

## BİNALARDA YAPISAL SAĞLIK TAKİBİ ÇÖZÜMLERİNİN HAZIRLANMASI YÖNTEMLERİ

S. Dinçer<sup>1</sup>, E. Aydın<sup>2</sup> ve H. Gencer<sup>3</sup>

<sup>1</sup> İnşaat Y. Mühendisi, Teknik Destek Grubu Ltd. Şti, Ankara

<sup>2</sup> Teknik Koordinatör, Teknik Destek Grubu Ltd. Şti, Ankara

<sup>3</sup> Yazılım Koordinatörü, Teknik Destek Grubu Ltd. Şti, Ankara

Email: dincer@teknikdestek.com.tr

### ÖZET:

Binalarda yapısal sağlık takibi çok yeni bir teknik değildir. Dünya ölçeğinde 20. yy. içinde cihazlandırılması ve izlenmesi 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 davranışları 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 cihazlandırma olanakları detaylı olarak incelenmiştir. Sensör/sayıştallaştırıcı 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. Çevrel titreşim / zorlanma titreşim test teknikleri, ilgili tamamlayıcı ekipman ve aktivatörler de çalışmanın içindedir. Yöntemler karşılaştırılmış, avantajları dezavantajları tartışılmıştır. Uygulama türüne göre uygun seçim yöntemleri getirilmiştir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Deprem, Yapısal İzleme, Modal, Dinamik, Ölçer

### 1. GİRİŞ

Tüm inşaat Mühendisliği yapılarının belirli bir ömrü vardır. Mühendislik bilimi yapıyı amaçlarında tasarım parametrelerine göre en uygun ve en ekonomik çözümü bulur ve uygular. Yaşanan bir afet yüklemesi (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 sonuçta giderken üç yoldan biri arasında seçim yapmak gerekir: i) yapının ömrü dolmadan ve net bir bilgi olmaksızın ondan vazgeçmek ya da yıkmak, ii) yapının kendi seçtiği zamanda yıkılmasını beklemek, iii) ya da yapıdaki defektleri izleyerek yıkılacağı zamanı en yakın şekilde tahmin etmek, mümkünse yıkılmadan gerekli onarım ve güçlendirmeyi yaparak devamını sağlamak (veya doğrudan zamanlama ile yıkarak yenisini yapmak)

Birinci yöntem büyük ekonomik kayba neden olur, ikinci 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 cihazlandırma yöntemleri, cihazlar, sensörler, elektronik

sistemler yazılımlar ve bunların uygulanma teknikleri üzerinedir. Özellikle deprem riskinin yo un oldu u bölgelerde sismik cihazlandırmaun önemi bir kat daha artmaktadır. Çelebi(2002), USGS(Birle ik Amerika Jeolojik Ara tırmalar Kurumu) için hazırladı ı raporda sismik cihazlandırmaun ve binalarda ivmeölçerler ile yapılacak izleme çalı malarının önemini, sa layaca ı katkıları ve uygulanma ekillerini ayrıntılı olarak anlatmı tır. Bu rapor, Amerika Birle ik Devletleri'nde kamu binalarında sismik izlemenin sıklıkla uygulanmasına dair bir tavsiye dokümanı niteli inde dir. Sismik cihazlandırmaun yapı mekani i laboratuvar çalı malarının gerçek dünya yüzeyini bir laboratuvara dönü türece i belirtilmi tir. Bu çalı malar sonucunda elde edilecek bilgilerin depreme yönelik tasarım ve çalı malar prati inde e siz bir bilgi birikimi ve veritabanı olu turaca ını vurgulamı tır.

Gerçek Zamanlı Yapısal Sa lık Takibi bu konuda en güncel ve e siz sonuçlar üreten teknolojilerden biridir. Binalarda yapısal sa lık takibi 20.yy'dan bu yana kullanılan bir teknik olmu tur. Ancak, teknolojinin özellikle 2000'li yıllardan sonra geldi i noktada, yapısal sa lık takibi uygun maliyetlerle eri ilebilir hale gelmi tir ve hızla yaygınla maya ba lamı tır. San Francisco n aat Yönetmeli i(2013) ve Los Angeles Yüksek Yapılar Konseyi'nin konsensüs dokümanında (2008) sismik cihazlandırma ve yüksek yapılarda ivmeölçerlerin kullanımı ile ilgili tanımlamalar ve yönergeler mevcuttur.

### **1.1. Dinamik Kimliklendirme**

Yapısal sa lık takibi temel olarak bir yapının gösterge niteli indeki önemli parametrelerinin sürekli ya da belli aralıklarla takibi ve analizi anlamına gelir. Bu parametrelerin içine çatlak, strain, tilt(e iklik) gibi bazı statik de i kenler dahilse de asıl olarak dinamik bir takip, analiz ve kimliklendirme amaçlanır. afak(2006), yapısal sa lık takibinde dinamik analizin nasıl yapılaca ını ve takip edilebilecek parametreleri ve bunun teknik yöntemlerini anlatmı tır. Genelde yapıya yerle tirilen ivmeölçerler ile yapının çok özel bir karakteristi i niteli indeki dinamik davranı ını gerçek zamanlı çözmek mümkün olur. Hakim periyot, sönüm oranları, modal frekanslar, mod ekillerini, katlar arası öteleme oranları bu analize dahildir. Yapının dinamik kimliklendirme çalı malarında modal analiz yöntemleri kullanılır.

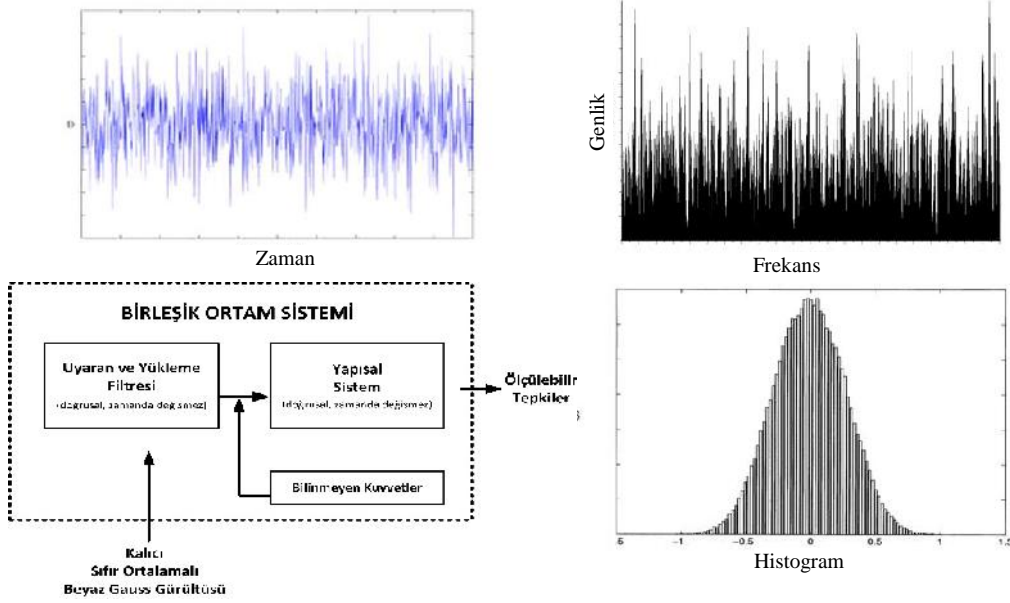
### **1.2. Modal Analiz Türleri (Etki-Tepki / Sadece Tepki-Operasyonel Modal Analiz)**

Yapıların gerçek dinamik analizini sahada deneysel yöntemlerle gerçekle tirmek modal analiz yöntemleri ile mümkün olur. Bu modal analiz çalı maları 2 farklı ekilde gerçekle tirilebilir. Binanın üstünde tanımlı ve kuvvetli titre im yaratarak Etki-Tepki içeren modal analiz yöntemi bunlardan birincisidir. kincisi ise görece daha yeni bir yöntem olan sadece tepkinin analizi üzerinden yola çıkılan operasyonel modal analiz yöntemidir. Dinamik kimliklendirme ve yapısal sa lık takibi çalı malarının etki-tepki içerikli testlerden günümüzde yo un olarak sadece tepki ölçümünü içeren operasyonel modal analiz yöntemine do ru evrimi Álvaro Cunha vd.(2006) tarafından ayrıntılı olarak incelenmi tir.

### **1.3. Çevrel titre im Testleri ve Operasyonel Modal Analiz**

Klasik modal analiz bilinen girdi ve ölçülen tepkiler ile gerçekle tirilir. Ancak in aat mühendisli i yapılarına dı arıdan bilinen bir yükleme uygulamaya çalı mak hem zor, hem maliyetli hem de risklidir. Bu nedenle özellikle in aat mühendisli i yapıları için çok pratik ve geçerli bir yöntem olan operasyonel modal analiz tekni i geli mi tir. Operasyonel modal analizin teorisi detaya ve matematiksel modelin ayrıntılarına girmeksizin ana hatlarıyla bu bölümde özetlenmi tir. Operasyonel modal analizde sadece tepkilerin ölçümüne dayalı bir modal analiz çalı ması hedeflenir. Bu ekilde bir modal analize çevrel titre im altında modal analiz ya da sadece-tepki ölçümüyle modal analiz adları da verilir. Bu ekilde yapının kendi operasyonel sistematini içinde kalınır ve üzerinde ekstra yüklemeler yaratmak gerekmez. Yapıya dı arıdan etki eden ve bile kesinde Beyaz Gauss Gürültüsü'ne yakla an dı kuvvetler oldu u kabul edilir. Etraftaki trafik ve rüzgar yükleri, küçük tektonik sarsıntılar bu gruba dahildir. Genelde bu görece küçük kuvvetlerin her frekansta gauss da ılımına benzer bir bile en içerdi i varsayılır. Sürekli, sıfır ortalamalı beyaz gauss gürültüsü oldu u varsayılan küçük genlikteki kuvvetlerin kar ılı nda ölçülecek tepkilerden bir modal analiz çalı ması yapmak mümkündür. Ancak bunun için önemli bir zorlu un a ılması gerekir. Bu zorluk, binanın üzerinde olu an çok küçük genliklerdeki tepki

titreimlerinin ve salınımların ölçülmesidir. Yapının rijitliğine göre de titreimlerle birlikte bina türü yapılarda genelde mikro-g seviyesinde olan bu titreimleri 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.



Şekil 1. Beyaz Gauss Gürültüsü – Zaman/Frekans kümeleri, histogramı ile çevrel titreim kavramsal teması

Operasyonel modal analizde sadece tepkilerin ölçümüne dayalı bir modal analiz çalışması hedeflenir. Bu şekilde bir modal analize çevrel titreim altında modal analiz ya da sadece-tepki ölçümüyle modal analiz adları da verilir. Bu şekilde yapının kendi operasyonel sistematiği içinde kalınır ve üzerinde ekstra yüklemeler yaratmak gerekmez. Yapıya dışarıdan etki eden ve bile kesinde Beyaz Gauss Gürültüsü'ne yakın olan 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 karışımında 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 titreimlerinin ve salınımların ölçülmesidir. Yapının rijitliğine göre de titreimlerle birlikte bina türü yapılarda genelde mikro-g seviyesinde olan bu titreimleri 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 amaçlarına gelinir. Bu amaçla 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 Salınım Takibi önerisi ve yöntemlerinin büyük bölümü de operasyonel modal analiz tekniklerine dayanmaktadır.

#### 1.4. Modal Analizde Etki-Tepki Yöntemi

Teknoloji ve ölçüm hassasiyetleri henüz günümüzdeki düzeyine erişmeden önce bina tipindeki rijit yapılardan anlamlı ve ayırdedilebilir bir salınım ve titreim tepkisi ölçülebilmek için mutlaka yapı üzerinde görece kuvvetli

bir etki yaratmaya gerek duyulmu tur. 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 örnek 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 alınır. İnan Frekans Tepki Fonksiyonu(FRF)’na erişmek mümkün olur.



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

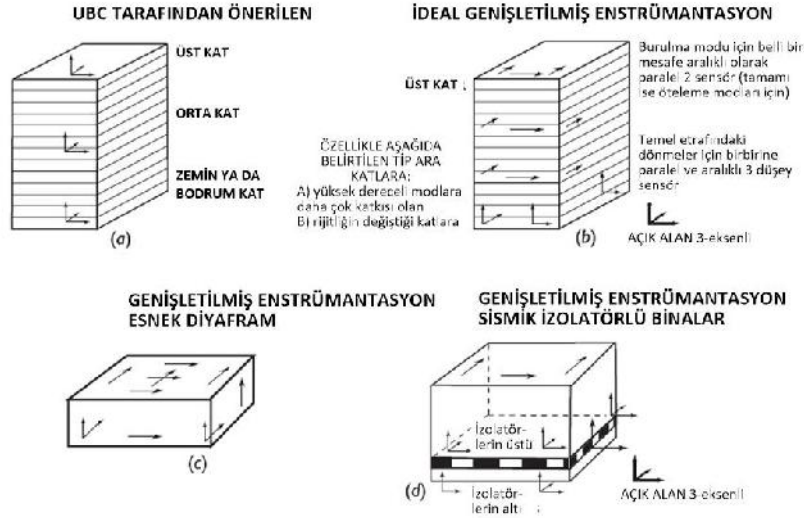
## 2. GERÇEK ZAMANLI YAPISAL SALLIK TAKİBİNİN UYGULANMASI

Yapısal Sallık 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 Sallık 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 çözümlemelerine yarayacak en önemli araç sunulmuştur. Gerçek zamanlı yapısal sallık 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 incelemeler gerekebilmektedir. Yine de sahada çevrel titreşim altında ulaşılan bu veriler binanın yapısal frekansları hakkında sunduğu bilgilerle eşsiz bir kaynak oluşturur.

### 2.1. Sensör Yerleşimleri ve Takip Edilen Parametreler

Modal analiz ve yapısal sallık 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 ölçülmesi ve takip edilmesi 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.



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

## 2.2. Üç Eksenli ivmeölçerlerden Tek/ki/Üç Eksenli ivmeölçerlere 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 olması gerekmektedir. 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 seçeneğini sunar. Tüm ivmeölçerlerin üç-eksenli olması durumunda pek çok eksenenden gelen ivme bilgisi fazladan, gerekli olmayan bilgi ve ek maliyet anlamına gelmektedir.

## 2.3. Sistemin Bileşenleri

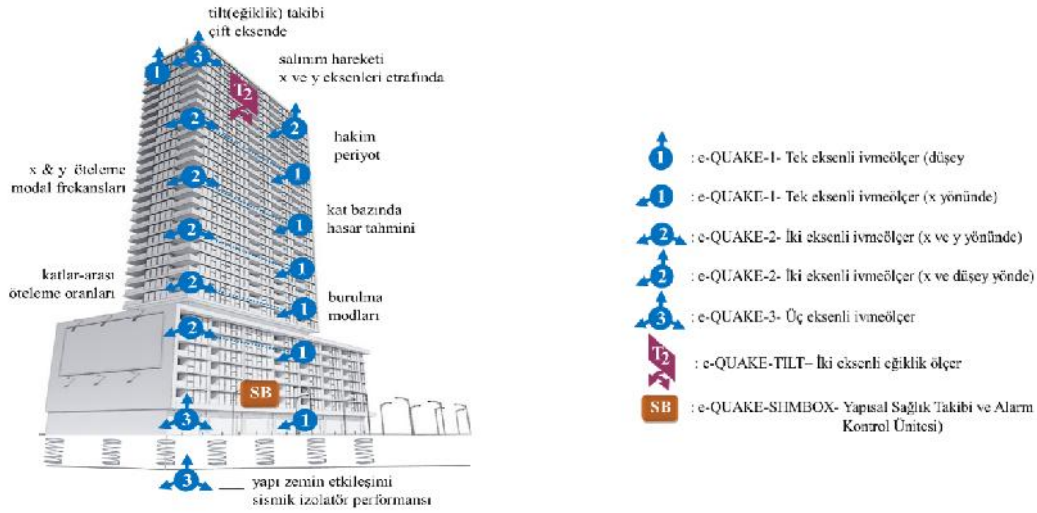
Binalarda kullanılacak bir yapısal sağlık takibi sisteminin bileşenleri şu şekilde listelenebilir: (i) Dinamik sensörler (ivmeölçerler -1/2/3 eksenli), (ii) Statik sensörler (gerekliyse Tilt-eğilim ölçerler, çatlak ölçerler, birim deformasyon ölçerler (ing. Strain gauge), çevresel sensörler-sıcaklık,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

## 3. YAPISAL SAĞLIK TAKİBİNE EN ÇOK UYGUN ENSTRÜMANLARIN SEÇİMİ

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

### 3.1. Sensörler

Esas olarak amaç dinamik kimliklendirme ve modal analiz olduğundan aslında yapıda gerçek-zamanlı olarak 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 amaçla 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 amaçlarından sonra sinyalin tespit edilen modal frekanslar etrafında bant geçiren filtreler ile filtrelenmesi tekniklerine başvurmak gerekir.



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

Ancak, tüm bunların öncesinde sensör seçimi amacıyla mümkün olduğunca düşük gürültü seviyesinde sensörün seçimi çok kritiktir. Binalar genelde diğer inşaat mühendisliği yapılarına oranla daha rijit olduğundan çevrel titreşim 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.

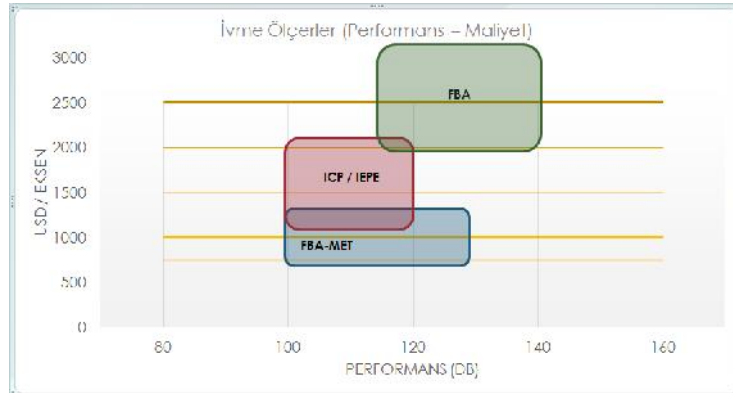
Tablo 1. İvmeölçer Seçiminde Dikkat Edilecek Teknik Özellikler

Teknik Özellik	Değer
Ölçüm Aralığı	$\pm 0,5 - \pm 3$ g
RMS Gürültü	$< 1\mu\text{g}/\text{Hz} - < 300\text{nano-g}/\text{Hz}$
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) ivmeölçer (FBA) – (Kuvvet geribeslemeli)
- 2) MEMS ivmeölçer – Kuvvet geribeslemeli (0,1 Hz-400 Hz arası çok iyi performans-Si-Flex™ tipi ivmeölçerlerin üretiminin durdurulmasından sonra güncel durumda binaların çevrel titreşim testleri için yeterli nitelikte bir MEMS ivmeölçer sunulamamaktadır)

- 3)FBA-MET vmeölçer – Kuvvet Dengeli/ Kuvvet geribeslemeli (120 Hz'e kadar çok iyi performans)  
4)Piezo vmeölçer – ICP/IEPE (Yüksek frekansların ölçümünde, makine mühendisliğinde)  
Ayrıca ekil-5'te maliyet ve performans karşılaştırması amacıyla mevcut 3 tip için(1,3,4) grafiksel bir analiz sunulmuştur.



ekil 5. vmeölçer tiplerine göre performans/maliyet karşılaştırması

### 3.2. Veri Toplama Sistemi(Sayısalda Tırıcı)

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 sayısalda tırıcı 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 sayısalda tırıcılar 24-Bit olmalıdır. Çözünürlüğü 24 bit olan bir sayısalda tırıcı(1), sinyali toplam  $2^{24}$  toplam ölçüm adımına(TÖA) (2) bölerek sayısalda tırır. Örnek olarak ölçülebilecek 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 sayısalda tırıcıların etkili çözünürlüğü bunun altında olur. Ara tırımcıyı daha çok ilgilendiren etkili çözünürlüktür. Bir başka deyişle 24-Bit içinden ne kadarının anlam ifade eden seviyede olduğunu gösterir.

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 sayısalda tırıcının ölçülebileceği en yüksek sinyalin en küçük sinyale oranını 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 değerlerin verildiğini de kontrol etmek gerekir.

Bu amaçla 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 ilki, w-istenilen bit artışı,  $f_{os}$ -fazla örnekleme frekansı,  $f_s$ : daha yüksek çözünürlüklü elde edilen örnekleme frekansı olmak üzere (5)’te verilmiştir.

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

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

#### Veri Toplama Sisteminin (Sayısallaştırıcı) Seçimi

Yukarıda anlatılan kavramları göz önünde bulundurarak bir sayısallaştırıcının seçimi için 3 önemli noktayı ekilde özetlenebilir. (i) Sensörden daha iyi performansa sahip olmalı, (ii) e-zamanlı örnekleme yeteneğine sahip olmalı, (iii) analog anti-aliasing filtrelere sahip olmalı. Yapısal sağlık takibinde Tablo-1’de belirtildiği gibi sensörlerin genelde 110-120 dB performansa sahip olması ve örnekleme frekanslarının da 100-200 Hz seviyesinde olması göz önünde bulundurulursa, genelde 100-200 Hz’de 120-130 dB’lik dinamik aralığa sahip bir sayısallaştırıcı tercih edilebilir. E-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 yansıtıcı frekans bileşenlerinin yansımamasını sağlamaktadır. TESTBOX™/e-QUAKE™ serisi cihazlar, Teknik Destek Grubu tarafından yukarıda bahsi geçen özelliklere göre geliştirilmiştir.

#### 3.3 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 e-zamanlılığı sağlamak için bir yolu her sayısallaştırıcıda bir GPS modülü kullanmaktır. Bu ekilde, tüm sayısallaştırıcılar bağımsız olarak analog-dijital çevrim işlemi UTC’ye göre 1 mikro-saniye ya da daha iyi bir senkronizasyonla gerçekleştirirler. Bu yöntem Teknik Destek Grubu tarafından geliştirilmiştir. TESTBOX™/e-QUAKE™ serisi cihazlarda kullanılmaktadır. (ekil-6) Bu çözümü farklılıktan ve e-zamanlılığı en iyi noktaya taşıyan en önemli nokta, uydudan gelen zamanlama sinyalinin doğrudan Analog-sayısal çeviricileri sürüyor olmasıdır. Tüm bağımsız sayısallaştırıcıları aynı anda bağlamak mümkün olmayacağından, arada oluşan zaman farkı ise her verinin önüne uydudan alınan global zaman etiketi ekleyerek çözülmektedir.





(a) TESTBOX-2010  
24 Bit Multi-Channel  
Simultaneous Sampling Digitizer

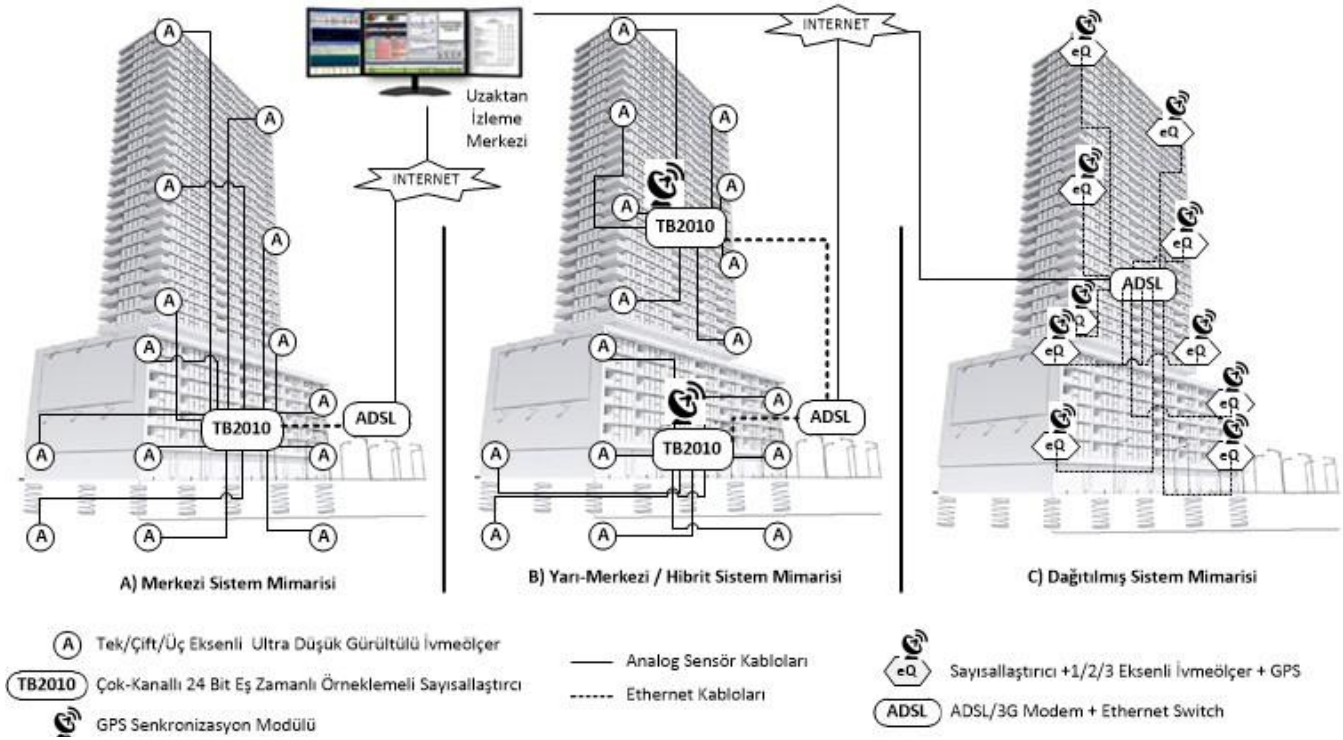


(b) e-QUAKE-ACC  
1/2/3 Channel Integrated Accelerometer and  
Digitizer with GPS Synchronization

ekil 6. Teknik Destek Grubu tarafından yapısal sallık takibi için geliştirilmiş (a) TESTBOX™/  
(b) e-QUAKE™ cihazları

#### 3.4 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 bılıkta 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 kargaasına neden olmaktadır. Kablosuz çözümlerin veri iletimi ve elektrik bağlantısı da dahil tamamen kablosuz olabileceği düşünülmektedir. Oysa yapısal sallık takibi çalışmalarında en çok zorluk çıkaran kablolar, sayısallaştırıcıdan sensöre giden analog, kalın ve bant dönmeye gereken kablolardır. Bu kabloların elimine edilebilmesi için bir üst maddede bahsi geçen kablosuz olarak GPS desteği ile uydu üzerinden e-zamanlılık sağlayan sistemler iyi bir çözüm üretir. Her sensör kendi sayısallaştırıcısına sahip olduğundan fazladan analog kabloya ihtiyaç kalmaz. 2. a amada veri iletimi 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 iletiminin kesintiler yaması muhtemeldir. Buna karşın yukarıda anlatılmış olan e-QUAKE™-ACC türünde sistemler sadece kendi üzerine kayıt alsada dahi, bu kayıtlar GPS desteği ile 1-mikro saniyeden daha iyi senkronize olduğundan yazılımsal olarak kolaylıkla birleştirilip modal analize hazır hale gelirler.



ekil 8. Yapısal Sağlık Takibi Farklı Yerleşim Mimarileri

### 3.5. Yapısal Sağlık Takibi için Farklı Cihaz ve Sensör Yerleşim Mimarileri

Kalıcı kurulum ve ölçümler ile 7/24 izleme uygulamaları için genellikle merkezi ( ekil 8-a) ya da yarı-merkezi/hibrit ( ekil 8-b) tercih edilir. Analog sensör kabloları çekmek daha zor gibi görünse de bu çözümler kesintisiz izleme için çok daha güvenilirlerdir. Dağıtılmış sistemler ( ekil 8-c) genellikle entegre bir yapının içinde bulunan sensör ve sayısallaştırıcı yapısına, GPS senkronizasyonu yeteneğine ve verinin Ethernet üzerinden transferine dayanır. Bu mimari analog sensör kablosu çekmenin çok zor olduğu durumlarda geçici ölçümler için tercih edilir.

## 4.SONUÇ

Bu çalışmada bina türündeki yapılarda yapısal sağlık takibi için güncel cihazlandırma olanakları ayrıntılı olarak incelenmiştir. Özellikle 2000'li yıllardan sonra cihazlandırma olanaklarındaki 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 çevrel titreşim altında sadece çıktıya dayalı bir dinamik kimliklendirme, binalarda yapısal sağlık takibinin en önemli çözüm noktasını oluşturmaktadır. Titreşim 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 dönüşmüştür. Çevrel titreşim 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. Sayısalla tırıcılar ise 24-bitte, en az 120-130 dB dinamik aralığına sahip olmalı, eş zamanlı örnekleme yapabilmeli ve analog anti-aliasing filtreleri olmalıdır. Senkronizasyon seviyesi 1µ-saniye seviyesinde olmalıdır. Sayısalla tırıcıların 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. Ara tırıcılar tarafından yapılan çalışmalarında, 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 amaçlar için her ne kadar çok daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç olsa da, bahsi geçen metodoloji yapısal sistemin 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

afak E(2007) Yapı Titreşimlerinin İzlenmesi: Nedir, Neden Yapılır, Nasıl Yapılır ve Ne Elde Edilir?. *Altıncı Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 16-20 Ekim 2007, İstanbul*