

Yüksek Bir Binanın Rüzgar Tepkisinin Farklı Sensörler ile Tam Ölçekli İzlenmesi ve Sensör Entegrasyonuna İlişkin Ön Analiz Sonuçları

Cemal Özer YİĞİT^{1,2}, Cevat İNAL³

Özet

Mühendislik yapıları beklenen hizmet ve yaşam süreleri boyunca maruz kalacakları olası yükleri karşılayabilecek şekilde tasarlanır ve inşa edilirler. Kule, gökdelen vb. yüksek yapıların tasarımında, az katlı yapıların aksine, yapıya dinamik yük olarak etkiyen depremin yanısıra, rüzgar yüklerinin de göz önüne alınması gereklidir. Yapıların rüzgar yükü karşısındaki davranışlarının farklı özelliklere sahip sensörlerle izlenmesi, yapı sağlıklarının(emniyetlerinin) değerlendirilmesi, proje kabullerinin kontrol ve kalibrasyonu yanında, gelecek projelere ışık tutan değerli bir veri alt yapısı oluştururlar. Bu çalışmada, çok katlı betonarme yüksek bir yapının GPS ve eğim sensörü ile rüzgar tepkilerinin eş zamanlı izlenmesi, yapının doğal frekanslarının belirlenmesi ve her iki sensörün yapının dinamik davranışlarını yakalama kabiliyetleri açısından değerlendirilmesi karşılaştırılmalı bir yaklaşımla ele alınmıştır.

Anahtar Sözcükler

Yapı Performansının izlenmesi, Rüzgar yükü, GNSS, Eğim sensörü, Yüksek yapılar

Abstract

Full-Scale Monitoring of Wind-Induced Response of a Tall Building with Various Sensors and Preliminary Analysis Results Regarding Sensor Integration

The engineering structures are designed and constructed to be able resist against possible load that could be anticipated during expected service and lifetime. Unlike low-rise building, it is necessary to take into account wind loading as much as seismic load as a dynamic load for high-rise structures in design stage. The monitoring of behaviour of the structures under wind load using sensors which has different ability provide future projects good and valuable information database as well as evaluating of structural health and control and calibration of project parameters accepted. In this study, it is dealt with the monitoring of wind-induced response of a multistory reinforced concrete building using GPS and inclination sensor together, determining the natural frequency of the building and evaluating of both sensor in terms of capturing dynamic components of the building with comparative approach.

Key Words

Structural Performance Monitoring, Wind Load, GNSS, Inclination Sensor, Tall Structures

1. Giriş

Günümüzde gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, gökdelen, yüksek bina, kule vb. yüksek yapıların sayısında dikkate değer bir artış gözlenmektedir. Asma köprüler ve yüksek yapılar, diğer mühendislik yapılarında uygulandığı gibi deprem yüklerini karşılayacak şekilde projelendirilmelerinin yanında, dinamik bir yük oluşturan rüzgar yüklerini de karşılayabilecek şekilde tasarlanmalı ve inşa edilmelidir. Yüksek yapıların, deprem yüküne karşı dirençli olabilmesi yapının olabildiğince hafif-ağırıklı ve esnek olmasını, şiddetli rüzgarlara karşı yapının dirençli olması ise yapının rijitliğinin olabildiğince yüksek olmasını gerektirmektedir (LI vd. 2008). Yapılara dinamik yük oluşturan, deprem ve rüzgar gibi, iki farklı tasarım ölçütlerinin göz önünde bulundurulması ve her iki yük değerine karşı dayanıklı bir yapının tasarlanması gereklidir.

Yüksek yapıların rüzgar yüklerine cevabı, temel olarak üç bileşen şeklinde olmaktadır. Bu bileşenler ortalama sabit bir yükte etki eden güçlerin neden olduğu statik bileşen, düşük-frekanslı yüklerin sebep olduğu quasi-statik bileşen ve yapıların 1. moduna yakın olan frekansdaki güçlerin sebep olduğu rezonans (dinamik) bileşendir (TAMURA 2003, LI 2006). Yapıların yükler karşısında tepki olarak ortaya çıktığı yapısal titreşim köprülerde düşey deplasmanlara, kule, yüksek bina ve gökdelenlerde yatay deplasmanlara sebep olmaktadır. Yapıların deplasman değerleri bu türden mühendislik yapılarının güvenliğinin değerlendirilmesi için anahtar bir parametredir.

Farklı sensörlerle elde edilen ölçmeler sonucu yapıların doğal frekanslarının belirlenmesi yapı sağlığının ve bütünlüğünün değerlendirilmesi açısından en önemli parametrelerden birisidir. Yapıların doğal frekanslarının ve sönümlenme oranlarının belirlenmesi, proje kabullerinin kontrol ve kalibrasyonu, analitik modellerin değerlendirilmesi ve iyileştirilmesi ilgili mühendislik yapılarının farklı özelliklere sahip sensörlerle farklı yükler altındaki davranışlarının izlenmesinin önemini ön plana çıkarmaktadır.

Yüksek yapıların rüzgar yüküne karşı davranışlarının değerlendirilmesi ve dinamik karakterlerinin ortaya çıkarılmasında en güvenilir yöntem, tam ölçekli izleme olarak düşünülmür (LI vd. 2002). Yapıların tam ölçekli izlenmesi ve dinamik testleri, yapıların davranışları ve performanslarının değerlendirilmesine ilişkin değerli bilgiler sağlarlar. Yapıların modal parametreleri olarak adlandırılan doğal frekansları, mod şekilleri ve modal sönüm değerleri ile sistem parametreleri olarak adlandırılan rijitlik, kütle ve sönümleme matrisi, ölçülen dinamik cevaplardan(hareketlerden) elde edilebilir. Bu

¹ Yrd.Doç.Dr., Selçuk Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., Harita Mühendisliği Bölümü, Konya/Türkiye , cyigit@selcuk.edu.tr

² Visiting Fellow, School of Surveying & Spatial Information Systems, The University of New South Wales, Sydney-NSW/Australia

³ Prof. Dr., Selçuk Üniversitesi, Müh. Mim. Fak., Harita Mühendisliği Bölümü, Konya/Türkiye , cevlat@selcuk.edu.tr

tanımlanmış parametreler daha sonra yapının performansını değerlendirmek için kullanılabilir ve yapının analitik modelleri bu parametreler kullanılarak değerlendirilebilir (SALAWU vd. 1995). Buna ilave olarak, ölçmeler sonucu belirlenen parametreler yardımıyla analitik modele yapılacak yeni ilaveler, daha gerçekçi modellerin elde edilmesini sağlayabilir.

İvme sensörü bir çok mühendislik yapısının, yükler altındaki dinamik davranışlarının ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde, kullanılabilirliğini kanıtlamış ve yapı sağlığının izlenmesinde ve değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan geoteknik bir ölçme aracı haline gelmiştir. İvme sensörü ile ivmelenme değişimleri doğrudan ölçülebilmektedir. İvme değerinden yer değiştirme büyüklüğüne ilişkin değere geçiş ise, çift katlı integral almayı ve integral sabitlerinin doğru belirlenmesini gerektirmektedir. İvme sensörü ölçmelerinden, yapıda meydana gelen quasi-statik ve statik deplasmanlar, hız ve deplasman integral sabitleri bilinmediği için ortaya çıkarılamaz (LI 2006, ROBERTS vd. 2000).

Yapıların hem statik hem de dinamik deplasman değerlerinin doğrudan ölçülmesinde GNSS alıcıları en etkili araçlardan birisidir. Günümüze kadar bir çok yüksek mühendislik yapısının deprem ve rüzgar yükü karşısındaki davranışları GPS ile ölçülmektedir (LOVSE vd. 1995, HRISTOPULOS vd. 2007, ÇELEBİ ve ŞANLI 2002, TAMURA vd. 2002, BROWNJON vd. 2004, LI vd. 2006, PARK vd. 2008, BREUER vd. 2008). TAMURA vd. (2002), GPS ile 2 Hz'den daha düşük ve 2 cm'den büyük olan titreşim genliklerinin belirlenebileceği belirtilmiştir. CHAN vd. (2006)'da, GPS'in hem yatay hem de düşey yöndeki dinamik ölçme doğruluğunu değerlendiren bir simulasyon çalışması yapılmıştır. Bu çalışma sonucunda, 1 Hz ve daha düşük frekanslı titreşimlerin yatayda 5 mm'den, düşeyde de 10 mm den düşük genlikli olmaması koşuluyla; GPS ile deplasmanların güvenilir bir şekilde ölçülebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

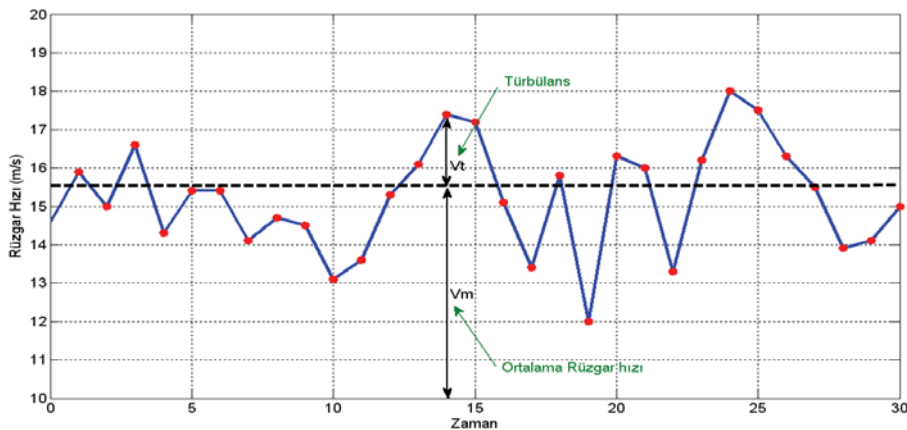
Diğer taraftan GPS ölçüleri alıcı etrafındaki sinyal yansımalarına sebep olan yansıtıcı yüzeylerden etkilendiğinden yapıların sabit rüzgar yükünün etkisi ile oluşan quasi-statik tepkimelerinin doğru belirlenmesine engel olmaktadır (LI 2006). Böyle durumlarda GPS ölçülerindeki sinyal yansımalarının uygun sinyal filtreleme modelleri ile giderilmesi gerekmektedir. Sinyallerin yansımaya etkisinden arındırılması ölçünün yapıldığı günü takip eden gün ve günlerde aynı

ölçme zaman diliminde fazladan bir ölçme işlemini gerektirmektedir. Yansıma hatası (Multipath) yapıların quasi-statik deplasmanlarının belirlenmesi açısından GPS'in etkinliğini düşürmektedir. Yapıların yükler altındaki daha yüksek frekanslarının izlenmesi ve tam ölçekli bir izleme ve analiz yapılabilmesi için GPS'e ilave olarak ivme vb. sensörleri de kullanılarak bir çok çalışma gerçekleştirilmiştir (LI vd. 2006, OGAJA vd. 2001, BROWNJOHN 2004). GPS ve geoteknik sensörlerle yapı davranışlarının belirlenmesi yanında robotik total station vb. gibi jeodezik ölçme aletlerinin dinamik hareketleri izleme performansı üzerine de araştırmalar yapılmıştır (GIKAS vd. 2005, 2006, DANISCH vd. 2008).

Bu çalışmada, benzerlerinden farklı olarak, ivme sensörü yerine eğim sensörü ve GNSS alıcısı kullanılarak, 30 katlı betonarme binanın rüzgar yükü karşısındaki davranışları izlenmiştir. GPS ve eğim sensörü verileri hem zaman, hem de frekans alanında analiz edilerek binanın dinamik parametrelerinden olan doğal frekansları belirlenmiş ve ölçmeler sonucu belirlenen frekans ile Sonlu Elemanlar Model'inden elde edilen frekans sonuçları karşılaştırılmıştır. Binanın, rüzgar yükü karşısındaki, dinamik davranışının belirleme açısından eğim sensörü ve GPS alıcısının karşılaştırılması ve her iki sistemin de güçlü ve zayıf yönlerinin ortaya konulması amacı ile band geçiren filtre uygulanmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

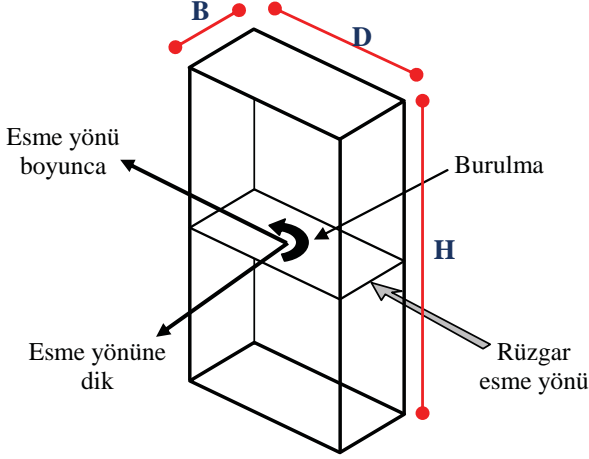
2. Dinamik Yük Olarak Rüzgar

Rüzgar, hızı ve yönü, zamana göre değişken karakter sergileyen, çok karmaşık bir doğa olayıdır. Rüzgar, atmosfer içerisindeki yüksekliğine bağlı olarak farklı istatistiksel özellikler sergileyen dinamik bir yapı gösterebilir. Genellikle rüzgar, ortalama hız ile bu ortalama değer etrafında salınım gösteren ve türbülans olarak adlandırılan, bir yapı gösterirler. Ortalama rüzgar hızı statik bir yük oluştururken, türbülans, ani ve zamanla değişen çarpma etkisi ile, bina üzerinde dinamik bir etki oluşturur. Türbülansın yapı üzerine etkisi, sadece türbülansın karakterine değil, aynı zamanda yapının boyut ve dinamik karakterlerine de bağlıdır (AIJ 2005). Şekil 1'de belirli bir zaman aralığı için tanımlanan ortalama rüzgar hızı (V_m) ve ortalamadan olan sapmaları gösteren türbülans (V_t) görülebilir. Toplam rüzgar hızı bu iki bileşenin toplamı olarak ifade edilir.



Şekil 1: Rüzgar türbülans ve ortalama değeri

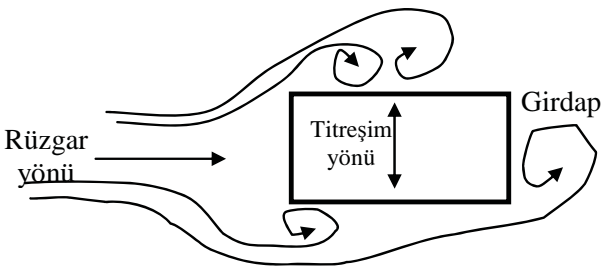
Rüzgarın sebep olduğu yapısal titreşimler büyük oranda, yapının şekli, rijitliği (yada esnekliği) ve sönümlenme karakterleri ile ilgilidir. Fakat, bu sadece yapının karakterine değil, aynı zamanda rüzgarın karakterine de bağlıdır. Örneğin, rüzgarın türbülans yapısı, yapıdaki titreşimi etkileyen en büyük etkenlerden birisidir (LIU 1991, MENDIS vd. 2007).



Şekil 2: Dikdörtgen kesitli bir yapıda, rüzgar esme yönüne göre yük-titreşim tanımları

Dinamik yüklerin etkisi altındaki yüksek yapılar rüzgar esme yönü doğrultusunda ve buna dik doğrultuda olmak üzere yapı eksenini boyunca burulma titreşimi yaparlar (KIJEWski VE KAREEM 1998). Şekil 2’de yüksekliği H, derinliği D ve genişliği B olan, dikdörtgen kesitli bir yapıya etkileyen rüzgar yönü ve yapı ana yönleri boyunca oluşabilecek yük-titreşim türleri görülebilir (AIJ 2005).

Rüzgar esme yönü boyunca olan titreşimler, binaya ön ve arka yüzeyinden etkileyen rüzgar kuvveti ile oluşurlar. Rüzgar esme yönüne dik yönde olan titreşimler, yapının her iki kenarına etkileyen değişken yapıdaki rüzgar sebebiyle oluşur. Burulma ise, yapıya etkileyen rüzgarın yapı üzerindeki basınç dağılımının düzensizliği sonucu ortaya çıkar (KIJEWski VE KAREEM 1998). Hem burulma, hem de rüzgar yönüne dik gerçekleşen titreşimler, genellikle yapının yan yüzeylerine etkileyen girdap kopmaları yüzünden (Vorteks) meydana gelmektedir (AIJ 2005).



Şekil 3: Girdap kopmaları ve etkisi

Yapılardaki titreşim, girdap kopmalarının doğasından dolayı titreşimi oldukça karmaşıktır (Şekil 3). Girdap kopmaları dar bir frekans bandında etkilidir ve yapıya sinüsoidal bir yük olarak etki ederler. Yapı yüksekliği arttıkça yapının doğal

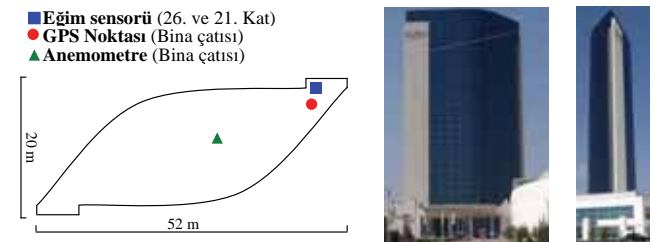
frekansı düşer ve girdap kopmalarının frekansına yaklaşır. Bunun sonucu olarak, yapıda rezonans hareketi artar ve yapının buna olan deplasman cevabı giderek artar (AIJ 2005, LIU 1991).

Yüksek yapıların rüzgar yüklerine ilişkin kod ve standartları, ülkeden ülkeye değişiklikler göstermektedir. KIJEWski VE KAREEM (1998), Avustralya, Amerika, Kanada, Çin, Avrupa, İngiltere ve Japonya gibi ülkelerin rüzgar yüklerine ilişkin kodlarını karşılaştırılmalı olarak incelemiş ve değerlendirmiştir. Çalışmanın yapıldığı dönemde, örneğin Japonya rüzgar esme yönü boyunca, rüzgar esme yönüne dik ve burulma etkilerini dikkate alarak tasarım yaparken, Avustralya ve Kanada ilk iki bileşeni dikkate alarak, Amerika ve Avrupa standartları yalnızca ilk bileşene göre yüksek yapıları tasarlamışlardır. Ülkemizde yakın geçmişe kadar yüksek yapılara etkileyen rüzgar yüküne ilişkin detaylı bir standart ve yönetmelik mevcut değil iken, İstanbul Büyükşehir Belediyesi ve Boğaziçi Üniversitesi-Kandilli rasathanesi ve Deprem Araştırma Enstitüsü-Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı “İstanbul Yüksek Binalar Rüzgar Yönetmeliği” isimli bir yönetmelik üzerine çalışmalar yürütmektedir.

3. Sensörlerin Yapı Üzerine Tesisi ve Yapıya İlişkin Bilgiler

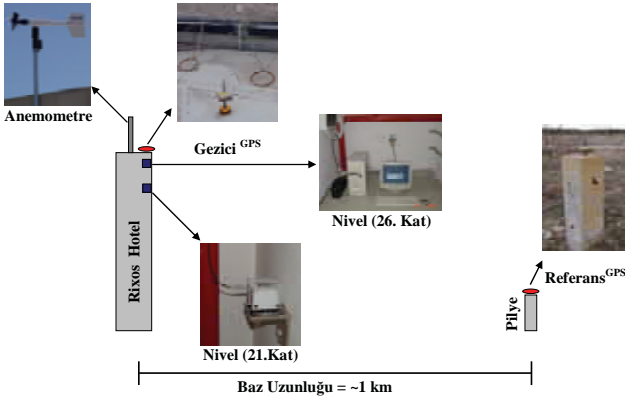
Rixos Hotel binası toplamda 30 katlı olup 100 m yüksekliğindedir. Temel alanı 685 m²’dir. Bina kuzey-güney yönünde 20 m, doğu-batı yönünde 52 m’dir (Şekil 4). Binanın taşıyıcı sistemi betonarme olup, kolon ve perdelerden oluşmuştur. Taşıyıcı sistemde değişik ebatlarda 44 adet kolon ve iki adet perde-çekirdek bulunmaktadır. Plan düzleminde merdiven ve asansör kovalarını kapsayan iki adet betonarme çekirdek ile yatay taşıyıcılık sağlanmıştır. Dolayısıyla deprem ve rüzgar gibi yanal etkiler için gerekli rijitlik sağlanmıştır.

Binanın projelendirme ve yapımı, Türk Deprem Yönetmeliği (TDY-1998) ve TS-500-2000 gibi standartlara göre gerçekleştirilmiştir. Binanın yapımında C25 (basınç dayanımı 25 MPa olan beton) ve S420 (çekme dayanımı 420 MPa olan donatı) kullanılmıştır. Zemin emniyet gerilmesi 3.94 kg/m² ve temel sistemi radye olarak seçilmiştir. Taşıyıcı sistem süneklik düzeyi yüksek olarak düşünülmüş, dolayısıyla eşdeğer deprem yükünün hesabında taşıyıcı sistem davranış katsayısı R, 7 olarak kabul edilmiştir. Bölgenin depremselliğine göre, tasarım, 4. derece deprem bölgesi için yapılarak etkin yer ivme katsayısı 0.10 g olarak, bina önem katsayısı I ise 1 olarak alınmıştır. Zemin sınıfı Z2 seçilmiş ve zemin karakteristik periyotları 0.15-0.40 sn olarak alınmıştır (TDY 1998, 1998; TS 500-2000, 2000).



Şekil 4: Plan (sol), ön (orta) ve yandan (sağ) binanın görünüşü

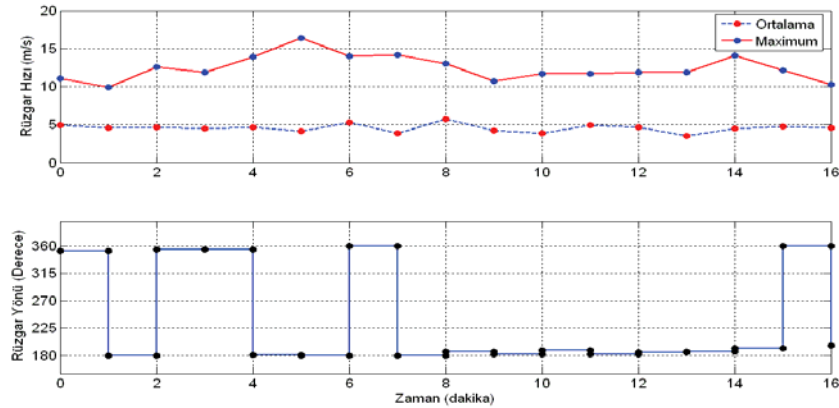
Eğim sensörlerinin, GPS gezici ve referans noktaları ve anemometrenin bina üzerindeki konumları Şekil 5'te şematik olarak görülebilir.



Şekil 5: Sensör (Ölçme) sistemleri ve bina üzerindeki konumları

Bu çalışmada NIVEL200 eğim sensörü serisinin NIVEL220 modeli kullanılmıştır. Eğim sensörleri binanın iki çekirdek-perdelerinden kuzeye bakan çekirdek-perde üzerine binanın iç kısmına tesis edilmiştir (Şekil 4, 5). Binada, çekirdek-perde kısmı yangın merdiveni ve asansörleri içermekte olup PC ve eğim sensörlerinden birisi 26. kat, diğer eğim sensörü ise 21. kat seviyesinde monte edilmiştir (YIĞİT vd. 2008, 2010-a).

Rüzgarın hız ve yön verilerini ölçmek için Young Model 05103 anemometresi kullanılmıştır. Anemometre yapının çatısında bulunan ek bina üzerine hiçbir fiziksel engelin olmayacağı ve sağlıklı verilerin toplanabileceği hakim bir noktaya tesis edilmiştir. Anemometre tesisinde sıfır doğrultusu eğim sensörünün X^{Nivel} eksenine paraleldir.



Şekil 6: Rüzgar ortalama, maximum hız (üst) ve yön-zaman serisi (alt)

Daha önce de bahsedildiği gibi binaya etkiyen rüzgarın hızı, ortalama rüzgar hızından olan dalgalanma şiddeti ve frekansı ve yönü en büyük etkenlerden biridir. Şekil 6'da alt çizim detaylı şekilde incelendiğinde, rüzgarın binaya esme yönü genelde çok fazla değişkenlik göstermemektedir (Şekil 7). Şekil 6'da üst çizim detaylı bir şekilde incelendiğinde, rüzgarın ortalama hızı 5 m/sn civarında, maximum rüzgar

Binanın rüzgarlı havalardaki yatay hareketlerinin belirlenmesi amacıyla bina üzerinde eğim sensörünün bulunduğu çekirdek-perde üzerine denk gelen bir GPS noktası tesis edilmiştir. Kinematik-GPS ölçmeleri için yatay konum belirlemede kinematik ölçme doğruluğu 10+1ppm olan GPS alıcıları kullanılmıştır. Kinematik-GPS ölçmelerinde referans noktası, pilye şeklinde bir tesis olup binadan 1 km uzaklıktadır (Şekil 5). Referans noktası, uydu görüşünün açık ve yansıtıcı yüzeylerin olmadığı bir bölgede seçilmiştir (Şekil 5).

Çoğu binaların rüzgar yüküne karşı tepkileri açısından, ilk mod, diğer yüksek frekans modlarına göre oldukça etkilidir. (AIJ 2005). Bir başka ifade ile, analizlerinde ilk mod toplam tepkinin yaklaşık %90'ını içerdiğinden, bu tür yapılar için yapı davranışını belirlemede ilk üç modun dikkate alınması yeterli olmaktadır (ERDOĞAN 2006). Bu çalışmada seçilen objeye ait mimari ve betonarme proje bilgileri yardımıyla, yapının 3 boyutlu modeli yapı analiz programı yardımıyla oluşturulmuştur. Objenin bu modeli yardımıyla teorik doğal frekansları ve bu frekanslara ait şekil değiştirme modları hesaplanmıştır.

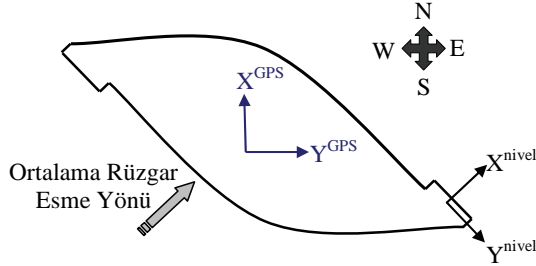
4. Rüzgar Tepkisi Ölçmeleri ve Analizi

21 Mart 2008 günü meydana gelen şiddetli rüzgar karşısında binanın dinamik cevabı hem GPS hem de eğim sensörü ile ölçülmüştür. Bu ölçülere ilave olarak, yapıya etkiyen rüzgar hız ve yönü anemometre yardımı ile ölçülmüştür. Şekil 6'da üst çizim 1 dk'lık veri toplama aralığındaki ortalama ve maximum rüzgar hızını, alt çizim ortalama rüzgar yönünü temsil etmektedir. Hem GPS hem de eğim sensörü ile eş zamanlı toplanan verinin uzunluğu 1000 sn ($16^d 40^s$) dir. Deney setine karşılık gelen rüzgar hız ve yönüne ait bilgiler Şekil 6'da görülebilir (YIĞİT vd. 2009, 2010-a, 2010-b).

hızları ise 10m/sn ile 17 m/sn aralığında değişmektedir. Burada şu unutulmamalıdır ki, çizim 1 dk'lık ortalama değerleri yansıtmaktadır. Eğer rüzgar verileri 1 sn veri aralığında, bir başka ifade ile 1 Hz'lik bir örnekleme sıklığında toplanmış olsaydı, binaya etkiyen rüzgarın karakteri daha detaylı bir şekilde frekans alanındada incelenebilecekti.

4.1. GPS Verilerinin Analizi

GPS verileri Leica Geo Office 3.0 yazılımı kullanılarak Post-Process Kinematik yöntemle analiz edilmiştir. Analizde elde edilen yer merkezli kartezyen koordinatlardan projeksiyon koordinatları X^{GPS} ve Y^{GPS} türetilmiştir (Şekil 7). Şekil 7’de ayrıca eğim sensörünün bina üzerindeki koordinat eksenleri X^{nivel} ve Y^{nivel} görülebilir.



Şekil 7: Sensör eksen yönlerinin binaya göre konumları

GPS verilerinin prosesi sonucu, her epöğa ait X^{GPS} ve Y^{GPS} koordinatları elde edilmiştir. Binanın GPS eksenleri boyunca zamana göre bağıl değişimlerine ilişkin zaman serileri Şekil 8’de görülebilir (sol üst ve alt). Şekil 8’de ΔX ve ΔY bileşenleri X^{GPS} ve Y^{GPS} eksen yönlerindeki bağıl değişimleri yansıtmaktadır. Bağıl değişimler,

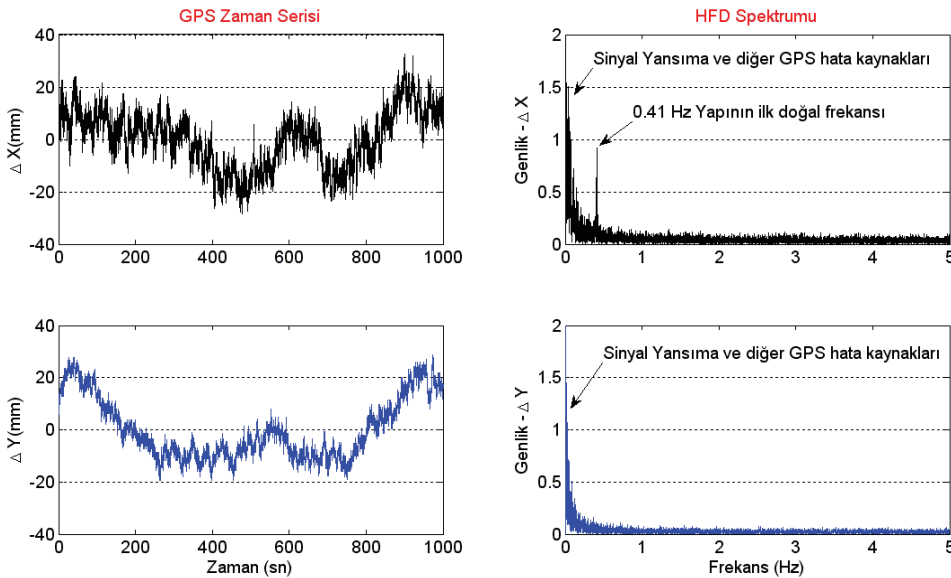
$$\Delta X_i^{gps} = X_i^{gps} - \frac{\sum_{i=1}^n X_i^{gps}}{n}$$

(1)

$$\Delta Y_i^{gps} = Y_i^{gps} - \frac{\sum_{i=1}^n Y_i^{gps}}{n}$$

formülleri ile hesaplanmıştır. Burada, n veri sayısıdır.

Şekil 8’de hem zaman, hem de frekans alanındaki çizimlerde, her iki bileşen yönündeki hareketin zaman-genlik ve zaman-frekans ilişkilerinin rahatlıkla karşılaştırılabilmesi amacıyla, her bileşen yönlerine ait çizimlerde yatay ve düşey eksene ait ölçekler aynı seçilmiştir. Bu bağlamda, her hangi bir istatistik hesaba gerek kalmaksızın sadece zaman serisinin göz ile incelenmesiyle bile yorum yapılabilir. Şekil 8’de zaman bölgesindeki yüksek frekans bileşeni, başka bir ifade ile kısa dönemli bileşen incelendiğinde, hareketin genliği ΔX bileşeninde ΔY bileşenine göre daha fazladır. Bu, binanın X^{GPS} yönündeki titreşiminin Y^{GPS} yönüne göre daha fazla olduğu anlamına gelmektedir. Bir başka ifade ile, rüzgarın bina üzerinde etkisinin çoğunlukla X^{GPS} yönünde ve binanın bu yönde daha esnek olduğu söylenebilir. Zaman alanındaki çizimlerde, kısa dönemli hareketin yanısıra, binada ortalama rüzgar hızındaki değişimlerin sebep olabileceği uzun dönemli bir hareket varmış gibi gözükmektedir. Fakat, Şekil 6’da üst çizimden de açıkça görüldüğü gibi, ortalama rüzgar hızı çok küçük bir standart sapma ile 5 m/sn civarındadır. Bu durum, deney süresi boyunca, bağıl anlamda binada quasi-statik bir hareketin beklenmediğini işaret etmektedir. Zaman serisinde görülen bu hareketin temel nedeni, GPS alıcısının etrafındaki bina çatısının dış cephe metal kaplamalarının sebep olduğu sinyal yansıma hatasıdır.



Şekil 8: GPS zaman serileri ve HFD spektrumları

Yüksek binaların yükler altındaki dinamik davranışlarının sadece zaman alanındaki genlik- zaman ilişkisini yansıtan zaman serisini incelemek ve değerlendirmek yeterli değildir. Dinamik parametrelerden olan yapının temel doğal frekanslarının belirlenmesi sinyalin içerdiği frekans bilgisinde saklıdır. Bir zaman-genlik gösterimini, her hangi bir hesap yapmaksızın, göz ile incelemek suretiyle, periyodik bir hareketin olup olmadığı sezgisel olarak bazı durumlarda ilk bakışta anlaşılabilir, fakat bu periyodik hareketin frekansının ve genliğinin sayısal olarak belirlenmesi harmonik analiz ya da frekans bölgesinde spektral analizinin yapılmasını gerektirir. Bu amaçla, zaman serilerinin frekans spektrumları Hızlı Fourier Dönüşümü (HFD) yardımıyla elde edilmiş ve sonuçlar frekans alanında incelenmiştir.

Şekil 8’de sağ üst ve alt çizimler, GPS zaman serisinin genlik-frekans ilişkilerini göstermektedir. GPS ile toplanan verilerin fs örnekleme frekansı 10 Hz olduğundan Nyquist kriterinden dolayı fs/2 değeri olan 5 Hz’e kadar olan binaya ait frekanslar belirlenebilir. Şekil 8’de 0 – 5 Hz arasındaki frekanslar ve karşılık gelen genlik değerleri görülebilir. Şekil incelendiğinde 0-0.2 Hz düşük frekans bölgesinde aşırı derecede sıçramaların olduğu hem ΔX hemde ΔY bileşeninde görülmektedir. Bu frekans bölgesindeki hareketliliğin sebebi daha öncede bahsedildiği gibi GPS sinyalinin çok yolluluk hatasından kaynaklanmaktadır (Li, 2006). Düşük frekanslı bölgedeki bu hareketliliğin her iki bileşende de olması bu yorumu daha da kuvvetlendirmektedir. 0.2- 5 Hz arasındaki frekans bölgesi incelendiğinde, ΔX bileşenindeki 0.41 Hz frekansı haricinde bir sıçrama göze çarpmamaktadır. 0.2 – 5 Hz arasında binanın doğal frekansına işaret eden ΔX bileşenindeki 0.41 Hz haricindeki frekansların genliklerinin aynı seyretmesi GPS in bu aralıkta beyaz gürültü niteliğinde gürültüler ürettiğine işaret etmektedir. 0.41 Hz frekansındaki sıçrama ile binanın SEM yardımıyla 0.38 Hz olarak hesaplanan birinci doğal frekansı karşılaştırıldığında % 7’lik bir fark olduğu tespit edilmiştir(YIĞİT vd. 2010-b).

4.2. Eğim Sensörü Verilerinin Analizi

Deney süresince, GPS in yanısıra eğim sensörü ile binanın rüzgar yükü karşısındaki eğim değişimleri 21. katta tesis edilen eğim sensörü ile ölçülebilmektedir. 26. katta bulunan eğim sensörü bu deney süresince, bina tepkisinin ölçme aralığının

dışında değerler almasından dolayı veri toplayamamıştır. Eğim sensörü eğim değişimlerini doğrudan ölçmektedir. Böylece, GPS ve eğim sensörü farklı birimlerde doğrudan ölçme yapmaktadır. İki sensörün performanslarının karşılaştırılabilmesi için birim dönüşümü gereklidir. Eğim değişimlerini inceleyerek binanın rüzgar yükü karşısındaki salınımlarını görmek ve algılamak zor olacağından, eğim değerinden deplasman değerlerinin hesaplanması ve çizilmesi daha anlamlı olacaktır. Bu bağlamda, eğim değerinden, deplasman değerlerinin hesaplanmasında aşağıdaki denklemden faydalanılmıştır.

$$d = h * \bar{\alpha} \quad (2)$$

Burada,

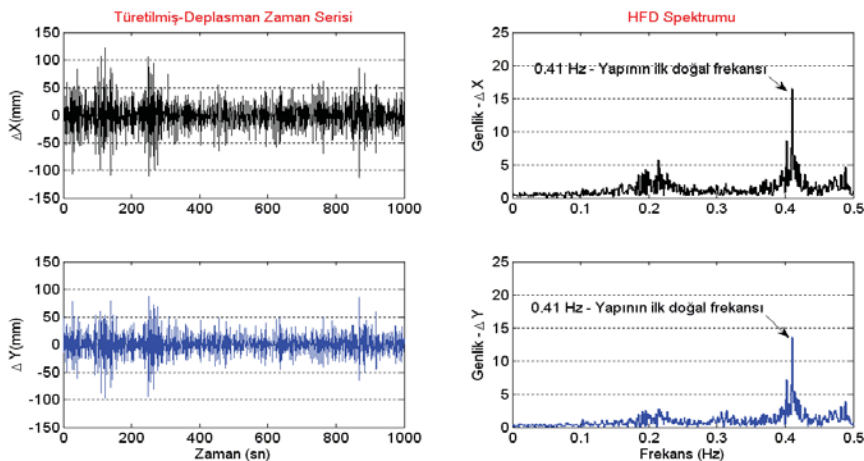
d : mm biriminde türetilmiş deplasman,

h : m biriminde sensörün tesis yüksekliği ya da deplasmanı hesaplanacak noktanın yükseklik değeri

$\bar{\alpha}$: mrad biriminde eğim değeri

Eğim sensöründen türetilmiş-deplasman zaman serisi ve HFD spektrumları Şekil 9’da görülebilir. Şekil 9’da alt ve üst çizimler kendi içerisinde karşılaştırıldığında, ΔX bileşeninin ΔY bileşenine göre daha fazla salınım genliği gösterdiği rahatlıkla görülebilir. Bu durum, yine GPS zaman serilerinin yorumunda yapılanlara benzer şekilde, bina eğim sensörünün X_{nivele} eksenı boyunca Y_{nivele} eksenine göre, daha fazla dinamik tepki ve salınım uğradığı anlamına gelmektedir. GPS ve eğim sensörlerinin eksen yönlerinin binaya göre aynı olmamasına rağmen, sayısal bulgular verilmeksizin, sadece zaman alanındaki grafikleri incelenerek de rahatlıkla bu durum algılanabilir.

Eğim sensörü ile toplanan verilerin fs örnekleme frekansı 1 Hz olduğundan Nyquist kriterinden dolayı fs/2 değeri olan 0.5 Hz e kadar olan binaya ait frekanslar belirlenebilir. Bunun anlamı 0.5 Hz lik bir frekansı aşan bir doğal frekans 1 Hz lik örnekleme frekansı ile mümkün olmadığına işaret etmektedir. Şekil 9 HFD spektrumları incelendiğinde, eğim sensörünün hem X_{nivele} hemde Y_{nivele} eksenleri yönünde maximum sıçramanın 0.41 Hz frekansında olduğu açıkça görülmektedir. Şekilden yine açıkça görüldüğü üzere ΔX bileşenindeki frekans sıçraması ΔY bileşenine göre daha yüksektir. Bu durum, zaman bölgesindeki grafiklerin yorumlanmasına benzer şekilde, binanın X_{nivele} yönündeki dinamik cevabının Y_{nivele} yönündekine göre daha yüksek olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 9: Eğim sensörü türetilmiş-deplasman zaman serileri ve HFD spektrumları

GPS ve Eğim sensörlerinin frekans alanındaki grafikleri, sırasıyla Şekil 8 ve 9, karşılaştırıldığında binanın doğal frekans değeri olan 0.41 Hz'lik sıçrama, GPS in sadece ΔX bileşeninde gözükmekte iken, eğim sensörünün her iki bileşeninde de gözükmektedir. Bu, eğim sensörü ve GPS'in koordinat sistemleri arasındaki dönüklükten kaynaklanmaktadır. Şu bir gerçektir ki, binanın birinci doğal frekansı hem GPS hem de eğim sensörü ile 0.41 Hz olarak belirlenmiştir. Fakat tam anlamıyla eğim sensörü ve GPS'in hem zaman hemde frekans alanında karşılaştırılması, sensörlerin aynı eksen doğrultularına getirilmesinden sonra daha anlamlı ve gerçekçi olacaktır. Buna ilişkin detaylı analiz ve sonuçlar takip eden bölümde verilmiştir.

4.3. GPS ve Eğim Sensörünün Karşılaştırılması

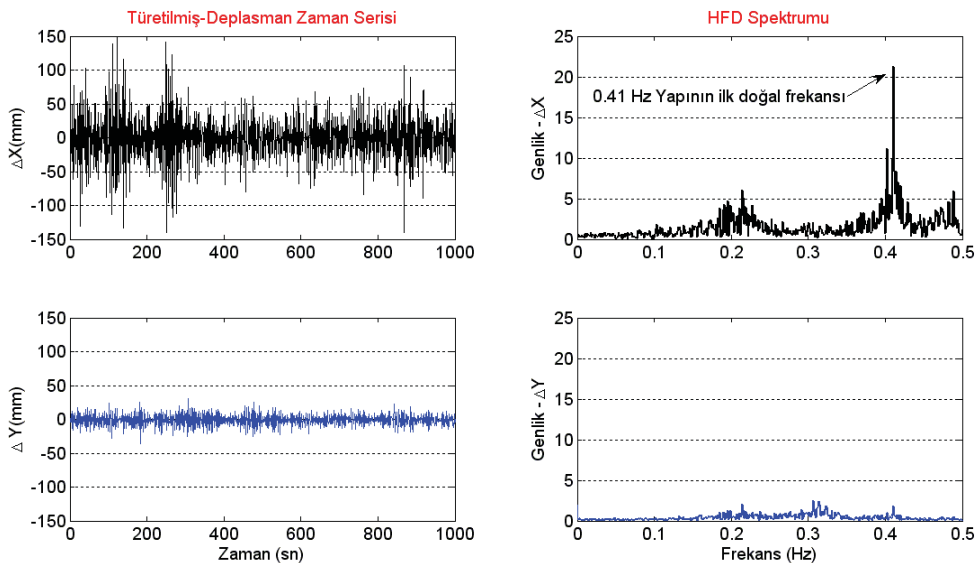
Sensörlerin karşılaştırılması amacıyla, GPS ve eğim sensörü eksenlerinin bir birine dönüşümünde benzerlik ya da bir başka isimle Helmert dönüşüm yöntemi kullanılmıştır. Her iki sensöründe aynı bina üzerinde olması ve sensörlerle toplanan verilerin binanın bağıl hareketlerini yansıtan kısmı ile ilgilendiği için, benzerlik dönüşümündeki ölçek faktörü 1, koordinat eksenlerindeki öteleme miktarları 0 kabul edilmiştir. Böylece dönüşüm, sadece eksenler arasındaki dönüklüğün giderilmesi şeklini almıştır. Dönüşüm, aşağıdaki dönüklük matrisi yardımı ile gerçekleştirilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \Delta \bar{X}_i^{nível} \\ \Delta \bar{Y}_i^{nível} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta X_i^{nível} \\ \Delta Y_i^{nível} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Burada,

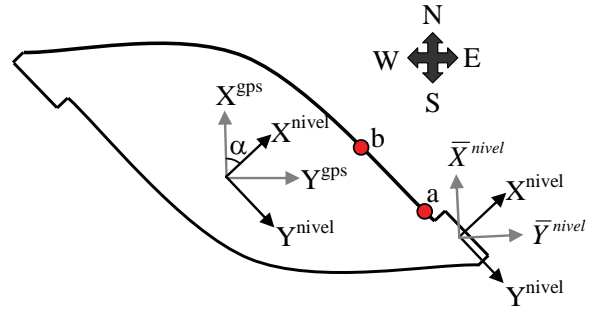
$\Delta X_i^{nível}$, $\Delta Y_i^{nível}$: (1) formülüne göre koordinat merkezine indirgenmiş dönüştürülecek koordinat sistemi

$\Delta \bar{X}_i^{nível}$, $\Delta \bar{Y}_i^{nível}$: X^{GPS} ve Y^{GPS} sistemine paralel olan yeni koordinat sistemi



Şekil 11: Eksen dönüşümü uygulanmış türetilmiş-deplasman zaman serisi ve HFD spektrumları

a : iki sistem arasındaki dönüklük açısı



Şekil 10: Sensör koordinat eksen yönleri ve aralarındaki dönüklük açısının belirlenmesi

İki sistem arasındaki α dönüklük açısı, bina üzerinde yapılan ilave jeodezik ölçmeler sonucunda hesaplanmıştır. Bu sebeple dönüklük açısı α , $Y^{nível}$ eksenini boyunca bina üzerinde belirlenen ardışık a ve b noktaları üzerinde statik GPS ölçmeleri sonucu koordinatların hesaplanması ile elde edilmiştir (Şekil 10). Dönüklük açısı α , aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır (YİĞİT vd. 2010-b).

$$\alpha = \arctan\left(\frac{Y_a - Y_b}{X_a - X_b}\right) - 100^g \quad (4)$$

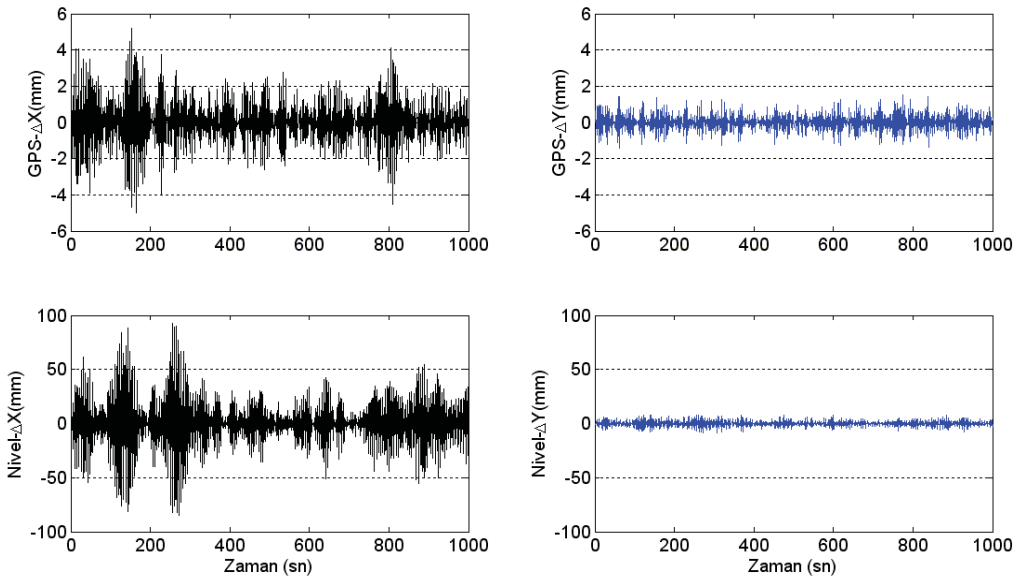
$X^{nível}$, $Y^{nível}$ eğim sensörü koordinat sistemi (3) formülü yardımı ile X^{GPS} , Y^{GPS} GPS projeksiyon sistemine paralel olan $\bar{X}^{nível}$, $\bar{Y}^{nível}$ koordinat sistemine dönüştürülmüştür (Şekil 10). Dönüşüm uygulanmış yeni sistemdeki zaman serisi ve HFD spektrumlarına ilişkin grafikler Şekil 11'de görülebilir. Şekil 9 ile Şekil 11 karşılaştırıldığında dikkate değer bir biçimde hem zaman alanında hem de frekans alanında farklılıklar göze çarpmaktadır.

Dikkat edilirse, dönüşüm sonrası, ΔY bileşeninde de 0.41 Hz frekans değerinde bir sıçrama artık göze çarpmamaktadır. Şekil 8 ve Şekil 11’de HFD spektrumları binanın ilk doğal frekansı olan 0.41 Hz frekans değeri açısından karşılaştırıldığında, her iki sensörün frekans genliklerinin büyüklükleri göz önüne alınmaksızın, sadece ΔX bileşeninde sıçrama yaptığı ve her iki koordinat bileşeni yönünden benzerlik gösterdiği rahatlıkla görülebilir(YIĞİT vd. 2010-b).

4.3.1. Dinamik Bileşenlerin Band Geçiren Filtre Yardımı ile Karşılaştırılması

GPS zaman serileri, sinyal yansıma hatasının etkileri ve diğer atmosferik gecikme, alıcıdan kaynaklanan gürültü vb. GPS hataları yüzünden farklı periyodlu ve genlikli dalga-

lanmalar içermektedir. Böylelikle, zaman serilerinde sadece yapının sinyalleri değil, aynı zamanda GPS’ den kaynaklanan hatalarda bulunmaktadır. Eğim sensörü verileri deney süresince GPS’e göre oldukça daha az gürültü içermektedir. Her iki sensörün kendine özgü gürültüleri sebebiyle zaman serilerinde bozulmalar oluşmaktadır. Her iki sensörün, binanın dinamik bileşeni yakalama performanslarının karşılaştırılabilmesi amacıyla band geçiren bir filtre ile 0.41 Hz olan binanın ilk doğal frekansı haricindeki frekanslar bastırılmış ve zaman serisi yeniden oluşturulmuştur. İki sensörün zaman alanındaki dinamik bileşenin karşılaştırılması amacıyla, Chebyshev 1. tip ve 2. dereceden band geçiren filtre uygulanmıştır. Filtreleme sonucu elde edilen genlik-zaman ilişkisi Şekil 12 görülebilir.

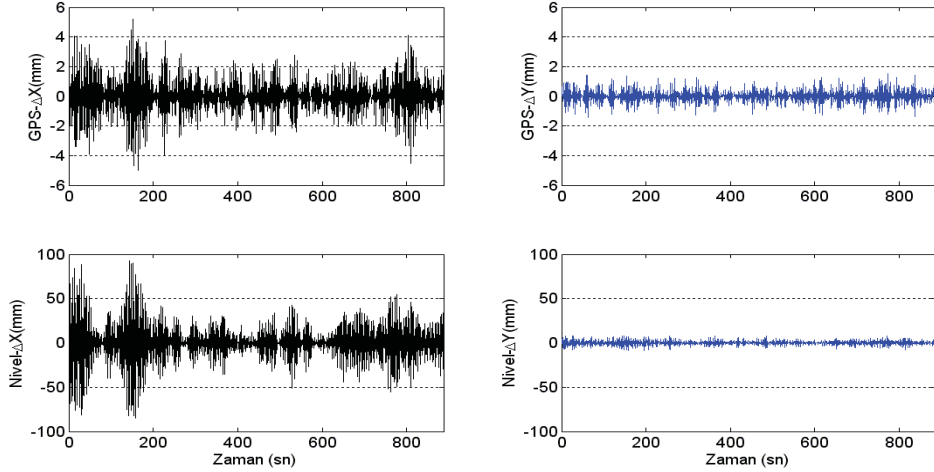


Şekil 12: Filtrelenmiş GPS ve eğim sensörü zaman serileri

Şekil 12 incelendiğinde filtreleme sonrası, GPS zaman serisinde sinyal yansıma hatasından kaynaklanan periyodik dalgalanmaların yok olduğu ve sadece hareketin dinamik bileşenin ortaya çıktığı görülebilir. GPS ve eğim sensörünün genlik – zaman ilişkisi karşılaştırıldığında belirli bir zaman gecikmesiyle benzerlik gösterdiği görülebilir. GPS zamanı ile eğim sensörünün bağlı olduğu bilgisayar zamanı arasındaki farkın belirlenmesi amacıyla, çapraz korelasyon uygulanmıştır. Çapraz korelasyon sonucu, ΔX bileşeninde zaman kayıklığı % 64’lük bir korelasyon ile, 113 sn çıkmıştır. ΔY bileşeninde korelasyon ihmal edilebilir derecede düşüktür.

Bu bileşendeki korelasyon yokluğu, binanın Y^{GPS} eksenini boyunca hareket etmediğinden ve zaman serilerinde görülen küçük genlikli rastgele hareketlerin, sinyal değil, GPS ve eğim sensörünün beyaz gürültüleri yüzündendir.

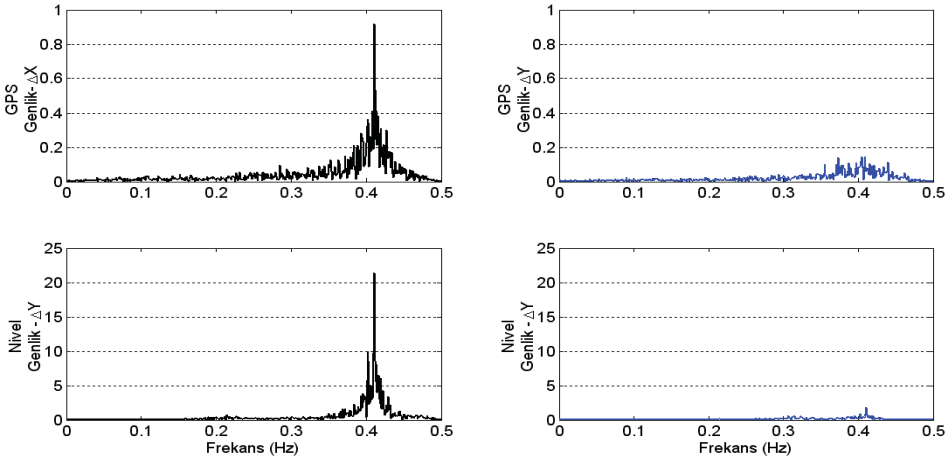
Çapraz korelasyon sonrası hesaplanan iki sistem arasındaki 113 sn’lik gecikme ortadan kaldırılmıştır (Şekil 13). Şekil 13’den açıkça görüldüğü gibi GPS ve eğim sensörü verileri ΔX bileşeni yönünde benzerlik göstermektedir. Şekil 13, titreşimin genliği açısından dikkatle incelendiğinde, GPS ve Eğim sensörü arasında anlamlı derecede bir ölçek farkı rahatlıkla görülebilir.



Şekil 13: Filtrelenmiş ve aynı zamana getirilmiş GPS ve eğim sensörü zaman serileri

Filtrelenmiş serilerin, frekans ve genlik ilişkilerinin görülmesi ve yorumlanması amacıyla, Şekil 13'teki zaman serilerinin HFD spektrumları Şekil 14'de verilmiştir. Şekil 13'te her iki sensöre ait ΔX bileşeni incelendiğinde, eğim sensörü genlik

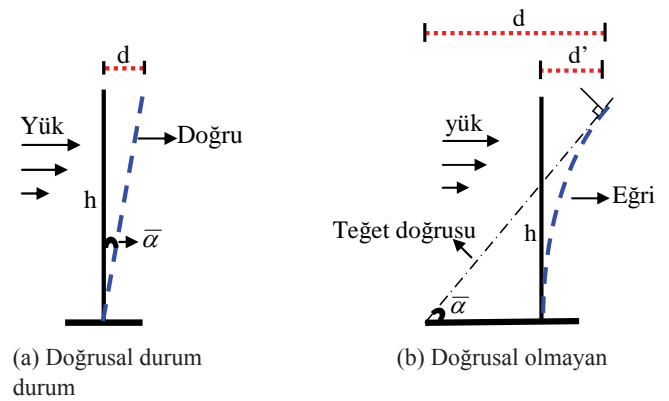
değerinin GPS genlik değerinden büyük olduğu ΔY bileşeni incelendiğinde ise her iki sensörün HFD spektrumlarında 0.41 Hz frekansında bir sıçrama olmadığı görülebilir.



Şekil 14: Filtrelenmiş zaman serilerinin HFD spektrumları

Bu noktada, neden Eğim sensöründen türetilmiş deplasman değerleri GPS deplasman değerlerinden farklı sorusu akla gelmektedir? (2) formülü incelendiğinde, eğim değerinden deplasman değerine dönüşümde objenin düşey eksenini boyunca her noktasındaki eğiminin aynı olması gereklidir. Bir başka deyişle objenin bir bütün olarak doğrusal bir hareket göstermesi gerekmektedir (Şekil 15-a). Fakat yüksek bir binanın yükler altındaki davranışı doğrusal değildir. Şekil 15, yükler altındaki doğrusal ve doğrusal olmayan durumu göstermektedir. Şekil 15-b yükler altındaki yüksek binanın davranışını, Şekil 15-a ise yüksek binalarda normal şartlar altında olması mümkün olmayan doğrusal hareketi göstermektedir. Eğer bina Şekil 15-a'da gösterildiği şekilde doğrusal davranıyorsa, (2) formülü ile hesaplanan deplasman değerleri GPS'e yakın hatta daha yüksek bir hassasiyet ve doğrulukla elde edilebilirdi. Fakat, bina doğrusal olmayan şekilde davrandığından ve eğim sensörü kurulu olduğu noktadaki teğetin eğimini belirleyeceğinden, gerçekte d' olması gereken deplasman değeri, (2) formülü ile d deplasman değeri olarak elde edilecektir.

Bu durum, neden eğim sensörü ile bulunan deplasman değerlerinin GPS ile ölçülen deplasman değerlerinden yaklaşık 16 kat büyük olduğunu açıkça ortaya çıkarmaktadır.



Şekil 15: Yatay yüklerle maruz kalmış bir yapının doğrusal ve doğrusal olmayan davranışları ve eğim-deplasman ilişkisi

5. Sonuçlar

Bu çalışmada, 30 katlı betonarme bir binanın rüzgar yükü karşısındaki davranışının GPS ve Eğim sensörü verileri ile ölçülmesi ve bu ölçüler yardımıyla doğal frekansların belirlenmesi, değerlendirilmesi ve tam ölçekli izleme projelerinde her iki sensörün benzerlik, güçlü ve zayıf yönleri karşılaştırılması olarak ele alınmıştır.

Yapıya etkiyen rüzgar kuvveti sonrası yapının ilk doğal frekansının harekete geçtiği hem GPS hem de eğim sensörü ile tespit edilmiştir. Yapılan eksen dönüşümleri sonrası, her iki sensörün HFD spektrumları, genlik değerlerindeki sayısal büyüklükler göz ardı edilmeksizin, benzer karakterler sergilemiştir. Her iki sensör ile yapının ilk doğal frekansı 0.41 Hz olarak uyum içerisinde belirlenmiştir. Ölçmeler sonucu elde edilen frekans ile analitik modelden elde edilen teorik frekans arasında %7'lik bir fark olduğu ortaya çıkarılmıştır. Ölçmeler ve hesap sonucu oluşan bu farkın inşaat mühendisliği açısından çok anlamlı olmamakla birlikte, farkın temel sebebi, analitik modelde alınan proje parametrelerinin tam anlamıyla gerçekçi olmadığı, ya da yapının içerisindeki sonradan yapılan bazı düzenlemelerden kaynaklandığı söylenebilir.

Bu çalışma kapsamında, rüzgar yükü karşısında binanın 1 cm altında ve civarında gerçekleşen titreşimlerinin, GPS ile rahatlıkla belirlenebildiği görülmüştür. GPS deplasman değerlerini doğrudan ölçebildiği için yüksek binaların izlenmesinde ve değerlendirilmesinde çok etkili bir ölçme aracıdır. Fakat, GPS sadece binanın en üst noktasına ait deplasman değerlerini ölçebilirken, eğim sensörü binanın üzerinde istenilen her noktada eğim değişimlerini ölçebildiği gerçeği göz ardı edilemez. Her iki sensörün zayıf ve güçlü yönleri göz önüne alındığında, tam ölçekli izleme projelerinde birbirlerini tamamlayıcı nitelikte bilgiler sağlanması, yapıların yükler altındaki davranışlarının izlenmesinde, eğim sensörü gibi geoteknik sensörlerin yanında, GNSS alıcılarının da dahil edilmesi ve sensör entegrasyonlarının önemini vurgulamaktadır.

Yüksek yapıların rüzgar gibi dinamik yükler karşısındaki tepkilerinin belirli aralıklarla ölçülmesi yalnızca davranışlarının anlaşılması, proje kabullerinin ve parametrelerinin değerlendirilmesi değil, aynı zaman da yapı sağlığının değerlendirilmesi açısından da büyük önem taşımaktadır.

Teşekkür

Birinci yazar Haziran 2008 ve Haziran 2009 tarihleri arasında Doktora çalışmasının bir kısmını Sydney-Australia'da University of New South Wales, School of Surveying & Spatial Information Systems de yapması için TÜBİTAK-BİDEB tarafından desteklenmiştir. Birinci yazar, doktora çalışmasına katkı sağlayan ve destekleyen, Prof. Chris Rizos, Linlin Ge, Xiaojing Li ve yazarlar yapının analitik modelini oluşturan M.Hakan Arslan'a teşekkür eder. Ayrıca bu çalışmaya, 06101026 nolu proje ile maddi destek sağlayan Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Koordinatörlüğüne, söz konusu binada bilimsel araştırma yapılmasına izin veren Konya Rixos Hotel yönetimine teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- AIJ : Recommendation for Load on Buildings, Architectural Institute of Japan, Japan, 2005
- BREUER, P., CHMIELEWSKI, T., GORSKI, P., KONOPKA, E., TARCYNSKI, L.: The Stuttgart TV Tower-displacement of the top caused by the effects of sun and wind, *Eng Struct*, 30:2771-2781., 2008
- BROWNJOHN, J.M.W., RIZOS, C., TAN, G.H., & PAN, T.C.: Real-time long-term monitoring and static and dynamic displacements of an office tower, combining RTK GPS and accelerometer data. *Ist FIG Int. Symp. on Engineering Surveys for Construction Works & Structural Eng.*, Nottingham, U.K., 28 June - 1 July, paper TS1.4, CD-ROM procs., 2004
- CHAN, W.S., XU, Y.L., DING, X.L., XIONG, Y.L., DAI, W.J. : Assessment of Dynamic Measurement Accuracy of GPS in Three Directions, *Journal of Surveying Engineering*, Vol. 123, No 3, 108-117., 2006
- ÇELEBİ, M., SANLI, A.: **GPS in Pioneering Dynamic Monitoring of Long-Period Structures** *Earthquake Spectra*. 18(1):47-61, 2002
- DANISCH, L., CHRZANOWSKI A., BOND J., BAZANOWSKI M., (2008). **Fusion of geodetic and mems sensors for integrated monitoring and analysis of deformations**, *13th FIG Symp. on Deformation Measurement & Analysis and the 4th IAG Symp. on Geodesy for Geotechnical & Structural Eng., "Measuring the Changes"*, Lisbon, Portugal, 12-15 May, paper 19, CD-ROM procs., 2008
- ERDOĞAN, H.: **Mühendislik yapılarındaki dinamik davranışların jeodezik ölçmelerle belirlenmesi**, *Doktora tezi*, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006
- GİKAS, V., AND DASKALAKIS, S. : **Full scale validation of tracking total stations using a long stroke electrodynamic shaker**, *XXIII International FIG Congress*, Munich, Oct 8-13., 2006
- GİKAS, V., DASKALAKIS, S. AND STATHAS, D.: **Investigation of the performance characteristics of tracking tachometers: preliminary tests and results**, *Proceedings of the international symposium on modern technologies, education and professional practice in geodesy and related fields*, Sofia, November 3-4., 2005
- HRISTOPULOS, D.T. MERTIKAS, S.P. ARHONTAKIS, I. BROWNJOHN J.M.W.: **Using GPS for Monitoring Tall-Building Response to wind loading: Filtering of Abrupt Changes and Low-Frequency Noise, Variography and Spectral Analysis of Displacements**. *GPS Solut* 11:85-95., 2007
- KJEWSKI, T., KAREEM, A.: **Dynamic Wind Effects: a Comparative Study of Provisions in Codes and Standarts with Wind Tunnel Data, Wind and Structures**, Vol 1, No 1, 77-109, 1998
- LI, Q.S., YANG, K., ZHANG, N., WONG, C.K. AND JEARY, P.: Field Measurements of Amplitude-Dependent Damping in A 79-Storey Tall Building and Its Effects On The Structural Dynamic Responses, *Struct. Design Tall Build.*, 11,129-153, 2002
- LI,X.: **Optimal Integrated Multi-sensor system for Full-Scale Structural Monitoring Based on Advanced Signal Processing**, *PhD thesis*, The University of New South Wales, Australia, 2006
- LI, X., GE, L., AMBIKAIKAJAH, E., RIZOS, C., TAMURA, Y., & YOSHIDA, A.: Full-scale structural monitoring using an integrated GPS and accelerometer system. *GPS Solutions*, 10(4), 233-247, 2006

- LI, X., YOSHIDA, A., TAMURA, Y., RIZOS, C., GE, L., & IMAI, R.,: How hybrid GPS-based surveying techniques can further assist with structural design and construction, 553-562. *Int. Symp. on GPS/GNSS*, Yokohama, Japan, 25-28 November, 2008
- LIU, H.,: Wind Engineering - A Handbook for Structural Engineers, 209 page, Prentice-Hall, New Jersey, 1991
- LOVSE, J.W. TESKEY, W.F. LACHAPPELLE, G. CANNON, M.E.: **Dynamic Deformation Monitoring of Tall Structure Using GPS Technology**. *J Surv Eng ASCE* 121(1):35-40, 1995
- OGAJA, C., RIZOS, C., WANG, J., & BROWNJOHN, J.M.W.,: A dynamic GPS system for on-line structural monitoring. *Int. Symp. on Kinematic Systems in Geodesy, Geomatics & Navigation (KIS2001)*, Banff, Canada, 5-8 June, 290-297., 2001
- PARK, H.S., SOHN, H.G., KIM, I.S., PARK, J.H.,: Application of GPS to monitoring of wind- induced Responses of high-rise buildings, *Struct. Design Tall Spec. Build.* 17:117-132, 2008
- ROBERTS, G.W. MENG, X. DODSON, A.H.: **Structural Dynamic and Deflection Monitoring Using Integrated GPS and Triaxial Accelerometers**. ION GPS 2000. 19-22 September. Salt Lake City, Utah, USA, 2000
- SALAWU, O.S. & WILLIAMS, C., : Review of full-scale dynamic testing of bridge structures, *Engng Struct.*, 17:2,113-121, 1995
- TAMURA, Y.,: **Design issues for tall buildings from acceleration to damping**, *The 11th International Conference on Wind Engineering*, Lubbock, Texas, USA, June 2-5, 2003
- TAMURA, Y., MATSUI, M., PAGININI, L-C., ISHIBASHI, R., YOSHIDA, A., Measurements of wind-induced response of buildings using RTK-GPS., *J Wind eng Ind Areodyn*, 90:1783-93., 2002
- TDY, *Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik*,: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara., 1998
- TS 500-2000, *Betonarme Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları*,: Türk Standartları Enstitüsü, Ankara., 2000
- YİĞİT, C.Ö., İNAL, C., YETKİN, M.,: **Monitoring of Tall Building's Dynamic Behaviour Using Precision Inclination Sensors**, *13th FIG Symp. on Deformation Measurement & Analysis and the 4th IAG Symp. on Geodesy for Geotechnical & Structural Eng.*, "Measuring the Changes", Lisbon, Portugal, 12-15 May, paper 19, CD-ROM procs., 2008
- YİĞİT, C.Ö., İNAL, C., LI, X., GE, L., RIZOS, C., YETKİN, M., ARSLAN, M.H, DOĞANALP, S.,: **Rixos Hotel Binasının Rüzgar Yüklü Karşısındaki Tepkisinin GPS ve Yüksek Presizyonlu Eğim Sensörü Verileri ile Analizi ve Sensörlerin Karşılaştırılması**, 4. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, s.111-121, 14-16 ekim, Trabzon, 2009
- YİĞİT, C.Ö., LI, X., İNAL, C., GE, L., YETKİN, M., ARSLAN, M.H.: **Analysis Of Wind-Induced Response Of Tall Reinforced Concrete Building Based On Data Collected By GPS And Precise Inclination Sensor**, *14th FIG Congress 2010, Facing the Challenges – Building the Capacity, Sydney, Australia, 11-16 April*, 2010-a
- YİĞİT, C.Ö., LI, X., İNAL, C., GE, L., YETKİN, M.: **Preliminary evaluation of precise inclination sensor and GPS for monitoring full-scale dynamic response of a tall reinforced concrete building**, *Journal of Applied Geodesy*, Vol. 4 Issue 2, pages 103-113, ISSN (online) 1862-9024, ISSN(print) 1862-9016, DOI: 10.1515/JAG.2010.010, 2010-b.