

BİNALARDA YAPISAL SAĞLIK TAKİBİ İÇİN ENSTRÜMANTASYON YÖNTEMLERİ

METHODOLOGY OF INSTRUMENTATION FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF BUILDINGS

Sarp DİNÇER¹, Eren AYDIN² ve Himmet GENCER³

ÖZET

Binalarda yapısal sağlık takibi çok yeni bir teknik değildir. Dünya ölçeğinde 20. yy. içinde enstrümente edilmiş ve izlenmiş pek çok örnek bina vardır. Ancak, 21. yy. başlarıyla birlikte bu konuyla ilgili cihazlarda, sensörlerde ve bilgisayar teknolojilerinde yaşanan gelişmeler, yapısal sağlık takibi ile ilgili gerçek dünya uygulamalarının hem içeriğinde hem de sayısında büyük bir ilerlemeye neden olmuştur. Bu ilerleme, yapısal sağlık takibini dinamik yapı davranışı araştırmaları için en gerçekçi yöntem haline getirmiş, inşaat mühendisliği laboratuvarlarını gerçek dünyaya taşımıştır. Böylelikle, şiddetli depremler sonucundaki yıkımlara karşı önlemler alma ve hasar analiz çalışmalarının önünde yeni ufuklar açmıştır. Bu gelişmelere paralel olarak, pek çok yeni cihaz, sensör, yazılım olanakları ve kombinasyonları belirmesi, araştırmacıları, bina sahiplerini ve otoriteleri bunların içinden en uygun yöntemi seçme konusunda zorlamaya başlamıştır.

Bu çalışmada farklı güncel enstrümantasyon olanakları detaylı olarak incelenmiştir. Sensör/sayısallaştırıcı seçimi, kablolu/kablosuz çözümler, kablosuz gps senkronizasyonu ve veri aktarımı, uzaktan gerçek zamanlı izleme, yazılım olanaklarının tamamı bu çalışmaya dahildir. Sensör yerleşimi, montaj teknikleri de incelenmiştir. Gerçek zamanlı ve sonradan analiz yazılımları da çalışmaya dahil edilmiştir. Ortam titreşimi / zorlanmış titreşim test teknikleri, ilgili tamamlayıcı ekipman ve aktivatörler de çalışmanın içindedir. Yöntemler karşılaştırılmış, avantajları dezavantajları tartışılmıştır. Uygulama türüne göre uygun seçim yöntemleri geliştirilmiştir. Son olarak, bir saha çalışmasının sonuçları paylaşılmıştır. Bu çalışmada hem majör, hem de minör hasarlı ve hasarsız iki binanın ivmeölçerler ile ortam titreşimi altında hakim periyot karşılaştırması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Ortam Titreşimi, Yapısal Sağlık Takibi, 24-Bit Sayısallaştırıcı, Düşük Gürültülü İvmeölçer

ABSTRACT

Structural health monitoring of buildings is not a brand new technique. There are many examples of monitored and instrumented buildings in 20th century. However, by the start of the 21st century, the technological developments in the instruments and the computer technologies caused an evolution both at the number and the scope of the real-world applications. This development also paved the way for structural health monitoring to be one of the most realistic techniques for studying the dynamic building behavior, moving the civil engineering laboratories to real-world, carrying out damage detection analysis and taking precautions and preventing the failures against severe earthquakes. In parallel to these developments, a number of instrumentation possibilities and combinations entered into the picture which forces the researchers, building owners and authorities to choose the best fitting methodology. In this study different recent instrumentation possibilities are covered in detail. Selection of the sensors, the digitizers, wireless/cabled solutions, wireless gps synchronization and data transfer,

¹ İnşaat Y. Mühendisi, Teknik Destek Grubu Bilimsel Ölçme Sis.Ltd., Ankara, dincer@teknikdestek.com.tr

² Matematikçi, Yazılımcı, Teknik Destek Grubu Bilimsel Ölçme Sis.Ltd., Ankara, eren@teknikdestek.com.tr

³ Yazılım Mühendisi, Teknik Destek Grubu Bilimsel Ölçme Sis.Ltd., Ankara, himmet@teknikdestek.com.tr

remote/ real-time monitoring, software requirements are all included to this study. Sensor locations and installation techniques are also discussed. Real-time and post analysis software are further included into discussion. Ambient and forced vibration testing techniques, related instruments and actuators are also covered. Methodologies are compared, pros and cons are evaluated, selection guides are developed according to the type of the application. Finally, results of a case study are shared, involving the natural frequency comparison of the undamaged and damaged identical buildings both with major and minor damages.

Keywords: Ambient Vibration, Structural Health Monitoring 24-Bit Digitizers, Low-Noise Accelerometer

GİRİŞ

Tüm İnşaat Mühendisliği yapılarının belirli bir ömrü vardır. Mühendislik bilimi yapım aşamasında tasarım parametrelerine göre en uygun ve en ekonomik çözümü bulur ve uygular. Yaşanan bir aşırı yüklenme (örnek: deprem, sel, patlama, derin kazı vb.) ya da aynı yükün tekrarlı uygulanması, yorulma ya da tahmini operasyonel ömrün dolması gibi durumlar sonucunda yapı yıkılacaktır.

Bu sonuca giderken üç yoldan biri arasında seçim yapmak gerekir:

i) ya yapının ömrü dolmadan ve net bir bilgi olmaksızın ondan vazgeçmek ya da yıkmak,
ii) ya yapının kendi seçtiği zamanda yıkılmasını beklemek,
iii) ya da yapıdaki değişiklikleri izleyerek yıkılacağı zamanı en yakın şekilde tahmin etmek, mümkünse yıkılmadan gerekli onarım ve güçlendirmeyi yaparak devamını sağlamak (veya doğru zamanlama ile yıkarak yenisini yapmak)

Birinci yöntem büyük ekonomik kayba neden olur,

İkinci yöntem daha da büyük ekonomik kayba ve hatta can kaybına neden olur,

Üçüncü yöntem ise en ekonomik çözümü üretir ve can kaybını engeller, kısaca Yapısal Sağlık Takibi olarak isimlendirilir.

Bu çalışmanın kapsamı pek çok farklı inşaat mühendisliği yapısı arasında özellikle binalarda yapısal sağlık takibi için kullanılan enstrümantasyon yöntemleri, cihazlar, sensörler, elektronik sistemler yazılımlar ve bunların uygulanma teknikleri üzerinedir.

Özellikle deprem riskinin yoğun olduğu bölgelerde sismik enstrümantasyonun önemi bir kat daha artmaktadır. Çelebi(2002), USGS(Birleşik Amerika Jeolojik Araştırmalar Kurumu) için hazırladığı raporda sismik enstrümantasyonun ve binalarda ivmeölçerler ile yapılacak izleme çalışmalarının önemini, sağlayacağı katkıları ve uygulanma şekillerini ayrıntılı olarak anlatmıştır. Bu rapor, Amerika Birleşik Devletleri'nde kamu binalarında sismik izlemenin sıklıkla uygulanmasına dair bir tavsiye dokümanı niteliğindedir. Sismik enstrümantasyonun yapı mekaniği laboratuvar çalışmalarının gerçek dünya yüzeyini bir laboratuvara dönüştüreceği belirtilmiştir. Bu çalışmalar sonucunda elde edilecek bilgilerin depreme yönelik tasarım ve çalışmalar pratiğinde eşsiz bir bilgi birikimi ve veritabanı oluşturacağını vurgulamıştır.

Gerçek Zamanlı Yapısal Sağlık Takibi bu konuda en güncel ve eşsiz sonuçlar üreten teknolojilerden biridir. Binalarda yapısal sağlık takibi 20.yy'dan bu yana kullanılan bir teknik olmuştur. Ancak, teknolojinin özellikle 2000'li yıllardan sonra geldiği noktada, yapısal sağlık takibi uygun maliyetlerle erişilebilir hale gelmiştir ve hızla yaygınlaşmaya başlamıştır. San Francisco İnşaat Yönetmeliği(2013) ve Los Angeles Yüksek Yapılar Konseyi'nin konsensüs dokümanında (2008) sismik enstrümantasyon ve yüksek yapılarda ivmeölçerlerin kullanımı ile ilgili tanımlamalar ve yönergeler mevcuttur.

Dinamik Kimliklendirme

Yapısal sağlık takibi temel olarak bir yapının gösterge niteliğindeki önemli parametrelerinin sürekli ya da belli aralıklarla takibi ve analizi anlamına gelir. Bu parametrelerin içine çatlak, strain, tilt(eğiklik) gibi bazı statik değişkenler dahilse de asıl olarak dinamik bir takip, analiz ve kimliklendirme amaçlanır. Şafak(2006), yapısal sağlık takibinde dinamik analizin nasıl yapılacağını ve takip edilebilecek parametreleri ve bunun teknik yöntemlerini anlatmıştır. Genelde yapıya yerleştirilen ivmeölçerler ile yapının çok özel bir karakteristiği niteliğindeki dinamik davranışını

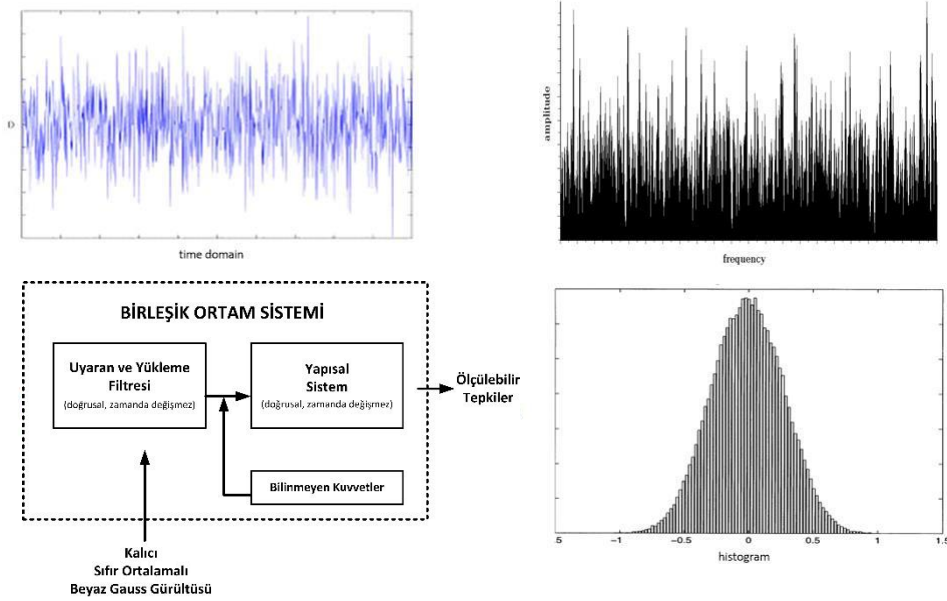
gerçek zamanlı çözmek mümkün olur. Hakim periyot, sönüm oranları, modal frekanslar, mod şekilleri, katlar arası öteleme oranları bu analize dahildir. Yapının dinamik kimliklendirme çalışmalarında modal analiz yöntemleri kullanılır.

Modal Analiz Türleri (Etki-Tepki / Sadece Tepki-Operasyonel Modal Analiz)

Yapıların gerçek dinamik analizini sahada deneysel yöntemlerle gerçekleştirmek modal analiz yöntemleri ile mümkün olur. Bu modal analiz çalışmaları 2 farklı şekilde gerçekleştirilebilir. Bina üstünde tanımlı ve kuvvetli titreşim yaratarak Etki-Tepki içeren modal analiz yöntemi bunlardan birincisidir. İkincisi ise görece daha yeni bir yöntem olan sadece tepkinin analizi üzerinden yola çıkılan operasyonel modal analiz yöntemidir. Dinamik kimliklendirme ve yapısal sağlık takibi çalışmalarının etki-tepki içerikli testlerden günümüzde yoğun olarak sadece tepki ölçümünü içeren operasyonel modal analiz yöntemine doğru evrimi Álvaro Cunha vd.(2006) tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Ortam Titreşimi Testleri ve Operasyonel Modal Analiz

Klasik modal analiz bilinen girdi ve ölçülen tepkiler ile gerçekleştirilir. Ancak inşaat mühendisliği yapılarına dışarıdan bilinen bir yükleme uygulamaya çalışmak hem zor, hem maliyetli hem de risklidir. Bu nedenle özellikle inşaat mühendisliği yapıları için çok pratik ve geçerli bir yöntem olan operasyonel modal analiz tekniği gelişmiştir. Operasyonel modal analizin teorisi detaya ve matematiksel modelin ayrıntılarına girmeksizin ana hatlarıyla bu bölümde özetlenmiştir.



Şekil 1. Beyaz Gauss Gürültüsü – Zaman/Frekans kümeleri ve histogramı ile Birleşik ortam titreşimi sistemi kavramsal şeması

Operasyonel modal analizde sadece tepkilerin ölçümüne dayalı bir modal analiz çalışması hedeflenir. Bu şekilde bir modal analize ortam titreşimi altında modal analiz ya da sadece-tepki ölçümüyle modal analiz adları da verilir. Bu şekilde yapının kendi operasyonel sistematığı içinde kalınır ve üzerinde ekstra yüklemeler yaratmak gerekmez. Yapıya dışarıdan etki eden ve bileşkesinde Beyaz Gauss Gürültüsü'ne yaklaşan dış kuvvetler olduğu kabul edilir. Etraftaki trafik ve rüzgar yükleri, küçük tektonik sarsıntılar bu gruba dahildir. Genelde bu görece küçük kuvvetlerin her frekansta gauss dağılımına benzer bir bileşen içerdiği varsayılır. Sürekli, sıfır ortalamalı beyaz gauss gürültüsü olduğu varsayılan küçük genlikteki kuvvetlerin karşılığında ölçülecek tepkilerden bir modal analiz çalışması yapmak mümkündür. Ancak bunun için önemli bir zorluğun aşılması gerekir. Bu zorluk, binanın üzerinde oluşan çok küçük genliklerdeki tepki titreşimlerinin ve salınımların ölçülebilmesidir. Yapının rijitliğine göre değişmekle birlikte bina türü yapılarda genelde mikro-g seviyesinde olan bu titreşimleri ölçüp ayırt edebilmek için ultra-düşük gürültü seviyesinde ve yüksek hassasiyette

ivmeölçerlere ihtiyaç duyulur. Bu çalışmada yer alan Sensör Seçimi bölümünde bu ivmeölçerlerin sahip olması gereken teknik parametreler ayrıntılı olarak açıklanmıştır.

Gerekli ölçümler yapıldıktan sonra modal analizin gerçekleştirilmesi aşamasına gelinir. Bu aşamayla ilgili tepelerin seçimi(peak picking) gibi basit yöntemlerin yanında daha ileri seviye zaman ya da frekans kümesi tabanlı yöntemler de önerilmiştir. Frekans bölgesinde ayrıştırma (Frequency Domain Decomposition-FDD) frekans kümesinde en yaygın olarak tercih edilen yöntemlerden biridir (Brincker vd.,2001). Zaman kümesinde ise Stochastic Subspace Identification(SSI) tercih edilen yöntemlerdendir (Peeters ve De Roeck, 1999).

Bu çalışmadaki Yapısal Sağlık Takibi öneri ve yöntemlerinin büyük bölümü de operasyonel modal analiz tekniklerine dayanmaktadır.

Modal Analizde Etki-Tepki Yöntemi

Teknoloji ve ölçüm hassasiyetleri henüz günümüzdeki düzeyine erişmeden önce bina tipindeki rijit yapılardan anlamlı ve ayırdedilebilir bir salınım ve titreşim tepkisi ölçebilmek için mutlaka yapı üzerinde görece kuvvetli bir etki yaratmaya gerek duyulmuştur. Zorlanmış titreşim testleri adı da verilen bu yöntem, binanın belirli bir katına genelde eksantrik kütleli sarsıcı (ing. eccentric mass shaker) adı verilen bir titreşim etki oluşturma makinesi yerleştirilerek uygulanır. Şekil-2’de bir örneği gösterilen bu sarsıcı makine bina üzerinde kontrol edilebilir eksen ve frekansta bir titreşim yaratır. Bu titreşimin kuvvet genliği de makineye eklenip çıkartılabilir kütleler aracılığıyla ayarlanır. Makinenin kontrol hassasiyetinin elverdiği kapsamda 0.1-0.5 Hz’lik frekans atlamaları ile yapı üzerinde bir frekans taraması gerçekleştirilir. Aynı anda eş zamanlı olarak binanın verdiği titreşim tepkileri ivmeölçerler aracılığıyla kaydedilir. Bu yöntem sonucunda hem verilen etki hem de alınan tepkiler kayıt altına alındığından Frekans Tepki Fonksiyonu(FRF)’na erişmek mümkün olur.



Şekil 2. İTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü’nün 2014 yılında gerçekleştirdiği Mevcut Binalarda Tam Ölçekli Deneylerle Deprem Performansının Saptanması Projesinde kullanılan TESTBOX™-SHAKER Sarsıcısı

GERÇEK ZAMANLI YAPISAL SAĞLIK TAKİBİNİN UYGULANMASI

Yapısal Sağlık Takibi’ni gerçek-zamanlı olarak uygulayabilmek için gerekli bant genişliğine sahip iletişim altyapılarına, analizlerin bir kısmını veri akışı ile aynı hızda gerçek zamanlı yürütebilecek bilgisayar işlemci gücüne, buna uygun geliştirilmiş cihaz ve yazılımlara ihtiyaç vardır. Günümüz teknolojisinin getirdiği olanaklarla Yapısal Sağlık Takibi gerçek-zamanlı olarak uygulanabilir hale gelmiştir.

Böylelikle yapı bir deprem geçirdiğinde ya da farklı bir zayıflatıcı etkene maruz kaldığında dakikalar mertebesindeki bir sürede yapının taşıyıcı sistemindeki değişimlerin göstergesi niteliğindeki dinamik parametrelerde bir değişim yaşanıp yaşanmadığını farketmek mümkün olabilir. Bundan sonra artık mühendis ve karar vericilerin eline binadaki olası gizli ya da açık hasarları çözümlmelerine yarayacak en önemli araç sunulmuş olur.

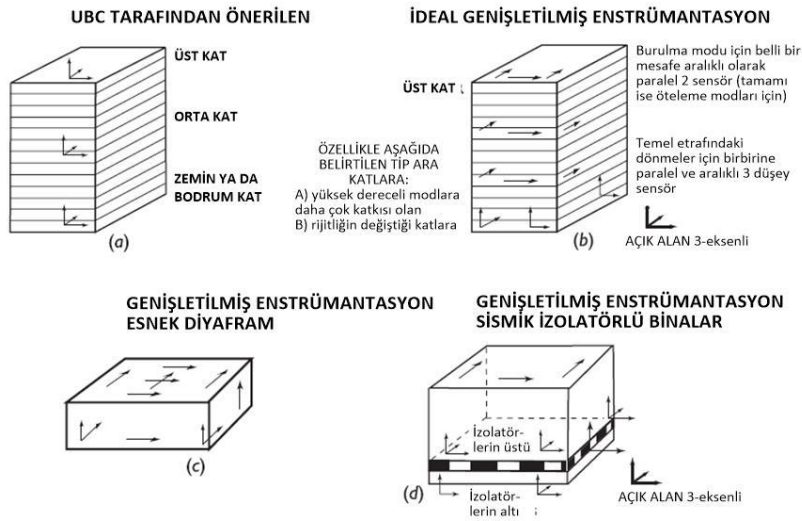
Gerçek zamanlı yapısal sağlık takibi günümüzde geldiği noktada çok önemli bir karar destek sistemi görevi görmektedir. Ancak, karar vericilerin net sonuç ve kararlara ulaşabilmesi için uzmanların post-analizleriyle de desteklenmesi ve ek incelemeler gerekebilmektedir.

Yine de sahadada ortam titreşimi altında ulaşılan bu veriler binanın yapısal frekansları hakkında sunduğu bilgilerle eşsiz bir kaynak oluşturur.

Sensör Yerleşimleri ve Takip Edilen Parametreler

Modal analiz ve yapısal sağlık takibi çalışmasının doğru yapılabilmesi için sensör yerleşimleri büyük önem taşımaktadır. Sensör yerleşimlerinin nasıl yapılması gerektiği ve nedenleri Çelebi(2002)'nin, USGS(Birleşik Amerika Jeolojik Araştırmalar Kurumu) için hazırladığı raporda detaylı olarak açıklanmıştır. Sensör yerleşimleri ile ilgili açıklamalar Şekil-3'te sunulmuştur. Şekil-3'ün (a) kısmında yer alan ABD UBC(Uniform Building Code) yönetmeliğindeki eski yaklaşım, en azından binanın en altına en üstüne ve orta katına 3'er eksenli birer ivmeölçer yerleştirilmesi yönündedir. Ancak bu yaklaşım, günümüz koşullarında yeterli olmadığından geliştirilmiştir.

Sensör yerleşimlerinin doğru yapılabilmesi aslında hangi parametrelerin ölçülmek ve takip edilmek istediği ile ilgilidir. Temel olarak takip edilecek parametreler, yatay x yönündeki öteleme modları, yatay y yönündeki öteleme modları, burulma modları (düşey eksen etrafında), temel etrafındaki rijit yapı dönmeleri – (x ve y eksenleri etrafında), yapı zemin etkileşimi ya da sismik izolatör performansı, tepe deplasmanı, kat deplasmanları, katlar arası öteleme oranları olarak listelenebilir.



Şekil 3. Binalarda ivmeölçer yerleşimi. Çelebi(2002)'nin, USGS(Birleşik Amerika Jeolojik Araştırmalar Kurumu) için hazırladığı rapordan Türkçeleştirilerek alıntılanmıştır.

Üç Eksenli İvmeölçerlerden Tek/İki/Üç Eksenli İvmeölçerlere Geçiş Zorunluluğu

Her ne kadar eski yaklaşımla belirli katlara üç-eksenli ivmeölçerler yerleştirmek hem planlama hem de montaj açılarından daha pratik gibi görünse de, daha çok anlamlı parametreyi takip edebilmek için hem tek, hem iki, hem de üç eksenli ivmeölçerlerden faydalanmak bir zorunluluk haline gelmiştir. Örnek olarak burulma modu temel olarak bir dönme hareketine dayanmaktadır. Bu nedenle aynı katta ölçüm alınacak iki sensör arasında bir moment kolu açıklığı oluşturmak gereklidir. Aynı katta x ya da y yönünde anlamlı bir aralıkla yerleştirilecek 2 farklı sensöre ihtiyaç duyulur. Tek eksenli sensörler bu açıdan hem daha verimli hem de daha pratik bir yaklaşım sunarlar. Tek ve iki eksenli ivmeölçerlerin ölçüm enstrümanları içinde yer alması ölçülecek parametreye göre ivmeölçer seçeneği sunar. Tüm ivmeölçerlerin üç-eksenli olması durumunda pek çok eksenden gelen ivme bilgisi fazladan, gerekli olmayan bilgi ve ek maliyet anlamına gelmektedir.

Temel Sensör Yerleşim Kuralları

Sensörlerin yerleşimi ile ilgili her araştırmacının farklı bir tercihi olabilir, ancak öneri amacıyla aşağıda bir akış sunulmuştur. Gerekli parametrelerin takibi için genel kurallar şu şekilde özetlenebilir:

1)En üst kata mutlaka ivmeölçerler yerleştirilir. Tepe noktadaki deplasmanlar özellikle yüksek dereceli modlara katkısı nedeniyle modal analiz için kritik önem taşımaktadır.

2)Kritik olarak belirlenen(özellikle yüksek dereceli modlara daha çok katkısı olan ve rijitliğin değiştiği) ara katlara ivmeölçerler yerleştirilir.

3) Sensörlerin bulunduğu her katta x ve y yönündeki yatay modal frekansların elde edilebilmesi için mutlaka ilgili katlara x ve y yönünde ölçüm alan ivmeölçerler yerleştirilmelidir.

4) Sensörlerin bulunduğu her katta burulma modunun saptanabilmesi için aynı yönde paralel olarak anlamlı bir aralıkla yerleştirilecek 2 farklı sensöre ihtiyaç duyulur.

5) İlk 4 maddeden çıkışla en üst katta ve sensör bulunmasına karar verilen ara katlarda, en optimum yaklaşım, bir noktaya tek-eksenli bir sensör yerleştirmek, belirli bir açıklık bırakarak ikinci bir noktaya da 2-eksenli bir ivmeölçer yerleştirmektir. Böylelikle ilgili katın hem x-öteleme, hem y-öteleme, hem de burulma modlarına katkısı ölçülebilir.

6) Temel etrafındaki rijit yapı dönmelerinin takip edilebilmesi için bodrum kata düşey eksene de sahip sensörler yerleştirilmelidir. Temel etrafında hem x, hem de y ekseni etrafındaki dönmelerin takip edilebilmesi için birbirinden aralıklı 3 noktadan düşey ivme takibi yapmak gereklidir.

7) Madde 6'daki temel etrafındaki rijit dönmelerin takibi ile ilgili gereklilik, diğer ilk 5 maddede ulaşılan öteleme ve burulma modlarının saptanmasına yönelik gerekliliklerle birleştirildiğinde, zemin ya da bodrum kat için Şekil-3-b'de çizilen optimum sonuca ulaşılır. Buna göre birbirinden aralıklı 3 noktaya sensör konur.

8) Yapı zemin etkileşiminin tespiti amacıyla binanın ötesinde uygun bir açık alana zemin üzerine 3 eksenli bir sensör yerleştirilir. Burada amaç oluşan bir sarsıntıda zeminden alınan ivmeler ile bunun bina üzerindeki boyutu ve etkisi arasında bir karşılaştırma yapabilmektir.

9) Eğer binanın temelinde sismik izolatörler kullanılıyorsa, sismik izolatörlerin performansının ve ne kadar bir sönümlenme gerçekleştirdiğinin takibi içinde ayrıca sensöre ihtiyaç duyulur. Sismik izolatörlerin hemen altına ve hemen üstüne sensörler yerleştirilir.

Yukarıdaki sensör yerleştirme akışı takip edildiğinde tek bir ara katın takip için seçildiği durumda bir binanın takibi için minimum 12 eksende ivme ölçümü gerekir. Yapı zemin etkileşimi buna katılırsa minimum eksen sayısı 15 olur. Eğer kritik ara kat sayısı arttırılırsa her kat için sisteme 3 eksen daha eklemek gerekir. Bu tercihlerde maliyete ana etken sensör sayısı değil, eksen sayısıdır.

Sistemin Bileşenleri

Binalarda kullanılacak bir yapısal sağlık takibi sisteminin bileşenleri şu şekilde listelenebilir: **(i) Dinamik sensörler** (İvmeölçerler -1/2/3 eksenli), **(ii) Statik sensörler** (gerekliyse Tilt-eğiklik ölçerler, çatlak ölçerler, birim deformasyon ölçerler (ing. Strain gauge), çevresel sensörler-sıcaklık, rüzgar, nem vb.), **(iii) Veri Toplama Sistemi (Sayısallaştırıcı)** **(iv) analog sensör kabloları** (gerekliyse), **(v) Tamamlayıcı Ekipman ve Ağ Cihazları** (gerekliyse, lokal bilgisayar, kablolu ya da kablosuz Ethernet ağı, ADSL/3G Modem-uzağa veri transferi için), **(vi) Yazılımlar** (Gerçek Zamanlı Veri Toplama, Görüntüleme, Kayıt, Analiz Yazılımı ve Post-Analiz Yazılımı)

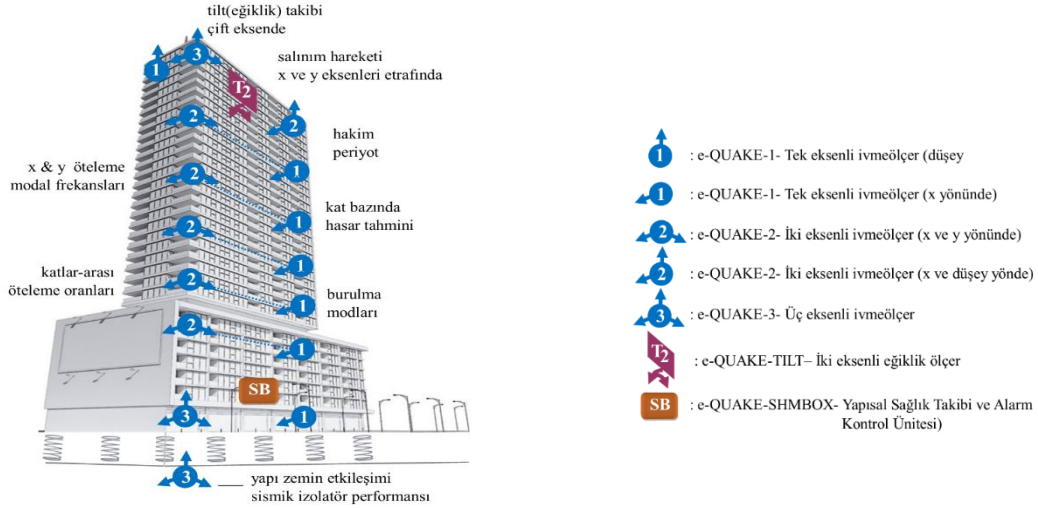
YAPISAL SAĞLIK TAKİBİ İÇİN UYGUN ENSTRÜMANLARIN SEÇİMİ

Tipik bir binada takip edilebilecek parametreler ve sensörlerin yerleşimi Şekil-4'te özetlenmiştir. Bu takibin gerçekleştirilmesi için hangi seçeneklerin olduğu, güçlü ve zayıf yönleri aşağıda anlatılmıştır.

Sensörler

Esas olarak amaç dinamik kimliklendirme ve modal analiz olduğundan aslında yapıda gerçek-zamanlı oluşan deplasmanların (ötelemeler) ölçümüne ihtiyaç duyulur. Ancak, doğrudan deplasman ölçümü bir referans olmaksızın çok güç olduğundan, çok daha kolay kullanım olanakları sunan ivmeölçerler tercih edilir.

Modal analiz çalışmalarında ivme değerinin çift integrali ile pozisyon değerine ulaşmak mümkün olur. Bu aşamada en büyük zorluk ivme sensöründen gelen veride bulunan tanımsız bir elektronik gürültüden kaynaklanır. Her ivme sensöründen gelen sinyal belli bir miktarda gürültüyü de içinde barındırır. Sinyalin bu gürültüden arındırılması için çeşitli sinyal temizleme aşamalarından sonra sinyalin tespit edilen modal frekanslar etrafında bant geçiren filtreler ile filtrelenmesi tekniklerine başvurmak gerekir.



Şekil 4. Binalarda Yapısal Sağlık Takibi - Parametreler ve enstrüman yerleşim özeti

Ancak, tüm bunların öncesinde sensör seçimi aşamasında mümkün olduğunca düşük gürültü seviyesinde sensörün seçimi çok kritiktir. Binalar genelde diğer inşaat mühendisliği yapılarına oranla daha rijit olduğundan ortam titreşimi altında anlamlı, ayırt edilebilir sinyallere ulaşmak için 1 mikro-g/Kök-Hz tercihan 300 nano-g/Kök-Hz seviyesinin altında bir gürültü yoğunluğuna sahip sensörler tercih edilmelidir. Sensör seçiminde dikkat edilmesi gereken parametreler Tablo-1’de sunulmuştur.

Tablo 1. İvmeölçer Seçiminde Dikkat Edilecek Teknik Özellikler

Teknik Özellik	Değer
Ölçüm Aralığı	$\pm 0,5 - \pm 3$ g
RMS Gürültü	$< 1 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}} - < 300 \text{ nano-g}/\sqrt{\text{Hz}}$
Dinamik Aralık	110 – 120 dB
Frekans Tepkisi	0 ya da 0,1- 100 Hz
Besleme Voltajı ve Sensör Tipi	Veri Toplama Sistemi ile Uyumlu
Sıcaklık ile Değişim	Makul sınırlar içinde kalmalı

Bunun dışında sensör seçiminde sensörün tipi de hem teknik özellikler hem de maliyet açısından önemlidir. Bu konuda değerlendirilebilecek 4 tip ivmeölçer mevcuttur:

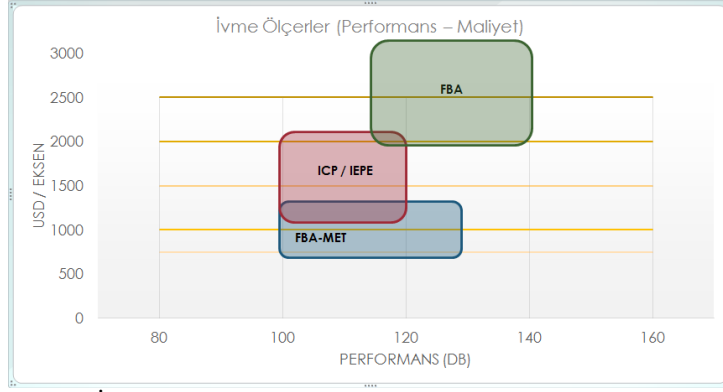
1)Konvansiyonel Kuvvet Dengeli(ing.Force Balance) İvmeölçer (FBA) – (Kuvvet geribeslemeli, Uzun periyotlu sinyallerin ölçümünde)

2)MEMS İvmeölçer – Kuvvet geribeslemeli (0,1 Hz-400 Hz arası çok iyi performans-Si-Flex™ tipi ivmeölçerlerin üretiminin durdurulmasından sonra güncel durumda binaların ortam titreşimi testleri için yeterli nitelikte bir MEMS ivmeölçer sunulamamaktadır)

3)FBA-MET İvmeölçer – Kuvvet Dengeli/ Kuvvet geribeslemeli (0,1 Hz-120 Hz arası çok iyi performans)

4)Piezo İvmeölçer – ICP/IEPE (Yüksek frekansların ölçümünde, makine mühendisliğinde)

Ayrıca Şekil-5’te maliyet ve performans karşılaştırması amacıyla mevcut 3 tip için(1,3,4) grafiksel bir analiz sunulmuştur.



Şekil 5. İvmeölçer tiplerine göre performans/maliyet karşılaştırması

Veri Toplama Sistemi(Sayısallaştırıcı)

Yapısal Sağlık Takibi'nde en az sensör seçimi kadar önemli olan bir başka unsur da veri toplama sisteminin seçimidir. Veri Toplama Sistemi'ne kimi zaman sayısallaştırıcı da denir. Temel görevi birden çok sensörden gelen analog sinyalleri eş zamanlı ve yüksek hassasiyetli olarak dijital veriye çevirip, kaydetmek, bilgisayara aktarmak ya da dijital hatlar üzerinden transfer etmektir. Bu kritik bileşenin seçimine geçmeden önce bazı temel kavramların bilinmesi gerekir.

Çözünürlük - Etkili Çözünürlük(ENOB) – Sinyal Gürültü Oranı(SNR)- Dinamik Aralık(DR)

Bunlardan birincisi ölçüm hassasiyetidir. Çözünürlük(R), etkili çözünürlük(ENOB), sinyal gürültü oranı(SNR) ve dinamik aralık gibi kavramlarla ifade edilir. Binalarda yapısal sağlık takibinde kullanılan sayısallaştırıcılar 24-Bit olmalıdır. Çözünürlüğü 24 bit olan bir sayısallaştırıcı(1), sinyali toplam 2^{24} toplam ölçüm adımına(TÖA) (2) bölerek sayısallaştırır. Örnek olarak ölçebildiği sinyal aralığının genişliği(G) 10 volt ise bu aralığı teorik sınır olarak 596 nano-Volt'luk (3) adımlarla örnekleyebilir.

$$R = n \text{ Bit } (n = 24) \quad (1)$$

$$TÖA = 2^{24} = 16777216 \quad (2)$$

$$ÖA(\text{Volt}) = G \div TÖA = 10 \text{ Volt} \div 16777216 = 596 \text{ nanoVolt} \quad (3)$$

Ancak çözünürlüğü 24-Bit olan sayısallaştırıcıların etkili çözünürlüğü bunun altında olur. Araştırmacıyı daha çok ilgilendiren etkili çözünürlüktür. Bir başka deyişle 24-Bit içinden ne kadarının anlam ifade eden seviyede olduğudur.

Dinamik aralık ve Sinyal Gürültü Oranı birbirine çok yakın kavramlardır. Sinyal gürültü oranı ölçülebilen en yüksek değerlerin cihazda kaçınılmaz olan arka plan gürültüsüne oranını ifade eder. Dinamik Aralık(DR) da dB(desibel) cinsinden ifade edilen sayısallaştırıcının ölçebildiği en yüksek sinyalin en küçük sinyale oranı gösteren bir değerdir. Bazı durumlarda bu 2 değer aynı kabul edilebilir. SNR ya da DR ne kadar büyük ise çözünürlük ve ölçüm kabiliyetinin o kadar yüksek olduğunu belirtir. SNR ile ENOB arasındaki ilişki (4)'te verilmiştir. Örneğin 116 dB'lik bir cihazın etkili çözünürlüğü 19-bit'tir. Yapısal Sağlık Takibi çalışmalarında genelde 120-130 dB arası cihazlar tercih edilir, ancak tek başına bu değer anlamlı değildir. Çünkü, ölçüm hızına göre aynı cihaz için bu değer değişebilir, o nedenle hangi ölçüm hızında bu değer verildiğini de kontrol etmek gerekir.

Bu aşamada fazladan veri örnekleme (oversampling) ve veri azaltımı (downsampling) teknikleri devreye girer. Bir sinyal üzerinden fazladan veri alınıp bu veri azaltıldığında etkili çözünürlük artar ve dinamik aralık genişler. Her 1 bit çözünürlük artışı için sinyal, 4'ün o kadar kuvveti kadar fazla örneklenmelidir. Bu ilişki, w-istenilen bit artışı, f_{os} -fazla örnekleme frekansı, f_s : daha yüksek çözünürlüklü elde edilen örnekleme frekansı olmak üzere (5)'te verilmiştir.

$$SNR(\text{dB}) = (6.02 \times ENOB) + 1.76 \quad (4)$$

$$f_{os} = 4^w \cdot f_s \quad (5)$$

Etkili çözünürlük artışı, dinamik aralık artışı ve fazladan örnekleme(O/S) arasındaki genel kural basitleştirilerek Şekil-6'da sunulmuştur.



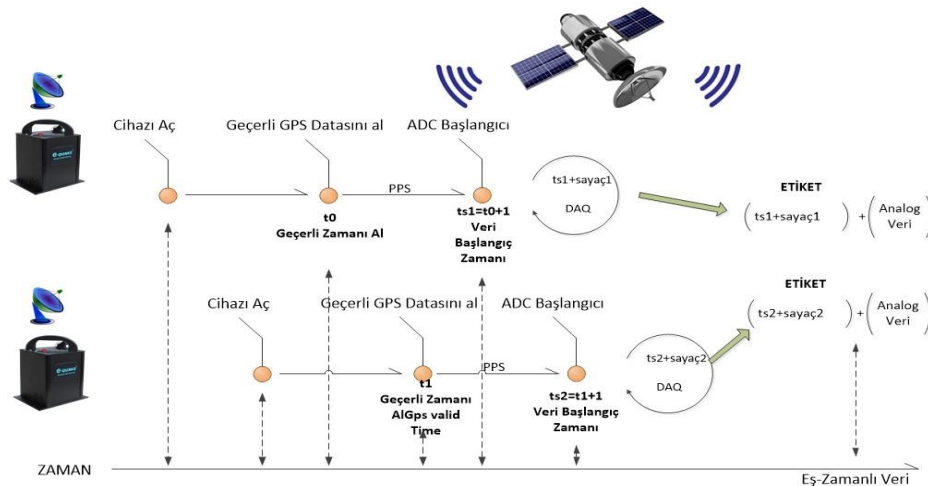
Şekil 6. Etkili çözünürlük artışı, dinamik aralık artışı ve fazladan örnekleme(O/S) arasındaki genel kural

Veri Toplama Sisteminin (Sayısallaştırıcı) Seçimi

Yukarıda anlatılan kavramları göz önünde bulundurarak bir sayısallaştırıcının seçimi için 3 önemli nokta şu şekilde özetlenebilir. (i) Sensörden daha iyi performansa sahip olmalı, (ii) eş-zamanlı örnekleme yeteneğine sahip olmalı, (iii) analog anti-aliasing filtreler sahip olmalı. Yapısal sağlık takibinde Tablo-1'de belirtildiği gibi sensörlerin genelde 110-120 dB performansa sahip olacağı ve örnekleme frekanslarının da 100-200 Hz seviyesinde olacağı göz önünde bulundurulursa, genelde 100-200 Hz'de 120-130 dB'lik dinamik aralığa sahip bir sayısallaştırıcı tercih edilebilir. Eş zamanlı örnekleme modal analiz için kaçınılmaz bir tercihtir. Genelde 1 mikro-saniye ve altında senkronize örnek toplayabilen sistemler seçilir. Analog anti-aliasing filtreler yüksek frekanslardan düşük frekanslara yanıtıcı frekans bileşenlerinin yansımamasını sağlamaktadır. TESTBOX™/e-QUAKE™ serisi cihazlar, Teknik Destek Grubu tarafından yukarıda bahsi geçen özelliklere göre geliştirilmiştir.

GPS Senkronizasyonu

Bir önceki bölümde de belirtildiği gibi modal analize uygun bir veri toplanabilmesi için binada farklı lokasyonlarda bulunan sayısallaştırıcıların arasında zaman senkronizasyonu için bir yöntem olmalıdır. Bu eşzamanlılığı sağlamanın bir yolu her sayısallaştırıcıda bir GPS modülü kullanmaktır. Bu şekilde, tüm sayısallaştırıcılar bağımsız olarak analog-dijital çevrim işlemini UTC'ye göre 1 mikro-saniye ya da daha iyi bir senkronizasyonla gerçekleştirirler. Teknik Destek Grubu tarafından geliştirilmiş TESTBOX™/e-QUAKE™ serisi cihazlarda kullanılan özel yöntem Şekil-7'de sunulmuştur. Bu çözümü farklılaştıran ve eş-zamanlılığı en iyi noktaya taşıyan en önemli nokta, uydudan gelen zamanlama sinyalinin doğrudan Analog-sayısal çeviricileri sürüyor olmasıdır. Tüm bağımsız sayısallaştırıcıları aynı anda başlatmak mümkün olmayacağından, arada oluşan zaman farkı ise her verinin önüne uydudan alınmış global zaman etiketi ekleyerek çözülmektedir.



Şekil 7. TESTBOX™/e-QUAKE™ serisi cihazlarda kablosuz GPS senkronizasyonu

Kablolu Çözümler, Kablosuz Çözümler

Kablo çekmenin mümkün olduğu durumlarda, özellikle binalarda kablolu sistemler, 7/24 takip için en stabil ve en düşük maliyetli çözümleri üretir. Bunlar bir alt başlıkta merkezi ya da hibrit sistemler

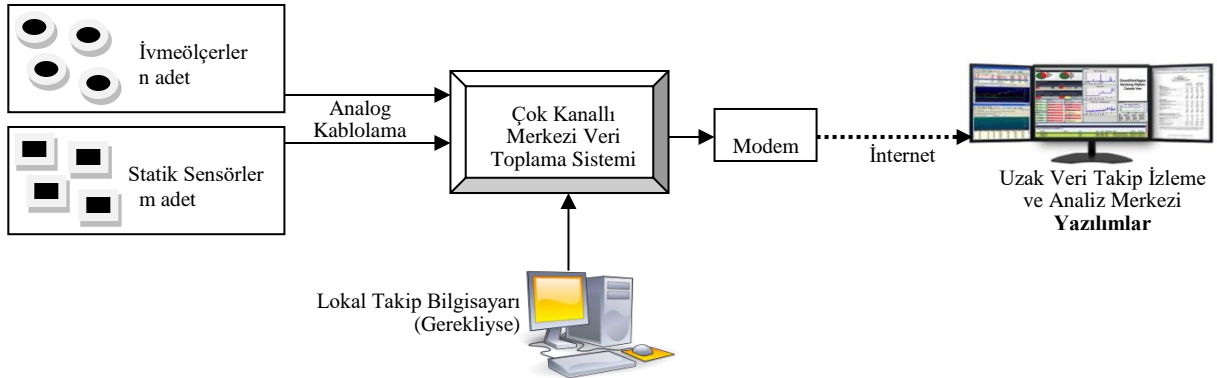
olarak da anılmaktadır. Daha kısa süreli ölçüm ihtiyaçları için ya da kablo çekmenin zor olduğu durumlarda kablosuz çözümler de kullanılabilir.

Kablosuzluk zaman zaman kavram kargaşasına neden olmaktadır. Kablosuz çözümlerin veri iletişimi ve elektrik bağlantısı da dahil tamamen kablosuz olabileceği düşünülmektedir. Oysa yapısal sağlık takibi çalışmalarında en çok zorluk çıkaran kablolar, sayısallaştırmadan sensöre giden analog, kalın ve baştan döşenmesi gereken kablolardır. Bu kabloların elimine edilebilmesi için bir üst maddede bahsi geçen kablosuz olarak GPS desteği ile uydu üzerinden eş-zamanlılık sağlayan sistemler iyi bir çözüm üretir. Her sensör kendi sayısallaştırıcısına sahip olduğundan fazladan analog kabloya ihtiyaç kalmaz. 2. aşamada veri iletişimi de kablosuz ethernet(wi-fi) gibi yöntemlerle ortadan kaldırılabilir. Ancak ethernet kabloları zaten çoğu binada hazır olan ya da çekilmesi çok kolay dijital hatlar olduğundan kablosuz ethernet özel durumlar dışında tercih edilmeyebilir. Bilindiği gibi kablosuz veri iletişiminin kesintiler yaşaması muhtemeldir. Buna karşın yukarıda anlatılmış olan e-QUAKE™-ACC türünde sistemler sadece kendi üzerine kayıt olsa dahi, bu kayıtlar GPS desteği ile 1-mikro saniyeden daha iyi senkronize olduğundan yazılımsal olarak kolaylıkla birleştirip modal analize hazır hale gelirler.

Uygulamanın Projelendirilmesi - Merkezi Sistemler/ Dağıtılmış Sistemler/ Hibrit Sistemler

Merkezi Sistemler

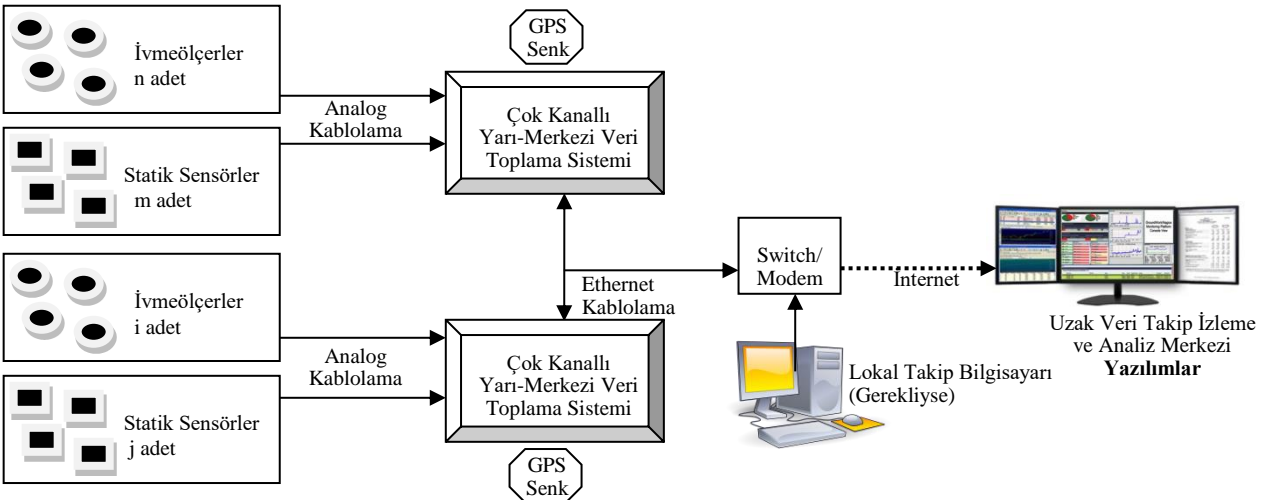
Özellikle 7/24 yapısal sağlık takibi için eğer kablo çekilmesinde bir zorluk yoksa Şekil-8’de gösterilen merkezi sistemler tercih edilir.



Şekil 8. Merkezi Sistem Şeması - Yapısal Sağlık Takibi

Hibrit Yarı-Merkezi/ Yarı Dağıtılmış Sistemler

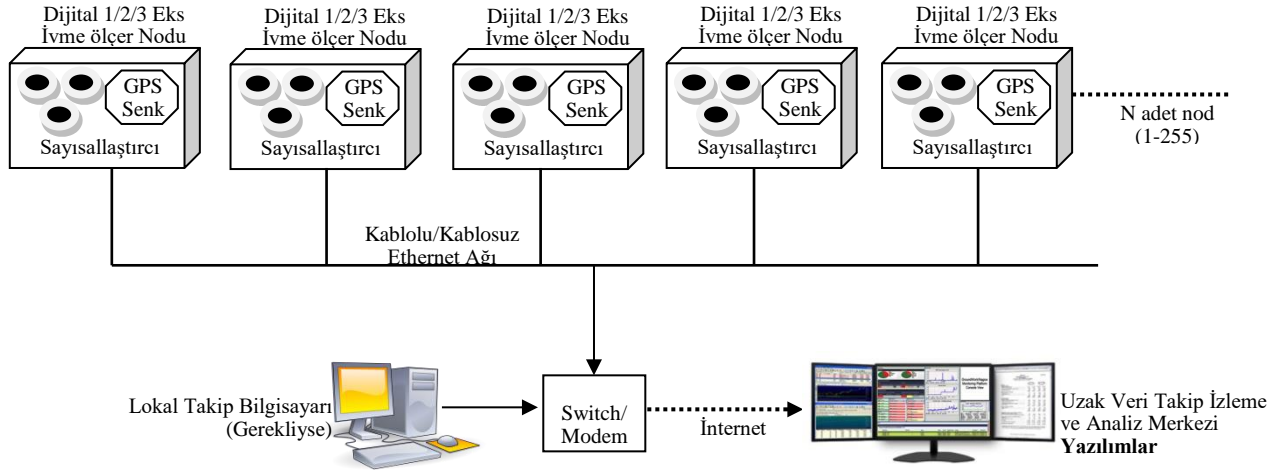
Yapının büyüklüğü ya da ölçülmek istenilen parametrelerin çeşitliliği, eksen sayısının fazlalığı ya da projenin daha geniş bir alana yayıldığı durumlarda Şekil-9’da gösterilen yarı dağıtılmış sistemler çok daha etkin bir çözüm üretir.



Şekil 9. Hibrit Yarı-Merkezi/ Yarı Dağıtılmış Sistem Şeması - Yapısal Sağlık Takibi

Dağıtılmış Sistemler

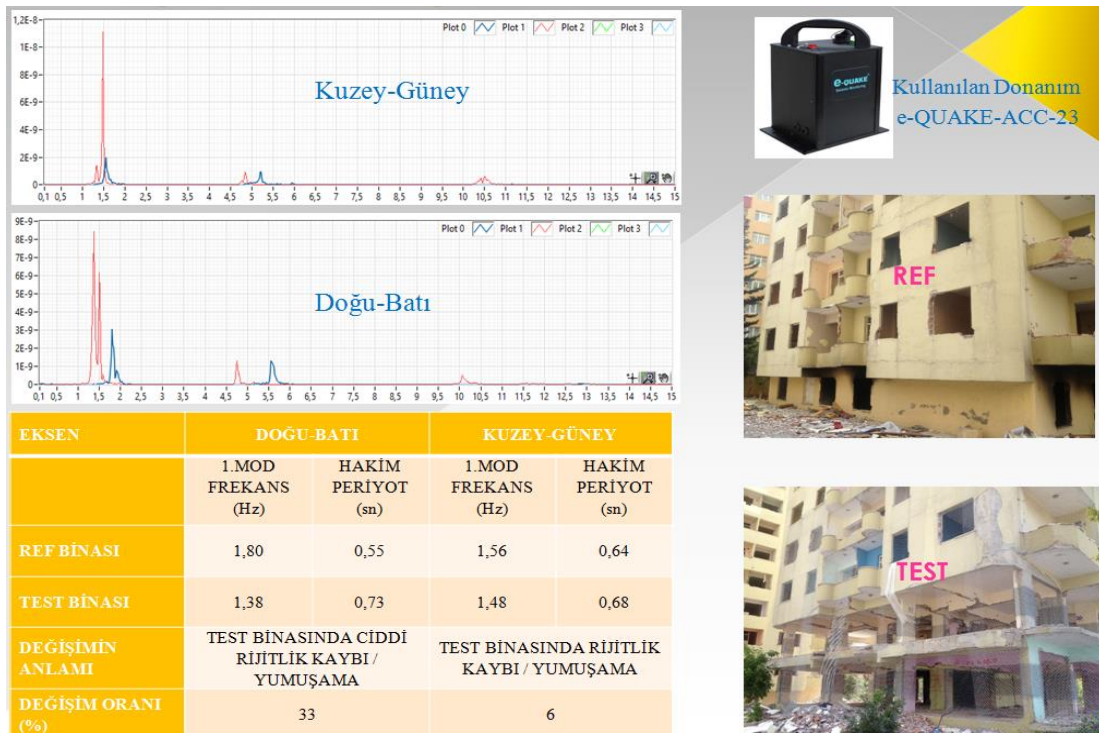
Özellikle daha kısa süreli ölçüm projelerinde ya da kablo çekmenin çok zor olduğu durumlarda Şekil-10'da gösterilen tercih edilir.



Şekil 10. Dağıtılmış Sistem Şeması - Yapısal Sağlık Takibi

BİR YIKIM ALANINDA HASARLI VE HASARSIZ BİNA ÜZERİNDE HAKİM PERİYOT DEĞİŞİM ANALİZİ

Yukarıda bahsedilen TESTBOX™/e-QUAKE™ serisi cihazlarla yürütülen bir saha çalışmasında bir yıkım alanında aynı mimariye sahip, 13 katlı, biri zayıflatılmış diğeri ise zayıflatılmamış iki eş apartmanda ortam titreşimi altında yapılan testler sonucunda hem majör hem de minör rijitlik kayıpları başarı ile saptanmıştır. REF binası orijinal durumundayken, TEST binası yıkım öncesi Doğu-Batı doğrultusunda yaklaşık %30 oranında zayıflatılmış, yıkımın istenilen doğrultuda gerçekleşmesi için Kuzey-Güney yönünde ise minimal zayıflatılma yapılmıştır. Hakim periyot üzerinden ölçülen değerler teorik zayıflatma hesaplarıyla uyumlu çıkmıştır.



Şekil 11. Hasarlı ve hasarsız binalar üzerinde ortam titreşimi altında karşılaştırmalı hakim-periyot analizi

SONUÇ

Bu çalışmada bina türündeki yapılarda yapısal sağlık takibi için güncel enstrümantasyon olanakları ayrıntılı olarak incelenmiştir.

Özellikle 2000’li yıllardan sonra enstrümantasyon olanaklarındaki, analiz yöntemlerindeki gelişmeler ve maliyetlerin düşmesi nedeniyle deprem ve diğer risk etkenlerine karşı binalarda yapısal sağlık takibi giderek artan bir hızla yaygınlaşmaktadır. Operasyonel modal analiz ve ivmeölçerler yardımıyla ortam titreşimi altında sadece çıktıya dayalı bir dinamik kimliklendirme, binalarda yapısal sağlık takibinin en önemli çözüm noktasını oluşturmaktadır. İletişim bant genişliklerinin ve bilgisayar işlemci güçlerinin yükselmesi ile analiz kısmının yazılımsal olarak gerçekleştirildiği gerçek-zamanlı yapısal sağlık takibi mümkün hale gelmiştir. Bu gerçek-zamanlı izleme uzmanlar, araştırmacılar, mühendisler ve karar vericiler için eşsiz bir karar destek sistemi haline gelmiştir.

Binalarda yapısal sağlık takibi için sensör ve sayısallaştırıcı seçimi en kritik iki noktadır. Sensör yerleşimleri konusunda güncel yaklaşımlar ortaya çıkmış, titreşim takibi projeleri 3-eksenli ivmeölçerlerden, daha esnek olanaklar sunan 1 ve 2 eksenli ivmeölçerlere doğru evrilmiştir. Ortam titreşimi altında modal frekansların tespiti için ivmeölçerlerin 0.1-100 Hz aralığında, 1 µg- 300 nano-g / kök-Hz seviyesinin altında bir iç gürültü seviyesine sahip olmaları gerekir. Sayısallaştırıcılar ise 24-bitte, en az 120-130 dB dinamik aralığa sahip olmalı, eş-zamanlı örnekleme yapabilmeli ve analog anti-aliasing filtreleri olmalıdır. Senkronizasyon seviyesi 1µ-saniye seviyesinde olmalıdır. Sayısallaştırıcıların birbirinden uzak noktalara konumlandırılması gerektiğinde GPS desteği ile uydu üzerinden senkronizasyon en geçerli ve etkili yöntemdir. Gelişen olanaklarla doğru seçimler yaparak merkezi ya da dağıtılmış, kablolu ya da kablosuz çözümler oluşturmak mümkündür. Tüm takip işlemi internet(ADSL/3G) desteği ile uzak bir lokasyondan sürdürülebilir.

Gerek diğer araştırmacıların çalışmalarında, gerekse bu çalışmada özetlenen saha çalışmasında yapısal sistemdeki bir değişim ya da hasarın hakim periyot ve doğal frekanslarda hızlıca tespit edilebilen belli bir değişime yol açtığı görülmüştür. Bu değişimlerin daha iyi yorumlanması ve hasar tespit gibi aşamalar için her ne kadar çok daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç olsa da, bahsi geçen metodoloji yapı sağlığının hızlı ve hasarsız tespiti için en önemli çözüm niteliğindedir.

KAYNAKLAR

- Brincker R, Zhang L Andersen P (2001) "Modal identification of output-only systems using frequency domain decomposition", *Smart Materials and Structures* 10 (3): 441
- Cunha A, Caetano E, Magalhães F, Moutinho C (2006) "From Input-Output to Output-Only Modal Identification of Civil Engineering Structures", *SAMCO Final Report 2006 F11 Selected Papers*
- Çelebi M(2002) "Seismic Instrumentation of Buildings (with Emphasis on Federal Buildings)- Special GSA/USGS Project –USGS Project No-0-7460-68170 GSA Project no: ZCA72434
- Los Angeles Tall Buildings Structural Design Council (2008) "An Alternative Procedure for Seismic Analysis and Design of Tall Buildings Located in the Los Angeles Region"
- Peeters B, Roeck G (2000) "Reference-Based Stochastic Subspace Identification for Output-Only Modal Analysis", *Mechanical Systems and Signal Processing* (1999) 13(6), 855}878
- San Francisco Building Code(2014) AB058 "Building Seismic Instrumentation- Procedures for Seismic Instrumentation of New Buildings"
- Şafak E(2007) "Yapı Titreşimlerinin İzlenmesi: Nedir, Neden Yapılır, Nasıl Yapılır ve Ne Elde Edilir?", *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul*