

## YÜKSEK BİR BİNANIN DEPREM PERFORMANSINA DIŞ DESTEK KİRİŞLERİN ETKİSİNİN DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Özlem Çavdar \*<sup>id</sup>  
Halil İbrahim Çelik \*\*<sup>id</sup>

Alınma: 23.03.2021; düzeltme: 20.09.2021; kabul: 21.01.2022

**Öz:** Bu çalışmada, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019 (TBDY-2019) esas alınarak 29 katlı betonarme perde-çerçevesel bir yüksek binanın deprem yükleri altındaki davranışı incelenmiştir. TBDY-2019'da tavsiye niteliğinde dış destek kirişlerin yüksek binalarda dayanım fazlalıklarının sınırlandırılmasının gerekliliğine dikkat çeken maddesi dikkate alınarak incelenen 29 katlı binaya, bina yüksekliği H olmak üzere 0.33H ve 0.66H mesafelerinde dış destek kirişler ilave edilmiştir. Oluşturulan iki farklı sayısal model için öncelikle dayanıma göre tasarım kapsamında kullanılacak doğrusal hesap yöntemlerinden mod birleştirme yöntemine göre spektrum analizi gerçekleştirilmiştir. Yüksek binaların davranışını daha doğru tahmin edebilmek için diğer gelişmiş ülkelerdeki deprem yönetmeliklerinde olduğu gibi TBDY-2019'da doğrusal olmayan şekildeğiştirme esaslı tasarım yaklaşımı önerilmektedir. Çalışmanın sonucunda incelenen iki sayısal model için hedeflenen performans etkileri dahilinde kalınp kalınmadığı tespit edilmiştir ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Dış destek kiriş kullanılan modelde yapı rijitliği ve perdelerde kesme kuvvetlerinin arttığı görülürken, buna bağlı olarak; yerdeğiştirmeler, görelî kat ötelemeleri, plastik dönme değerleri ve perdeler için eğilme momenti değerlerinin azaldığı görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Betonarme perdeli yüksek bina, Dış destek (outrigger) kirişler, Deprem Performans Analizi, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019, Mod Birleştirme Yöntemi, Zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz

### Investigating Effects of Outrigger Beams on Earthquake Performances of Reinforced Concrete High-Rise Buildings by Linear and Nonlinear Methods

**Abstract:** In this study, the behavior of a 29-story reinforced concrete framed high-rise structure under earthquake loads is examined based on Turkish Building Earthquake Code 2019 (TBDY-2019). Outrigger beams were added to the 29-story structure on 0.33H and 0.66H levels (H is height of structure), because these were advised in an article of TBDY-2019 for the necessity of limiting the excess strength of the beams in high-rise buildings. For two different models, firstly, spectrum analysis according to mode superposition methods of linear computational methods to be used within the scope of design according to strength is performed. In order to determinate more accurately the behavior of tall buildings, as in the earthquake regulations of other developed countries, the TBDY-2019 advised a nonlinear deformation-based design approach. As a result of these analyzes, it was determined whether the two models examined were within the targeted performance effects or not and the results were given comparatively. In the model having outrigger beams, stiffness and shear forces in shear walls were increased. Thus, displacements, relative story drift, plastic rotations and bending moments of shear walls were decreased.

**Keywords:** Reinforced concrete shear wall high-rise building, Outrigger beams, Earthquake Performance Analysis, Turkish Building Earthquake Code-2019, Mod superposition Method, Nonlinear time history analysis

\* Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100, Gümüşhane

\*\* Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 29100, İletişim Yazarı: Özlem Çavdar (ozlemcavdar@gumushane.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Bina yüksekliklerinin artması yapı mühendisliği bakımından ciddi problemleri de beraberinde getirmiştir. Bu problemlerin ilki yatay yüklerin (deprem, rüzgâr vb.) bina tarafından uygun bir şekilde karşılanabilmesi olmuştur. Bir diğeri ise tasarımcıların yüksek binalarda kullandıkları taşıyıcı sistem; yatay yüklerin çekirdek perde tarafından karşılandığı, kolonların ise daha çok düşey yükler altında zorlandığı sistemler olmuştur. Ancak bu sistemlerde özellikle çekirdek perde boyutları oldukça büyük ve mimari açıdan uygulanabilir sınırların dışına çıkmaktadır (Smith ve Coull, 1991). Bu sebeple tasarımcılar, yüksek binaları daha küçük boyutlu yapı elemanları ile oluşturmak zorunda kalmışlardır. Bu farklı taşıyıcı sistemlerden en yaygın olarak kullanılanlarından biri dış destek kirişli (Outrigger) sistemlerdir. TBDY-2019’da taşıyıcı sistemde dıştan destek (outrigger) kullanılması durumunda destek kirişlerinin, mesnetlendikleri çekirdek perdelerine ve destek kolonlarına aktaracakları eksenel kuvvetlerin öngörülen düzeyleri aşmaması için bu kirişlerin dayanım fazlalıklarının sınırlandırılmasına yönelik önlemler alınmalıdır. Bu bağlamda destek kirişlerinin, akma düzeyleri kontrol edilebilen burkulması önlenmiş çelik çaprazlar’ın kullanıldığı kafes sistemler olarak düzenlenmesi tercih edilebilir (TBDY-2019 Madde 13A.1.7, 13A.2.3). Yüksek binalarda dış destek kirişinin kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda en temel araştırma konusu destek kirişinin konumu olmuştur. Birçok yazar belirli kabuller altında teorik çalışmalar ile uygun konuma ulaşmaya çalışmıştır (Smith, 1981; Hoenderkamp ve Bakker, 2003; Wu ve Li 2003; Hoenderkamp, 2008; Taranath, 2010; Choi ve Joseph, 2012). 1 Ocak itibari ile yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019 (TBDY-2019) belli şartlar altında Yüksek Binaları şu şekilde sınıflandırmıştır:

- (a) Rijit bodrum perdelerinin binayı her taraftan veya en az üç taraftan çevrelemesi,
- (b) Birbirine dik bina eksenlerinin her birinin doğrultusundaki hakim titreşim modunda, bodrum katlar dahil binanın tümü için hesaplanan doğal titreşim periyodunun, aynı taşıyıcı sistemde zemin kat döşemesi dahil tüm bodrum kütleleri hesaba katılmaksızın aynı doğrultuda hesaplanan doğal titreşim periyoduna oranının 1.1’ den küçük olması

$$T_{p,tüm} \leq 1.1 T_{p,üst} \quad (1)$$

Yukarıda ki şartları sağlamayan bodrumlu veya bodrumsuz binaların bina tabanı temel üst kotu kabul etmiştir ve bina yüksekliği baz alınarak:

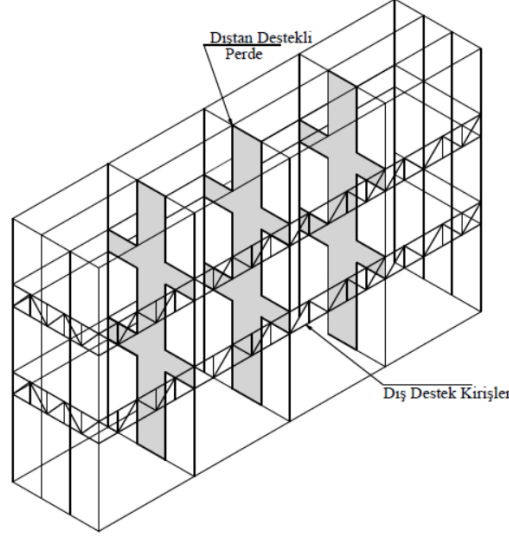
TBDY-2019’a göre Tablo 1’de verilen deprem tasarım sınıflarına göre belli yüksekliklerdeki binaları Yüksek bina olarak sınıflandırmıştır.

**Tablo 1. Yüksek bina için yükseklik sınırları**

Bina Yükseklik Sınıfı	Bina Yükseklik Sınıfları ve Deprem Tasarım Sınıflarına Göre Tanımlanan Bina Yükseklik Aralıkları (m)		
	DTS = 1, 1a, 2, 2a	DTS= 3, 3a	DTS = 4, 4a
BYS = 1	$H_n > 70$	$H_n > 91$	$H_n > 105$

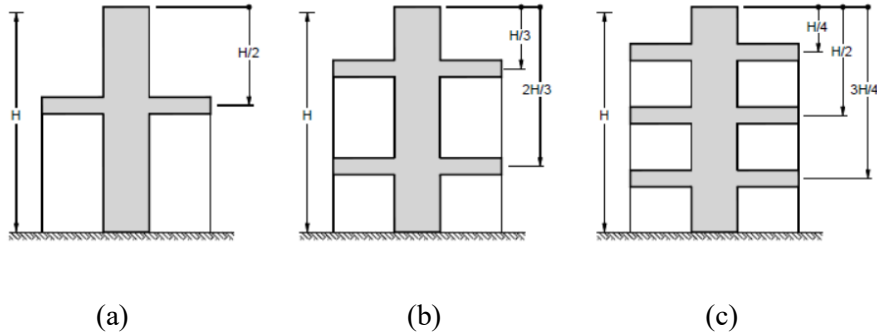
Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)’de yüksek binalara ait ayrı bir bölüm belirtilmemiştir. Ancak yüksek binalara artan talep doğrultusunda TBDY-2019’da Yüksek Bina Taşıyıcı Sistemlerin Tasarımı İçin Özel Kurallar başlığı altında Bölüm 13’te ayrıca irdelenmiştir. Ülkemizde yüksek binaların yapımı son yıllarda hız kazanmaya başlamış yapı mühendislerini farklı taşıyıcı sistemlerin kullanımına yönlendirmiştir. Bu farklı taşıyıcı sistemlerden en yaygın olarak kullanılanlarından biri Dış

Destek kirişli (Outrigger) sistemlerdir (Şekil 1) (Smith ve Coull, 1991). Bu sistem, özellikle yatay yükler altında konfor şartını sağlayabilmesi, bu sayede kat sayısını da önemli miktarda arttırdığı için yüksek binalarda tercih edilmiştir.



**Şekil 1:**  
*Dış destek kirişlerinin uygulanması*

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda tepe deplasmanını baz alarak dış destek kirişlerin en ideal seviyesinin belirlenmesi esas alınsa da yapı tasarımcıları için en uygun yerleşimin yapının kullanım ihtiyacına göre belirlenmesi gerekir. Yapı tasarımcısı için perde taban eğilme momentinin azaltılması ön planda ise destek kirişlerinin alt katlara, tepe deplasmanının yönetmelikte belirtilen sınır değerlere çekilmesi gerekiyorsa sistemin orta katlarına yerleştirilmesi gereklidir (Smith ve Coull, 1991, Taranath, 2010).



**Şekil 2:**

*Tepe yerdeğiştirme bakımından en uygun destek kirişi yerleşimleri*

*(a)  $H/2$  (b)  $H/3$  ve  $2H/3$  (c)  $H/4$ ,  $H/2$  ve  $3H/4$  seviyesinde dış destek kiriş uygulaması*

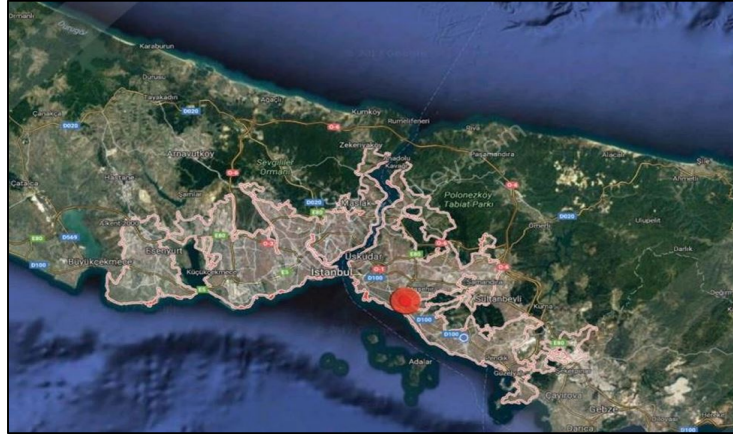
Bu çalışmanın amacı; betonarme yüksek binaların deprem performansının belirlenmesinde kullanılan doğrusal analiz için dayanım esaslı tasarım yöntemlerinden Mod Birleştirme yöntemi ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemleri ile yeni yürürlüğe giren TBDY-2019'a göre araştırmaktır. Bu amaçla; 29 katlı toplam yüksekliği 116.0 metre olan betonarme yüksek bir bina dış destek kirişli ve dış destek kirişsiz olarak ele alınarak binaların doğrusal ve doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler sonucunda incelenen iki model için hedeflenen performans etkileri dahilinde kalınıp kalınmadığı tespit edilerek ve sonuçlar

karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Dış destek Kirişli model için bina yüksekliği ‘H’ olmak üzere 0.33H ve 0.66H mesafelerinde dış destek kirişleri ilave edilmiştir. Oluşturulan iki farklı model için öncelikle Dayanıma Göre Tasarım kapsamında kullanılacak doğrusal hesap yöntemlerin Mod Birleştirme yöntemine göre spektrum analizi gerçekleştirilmiştir. Performans analizi kapsamında ise, bu binaların zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizleri gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan analiz aşamalarında kullanılan deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi hakkında bilgi verilmiştir.

## 2. SAYISAL UYGULAMA

### 2.1. İncelenen Yüksek Binaların Tasarımı

Bu çalışmada iki yüksek bina tasarlanmıştır. Tasarlanacak model perde-çerçeve taşıyıcı sistem olarak seçilmiştir. İkinci model ise mevcut taşıyıcı sisteme dış destek kiriş eklenmiş olup, iki model içinde doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapıp sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada tasarlanan bina İstanbul ili Bostancı Mahallesi’nde düşünülmüştür. Binanın düşünüldüğü yer Şekil 3’te verilmiştir. Her iki bina için kullanılan taşıyıcı eleman boyutları Tablo 2’de verilmiştir. Binalar 2 Bodrum kat, 1 Zemin kat ve 26 normal kattan oluşmaktadır. Bina için bodrum katların etrafı 30 cm genişliğinde saran rijit perdeler kullanılmıştır. Normal katlar için uygulama kalıp planı Şekil 4’te verilmiştir. Dış destek kirişli model için kat uygulama planı Şekil 5’te verilmiştir. Dış destek kirişsiz modelin (Model 1) 3 boyutlu görüntüsü Şekil 6, dış destek kirişsiz model için XZ uygulama planı Şekil 7a’da ve dış destek kirişli model (Model 2) için XZ uygulama planı Şekil 7b’de verilmiştir. Analizlerde, beton sınıfı C30/37, donatı çeliği sınıfı B420C olarak dikkate alınmıştır. Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yükler yönetmeliğinden (TS498, 1987) bodrum katlara; 15 cm dökme asfalt düşünülerek  $3.4 \text{ kN/m}^2$ , döşemelerde sabit yük  $g = 2.01 \text{ kN/m}^2$ , çatı katında  $g=1.58 \text{ kN/m}^2$  hareketli yükler çatı katında  $q = 1.5 \text{ kN/m}^2$ , konut odalarında  $q = 2 \text{ kN/m}^2$  ve konut koridorlarında  $q = 2 \text{ kN/m}^2$  alınmıştır. Konut merdiven sahanlıklarında  $3.5 \text{ kN/m}^2$ , Konut balkonlarında  $5.0 \text{ kN/m}^2$ , Garajlarda (2.5 t olan araçlara kadar)  $5.0 \text{ kN/m}^2$  olarak alınmıştır. Ayrıca, kirişlere  $4.6 \text{ kN/m}$  sabit yük dikkate alınmış ilgili kirişlere aktarılmıştır.

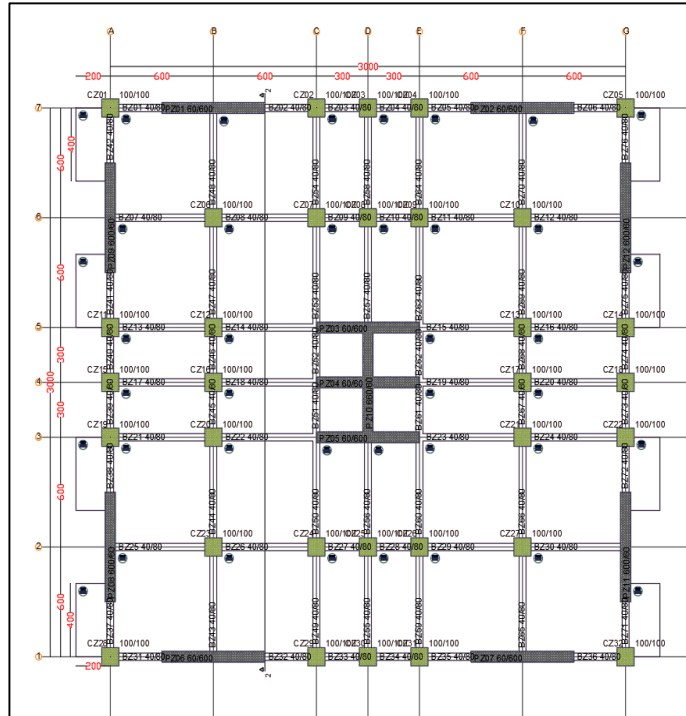


**Şekil 3:**

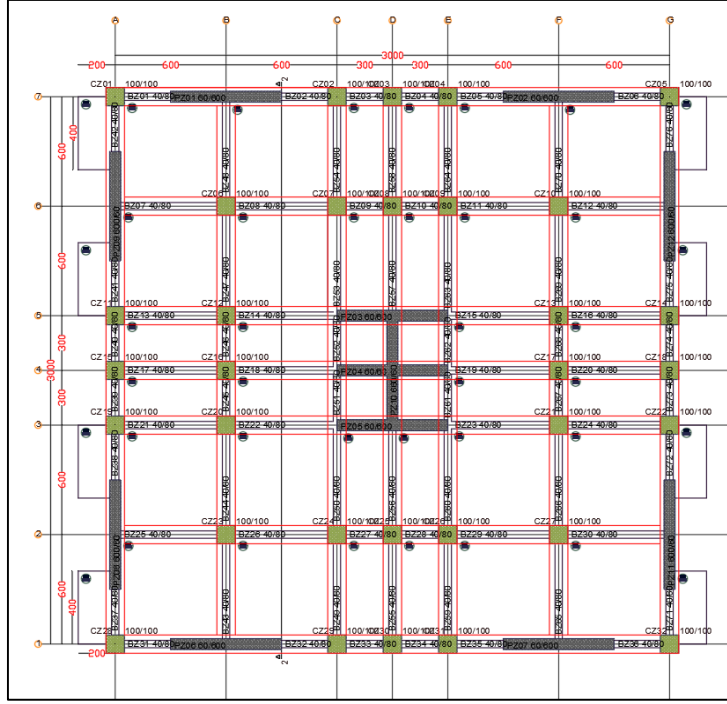
*Tasarlanan model için düşünülen konum (Bostancı/İstanbul)*

**Tablo 2. Tasarlanan iki model için Yapısal Eleman boyutları**

Yapısal Elemanlar	Kesit Boyutları (mxm)	
	Dış Destek Kirişsiz Model	Dış Destek Kirişli Model
Bodrum Perdeleri	30.0X0.30 – 0.30X30.0	30.0X0.30 – 0.30X30.0
Diğer Taşıyıcı Perdeler	0.40X6.0 – 6.0X0.40	0.40X6.0 – 6.0X0.40
	0.50X6.0 – 6.0X0.50	0.50X6.0 – 6.0X0.50
	0.60X6.0 – 6.0X0.60	0.60X6.0 – 6.0X0.60
Kolonlar	1.0X1.0 – 0.90X0.90	1.0X1.0 – 0.90X0.90
	0.80X0.80	0.80X0.80
Kirişler	0.40X0.80	0.40X0.80
Döşemeler	h = 0.15	h = 0.15
Outrigger alt/üst başlık çubukları	—	"I" Profil 0.25X0.25X0.25 (t = 0.03)
Outrigger diyagonal çubukları	—	Daire = 0.25 (t = 0.03)
Outrigger dikme çubukları	—	Kare 0.25X0.25 (t = 0.03)

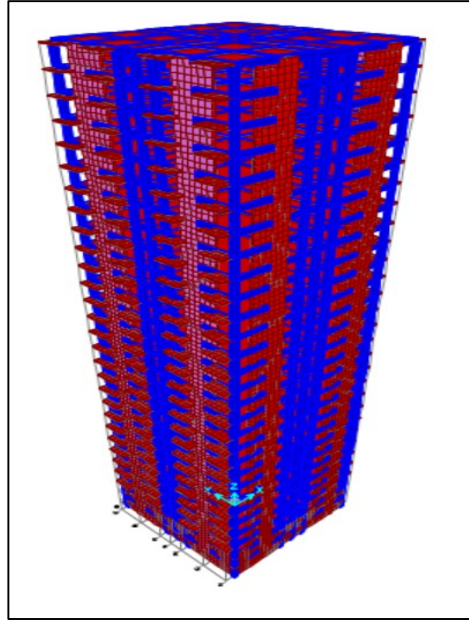


**Şekil 4:**  
Normal katlar kalıp planı (Birimler cm'dir.)



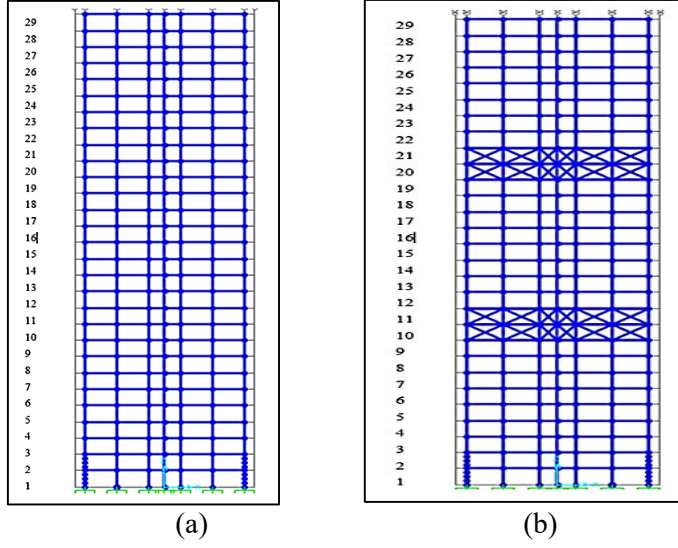
Şekil 5:

*Dış destek kirişli model için uygulama kalıp planı (Birimler cm'dir.)*



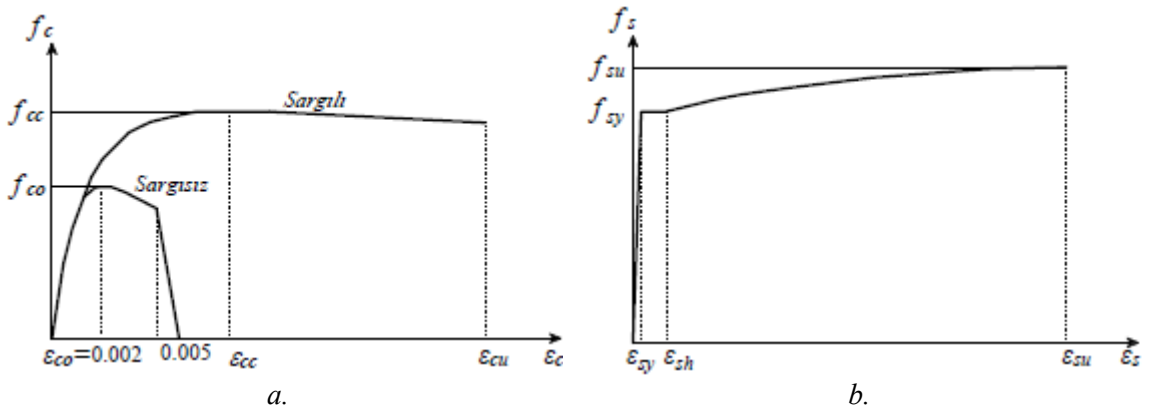
Şekil 6:

*Model 1 3D sonlu eleman modeli*



**Şekil 7:**  
(a) Model 1XZ düzlemi görünüşü (b) Model 2 XZ düzlemi görünüşü

Tasarlanacak bina İstanbul ili Kadıköy ilçesi ve Bostancı Mahallesi'nde yer aldığı kabul edilmiştir. Deprem tasarım parametreleri, AFAD tarafından hazırlanan “<https://testdth.afad.gov.tr/>” sitesinden alınmıştır. Yapının bulunduğu bölgede zemin sınıfının ZC olduğu kabul edilmiştir. DD-2 deprem düzeylerine ait spektral ivme katsayıları ve yer ivmesi büyüklükleri  $S_{DS} = 1.235$  ve  $S_{D1} = 0.419$  şeklinde hesap edilmiştir. Bina kullanım amacı: konut olarak dikkate alınmış BKS = 3.  $I = 1.0$ , deprem tasarım sınıfı DTS = 1 ve bina yükseklik sınıfı BYS = 1 olarak belirlenmiştir. Bina devrilme momentleri ilgili tahkikleri neticesinde taşıyıcı sistem davranış katsayısı  $R=6$  ve dayanım fazlalığı katsayısı  $D=2.5$  olarak dikkate alınmıştır. Beton ve donatı malzeme modelleri, TBDY-2019 EK5A ile verilen esaslar kullanılarak tanımlanmıştır. Bu malzeme modellerine ait gerilme-şekildeğiştirme grafikleri Şekil 8'de sunulmuştur. Şekil 8'de  $f_c$  sargılı betonda beton basınç gerilmesini,  $f_{cc}$  sargılı beton dayanımını,  $f_{co}$  sargısız betonun basınç dayanımını,  $\epsilon_c$  beton basınç birim şekildeğiştirmesini,  $\epsilon_{cu}$  sargılı betonun maksimum basınç birim şekildeğiştirmesini ifade etmektedir. Ayrıca  $f_s$ ,  $f_{su}$ ,  $f_{sy}$ ,  $\epsilon_{sy}$  ve  $\epsilon_{sh}$  sırasıyla donatı çeliğinin gerilmesini, kopma dayanımını, akma dayanımını, akma birim şekildeğiştirmesini ve kopma birim şekildeğiştirmesini ifade etmektedir.



**Şekil 8:**  
Betonun ve donatı çeliğinin gerilme-şekildeğiştirme ilişkisi  
a. Beton b. Donatı Çeliği

### 3. DOĞRUSAL OLMAYAN ANALİZLERİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

TBDY-2019'a göre doğrusal olmayan analizler Sap2000 ve Sectional Analysis Program (Response2000, 2000) programları yardımıyla yapılmıştır. Modeller de kullanılacak uygun deprem kayıtlarını düzenlemek için SeismoSignal ve Excel programları kullanılmıştır. Doğrusal olmayan analizler kapsamında TBDY-2019 Bölüm 13'te açıklanmış olan "Tasarım Aşaması III" hesap kuralları takip edilmiştir. Tablo 2'ye göre yapının performans hedefi; DD-4 deprem düzeyi altında kesintisiz kullanım, DD-2 deprem düzeyi altında kontrollü hasar ve DD-1 deprem düzeyi altında göçmenin önlenmesi olarak belirlenmiştir. Kesintisiz kullanım performans hedefi için yapılan hesapta dayanıma göre tasarım yaklaşımı kullanılacaktır. Kontrollü hasar performans hedefi için yapılan hesapta da dayanıma göre tasarım yaklaşımı kullanılacaktır. Bu performans seviyesinde yapılan hesap, göçmenin önlenmesi seviyesinde yapılacak hesap için ön tasarım olarak kabul edilecektir. Göçmenin önlenmesi performans hedefi için yapılan hesapta ise şekildeğiştirmeye göre tasarım ve değerlendirme tasarım ilkeleri kullanılmıştır.

Şekildeğiştirme ve iç kuvvetlerin değerlendirilmesinde kullanılacak sınır değerleri aşağıda verilen denklemlere göre belirlenmiştir. Yapıda plastik davranışlar iki farklı yaklaşımla modellenmiştir. Kolon ve kirişlerde yığılı plastik davranış modeli kullanılırken perdelerde yayılı plastik mafsalsal modeli kullanılmıştır.

#### Göçmenin Önlenmesi Performans Düzeyi İçin Sınır Değerler

Seçilecek olan Göçmenin önlenmesi (GÖ) performans düzeyi için sınır değerler; yayılı plastik davranış için toplam birim şekildeğiştirme, yığılı plastik davranış için plastik dönmeler üzerinden hesaplanacaktır.

#### 3.1. Yayılı Plastik Davranış İçin Birim Şekildeğiştirme Sınır Değerleri

Göçmenin önlenmesi performans düzeyi için dikdörtgen kesitli kolon, kiriş ve perdelerde ki beton birim kısalması sınır değeri aşağıdaki denklem ile hesaplanacaktır.

$$\varepsilon_c^{(GÖ)} = 0.0035 + 0.04 \sqrt{(Wwe)} \leq 0.018 \quad (2)$$

Yukarıda ki formülde yer alan Wwe terimi, etkin sargı donatısının mekanik donatı oranını göstermektedir ve aşağıdaki Denklem 3 ile hesaplanmaktadır.

$$W_{we} = a_{se} \rho_{sh,min} \frac{f_{ywe}}{f_{ce}} \quad (3)$$

Yukarıda Denklem 3'te verilen  $a_{se}$  sargı donatısı etkinlik katsayısını göstermektedir ve aşağıdaki Denklem 4 ile hesaplanmaktadır. Formüldeki diğer terimlerden olan  $\rho_{(sh,min)}$  dikdörtgen kesitte iki yatay doğrultuda hacimsel enine donatı oranından küçük olanı,  $f_{ywe}$  enine donatı ortalama akma dayanımını göstermektedir.

$$a_{se} = \left(1 - \frac{\sum a_i^2}{6b_0h_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_0}\right) \left(1 - \frac{s}{2b_0}\right) ; \quad \rho_{sh} = \frac{A_{sh}}{b_k s} \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemde verilen  $A_{sh}$  ve  $\rho_{sh}$  göz önüne alınan doğrultuda enine donatının alanını ve hacimsel oranını,  $b_k$  dik doğrultudaki çekirdek boyutunu,  $s$  enine donatı aralığını,  $h_0$  ve  $b_0$  sargı donatısı eksenlerinden ölçülen sargılı beton boyutlarını,  $a_i$  ise bir etriye kolu veya çiroz tarafından mesnetlenen boyuna donatıların eksenleri arasındaki uzaklığı göstermektedir. Göçmenin önlenmesi için donatı çeliği birim uzama sınır değeri Denklem 5 ile gösterilmiştir.



$$\varepsilon_c^{(G\ddot{O})} = 0.4 \varepsilon_{su} \quad (5)$$

### 3.2. Yığılı Plastik Davranış İçin Plastik Dönme Sınır Değerleri

Plastik dönme sınır değerleri Göçmenin önlenmesi performans hedefi için Denklem 6 ile hesaplanmaktadır.

$$\theta_p^{(G\ddot{O})} = \frac{2}{3} \left[ (\phi_u - \phi_y) L_p \left( 1 - 0.5 \frac{L_p}{L_s} \right) + 4.5 \phi_u d_b \right] \quad (6)$$

Yukarıdaki Denklem 6'da verilen  $\phi_u$  beton-donatı çeliği modellerinden yararlanarak ve kesite etkiyen aksenal kuvvet dikkate alınarak yapılan analizden elde edilen göçme öncesi toplam eğriliğine karşılık gelmektedir. Verilen denklemdeki son terim akma sonrası durum için akma penetrasyonuna bağlı donatı sıyrılması dönmesine karşı gelmektedir.

#### Kontrollü Hasar Performans Düzeyi İçin Sınır Değerler

Göçmenin önlenmesine bağlı olarak, Kontrollü hasar performans düzeyi için sınır değerler, Denklem 7-9'da verilmiştir.

$$\varepsilon_c^{(KH)} = 0.75 \varepsilon_c^{(G\ddot{O})} \quad (7)$$

$$\varepsilon_s^{(G\ddot{O})} = 0.75 \varepsilon_s^{(G\ddot{O})} \quad (8)$$

$$\theta_p^{(KH)} = 0.75 \theta_p^{(G\ddot{O})} \quad (9)$$

#### Sınırlı Hasar Performans Düzeyi İçin Sınır Değerler

Sınırlı hasar performans düzeyi için birim şekildeğiştirme sınır değerleri Denklem 10-13'te verilmiştir. Yığılı plastik davranış için ise taşıyıcı sistemde plastik mafsal oluşumuna müsaade edilmeyecektir (Denklem 11).

$$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0025 \quad (10)$$

$$\varepsilon_c^{(SH)} = 0.0075 \quad (11)$$

$$\theta_p^{(SH)} = 0 \quad (13)$$

Yukarıda verilen denklemlere göre sırasıyla kirişler, kolonlar ve perde duvarlar için plastik dönme sınır değerleri elde edilmiştir.

#### 3.2.1. Kirişler İçin Plastik Dönme Sınır Değerinin Hesabı

Modellerde kullanılan B40/80'lik kiriş için dönme sınır değer hesabı aşağıda gösterilmiştir. Plastik mafsallar, kirişlerin mesnet bölgelerinde tanımlanacağı için hesaplamalarda kesitte negatif moment oluşacağı düşünülmüştür. Açıklık ortasında, kiriş kesitlerinin pozitif moment altında doğrusal elastik kalacağı kabul edilmiştir.

Seçilen boyuna üst donatı: 3Ø20 (ana donatı), 3Ø20 (mesnet ilave donatısı)

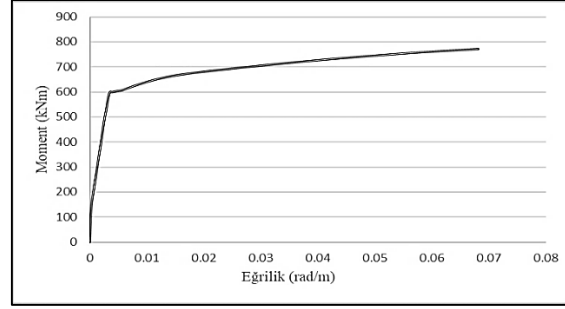
Seçilen boyuna alt donatı: 5Ø20

Seçilen enine donatı: 2Ø10/10

Plastik mafsal boyu:  $0.4/2 = 0.20$  m

Kesme açıklığı:  $6.0/2 = 3.0$  m

Tipik kiriş kesiti için akma eğriliği ve kopma eğriliği, Response2000 programı ile hesaplanan moment-eğrilik diyagramı ile belirlenmiştir (Şekil 9).



**Şekil 9.**

*Kirişler için Moment-Eğrilik diyagramı*

Akma eğriliği = 0.00432 1/m

Kopma eğriliği = 0.07 1/m

$\theta_p^{(GÖ)} = 2/3[(0.07-0.00432) \times 0.2(1-0.5 \cdot 0.2/3.0) + 4.5 \times 0.07 \times 0.02] = 0.013 \text{ rad}$

### 3.2.2. Kolonlar İçin Plastik Dönme Sınır Değerinin Hesabı

Yapıdaki kolonlar için plastik dönme sınır değerleri, aşağıda hesaplanmıştır. Benzer kolon ebatları için tek hesap yapılmıştır. Çalışma da C1 kolonu için hesaplar ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

±0.00~+44.00 Kotları arası:

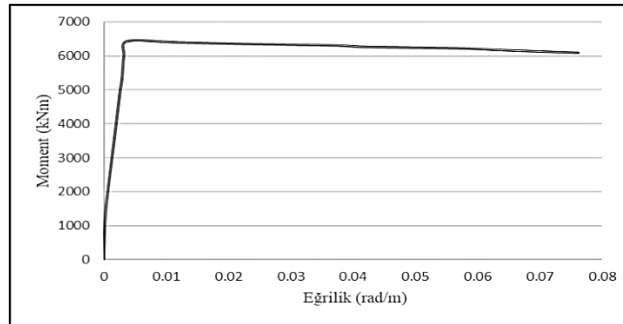
Seçilen boyuna donatı: 30Ø22

Seçilen enine donatı: 10Ø12/10

Plastik mafsal boyu:  $1.0/2 = 0.50 \text{ m}$

Kesme açıklığı:  $4.0/2 = 2.0 \text{ m}$

Kolon kesiti için akma eğriliği ve kopma eğriliği, Response2000 programı ile hesaplanan moment-eğrilik diyagramı ile belirlenmiştir (Şekil 10).



**Şekil 10.**

*C100X100 kolon için Moment-Eğrilik diyagramı*

Akma eğriliği: 0.00349 1/m

Kopma eğriliği: 0.0778 1/m

$$\theta_p^{(G\ddot{O})} = 2/3[(0.0778-0.00349)x0.5(1-0.5 \cdot 0.5/2.0)+4.5x0.0778x0.022]= 0.015 \text{ rad}$$

### 3.2.3. Perdeler İçin Birim Şekildeğiştirme Sınır Değerinin Hesabı

P600/60 Perdesinin kritik katta kalan kısmı için birim kısalma sınır değer hesabı aşağıda gösterilmiştir.

$$\alpha_{se} = \left(1 - \frac{3x200^2+130^2x9}{6x1160x560}\right) \left(1 - \frac{100}{2x1160}\right) \left(1 - \frac{100}{2x560}\right) = 0.78$$

$$\rho_{sh} = \frac{1099}{1160x100} = 0.0095$$

$$\omega_{we} = 0.78x0.0095x504/65 = 0.0575$$

$$\varepsilon_c^{G\ddot{O}} = 0.0035 + 0.04\sqrt{0.0575} = 0.0131 \leq 0.018$$

P600/60 Perdesi birim kısalma sınır değeri 0.0131 bulunmuştur. Bulunan değer 0.018'den küçük olduğundan kontrollerde bu değer kullanılacaktır.

Göçmenin önlenmesi performans düzeyi için donatı çeliği birim uzama sınır değeri

$$\varepsilon_s^{G\ddot{O}} = 0.4x0.08 = 0.032$$

Yapı için bu analiz aşamasında malzemelerin karakteristik dayanımları yerine beklenen (ortalama) dayanımları kullanılacaktır. Malzeme beklenen dayanımları aşağıda verildiği gibi dikkate alınmıştır. Beton elastisite modülü, hesap dayanımı ile değiştiğinden dolayı yeniden hesaplanması gerekmektedir. TS 500 ile verilen elastisite modülü hesabı C50'ye kadar olan beton sınıflarını kapsamaktadır. TBDY-2019'a göre, C50'in üzerindeki beton sınıflarında elastisite modülü Eurocode 2'ye göre hesaplanacaktır.

Beton Sınıfı	: C65 f <sub>ce</sub> = 65000 kN/m <sup>2</sup>
Elastisite Modülü	: (C65) E = 39175 N/mm <sup>2</sup>
Kayma Modülü	: (C65) G = 15670 N/mm <sup>2</sup>
Donatı Sınıfı	: B420C f <sub>yk</sub> = 506000 kN/m <sup>2</sup>

### 3.3. Etkin Rijitlik Değerleri

Doğrusal olmayan analizler için taşıyıcı sistem etkin rijitliklerinin hesabı Bölüm 1.4.4.2'ye göre yapılacaktır. Kolon ve kirişlerde plastik mafsallar arasında kalan kısımların etkin rijitlik değerlerinin hesabı Denklem 1.24 ve Denklem 1.25 ile yapılacaktır. Perdelerde yayılı plastik mafsal (lif) kabulü yapıldığından dolayı etkin kesit rijitlik değeri hesabı yapılmasına gerek yoktur.

Kirişler İçin Etkin Rijitlik Hesabı

Bina modelinde yer alan 40/80'lik kiriş için etkin rijitlik hesabı aşağıda verilmiştir.

$$\Theta_y = \frac{0.00432 x 3}{3} + 0.0015 x 1 \left(1 + 1.5 x \frac{0.8}{3}\right) + \frac{0.0043x 0.02 x 506}{8 x \sqrt{65}} = 0.007 \text{ rad}$$

$$(EI)_e = \frac{598.7}{0.07} x \frac{3}{3} = 8552.8 \text{ kNm}^2$$

Kesitin brüt rijitliği 447614.9 kNm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Buna göre kesitin etkin rijitlik çarpanı 8552.8 / 447614.9 ≈ 0.19 olarak bulunmuştur.

Kolonlar İçin Etkin Rijitlik Hesabı

$$\Theta_y = \frac{0.0035 x 2}{3} + 0.0015 x 1 \left(1 + 1.5 x \frac{1.0}{2}\right) + \frac{0.0035x 0.022 x 506}{8 x \sqrt{65}} = 0.0057 \text{ rad}$$

$$(EI)_e = \frac{6543.5}{0.0057} \times \frac{2}{3} = 765263.2 \text{ kNm}^2$$

Kesitin brüt rijitliği 3262500 kNm<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır. Buna göre kesitin etkin rijitlik çarpanı  $765263.2 / 3262500 \approx 0.23$  olarak bulunmuştur. Diğer kolonlar içinde yapılan hesaplar sonucunda C90X90 Kolonları için etkin rijitlik hesabı 0.21 olarak, C80X80 için ise 0.15 olarak hesap edilmiştir.

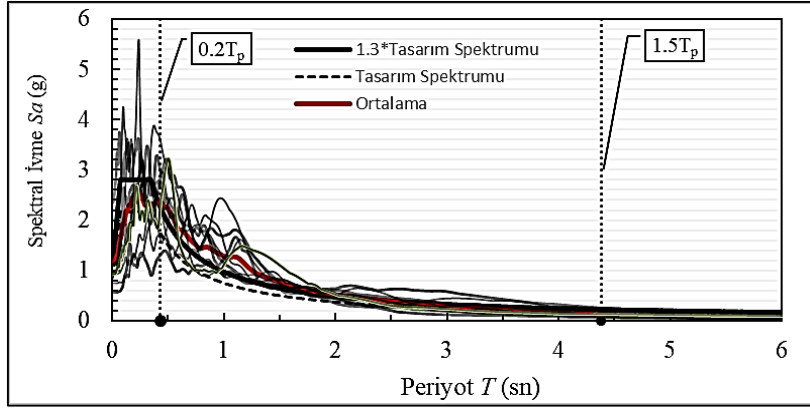
### 3.4. Deprem Kayıtlarının Ölçeklendirilmesi

Deprem kayıtlarının seçilmesi ve ölçeklendirilmesi TBDY-2019’da verilen kurallara göre yapılmıştır. Buna göre analizlerde en az 11 deprem kaydının kullanılması gerekmektedir. Deprem kayıtları “Peer Strong Motion Database” veri tabanından elde edilmiştir (URL-4, 2020). Arama sonuçları sonucunda 11 deprem kaydına ek ölçek katsayısı sınırlaması kaldırılarak bina modellerine Türkiye’de gerçekleşen en uygun Düzce deprem kaydı, analizlere eklenmiştir. Seçilen deprem kayıtları, oluşturulacak hedef spektrumuna göre ölçeklendirilecektir. Hedef spektrumu DD-1 deprem düzeyi ve ZC zemin sınıfı özelliklerine göre oluşturulacaktır. Ancak tasarım spektrumu değerleri, DD-1 spektrumu değerlerinin 1.30 katından fazla olması gerektiğinden, hedef spektrumu oluşturulurken 1.30 katsayısı ile büyütülmüştür.

Tablo 3. Seçilen deprem kayıtlarının özellikleri

No	Rsn	Deprem	Yıl	İstasyon	Büyükölç	Kayıt Süresi (sn)	Adım Sayısı	Adım Aralığı (sn)
1	164	Imperial Valley-06	1979	Cerro Prieto	6.33	63.82	6382	0.01
2	265	Victoria, Meksika	1980	Cerro Prieto	6.33	24.53	2453	
3	313	Corinth, Greece	1981	Corinth	6.60	41.32	4132	
4	359	Coalinga-01	1983	Parkfield - Vineyard Cany	6.36	59.99	5999	
5	587	New Zealand-02	1987	Matahina Dam	6.60	49.34	2467	0.02
6	827	Cape Mendocino	1992	Fortuna - Fortuna Blvd	7.01	44.00	2200	
7	864	Landers	1992	Joshua Tree	7.28	44.00	2200	
8	963	Northridge-01	1994	Castaic - Old Ridge Route	6.69	40.00	2000	
9	1006	Northridge-01	1994	LA- UCHA Grounds	6.69	60.00	3000	
10	1633	Manjil, Iran	1990	Abbar	7.37	53.52	2676	0.01
11	1787	Hector Mine	1999	Hector	7.13	45.31	4531	
12	1614	Düzce, Türkiye	1999	Lamont 1061	7.14	42.33	4233	

Çalışmada iki farklı model karşılaştırılacağından iki model periyotlarına uyan deprem kayıtları seçilmiştir. Bu kapsamda dış destek kirişsiz model büyük doğal periyodu 2.92 s ve dış destek kirişli model için küçük periyot 2.16 s’dir. Kullanılacak olan deprem kayıtlarının ölçeklendirme aralığı bu periyot değerlerinin 0.2 ve 1.5 katları arasında olacaktır. Ölçeklendirme aralığı 0.43 s ve 4.38 s olarak belirlenmiştir. Ölçeklendirilen ivme kayıtlarına ait tepki spektrumları ve hedef spektrumu Şekil 11’de verilmiştir. Doğrusal olmayan modelleme yapılırken, yüksek yapıların doğrusal olmayan çözümlemesi için sönüm oranı %2.5 alınmıştır. Doğrusal olmayan geometri (P-Δ) etkileri göz önüne alınmıştır. Perdelerin kesme davranışının doğrusal olacağı kabul edilmiştir. Döşemelerde rijit diyafram kabulü yapılmıştır.



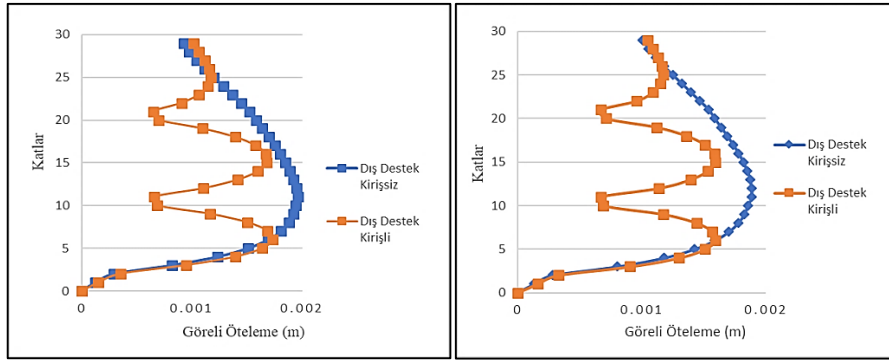
Şekil 11.

Ölçeklendirilen ivme kayıtlarına ait tepki spektrumları ve hedef spektrumu

### 3.5. Doğrusal Analiz Sonuçları ve İrdelemeler

Kütle katılım oranları her iki model için %90'ın üzerinde çıkmıştır. Dış destek kirişli modelde kütle katılım oranı %92 olurken, dış destek kirişsiz model de %91 olmuştur. Yapılan kontroller sonucunda her iki modelde de herhangi bir düzensizlik durumu oluşmamıştır.

Binalardaki kolon ve perde gibi düşey taşıyıcılarda oluşan şekildeğişiminin ardışık iki kat diyaframının yanal ötelenmeleri arasındaki farkın yönetmelikteki sınır değer içerisinde kalması gerekmektedir. Dış destek kirişli model için X doğrultusunda maksimum görelî öteleme miktarı 0.00173 olurken, dış destek kirişsiz model için 0.00196 olmuştur. Dış destek kirişli model için Y doğrultusunda maksimum görelî öteleme miktarı 0.00159 olurken, dış destek kirişsiz model için 0.00188 olmuştur. X doğrultusunda görelî kat öteleme miktarı %12, Y doğrultusunda %15 azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 12).



(a)

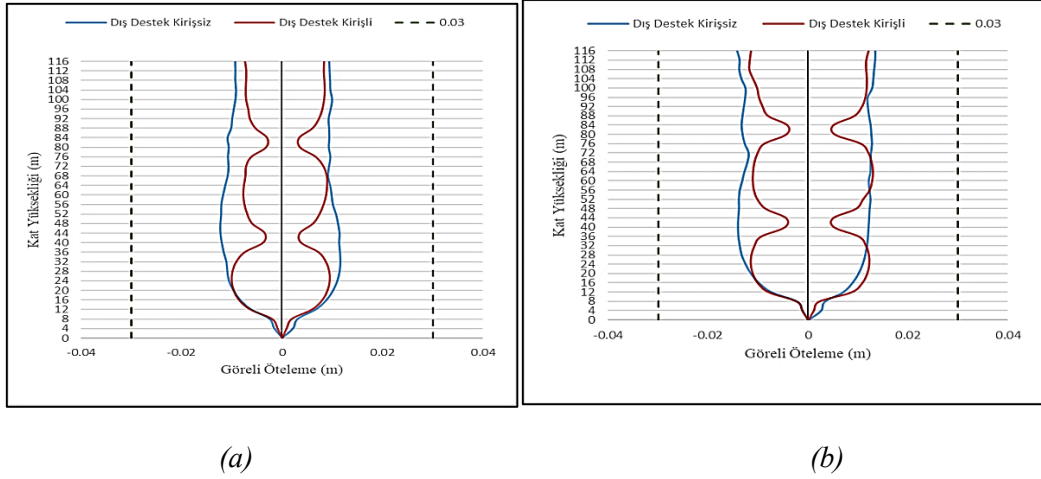
(b)

Şekil 12.

Her iki model için kat öteleme karşılaştırılması  
(a) X doğrultusu (b) Y doğrultusu

### 3.6. Doğrusal Olmayan Analiz Sonuçları ve İrdelemeler

#### 3.6.1. Görelî Kat Ötelemeleri Kontrolü

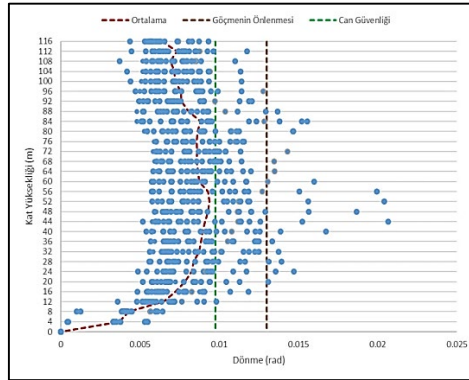


**Şekil 13:**  
Ortalama görelî kat ötelemeleri  
(a) X doğrultusu (b) Y doğrultusu

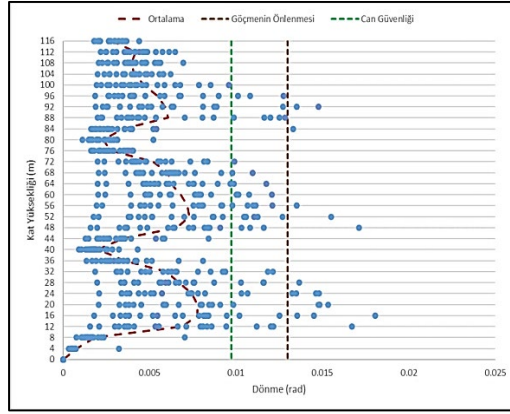
Yüksek binalar için elde edilen görelî kat ötelemelerinin ortalaması 0.03 değerini ve tek bir deprem kaydından elde edilen görelî kat ötelemesi değerinin 0.045'i geçmemesi gerekmektedir. Her iki model için ortalama görelî kat öteleme değerleri Şekil 13'te verilmiştir. Grafiklerden görüldüğü üzere tasarlanan bina gereken şartları sağlamaktadır.

### 3.6.2. Kiriş Plastik Dönmelerinin Kontrolü

Kirişlerin plastik dönmelerinin hesabı için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucunda her bir deprem kaydı için elde edilen kiriş uçlarının eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Dış destek kirişsiz model için B1 kirişli dönme değerleri Şekil 14'te, dış destek kirişli model için Şekil 15'te gösterilmiştir. Kirişlerde Plastik uç dönmelerinin ortalamaları hedeflenen performans düzeyi olan göçmenin önlenmesi performans düzeyinin oldukça altında kalmaktadır. Dış destek kirişli modelde ise dönme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Dış destek kirişsiz model için maksimum ortalama dönme değeri 0.0093 rad iken, dış destek kirişli model için maksimum ortalama dönme değeri 0.0071'e düşmüştür. Yaklaşık %24 oranında azalma meydana gelmiştir. Her iki bina modeli için Can güvenliği performans düzeyi sağlanmıştır.



**Şekil 14:**  
Dış destek kirişsiz model için B1 kirişli dönme değerleri

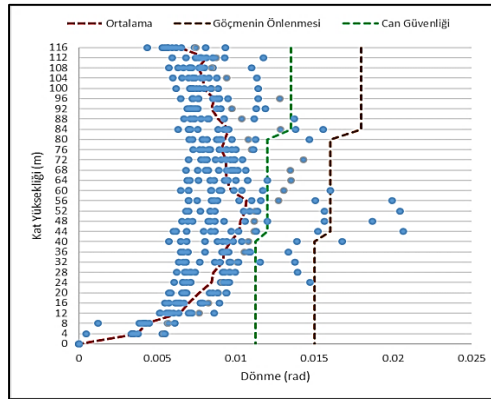


Şekil 15:

*Dış destek kirişli model için B1 kirişi dönme değerleri*

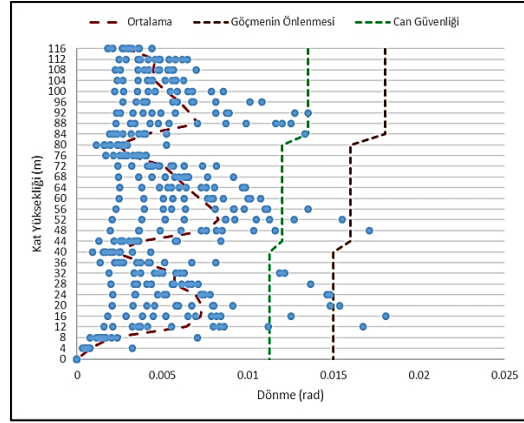
### 3.6.3. Kolon Plastik Dönmelerinin Kontrolü

Kolonların plastik dönmelerinin hesabı için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analizler sonucunda her bir deprem kaydı için kolon uçlarının eğrilik değerleri hesaplanmıştır. Dış destek kirişsiz model için C1 kolonu X ve Y doğrultularındaki dönme değerleri Şekil 16 ve dış destek kirişli model için Şekil 17’de gösterilmiştir. Dış destek kirişli modelde ise dönme değerlerinin azaldığı görülmüştür. Dış destek kirişsiz model için maksimum ortalama dönme değeri 0.011 rad iken, dış destek kirişli model için maksimum ortalama dönme değeri 0.0082’e düşmüştür. Yaklaşık %25 oranında azalma meydana gelmiştir. Her iki model için Can Güvenliği performans seviyesi sağlanmıştır.



Şekil 16:

*Dış destek kirişsiz model için C1 kolonu X doğrultusu dönme değerleri*

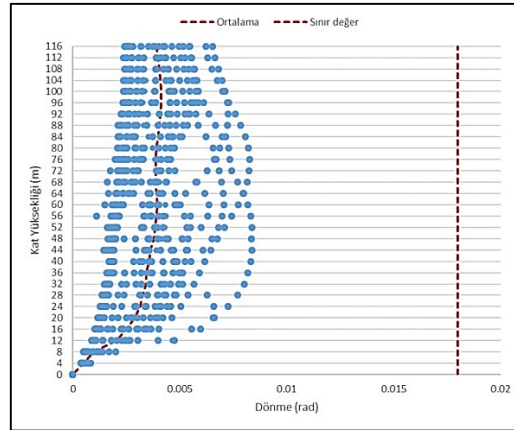


Şekil 17:

*Dış destek kirişli model için C1 kolonu X doğrultusu dönme değerleri*

### 3.6.4. Perde Birim Şekildeğiştirme Kontrolü

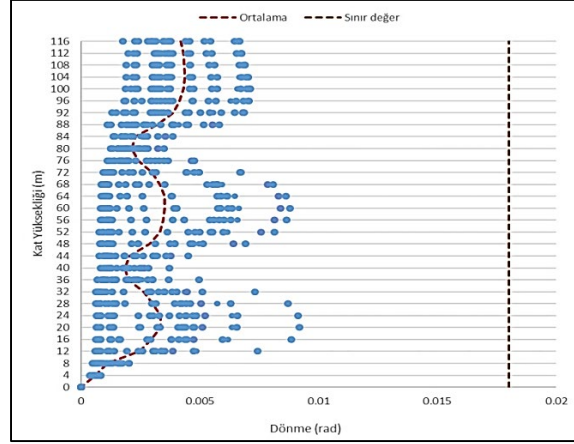
Perdelerin plastik dönmelerinin hesabı için zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz sonucunda perde uçlarının eğrilik değerleri elde edilmiştir. Dış destek kirişsiz model için P1 perdesi dönme değerleri Şekil 18'de, dış destek kirişli model için Şekil 19'da gösterilmiştir. Dış destek kirişli model için ortalama sınır değeri değiştirme değerleri %18 azaldığı görülmüştür. Her iki bina için hedeflenen performans seviyesi sağlanmıştır.



Şekil 18:

*Dış destek kirişsiz model P1 Perdesi dönme değerleri*





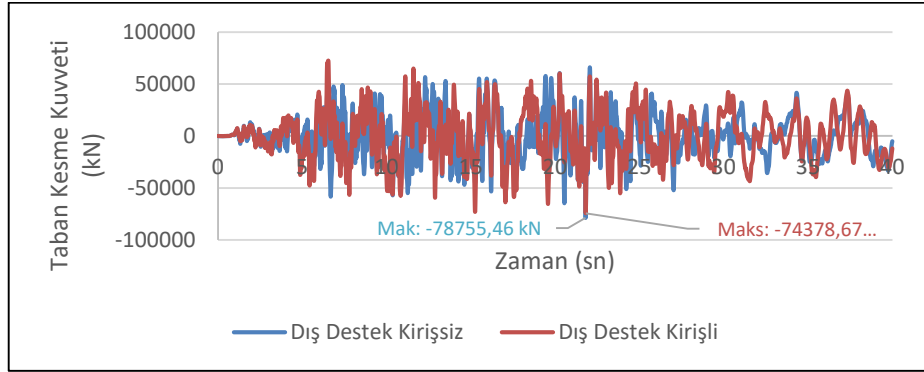
**Şekil 19:**

*Dış destek kirişli model P1 perdesi dönme değerleri*

### 3.6.5. Kesit etkilerinin karşılaştırılması

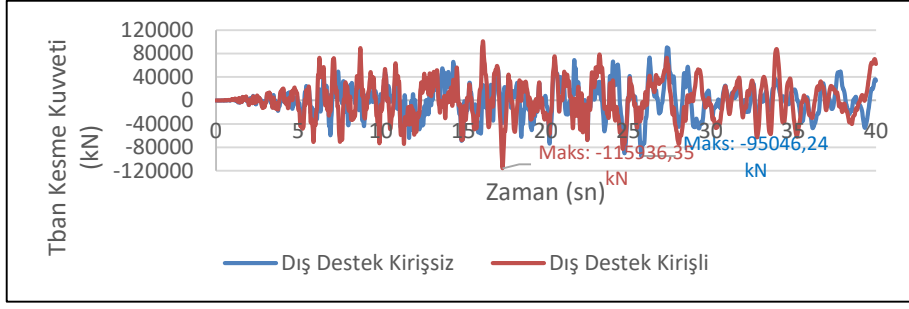
#### 3.6.5.1. P1 Perdesi Kesme Kuvvetleri

Şekil 20-21'de dış destek kirişli ve dış destek kirişsiz model için X-Y doğrultusunda P1 perdesi kesme kuvvetleri RSN 164 ivme kaydı için karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



**Şekil 20:**

*X Doğrultusunda RSN164 ivme kaydı için P1 perdesi kesme kuvveti*

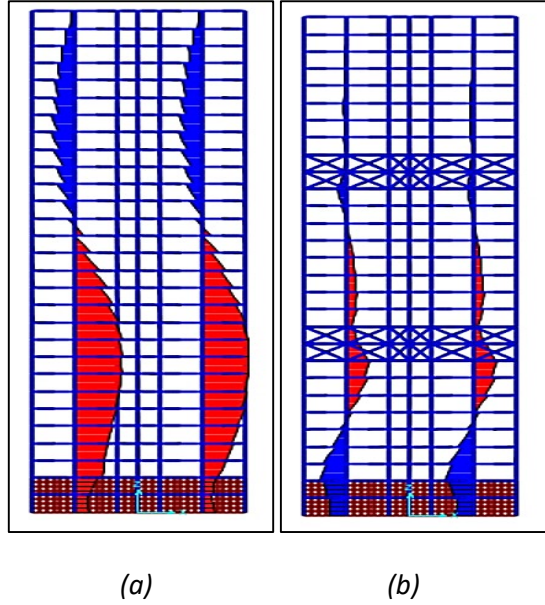


**Şekil 21:**

*Y Doğrultusunda RSN164 ivme kaydı için P1 perdesi kesme kuvveti*

### 3.6.5.2. P1 Perdesi Eğilme Momenti

Dış destek kullanılan katlarda rijitlik artarken buna bağlı olarak öteleme ve görelî kat ötelemeleri azalmıştır. Buna paralel olarak dış destek kullanılan katlarda eğilme momenti değerlerinin azaldığı Şekil 22’de görülmektedir. RSN164 için P1 perdesi eğilme momenti değeri yaklaşık olarak %54 azaldığı görülmüştür. Bir deprem kaydı için sonuçlar verilmiştir, diğer kayıtlarda da benzer sonuçlar çıktığı için verilmeye gerek görülmemiştir.



**Şekil 22:**

*RSN164 deprem kaydı için P1 Perdesi eğilme momenti diyagramı*

## 4. SONUÇLAR

Günümüzde yüksek binaların yapımı giderek artmaktadır, buna bağlı olarak yüksek binaların deprem analizleri giderek önem kazanmıştır. TBDY-2019 yönetmeliğinde yüksek binalar için ayrı bir ana başlıkta uyulması gereken hesap ve kurallar belirtilmiştir. Bu çalışmada taşıyıcı sistemi ve ölçüleri aynı fakat taşıyıcı sisteme ek dış destek kiriş kullanılan

iki bina tasarlanmış olup sonuçlar doğrusal ve doğrusal olmayan analiz için aşağıdaki şekilde elde edilmiştir.

- Dış destek kiriş kullanılan model için X ve Y doğrultularındaki periyot değeri %24 oranında azalmıştır.
- Dış destek kirişli model için X doğrultusunda görel kat öteleme miktarı %12, Y doğrultusunda %15 azaldığı gözlemlenmiştir.
- Dış destek kirişli model için ikinci merteye etkileri X doğrultusunda %30, Y doğrultusunda %26 azalmıştır.
- Dış destek kirişli model için maksimum yerdeğiştirme yaklaşık %27 oranında bir azalış göstermiştir.
- Düzce deprem kaydı için; dış destek kirişli modelin maksimum yer değiştirmesinde yaklaşık %29 oranında azalma gözlemlenmiştir.
- Dış destek kirişli model için +44.0 kotu ile +84.0 kotu sonrasında düşey taşıyıcı elemanların boyutlarında azalma olmasına rağmen görel kat ötelemelerinde belirgin artma olmamıştır. Bunun nedeni olarak dış destek kiriş kullanımı, boyutların azaldığı katlarda kullanılması nedeniyle rijitlik farkını giderdiği görülmektedir.
- Dış destek kiriş kullanılan katlarda Görel Kat Ötelemelerin önemli oranlarda azaldığı görülmüştür.
- RSN164 deprem kaydı dış destek kirişli model için P1 perdesi kesme kuvveti yaklaşık %20, oranında arttığı belirlenmiştir.
- Dış destek kullanılan katlarda rijitlik artarken buna bağlı olarak yerdeğiştirme ve görel kat ötelemeleri azalmıştır. Buna paralel olarak dış destek kullanılan katlarda eğilme momenti değerlerinin azaldığı görülmüştür. RSN164 için P1 perdesi eğilme momenti değeri yaklaşık olarak %54 oranında azaldığı görülmüştür.
- Her iki bina Can Güvenliği performans seviyesini sağlamıştır.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## YAZAR KATKISI

Bu çalışmaya, Özlem Çavdar, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, Halil İbrahim Çelik ise modelleme, veri analizi yönünden katkı sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

1. Choi, H.S. ve Joseph, L. (2012) Outrigger System Design Considerations, *The International Journal of High-Rise Buildings*, CTBUH, 1(3),237-246.
2. Çelik, H.İ. (2020) Dış Destek (Outrigger) Kirişlerinin Deprem Etkisindeki Betonarme Yüksek Bir Binanın Performansı Üzerine Etkisinin Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Yöntemlerle İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi.

3. Hoenderkamp, J.C.D. ve Bakker, M.C.M. (2003) Analysis of High-Rise Braced Frames with Outriggers, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 12, 335-350. doi: 10.1002/tal.226
4. Hoenderkamp, J. C. D. (2008) Second Outrigger at Optimum Location on High-Rise Shear Wall, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 17, 619-634. doi: 10.1002/tal.369
5. Özorpak, U. 2018, Deprem Etkisindeki Yüksek Binalarda Çoklu Dıştan Destek (Outrigger) Kirişlerinin Konumunun Tasarıma Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
6. PEER (2020), (Pacific Earthquake Engineering Research Centre), <http://peer.berkeley.edu/smcat/data>.
7. RESPONSE2000 (2000) Sectional Analysis Program, University of Toronto, Version: 1,0,5, Toronto,
8. SAP2000 (2015) Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures, Computers and Structures Inc, Berkeley, California, USA,
9. Smith, B. S. & Salim I. (1981). Parameter Study of Outrigger-Braced Tall Building Structures, *Journal of the Structural Division ASCE*, 107(ST10), 2001-2013.
10. Smith, B.S. ve Coull, L. (1991) *Tall Building Structures: Analysis and Design*, Montreal, Glasgow, John Wiley & Sons Inc.
11. Taranath, B. S. (2010). Reinforced Concrete Design of Tall Buildings, Las Vegas, Nevada: CRC Press Taylor & Francis Group.
12. TBDY, (2019), Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara,
13. TS498, (1987), Yapı Elemanlarının Boyutlandırılmasında Alınacak Yüklerin Hesap Değerleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,
14. TS 500, (2000), Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,
15. Wu, J. R. & Li, Q. S. (2003) Structural Performance of Multi-Outrigger- Braced Tall Buildings, *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 12, 155-176. doi.org/10.1002/tal.219.
16. URL-1, <https://deprem.afad.gov.tr/deprem-tehlike-haritasi>.