

## ASCE 41-17'ye Göre Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemleri ile Betonarme Taşıyıcı Sistemlerin Performans Analizlerinin Elde Edilmesi ve Karşılaştırması

Rohullah JAMAL<sup>1,2\*</sup>, S. Bahadır YÜKSEL<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

<sup>2</sup>Theoretical and Applied Mechanics department, Electromechanics Faculty, Kabul Polytechnic University, Kabul, Afghanistan

<sup>3</sup>Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 42250, Konya

<sup>1</sup><https://orcid.org/0000-0001-5987-8502>

<sup>3</sup><https://orcid.org/0000-0002-4175-1156>

\*Sorumlu yazar: jamal.rohullah@gmail.com

### Araştırma Makalesi

#### Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi:23.01.2021

Kabul tarihi:23.08.2021

Online Yayınlanma:08.03.2022

#### Anahtar Kelimeler:

İtme analizi

Plastik mafsalsal

Kapasite eğrisi

Tepe yer değiştirme

Taban kesme kuvveti

### ÖZ

Doğrusal olmayan statik prosedür (NSP) veya itme analizi basitliği nedeniyle, yapısal ve yapısal olmayan elemanların performanslarının belirlenmesi için kullanılmaktadır. Modelleme sırasında yapıdaki her bir elemanın doğrusal olmayan özelliklerinin ve deformasyon kapasitelerinin belirlenmesi gerekmektedir. İtme analizi, ASCE 41-17 yönetmeliğine göre tanımlanan plastik mafsalsal özellikleri ele alınarak gerçekleştirilmiştir. Programlara tanımlanan plastik mafsalsal özelliklerinin sınır değerleri verilirken programlar sınır değerlerinin içerisindeki değerleri otomatik olarak hesaplamaktadır. Varsayılan mafsalsal özelliklerinin yanlış kullanılması, mevcut yapılar için hatalı yer değiştirme kapasitelerine yol açabilmektedir. Bu çalışmada, ASCE 41-17'de tanımlanan doğrusal olmayan elemanların plastik mafsalsal özellikleri ele alınarak itme analizi yapılmıştır. Betonarme taşıyıcı sistemlerin analiz sonuçları incelenerek birbiri ile karşılaştırılmıştır. Plastik mafsalsal özelliklerinde en etkili parametreler plastik mafsalsal uzunluğu ve enine donatı aralığıdır. Bu çalışmada artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemiyle 3 açıklıklı 1, 2 ve 3 katlı betonarme yapıların analizleri yapılmıştır. Yapı sistemleri üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda kapasite eğrileri elde edilmiştir. ASCE 41-17'ye göre hesaplanan tepe yer değiştirme miktarı ve taban kesme kuvveti, kat sayısı arttıkça zaman artmaktadır. ASCE 41-17 yönetmeliğine göre yapılan analizlerden elde edilen sonuçlar kat yüksekliğine, yapıya etkiyen düşey yük miktarına ve efektif rijitliğine bağlıdır.

## Obtaining and Comparison of Nonlinear Calculation Methods and Performance Analysis of Reinforced Concrete Structural Systems According to ASCE 41-17

### Research Article

#### Article History:

Received: 23.01.2021

Accepted: 23.08.2021

Published online:08.03.2022

#### Keywords:

Pushover analysis

Plastic hinge

Capacity curves

Peak displacement

Base shear force

### ABSTRACT

Due to its simplicity, the structural engineering profession has been using the nonlinear static procedure (NSP) or pushover analysis. While modeling, the determination of the nonlinear properties and deformation capacities of each component in the structure should be determined. Pushover analysis was performed by considering the nonlinear hinge properties defined according to ASCE 41-17. While the limit values of the defined plastic hinge properties are given to the programs, the programs automatically calculate the values within the limit values. The user needs to be careful; the misuse of default-hinge properties may lead to unreasonable displacement capacities for existing structures. In this study, pushover analysis has been carried out by considering the plastic hinge properties of the nonlinear elements defined in ASCE 41-17. The analysis results of reinforced concrete building systems were examined and compared with each other. The most effective parameters in plastic hinge

properties are plastic hinge length and transverse reinforcement spacing. In this study, 3-span, 1, 2 and 3-storeys reinforced concrete structures were analyzed using the incremental equivalent earthquake load method. Capacity curves have been obtained as a result of the analysis performed on the building systems. The peak displacement and base shear strength calculated according to ASCE 41-17 increase when the number of floors increased. The results calculated according to ASCE 41-17 depend on the number of floors, the amount of vertical load acting on the structure and effective stiffness in the analysis.

**To Cite:** Jamal R., Yüksel B. ASCE 41-17'ye Göre Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemleri ile Betonarme Taşıyıcı Sistemlerinin Performans Analizinin Elde Edilmesi ve Karşılaştırması. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2022; 5(1):189-204.

## Giriş

Sismik yer değiştirme tahminleri, doğrusal veya doğrusal olmayan analiz yöntemleri kullanılarak elde edilebilir. Binaların sismik tasarımı için doğrusal elastik analiz kullanılırken, elastik olmayan davranış, sık olmayan deprem yüklemelerine maruz kalan çoğu yapıda amaçlanmaktadır. Bu nedenle, sismik yükler altında binaların gerçek davranışını anlayabilmek için doğrusal olmayan analizlerin kullanılması önerilmektedir (Priestley ve ark., 1993).

Doğrusal olmayan analiz, mevcut ve yeni yapıların sismik performans değerlendirmesi için daha popüler bir araç haline gelmiştir. Doğrusal olmayan zaman alanı analizinin, sismik talep tahminleri ve yapıların performans değerlendirmesi için en doğru yöntem olduğu iyi bilinmesine rağmen, doğrusal olmayan statik analiz, basitliği nedeniyle yapı mühendisliğinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

İtme ve doğrusal olmayan zaman alanı analizlerinin kendi sınırlamaları, zorlukları veya belirsizlikleri vardır (Krawinkler, 1996; Mwafy ve ark., 2001). İtme analizinin, elastik analiz ile elde edilemeyen mukavemet ve yer değiştirme talepleri hakkında yapısal yönler ve faydalı bilgiler hakkında bir kavrayış sağladığı yaygın olarak kabul edilmektedir. Bununla birlikte, daha yüksek mod etkileri veya burulma düzensizlikleri olan yapılar için doğru sonuçlar vermemektedir (Krawinkler ve ark., 1998; Papanikolaou ve ark., 2006).

Elastik olmayan davranış, seyrek deprem yüklemesine maruz kalan çoğu yapılarda amaçlandığından, sismik etkiler altındaki yapıların davranışını belirleyebilmek için doğrusal olmayan analizlerin kullanılması gereklidir. Basitliği nedeniyle, yapı mühendisliğinde, FEMA-356 (FEMA-356., 2000), ATC-40 (ATC-40., 1996) ve ASCE 41-17 (ASCE 41-17., 2017)'de açıklanan doğrusal olmayan statik prosedür (NSP) veya itme analizi kullanılmaktadır. İtme analizi doğru bir şekilde yapıldığı zaman, doğrusal statik veya dinamik analiz prosedürleri ile elde edilemeyen faydalı bilgileri sağladığı yaygın olarak kabul edilmektedir.

İtme analizinin uygulanmasında matematik modellemesi önemli adımlardan biridir. Modellemede, yapının / elemanların doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmalıdır. Böyle bir model ile, yapıdaki her bir bileşenin mukavemet ve deformasyon kapasiteleri ile ölçülen doğrusal olmayan özelliklerinin belirlenmesini gerektirir. Bir bileşenin nihai deformasyon kapasitesi, nihai eğrilığe ve plastik mafsallık uzunluğuna bağlıdır.

Doğrusal olmayan analiz, mevcut ve yeni yapıların sismik performans değerlendirmesi için daha popüler bir araç haline gelmiştir. Doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizinin, sismik talep tahminleri ve yapıların performans değerlendirmesi için en doğru yöntem olduğu bilinmesine rağmen, doğrusal olmayan statik analiz, kolaylığı nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır.

ASCE 41-17'de açıklanan doğrusal olmayan statik analiz (NSP) veya itme analizi basitliği nedeniyle yapı sistemlerini analiz etmek için kullanılmaktadır. İtme analizinin uygulanmasında önemli adımlardan biri yapı sistemlerinin modellenmesidir. Modelleme sırasında, yapı elemanlarının doğrusal olmayan davranışı dikkate alınmalıdır.

Modellerde, yapı elemanlarının mukavemet ve deformasyon kapasiteleri ile doğrusal olmayan özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Deformasyon kapasitesini belirlemek için modellerde ideal konsol modeli yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bir elemanın nihai deformasyon kapasitesi, nihai eğriliğe ve plastik mafsallık uzunluğuna bağlıdır. Farklı plastik mafsallık uzunluğu ve farklı eğrilik değerlerinin kullanılması, farklı deformasyon kapasitelerine neden olabilir. Yönetmeliklerde farklı plastik mafsallık uzunluğu ve farklı hasar sınırlarının dönme açıları detaylı bir şekilde verilmiştir (ASCE 41-17, 2017).

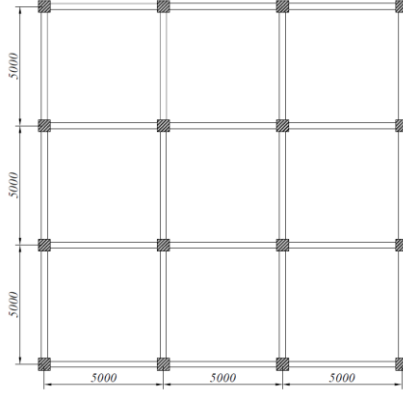
Bu çalışmada, doğrusal olmayan elemanların plastik mafsallık özellikleri kullanılarak itme analizinin sonuçlarının elde edilmesi amaçlanmıştır. 1, 2 ve 3 kata sahip 3 açıklıklı binalar ele alınarak elde edilen sonuçlar karşılaştırarak yorumlanmıştır. Ele alınan binaların iki eksenli simetrik olduğu için burulma düzensizliği bulunmamaktadır. Binalar üç boyutlu olarak SAP2000 (SAP 2000 V20.2) programı ile modellenerek itme analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapı sisteminin bilgi düzeyi, malzeme dayanımları ve elemanların plastik mafsallık özellikleri belirlenmiştir. Elemanların plastik mafsallık özellikleri ve malzeme dayanımları ele alınarak matematiksel modelleme yapılmıştır. Matematiksel modelin analiz sonucunda ASCE 41-17'ye göre kapasite eğrileri hesaplanarak çizilmiştir. Kapasite ve ideal kapasite eğrileri aynı grafikte çizilerek yapı sisteminin performans noktası belirlenmiştir. Farklı tip taşıyıcı sistemlerin kapasite eğrileri ve elde edilen performans noktaları karşılaştırarak yorumlanmıştır.

## **Materyal ve Metot**

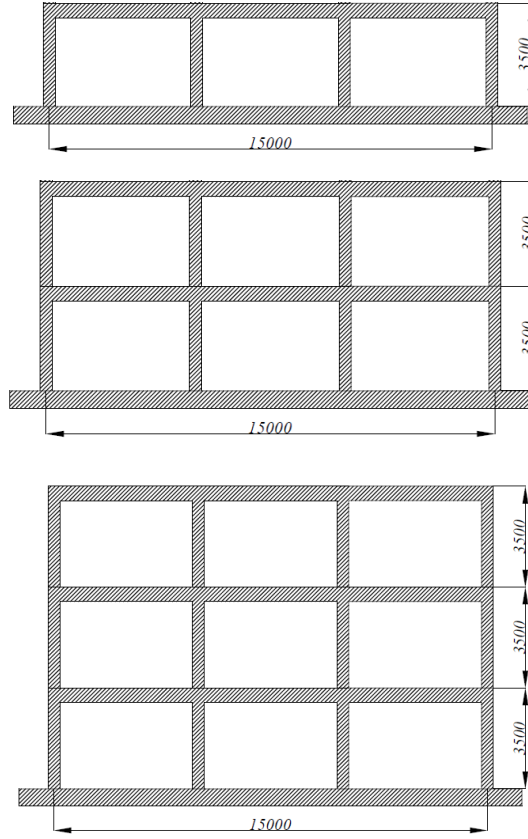
Çalışmada 3 farklı tip mevcut betonarme taşıyıcı sistem tasarlanmıştır. Tasarlanan taşıyıcı sistemlerin genel özellikleri Tablo 1'de, kolonların ve kirişlerin konumlarının daha iyi anlaşılması için tipik kat planı ise Şekil 1'de verilmiştir. Bina taşıyıcı sistemi (BTS) BTS-1, BTS-2 ve BTS-3 olan betonarme binaların düşey kesitleri Şekil 2'de verilmiştir. Betonarme taşıyıcı sistemlerde her iki yönde x ve y eksen aralıklarının mesafesi 5m ve kat yüksekliği 3,5m olacak şekilde sabit tutulmuştur.

**Tablo 1.** Betonarme yapı sistemlerinin genel özellikleri

<b>Bina Tipi</b>	<b>Kat Sayısı</b>	<b>Taşıyıcı Sistem Tipi</b>
BTS-1	1	Çerçevesiz Sistem
BTS-2	2	Çerçevesiz Sistem
BTS-3	3	Çerçevesiz Sistem



Şekil 1. Betonarme taşıyıcı sistemlerin tipik kat planı [ölçüler mm'dir]



Şekil 2. Betonarme taşıyıcı sistemlerin düşey kesitleri [ölçüler mm'dir]

### Malzeme tanımlanması

Betonarme taşıyıcı sistemlerin tasarımında C30 beton ve B420C donatı sınıfı kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerin mekanik özellikleri TS 500'e göre hesaplanmıştır. Hesaplanan beton ve donatı çeliğinin özellikleri sırasıyla Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Kullanılan beton ve donatı çeliğın mekanik özellikleri

Beton Sınıfı	Karakteristik Basınç Dayanımı, $f_{ck}$ (Mpa)	Eşdeğer Küp (150mm) Basınç Dayanımı (Mpa)	Karakteristik Eksenel Çekme Dayanımı $f_{ctk}$ (Mpa)	28 Günlük Elastik Modülü, $E_c$ (Mpa)	
C30	30	37	1,9	32000	
Donatı Sınıfı	Minimum Akma Dayanımı, $f_{yk}$ (Mpa)	Minimum Kopma Dayanımı, $f_{su}$ (Mpa)	$\phi \leq 32$ için Minimum Kopma Uzaması, $\epsilon_{su}$ (%)	$32 < \phi \leq 50$ için Minimum Kopma Uzaması, $\epsilon_{su}$ (%)	Elastik Modülü, $E_s$ (Mpa)
B420C	420	550	8	8	200000

Yapı İstanbul Atatürk havalimanı bölgesinde bulunmaktadır. Hesaplamalarda ASCE 41-17 ve ACI 318-14'e göre tasarlanan betonarme taşıyıcı sistem modellerinde deprem ve zemin parametreleri AFAD web sayfasından (<https://tdth.afad.gov.tr>) parametreleri alınarak Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Hesaplarda kullanılan deprem ve zemin parametreleri

Bina Önem Katsayısı	I=1
Bina Kullanım Sınıfı	BKS=3
Eksantriste Oranı	0,05
Süneklik Düzeyi	Yüksek
Deprem Yer Hareketi Düzeyi	DD2
Deprem Tasarım Sınıfı	DTS=1
Bina Yükseklik Sınıfı	BYS=7
Normal Performans Hedefi	Kontrollü Hasar
Zemin Tipi	ZC
Spektrum Karakteristik Periyotları	Ta= 0,06; Tb= 0,32
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı	$S_s = 1,294$
1,0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı	$S_1 = 0,329$
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı	$SD_s = 1,5528$
1,0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı	$SD_1 = 0,4935$

Çalışmada tüm yapı sistemleri için, normal kat döşemelerine etkiyen kaplama yükü  $2,12 \text{ kN/m}^2$ , çatı katı döşemelerine etkiyen kaplama yükü  $2,5 \text{ kN/m}^2$  ve kirişlere etkiyen duvar yükü de  $4,8 \text{ kN/m}$  alınmıştır. Normal kat döşemelerine etkiyen hareketli yük  $3,5 \text{ kN/m}^2$ , çatı katı döşemelerine etkiyen hareketli yük ise  $1,5 \text{ kN/m}^2$  ve hesaplanan kar yükü ise  $1,05 \text{ kN/m}^2$  alınmıştır.

### **Betonarme kiriş ve kolonların boyutlandırma ve donatılması**

Çalışmada kolonlar  $400 \times 400 \text{ mm}$ , kirişler  $250 \times 500 \text{ mm}$  boyutlarında ve döşemeler  $160 \text{ mm}$  kalınlığında seçilmiştir. Kolonlar ve kirişlerde pas payı  $50 \text{ mm}$ , döşemelerde  $20 \text{ mm}$  olarak seçilmiştir. Yapı sistemlerinin tasarımı TBDY 2018 ve TS 500'e göre ideCAD Statik (ideCAD Statik., 2018) programı ile yapılmıştır. Tasarlanan kolonların ve kirişlerin en-kesit özellikleri sırasıyla Tablo 4, 5, 6 ve 7'de verilmiştir. Kolon ve kirişlerin donatı yerleşim planı sırasıyla Şekil 3 ve 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Betonarme kolonların en-kesit boyutları ve donatılarının miktarı

Bina Tipi	Kolon	Boyut (mm)	Düşey Donatı	Enine Donatı	Boyuna Donatı Oranı
BTS-1, 2 ve 3	Yapılardaki Tüm Kolonlar (C)	400x400	8Φ16	Φ8/80	0,01005

**Tablo 5.** BTS-1 bina tipi betonarme kirişlerin en-kesit boyutları ve donatılarının miktarı

BTS-1 Tipi Bina Kirişleri (250x500mm)					
Kiriş	Katlar		Sol Mesnet	Açıklık	Sağ Mesnet
BZ	Z. Kat	Üst	3Φ16	3Φ16	3Φ16
		Alt	2Φ16	2Φ16	2Φ16

Not: Tüm kat kirişlerinde Φ8/200/90 etriye kullanılmıştır.

**Tablo 6.** BTS-2 bina tipi betonarme kirişlerin en-kesit boyutları ve donatılarının miktarı

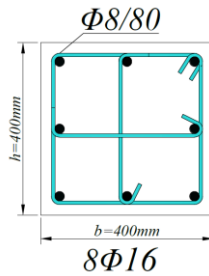
BTS-2 Tipi Bina Kirişleri (250x500mm)					
Kiriş	Katlar		Sol Mesnet	Açıklık	Sağ Mesnet
BZ	Z. Kat	Üst	4Φ16	4Φ16	4Φ16
		Alt	3Φ16	3Φ16	3Φ16
B1	1. Kat	Üst	3Φ16	3Φ16	3Φ16
		Alt	2Φ16	2Φ16	2Φ16

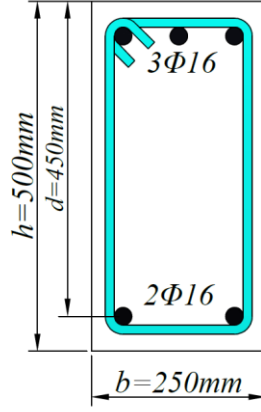
Not: Tüm kat kirişlerinde Φ8/200/90 etriye kullanılmıştır.

**Tablo 7.** BTS-3 bina tipi betonarme kirişlerin en-kesit boyutları ve donatılarının miktarı

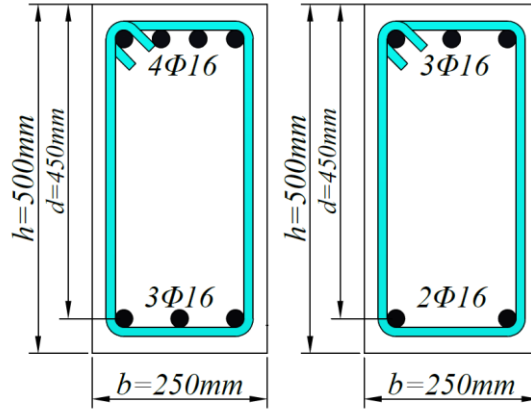
BTS-3 Tipi Bina Kirişleri (250x500mm)					
Kiriş	Katlar		Sol Mesnet	Açıklık	Sağ Mesnet
BZ	Zemin Kat	Üst	5Φ16	5Φ16	5Φ16
		Alt	3Φ16	3Φ16	3Φ16
B1	1. Kat	Üst	4Φ16	4Φ16	4Φ16
		Alt	3Φ16	3Φ16	3Φ16
B2	2. Kat	Üst	3Φ16	3Φ16	3Φ16
		Alt	2Φ16	2Φ16	2Φ16

Not: Tüm kat kirişlerinde Φ8/200/90 etriye kullanılmıştır.

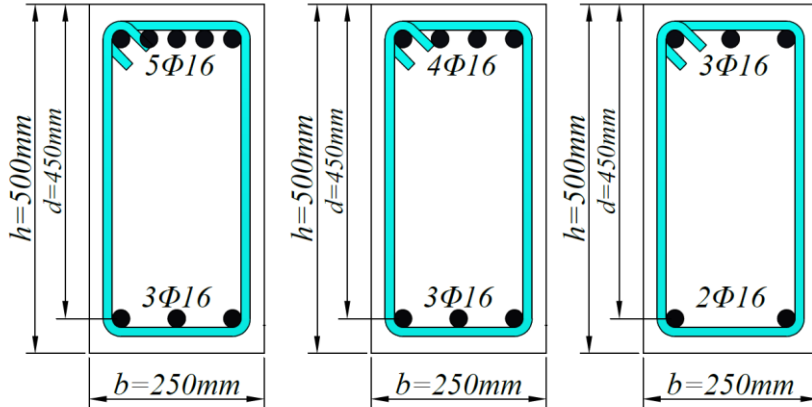
**Şekil 3.** Betonarme taşıyıcı sistemlerinin kolonların en-kesit boyutları ve donatı yerleşim planı



a. BTS-1 betonarme taşıyıcı sistemi kirişlerinin en-kesit boyutları ve donatı yerleşim planı



b. BTS-2 betonarme taşıyıcı sistemi kirişlerinin en-kesit boyutları ve donatı yerleşim planı



c. BTS-3 betonarme taşıyıcı sistemi kirişlerinin en-kesit boyutları ve donatı yerleşim planı

**Şekil 4.** Betonarme kirişlerin en-kesit boyutları ve donatı yerleşim planı

Betonarme taşıyıcı sistemlerin matematik modelinin tanımlanmasında tüm yapı sistemleri için kolonların temele ankastre olarak bağlandığı ve döşemelerin kendi düzlemleri içinde sonsuz rijit olduğu varsayılmıştır. Betonarme taşıyıcı sistemleri düzenli ve simetrik olduğu için kütleler kat ağırlık merkezlerinde toplanarak yatay etkiler ek dış merkezlik olmaksızın dikkate alınmıştır.

### Betonarme kiriş ve kolonların etkin rijitlik çarpanlarının belirlenmesi

Doğrusal olmayan statik analizlerin yapılabilmesi için kolonlar ve kirişler için ASCE 41-17’de verilen etkin eğilme rijitlik çarpanlarının belirlenmesi gerekmektedir. Eğilme etkisi altındaki betonarme elemanların eğilme rijitlikleri çatlamış kesite ait eğilme rijitliklerine dönüştürülmüş olur. ASCE 41-17’de kirişlerin ve kolonların etkin rijitlik çarpanlarını elde etmek için iki eksenel yük sınırı Tablo 8’de verilmiştir. ASCE 41-17’de düşey yük hesabında  $W=G+nQ+S$  alınmaktadır. Denklemden; G zati yükün, Q hareketli yüklerin ve S etkilenen kar yükünün miktarıdır.

**Tablo 8.** Kolonlar ve kirişlerin etkin eğilme rijitlikleri çarpanları

Betonarme taşıyıcı sistem elemanı	ASCE 41-17’e göre	
	Etkin kesit rijitliği çarpanı ( $k_e$ )	
Çubuk elemanlarda	Eğilme	Kesme
Öngerilmemiş kirişler	0,3	0,4
Kolonlar için $N_D/(A_c f_{cm}) \geq 0,5$	0,7	0,4
Kolonlar için $N_D/(A_c f_{cm}) \leq 0,1$	0,3	0,4

Tablo 8’de  $N_D$  ve  $k_e$  sırasıyla kolonların tasarım eksenel yükü ve çatlamış kesitin etkin rijitlik çarpanıdır.  $N_D$ , deprem hesabında esas alınan toplam kütlelerle uyumlu yüklerin göz önüne alındığı ve çatlamamış kesitlere ait (EI)<sub>o</sub> eğilme rijitliklerinin kullanıldığı bir ön düşey yük hesabı ile belirlenir. Deprem hesabı için başlangıç durumunu oluşturan düşey yük hesabı ise, yukarıda belirtildiği şekilde elde edilen etkin eğilme rijitliği (EI)<sub>e</sub> kullanılarak, deprem hesabında esas alınan kütlelerle uyumlu yüklere göre yeniden yapılır. Deprem hesabında da aynı rijitlikler kullanılır.

Eğer kolonlara uygulanan eksenel yük miktarı ( $N_D$ ) iki sınır değerlerin arasında ise, etkin eğilme rijitliği çarpanı doğrusal enterpolasyon ile elde edilmektedir. Tablo 8’e göre kolonlarda hesaplanan eksenel yük miktarı  $N_D/(A_c f_{cm}) \leq 0,1$  olduğu durumlarda kolonların etkin eğilme rijitlikleri çarpanı 0,3 alınmıştır.

Betonarme kirişlerin etkin rijitlik çarpanları ASCE 41-17’ye göre 0,30 olarak sabit verilmiştir. Betonarme kolonların etkin eğilme rijitliklerinin çarpanları ASCE 41-17’ye göre Tablo 9’da verilmiştir.

**Tablo 9.** Betonarme kolonların etkin eğilme rijitliklerinin çarpanları

Kolonlar	BTS-1		BTS-2		BTS-3	
	$N_d / A_c f_{cm}$	$k_e$	$N_d / A_c f_{cm}$	$k_e$	$N_d / A_c f_{cm}$	$k_e$
Z. Kat	0,041	0,30	0,097	0,30	0,164	0,36
1. Kat			0,041	0,30	0,097	0,30
2. Kat					0,041	0,30

Betonarme kolon ve kirişlerde Tablo 8 ve 9’de verilen etkin eğilme rijitliklerinin çarpanları yapı hesap modellerine uygulanmış ve modal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen modal analiz sonucunda yapı sistemlerinin birinci titreşim modlarına ait etkin kütlelerin toplam bina kütlelerine oranları Tablo 10’da verilmiştir.



**Tablo 10.** Betonarme taşıyıcı sistemlerin x doğrultusundaki birinci titreşim modlarına ait etkin kütle oranları ve periyotları

Bina Tipi	Mod No	Periyot (sn)	Etkin Kütle Oranları		
			UX	UY	RZ
BTS-1	1	0,30596	0,91840	0	0
BTS-2	1	0,56469	0,85443	0	0
BTS-3	1	0,81578	0,80197	0	0

Betonarme taşıyıcı sistemleri rijitlik ve kütle bakımından planda simetrik olduğu için, x ve y doğrultularındaki hâkim modların özellikleri aynıdır. Bu nedenle sadece x doğrultusunda tek yönde artımsal itme analizi yapılmıştır. Binanın hâkim mod şekillerine ve kat ağırlıklarına bağlı olarak doğrusal olmayan statik analizde kullanılacak eşdeğer deprem yükü dağılımları Tablo 11, 12 ve 13'te verilmiştir.

**Tablo 11.** BTS-1 Betonarme taşıyıcı sistemi için eşdeğer deprem yükü dağılımı

Kat	Kat Ağırlığı (kN)	X Doğrultusunda Hâkim Mod Şekli Genlikleri (m)	Ağırlık x Genlik	Eşdeğer Deprem Yükü Dağılımı
Z	1920,9	0,0706	135,6	1,0000

**Tablo 12.** BTS-2 Betonarme taşıyıcı sistemi için eşdeğer deprem yükü dağılımı

Kat	Kat Ağırlığı (kN)	X Doğrultusunda Hâkim Mod Şekli Genlikleri (m)	Ağırlık x Genlik	Eşdeğer Deprem Yükü Dağılımı
Z	2748,9	0,0336	92,4	0,8436
1	1920,9	0,0570	109,5	1,0000

**Tablo 13.** BTS-3 Betonarme taşıyıcı sistemi için eşdeğer deprem yükü dağılımı

Kat	Kat Ağırlığı (kN)	X Doğrultusunda Hâkim Mod Şekli Genlikleri (m)	Ağırlık x Genlik	Eşdeğer Deprem Yükü Dağılımı
Z	2748,9	0,0178	48,9	0,5318
1	2748,9	0,0379	104,2	1,1323
2	1920,9	0,0479	92,0	1,0000

### **Kolonların ve kirişlerin ASCE 41-17'ye göre plastik mafsallık özelliklerinin belirlenmesi**

Doğrusal olmayan statik analizde, tasarlanan 3 açıklıklı 1, 2 ve 3 katlı betonarme çerçevesel taşıyıcı sistemlerin kolonların ve kirişlerin plastik mafsallık özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kolonların ve kirişlerin plastik mafsallık özelliklerinin hesaplanmasında SAP2000 programından yararlanarak plastik mafsallık özellikleri hesaplanmıştır. Analizlerde SAP2000 programında kullanılan beton için sargılı ve sargısız beton malzeme modelleri ve donatı çeliği malzeme modeli

tanımlanmıştır. Beton malzeme modeli için Mander sargılı ve sargısız beton modeli, donatı çeliği malzeme modeli için ise Park modeli kullanılmıştır.

Betonarme kirişlerin ve kolonların plastik mafsalsız özellikleri ASCE 41-17'de Tablo 14 ve 15'te verilmiştir. Plastik mafsalsız özellikleri Tablo 14 ve 15'e göre hesaplanarak SAP 2000 programına tanımlanmıştır.

**Tablo 14.** Doğrusal olmayan analizler için modelleme ve kabul kriterleri- betonarme kolonlar (ASCE 41-17, 2017)

Modelleme değişkenleri	Kabul edilmiş kriterler		
	Plastik dönme açısı (Rad)		
	Performans seviyesi		
Plastik Dönme Açıları, a ve b (Rad). Artık dayanım oranı, c	IO	LS	CP
Net yükseklik boyunca yetersiz gelişme veya birleştirme ile kontrol edilmeyen kolonlar <sup>a</sup>			
$a = \left( 0,042 - 0,043 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{CE}} + 0,63 \rho_t - 0,023 \frac{V_{YE}}{V_{COIOE}} \right) \geq 0,0$ $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{CE}} \leq 0,5 \text{ için } b = \frac{0,5}{5 + \frac{N_{UD}}{0,8 A_g f'_{CE}} \rho_t f_{yIE}} - 0,01 \geq a^a$ $c = 0,24 - 0,4 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{CE}} \geq 0,0$	0,15a ≤ 0,005	0,5bb	0,7bb
Net yükseklik boyunca yetersiz gelişme veya birleştirme ile kontrol edilen kolonlar <sup>c</sup>			
$a = \left( \frac{1}{8} \frac{\rho_t \cdot f_{yIE}}{\rho_t \cdot f_{yIE}} \right) \geq 0,0$ $\left( \frac{1}{8} \frac{\rho_t \cdot f_{yIE}}{\rho_t \cdot f_{yIE}} \right) \leq 0,025^d$ $b = \left( 0,012 - 0,085 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{CE}} + 12 \rho_t^e \right) \geq 0,0$ $\left( 0,012 - 0,085 \frac{N_{UD}}{A_g f'_{CE}} + 12 \rho_t^e \right) \leq 0,06$ $c = 0,15 + 36 \rho_t \leq 0,4$	0,0	0,5b	0,7b

**Not:**  $\rho_t$ , çekirdeğe yeterince sabitlenmediğinde hiçbir durumda 0,0175'ten fazla veya 0,0075'ten küçük alınmamalıdır. Tablodaki denklemler  $\rho_t$  değeri 0,0005'ten küçük olan kolonlar için geçerli değildir.  
 $V_{YE} / V_{COIOE}$ , 0,2'den az alınmamalıdır.  
 $N_{UD}$ , Denklemde (7-34)'te. Açıklandığı gibi yanal kuvvetlerin etkilerini açıklayan maksimum basınç eksenel yük hesabı olacaktır. Alternatif olarak,  $N_{UD}$ 'un bir limit-durum analizine dayanarak değerlendirilmesine izin verilecektir.  
a) b,  $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{CE}} > 0,5$  için  $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{CE}} = 0,5$  değerinden  $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{CE}} = 0,7$  değerinde lineer olarak azaltılacaktır, ancak a'dan küçük olmamalıdır  
b)  $\frac{N_{UD}}{A_g f'_{CE}} > 0,1$ 'den küçük alınmamalıdır.  
c) Kolonların, ekteki hesaplanan çelik stresinin Denklem (10-1a) veya (10-1b) tarafından belirtilen çelik stresi aştığı yetersiz gelişme veya ek yerleri ile kontrol edildiği düşünülmektedir. Yetersiz gelişme veya birleştirme ile kontrol edilen kolonlar için modelleme parametresi, yetersiz gelişme veya birleştirme ile kontrol edilmeyen sütünların parametrelerini asla aşmayacaktır.  
d) a Yeterli gelişme veya birleştirme ile kontrol edilen kolonlar için, birleşme bölgesinde sıfır alınacak, uzunluğu boyunca en az iki bağ grubu tarafından geçilmeyecektir.  
e)  $\rho_t$ , 0,0075'ten daha fazla alınmaz.

**Tablo 15.** Doğrusal olmayan analizler için modelleme ve kabul kriterleri- betonarme kirişler (ASCE 41-17, 2017)

Durum	Modelleme değişkenleri			Kabul edilmiş kriterler				
	Plastik Dönme Açıları (Rad)		Artık dayanım oranı	Plastik dönme açısı (Rad)				
	Performans seviyesi							
Durum 1: Eğilme davranışı kontrolündeki kirişler <sup>b</sup>								
$\frac{(\rho - \rho')}{\rho}$	Enine donatı	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f'_{CE}}}$	a	b	c	IO	LS	CP
≤ 0,0	C	≤ 3 (0,25)	0,025	0,050	0,2	0,0100	0,025	0,050
≤ 0,0	C	≥ 6 (0,5)	0,020	0,040	0,2	0,0050	0,020	0,040
≥ 0,5	C	≤ 3 (0,25)	0,020	0,030	0,2	0,0050	0,020	0,030
≥ 0,5	C	≥ 6 (0,5)	0,015	0,020	0,2	0,0050	0,015	0,020
≤ 0,0	NC	≤ 3 (0,25)	0,020	0,030	0,2	0,0050	0,020	0,030
≤ 0,0	NC	≥ 6 (0,5)	0,010	0,015	0,2	0,0015	0,010	0,015
≥ 0,5	NC	≤ 3 (0,25)	0,010	0,015	0,2	0,0050	0,010	0,015
≥ 0,5	NC	≥ 6 (0,5)	0,005	0,010	0,2	0,0015	0,005	0,010
Durum 2: kesme davranışı kontrolündeki kirişler <sup>b</sup>								
Etriye Aralığı ≤ d/2			0,003	0,020	0,2	0,0015	0,010	0,020
Etriye Aralığı ≥ d/2			0,003	0,010	0,2	0,0015	0,005	0,010
Durum 3: Açıklık boyunca yetersiz donatı ve bindirme boyu kontrolündeki kirişler <sup>b</sup>								
Etriye Aralığı ≤ d/2			0,003	0,020	0,0	0,0015	0,010	0,020
Etriye Aralığı ≥ d/2			0,003	0,010	0,0	0,0015	0,005	0,010
Durum 4: Kolon kiriş birleşim bölgesine yeterli derecede saplanmamış kirişler <sup>b</sup>								
			0,015	0,03	0,2	0,0100	0,020	0,030

**Not:**  $f'_{cE}$  in lb/in<sup>2</sup> ve (MPa) olarak verilmiştir.

a Tabloda listelenenler arasındaki değerler doğrusal enterpolasyon ile belirlenir.

b Durum i,ii,iii,iv'ten birden fazla halin sağlanması durumunda, minimum şartı sağlayacak değerler kullanılır.

c Sırasıyla "C" ve "NC", uygun ve uygun olmayan enine donatıların kısaltmalarıdır. Enine donatının uygun olması için plastik mafsal bölgesinde, etriye aralığı d/3 ten küçük olmalı, orta ve yüksek süneklik talebine sahip elemanlar için, kesme donatıları tasarım kesme kuvvetlerinin ¾'ünü taşımalıdır. Aksi halde enine donatıların uygun olmadığı kabul edilir.

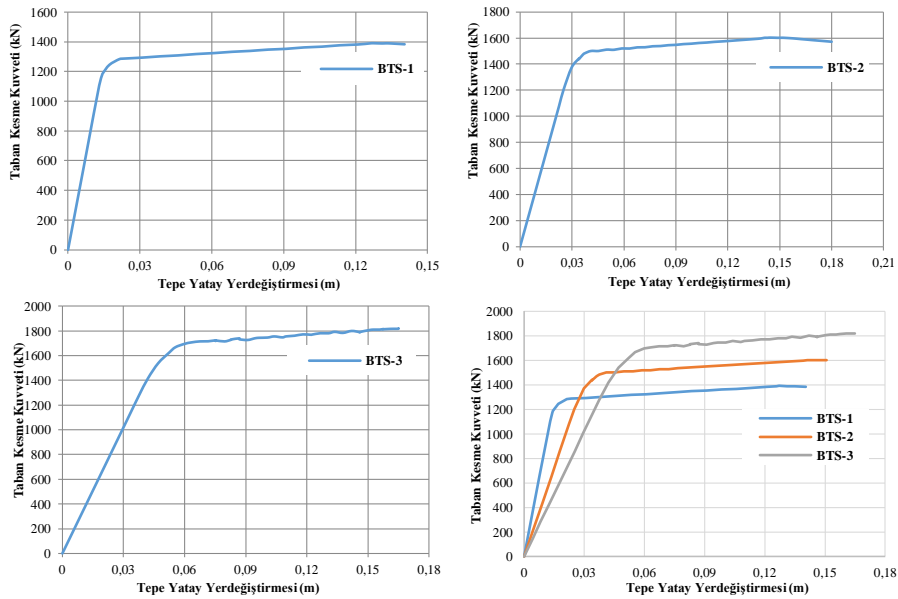
d V, NSP veya NDP'nin tasarım kesme kuvvetidir.

## Bulgular ve Tartışma

Betonarme taşıyıcı sistemlerin basitleştirilmiş doğrusal olmayan statik analizinin yapılabilmesi için, etkin en-kesit rijitlikleri, eşdeğer deprem yükü dağılımları ve plastik mafsal özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının etkin en-kesit rijitlik çarpanları, eşdeğer deprem yükü dağılımları için yukarıda verilen veriler ele alınmıştır. Plastik mafsal özellikleri SAP2000 programında varsayılan (default) olarak analizlerde ele alınmıştır. Elde edilen veriler kullanılarak betonarme taşıyıcı sistemlerin itme analizi SAP 2000 programı ile gerçekleştirilerek analiz sonuçları elde edilmiştir.

### Betonarme taşıyıcı sistemlerin basitleştirilmiş doğrusal olmayan statik analizi sonucunda kapasite eğrilerinin elde edilmesi

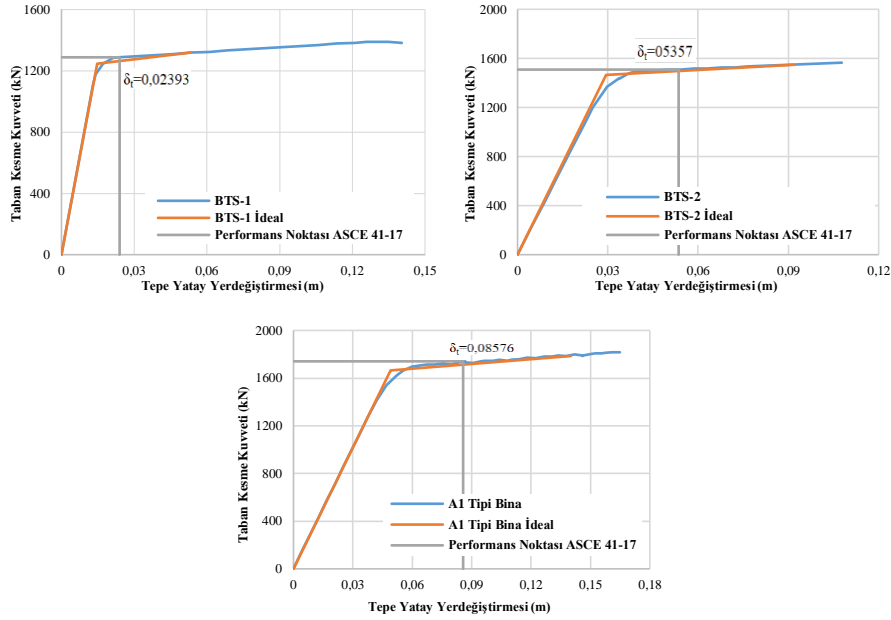
Betonarme taşıyıcı sistemlerin basitleştirilmiş doğrusal olmayan statik analizleri yapılarak taban kesme kuvveti-tepe yerdeğiştirme grafiği (kapasite eğrileri) elde edilmiştir. BTS-1, BTS-2 ve BTS-3 tip taşıyıcı sistem modellerinin basitleştirilmiş doğrusal olmayan statik analizleri SAP 2000 programı ile gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda 3 tip binanın, itme grafiği (tepe yerdeğiştirmesi-taban kesme kuvveti) grafikleri elde edilmiştir. Betonarme taşıyıcı sistemlerin kapasite eğrileri ve karşılaştırma grafiği Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. BTS-1, BTS-2 ve BTS-3 taşıyıcı sistem modeli için kapasite eğrisi ve karşılaştırma grafiği

## Betonarme taşıyıcı sistemlerin performans noktalarının belirlenmesi

Betonarme taşıyıcı sistemlerin taban kesme kuvveti (kN) - tepe yer değiştirmesi (m) (kapasite eğrileri) Şekil 5’de verilmiştir. Betonarme taşıyıcı sistemlerin performans noktalarının belirlenmesi için, taşıyıcı sistemlerin taban kesme kuvveti (kN)- tepe yer değiştirmesi (m) olan kapasite eğrilerinin üzerinde ASCE 41-17’ye göre performans noktasının belirlenmesi gerekmektedir. Bu durumda ASCE 41-17’ye göre hesaplanan tepe yatay yerdeğiştirmesi ( $\delta_t$ ) hesaplanarak ona karşı gelen taban kesme kuvveti bulunmuştur. Betonarme taşıyıcı sistemlerin performans noktaları Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. BTS-1, BTS-2ve BTS-3 betonarme taşıyıcı sistemlerinin performans noktaları

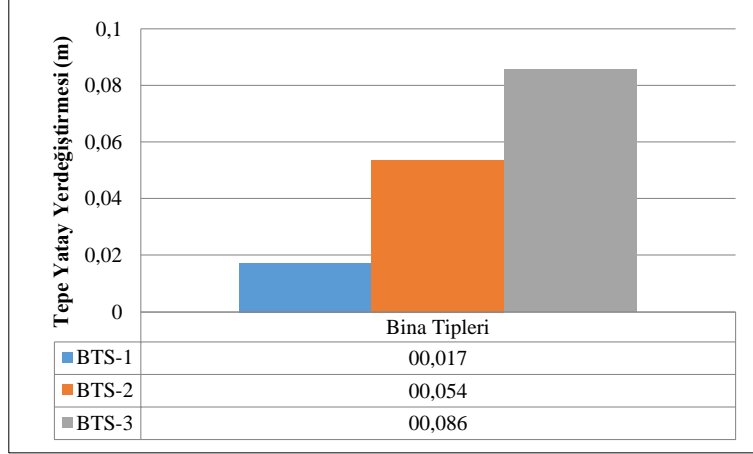
Tablo 16. BTS-1, 2 ve 3 taşıyıcı sistemi için tepe yer değiştirmesi istemleri  $\delta_t$ ve gereken katsayıları

Parametreler	Bina Tipi	Bina Tipi	Bina Tipi	Birimler
	BTS-1 Tipi Bina	BTS-2 Tipi Bina	BTS-3 Tipi Bina	
$C_0$	1,00000	1,20000	1,30000	-
$C_1$	0,99230	0,99750	0,99720	-
$C_2$	1,00005	1,00002	1,00000	-
$S_a$	1,07530	0,58261	0,40329	m/s <sup>2</sup>
$T_e$	0,30042	0,55590	0,81247	s
$\delta_t$	0,02393	0,05357	0,08576	m

## Araştırma Sonuçları ve Tartışma

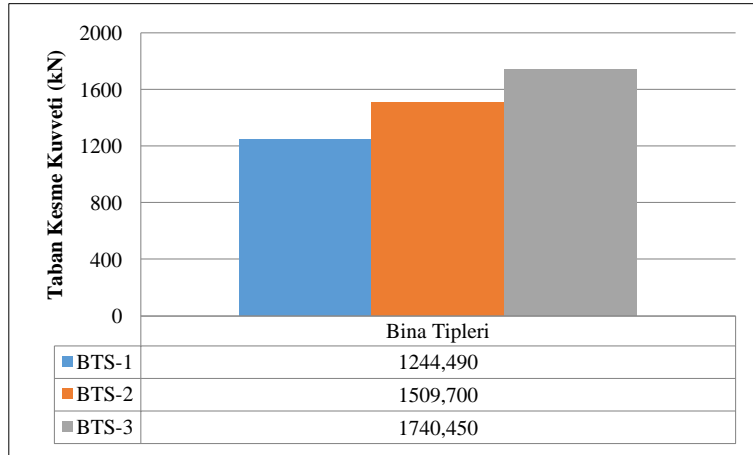
Betonarme taşıyıcı sistemlerin elde edilen  $\delta_t$  tepe yer değiştirmesi istemi büyüklükleri yapı sistemlerinin performans noktası olarak tanımlanmaktadır. Yapı sistemlerinin performans değerlendirmesi bu tepe yer değiştirmesine göre yapılmaktadır. SAP 2000 programı ile gerçekleştirilen artırsal itme analizlerinin sonucunda, BTS-1 tipi binada 11. BTS-2 tipi binada 11. ve BTS-3 tipi binada 28. hesap adımı yapı sistemlerinin performans değerlendirilmelerinin yapılacağı hesap adımları olarak belirlenmiştir. Betonarme taşıyıcı sistemlerin performans değerlendirilmelerinin yapılacağı

adımlardaki istemler (tepe yer değiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri, kat kesme kuvvetleri ve görel kat ötelemeleri) sırasıyla aşağıda verilmiştir. Betonarme taşıyıcı sistemlerin performans noktalarında elde edilen tepe yer değiştirmesi istemleri Şekil 7’de karşılaştırma olarak verilmiştir.



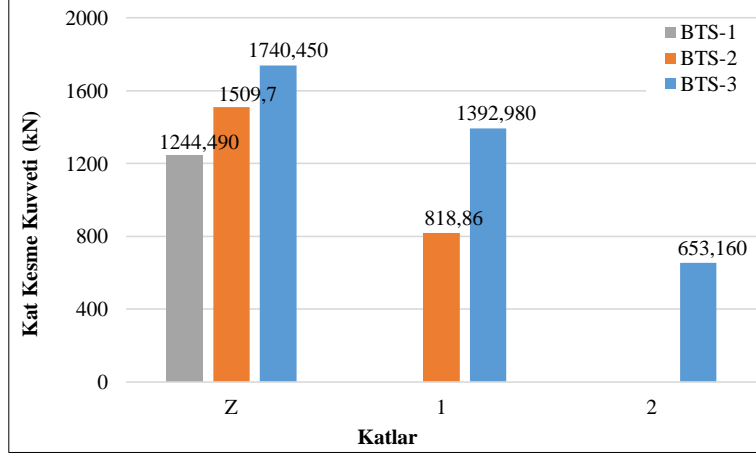
**Şekil 7.** Betonarme taşıyıcı sistemlerinin performans noktalarındaki tepe yer değiştirmesi istemlerinin karşılaştırma grafiği

Betonarme taşıyıcı sistemler için performans noktalarında elde edilen taban kesme kuvveti istemlerinin grafiği karşılaştırma olarak Şekil 8’de verilmiştir.



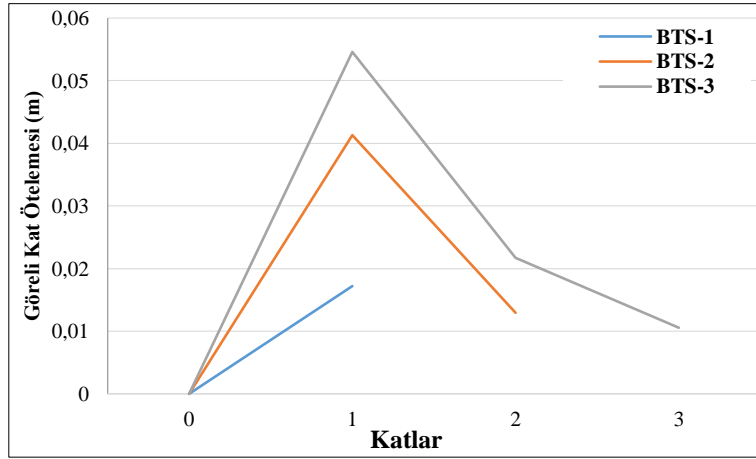
**Şekil 8.** Betonarme taşıyıcı sistemlerinin performans noktalarındaki taban kesme kuvveti istemlerinin karşılaştırma grafiği

Betonarme yapı sistemleri için performans noktalarında elde edilen kat kesme kuvveti istemlerinin karşılaştırma grafiği Şekil 9’da verilmiştir.



**Şekil 9.** Betonarme taşıyıcı sistemlerin performans noktalarındaki kat kesme kuvveti istemlerinin karşılaştırma grafiği

Betonarme taşıyıcı sistemler için performans noktalarında elde edilen görelî kat ötelemesi istemlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 10’da verilmiştir.



**Şekil 10.** Betonarme taşıyıcı sistemlerinin performans noktalarındaki görelî kat ötelemesi istemlerinin karşılaştırmalı grafiği

## Sonuçlar

Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlardan; deprem analizinde ASCE 41-17’ye göre tanımlanan çatlamış kesit rijitlik oranları ve kat sayısına göre sonuçlar değişmektedir. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda sunulmuştur.

- Betonarme taşıyıcı sistemlerin x doğrultusundaki birinci titreşim modlarına ait periyotları kat sayısı arttığı zaman artmaktadır.
- Betonarme taşıyıcı sistemlerin x doğrultusundaki birinci titreşim modlarının etkin kütle oranları kat sayısı arttığı zaman azalmaktadır.
- Betonarme taşıyıcı sistemlerde x doğrultusunda hâkim mod şekli genlikleri ve eşdeğer deprem yükü dağılımının miktarı kat sayısı arttığı zaman azalmaktadır. Birinci (hâkim mod) şekli

genlikleri ve eşdeğer deprem yükü dağılımının miktarı etkilenen düşey yüklerin miktarına bağlıdır.

- Şekil 7’de belirtilen tepe yer değiştirmelerinin karşılaştırılmasına bakıldığı zaman kat sayısı yükseldikçe tepe yer değiştirme miktarı artmaktadır.
- Şekil 8’de açıklanan betonarme yapı sistemlerinin taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırma grafiğine göre, kat sayısı yükseldikçe taban kesme kuvvetinin miktarı artmaktadır. Fakat kat sayısı yükseldikçe taban kesme kuvvetinin artması bazında yüzdelik artış daha fazladır.
- Üç farklı tip betonarme taşıyıcı sistem için kat kesme kuvvetleri karşılaştırıldığında kat sayısı yükseldikçe kat kesme kuvvetinin miktarı da artmaktadır. Kat sayısı yükseldiği zaman kat kesme kuvvetinin artması bazında yüzdelik artış miktarı artmaktadır. Bu durumda kat kesme kuvveti kat sayısı ve düşey yük miktarına bağlıdır.
- Şekil 10’da verilen üç farklı yapı sistemi için görelî kat ötelemeleri karşılaştırıldığında, kat sayısı yükseldikçe görelî kat ötelemesi miktarı artmaktadır. Kat sayısı yükseldikçe görelî kat ötelemesinin artması bazında yüzdelik artış miktarı azalmaktadır.

Betonarme taşıyıcı sistemlerde kolonların eğilme rijitlik çarpanları ASCE 41-17’ye göre hesaplanmıştır. Hesaplanan kolonların eğilme rijitlikleri çarpanları düşey yüklere bağlıdır. Bu nedenle kat sayısı artıkça kolonların etkin eğilme rijitlik çarpanları artırılmaktadır.

### **Çıkar Çatışması Beyanı**

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

### **Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti**

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

### **Kaynakça**

Applied Technology Council, ATC-40. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, vols. 1 and 2. California; 1996.

ASCE 41-17. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2017.

Federal Emergency Management Agency, FEMA-356. Prestandard and commentary for seismic rehabilitation of buildings. Washington (DC); 2000.

ideCAD Statik IDS v10.05. Yapı Analiz Programı, ideYAPI Bilgisayar Destekli Tasarım Mühendislik Danışmanlık Taahhüt A.Ş., İstanbul, 2018.

Krawinkler H. Pushover analysis: why how when, and when not to use it. In: Proceedings of 1996 convention, structural engineer’s association of California, 1996; p. 17–36, Maui, Hawaii.

Krawinkler H., Seneviratna GDPK. Pros and cons of a pushover analysis for seismic performance evaluation. Eng Struct 1998; 20(4): 452-464.

- Mwafy A., Elnashai A. Static pushover versus dynamic collapse analysis of RC buildings. *Eng Struct* 2001; 23(5): 407-424.
- Papanikolaou VK., Elnashai AS., Pareja JF. Evaluation of conventional and adaptive pushover analysis II: comparative results. *J Earthq Eng* 2006; 10(1): 127-151.
- Priestley MJN. Myths and fallacies in earthquake engineering-conflicts between design and reality. *Bull N Z Natl Soc Earthq Eng* 1993; 26(3): 329-341.
- SAP2000. Structural software for analysis and design, Computers and Structures, Inc. Version 20.0.0. USA.