bilgisayar ile baz istasyonunun yeni konumuna göre yapılan yapılandırma işlemleri sırasında elde edilmiştir.



Şekil 10. GPS Baz istasyonu ve kurulum/yapılandırma işlemleri

İki adet hareketli GPS anteni (RR1 ve RR2) bina çatısının en üst seviyesinde gökyüzünü tamamen görebilecek konumlarda ve birbirinden mümkün olduğunca en uzak mesafedeki uygun yerlere yerleştirilmiştir. Bu yerleştirme işleminde göz önüne alınan kriterler şunlardır: a) Multipath etkisinden en az etkilenmesi için çatının en üst kısmına konulması, b) binanın üst görünüşüne göre simetrik olması, c) mümkün olan (GPS anten kablolarının izin verdiği ölçüde) antenler arası en uzak mesafelere yerleştirilmesi, d) GPS antenlerinin dışarıda bilgisayar ile beraber sürekli çalışmasına en uygun çatı konumuna yerleştirilmesi, e) bilgisayar, GPS alıcısı ve radyo modemlerin olduğu kutuların hava şartlarından etkilenmemesi için izolasyonunun yapılması.

Şekil 11 ve 12'te sırası ile RR1 ve RR2 hareketli GPS antenlerinin çatıdaki konumları, alıcıları, radyo modemlerin ve bilgisayar arasındaki bağlantıları görülmektedir. Şekil 13'de korumalı bilgisayar ünitesi ve alıcıların yerleştirildiği izolasyonlu kutular birlikte gösterilmiştir.

Uzun Periyotlu bir Yapıda Çatı Yer Değişikliklerinin GPS ile İzlenmesi

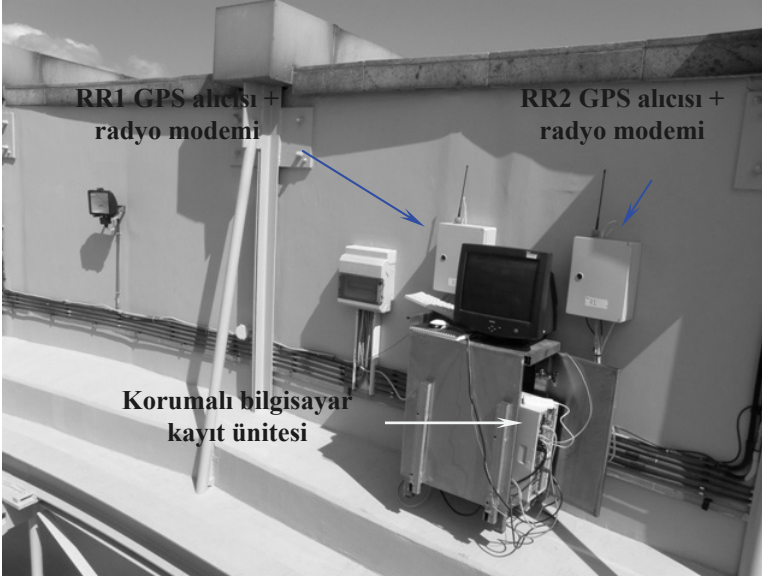
Binaya yerleştirilen DGPS sisteminden deneme verileri alınarak sistem test edilmiştir. Deneme verilerinden yer istasyonu ile çatıda bulunan hareketli GPS alıcısı RR1 arasındaki mesafeler X yönünde 70.62 m, Y yönünde 36.61 m'dir. Bu değerler ECEF koordinat sistemine (Yer Merkezli Yere Sabit – Earth-Centered Earth-Fixed) göre belirlenmiştir.



Şekil 11. Çatıda RR1 bağlantısı



Şekil 12. Çatıda RR2 bağlantısı



Şekil 13. Korumalı bilgisayar kayıt ünitesi ve RR1, RR2 GPS alıcıları+modemleri

Benzer şekilde Z yönünde binanın çatısındaki hareketli GPS antenleri (RR1 ve RR2) ve GPS baz anteni arasındaki mesafe 107.39 m olarak ölçülmüştür. GPS baz istasyonu ile ilgili koordinatlar hassas olarak 4 saatlik ölçümün ortalamasından elde edilmiştir. Şekil 14’de sabit GPS istasyonu (BASE) ile hareketli alıcıların (RR1 ve RR2) koordinatlarının Google Earth’den elde edilen uydu görüntüsü şematik olarak verilmiştir.

4.2 Yapısal İzleme ve Analizler

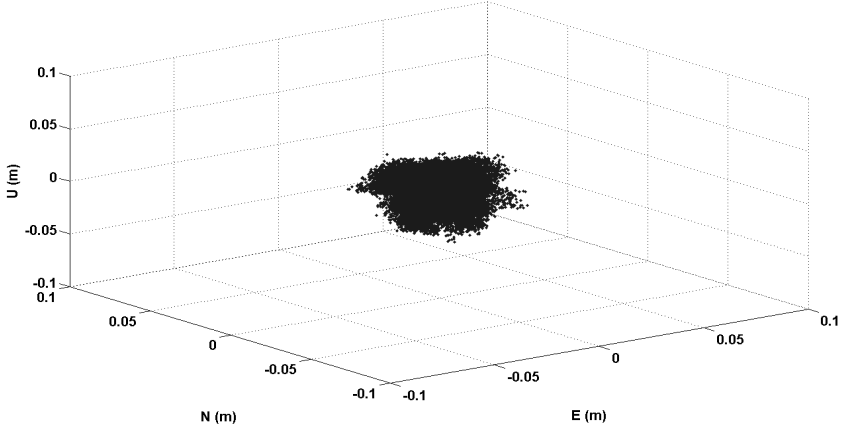
Gerçek zamanlı DGPS’in binaya yerleştirilmesi işlemlerinden sonra elde edilen verilere bağlı olarak sonuçlar iki bölümde sunulmuştur. Birinci bölümde, GPS elde edilen rölatif yer değiştirmelerin gösterilmesi amaçlanmaktadır. Bir günlük veri içerisindeki bir bölümde iki hareketli GPS alıcısına (RR1 ve RR2) ait olmak üzere 3 eksende elde edilen sonuçlar gösterilmiştir. Alınan GPS verisinin sonuçları bir günlük veri kısmının iki hareketli alıcısı için ayrı ayrı tekrarlanmıştır ve grafiksel olarak gösterilmiştir. İkinci bölümde ise birinci bölümde yapılan çalışmalarda kullanılan veriler kullanılarak bina dinamik özelliklerinin belirlenebilmesi ile ilgili çalışma sunulmuştur. İki hareketli GPS alıcısının üç eksendeki ölçüm sonuçları kullanılarak 36 adet (günlük) Power Spektrumu (Power Spectral Density) analizi yapılmıştır ve bu analiz sonuçlarının bir günlük kısmı grafiksel olarak gösterilmiştir. Analiz boyunca sonuçların sunumunda kullanılan koordinat sistemi “Lokal Koordinat Sistemi”dir ve ENU (East-North-Up) veya ENU (Doğu-Kuzey-Yukarı) olarak adlandırılmıştır.



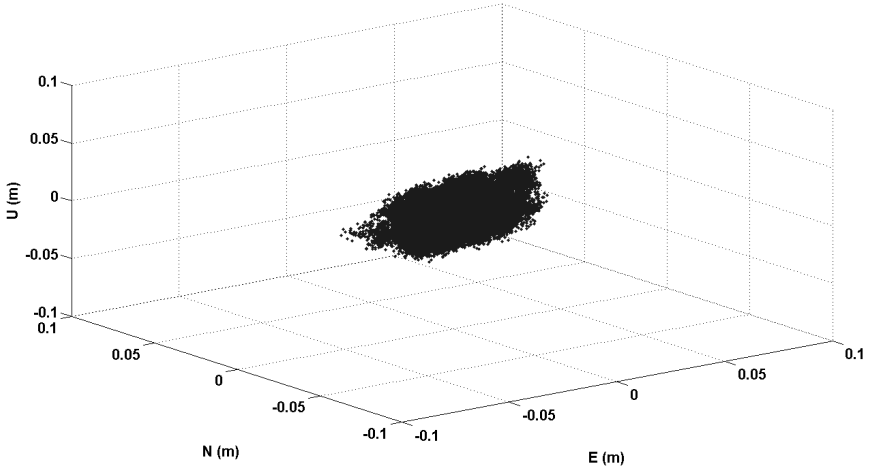
Şekil 14. GPS alıcılarının bina üzerindeki konumlarının uydu görüntüsü

Şekil 15 ve 16'da RTK verisinin yerel koordinata dönüştürüldükten sonra alıcılar arası mesafe çıkarılarak alıcı antenin faz merkezine göre ölçüm sonuçları üç eksende gösterilmiştir. Eksenler, ilk sırada E (doğu), ikinci sırada N (kuzey) ve üçüncü sırada U (yukarı) yönleri ile gösterilmiştir. Veri kayıt hızı 20 Hz olup birimi metredir. Şekil 15 ve 16'da sırası ile RR1 ve RR2 alıcısından bir gün içinde kaydedilen veriden elde edilmiş üç boyutlu bina hareketi gösterilmiştir. Uzun dönem yapılan veri analizinde, bu gün içi değişimlerin ortalamasında önemli bir değişiklik gözlenmemiştir (Z-yönünde; $2 \text{ cm} <$). Ölçüm belirsizlikleri de gözönüne alındığında bu durum binada veri kayıt süresince (36 günlük kısımda) kalıcı bir deformasyon olmadığını göstermektedir.

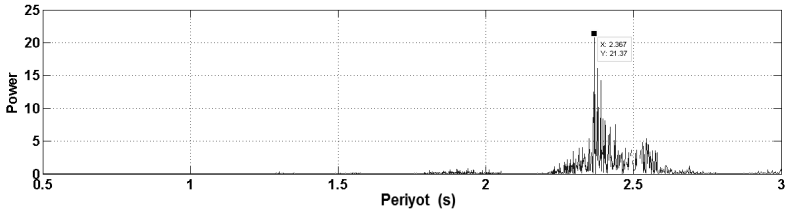
Hareketli GPS alıcıları RR1 ve RR2'den elde edilen verilerden güç spektrumu analizleri yapılarak bina hâkim frekansı ve periyotları belirlenmeye çalışılmıştır. Her alıcının (RR1 ve RR2) verdiği pozisyon verilerinden her eksen için (E-N-U) ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Sonuçlardan elden edilen grafikler takipeden bölümlerde sunulmuştur. Çalışmada 'Fourier Transform' tekniğinden yararlanılmıştır. Fourier Transform matematiksel operasyonla bir sinyalin kendi içerisinde bulunan frekansları ayırma işlemidir. Şekil 17, 18 ve 19'da her şekil bir eksene ait yer değiştirmeden elde edilen periyot analiz sonucunu göstermektedir. Bu şekillerde anlaşılabilirlik açısından yatay eksenlerde frekans yerine periyot dönüşümü yapılarak çizilmiştir. Şekillerin diziliş sırası ise bir gün için RR1 alıcısı E, N, U eksenidir. RR2 için üretilen sonuçlar ile benzer şekilde diğer günler için tekrarlanan sonuçlar Şekil 20 ve 21'de verilmiştir.



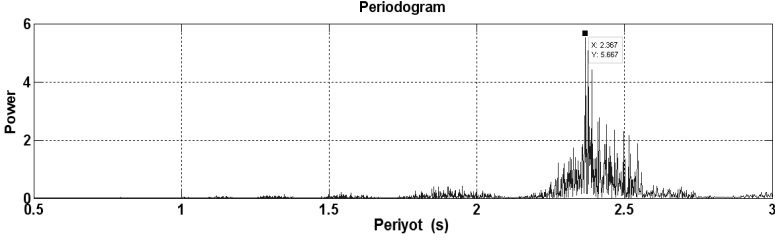
Şekil 15. RR1 alıcısına ait 3 boyutlu ölçüm değerleri



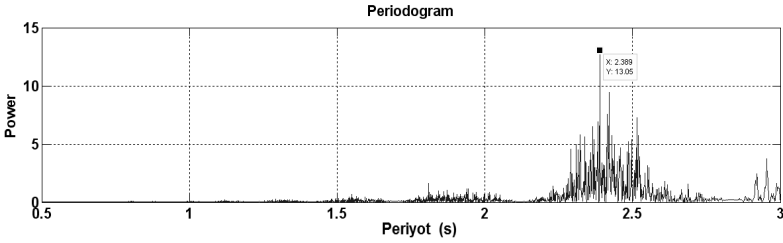
Şekil 16. RR2 alıcısına ait 3 boyutlu ölçüm değerleri



Şekil 17. RR1'in E - yönündeki verisinde elde edilen periyodogram



Şekil 18. RR1'in N - yönündeki verisinde elde edilen periyodogram



Şekil 19. RR1'in U - yönündeki verisinde elde edilen periyodogram

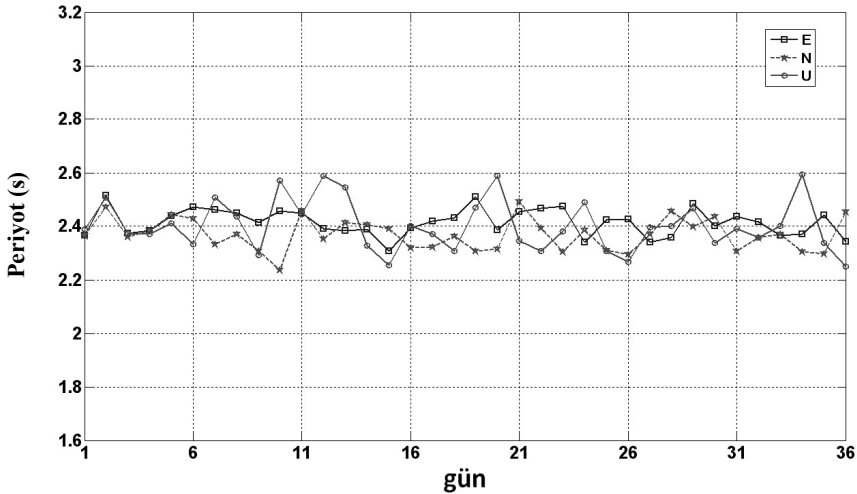
4.3 Kısa Dönem Gün İçi Periyot Değişimi

Veri toplama sürecinde oluşan cycle-slip ve RTK performansının zaaflarına dönük önleyici çalışmalar tam olarak giderilememiştir. Örneğin, herhangi bir zaman diliminde oluşabilecek GPS uydularının konumunda (geometrik olarak uzaydaki uydu pozisyonları) veya GPS sinyalinin yerden istenmeyen şekilde yansiyarak alıcıya ulaşması (multipath) bunun sonucu olarak cycle-slip olarak bilinen olumsuzluklara neden olabilmektedir. Bu tür GPS ölçüm olumsuzluklarının oluşabileceği varsayılarak, binaya GPS uygulaması yapılmadan önce prototip üzerinde yapılan çalışmadan uygun performans elde edilmesine rağmen sistemin binaya uygulanmasından sonra bu tarz sorunlarla (cycle-slip) karşılaşmıştır. Örneğin, E yönündeki hareket süresince hatanın tekrarı yaklaşık 24 saatlik bir periyotta oluşmaktadır. Bu durumun nedenleri incelendiğinde GPS baz istasyonunda yer alan GPS antenin günün belirli bir bölümünde (hata oluştuğu sıralarda) uyduların büyük kısmını (binanın gölgesinde kalmasından dolayı) görememekte olduğu ve bu zaman diliminde RR1 ve RR2'ye gönderdiği GPS düzeltici değerlerin uygun olmadığı ve hatalar içerdiği görülmüştür (cycle-slip). Bu durum bir sistem güvenilirliği (integrity) problemi olup göz önüne alınması gereken çok önemli bir konu olduğundan veri analizinde bu tür durumlar analizler boyunca devre dışı bırakılmıştır. Aksi halde binadan elde edilebilecek GPS ölçüm sonuçlarının gerçek bir bina dinamik davranışı mı ya da hatalı bir GPS performansı mı olduğu tam olarak bilinemez.

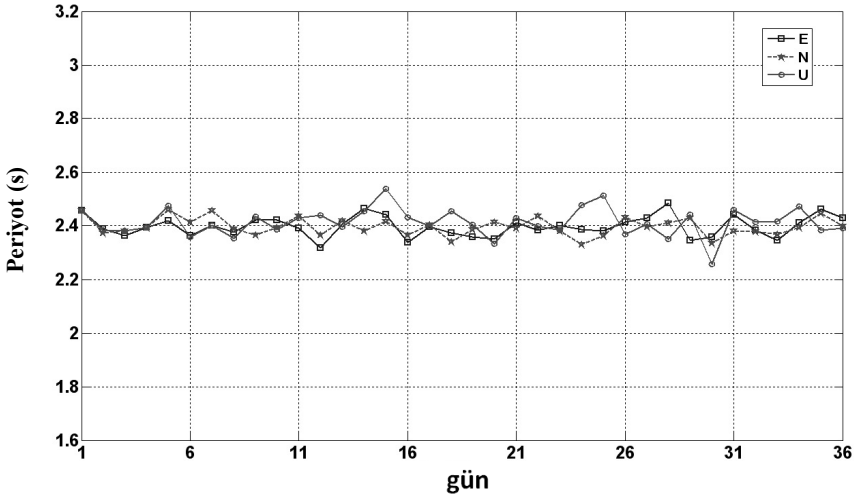
4.4 Uzun Dönem Günler Arası Periyot Değişimi

Yapının uzun dönem bina periyodu (36 günlük) GPS verisinden elde edilmiştir. Değişik zamanlarda alınan verinin içerisinde en az bir saat uygun veri kayıt bölümü ham veriden rastgele çekilerek aşağıdaki sonuçlar üretilmiştir. RR1'in bir günlük ayrıntılı sonuçları yukarıdaki grafiklerde verilmiştir (Şekil 17, 18 ve 19). Elde edilen sonuçların diğer 35 gününe ait kısmı Şekil 20 ve Şekil 21'de özet olarak verilmiştir. Bu analizde kullanılan verinin yaklaşık güntün aynı zaman dilimine denk getirilmesine de dikkat edilmiştir.

Genel olarak ölçülen bina periyodunun ortalaması yaklaşık 0.05 saniyelik bir standart sapma ile 2.40 saniye civarında olduğu gözlenmiştir. Şekil 20 ve 21'den, E ve N - yönünde elde edilen sonuçlar ile U-yönünden elde edilen sonuçlar arasında önemli bir fark olduğu anlaşılmaktadır. Bu fark aynı oranda olmamakla birlikte her iki alıcıda da mevcuttur. Göze çarpan bu durum U yönünde belirsizliğin çok yüksek çıkması anlamındadır. Bu sonucu ortaya çıkaran başlıca nedenin GPS performansının bu yönde diğer yönlere (yatay) kıyasla daha düşük seviyede olması ve ölçüm belirsizliği içermesidir. Burada GPS ölçümlerinin yatay yöndeki hareketlerin (E-N) düşey bileşen üzerinde (U) üzerinde bir etkisi vardır ancak zemine göre yaklaşık 110 m mesafedeki bina çatısındaki antenlerin yatay yönde (E-N) yapacağı 10 cm'lik yay çizme şeklindeki hareketi sonucu oluşan düşey bileşen üzerindeki (U) etkisi ihmal edilecek düzeydedir. Bir başka bulgu, RR2 alıcısının sonuçlarının RR1'den daha iyi çıkmasıdır. Bu durum binanın kısmen bir burulmaya maruz kaldığı şeklinde yorumlanabilir ya da alıcıların bina ağırlık merkezine göre simetrik olmayışıdır. Her ne kadar alıcılar bina düşey görüntüsüne yaklaşık simetrik yerleştirilmiş ise de bina ağırlık merkezi düşey görüntüye göre simetrik olmayabileceğinin bir göstergesi olabilir.



Şekil 20. RR1 Günler arası periyot değişim



Şekil 21. RR2 Günler arası periyot değişim

Yapısal analizler sonucu elde edilen 1. Moda ait periyot değeri (2.066 sn) GPS ölçümleri ile elde edilen değerden bir miktar saptmıştır. Yaklaşık %16 mertebesinde bağlıl hata söz konusudur. Bunun nedeni olarak; a) yapısal analizlerde kullanılan modelleme tekniği (2D olarak modellenmesi gereken perde elemanların hesap kolaylığı açısından 1D çubuk eşdeğeri ile tanımlanması); b) malzeme dayanımlarının projede belirtildiği gibi alınması, gerçek malzeme dayanımlarının bilinmemesi, c) yüklerin ve kütlelerin hesabında yapılan kabuller olarak açıklanabilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Maslak, İstanbul'da bulunan uzun periyotlu yüksek bir binada gerçek zamanlı kinematik diferansiyel GPS teknolojisi kullanılarak yük etkilerinden dolayı (rüzgâr vb.) oluşan rölatif (çatı) yer değiştirmeler izlenmiştir. Rölatif yer değiştirmelerin ölçülmesinde kullanılan DGPS sistemi iki adet hareketli ve bir adet sabit olmak üzere 3 adet 24 kanallı ve çift frekanslı GPS alıcısı ve anteninden oluşmuştur. Hareketli olarak kurulan iki adet GPS alıcısı ve anteni, binanın çatısına, sabit olarak kullanılan GPS alıcısı ise binanın bahçesine monte edilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

1. Gerçek zamanlı olarak DGPS sistemi kurulduktan hemen sonra bir prototipte denemiştir. Bu amaçla öncelikle bir test prototipi hazırlanmıştır. Burada ön veri alma ve analizler yapılmıştır. Analizler için iki hedefi belirlenmiştir: a) DGPS'in kendi performansı, b) binanın muhtemel frekans aralığının prototipte elde edilebilirliği. Bu analiz sonuçlarının uygunluğundan sonra sistemin binaya yerleştirilmesine karar verilmiştir.
2. Bina üzerinde detaylı etütler yapıldıktan sonra sistem (hem baz hem de hareketli antenlerin multipath vb. olumsuzluklardan en az etkilenecek şekilde) yerleştirilmiştir.

3. Binada haftalık veri kayıtları alınarak analiz yapılmıştır. Bina davranışını temsilen bina frekansı (periyodu) elde edilmiştir. Bu sonuçlar günler arasında, gün içi ve alıcılar arası olarak incelenmiştir. Değişim boyutu ve nedenleri araştırılmıştır.
4. Veri üzerinde bina davranışını temsil etmediğine inanılan GPS sisteminin kendisinden kaynaklanan (multipath ve cycle-slip vb.) hatalar analiz dışı bırakılmıştır. Bu amaçla verinin kayıtlarında uygun zaman dilimleri seçilmiştir.
5. Bina ayrıca yapısal olarak modellenerek mod şekilleri ve ilgili periyot değerleri bulunmuş ve GPS ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma sonucunda aşağıdaki hedeflere ulaşılmıştır:

- a. Uzun periyodlu yapılarda rölatif (çatı) yer değiştirmelerin gerçek zamanlı dinamik olarak DGPS teknolojisi yardımıyla izlenebilirliği kullanılan yöntemle gösterilmiştir.
- b. GPS yardımı ile elde edilen pozisyon verilerinden yapının periyot değişim özellikleri uzun dönem için belirlenmiş ve yapısal modelden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.
- c. Bir prototip üzerinde GPS sisteminin yapısal izleme için yeterli ve güvenilir olduğu ispatlanmıştır.

Teşekkür

Bu proje, TUBİTAK tarafından (Proje No:106M032) desteklenmiştir. Projenin uygulandığı Plaza Yönetimi'nden başta Sayın Şafak Türkmen ve Mustafa Akbayrak olmak üzere tüm Plaza Yönetimine, ayrıca yardımlarını esirgemeyen Sayın Prof. Zekeriya Polat ve Abdülkadir Coşkun Reyhan'a içten teşekkürü borç biliriz. Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Deprem ve Yapı Mühendisliği Anabilim Dalı öğretim üyesi Doç. Dr. Yasin Fahjan'a projenin her aşamasında vermiş olduğu destek için teşekkür ederiz. Probina-Orion yapısal analiz programını proje süresince bize sağlayan Sayın Joseph Kubin'e de teşekkür ederiz. Proje süresi boyunca özveriyle çalışan lisansüstü öğrencileri İnşaat Mühendisleri Ömer Ayzit, Başar Eralp ve Mehmet Gökçe Pürselim'e de teşekkür ederiz. Yayındaki bilgiler ve görüşler yazarlara ait olup başka kurum ve kişileri bağlamaz.

Kaynaklar

- [1] Roberts, G. W., Dodson, A. H., and Ashkenazi, V., Twist & Deflect: Monitoring Motion Of The Humber Bridge. GPS World, 24–34, 1999.
- [2] Toriumi, R., Katsuchi, H., and Furuya, N., A Study On Spatial Correlation Of Natural Wind. Journal of Wind Engineering, 87, 203-216, 2000.
- [3] Çelebi, M., GPS In Dynamic Monitoring Of Long-Period Structures. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20, 477-483, 2000.
- [4] Wong, K. Man, K. and Chan, W., Monitoring Hong-Kong's Bridges Real Time Kinematic Spans The Gap. GPS World, 2001.

- [5] Breuer, P., Chmielewski, T., Giorski, P., Konopka, E., Application Of GPS Technology To Measurements Of Displacements Of High-Rise Structures Due To Weak Winds. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 223–230, 2002.
- [6] Çelebi, M. and Sanli, A., GPS In Pioneering Dynamic Monitoring Of Long-Period Structures, *Earthquake Spectra*, 18, 1, 47–61, 2002.
- [7] Kijewshi-Correa, T. and Kareem, A., The Height Of Precision Monitoring Tall Buildings , University of Notre Dame. *GPS World*, 2003.
- [8] Brownjohn, J.M.W., Lateral Loading And Response For A Tall Building In The Non-Seismic Doldrums. *Engineering Structures*, 27, 1801–1812, 2005.
- [9] Probina-Orion, Statik ve Dinamik Sonlu Elemanlar Analizi, Dizaynı, Çizimi ve Metrajı, V.14.1, 2009.