

# YENİ YÖNETMELİĞİN SUNDUĞU DOĞRUSAL ELASTİK OLMAYAN STATİK ANALİZ YÖNTEMİNDEN ELDE EDİLEN YAPI TEPKİLERİNDEKİ BELİRSİZLİKLER

## THE UNCERTAINTIES IN THE STRUCTURAL RESPONSES INFERRED FROM THE NONLINEAR STATIC ANALYSIS METHODOLOGY OF THE NEW TURKISH EARTHQUAKE CODE

Kemal BEYEN,<sup>1</sup> Mustafa KUTANIS,<sup>2</sup> İ. Engin BAL<sup>3</sup>

### ÖZET

Özellikle sismik yüklerdeki değer belirsizliklerinin tasarım kararlarına büyük etkisinin olduğunu biliyoruz. Yapıya etkiyen dinamik yüklerin belirsizliğinin neden olduğu yapısal tepkilerdeki tutarsızlık, tepkilerdeki farklılıkları açıklayabilecek bir çok nedenden bir tanesidir. Fakat, aynı dinamik kuvvet için farklı metotlarla hesaplanmış yapısal tepkilerdeki tutarsızlığın sebebi bir diğer önemli halledilmesi gereken problemdir ve bu makalede, 2007 yılında yürürlüğe giren Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007) içinde seçenekler olarak verilen zaman tanım alanında analiz ve doğrusal olmayan statik itme analizi çalışılacaktır.

Çalışmada, 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin yapı bölgesinde kaydedilmiş verileri deprem yer hareketi olarak kullanılmıştır. Sonuçların eşit yük şartlarında mukayese edilebilmesi için kullanılan deprem kaydından üretilmiş olan eşdeğer elastik deprem spektrumu nonlinear statik analizde deprem yer hareketi olarak kullanılmıştır. Analiz seçeneklerinin sonuçları, yönetmelikte farklı yapı performans seviyeleri için önerilen katlar arası ötelenme oran sınırları ve diğer parametreleri açısından değerlendirilmiş ve tartışılmıştır. Tasarım için önemli olan bütün ihtimal yük durumları bu çalışmada dikkate alınmamıştır.

Analiz metotlarının test edilmesi için Gölcük'te 6 katlı tipik bir betonarme apartman yapısı on tane üç eksenli ivme ölçerden oluşan bir gözlem ağıyla dinamik sarsma ünitesinin frekans band genişliği sınırları içinde üretilebilen bir dizi zorlama kuvvetler ve çevrel titreşim ölçümleri için cihazlandırılmıştır.

Yapı tanı çalışmalarıyla elde edilen mevcut durumu yansıtan gerçek yapısal dinamik özellikler yapının sonlu eleman modelinin kalibre edilmesinde kullanılmıştır. Yönetmeliğin önerdiği yapı analiz metotlarının sonuçları ve 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin oluşturduğu hasarlı binanın yapı tanılama tekniği kullanılarak yapılan çalışmalarının sunduğu sonuçların ışığında farklılıklar ve belirsizlikler dikkate alınarak tartışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Deprem Yönetmeliği, Zaman Tanım alanında analiz, Performansa Göre Tasarım

### ABSTRACT

It is certainly well known that the uncertainties, particularly for seismic loads, can be very influential factors in the design decisions. The uncertainties in the structural responses, due to uncertainties in the loads exciting the structure, might be one of many reasons to explain the differences in responses. The discrepancy caused by the use of different methods, on the other hand, is known to be another reason of different results. The sole aim of this paper is to

<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

*investigate the inconsistencies in the capacity calculations by using time history and pushover analyses according to the the Turkish Earthquake Code of 2007.*

*In this study, time history recorded during the Kocaeli earthquake of 17 August, 1999, demonstrated to be well suited to the specifications of the Turkish code is used as an earthquake ground motion. As a special case, in order to compare the results of the two different analysis techniques, for an identical earthquake, the ground motion used in the pushover analysis was characterized by equivalent elastic earthquake spectra, which were developed from available time history at the nearest construction site. Different performance levels suggested in the Turkish building code (TDY-2007) are tested in terms of specified interstory drift ratio limits and their corresponding reliabilities. At this stage, to specify all possible loading cases that the structure might experience during its lifetime is not the case, since, it is clear that the choice of all possible cases is of utmost importance for the design purpose.*

*To test the analysis methods for a typically suitable structure, an apartment building at Gölcük with 6 stories, was instrumented by a total of ten three-axial components accelerometers in order to record the ambient vibrations and a set of force vibrations with available varying amplitudes in broadband frequencies of the shaker excitation. The most realistic structural dynamic characteristics under present circumstances inferred from structural identification study are used for calibrating the structural parameters in the finite element modeling. Results of the structural analyses of the TDY-2007 and those of the structural identification of the building damaged during the 17 August 1999 Kocaeli earthquake are discussed, paying special attention to the differences and uncertainties in the methodologies.*

*Key words: Earthquake code, Time History analysis, pushover analysis*

## GİRİŞ

Hesaplama teknolojilerinde oluşan gelişmelerin ve Kocaeli depremi gibi son zamanlarda dünyada olan şiddetli depremlerin inşaat mühendisliğine kazandırdığı gözlem ve birikimlerin ışığında (Şafak vd., 2000), Türkiyenin yanısıra bir çok ülkenin yapı tasarım yönetmeliklerine itme analizi doğrusal elastik olmayan yöntemlerden biri olarak girmiştir (T. C. Bay. İ. Bak., 2007). Amaç ise verilen bir deprem için sünek davranışa ilişkin plastik şekil değiştirme istemleri ile gevrek davranışa ilişkin iç kuvvet istemlerinin hesaplanması ve yönetmelikce tanımlanmış şekildeğiştirme ve iç kuvvet kapasiteleri ile karşılaştırılarak, kesit ve bina düzeyinde yapısal performans değerlendirmesinin yapılabilmesidir. Pratik mühendislik uygulaması açısından, önerilen yöntemlerin tutarlılığının tartışılabilceği açıktır. Bütün bunların yanısıra, yönetmeliklerdeki bu yöntemleri uygulayacak mühendislik bürolarının kullanabileceği sınırlı sayıda analiz programlarının anlaşılmayan/örtülü kabülleri ve/veya basitleştirmeleri veya uygulanmasında karşılaşılan zorluklar vardır. Deprem yükleri altında, zaman tanım alanında yapılacak doğrusal olmayan bir dinamik analiz yapı performansının değerlendirilmesinde oldukça doğru sonuçlar vermesine rağmen sonuçların kullanılan deprem yük şartlarıyla sınırlı olacağını biliyoruz. Yönetmeliğimizde bölüm 2' de kaydedilmiş veya benzeştirilmiş yer hareketi kullanımı ile ilgili kuralların (Doğrusal veya doğrusal olmayan hesapta, üç veya yedi yer hareketi kullanılması ve sonuçlarının değerlendirilmesi ves.) uygulanması safhasında yönetmelik koşullarını sağlayan depremlerle çalışılması, deprem merkezine uzaklık, yakın fay etkisi, yerel zemin koşulları, coğrafi saha karakteristiği gibi kıstasların sınırladığı deprem adeti içinden doğru depremleri seçmekte proje büroları açısından güçlükler vardır. Diğer yandan, yapı geometrisinin sunduğu geometrik sönümün yanısıra malzeme sönümünün karmaşık özelliği tam çalışılmamış ve dolayısıyla anlaşılır parametrelerle günlük mühendislik uygulamalarının içinde henüz tam ifade edilememiştir. Doğrusal olmayan dinamik analizde ise, örneğin histeretik veya viskos sönüm gibi modellerin sonuçlara büyük tesirler veren hassas yapısı, gözlenen mevcut ve nümerik model sonuçlarının mukayese edilmesiyle anlaşılmaktadır. Doğrusal elastik olmayan artımlı statik analiz ise bu türden sönümlerin yerine,

yapı elemanında oluşan birim-şekildeğiştirme enerjisini ve onun sonucu oluşan gerilmeleri göz önüne alırken etkiyen deprem süresince oluşan toplam enerji kaybıyla ilgilenmez.

Genel olarak, deformasyon analizlerinde, statik veya statikleştirilmiş deformasyon analizleriyle zaman tanım alanında yürütülen dinamik deformasyon analizleri arasında temelde farklılıklar vardır. Statik deformasyonlarda, eleman iç kuvvet değerlerinin hesaplandığı statik denge denklemleri toplamda sıfırı ve dahil edilen ayrıklaştırılmış tek mod eşdeğerlerinin toplamıyla (süperpozisyon) temsil ettirilen çok mod için göz önüne alınan yeterli mod sayısı ise tutarlılığı sağlar. Buna mukabil, dinamik deformasyon analizlerinde, deformasyonlar ve dolayısıyla önemli gerilmeler elemanın bir kısmında meydana gelirken diğer kısımları için bu durum söz konusu olmayabilir. Bir başka ifadeyle, elemanın karakteristik dinamik ve mekanik değerlerine ve deformasyonun an be an değişen yayılım hızına göre gerilme ve birim-şekildeğiştirme elemanda yayılmaktadır. Bu özelliğiyle dinamik deformasyon analizleri gerilme-birim şekildeğiştirme yayılım hikayesini verirken, statik deformasyon analizleri ardarda statik-denge (stabilite) durumunu vermektedir. Dolayısıyla, zaman tanım alanında depreme verilen doğrusal elastik olmayan tepkilerin ürettiği deformasyonlar ile artımlı statik yüklemeye verilen tepkilerin ürettiği deformasyonlar arasındaki farklılığın ve hata payının muhtemel kaynaklardan biri olabileceği tartışılmalıdır. Sonuçlar karşılaştırılırken, her iki analizde de tanımlanmış malzeme davranış modeli ve birim-şekildeğiştirme uygunluk ifadeleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Bir diğer önemli konu olan plastik dalga yayılımı ise farklılığı açıklayabilecek bir başka muhtemel yaklaşım olabilir. Sünek bir elemanda, belirli birim-şekildeğiştirme oranında gerilme dalgası genliği malzeme elastik gerilme sınırını aştığı zaman, plastik deformasyonlar gelişecektir. İlk akma gerçekleşikten sonra, oluşan plastik dalgaların yayılma hızı elemanın elastik şartlardaki yayılma hızından daha düşük olacaktır. Oysa, dinamik davranış içinde, çok kısa bir an için sabit olan birim-şekildeğiştirme oranında gerilme yayılım hızının o an için sabit olacağı bilinmektedir. Gerilme - birim-şekildeğiştirme eğrisini düşünersek, pekleşme oranının azalmasıyla hızın azalacağı bilinmektedir (Meyers, 1994).

Artımsal itme analizi 1990'lerden bu yana yapı deprem performansının değerlendirilmesinde kullanılmaktadır. Geleneksel artımsal itme analizinde, basit eğilme şartlarında geçerli olan idealleştirilmiş malzeme davranışı olan plastik mafsallı (elastoplastik) hipotezini plastik şekil değiştirme bölgelerinde (plastik mafsallı boyunda  $l_p=h/2$ ) kullanarak prizmatik eleman çubuklarının yığılı hasar modeli teşkil ettirilmiş ve yapının hakim mod şekline uyarlanmış eşdeğer yanal yük dağılımı artımlarla uygulanmıştır. Eleman eğilme moment kapasitesi aşıldığı zaman, plastik mafsalların eğilme momenti ve dönme açısı ilişkisi içinde elastoplastik davranış sergileyecekleri kabul edilmiştir. Yapılan ilk kabüllerden de anlaşılacağı gibi metotun uygulanma çerçevesi sınırlı olup, sonuçlarında farklı olması kaçınılmazdır. Son yıllarda, artımsal itme analizini burulmalı yapılara, çok modlu yapılara, rijitlik yumuşamasına girmiş yapılara uygulamak için çalışmalar yapılmaktadır. Deprem yükleri altında rijitlik yumuşaması yapının modal karakteristiklerini değiştirecektir. Örneğin, deprem süresi içinde hasar alan elemanlar ile yapı periyodu büyüme sürecine girecek, bu anlık periyot değişimleri dinamik yüklerin anlık değişimine sebep olacaktır. Yapı mukavemetinin ve genel rijitlik matrisinin analiz içinde ardışık olarak her yük artım adımında güncellenmesiyle problemlerin bir kısmı çözülmeye çalışılmış [4, 5, 6, 7, 8] ve uygulanabilirlik alanları artmıştır (Paret TF et al., 1996, Gupta et al., 2002, Elnashai, 2000, Aydınoglu, 2003, Penelis and Kappos, 2002).

Artımsal statik itme analizinin zayıf noktasını yanal yük şekli oluşturmaktadır. Yanal yük şeklinin, depremde yapıda oluşan atalet kuvvetlerinin yayılımına en yakın olan şekilde olması beklenir. Fakat, deprem sırasında şiddetli kuvvetlere maruz kalan yapının anlık farklı atalet kuvvet dağılımları sergileyeceği bilinmesine rağmen, yönetmeliklerde, küçük periyot değerlerine sahip yapılarda dolayısıyla hakim modal davranışı yüksek kütle katılımıyla gerçekleştiren yapılar için tek mod benzeşimli eşdeğer yük şekli ve dağılımı yapı davranışını kabul edilebilir doğrulukta tahmin etmek için yeterli görülmüştür. Diğer taraftan, artımsal statik itme analizi, toplam davranışa katkıları büyük olan yüksek sayıda moda sahip büyük periyotlu uzun yapılar için doğru deformasyon geçmişi ve hasar mekanizması verememektedir. Mwafy ve Elnashai, 2001 ve Lawson vd.'leri, 1994, artımsal statik itme analizinin perdeli-çerçeve taşıyıcı sistemlerin davranışını tahmin etmekte yetersiz olduğu sonucuna varmışlardır. Gözlenen metot tutarsızlığını perdelerin temel üstü birleşimlerinin kapasiteyi aşan eğilme momentler altında akmasına ve dönmesine sebep

olduğu, değişen eleman sınır ve mesnet şartlarının periyot büyümelerine, periyot kaymasına ve dolayısıyla atalet kuvvet dağılımlarının değişmesine bağlıdır. Aynı bakış ile, büyük şiddet (enerjik) bileşenlerini büyük periyotlarda tutan bir depreme maruz kalmış tek hakim moda sahip bir yapının elastik olmayan statik ve dinamik hasar görülebilirlik analiz sonuçlarında gözlenen farklılıklar için de benzer sebepleri sıralayabiliriz. Üç boyutlu asimetrik yapılarda olan düzensiz kütle ve rijitlik dağılımı artımsal statik itme analizinin uygulanmasını güçleştirmesinin yanısıra, uygulanacak eşdeğer yanal yük şekli, dağılımı, hedef deplasman ve izlenecek çatı noktası tartışılır hale gelmektedir. Dahası, üç boyutlu analizlerde, iki yönden etkilenecek yanal yüklerin eşzamanlı tatbik edilme benzeşimini verecek oluşmuş bir fikir birliğinin olmamasının yanısıra depremin düşey bileşeninin artımsal statik itme analizinde değerlendirilmesi şuan için söz konusu bile değildir. Sonuç olarak, kuvvet esaslı bir yaklaşım olan artımsal statik itme analizi örneğin mukavemet düzensizliği olan her yapı için tutarsız sonuçlar verecektir.

### YAPILMIŞ TEST MODEL ÇALIŞMALARI

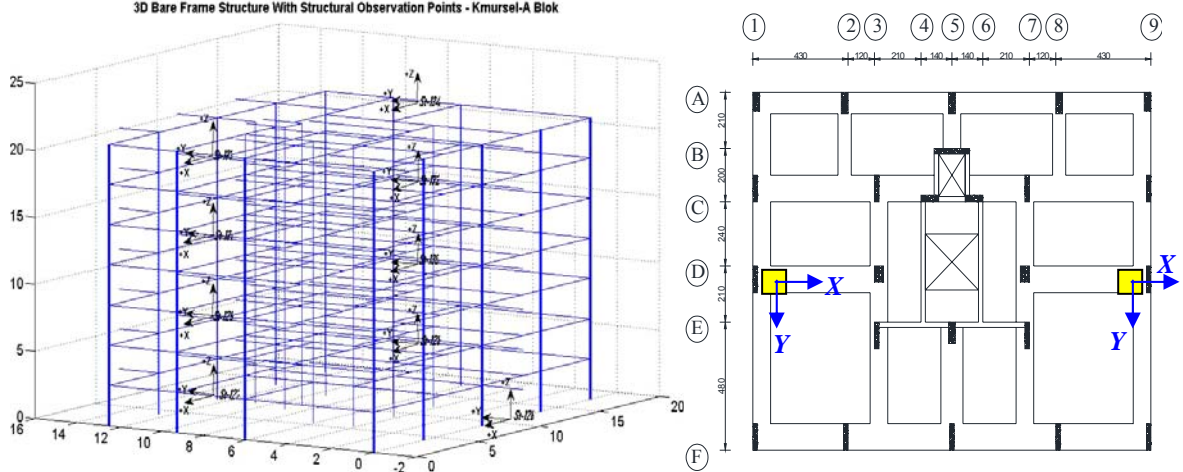
Geçmiş çalışmalara bakıldığında, metota eleştirel yaklaşanlar olduğu gibi pratiklik açısından faydalarından bahsedenlerde olmuştur. Faella, 1998, artımsal statik itme analizini kullanarak yapay ve kaydedilmiş farklı depremlere maruz bırakılmış değişik kat adetleri bulunan yapıların davranışlarını mukayese etmiş ve çökme mekanizmalarının ve kritik bölgelerinin tanımlanabildiği sonucuna varmıştır. Buna karşın, Kim ve D'amore, 1999, ise cihazlandırılmış 6 katlı çelik bir yapının farklı deprem yükleri altında farklı performans hikayelerinin artımsal statik itme analiziyle tahmin edilemediği sonucuna ulaşmıştır. Benzer şekilde laboratuvar şartlarında kontrollü yapı göçme testleri ile ilgili bir çok çalışma yapılmış ve nümerik olarak tekrar üretilmeye çalışılmıştır (Pinho ve Elnashai, 2000). Villaverde'in, 2007'de açıkladığı gibi, yapıların göçme kapasiteleri, mekanizması ve hasar dağılımıyla ilgili nümerik analizlerin gerçek yapıya etkimiş ve hasar vermiş kaydedilmiş deprem ve hasarlı yapı ile çalışılmaya ihtiyacı vardır.

### ÇALIŞMANIN AMACI

Mevcut hasar analiz metodlarının uygunluğu gerçek saha çalışmalarıyla hala tam test edilememiştir. Dahası, ülke gerçeklerini yansıtan pratikte uygulanan imalat teknikleriyle inşaa edilmiş gerçek üç boyutlu gözlenen bir yapının depremde kaydedilmiş değişik performans seviyelerinin (can güvenliği, ve göçme öncesi) davranışları nümerik benzeşimle üretecek hesaplama yöntemlerini test eden bir çalışma henüz yapılamamıştır. Bu ihtiyacın kısmen giderilmesi gayretiyle, TÜBİTAK'ın desteklediği 108M303 kodlu proje çerçevesinde Kocaeli depreminde, Şekil 1'de görülen, Halıdere, doksanlarda yürürlükte olan yönetmeliğe göre projelendirilmiş ve seksenli doksanlı yılların geleneksel inşaat uygulamasını temsil eden kabası tamamlanırken hasar almış altı katlı betonarme bir çerçeve gerçek bir vaka analizi yaklaşımı içinde çalışılmıştır. Henüz kapasiteye göre tasarımın yönetmeliklere girmediği düz inşaat demirlerinin kullanıldığı uygulamada, binanın üç boyutlu sonlu eleman (nümerik) modeli kesit geometrisi ve donatı bilgileri doğrultulararak Şekil 1 ve 2'de görüldüğü gibi oluşturulmuştur.



Şekil 1 İzmit körfezinde Halıderenin konumu, çalışılan binanın Halıdere'deki konumu, binanın görünüşü ve sonlu eleman nümerik modeli sırasıyla görünüyor.

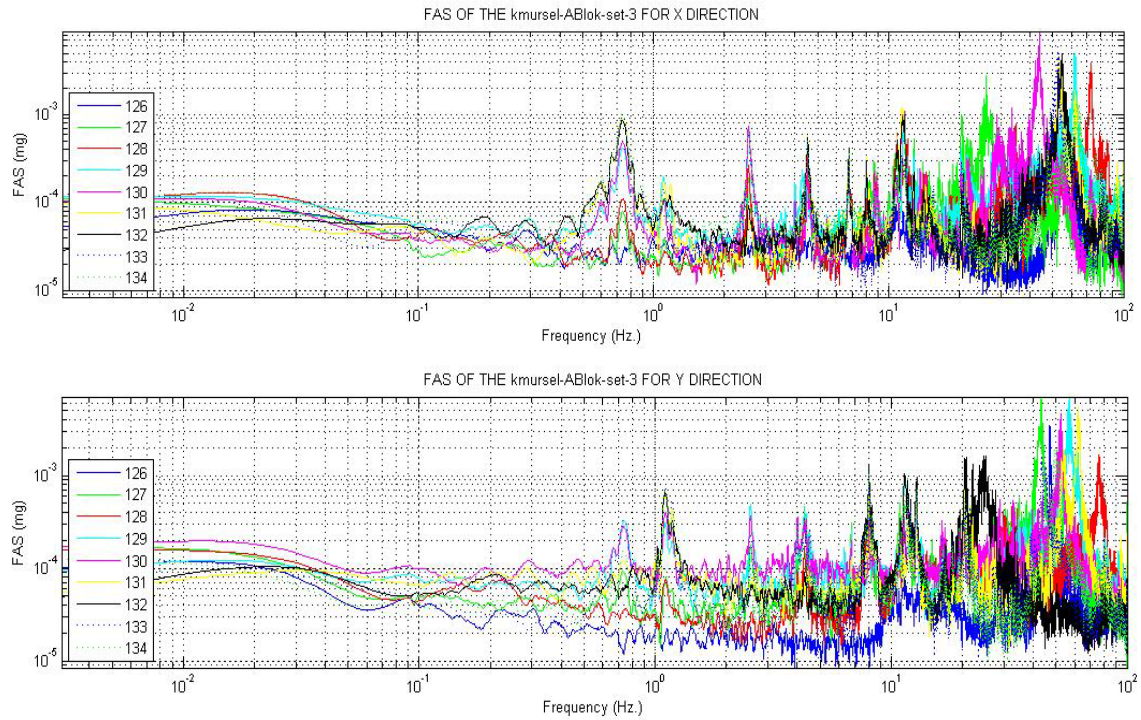


Şekil 2 Yapı üzerine serilen izleme cihazlarının konumları, yönelimleri ve cihaz numaraları üçboyut ve planda.

## YAPI TANILAMA ÇALIŞMASI SONUÇLARI

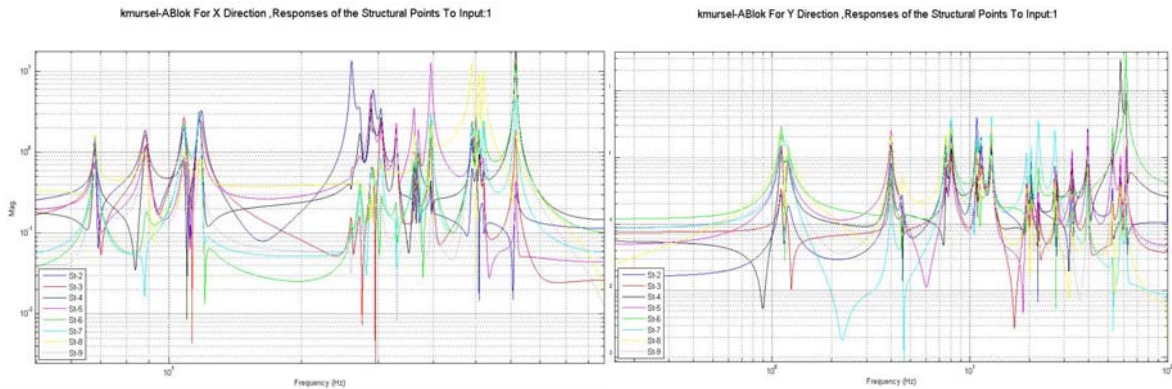
### Serbest Titreşim Ölçüm Sonuçları

Karamüsel girişi Haliderekteki bloklardan A bloğun yapısal tanılama çalışmaları için serbest ve zorlama titreşim ölçümlerinde kullanılmak üzere cihaz serimi ve polarizasyonu Şekil 2’de görüldüğü gibi yapılmış, ölçümlerde sinyal kalitesi ve veri tutarlılığının kontrolleri için çok setli kayıt 200 Hz.’de alınmıştır. Çevrel titreşim kayıtları 300 sn süre ile kaydedilirken, zorlama harmonik kuvvet uygulaması yapay depremin karakteristiğine ve etkiye süresine uygun zaman diliminde kaydedilmiştir. Tanılama çalışmalarıyla ilgili geniş bilgi Beyen vd., 2011 ve diğerlerinden öğrenilebilir (Beyen, 2007, Juang ve Pappa, 1985, Juang, 1994). Çevrel titreşim verilerinin Fourier dönüşümleri sonucu elde edilen genlik spektrumları Şekil 3’de çizilmiştir. Görüleceği gibi yüksek frekanslarda geniş band özelliğiyle hakim modal frekanslar 0.7, 1.1, 2.5, 4.5, 7 Hz. olarak x yönünde, 0.65, 1.1, 2.5, 4 Hz. değerleriyle devam eden modal frekanslar ise y yönünde tesbit edilebilmektedir.



Şekil 3 Çevrel titreşim ölçümlerinden elde edilen istasyon kayıtlarının Fourier dönüşümlerinin x ve y yönleri için Fourier genlik-frekans içeriğini veren grafikler, sırasıyla üst ve altta.

Veri işleme uygulamalarında çevrel kayıt sinyalleri gürültü analizleri olarak değerlendirilirler. Bu çerçevede, kullanılan bir yöntemin sonuçlarının tutarlılığı gürültü sinyal oranına bağlı olarak değişebilir ve sonuçların doğru tanılama ve doğru yapı bilgisi için doğrultulması gerekir. Gürültü olarak değerlendirilebilecek bir sinyalin içinde bulunabilecek yapısal bilginin açığa çıkarılması 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 gözlem verisinden doğrudan elde ettiği parametrelerin (Markov zincirleri) asimtotik olarak stabil olmasının getirdiği kazanç ile veride olabilecek gürültü kirliliği veya tahmin hatası gibi işlem kirlilikleri minimize edilmiştir. Kullanılan algoritmalar ile ilgili geniş bilgi Juang, 1994'de bulunabilir. TGTC şartları için döşemelerin rijit diyafram çalıştığı ayrıklaştırılmış kat kütlelerinin kendi kat seviyesinde yanal serbestliğe sahip olduğu kabulüyle, yapı genel rijitlik matrisinde tek yatay serbestliğe sahip olmanın diagonal eksen üzerindeki terimlerle gerçekleşebileceği ve katlar arası etkileşimin olmadığı dolayısıyla diagonal terimlerin dışında rijitlik matrisinin sıfır olacağı bir yapı davranışını tarifleyen TGTC algoritmasından elde edilen kat transfer fonksiyonları Şekil 4'de çizilmiştir. Modal bilgiler ise Tablo 1'de modal frekans ve modal sönüm olarak ilk 16 mod için gösterilmiştir.



Şekil 4 Çevrel titreşim ölçümlerinin yerel serbest ortam girdi kuvvetlere karşı yapısal noktaların tepkilerinden hesaplanan transfer fonksiyonları solda x yönü, sağda ise y yönü.

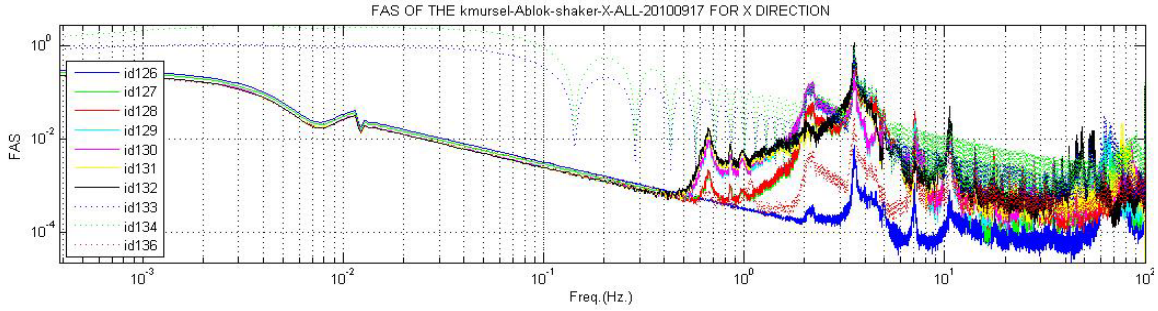
Tablo 1. Karamürsel A Blok Modal Parametreler

Karamürsel A Blok Modal Analiz (x yönü)																
Hakim Frekanslar (Hz.)	0,67	2,55	4,53	6,79	8,05	8,85	11,45	11,7	26,05	42,61	43,18	43,75	43,78	44,03	44,07	62,39
Modal Sönüm Oranları (%)	1,78	0,56	0,77	0,43	0,71	1,26	0,97	0,65	0,23	0,59	0,54	0,44	0,37	0,72	0,41	0,24

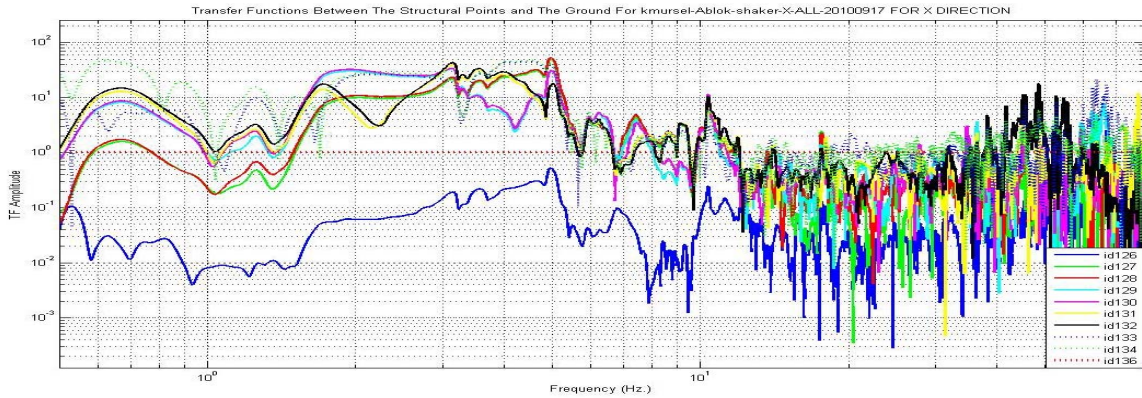
### Zorlama Harmonik Test Ölçüm Sonuçları

Yapay deprem olarak nitelendirilebilecek, tek yönden uygulanan değişik genlik ve frekans muhteviyatına sahip harmonik sinüs zorlama kuvvetleri altında yapıların tepkilerinin ve davranış karakteristiklerinin tanılanması yapıların nümerik model düzeltmelerinin yapılmasında, statik, dinamik ve mukavemet parametrelerinin yapı üzerinden alınan ölçüm analiz sonuçlarına göre güncellenmesiyle model tutarlılığının yükseltilmesi amaçlanırken, çevrel titreşimler gibi lineer girdilerin aşılması linear ötesi zorlama kuvvetleri altında statik açıdan kararlı durumda bulunan hasarlı/hasarsız yapısal davranışın karakteristik özelliğinin açığa çıkarılması için zorlama kuvvet testleri yapılmıştır. Üretilen değişik genlik ve farklı hakim tepe frekanslara sahip harmonik sinüs salınımlarının toplam hikayesine yapının verdiği tepki hikayesi yapısal noktalarda kurulmuş ivme ölçer istasyonlar tarafından kaydedilmiş verilere uygulanan Fourier dönüşümleri yapı gözlem istasyonları için Şekil 5'de çizilmiştir. Farklı modal deplasmanlar sergileyen izlenen katlar 0.65,

0.85, 1, 2.2, 3.5, 4.5, 7, 11 ve benzeri Hz.'lerde hakim tepcikler vermişlerdir. Benzer frekanslar Şekil 6'da çizilen yapısal noktalarla zemin arasındaki transfer fonksiyonlarında da görülmektedir. Zorlama kuvveti uygulanan x bileşeni dışında diğer bileşeninde nispeten zayıf olmakla beraber titreşim içermesi, yüklem eksenine ortogonal diğer eksen serbestliğinde yükten etkilendiğini göstermiş ve yapının önemli mertebede hasarlı olduğunu göstermiştir. Gerçekte tek yön yüklemenin tek serbestliği tetikletme beklentimizin burada gerçekleşmemesi hasarı ve hasarın neden olduğu rijitlik kayıplarının bir sonucu olarak rijitlik merkezinin kaymasıyla oluşmuş ilave burulmanın ötesinde, hasarsız haline ait bir yapısal davranış karakteristiği olabileceğini de akla getirmiş ve çalışılmıştır.



Şekil 5 Karamürsel A blok, 17 Eylül 2010 tarihinde x yönünde yapılan değişik genlik ve frekans içeriğine sahip yapıy depremler toplamının Fourier genlik spektrumu.



Şekil 6 Karamürsel A blok x yönü toplam hareket için yapı-zemin transfer fonksiyonu

### Nümerik Modelin Tanılama Sonuçlarıyla Kalibrasyon Çalışmaları

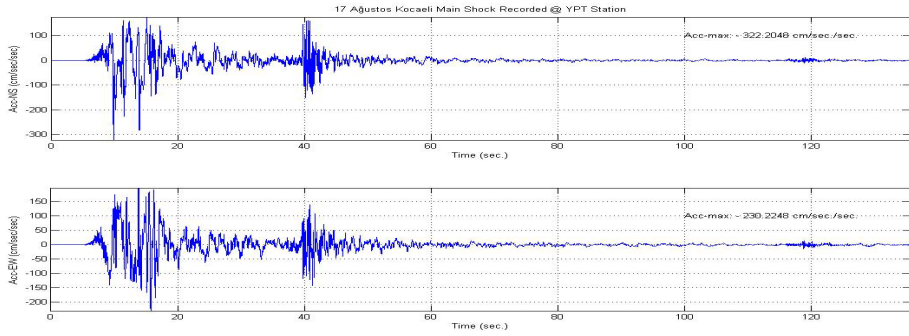
Serbest titreşim veya zorlama altında tek dinamik yük ve/veya toplam dinamik yük şartlarında davranışları izlenen çalışma yapısı için oluşturulmuş olan nümerik modellerin benzeşim çalışmaları içinde model kalibrasyonlarında yapıdan elde edilen karakteristik modal bilgiler kullanılmıştır. Çalışılan mevcut yapının üstünde ölçülen davranışları aynı doğrulukta sonlu eleman modelinde elde edilebilmesi için deneysel ve analitik modellerin modal şekiller arası korelasyon teknikleri, örneğin, *COMAC* değerlendirmesi ve rijitlik hata matrisinin minimize edilme teknikleriyle nümerik model kalibrasyonları tamamlanmıştır (Jimin, 2000, Maia, 2000). Yönetmeliğin 7.4.5, 7.4.6 ve 7.4.7 şartlarını sağlayan analitik model daha sonra hasar görülebilirlik analizlerinde kullanılmıştır.

## DOĞRUSAL ELASTİK OLMAYAN YÖNTEMLERLE BİNA PERFORMANSININ BELİRLENMESİ

Çalışmada, SeismoStruct, 2010 sonlu eleman yazılım paketi kullanılmıştır. Pratik mühendislik açısından, proje bürolarının günlük uygulama kullanımına cevap verebilecek yönetmelik yöntemleri test edilmiştir. Depremde bina performansının doğrusal elastik olmayan yöntemlerle analizinde yönetmelik; a) Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi, b) Artımsal mod birleştirme yöntemi ve c) Zaman tanım alanında hesap yöntemini, uygulanabilme şartlarıyla beraber önerir.

Can güvenliği performans seviyesi için yürütülen analizlerde yönetmeliğin önerdiği elastik tasarım ivme spektrumu kullanılarak uygulanabilen yöntemlerin sonuçlarıyla Şekil 7’de verilen gerçek yerel deprem istasyon kaydı için üretilen Şekil 8’de çizilen ilgili spektrumun kullanılmasıyla uygulanabilen analiz yöntemlerinin sonuçları karşılaştırılmış ve tartışılmıştır. Deprem kaydının bileşenleriyle bir binaya uygulanması noktasında bina yönleri için kullanılacak kayıt bileşenleri tam aydınlanmış bir konu olmamakla beraber, bu çalışmada, deprem kuvvetleri binaya her iki yönden yapı konumuyla uygun bileşenleriyle ayrı ayrı etkilmiştir. Yönetmeliğin önerdiği mühendislik büro uygulaması birikim ve yazılım şartlarında kalınarak aşağıda özetlenen analizler uygulanmış, çıkan sonuçlar karşılaştırılmış, tutarlı ve belirsiz yönlerinin altı çizilmiştir. Zaman tanım alanında yürütülen analizde, deprem merkezinden 4.2 km uzaklıkta bulunan Şekil 7’deki Yarımca Petro Kimya Tesisleri’nin (YPT) istasyon kaydı kullanılmıştır. Artımsal statik itme analizinde kullanılmak üzere Şekil 8’de gösterilen %0 ve %5 sönüm için üretilen elastik ivme spektrumları yönetmelik spektrumuyla karşılaştırılmıştır. Deprem kaydının yüzeyde yapı kotu seviyesinde alınmış olmasının bir sonucu olarak sıfır sönümlü deprem spektrumunun sonuçlara etkisi anlaşılmaya çalışılmıştır. Analizlerde hasar model için yönetmelikte 7.6.4.7.a bendinde tariflenen pekleşmeyen elastik-tam-plastik kesit ile yapılandırılmış yığılı plastik model kullanılmıştır.

Depreme dayanıklı yapı tasarımında, şiddetli deprem altında elastik sınır ötesinde deformasyon ve dolayısıyla yatay ötelenme rijitliğinin az olacağı katta büyüyen ikinci mertebe momentlerinin eleman uçlarında ilaveten oluşmasına ve taşıyıcı olmayan elemanların da hasar görmesine yol açacaktır. Yeterli rijitliği sağlamanın yanısıra ikinci mertebe etkilerin oluşmaması için yönetmelik yapılarda  $((\delta_{ij} / h_{ij})_{MN} < 0.01, (\delta_{ij} / h_{ij})_{GV} < 0.03, (\delta_{ij} / h_{ij})_{GÇ} < 0.04)$  göreceli kat öteleme sınırları tariflemiştir. Göreceli kat ötelenme sonuçları yapı profili üzerinden verilerek, çizdirilip karşılaştırılmıştır.



Şekil 7 17 Ağustos Kocaeli depremi ana şokunun YPT istasyonu iki yatay bileşen kaydı.

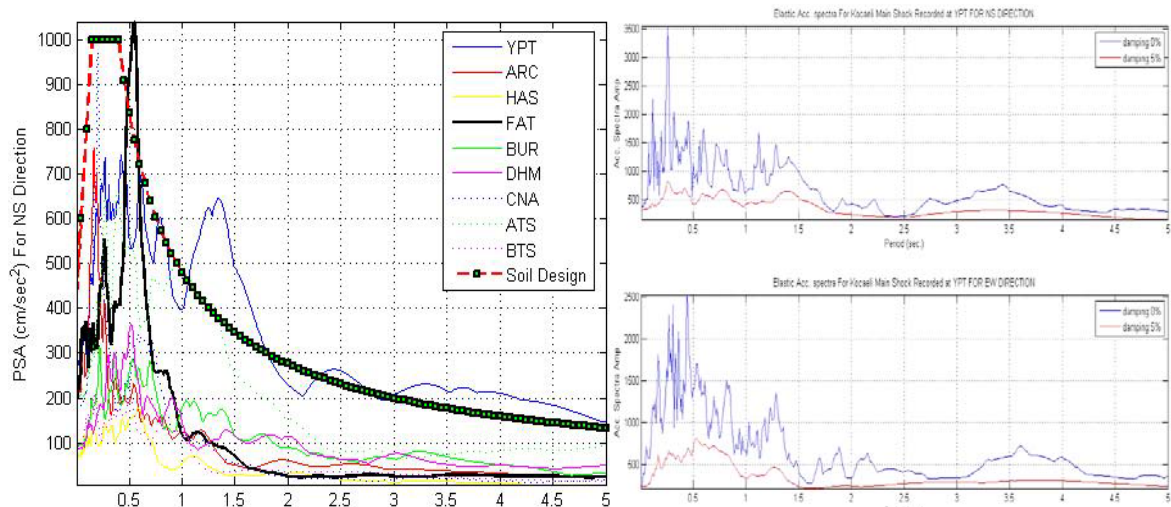
Deprem ile yüksek girdi enerjiye maruz kalan yapı, taşıyıcı elemanlarıyla elastik ve plastik şekil değiştirmelere uğrayarak hedeflenen performans seviyesinde enerji tüketimini gerçekleştirebilmesi beklenir. Yapılarda deprem enerjisi tüketiminin bir göstergesi olarak ötelenme sünekliği taban kesme kuvveti, göreceli kat ötelenmeleri ve çatı döşemesinde bir tepe noktası deplasmanı ile izlenmektedir. Bu çalışmada, analiz sonuçları zaman-tepe deplasman grafiği, tepe deplasman-taban kesme kuvveti grafiği, maksimum kat ötelenme grafiği ve en büyük deplasmanın olduğu 0.5 saniyelik zaman penceresinde oluşmuş hasar dağılımının üstünde gösterildiği deforme olmuş yapı olmak üzere dört sonuç grafiği üzerinden karşılaştırılmıştır.

### Zaman Tanım Alanında Doğrusal Elastik Olmayan Tepki Analizleri

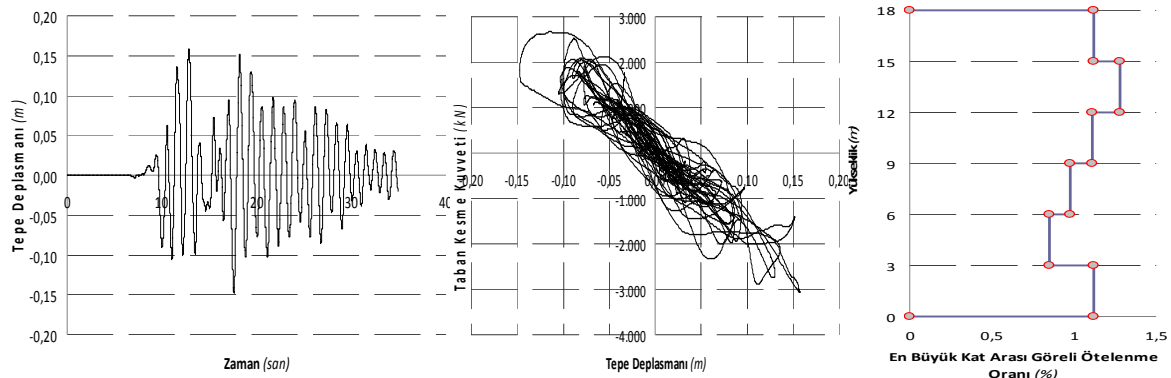
Şekil 7’de verilen 17 Ağustos Kocaeli depremi ana şokunun YPT istasyonunda kaydedilmiş YPT\_60 derece ve YPT\_330 derece iki yatay bileşen kaydının 0.005 saniyelik zaman adımı hikayesi 0.002 saniye için tekrar örneklenerek zaman tanım alanında çözüm yakınsaklığı artırılmış kısa süreli analiz (~2 gün) için ilk 30 saniyelik kısmı kullanılabilmiştir. Şekil 9’da YPT\_60 derece kaydının x yönünde etkimesiyle Halidere A Blok’da oluşan tepkinin zaman tanım alanında doğrusal elastik olmayan analiz sonuçlarından tepki zaman geçmişi, taban kesme kuvveti-tepe



deplasmanı ve göreceli kat ötelenmeleri çizdirilmiştir. Taban kesme kuvveti-tepe deplasmanın oluşturduğu ilmiğin uçdan uca ulaştığı 30 cm'lik deplasmanın aynı taban kesme kuvvetlerinde gerçekleşmesinin yanı sıra genişlemiş ilmik yapıda önemli plastik iş yapan sönüm noktalarının oluştuğunu göstermektedir. Şekil 10'da YPT\_330 derece kaydının y yönünde etkimesi durumunda oluşan ilmiğin 4000-3000 Kn'luk bir taban kesme kuvvetinde uçdan uca 20-25 cm ile sınırlı olması ve ilmik içi alanın küçüklüğü x yönüne göre yapının y yönünde daha rijit olduğunu ve elastığe yakın davrandığını göstermektedir. Göreceli kat ötelemelerine bakıldığında y yönünde orta katlar 4 ve 5'de minimum hasar sınırı olan %1 değerlere ulaştığı, aşıldığı ve can güvenliği sınırları içinde ötelendiğini buna mukabil x yönünde yapı yüksekliği boyunca minimum hasar sınırı %1'e yaklaşan ve geçen katların çokluğu katlarda can güvenliği sınırları içinde ötelemelerin gerçekleştiğini ve yönetmeliğin tanımladığı can güvenliği performans bölgesi yapısal hasarlarına ulaşıldığı anlaşılmaktadır.



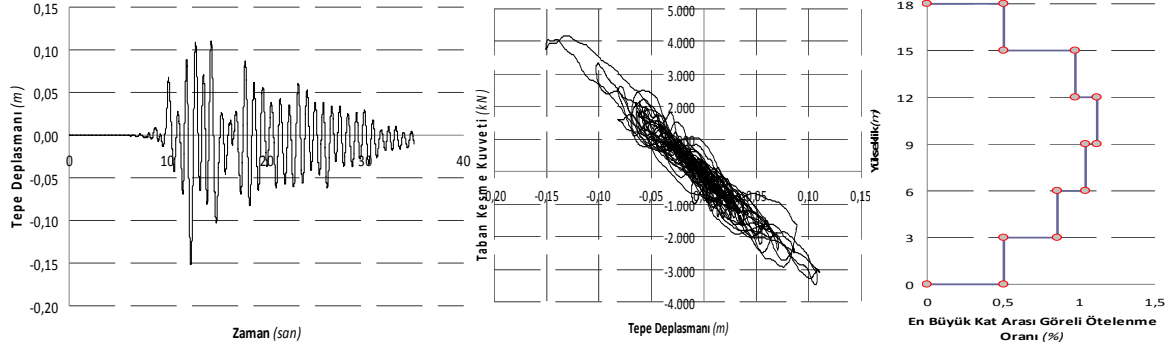
Şekil 8 K.R.D.A.E. istasyonlarının 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminde kaydettiği depremlerin KG bileşenlerinin %5 sönüm ile hesaplanmış ivme spektrumları ve yönetmeliğin önerdiği elastik tasarım spektrumu solda, sağda ise YPT kaydı bileşenlerinin %0 ve %5 sönüm ile hesaplanmış ivme spektrumları.



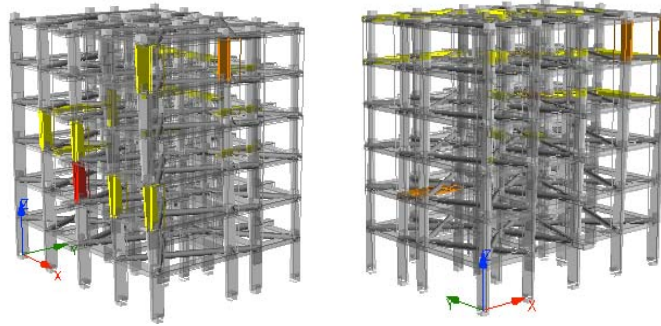
Şekil 9 17 Ağustos 1999 Kocaeli ana şokunun YPT istasyonunda kaydedilmiş YPT\_60 derece kaydının x yönünde etkimesine karşın Halidere A Blok'da oluşan tepkinin nonlinear zaman tanımı alanında a) Zaman geçmişi, b) Uygulanan taban kesme kuvveti – tepe deplasmanı, c) Göreceli kat ötelemeleri.

Perdelerde enerji, tabanda oluşan tek plastik mafsalla tüketilmektedir, bu ise perdelerin çerçeveye oranla sünekliliğini ve enerji tüketimini azaltır. Buna mukabil perdelerin kesme kuvvetini alacak büyük kesit alanına sahip olması, yapı taşıyıcı sisteminin elastik sınırlar içinde yanal ötelemeler yapmasına katkı verir. Dolayısıyla, az enerji tükettiren, ani ve gevrek olan kesme kırılmasının eğilme hasarından sonra gerçekleşmesi bir çerçeve kapasite tasarımı uygulaması olup yapıda enerji tüketimi, tasarımcının yönetmeliklere göre uygun gördüğü yerlerde sünek moment mafsalları ile kontrollü gerçekleşmektedir. Yapı Y yönünde esnek kırışlarla bağlı çerçevelere has bir

deformasyon sergilerken, X yönünde ise Şekil 9’da görüldüğü gibi perde duvarın etkisi belirginleşmiş, merdiven kovanında bulunan perdeler çerçeve-perde sistem olarak çalışmıştır. Nümerik modelde bulunan hasar dağılımı süneklik düzeyi yüksek bir yapıya ait dağılım üretmesine rağmen özellikle büyük perdede kesme dayanımı güç yitimi gevrek hasarı işaret etmektedir. Hasar sınıfı orta olan bu yapının doğrusal elastik olmayan zaman tanım alanı analizlerinin diğer artımsal statik itme analizlerine göre hedef deplasmanın yaklaşık %40 daha yüksek olmasına rağmen Şekil 11’de görülen hasar dağılımıyla benzer sonucu vermesi metodun diğer uygulanacak statik metodlar ve sonuçları için referans alınabileceği kanaatini oluşturmuştur.



Şekil 10 17 Ağustos 1999 Kocaeli ana şokunun YPT istasyonunda kaydedilmiş YPT\_330 derece kaydının y yönünde etkimesine karşın Halidere A Blok’da oluşan tepkinin nonlinear zaman tanım alanında a) Zaman geçmişi, b) Uygulanan taban kesme kuvveti – tepe deplasmanı, c) Göreceli kat ötelenmeleri



Şekil 11 Halidere A Blok’da oluşan tepkinin nonlinear zaman tanım alanında maksimum deplasmanları solda X yönü, ve sağda Y yönü için hasar dağılımlarıyla beraber görünümü.

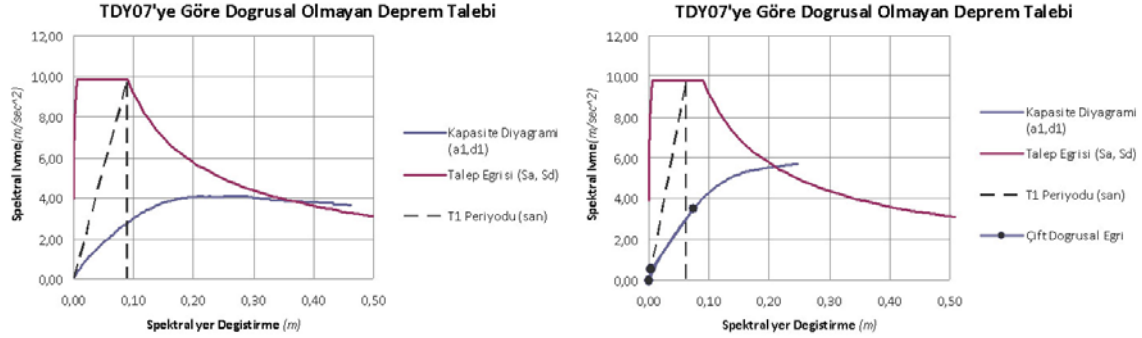
### Doğrusal Elastik Olmayan Statik İtme Analizleri

Doğrusal elastik olmayan statik itme analizlerinde (a) Yönetmelik önerisi doğrusal elastik ivme tasarım spektrumunun yanısıra, (b) 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin YPT istasyon kaydının %0 sönümlü elastik ivme spektrumu ve (c) Aynı kaydın %5 sönümlü elastik ivme spektrumu kullanılarak ilk mod şekline uyan yük dağılımı altında artımsal statik itme analizi yapının x ve y yönleri için uygulanmıştır. Şekil 12’de can güvenliği performans seviyesi için önerilen yönetmelik spektrumundan alınan  $S(TI)$  ile hesaplanan taban kesme kuvvetinin ilk mod şekline uyan yük dağılımıyla yapıya etkilmesi sonucu elde edilen hedef tepe deplasmanları x yönü için 0.116 m değerine 58. adımda, buna mukabil y yönü için 0.095 m değerine 69. adımda ulaşırken ilgili kuvvet spektral ivme değerleri Şekil 12’den görülmektedir.

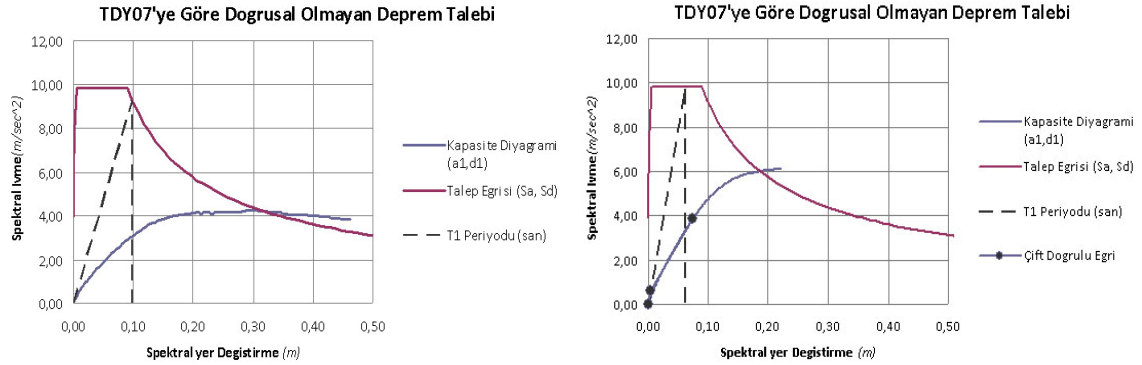
Yönetmelik spektrumu eşdeğer yanal yük dağılımıyla yapıya sırasıyla x ve y yönünde uygulandığında ise, Şekil 13’de görüldüğü gibi tek modlu itme tepe deplasmanlarına yakın sonuçlar gözlenmesi (Tek mod itme analizi; y yönü kapasite eğrisinden 0.095 m’ye 69. adım, eşdeğer yanal yük ile itme analizi ise y yönü için 0.098 m’ye 97. adım) ancak binanın planda kareye yakın olmasına, dolayısıyla kütle dağılımı ve kütle merkezinin katlar arası çok değişmemesiyle beraber, ilk mod kütle katılım oranının yüksek olmasıyla açıklanabilmektedir.

Çalışılan yapının hasar aldığı 17 Ağustos 1999 Kocaeli depreminin Yarımca (YPT) istasyon kaydı bileşenlerinin %0 ve %5 sönümlü elastik ivme spektrumlarından alınan  $S(TI)$  değerleriyle

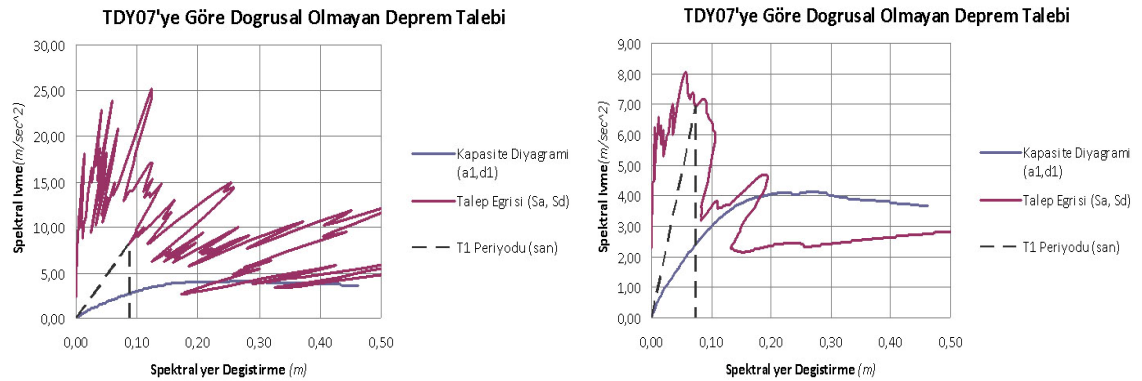
taban kesme kuvveti hesaplanarak ilk mod şekline uygun yük dağılımı altında itme analizi sonuçları Şekil 14’de x yönü için, Şekil 15’de ise y yönü için verilmiştir. İlk grafikler sönümsüz elastik ivme spektrumundan elde edilen yapı hakim mod periyodunun karşılaştığı ivme kuvvetinin ürettiği taban kuvvetidir. Kaydın zemin yüzeyinde yapı taban kotu seviyesinde alınması sebebiyle, zemin üst yapısının mevcut sönümünü uygulamış olacağı varsayılmıştır. Sönümlü spektrum yer ivme hareketini dolayısıyla deprem talebini x yönünde %20 küçültürken, y yönünde %40’lara varan küçülme görülmüştür.



Şekil 12 Solda, spektral deprem talep eğrisi ve Halidere A Blok x yönü kapasite eğrisinden sınır deplasman değeri 0.116 m 58. adımda aşılmıştır ( $T1=0.648$  san  $>$   $Tb=0.6$  san için  $CR1=1$ ). Sağda, y yönü kapasite eğrisinden 0.095 m’ye 69. adımda ulaşılmıştır. ( $T1=0.492$  san  $<$   $Tb=0.6$  san için  $CR1=1.207$  olarak bilinear eğrinin ortalamadığı alan farkları 0 olana kadar devam ettirilen iterasyon sonucu hesaplanmıştır.)

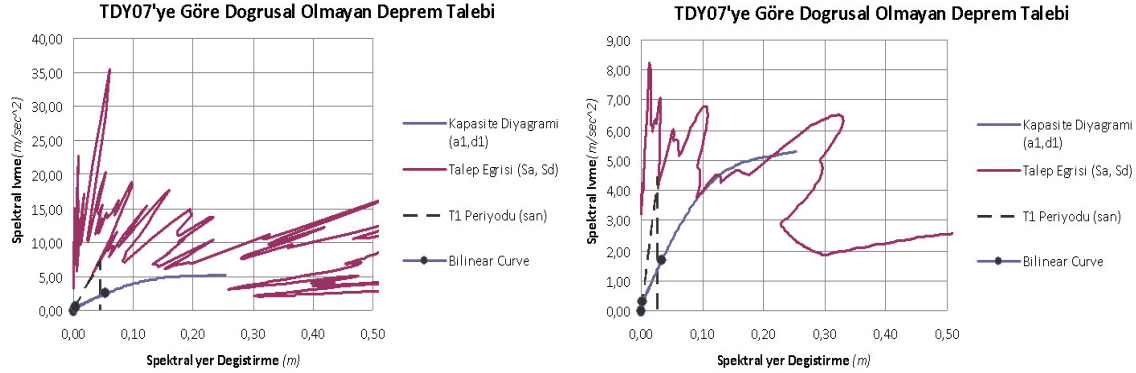


Şekil 13 Eşdeğer yatay yük dağılımıyla uygulanan itme analizi sonucu, solda x yönü kapasite eğrisinden tepe deplasmanı 0.127 m’ye 65. adımda, sağda ise y yönü için 0.098 m’ye 97. adımda ulaşıyor.



Şekil 14 Solda, YPT-EW (X) bileşeninin %0 sönümlü hesaplanan elastik ivme spektrumundan alınan  $Sa(T1)$  kuvveti için yürütülen itme analizinde 0.115 m.’lik çatı deplasmanına 58. adımda, sağda ise, %5 sönümlü hesaplanan spektrumun  $Sa(T1)$  kuvveti için 0.095 m.’lik çatı deplasmanına 51. adımda ulaşılmıştır.

Çalışmada artımsal mod birleştirme yöntemi ile itme analizi için taşıyıcı sistemin davranışını temsil edecek yeterli sayıda doğal yanal titreşim mod şekli burulma modlarının baskın hale gelmesiyle elde edilemediğinden, sağlıklı uygulanamamıştır. Çok modlu analizin uygulanabilmesi için burulma modlarının hakim olmadığı, tam çerçeve çalışan, modal sönüm kabiliyetlerinin farklı ve küçük olduğu yapı davranışı içinde mod girişimlerinin oluşmadığı ayrılmış tepkiler ideal şartları oluşturmaktadır. Çalışılan binanın birinci modu hakim olarak x yönünde görülürken, ikinci modda burulma hakim olmakta, üçüncü modu ise ağırlıklı y yönünde vermektedir. Sonraki modlar burulma bileşenleri olan kompleks bir davranış sergilemektedir.



Şekil 15 Solda, YPT-NS (Y) bileşeninin %0 sönümle hesaplanan elastik ivme spektrumundan alınan  $S_a(T1)$  kuvveti için yürütülen itme analizinde 0.07 m.'lik çatı deplasmanına 55. adımda, sağda ise, %5 sönümle hesaplanan spektrumun  $S_a(T1)$  kuvveti için 0.043 m.'lik çatı deplasmanına 37. adımda ulaşılmıştır.

Modal girişimin olmadığı her serbestlik derecesinin ayrı ayrı dinamik davranışa katıldığı kütle katılım oranları toplamını yönetmelikte verilen değerlere ulaştıracak adet mod sayısını her iki yönde veren bir mevcut eski binayı bulma zorluğu, bu yöntemin pratikte uygulanmasını (en azından üç boyutlu analizlerde) zorlaştırdığı gibi sonuçların süperpoze edilmesi yapı davranışını oluşturan kinematik ve kinetik şartları zorlar mahiyettedir. Bir diğer düşündürülen sıkıntı ise mod birleştirmede mod sonuçlarını süperpoze ederken farklı işaretlere sahip büyüklükleri yönetmelikte 2.8.4'te belirtilen tam karesel birleştirme (CQC) kuralını kullanarak, pozitif hale getirilmesi suretiyle modal katkıların toplanmasının yapı davranış fiziğiyle örtüşmediği dolayısıyla farklı mod şekilli yük dağılımlarının ürettiği doğrusal elastik olmayan değerlerin (hasar mekanizması – yerdeğiştirme, şekil değiştirme ve iç kuvvet büyüklükleri) elastikmiş gibi biriktirilmesi, bunu uygularken çapraz korelasyon katsayılarının hesabında modal sönüm oranlarının bir elastik ötesi uygulama analizinde sabit (%5) alınması yöntemin çok çalışılması gerekliliğini göstermektedir.

## SONUÇ

Sonuç olarak; (1) Zaman tanım alanında analiz sonuçları uygulanabilen doğrusal elastik olmayan statik itme analizlerinden artımsal eşdeğer deprem yükü ve tek modlu itme yöntemleriyle bulunan hedef deplasmandan yaklaşık %40 daha yüksek bulunmuştur. Bu sonucu dinamik deformasyon analizlerinin gerilme-birim şekil değiştirme yayılım hikayesini verirken, statik deformasyon analizlerinin ardarda statik-denge durumunu verme farklılığının yanısıra üç boyutlu dinamik davranış farklılığıyla açıklayabiliriz. (2) Artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemi sonuçları ve artımsal tek modlu itme analiz sonuçları aynı çıkmıştır. İlk hakim mod ve kütle katılım oranının büyüklüğü, dolayısıyla planda ve kesitte var olan simetrinin önemi anlaşılmaktadır. (3) Artımsal mod birleştirme yöntemi ile itme analizi için taşıyıcı sistemin davranışını temsil edecek yeterli sayıda doğal yanal titreşim mod şekli burulma modlarının baskın hale gelmesiyle elde edilemediğinden, sağlıklı uygulanamamıştır. Modal girişimin olmadığı, yeterli adet mod sayısına her iki yönde ulaşacak bir mevcut eski binayı bulma zorluğu, bu yöntemin pratikte uygulanmasını (en azından üç boyutlu analizlerde) azaltmaktadır. (4) Yapı tanılama çalışması sonuçlarıyla kalibre edilen nümerik modelde belirsizliklerin minimize edilmesiyle hasar görebilirlik analiz

yöntemlerinin sonuçlarında gözlenen farklılıkların yöntem üzerinden daha sağlıklı tartışılması imkanı doğmuştur. (5) Doğrusal elastik olmayan analiz yöntemlerinin lineer analiz yaklaşımı içinde kabul edilmiş hasar fiziği olarak da karşılığı olmayan basitleştirmelerden kurtarılması gerekliliği anlaşılmaktadır.

### Teşekkür

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 108M303 kodlu proje kapsamında mali yönden desteklenmektedir. Bütün sonuç ve değerlendirmeler yazarlara ait olup kurumu bağlamamaktadır. Yazarlar bu katkısından dolayı TÜBİTAK'a teşekkür ederler.

### KAYNAKLAR

- Aydınoglu, M. N., 'An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation', Bulletin of earthquake engineering, V.1, 2003.
- Beyen Kemal, 'Structural identification for post-earthquake safety analysis of the Fatih mosque after the 17 August 1999 Kocaeli earthquake', Engineering Structures (2007), doi:10.1016/j.engstruct.2007.08.005.
- Beyen, K., Kutanis, M., Bal, İ.E., 'Çevrel ve Zorlama Kuvvet Titreşimleri Altında 17 Ağustos 1999 Kocaeli Depreminde Hasar Almış Binaların Yapı Tanı Çalışmaları', 7. UDMK, İstanbul, 2011.
- Elnashai A. S., 'Advanced inelastic (pushover) analysis for seismic design and assessment', The G. Penelis Symposium, Thessaloniki, Greece, 2000
- Faella, G. and Kilar, V., 'Asymmetric multi-story RC frame structures: pushover versus nonlinear dynamic analysis', Proceedings of the 11<sup>th</sup> European conference on earthquake engineering, 1998.
- Gupta B, Kunnath S. K., 'Adaptive spectra based pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings', Earthquake Engineering and Soil Dynamics, 2002, 31, pp. 561-582.
- Jimin He, 'Structural modification', Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 2001 359, 187-204, doi:10.1098/rsta.2000.0720
- Juang J-N, Pappa RS. 'An eigensystem realization algorithm for modal parameter identification and model reduction' Journal of Guidance, Control, and Dynamics 1985;8(5):620-7.
- Juang J-N., Applied System Identification. Englewood Cliffs (NJ 07632): Prentice Hall, Inc.; 1994.
- Kim, S. and D'amore, E., 'Push-over analysis procedure in earthquake engineering', earthquake spectra, 115 (3), pp. 417-434, 1999.
- Lawson, R. S., Vance, V. and Krawinkler, H., 'Nonlinear static pushover analysis – why, when and how?', Proceedings of the 5<sup>th</sup> U.S. National conference on earthquake engineering, Earthquake engineering research Institute, Oakland, California, I, Vol. I, pp. 283-292, 1994
- Maia, M. M., J. M. M. Silva N., 'Modal analysis identification techniques', Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 2001 359, 29-40, doi:10.1098/rsta.2000.0712
- Meyers, Marc A., Dynamic behavior of materials, 1994, John Wiley & Sons Inc.
- Mwafy, A. M. and Elnashai, S. A., 'Static pushover versus dynamic-to-collapse analysis of RC buildings', Engineering seismology and earthquake engineering section, Imperial college of science, Technology and medicine. Report No. 00/1, January 2001.
- Paret TF et al., 'Approximate inelastic procedures to identify failure mechanisms from higher mode effects', Proceedings of the 11<sup>th</sup> World conference of earthquake engineering, Acapulco, Mexico, 1996
- Penelis, G. and Kappos, A. J., '3-D pushover analysis: The issue of torsion', Proceedings of the 12<sup>th</sup> European conference on earthquake engineering, 2002.
- Pinho, R., Elnashai, A. S., 'Dynamic collapse testing of a full scale four story RC frame', ISET Journal of earthquake technology, No:37(4), pp. 143-164, 2000.
- Safak, E., Erdik, E. Beyen, K. et al., 'Recorded main shock and aftershock motions', 1999 Kocaeli, Turkey Earthquake, Reconnaissance report, Earthquake Spectra, V.16, 2000.
- SeismoSoft, 'SeismoStruct – A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures', URL:http://www.seismosoft.com, 2010.
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı (2007) Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Ankara
- Villaverde, R., 'Methods to assess the seismic collapse capacity of building structures: State of the art', Journal of Structural Engineering – ASCE, 133(1), pp. 57-66, 2007.