



## Comparison of Seismic Shake Table and Dynamic Analysis Results Using Balsa Model

Muhammet Taha NAZIOĞLU<sup>1</sup>, Murat YALÇINKAYA<sup>1</sup>, Harun KEŞEN<sup>1</sup>,  
Hızır ERDOĞAN<sup>1</sup>, Ömer Faruk KARAÇAL<sup>1</sup>

Chamber of civil engineers, freelance civil engineer, Trabzon, Turkey  
Corresponding Author email: tahanazioglu@gmail.com

### Keywords:

DASK competition  
Balsa building model  
Shaking table  
Shaking experiment  
Earthquake resistant  
building design

### Abstract

All the studies discussed in this article were carried out within the scope of “DASK Earthquake Resistant Building Design Competition”. The purpose of this article is; to predict the earthquake performance of multi-storey buildings more accurately. For this purpose, nonlinear dynamic analysis method and earthquake simulation with shaking table were used. Scope of work; A 29-storey building with a wooden carrier system was designed. Separate projects have been created for architectural design and structural system design. The designed building was modeled in 3D with the CSI SAP2000 structural analysis program. Then, the model of the building was produced with the help of balsa laths and glue. The earthquake records applied to the computer model were also applied to the model with the shaking table. In the results of working; Damage results obtained from analysis and experiments were compared.

## Balsa Maket Kullanılarak Sarsma Tablası ve Dinamik Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

### Anahtar Kelimeler;

DASK yarışma  
Balsa bina maketi  
Sarsma tablası  
Sarsma deneyi  
Depreme dayanıklı  
bina tasarımı

### Özet

Bu makalede ele alınan tüm çalışmalar “DASK Depreme Dayanıklı Bina Tasarımı Yarışması” kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu makalenin amacı; çok katlı yapıların deprem performansını daha doğru tahmin edebilmektir. Bu amaçla nonlineer dinamik analiz yöntemi ve sarsma tablası ile deprem simülasyonu kullanılmıştır. Çalışma kapsamında; ahşap taşıyıcı sisteme sahip 29 katlı bir bina tasarlanmıştır. Mimari tasarım ve taşıyıcı sistem tasarımı için ayrı ayrı projeler oluşturulmuştur. Tasarlanan bina CSI SAP2000 yapısal analiz programı ile 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Daha sonra balsa çitalar ve yapıştırıcı yardımıyla binanın maketi imal edilmiştir. Bilgisayar modeline uygulanan deprem kayıtları sarsma tablası ile makete de uygulanmıştır. Çalışma sonucunda; Analizlerden ve deneylerden elde edilen hasar sonuçları karşılaştırılmıştır.

## 1 GİRİŞ

Günümüzde binaların depreme karşı gösterecekleri performansın ölçülebilmesi amacıyla bilgisayar yazılımları kullanılmaktadır. Bu yazılımlardan elde edilen sonuçlar ise genellikle mutlak doğru gibi algılanmaktadır (Ersoy ve Özcebe, 2012). Fakat kullanılan yazılım inşaatın her bir aşaması için çok sayıda kabul yapmak zorunda kalmaktadır. Örnek verecek olursak gerçek imalatta betonarme kompozit bir malzemedir. Her bir birim hacmi farklı davranış gösterir. Aynı anda dökülmüş beton imalatından alacağımız 3 farklı karot numunesinin bile dayanımı birbirinden farklı çıkacaktır. Donatıların yerleşimi ve montajı da dikkate alındığında bilgisayar ortamında birebir modellenmesi imkânsız hale gelmektedir. Bu durumu en iyi temsil edecek şekilde bir kabul yapılarak hesaplamalar için tüm kesitlerin homojen olduğu ve ortalama bir dayanım değeri bulunduğu varsayılmaktadır. Günümüz teknolojisi ile en gelişmiş analiz yöntemleri kullanılarak yapılan nonlinear analizler bile gerçek davranışı yaklaşık olarak modellemektedirler. Örneğin kullanılan malzemelerin parabolik olan yük-deplasman grafikleri yine bir kabul yapılarak sadece iki doğru ile idealleştirilip programa tanımlanmaktadır. Bazen kabul yapılan bir parametrenin üzerine bir kabul daha yapılarak deyim yerindeyse kabulün karesi alınmaktadır. Bilgisayar ortamında yapılan analizlerde durum bu iken yerinde yapılan gerçek imalatta hata payları çok daha büyüktür. Malzeme imalatından yapı elemanlarının imalatına kadar her bir süreç homojenlikten uzaktır. Bütün bu etmenler neticesinde bilgisayar ortamında yapılan analizler gerçek inşaatın davranışını göstermekten oldukça uzak kalmaktadır. Yaşanan depremler ve henüz depremle karşılaşmamış mevcut yapıların deprem değerlendirme raporları bu durumu açık bir biçimde gözler önüne sermektedir. Yapı stoğumuzun çok büyük bir bölümü projesinde öngörülen performans hedeflerini sağlayamamaktadır.

Bu makale çalışması mevcut durumu deneysel olarak ortaya koymayı amaçlamaktadır. Ülkemizde gelenekselleşmiş olarak Doğal Afet Sigortaları Kurumu (DASK) tarafından “Depreme Dayanıklı Yapı Tasarımı Yarışması” düzenlenmektedir. Yarışma formatı gereği; mimari ve statik olarak hazırlanan yapı projeleri balsa çubuklarla ölçekli olarak imal edilmektedir. Daha sonra elde edilen yapı maketleri en gelişmiş bilgisayar yazılımları vasıtasıyla nonlinear analizler kullanılarak belirli deprem kayıtlarına göre analiz edilmektedir. Son olarak; yarışmaya katılan maketler sarsma tablası üzerinde de deneysel olarak aynı depremlere maruz bırakılmaktadır. Yarışmacılardan bilgisayar ortamındaki analiz sonuçlarını deneysel olarak elde edilen gerçek sonuçlara mümkün olduğunca yakın bulmaları istenmektedir. Yarışmacıların aylar süren hazırlık süreçlerine rağmen katılımcıların büyük bir çoğunluğunda maket ile bilgisayar analizi sonuçları çok farklı çıkmaktadır. En başarılı sonuçlarda bile maket ile analiz arasında %20’ye yakın hata payları oluşmaktadır (Ağcakoca, 2019).

Söz konusu yarışma bizlere gerçek bir yapı inşa etmenin bilgisayarda model kurmaktan çok daha farklı olduğunu göstermektedir. Bu makale çalışmasında; örnek bir maketin bilgisayar modeli sonuçlarıyla deneysel sonuçları üzerinden bu duruma dikkat çekilmektedir.

## 2. ÖRNEK BİNA BİLGİLERİ

Tasarlanan yapının Bursa ili Nilüfer ilçesinde Bahçe Kule Süit Otel adıyla otel binası olarak faaliyet göstereceği varsayılmıştır. Binamız 1 bodrum + zemin + 28 normal kattan oluşmaktadır. Yapının oturma alanı 40mx40m olarak tasarlanmıştır. Tasarımın gelir elde etmesi amacıyla kiraya verilebilecek alan maksimum düzeyde tasarlanmaya çalışılmıştır. Bina

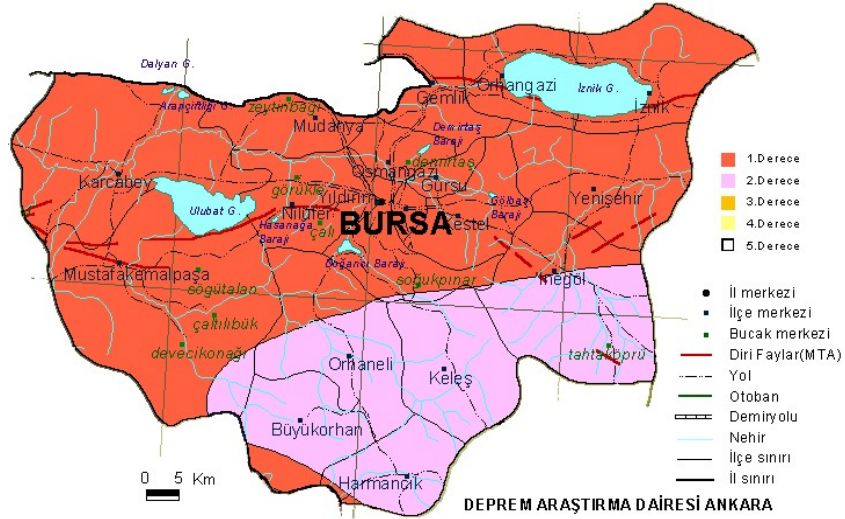
toplam kullanım alanı 42500 m<sup>2</sup>'dir. Binada cepheye estetiklik kazandırmak ve dayanıma katkıda bulunmak amacıyla üst katlara çıkıldıkça küçültmeler yapılmıştır.

Balsa modeli ile uyumlu olması için binanın kat yüksekliği zemin katta 12m diğer katlarda 6m olarak uygulanmıştır. Toplamda yapının yüksekliği 180m olacaktır. Binanın 3 boyutlu görünüşü Şekil-1 de verilmiştir.



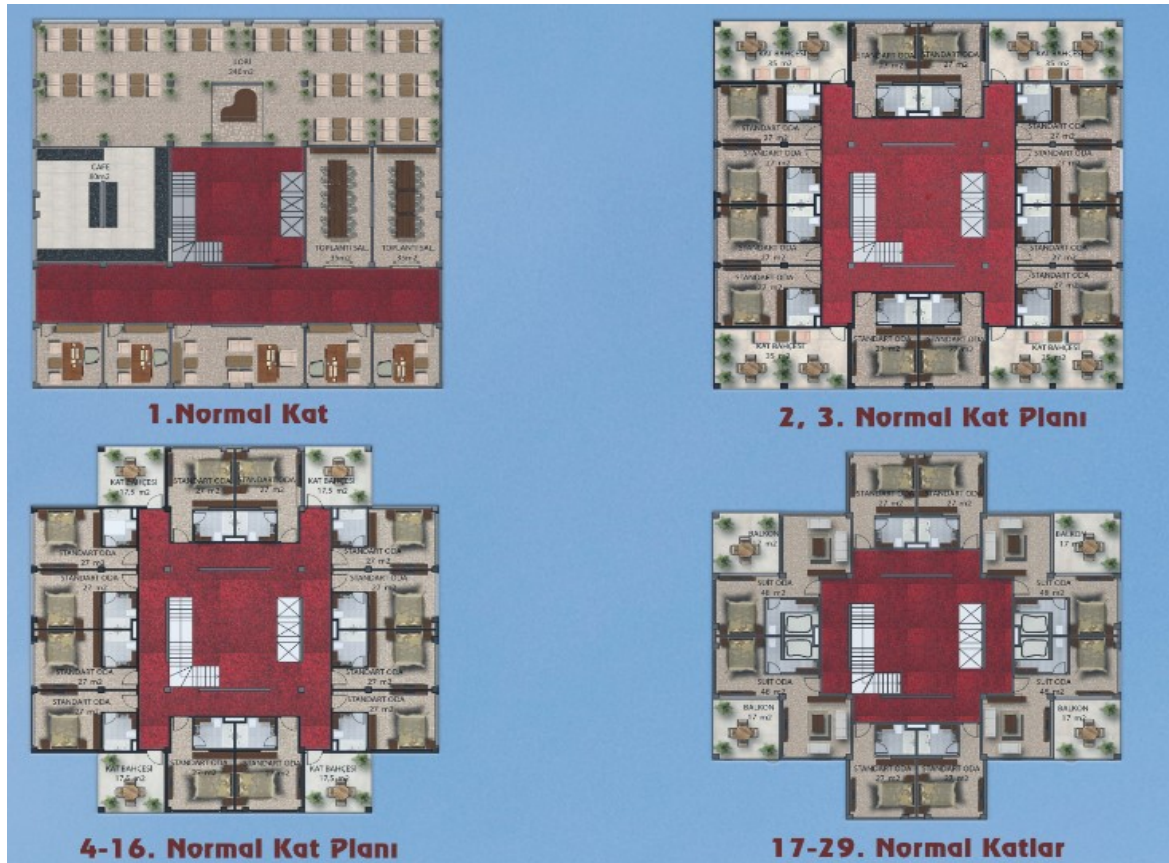
Şekil 1. Binanın 3 boyutlu görüntüsü (Lumion, 2018)

Yapının bulunduğu Bursa ili Nilüfer İlçesi 1. derece deprem bölgesi içerisinde yer almakta ve aktif fay hatları bölgenin yakınından geçmektedir. Nilüfer belediyesinin son yapmış olduğu çalışmalarda Nilüfer ilçesinden aktif fay hatları geçmektedir. Özellikle riski tespit edilen 1855 fayı Nilüfer ilçesinden geçmekte ve aktif durumdadır. Bu nedenle bu bölgede depremlerin hasar verici olması beklenmektedir. Olası bir depremin beklenen ivme değeri 0.40g'dir. Yapının statik tasarımı üç farklı deprem hareketi göz önüne alınarak yapılmıştır. Şekil 2'de Bursa ilinin depremselliği görülmektedir.



Şekil 2. Bursa ili deprem haritası (AFAD, 2008)

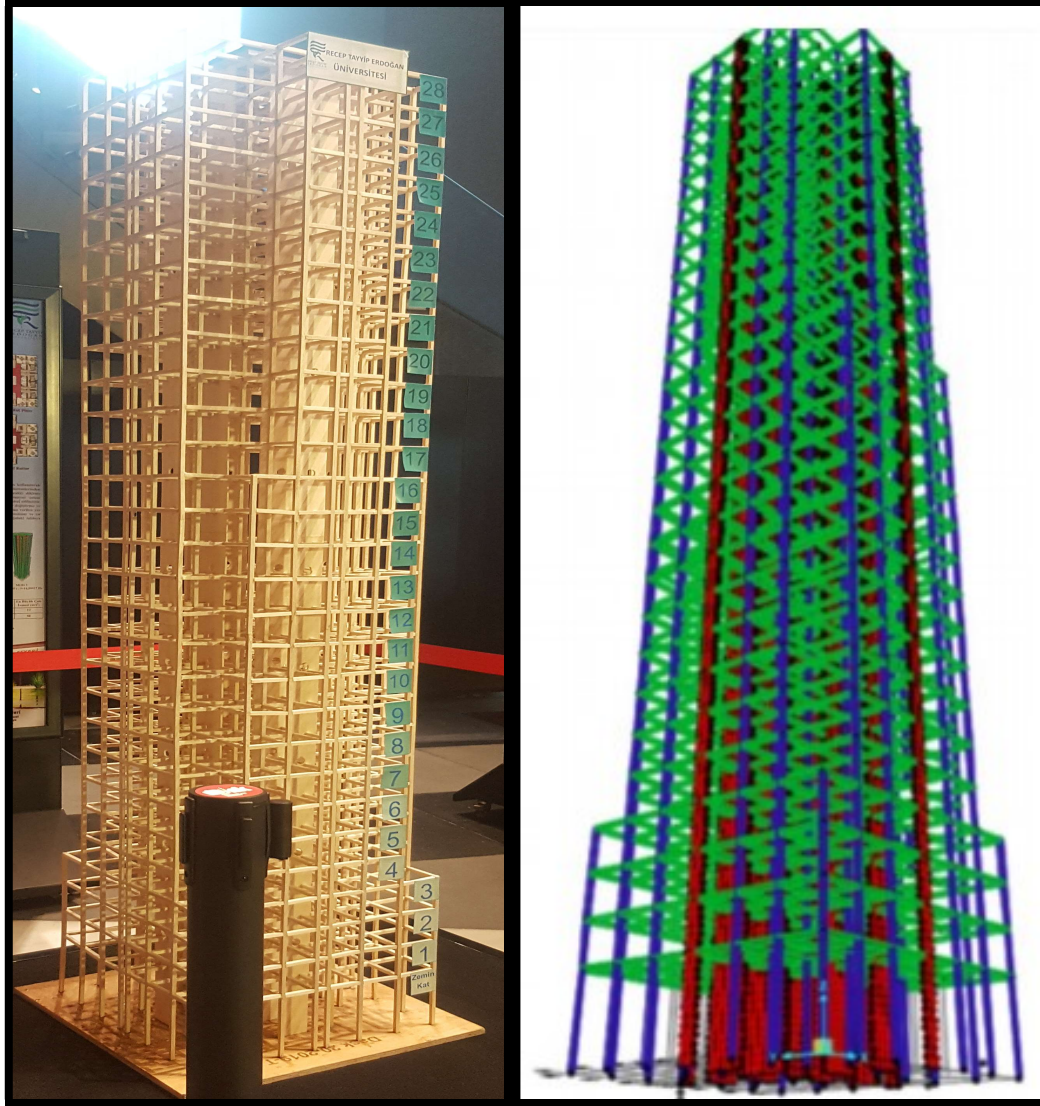
Binanın ilk dört katı (Zemin + 1,2 ve 3. Normal katlar) 40x40m'lik kare şeklinde bir plana sahiptir. 4. Normal kattan başlayıp 16. Normal kata kadar (16. Normal kat dahil) köşe kolonlar ve onlara bağlanan 2 kiriş kaldırılmıştır. Böylelikle bina kat alanında daralmaya gidilmiştir. 17. Kattan başlayıp en çatıya kadar ise köşelerden birer kolon ve ikişer kiriş daha eksilterek kat alanında tekrar küçültmeye yapılmıştır. Binanın kat planları Şekil 3'te görüldüğü gibidir.



Şekil 3; Kat planları

Yapının zemin kat yüksekliği diğer katların iki mislidir. Uygulanacak olan depremde zemin katın kritik kat olduğu görülmektedir.

### 3. MAKET VE BİLGİSAYAR MODELİNİN TASARIMI



Şekil 4; SAP2000 modeli ve balsa ağacı çitallerinden yapılan maket (CSI SAP2000)

Bina tasarımı için Şekil 4'te görülen balsa maket inşa edilmiştir. Maketin yapımında kolon ve kiriş elemanlar için 6x6mm ebatlarında balsa çitaller kullanılmıştır. Perde duvarlar içinse 3mm kalınlığında ve maksimum 70mm uzunluğunda balsa levhalar kullanılmıştır. Çıta ve levhaları bir arada tutmak için Patex marka hızlı kuruyan aktivatörlü yapıştırıcı kullanılmıştır.

Maketin sarsma tablasında göstereceği performansı balsa ağacının elastisite modülü ve gerilme değerleri belirlemektedir. Bu nedenle bilgisayar modelini betonarme ve çelik sistemlerde tercih edilen malzeme modelleriyle karıştırmamak gerekir. Önerdiğimiz yapısal

Sistemin yeni gelişmekte olan çok katlı ahşap yapılar statüsünde değerlendirilmesi daha uygun olacaktır.

Son yıllarda 15-20 kat arası bir binanın tamamen ahşap taşıyıcı sistem ile inşa edilmesi Dünya'da giderek yaygınlaşan bir uygulama haline dönüşmektedir. Ahşap gökdelenler ülkemizde henüz inşa edilmiyor olsa da dünya genelindeki uygulamaları çoktan çelik yapılarla yarışır düzeye ulaşmıştır. Tokyo şehrinde yapımı devam eden 350metre yapı yüksekliğine sahip 70 katlı ahşap bina buna en güzel örnektir. "W350 Tower" olarak isimlendirilen ahşap gökdelende 185.000m<sup>3</sup> ahşap kullanılacağı hesaplanmıştır. Londra'da yapımına henüz başlanmamış olan ve %100'ü ahşap levhalar ile üretilecek OAK Wood Tower isimli 80 katlı projenin tanıtımları da yapılmaktadır. Çelikten 400 kat daha yalıtkan olan ahşaptan yapılan bir evde ısınmak için betonarme binada harcadığımız enerjinin yüzde 35'i yeterli olacaktır. Dolayısıyla ahşap çok verimli ve ekonomik bir yapı materyalidir. Söz edilen ahşap gökdelenlerin fotoğrafları Şekil 5'te görülebilmektedir.



W350 Tower, Tokyo



W350 Tower, Tokyo



OAK Wood Tower, Londra



OAK Wood Tower, Londra

**Şekil 5;** Ahşap gökdelenler (Web Kaynağı-1, 2019; Web Kaynağı-2, 2019)

Modelleme yaklaşımında birçok deprem verisi kullanılarak analiz ve deney sonuçları karşılaştırılmıştır. Kullanılan deprem ivme kayıtları hem SAP2000 ile yapılan dinamik analizler de hem de sarsma tablası ile yapılan deneylerde bire bir aynı etkiyi verdiği için karşılaştırmaya asıl etki eden malzeme ve geometrideki nonlinearite kabullerdir. Maket ve bilgisayar modelinin uyumlu sonuç vermesi için en önemli parametreler; elemanların kütlesi,

elastisite modülü ve yapının sönüm oranıdır. Balsa çubuklar için modelleme yapmak oldukça ayrıntılı çalışmayı gerektirmektedir. Çünkü balsa ağacı; çelik veya beton gibi sabit bir ağırlık veya sabit bir elastisite ile temsil edilememektedir. Aynı ebatlardaki çubukların ağırlıkları arasında 5 kata kadar (%500) fark bulunmaktadır. Yine her bir çubuğun elastisite modülü birbirinden çok farklı değerler alabilmektedir. Modelleme yaklaşımının analizler ve deneyde tutarlı sonuç vermesi için bir diğer kritik parametre ise yapının sönüm oranıdır. Uygulamada betonarme yapılar için sönüm değeri %5 olarak, çelik yapılar içinse bu değer %2 olarak alınabilmektedir. Balsa çubuklardan inşa edilecek yapıda ise sönüm oranı tasarıma göre birbirinden çok farklı değerler alabilmektedir. Bu çalışmadaki örnek yapının sönüm oranı %2 olarak analize dahil edilmiştir. Bu çalışmada balsa çubukların birim hacim ağırlıkları; 250kg/m<sup>3</sup>, elastisite modülleri; 2500N/mm<sup>2</sup>, poisson oranı; 0,2 olarak alınmıştır.

Dinamik analizlerde 3 farklı yer hareketi kaydı esas alınmıştır. Bunlar tekrarlama periyotlarına göre Tablo 1'deki gibidir.

**Tablo 1;** Kullanılan yer hareketi kayıtları ve tekrarlama periyotları

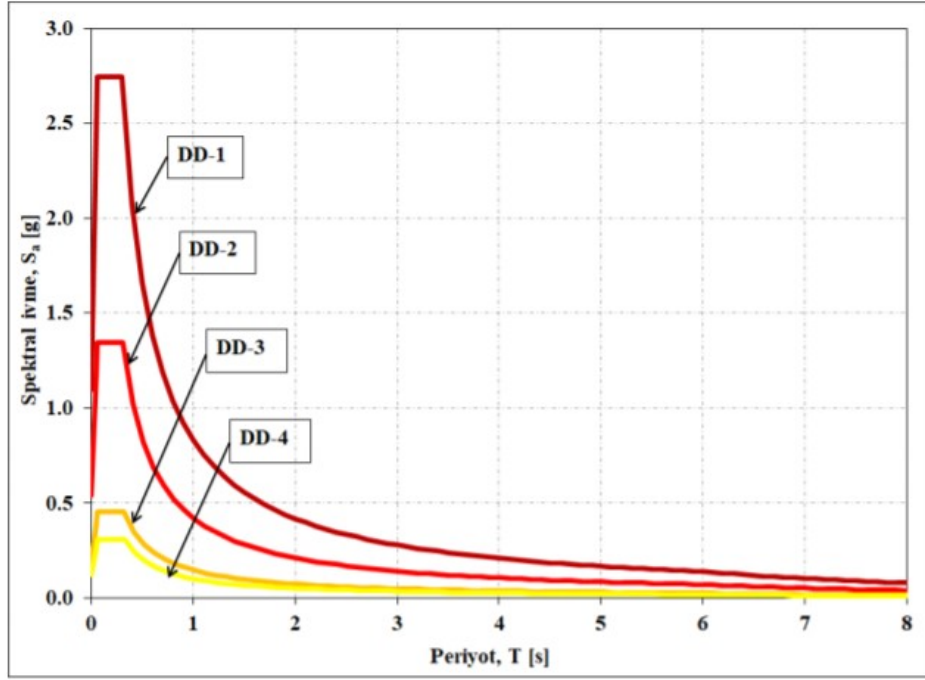
| Deprem Kuvvetli Yer Hareketi | Deprem Yinelenme Periyodu |
|------------------------------|---------------------------|
| KYH1                         | 72 yıl                    |
| KYH2                         | 475 yıl                   |
| KYH3                         | 2.475 yıl                 |

Yapının analizlerinde kullanılan spektral ivme katsayıları ve spektrum köşe periyotları ise Tablo 2'deki gibidir.

**Tablo 2;** Yatay Elastik İvme Spektrumu Parametreleri (DASK, 2019)

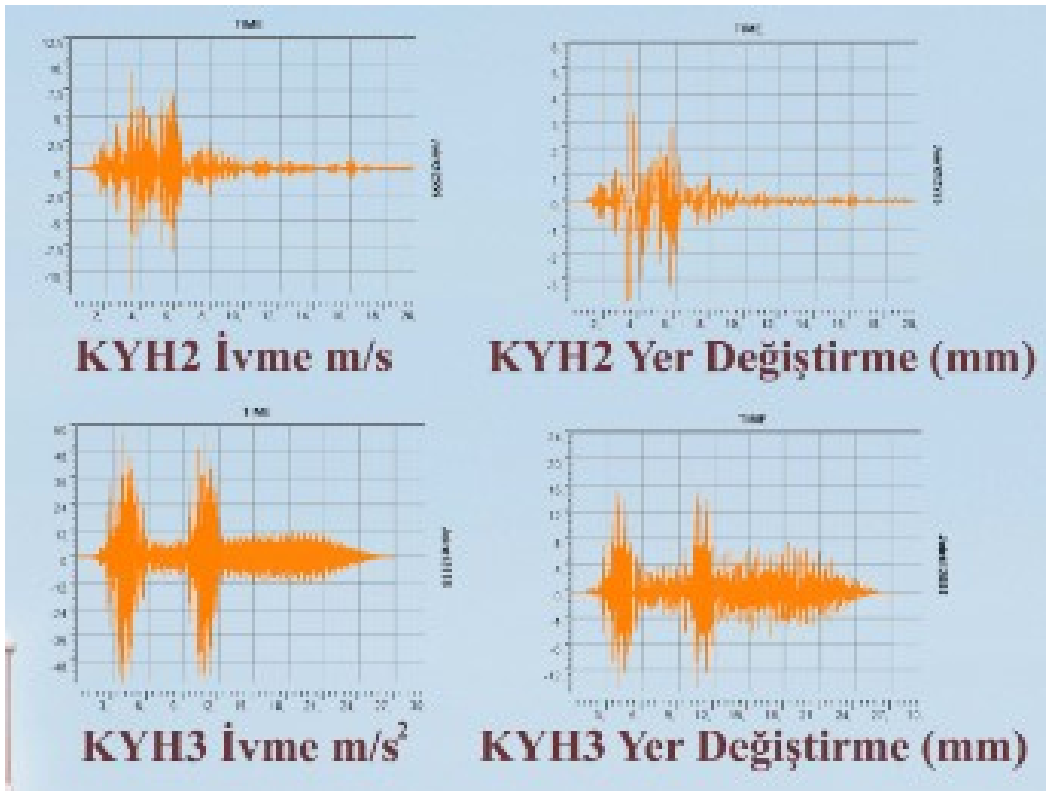
| Deprem Düzeyi | $S_{D5}$ | $S_{D1}$ | $T_A$ (s) | $T_B$ (s) |
|---------------|----------|----------|-----------|-----------|
| <b>DD-1</b>   | 2,746    | 0,836    | 0,061     | 0,304     |
| <b>DD-2</b>   | 1,345    | 0,423    | 0,063     | 0,314     |
| <b>DD-3</b>   | 0,452    | 0,147    | 0,065     | 0,325     |
| <b>DD-4</b>   | 0,307    | 0,102    | 0,066     | 0,332     |

Tablo 2'deki parametrelere göre oluşturulan yatay elastik ivme spektrumları ise Şekil 6'daki gibidir.



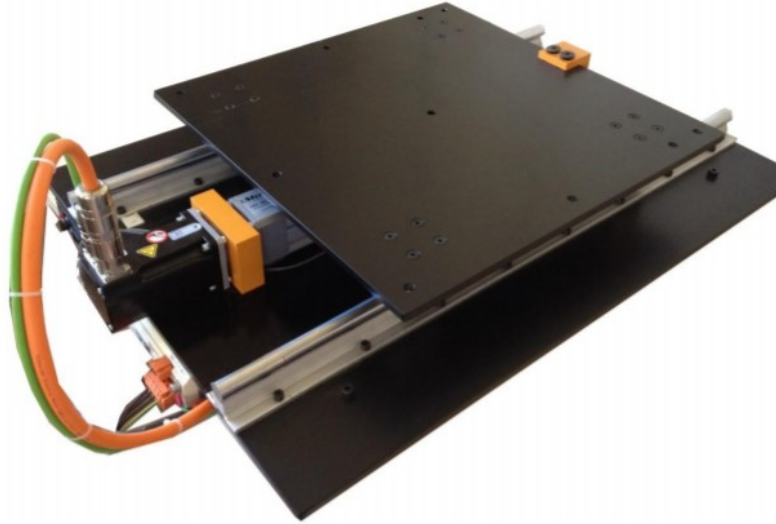
Şekil 6; Yatay elastik ivme spektrumları (DASK, 2019)

Yapının bilgisayar modeli üzerinde yapılan analizlerde KYH2 ve KYH3 yer hareketlerine karşılık elde edilen ivme ve yerdeğiştirme grafikleri şekil 7’de verilmiştir.



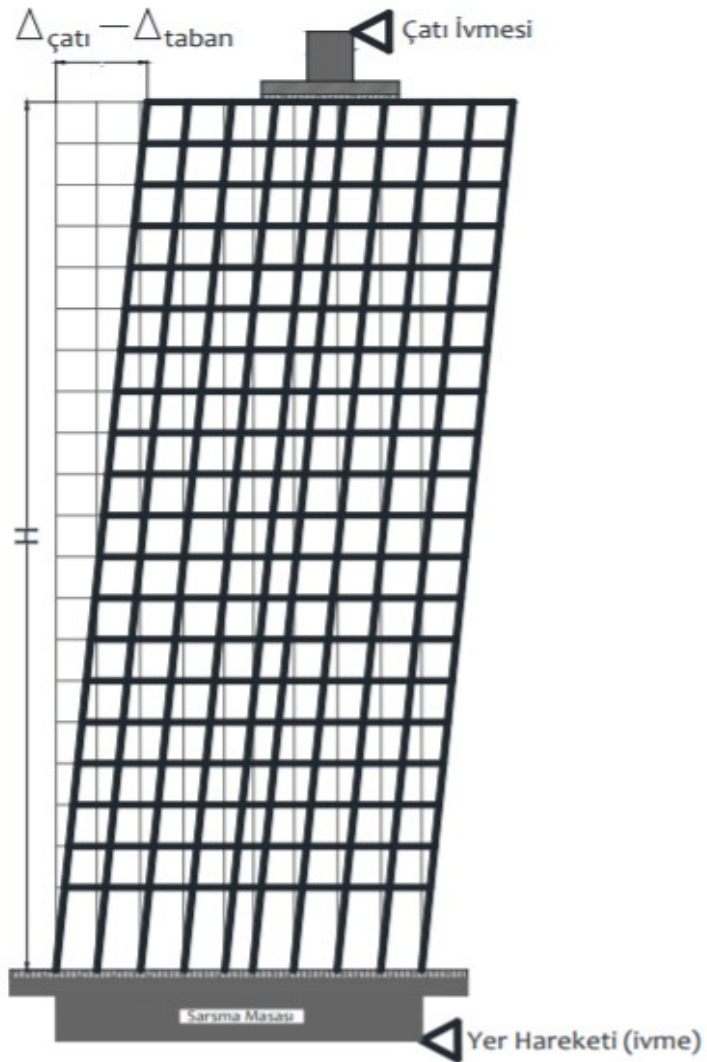
Şekil 7; KYH2 ile KYH3 için elde edilen ivme ve yer değiştirme grafikleri Sarsma deneyleri Şekil 8’de gösterilen sarsma tablası ile yapılmıştır.





Şekil 8; Deneylerde kullanılan sarsma tablası

Binaya etkiyen yükleri temsilen makete, metal çatı levhası ve 18cm arayla metal ağırlıklar bağlanmıştır. Sarsma düzeneğinin şematik görünüşü Şekil 9'da görüldüğü gibidir.



Şekil 9; Sarsma düzeneğinin şematik görünüşü (DASK, 2019)

Örnek olarak KYH2 yer hareket kaydına yönelik SAP2000 analizi ve sarsma tablası deneyinden elde edilen ivme ve yer değiştirme sonuçları Tablo 3'teki gibidir.

**Tablo 3;** KYH2 için SAP2000 ve sarsma tablası ivme/yer deęiřtirme değerleri

| KYH2 Sonuçları       | İvme(m/s <sup>2</sup> ) | Yer değiştirme (mm) |
|----------------------|-------------------------|---------------------|
| SAP2000 Sonucu       | 1,22                    | 5,40                |
| Sarsma Deneyi Sonucu | 3,51                    | 40,20               |

Tabloda görüldüğü gibi örnek tasarımın bilgisayar modeli üzerinde gerçekleştirilen analiz ile balsa maketine uygulanan sarsma deneyi sonuçları arasında büyük ölçüde farklı değerler elde edilmiştir.

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma; bilgisayar ortamında yapılan analizler ile gerçek yapının davranışı arasındaki farkları konu almaktadır. Çalışma kapsamında tasarlanan 30 katlı yapı için bilgisayar ortamında gerçekleştirilen analizler depreme dayanıklı bir tasarım elde edildiğini gösterirken sarsma tablası ile yapılan deneyde yapı çok daha fazla ivme ve yer değiştirme yaparak ağır hasarlı/göçmüş kabul edilmiştir.

Elbette sonuçlar arasındaki büyük farkın çok sayıda nedeni vardır. Kullanılan malzemenin ağırlık değerlerinin her bir eleman için birbirinden çok farklı olması, balsa çubukların gerilme dayanımları ve elastisite modüllerinin sabit olmayışı, Yapının sönüm oranının tam olarak hesaplanamayışı bunlardan bazılarıdır. Balsa çubukların ufak bir gerilmeye hasar alan gevrek malzemeler olması maketin inşası sırasında yapının dayanım kaybını da beraberinde getirmektedir. Bir diğer etken ise taşıyıcı sistem elemanlarının birleşim yerlerinin tam olarak modellenememesi ve maket üzerinde homojen olmayışıdır. Bilgisayar modelinde tüm yapı standart ve homojen şekildeyken gerçek uygulamada kullanılan yapıştırıcı her bir düğüm noktasında aynı şekil ve miktarda olmamaktadır. Yapılan işçilik hataları da sonuca eklendiğinde karşılaşılan tablo imal edilen yapının performansını bilgisayar modelinden bir hayli uzaklaştırmıştır.

Çalışmanın başında belirtildiği gibi bu çalışmadaki analiz ve deneyler DASK Depreme Dayanıklı Bina Tasarımı Yarışması kapsamında yapılmıştır. Yarışmaya katılan tasarımların %90'ı için analiz sonuçları ile deney sonuçları arasındaki ilişki yaklaşık olarak benzer sonuçlar vermiştir. Elbette ki az sayıda da olsa analiz sonuçları ile deneysel sonuçları birbirine çok yakın elde eden tasarımlar olmuş, fakat bu başarılar; daha öncesinde maketi sarsma tablası üzerinde defalarca deneye tabi tutarak analiz sonuçlarının kalibre edilmesiyle yakalanmış başarılarıdır.

Kısacası bilgisayar ortamında yapılan analizler ile bir maket imalatı bile çok farklı performans sonuçları göstermektedir. Gerçek bir yapının inşa aşamaları göz önüne alındığında; projelendirme aşamasındaki analizlerin yapıyı ne ölçüde temsil edebileceği düşünülmeli ve imalatlarda hata paylarını tolere edebilecek güvenlik payları bırakılmalıdır.

## TEŞEKKÜRLER

Bu çalışma yazarların Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi adına katıldığı Doğal Afet Sigortaları Kurumu (DASK) Depreme Dayanıklı Bina Tasarım Yarışması için tasarlanan proje analizi ve maketin verileri kullanılarak hazırlanmıştır. İnşaat mühendisliği bölümü başta olmak üzere çalışmanın tüm aşamalarında maddi ve manevi desteğini esirgemeyen tüm Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi personeline teşekkür ederiz. Maketin imalatında kullanılan tüm malzemeler DASK tarafından sağlanmıştır. Katkılarından dolayı DASK'a, yarışmayı düzenleyen tüm ekibe ve jüri üyelerine teşekkür ederiz.

## REFERANSLAR

Ağcakoca, E. (2019). Yüksek Katlı Yapının Sarsma Tablası Üzerinde Deprem Performansının İncelenmesi. ALKÜ Fen Bilimleri Dergisi, 1 (3), 132-143. DOI: 10.46740/alku.577323

AFAD, (2016). Deprem Araştırma Dairesi Başkanlığı, Türkiye Deprem Bölgeleri Haritası,

DASK, (2019), Depreme Dayanıklı Bina Tasarımı Yarışması 2019, Yarışma Şartnamesi

Ersoy, U., Özcebe, G. (2012). Betonarme, Evrim Yayınevi, İstanbul.

Lumion, (2018). Lumion 9, 3D Rendering Software, <https://lumion.com/index.html>

SAP2000, (2016) SAP2000 v14, CSI Structural Analysis Software and Design,

TBDY (2018), Türk Bina Deprem Yönetmeliği 2018, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara.

Web Kaynağı -1, (2019): <https://www.dezeen.com/2018/02/19/sumitomo-forestry-w350-worlds-tallest-wooden-skyscraper-conceptual-architecture-tokyo-japan/>

Web Kaynağı -2: (2019), <https://www.archilovers.com/projects/182005/oakwood-timber-tower.html>