

## ÇEVREL VE ZORLAMA KUVVET TİTREŞİMLERİ ALTINDA 17 AĞUSTOS 1999 KOCAELİ DEPREMİNDE HASAR ALMIŞ BİNALARIN YAPI TANI ÇALIŞMALARI

### STRUCTURAL IDENTIFICATION OF THE APARTMENT BUILDINGS DAMAGED DURING THE 17 AUGUST 1999 KOCAELİ EARTHQUAKE FOR AMBIENT AND FORCED VIBRATIONS

Kemal Beyen<sup>1</sup>, Mustafa Kutanis<sup>2</sup>, İ. Engin Bal<sup>3</sup>

#### ÖZET

*Düşük gürültü seviyeli sensörlerde gözlenen gelişmeler ve yeni kablosuz veri toplama protokolları hasar gözlem uygulamalarını kolaylaştırmıştır. Benzer bir ölçüm sistemi Kocaeli ve Adapazarı şehirlerinde 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde farklı seviyelerde hasar görmüş 5 ile 7 kat döşemeleri arası değişen betonarme çerçeve binalara uygulanmıştır. Yapı tanı çalışmalarıyla elde edilecek mevcut durumunu yansıtan gerçek yapısal dinamik özellikler bir yapının sonlu eleman modelinin tutarlılığının test edilmesinde, kalibrasyon çalışmalarında ve numerik modelin değişik zaman adımlarında göstereceği davranış ve oluşturacağı mekanizma hikayesindeki tutarlılığın yüksek olmasının yanı sıra numerik çözümde istenen stabilite ve yakınsaklığın gerçekleşmesi için gereken güncelleme için kullanılmaktadır. Bu karakteristik parametreler test edilen yapının sonlu eleman modelinin deneysel sonuçları doğru üretmesini ve gözlenen hasarlarla tutarlı olmasına imkan verir. Dinamik sarsma unitesinin frekans band genişliği sınırları içinde üretilebilen zorlama kuvvet serisi ve çevrel titreşim ölçümleri altında, yapısal tepkiler (katlararası ötelenme, döşeme ivmeleri) kaydedilerek ve Gözlemci/Kalman Süzme Tanımlama – Eigen Gerçekleşme Algoritmaları (OKID-ERA) kullanılarak modal özellikler tahmin edilmiştir. Bu amaçla OKID-ERA metodu MatLab'in sunduğu makro kodlama yapısı içinde yazılmış ve analizlerde kullanılmıştır.*

*Yapısal elemanlarda oluşan hasarlar yapının sönüm ve rijitlik düzeninde kalıcı değişimlere neden olurlar. Yapının doğal frekanslarını, mod şekillerini ve modal sönüm özelliklerini etkileyen rijitlik, kütle ve sönüm gibi yapısal parametreler yapısal hasarların varlığının ve yerinin tahmin edilmesinde etkilidir. Bu makale özetlenen geçmiş çalışmaların değerlendirmesinden sonra, yapı tanı çalışmaları yürütülen hasarlı binaların sonuçlarını ve uygulanan yük şartları için global yapısal tepkileri sunmaktadır. Mevcud yapısal hasar şartlarında zayıf ve güçlü kuvvetlerin sonuçları mukayese edilerek önemli modal parametrelerdeki değişimlerde ayrıca irdelenmiştir.*

Anahtar kelimeler : çevrel titreşim, güçlü kuvvet altında titreşim, modal analiz, yapı tanımlama, OKID-ERA.

#### ABSTRACT

*Rapid advances in low noise level sensors as well as new wireless data acquisition protocols have made damage monitoring feasible. Such a monitoring system was implemented on four reinforced concrete buildings, with 5 to 7 stories, in Kocaeli and Adapazarı provinces, which received different level of damages during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake. The most realistic structural dynamic characteristics under present conditions inferred from the identification studies can be used for validation. Calibrating analytical model at different stages for the test building may reproduce experimental results accurately and consistent with observed building damage. Under a series of force vibration tests with available varying*

<sup>1</sup> Doç. Dr. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, kbeyen@kocaeli.edu.tr

<sup>2</sup> Yard. Doç. Dr. Mustafa Kutanis, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, kutanis@sakarya.edu

<sup>3</sup> Dr. İhsan Engin Bal, Eucenter, Pavia, İtalya, ihsanenginbal@gmail.com

*amplitudes and frequencies of the shaker excitation structural responses were monitored and modal characteristics were obtained using the Observer/Kalman Filter Identification (OKID) technique with Eigen system Realization Algorithm (ERA). The OKID-ERA method was adopted and coded within macro facilities of MatLab.*<sup>4</sup>

*Damages in the structural members result in permanent changes in the distribution of the structural stiffness and damping. Characteristic properties like stiffness, mass, and damping affecting the natural frequencies, mode shapes, and modal damping values are capable of assisting in both detecting and locating structural damage. This paper presents the results inferred from the identification studies for one of the buildings in the test program for the given weak and strong motion loading. The results obtained for weak and strong motion loading were also compared to point out indicative changes in case of existing structural damages.*

Key words : ambient vibration, force vibration, modal analysis, structural identification, OKID-ERA

## GİRİŞ

Mühendislik yapıları deprem gibi bir yer hareketine maruz kaldığında etkiyen kuvvetin zaman içindeki değişimi, etkiye süresi, yapı içinde yayılımı ve bu süreç içinde oluşan karakteristik yapısal tepkiler yapısal davranışı şekillendirir. Yapıların, küçük sismik titreşimlerde ancak hız veya ivme ölçer cihazlardan oluşan bir şebeke ile kaydedilip, işlendikten sonra büyütülmüş davranışı izleme şansımız vardır. Kuvvetli yer hareketlerinin yapı ömrü içinde birkaç kere gerçekleşme sayısı azdır. Depreme maruz kalındığı anda da yapının uygun sensör ve kayıt şebekesiyle teçhiz edilmiş çalışır durumda olması gerekmektedir. Pahalı bir izleme şekli olmakla beraber bazı özel mühendislik yapılarında, yapı deprem güvenliği hedefli yapı sağlığı izleme sistemleri kurulmuş ve işlemektedir [2]. Yapılar nadir oluşan deprem kuvvetlerinin dışında, her daim var olan çevrel titreşimlerin etkisi altındadır.

Çevrel titreşimler, atmosfer hareketleri (iklimler, rüzgar, ısı), malzeme değişimleri (ısısal genleşme ve büzülme), taşıyıcı elemanların davranışı (yüklenme ve boşalma durumları), trafik, endüstriyel gürültü, insan hareketleri, yer altı tektonik çökmeler, yer altı akarsu veya su seviyesi oynamaları, volkanik aktiviteler gibi etkenlerle oluşurlar. Yapılar bu çevrel titreşimleri yapısal özellikleriyle ilişkili olarak az veya çok (10-12 – 10-18 m.) hissederler ve çok düşük mertebelerde (elastik davranış içinde ortaya çıkan bu düşük enerjili kuvvetler ile ataletleri oranında) tepki üretirler. Çevrel titreşim ölçümleri inşaat mühendisliği uygulamaları içinde yapısal karakteristik parametreleri (modal periyodlar, modal deformasyon, sönüm ve faz (tepki gecikmeleri) özelliklerinin frekans geçmişi içinde değişimlerini) tanımlama çalışmalarında önemli verilerdir [1, 2]. Çevrel titreşim ölçümleri mobil hız veya ivme ölçer cihazların önemli yapısal noktalara konumlandırılarak yapısal titreşimlerin belirli periyodlarla tekrarlı kaydedilmeleri ile gerçekleşir. Alınan yapısal titreşimlerin işlenmesi ve analiz safhalarında verinin gürültü seviyesi ve izlenen noktaların genel yapısal davranışı temsil edebilme güvenilirliği yapı titreşim ölçümlerinin tutarlılığını gösterecektir [3].

## YAPISAL DAVRANIŞ

Yönetmelikler temel yaklaşım olarak esnek (fleksibilitesi yüksek) yapıları hedefler. Esnek yapı nitelmesi, nereden bakıldığına bağlı olarak farklı yorum ve tanımlara açıktır. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik-2007 (DBYYHY-07) lineer davranan, yatay kat ötelenmelerine doğrusal olmayan hasarı sınırlamak için bazı kriterlerle müsaade edilen, rijid diyafram döşeme ızgara kiriş sistemine sahip, burulması sınırlanmış, ikinci mertebe davranışlara müsaade edilmeyen, eğilme hasarı öncelikli, kesme güç yitimine karşı mukavemeti yüksek tutulmuş, kayma çerçeve eğilme moment çalışan her iki yönde sürekli çerçeve hiperstatik bir yapı olarak tasarlanmasını önerir.

## YAPISAL MODELLEME

20. yüzyılın son çeyreği hem yazılım hem de bilgi-işlem alanında hesaplama teknolojilerinin atılım yaptığı bir dönem olmuştur. İnşaat mühendisliği analiz yazılımlarında bu gelişmeleri bünyesine uyarlamış ve sonlu eleman metodunun çözüm algoritmalarıyla geniş uygulama imkanları doğmuştur. Yönetmeliklerde bu yönde hesap yöntemlerini önermişlerdir. Yeni veya mevcut mühendislik yapılarının nümerik modellerinin oluşturulması, benzer hassaslıkları taşımakla beraber, yeni tasarlanacak bir yapı modeli statik ve dinamik parametrelerinin öngörülen tasarım değerleriyle oluşturulabilir, buna mukabil, mevcut bir yapının nümerik modelinin davranış açısından aslı ile özdeş hale getirilmesi yapısal ölçümlerin ve sonuçlarının nümerik modeller ile sınınanarak tam yapısal benzeşimin sağlanması ile mümkündür.

Yeni tasarlanacak bir yapı modelinde yönetmeliğin istediği analizin yanı sıra, günümüzün hesaplama teknolojileri yardımıyla, değişik statik ve dinamik yük şartları altında farklı davranış simülasyonlarını üretmek mümkündür. Bu simülasyonlarda yapısal zayıflık veya yeterliliği gözleme ve güç yitimine girmiş zayıf elemanları nümerik model üzerinde güçlendirerek yönetmeliğin istediği güvenlik sınırlarına yapı performansını yükselterek, son iyileştirilmiş durumu, imalat için değerlendirme imkanı doğmuştur. Tasarımın yanı sıra, yapı dinamik titreşim ölçümleri, deprem gibi kuvvetler karşısında yapı deprem güvenliği izleme ağlarına altlık oluşturabilmektedir. Benzer güvenlik ağları mevcut yapılar içinde mümkündür ve benzer bir yol izlenmekle beraber, mevcut durumun modelde tam yaşatılması ilave yapısal ölçümleri bu safhada kaçınılmaz kılmaktadır. Yapısal ölçümler ise yapı dinamiği ve yapısal davranış bilgilerinin tanımlanmasında önemlidir. Sistem tanımlama teknikleri kullanılarak nümerik model düzeltmeleri (kalibrasyonları) ile sonuç alınabilmektedir. Kaydedilmiş yapı tepki sinyallerini işlemekle kazanılan yapısal bilgiler, yeni bir yapı için tasarımı yönlendirebileceği gibi, mevcut bir yapı için güçlendirilmiş yapının testlerini sanal laboratuvar ortamında dinamik yükler altında tekrar üretmekle gelecekte ihtimal dinamik yük şartlarında gelişecek tepkilerin kestirilmesine imkan verecektir.

## SERBEST VE ZORLAMA KUVVETLER ALTINDA YAPI TANIMI İÇİN CİHAZLANDIRMA

Yapısal ivme ölçer sensörlerin yerleştirilmesi çalışılan yapının yapısal davranışının iyi bilinmesiyle mümkündür. Bu amaç doğrultusunda yapının nümerik modelinin kurularak yapılacak modal analiz sonuçlarının değerlendirilmesi, örneğin modal deformasyonlar doğru ölçme noktalarının bulunmasında ilk başvurulacak yöntemdir. Buna mukabil, lineer bir sistem için modal parametrelerin, girdi sinyalinin frekans ve genliğine bağlı olmaması gerçeği akılda tutularak, statik olarak kararlı hal içinde bulunan hasarlı bir yapının lineer yaklaşım içinde klasik modal deformasyonlarının getireceği tartışılabilir mod şekilleri için rijid diyafram plak kabulü içinde kalınarak her serbestlik derecesinin izlenebilmesi için her katın cihaz ile izlenmesi, cihaz sayısının imkanları içinde gerçekleşecektir. Dahası, karakteristik yüksek frekans tepkilerin toplam davranışa verdiği katkılar bilinmesine rağmen, örneğin deprem üreticinin limitleri içinde yüksek frekans tepkileri üretecek harmonik zorlama kuvvetlerin üretilmemesi bir eksiklik olacaktır. Yüksek frekanslarda, yakın modlar arasında gözlenen girişimler ise doğru dinamik parametre değerlerini elde etmekte problemidir. Altı çizilen problemleri minimize edecek cihaz serimini etkileyen diğer bir unsur ise hasarlı yapısal davranışın kararlı şartlar altında lineerlikten sapmasına sebep olacak girdi kuvvet bilgisi eksikliğidir. Eldeki izleme cihazı imkanı kullanılarak ve titreşim üreteç limitleri içinde üretilebilecek zorlama kuvvet çerçevesinde, yapısal gözlem noktaları seçilmiş ve izlenmiştir.

## YAPI TANI TEKNİĞİ

Yapı tanı tekniği temelde deprem yükleri altında veya çevrel titreşim şartlarında kaydedilen yapı girdi,  $(y)$ , ve çıktı,  $(x)$ , veri setlerinden yapının dinamik karakteristikleri olan hakim frekansını ve modal frekanslarını, modal sönüm özellikleri, ve mod şekillerinin hesaplanmasını içerir.

Yapı üzerindeki yapısal davranışa açıklık getirecek herhangi bir noktanın kaydı,  $y(t)$  ile serbest yer hareketinin kaydı,  $x(t)$ , arasındaki ilişkiyi tek giriş ve tek çıkış (yapısal tepki), (TGTC) sistem olarak tek serbestlik dereceli sistem (TSDS) gibi kabul edersek, bu TSDS'in girdi çıktı ilişkisini zaman tanım alanında

$$y(t) + a_1 \cdot y(t-1) + a_2 \cdot y(t-2) + \dots + a_m \cdot y(t-m) = b_0 + b_1 \cdot x(t-1) + b_2 \cdot x(t-2) + \dots + b_n \cdot x(t-n) \quad (1)$$

denklemleriyle tarifleyerek sayısallaştırılmış süzgeç (filtre) ilişkisi olarak ifade edilebilir.  $a_i$  ve  $b_i$  katsayıları filtre parametreleridir. Denklem 1 ile tariflenen süzgeç tepkisinde yer alan  $a_i$  ve  $b_i$  katsayıları lineer (doğrusal) işleyen bir süzgeç için sabittir. Doğrusal olmayan (nonlinear) bir süzgeç için katsayılar zaman içinde değişen değerler alır.  $a_i$  katsayıları yapının sönüm oranları ve doğal frekans muhteviyatı ile ilintilidir. Bunun yanı sıra,  $b_i$  katsayıları modal (kütle) katılım oranları ile ilintilidir. Denklem 1'deki bütün parametreleri ve verileri bir matris formatında oluşturarak;

$$\theta = [a_1, a_2, \dots, a_m, b_1, b_2, \dots, b_n]^T \quad (2a)$$

$$\phi = [-y(t-1), -y(t-2), \dots, -y(t-m), x(t), x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-n)]^T \quad (2b)$$

$$\theta = \left[ \sum_{t=1}^N \phi(t) \phi^T(t) \right]^{-1} \left\{ \sum_{t=1}^N \phi(t) y(t) \right\} \quad (3)$$

Bir denge denklemi seti kurabiliriz.  $a_i$  ve  $b_i$  katsayılarını tutan  $\theta$  parametre vektörü çözümlerse, modal sönüm oranları,  $\xi_j$  ve doğal frekans  $f_j$  değerleri aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$\xi_j = \frac{\ln(1/r_j)}{\left[ \phi_j^2 + \ln^2(1/r_j) \right]^{1/2}} \quad f_j = \frac{\ln(1/r_j)}{2 \cdot \pi \cdot \Delta t \cdot \xi_j} \quad (4)$$

Denklem 4'de  $\phi_j$  j'nci kompleks pole'un argümanı ve  $r_j$  j'nci kompleks pole'un modülüdür.  $\Delta t$  ise kayıta örnekleme zaman aralığıdır. Yapı tepkisi zaman hikayesinin z-dönüşümlerinden elde edilen deklemin

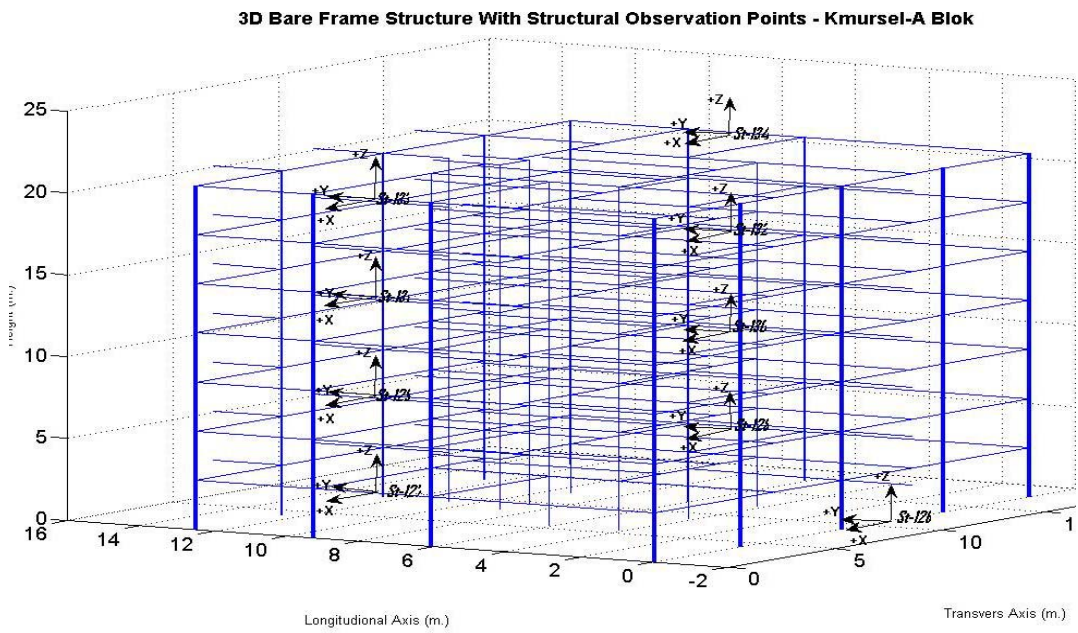
$$z^m + a_1 z^{m-1} + a_2 z^{m-2} + \dots + a_{m-1} z + a_m = 0 \quad (5)$$

kökleri kompleks pole çiftlerini oluşturmaktadır. Pozitif sönüme sahip stabil sistemlerde, poleler kompleks eşlenik çiftlerdir. Her bir eşlenik kompleks çift bir frekans ve ilgili sönüm oranını verecektir ve  $m$  adet kök ise  $m/2$  adet doğal yapısal frekans ve  $m/2$  adet sönüm oranını verecektir.

Yukarıda verilen yapı davranışı ve girdi-çıkış ilişkileri doğrusal çalışan (linear) TSDS, (TGTC sistemler) içindir. Burada tariflenen bağıntıları eş senkronizasyon içinde çok serbestlik dereceli sistemlere (ÇSDS) yani çok girişli çok çıkışlı (çok noktadan izlenen yapısal tepkili), (ÇGÇÇ) yapısal sistemlere uyarlamak mümkündür. ÇGÇÇ sistemler özelliği gereği, üç eksen (bileşen) deprem veya zayıf girdi benzeri çevrel titreşimi yapıya etkitemeyi ve tüm bileşenleriyle yapısal tepkileri yapısal modeller içinde kullanma imkânı vermektedir. Lineer yapısal davranışı aşan yapılar içinde aynı yaklaşımı kullanmak mümkündür. O vakit, nonlinear davranan yapıyı temsil eden aday parametrik yapısal modelin (filitrenin) zamanla değişen parametrik değerleri adaptif metodlar ile tahmin edilmeye çalışılır. Adaptif metod uygulamaları, tekrarlı kullanılan yürüyen pencereleme teknikleriyle parçalanmış verilerin kullanılarak elde edilen transfer fonksiyonlar yardımıyla veya durum-uzay (State-space) ortamında ifade edilen ÇGÇÇ doğrusal

olmayan bir yapının girdi-çıkı veri setlerini Kalman süzgeçleriyle modelleme imkanlarını kapsar [1].

Zaman-tanım alanında tipik bir yapı tanı çalışmasında şu adımlar izlenir; (1) Uygun bir aday matematik model yapı seçilir. (2) Seçilen aday model yapı için uyan en büyük model mertebesi hesaplanır. (3) Aday modelin mertebesi adedine uygun katsayılarının ağırlıklı değerleri yapı girdi ve çıktı kayıtlarından hesaplanır. (4) Aday yapı modeli bulunan parametreleriyle tutarlılığı sınanarak en iyi temsil kabiliyeti olan kesin yapısal model elde edilir. (5) Farklı girdi ve çıktı kayıt çiftleriyle doğrusal yapısal davranış test edilir, tutarlılık kalıcıysa elde edilen transfer fonksiyonları fiziki yapıyı tam temsil ettiği kanaati yüksek güvenilirlikte elde edilmiş olur. Eğer tutarsızlık var ise 2. adımdan merite değiştirilerek sonraki adımlar tekrarlanır veya 1. adımdan matematik model yapı değiştirilerek sonraki adımlar tekrar edilir. Verilen adımları takip eden programlar MatLab makro yazılım ortamında oluşturulmuş ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde orta derecede hasar almış Karamürsel girişi Halidere mevkiinde tespit edilen altı katlı bir betonarme çerçeve yapı için çevrel titreşim ve harmonik zorlama kuvvetler altında elde edilen verilere uygulanmıştır.



Şekil 1 Karamürsel A blok sonlu eleman modeli, gözlem noktaları, cihaz adı ve konumları.



Şekil 2 Çevrel titreşim ölçümlerinin ve dinamik zorlama testlerinin yapıldığı Karamürsel girişi Halidere mevkinde bulunan bloklar, solda. Bir gözlem noktasında üç bileşen ivme ölçer, enerji besleme ünitesi, RF-modem modülü ve GPS-anten'den oluşan düzenek, sağda.

## ÇALIŞILAN YAPI VE YAPI CİHAZLANDIRMA

Tubitak destekli yürütülen 108M303 numaralı "Performansa Dayalı Tasarım Ve Değerlendirme Yöntemlerinin Deprem Sonrası Türkiye' de Gözlenen Yapı Performansları ile Karşılaştırılarak Geliştirilmesi" başlıklı proje çalışması içinde çalışılmaya aday binalardan serbest ve zorlama titreşim uygulanmış bir bina burada tartışılmak üzere ele alınmış ve yapının üç boyutlu sonlu eleman modeli, gözlem noktaları, yerleştirilen cihazların serimi, numaraları yönlendirilmeleri Şekil 1'de gösterilmiştir. Şekil 2 solda görülen bloklardan önde bulunan A blokta ölçümler için sağda, tipik bir izleme-kaydetme şebekesi için gereken ivme ölçer, enerji besleme ünitesi, RF-modem modülü ve GPS-anten'den oluşan düzenek yapı üzerinde, nümerik sonlu eleman model analiz sonuçlarına göre yapısal karakteristiği en iyi yansıtacak mod şeklini veren yapısal noktalara kurulmuştur. Şekil 3 solda, çatı plağı kütle merkezinden geçen kirişe tespit edilmiş sarsma jeneratörü bağlantılarını, sağda ise yapay deprem üretici Kinometrics'in üretimi olan 103 seri numaralı titreşim jeneratörü görünüyor. Bu cihaz sayesinde birbirine göre ters dönen iki sepete konulan Tablo 1'deki L (Large) ve S (Small) etiketli kurşun ağırlıkların adedine bağlı olarak tam dolu durumunda 2.5 Hz.'den boş durumda 9.7 Hz.'e kadar harmonik (Sinus) titreşimleri üretebilmektedir. Çatı seviyesinden uygulanan bu sarsma işlemi bir frekans kontrol ünitesi yardımıyla frekans içeriği kontrollü değişen sinüs salınımlarına maruz bırakılmış ve yapının uygulanan zorlama kuvvetlere iştirak etmesiyle oluşan yapıya özgün davranışlar yapısal noktalarda kurulmuş ivme ölçer istasyonlar tarafından kuvvetin etkin olduğu süre (3–5 dak.) boyunca kaydedilmek suretiyle yapı tepki verileri oluşturulmuştur. Serbest titreşim ölçümleri ise, anlık değişimlerin ve etkilerinin izlenebilmesi için 300 sn. süren kayıt uzunluğu ile 5 set olarak tekrarlanmıştır. Saha çalışmalarının tamamında örnekleme frekansı 200 Hz. alınmıştır.

Tablo 1. Yapay Deprem Üretici Yük – Frekans Çizelgesi

Yapay Deprem Üretici Kinometrics Seri No: 103'e ait Sepet Yükü Frekans Çizelgesi					
	0	S1	S2	S3	S4
0	9.7Hz	7.2Hz	6.0Hz	5.2Hz	4.7Hz
L1	5.0Hz	4.6Hz	4.2Hz	3.9Hz	3.7Hz
L2	3.8Hz	3.6Hz	3.4Hz	3.3Hz	3.1Hz
L3	3.2Hz	3.1Hz	3.0Hz	2.8Hz	2.8Hz
L4	2.8Hz	2.7Hz	2.6Hz	2.6Hz	2.5Hz



Şekil 3 Yapay deprem üreticinin çalışılan bina çatı döşemesinde kütle merkezinden geçen uygun yapı elemanına montajının alttan görüntüsü solda, üstten çalışırkenki görüntüsü, sağda.

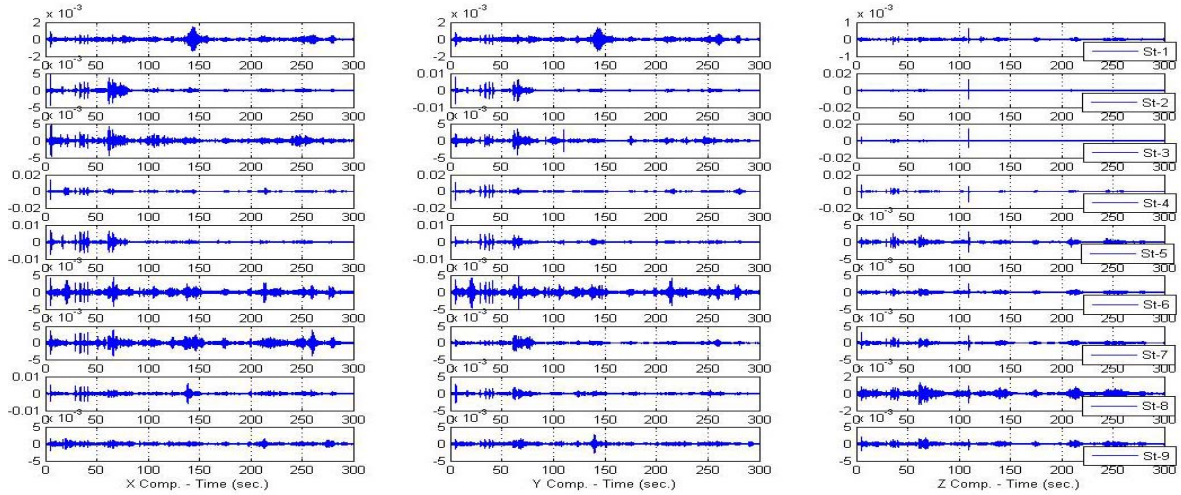
## SERBEST VE ZORLAMA KUVVETLER ALTINDA ÖLÇÜMLER

Yapılar serbest titreşim şartlarında Şekil 4'de 300 saniyelik zaman penceresinde çizdirilen örnekte olduğu gibi elastik bir davranış içinde titreşim sergilerler. Eğer yapısal elemanlardan hasarlı olan



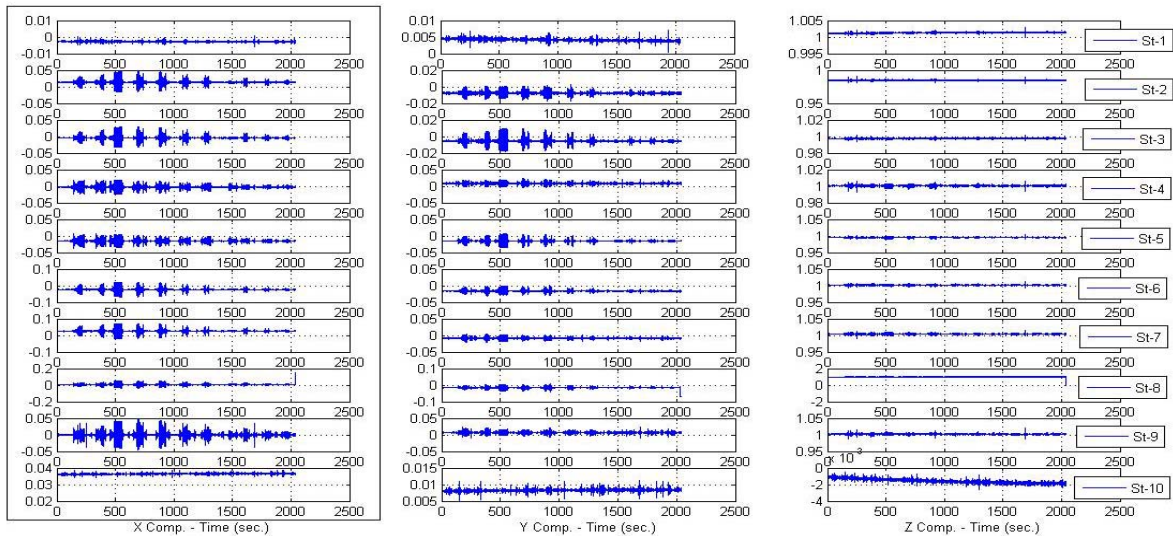
var ise, statik olarak ulaştıkları kararlı durum şartlarında, değişen eleman rijitliklerinin son durumuna (dolayısıyla global rijitlik matrisinin son durumuna) bağlı olarak değişmiş (büyümüş) periyodlar altında titreşirler. Serbest titreşim şartlarının ötesinde zorlama bir dinamik kuvvet etkisi ise statik olarak kararlı durumdaki hasarlı binadan elastik ötesi hareket isteminde bulunacaktır. Hasarlı yapı nümerik kalibrasyonu için hasarlı yapı karakteristik dinamik özellikleri hakkında önemli bilgiler bu safhada elde edilebilir. Örneğin nümerik bir modelin hasar görülebilirlik analizleri sonunda gözlenen hasar rölevesindeki dağılıma ulaşılması elastik ve elastik ötesi model tutarlılığının yüksek olduğunu gösterecektir. Oluşan hasar sonrası kararlı durumun tutarlılığını (dolayısıyla kullanılan plastik mafsalların güvenilirliğini) test etmek için aşamalı olarak yapıya uygulanan dinamik zorlama kuvvetler altında kaydedilmiş tepki geçmişinin nümerik model tarafında üretilebilme gücünün sınanması bu testlerin yapılma sebeplerinden bir diğeridir.

Ambient Vibration Measurement Data For kmursel-ABlok-set-3



Şekil 4 Çevrel titreşimler yapı üstünde konuşlandırıldığı istasyonlarda üç bileşenli ivme ölçerler (X, Y, Z bileşenler) ile kaydedildi.

Kmursel-A-Blok-Shaker-X-ALL-20100917 Forced Vibration Measurements



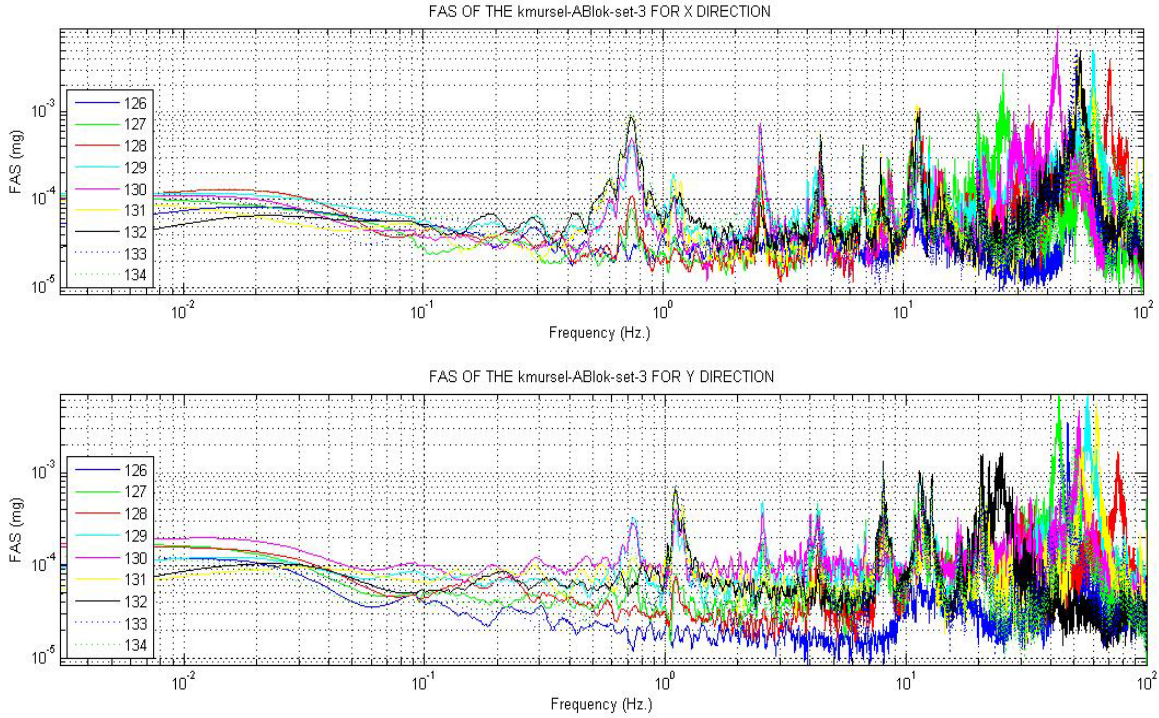
Şekil 5 Yapay deprem etkisinde yapı üstünde konuşlandırılan 10 gözlem istasyonunda x yönü değişik yüklemeleri için kaydedilmiş toplam 35 dakikalık üç bileşen ivme kayıtları.

17 Eylül 2010 tarihli testde, yapıya x yönünde etkittirilen değişik genlik ve frekans muhteviyatına sahip yapay deprem tekrarlarının toplamını oluşturan 35 dakikalık tepki-zaman hikayesi kaydedildiği ham haliyle örnek olarak Şekil 5'de çizdirilmiştir. X yönünde güçlü, diğer bileşenlerde göreceli olarak daha zayıf tepki hikayelerinin 10 yapısal izleme istasyonunda

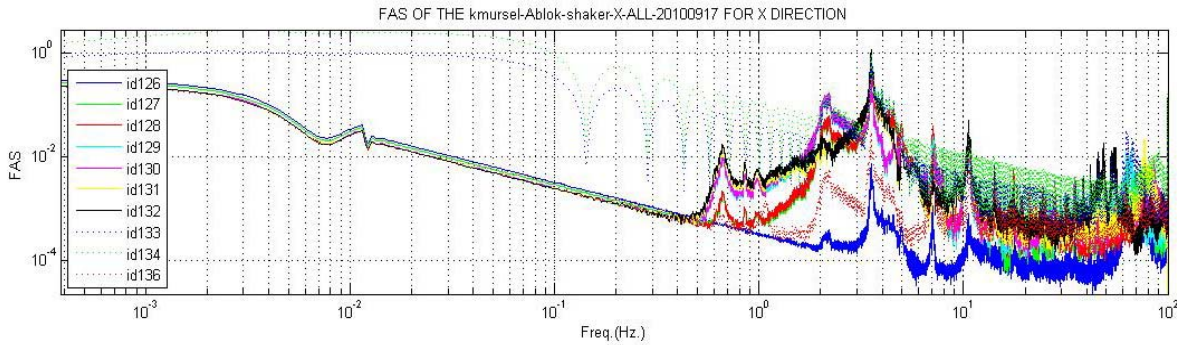
izlenmesi, yapının önemli mertebede hasarlı olduğunu göstermekle beraber, burulma ve y yönü rezonans frekanslarıyla rastlaşması çok muhtemeldir. Dolayısıyla, toplamda, tek yön yüklemenin tek serbestliği tetikleemesinin yanı sıra ortogonal eksen serbestliklerinde yükden etkilendiğini kayıtlarda görmemiz hasarlı yapının davranış karakteristiği olarak algılanmış ve referans olarak kullanılmıştır.

## YAPI TANI ANALİZLERİ

Zaman tanım alanındaki kayıtların frekans içeriğinin anlaşılabilmesi için Şekil 6a'da iki yatay bileşenin çevrel titreşim verileri Fourier dönüşümüne tabi tutulmuş ve elde edilen genlik spektrumları çizilmiştir. Şekil 6b'de ise x yönünde uygulanan değişik genlik ve frekans muhteviyatına sahip yapay depremler toplamının Fourier genlik spektrumu çizilmiştir.



Şekil 6a Çevrel titreşim ölçümlerinden elde edilen istasyon kayıtlarının Fourier dönüşümlerinin x (üst) ve y (alt) yönleri için genlik-frekans içeriği.



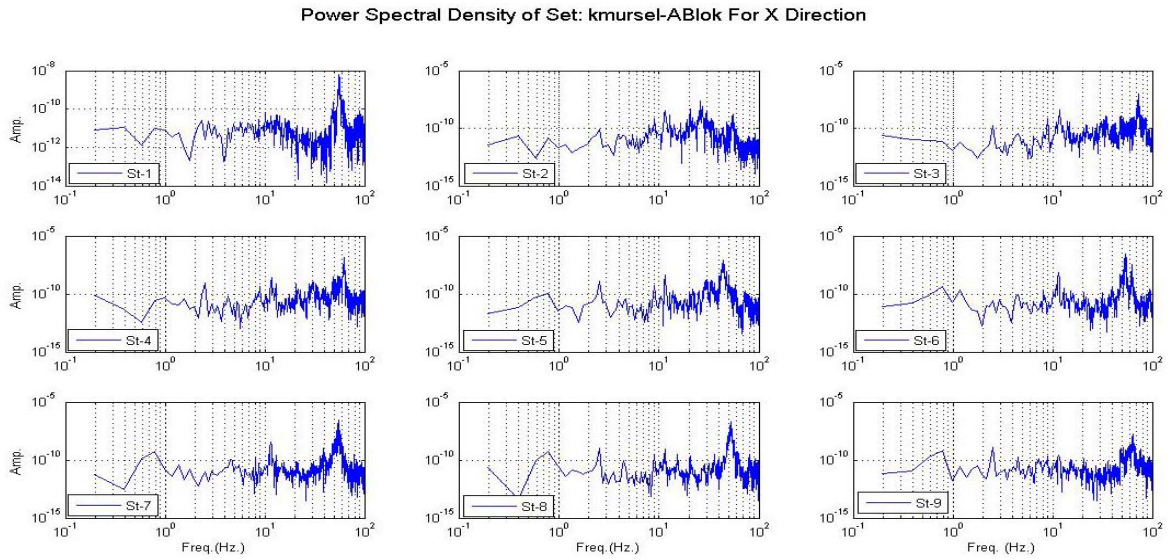
Şekil 6b Karamürsel A blok, 17 Eylül 2010 tarihinde x yönünde yapılan değişik genlik ve frekans muhteviyatına sahip yapay depremler toplamının Fourier amplitude spektrumu.

Şekil 6'da verilen serbest ve zorlama titreşim Fourier genlik spektrumları mukayeseli incelendiğinde, çevrel titreşimin x yönü için 0.7 tepe frekanslı 0.5-0.9 geniş band aralığında hakim tepesiği 0.9, 1.1, 2.5, 4.2, 7.8, 8, 9, 12 Hertz ves. gibi tepe frekansları takip etmekte olup, ufak genlik farklılıkları dışında benzer modal frekanslar y yönünde de görülmektedir. X yönü zorlama titreşim Fourier genlik spektrumları 0.65, 0.85, 1, 2.2, 3.5, 5, 7, 10, 13 Hertz ves. gibi yapıyı

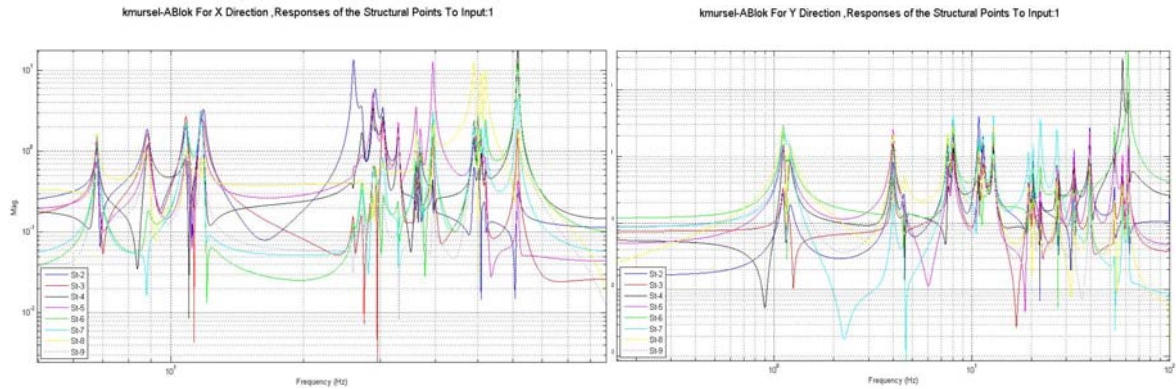


titreştirebilen hakim modlara sahip girdi zorlayıcı kuvvetlerin tepelikleri görülmekte olup yapının her iki yük şartlarında benzer frekanslarda tepelikler üretmesine rağmen tepe genlikleri arasındaki göreceli oranın serbest ve zorlama yük şartlarında farklılık göstermesi dikkat çekici olup, kuvvetli yükleme şartlarının serbest şartlara göre zorlayıcı yapısının temel etken olduğu kanaati hakimdir. Çevrel titreşimlerde x ve y yönü frekanslarının benzerliği yapının planda kareye yakın olması ve hasarlı son durum itibariyle yakın benzer yanal rijidliklere sahip olmasıyla açıklanabilmektedir.

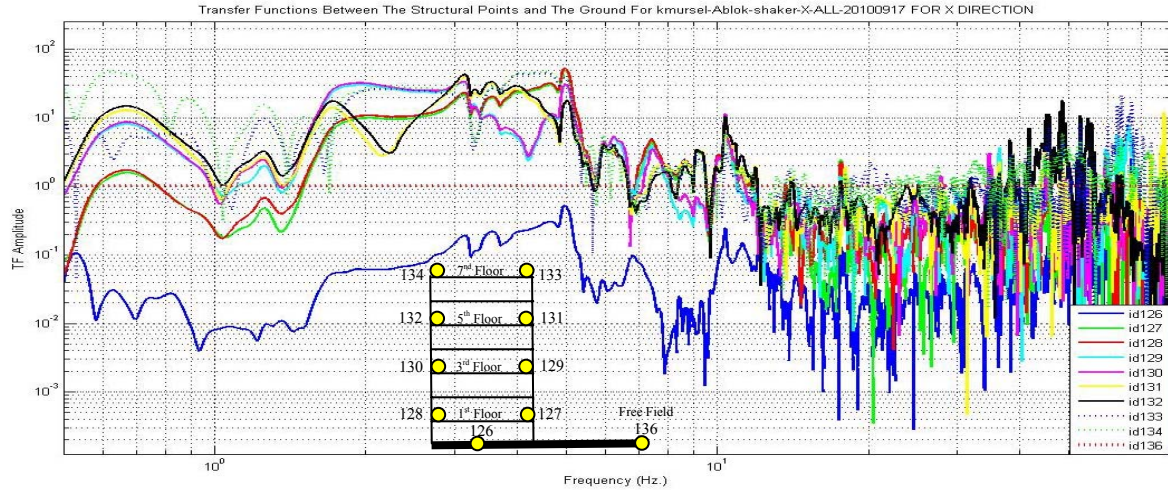
Güç spektrumu ise aynı bilginin frekans tanım alanındaki görüntüsü olup hakim dalga formlarının yani yüksek enerji yüklü bileşenlerini belirginleştirmekte olup Fourier dönüşümüyle gözlenen kompleks, girişimli, geniş band yapılarını veya seçilemeyen frekans girişimlerini netleştirmemizde bize yardımcı olacak önemli detaylar vermektedir. Bu ayırıcı özelliğine karşın Fourier dönüşümündeki faz bilgileri eksiktir. Şekil 7’de x yönü serbest titreşim kayıtlarının güç yoğunluk spektrumları çizilmiştir. X yönü güç spektrum tepeliklerine bakıldığı zaman yapısal gözlem noktaları düşük frekans bölgesinde farklı tepe genlikleri vermelerine rağmen benzer modal frekansları (0.4, 0.7, 1.2, 2.5, 4, 7, 8, 11Hz gibi) hakim tepelikleri göstermektedir. Rastlantısal dalga yayılımının her cihazda belirli bir benzerlik gösterdiğini fakat bazı istasyonlarda farklı modları hakim yaptığını görebiliyoruz.



Şekil 7 Yapısal izleme noktalarının x yönü serbest titreşimlerinin güç yoğunluk spektrumları.



Şekil 8a Çevrel titreşim şartlarında açık alan girdi kuvvetlere karşı yapısal noktaların tepelikleri x yönü için solda ve y yönü için sağda.



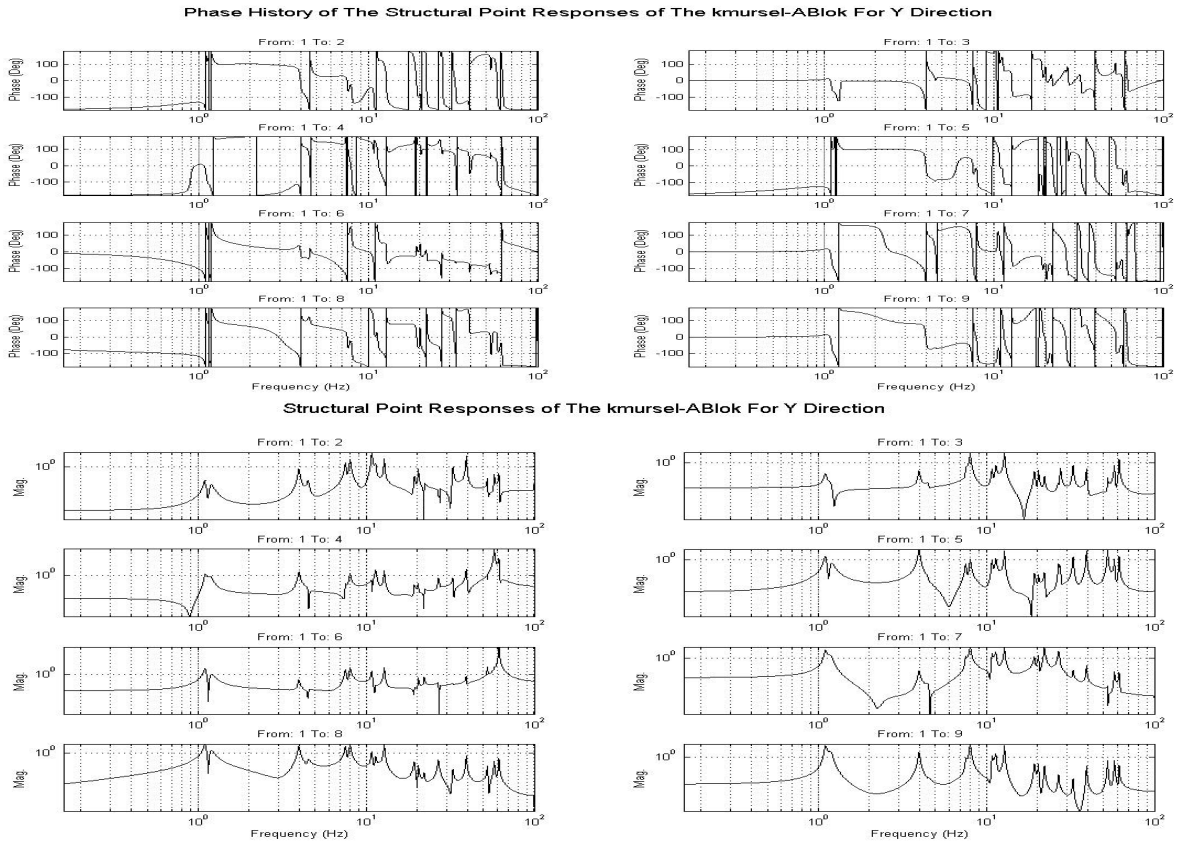
Şekil 8b X yönü toplam zorlama harmonik kuvvet şartlarında yapı-zemin transfer fonksiyonu. Cihaz konum bilgisi grafik içinde görülmektedir.

Yapısal gözlem noktalarıyla yer arasında hesaplanan göreceli transfer fonksiyonlar ise Şekil 8a'da çevrel titreşim ölçümleri için sırasıyla x ve y yönünde, x yönü zorlama kuvvet şartları için Şekil 8b'de verilmiştir. Çevrel titreşimlerde x yönü için 6.5, 8.5, 11, 12 Hz gibi frekanslarda 10 katına kadar büyütme ilgili tepe frekanslarında gözlenirken, y yönünde 1.2, 4, 8, 11, 13 Hz gibi farklı tepe frekanslarında büyütme görülmüştür. Şekil 8b'de x yönü için değişik genlik ve hakim frekans yapılarına sahip harmonik yükleme kuvvetler toplamı göz önüne alınarak serbest yüzey (id136) kaydı ile yapısal gözlem noktaları arasında hesaplanan transfer fonksiyonları incelendiğinde, 0.6-0.7 Hz band aralığında yapı zemin etkileşiminin izlerini veren deamplifikasyon izlenmektedir. Buna mukabil üst yapıda, örneğin 1. kat istasyonları beraber zemine göre 2 misli, 3. kat istasyonları 5 misli, 5. kat istasyonları 15 misli büyütmeyle senkronize davranarak tam yanal ötelenme mod şekline doğru giderken çatı döşemesi olan 7. kat istasyonlarından id133 0.4 Hz'de 5 misli, diğeri id134 0.6 Hz'de 50 misli büyütmeyle farklı davranmışlardır. Buna mukabil 1.5 Hz'de bütün istasyonlar aynı tepe frekansını verirken 1. katda deamplifikasyona karşılık diğer kat istasyonları 2-10 misline kadar zemine göre büyütme gözlemlendiği modal deformasyonlar oluşmuştur.

Zorlama kuvvet altında uyarılan yapısal tepkilerin görüldüğü frekansların bir kısmı serbest titreşim altında gözlenen modal frekansların civarında tekrar ettiği gözlenmiştir. Bu modal tepki diyebileceğimiz küçük frekans bölgesi davranışlarının ötesinde, yüksek frekans bölgesinde gözlenen birçok tepki tepecikleri, hasarlı elemanların birleşim noktalarının (yığılı hasar) veya hasarlı eleman bünyesinin (yayılı hasar) etkilediği lokal hasar davranışlarıdır. Küçülen kayma rijidliği ve eğilme rijidlik değerlerinin neden olduğu esnek yapı davranışı global modların hakim olduğu küçük frekans bölgesinde tepe frekans değerlerinin zorlama kuvvetler altında frekans ekseninde yer değiştirmesine neden olmuştur. Yüksek frekans bölgesinde hasarlı eleman davranışının tipik sonucu olan enerji yutan mekanizma yani sönüm daha etkinleşmekte ve yapı tepki fonksiyonlarında sert tepeciklerin yumuşadığı kaybolduğu ve tepe-tepe girişimlerinin olduğu Şekil 8b'de zorlama kuvvet için verilen yapısal noktaların tepkileri ile zemin girdisi arasında çizilen transfer fonksiyonlarında seçilebilmektedir.

Yapı dinamik davranışının tanımında klasik spektral (nonparametrik) tekniklerin yanı sıra modal davranış tutarlılığının sağlanması için yapısal modelleri temsil edecek önerilen aday nümerik modellerden, örneğin otomatik regrasyonlu geri besleme model (Auto Regressive eXtra input (ARX)), 4 aşamalı adaptif değişken model (4 stage Instrumental Variable method (IV4)), durum-uzay modeller (STATE\_SPACE) ve hata ayıklama algoritmalarının (Prediction Error Method (PEM)) katkısıyla belirlenen optimizasyonlar çerçevesinde en uygun olanı seçilip, eldeki spektral analiz bilgileri de dikkate alınarak en uygun model ve parametreleri yapı dinamik özelliğini tanımlamakta kullanılabilir. Bu çalışmada, kullanılan veriler spektral metodun aksine zaman tanım alanındadır. Zemin ve yapı kayıtları girdi-çıkı çifti olarak kurgulanmış ve yapı davranışını

temsil etmesi için önerilen modellere sayısız (100x100x100) alternatif değişimin içinden optimizasyon yaparak bir tanesi önerilmiştir. Çevrel ve mikrotremor kayıtları genelde veri işleme uygulamalarında gürültü analizleri olarak değerlendirilirler, bu çerçevede, kullanılan bir yöntemin gürültü seviyesi değerlendirmesinin doğrulması yapılmaya çalışılmış, içinde bulunabilecek yapısal bilginin ayıklanması için Gözlemci/Kalman Filtre Tanı Tekniği Eigen Sistem gerçekleştirme algoritmaları (Observer/Kalman filter Identification and Eigen System Realization Algorithm (OKID/ERA)) ile Tek Giriş Tek Çıkış (TGTC (SISO)) ve Çok Giriş Çok Çıkış (ÇGÇÇ (MIMO)) nümerik sistem modelleri çalışılmıştır. Klasik veri analiz tekniklerinin aksine, OKID'in



Şekil 9 X yönü çevrel titreşim ölçüm verilerinin frekansa göre davranış fazındaki değişimleri üstte, hakim modal tepcikler ve modal frekanslar altta.

gözlem verisinden doğrudan elde ettiği parametrelerin asimtotik olarak stabil olmasının getirdiği kazanç ile veride olabilecek gürültü kirliliği veya tahmin hatası gibi işlem kirlilikleri minimize edilerek aşılmıştır. Kullanılan algoritmalar ile ilgili detaylı bilgi Juang (Juang, 1985 ve 1994) ve Beyen (Beyen, 2008) de bulunabilir.

TGTC (SISO) şartları için döşemelerin rijid diyafram çalıştığı ayrıklaştırılmış kat kütlelerinin kendi seviyesinde eşdeğer yanal kat rijitliğini temsil eden hayali bir düşey rijit çubuk üstünde yığılı olduğu basitleştirmesiyle rijitlik matrisinde diagonal eksen üzerindeki kat serbestliklerinin bir yatay yönde serbest oldukları kabulüne denk düşen ve katlar arası etkileşimin olmadığı öngörüsünü işleten bir yapı davranışının transfer fonksiyonudur. Buna mukabil, katlar arası etkileşiminde göz önüne alınacağı ama yine yığılı kütle davranışını anlamamıza yarayacak ÇGÇÇ (MIMO) şartları için rijitlik matrisinde diagonal eksen ve diagonal eksenin alt ve üst bölgesindeki rijitlik terimlerinde katkı verdiği (elemanlarda hiperstatik çalışmanın sunduğu dengelenmiş – kararlı hale gelmiş) bir yapı davranışının transfer fonksiyonu verilerden tahmin edilmektedir. Şekil 9'da kısaca anlatılan parametrik modal analizin Matlab ortamında yapılan yazılımlar ile yürütülen analiz sonuçları x yönü çevrel titreşim ölçümü için yapısal gözlem noktalarının frekansa göre davranış

fazındaki değişimleri ve faz değişimine denk düşen frekanslardaki hakim modal genlikleri gösteren kat (istasyon) transfer fonksiyonları çizdirilmiştir.

Bulunan yapısal model ile şekillenen transfer fonksiyonlardan elde edilen değerler kullanılarak hesaplanan yapı parametrelerinden olan hakim modal frekanslar ve bu modlara tekabül eden yapı sönüm katsayıları Tablo 2’de görüldüğü gibi x yönü için verilmiştir.

Tablo 2. Karamürsel A Blok Parametrik Modal Analiz Sonuçları

Karamürsel A Blok Modal Analiz (x Yönü)	
Hakim Frekanslar (Hz.)	Modal Sönüm Oranları (%)
0,73	1,78
2,55	0,56
4,53	0,77
6,79	0,43
8,05	0,71
8,85	1,26
11,45	0,97
11,70	0,65
26,05	0,23
42,61	0,59
43,18	0,54
43,75	0,44
43,78	0,37
44,03	0,72
44,07	0,41
62,39	0,24

## SONUÇLAR

Yapı dinamik davranışının tanımında klasik spektral (nonparametrik) tekniklerin yanısıra parametrik modeller önerilmiş ve içlerinden en tutarlı olan seçilerek parametrik analizlerde kullanılmış, Tablo 2’de verilen sonuçları klasik sonuçlar ile çapraz sınanmıştır. Kullanılan veriler spektral metodun aksine zaman tanım alanındadır ve zemin yapı kayıtları girdi-çıkı ilişkisi içinde analiz edilmiştir. Çevrel titreşim verilerinin spektral analizde verdiği örneğin x yönü için 0.7 tepe frekanslı 0.5-0.9 geniş band aralığında hakim tepesiği 0.9, 1.1, 2.5, 4.2, 7.8, 8, 9, 12 Hertz ves. gibi tepe frekansları takip ederken aynı yönde zorlama kuvvet altında 0.65, 0.85, 1, 2.2, 3.5, 5, 7, 10, 13 Hertzlerde gözlenmektedir. Yapının her iki yük şartlarında tam tepe frekanslarında tepkiler üretmemesi fakat benzer yakın frekanslarda tepkiler üretmesi, tepe genlikleri arasındaki göreceli oranın serbest ve zorlama yük şartlarında farklılıklar oluşturması, zorlama kuvvetler altında ihtiyaç duyulan tam çerçeve çalışma şartlarının bazı hasarlı elemanlardan dolayı toplam davranışta katkılarının düşmesi dikkat çekici olup, kuvvetli yükleme şartlarının serbest şartlara göre zorlayıcı yapısının temel etken olduğu kanaati hakimdir. Çevrel titreşimlerde x ve y yönü frekanslarının benzerliği yapının planda kareye yakın olması ve hasarlı son durum itibarıyla yakın benzer yanal rijidliklere sahip olmasıyla rijidlik merkeziyle kütle merkezinin simetri eksenlerinin kesişim noktasına kaymasıyla açıklanabilmektedir.

Zorlama kuvvetler altında, lokal hasar davranışları, küçülen kayma rijidliği ve eğilme rijidlik değerlerinin neden olduğu esnek yapı davranışı içinde açığa çıkmıştır. Global modların hakim olduğu küçük frekans bölgesinde tepe frekans değerlerinin zorlama kuvvetler altında frekans ekseninde yer değiştirmelere neden olduğu görülmüştür. Yüksek frekans bölgesinde hasarlı elemanların enerji yutan özelliği sönüm yüzdesini yükseltmiş ve sonuç olarak transfer fonksiyonlarında sert tepeliklerin yumuşadığı kaybolduğu ve tepe-tepe girişimlerinin oluştuğu anlaşılmıştır.



## Teşekkür

Bu makalede bazı sonuçları verilen proje çalışması 108M303 koduyla TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir. Katkılarından dolayı yazarlar teşekkürlerini sunar.

## KAYNAKLAR

- [1] Liu, S. C. and Yao, J. T. P., (1978), 'Structural Identification Concept', ASCE Journal of The Structural Division, V. 104, No. ST12, 1845-1858.
- [2] Kemal Beyen, 'Structural identification for post-earthquake safety analysis of the Fatih mosque after the 17 August 1999 Kocaeli earthquake', Engineering Structures (2007), doi:10.1016.
- [2] Kemal Beyen and M. Erdik, 'Two Dimensional Nonlinear Site Response Analysis of Adapazari Plain and Predictions Inferred From Aftershocks of The Kocaeli Earthquake, 17 August 1999', Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 24 (2004) 261–279, 2004.
- [3] Erdal Şafak et. al., 'Recorded Main Shock and Aftershock Motions', EERI Spectra Special Issue on Turkish Earthquake, 2000
- [4] Lus, H., De Angelis M, Betti, R., and Longman, R.W., "Obtaining Physical Parameters of Mechanical Systems from Identified State Space Models. Part I: Theoretical Discussions", ASCE Journal of Engineering Mechanics, Vol. 129 (5), pp. 477-488, 2003
- [5] Inman, D. J. and Minas, C., (1986), 'Matching analytical models with experimental modal data in mechanical systems', Control and Dynamics Systems, V. 37, 327-363.
- [6] Law, S. and Li, X., (1993), 'Structural damage detection based on higher order analysis', Proceedings of Asia Pacific Vibration Conference, Japan, 640/3.
- [7] Lim, T. W., (1990), 'Submatrix approach to stiffness matrix correction using modal test data', AIAA Journal, V. 28, No.6, 1123-1130.
- [8] Choudhury, R. and He, J., (1993), 'Expansion of measured frf data for model updating', Proceedings of Asia Pacific Vibration Conference, Japan, 677-682.
- [9] Mathworks, Signal Processing Toolbox for Matlab, Ver. 6.5 Release 13, The MathWorks Inc., Natick, MA, 2002.
- [10] J. K. Hammond, 1998, 'Introduction to Signal Processing, Fundamentals of Signal Processing', Modal Analysis and Testing, edited by Julio M., Silva and Nuno M. M. Maia, Nato Science Series, Series E-Vol. 363
- [11] H. Imai, C-B. Yun, O. Maruyama and M. Shinozuka, 'Fundamentals of System Identification in Structural Dynamics', Technical Report NCEER-89-0008, January 26, 1989.
- [12] Jullus S. Bendat, 1990, 'Nonlinear System Analysis and Identification From Random Data', Wiley-Interscience.
- [13] Juang, J.-N., Applied System Identification, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1994.
- [14] Juang, J.-N., Pappa, R. S., 'An Eigensystem Realization Algorithm For Modal Parameter Identification And Model Reduction', Journal of Guidance, Control, & Dynamics, Vol. 8, No.5, 1985, pp. 620-627.
- [15] Phan, M.Q., Observer/Kalman Filter Identification (OKID): Step-by-Step Guide and References, A Matlab-based system identification software package, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, Princeton University, 1997.