



Makale / Research Paper

**TBDY 2018 ve ASCE 41-17 Yönetmeliklerine Göre
Çerçevesel Bir Yapının Performans Analizlerinin Karşılaştırılması**

Rohullah JAMAL^{1a*}, S. Bahadır YÜKSEL^{1b}

¹Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü,
Konya/TÜRKİYE
jamal.rohullah@gmail.com

Received/Geliş: 09.10.2020

Accepted/Kabul: 20.01.2021

Öz: Doğrusal olmayan statik prosedür (NSP) veya itme analizi basitliği nedeniyle, yapısal ve yapısal olmayan elemanların performanslarının hesaplanması için kullanılmaktadır. Modelleme yapılırken yapıdaki her bir elemanın doğrusal olmayan özelliklerinin ve deformasyon kapasitelerinin belirlenmesi gerekmektedir. İtme analizi, TBDY 2018 ve ASCE 41-17 yönetmeliklerine göre, kullanıcı tanımlı doğrusal olmayan plastik mafsallık özellikleri veya varsayılan mafsallık özellikleri için gerçekleştirilir. Varsayılan mafsallık özelliklerinin yanlış kullanılması, mevcut yapılar için hatalı yer değiştirme kapasitelerine yol açabilmektedir. Bu çalışmada, ASCE 41-17'e ve TBDY 2018'e tek açıklıklı bir yapının performans analizi yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Parametrik çalışma için yapının kat sayıları değiştirilmiştir. Yapı sistemleri üzerinde gerçekleştirilen analizler sonucunda kapasite eğrileri elde edilmiştir. ASCE 41-17'ye göre hesaplanan tepe yer değiştirme miktarı TBDY 2018'e göre hesaplanan tepe yer değiştirme miktarından daha fazla elde edilmiştir. TBDY 2018'e göre hesaplanan taban kesme kuvveti ve kat kesme kuvvetleri ASCE 41-17'ye göre daha fazla elde edilmiştir. TBDY 2018 ve ASCE 41-17'ye göre elde edilen analizler sonucunda yapının performansının, yapıya etkiyen düşey yük miktarına, elemanların etkili rijitliğine ve plastik mafsallık özelliklerine bağlı olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İtme analizi; Plastik mafsallık; Kapasite eğrisi; Tepe yer değiştirme; Taban kesme kuvveti.

**Comparison of Performance Analysis of a Moment Resisting Framed
Structure According to TBDY 2018 and ASCE 41-17**

Abstract: Due to its simplicity, nonlinear static procedure (NSP) or pushover analysis has been using for the determination of the nonlinear performance of structural and non-structural members. While modeling the determination of the nonlinear properties and deformation capacities for each component of the structure should be determined. Pushover analysis is carried out for either user-defined nonlinear hinge properties or default-hinge properties, available in some programs based on the TBDY 2018 and ASCE 41-17 standards. Assigning the incorrect default-hinge properties may lead to unreasonable displacement capacities for existing structures. In this study the performance analysis of a single span structure was performed according to TBDY 2018 and ASCE 41-17 codes and the results were compared. Number of stories of the structures were changed for the parametric study. Capacity curves have been obtained as a result of the analysis performed on the building systems. The peak displacement amount calculated according to ASCE 41-17 was obtained more than the peak displacement amount calculated according to TBDY 2018. The amount of base shear force and story shear forces calculated according to TBDY 2018 has been obtained more than ASCE 41-17. The most effective parameters for the plastic hinge properties are plastic hinge length and transverse reinforcement spacing. The results of analyses obtained from the TBDY 2018 and ASCE 41-17 codes show that the structural performance depends on the number of vertical loads, effective stiffness of the structural members and plastic hinge properties.

Keywords: Pushover analysis; Plastic hinge; Capacity curves; Peak displacement; Base shear force.

Bu makaleye atıf yapmak için

Jamal, R., Yüksel, S.B., "TBDY 2018 ve ASCE 41-17'e Göre Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemleri İle Yapı Sistemlerinin Performans Analizinin Elde Edilmesi ve Karşılaştırılması" El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi 2021, 8(1); 432-444.

How to cite this article

Jamal, R., Yüksel, S.B., "Obtaining and Comparison of Nonlinear Calculation Methods and Performance Analysis of Structural Systems According to TBDY 2018 and ASCE 41-17" El-Cezeri Journal of Science and Engineering, 2021, 8(1); 432-444.

ORCID ID: ^a0000-0001-5987-8502, ^b0000-0002-4175-1156

1. Giriş

Sık deprem yüklemesine maruz kalan, sismik etkiler altındaki yapıların davranışını anlayabilmek için doğrusal olmayan analizlerin kullanılması gerekmektedir. Bu metotlar mevcut yapı sistemlerinin performanslarının belirlenmesi amacıyla kullanılmasının yanı sıra yeni yapılacak yapı sistemlerinin tasarımının yeterli düzeyde olup olmadığını belirlemek amacıyla da kullanılmaktadır. Hem mevcut yapı sistemleri için hem de yeni yapılacak yapı sistemleri için belirlenen iç kuvvet ve şekil değiştirme istemleri yönetmelikte verilen sınır değerler ile karşılaştırılarak performans değerlendirmesi yapılır.

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 araştırmak için doğrusal olmayan analizlerin kullanılması önemlidir [1].

Doğrusal olmayan analiz, mevcut ve yeni yapıların sismik performans değerlendirmesi için daha popüler bir araç haline gelmektedir. 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.

Ayrıca, doğrusal olmayan statik yöntemler, yapıların gerçek davranışını daha iyi temsil etmektedir. Doğrusal olmayan statik yöntemler belirli yer hareketi kayıtları altında olan yapıların analizleri yansıtmak için doğal olarak yetersiz kalmaktadır [2]. Bir diğer önemli nokta da, doğrusal olmayan statik analizden gözlemlenen hasar modelinin, bazı durumlarda doğrusal olmayan dinamik analize kıyasla önemli ölçüde farklı olabileceğidir [3]. Bunları aşmak için farklı doğrusal olmayan statik analiz prosedürleri geliştirilmiştir [4–6].

Doğrusal olmayan statik ve dinamik analizlerle ilgili birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalar, itme analizinin yeterliliğini ve yetersizliğini, doğrusal olmayan dinamik veya doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizinin karmaşıklığını değerlendirmiştir [7-11].

TBDY 2018 ve 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 olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bir elemanın nihai deformasyon kapasitesi, nihai eğriliğe ve plastik mafsalları uzunluğuna bağlıdır. Farklı plastik mafsalları uzunluğu ve farklı eğrilik değerlerinin kullanılması, farklı deformasyon kapasitelerine neden olabilir. Yönetmeliklerde farklı plastik mafsalları uzunluğu ve farklı hasar sınırlarının dönme açıları detaylı bir şekilde verilmiştir [12, 13].

Bu çalışma, yönetmeliklerde tanımlanmış doğrusal olmayan elemanların plastik mafsalları özelliklerini kullanarak itme analizinin sonuçlarındaki olası farklılıkları incelemeyi ve karşılaştırmayı amaçlamıştır. Farklı mafsalları özelliklerine sahip 3 açıklıklı 3 katlı bina ele alınarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Ele alınan binanın iki eksenli simetrik olduğu için burulma etkisi olmamaktadır. Bina üç boyutlu olarak SAP2000[14] programı ile modellenerek itme analizi gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda yapı sisteminin bilgi düzeyi, malzeme dayanımları ve elemanların plastik mafsalları özellikleri belirlenmiştir. Elemanların plastik mafsalları özellikleri ve malzeme

dayanımları ele alınarak matematiksel modelleme yapılmıştır. Matematiksel modelin analiz sonucunda iki farklı yönetmeliğe göre kapasite eğrileri hesaplanarak çizilmiştir. Kapasite ve talep eğrileri aynı eksen takımına dönüştürülerek yapı sisteminin performans noktası belirlenmiştir. TBDY 2018 ve ASCE 41-17'ye göre hesaplanan kapasite eğrileri ve elde edilen performans noktaları karşılaştırarak yorumlanmıştır.

2. Literatür Özeti

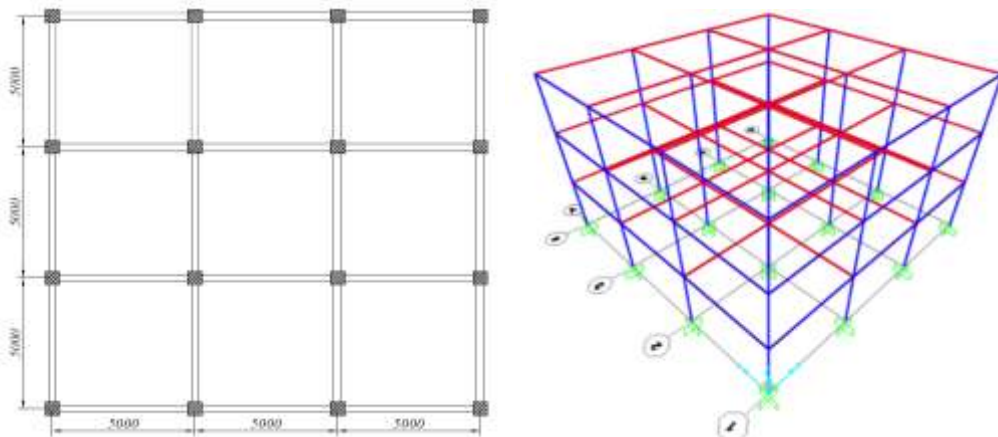
Karabulut (2011), DBYBHY 2007 yönetmeliği ve FEMA 440 raporunda tanımlanan doğrusal olmayan analiz yöntemlerini kullanarak mevcut betonarme binalar için karşılaştırma yapmıştır. Çalışmada DBYBHY 2007 ve TS500 yönetmeliklerine uygun olarak boyutlandırılmış kat adedi ve taşıyıcı sistemlerinin özelliği bakımından farklı olan üç bina, iki farklı doğrusal olmayan statik analiz yöntemine göre incelenmiş, daha sonra elde edilen sonuçlar doğrusal olmayan dinamik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır [15].

Sönmez (2012), DBYBHY 2007 ve ASCE 41-06'da tanımlanan doğrusal olmayan performans değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılmasını yapmıştır. Çalışmada farklı kat yüksekliğine sahip betonarme binaların doğrusal olmayan analizleri iki farklı yönetmeliğe göre yapılmıştır. Bu doğrultuda farklı kat adetlerine sahip yapılara ait deprem talep yerdeğiştirme durumu, her bir kesitin performans düzeyi, kesitlerin hasar durumları, farklı yönetmelikler açısından yapılan analizlerle karşılaştırılmıştır [16].

Yüksel ve Yağlıkcı (2019), DBYBHY 2007 ve TBDY 2018' e göre doğrusal olmayan hesap yöntemleri ile yapı sistemlerinin performans analizleri hakkında bilgi vermiş ve sayısal incelemelere konu olan farklı tip betonarme taşıyıcı sistemleri DBYBHY 2007, TBDY 2018 ve TS 500'e göre tasarlanmıştır. Tasarlanmış farklı tip betonarme taşıyıcı sistemlerin DBYBHY 2007'de tanımlanan artımsal eşdeğer deprem yükü yöntemine ve TBDY 2018'de tanımlanan sabit tek modlu itme yöntemine göre artımsal itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen artımsal itme analizleri sonucu farklı tip betonarme taşıyıcı sistemler için elde edilen kapasite eğrileri ve performans noktalarındaki deprem istemleri (tepe yer değiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri, kat kesme kuvvetleri ve görelî kat ötelemeleri) karşılaştırılmıştır [17,18].

3. Materyal ve Metot

TBDY 2018[12] ve TS 500[19]'e göre tasarlanan 3 açıklıklı 3 katlı betonarme çerçevesel taşıyıcı sistemlerin üzerine bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Çerçevenin açıklığı 5m ve kat yüksekliği 3.5m olarak alınmıştır (Şekil 1). Taşıyıcı sistem hesaplarında beton sınıfı C30 ve donatı sınıfı B420C ele alınmıştır. Kullanılan malzeme özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Tipik kat planı ve çerçevenin üç boyutlu görünüşü

Tablo 1. Kullanılan malzeme özellikleri

C30 Betonun 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
B420C Donatı Çeliğinin Mekanik Özellikleri					
Donatı Sınıfı	Minimum Akma Dayanımı, f_{yk} (Mpa)	Minimum Kopma Dayanımı, f_{su} (Mpa)	$\emptyset \leq 32$ için Minimum Kopma Uzaması, ϵ_{su} (%)	$32 < \emptyset \leq 50$ için Minimum Kopma Uzaması, ϵ_{su} (%)	Elastik Modülü, E_s (Mpa)
B420C	420	550	12	10	200000

Yapı İstanbul Atatürk havalimanı bölgesinde bulunmaktadır. Hesaplamalarda TBDY 2018 ve TS 500'e göre tasarlanan betonarme taşıyıcı sistem modellerinde deprem ve zemin parametreleri AFAD web sayfasından (<https://tdth.afad.gov.tr>) parametreleri alınarak Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. 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	$T_a=0.06, T_b=0.32$
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	$SD_s=1.524$
1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı	$SD1=0.4935$

Çalışmaya konu tüm yapı sistemleri için, normal kat döşemelerine etkiyen kaplama yükü 2,12 kN/m², çatı katı döşemelerine etkiyen kaplama yükü 1.5 kN/m² ve kirişlere etkiyen duvar yükü de 4.8 kN/m alınmıştır. Normal kat döşemelerine etkiyen hareketli yük 3.5 kN/m², çatı katı döşemelerine etkiyen hareketli yük ise 1.5 kN/m² ve hesaplanan kar yükü ise 1.5 kN/m² alınmıştır.

Çalışmada kolonlar 400x400mm, kirişler 250x500mm boyutlarında ve döşemeler 160mm kalınlığında seçilmiştir. Kolonlar ve kirişlerde pas payı 50mm, döşemelerde 20mm olarak seçilmiştir. Yapı sistemlerinin tasarımı TBDY 2018 ve TS 500'e göre ideCAD Statik [20] programı ile yapılmıştır. Tasarlanan kolonların ve kirişlerin en-kesit özellikleri Tablo 3'te verilmiştir. Kolon ve kirişlerin donatı yerleşim planı Şekil 2'de verilmiştir.

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

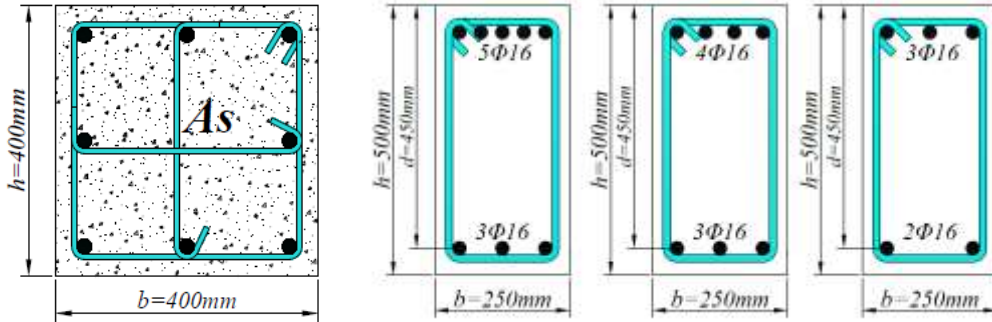
Doğrusal olmayan statik analizlerin yapılabilmesi için kolonlar ve kirişler için TBDY 2018 ve ASCE 41-17'de verilen etkin eğilme rijitlik oranlarının belirlenmesi gerekmektedir. Eğilme etkisi altındaki betonarme elemanların eğilme rijitlikleri çatlamış kesite ait eğilme rijitliklerine

dönüştürülmüş olur. TBDY 2018'de tanımlanan etkin eğilme rijitlik çarpanları sabit katsayılardır. ASCE 41-17 ve TBDY 2018'e göre etkin eğilme rijitliklerin çarpanları Tablo 4'te verilmiştir. ASCE 41-17'de kolonların etkin rijitlik çarpanlarını elde etmek için iki eksenel yük sınırı verilmiştir. Eğer kolonlara uygulanan eksenel yük miktarı (N_D) iki sınır değerlerin arasında ise, etkin eğilme rijitliği çarpanı doğrusal enterpolasyon ile elde edilmektedir.

Tablo 3. Kolonlar ve kirişlerin en-kesit özellikleri

Kolonların en-kesit Özellikleri					
Kolon	Boyut (mm)	Düşey Donatı	Enine Donatı	Boyuna Donatı Oranı	
Yapılardaki Tüm Kolonlar	400x400	8 Φ 16	Φ 8/15/8	0.01005	
Kirişlerin en-kesit Özellikleri					
Kiriş	Katlar	Donatı konumu	Sol Mesnet	Açıklık	Sağ Mesnet
B1	Zemin Kat	Üst	5 Φ 16	5 Φ 16	5 Φ 16
		Alt	3 Φ 16	3 Φ 16	3 Φ 16
B2	1. Kat	Üst	4 Φ 16	4 Φ 16	4 Φ 16
		Alt	3 Φ 16	3 Φ 16	3 Φ 16
B3	2. Kat	Üst	3 Φ 16	3 Φ 16	3 Φ 16
		Alt	2 Φ 16	2 Φ 16	2 Φ 16

Not: Tüm kat kirişlerinde Φ 8/20/9 etriye kullanılmıştır.



Şekil 2. Kolon ve kirişlerin donatı yerleşim planı

ASCE 41-17'de düşey yük hesabında $W = G + nQ + S$ alınırken TBDY 2018' de düşey yük hesabında $W = G + nQ + 0.2S + 0.3E_d^{(z)}$ alınmaktadır. ASCE 41-17'ye göre düz çatıda eğer kar yükünün miktarı 1.44kN/m^2 den büyük ise hesaplanan kar yükün %20'si ve eğer bu değerden küçük ise sıfır olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada ASCE 41-17'ye göre hesaplanan kar yükü 1.44kN/m^2 'den küçük olduğu için hesaplarda sıfır alınmıştır.

Tablo 4. Kolonlar ve kirişlerin etkin eğilme rijitlikleri çarpanları

Yönetmelik: TBDY 2018		
Betonarme taşıyıcı sistem elemanı	Etkin kesit rijitliği çarpanı (k_e)	
Çubuk elemanlarda	Eğilme	Kesme
Çerçeve kirişi	0,35	1,00
Çerçeve kolonu	0,7	1,00
Yönetmelik: ASCE 41-17		
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

N_D , deprem hesabında esas alınan toplam kütlelerle uyumlu yüklerin göz önüne alındığı ve çatlamamış kesitlere ait $(EI)_o$ 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 $(EI)_e$ kullanılarak, deprem hesabında esas alınan kütlelerle uyumlu yüklere göre yeniden yapılır. Deprem hesabında da aynı rijitlikler kullanılır [17]. Kolonlar ve kirişlerin etkin eğilme rijitlik çarpanları TBDY 2018 ve ASCE 41-17'ye göre verilen değerler Tablo 4'te sabit olarak verilmiştir. ASCE 41-17'ye göre hesaplanan eksenel yük birinci ve ikinci kat kolonlarda $N_D/(A_c f_{cm}) \leq 0.1$ olduğu için tüm kolonların etkin eğilme rijitlikleri çarpanı 0,3 olarak ele alınmıştır. Zemin katta $N_D/(A_c f_{cm}) > 0.1$ olduğu için zemin kat kolonların etkin eğilme rijitlikleri çarpanı 0,36 olarak hesaplanmıştır.

Yapı sistemlerinin eşdeğer deprem yükü dağılımının belirlenmesi iki farklı yönetmeliğine göre yapılmıştır. Kolon ve kirişlerde Tablo 4'te verilen etkin eğilme rijitliklerinin değerleri yapı hesap modellerine uygulanmış ve modal analiz gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen modal analiz sonucunda; yapı sistemlerinin birinci titreşim modlarına ait etkin kütle oranları ve periyotları Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Yapı sistemlerinin birinci titreşim modlarına ait etkin kütle oranları

Yönetmelik	Mod No	Periyot (sn)	Etkin Kütle Oranları		
			UX	UY	RZ
TBDY 2018	1	0,6398	0,80004	-	-
ASCE 41-17	1	0,8158	0,80197	-	-

Yapı sistemi rijitlik ve kütle bakımından planda simetrik olduğu için, x ve y doğrultularındaki hakim modların özellikleri aynıdır. Bu nedenle sadece x doğrultusunda tek yönde artımsal itme analizinin yapılması yeterlidir. Binanın hakim mod şekillerine ve kat ağırlıklarına bağlı olarak doğrusal olmayan statik analizde kullanılacak eşdeğer deprem yükü dağılımları Tablo 6'da verilmiştir.

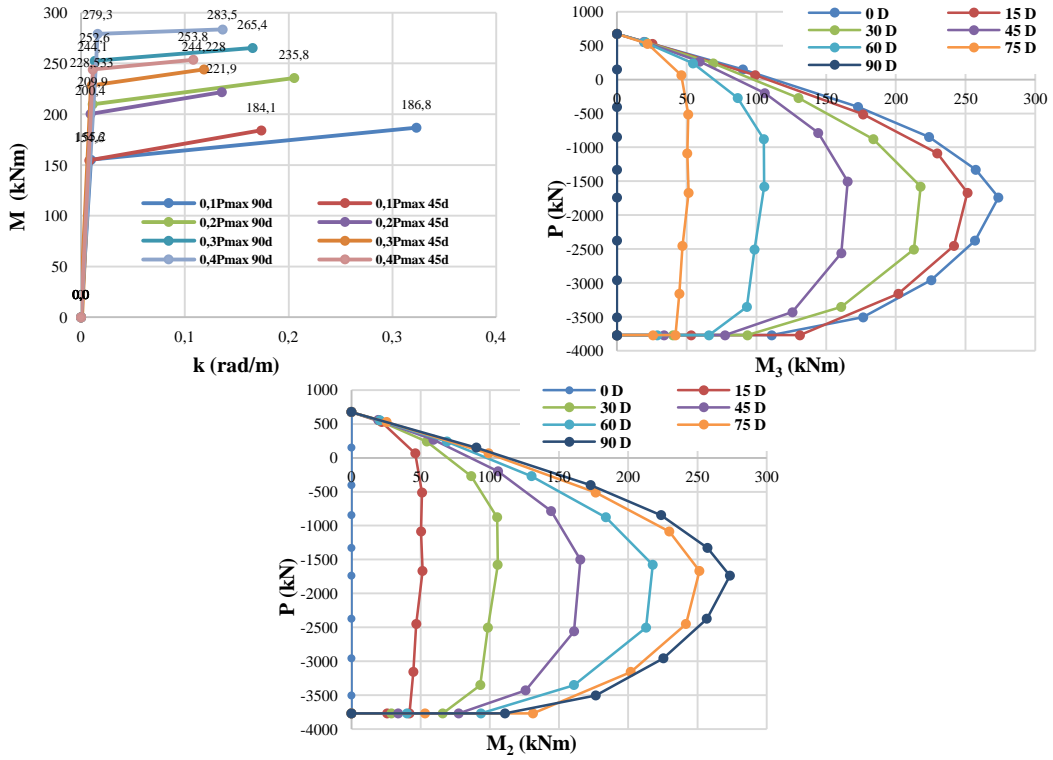
Tablo 6. TBDY 2018 ve ASCE 41-17'ye göre yapı sistemlerinin eşdeğer deprem yükü dağılımı

Yönetmelik	Kat	Ağırlık (kN)	X Doğrultusunda Hakim Mod Şekli Genlikleri (m)	Ağırlık x Genlik	Eşdeğer Deprem Yüğü Dağılımı
TBDY 2018	1	3566,1	0,0175	62,41	0,5146
	2	3566,1	0,0372	132,66	1,0938
	3	2542,5	0,0477	121,28	1,0000
ASCE 41-17	1	2748,9	0,0178	48,9301	0,5318
	2	2748,9	0,0379	104,1821	1,1323
	3	1920,9	0,0479	92,0100	1,0000

3.1. Kolonların ve Kirişlerin TBDY 2018'e Göre Plastik Mafsallık Özelliklerinin Belirlenmesi

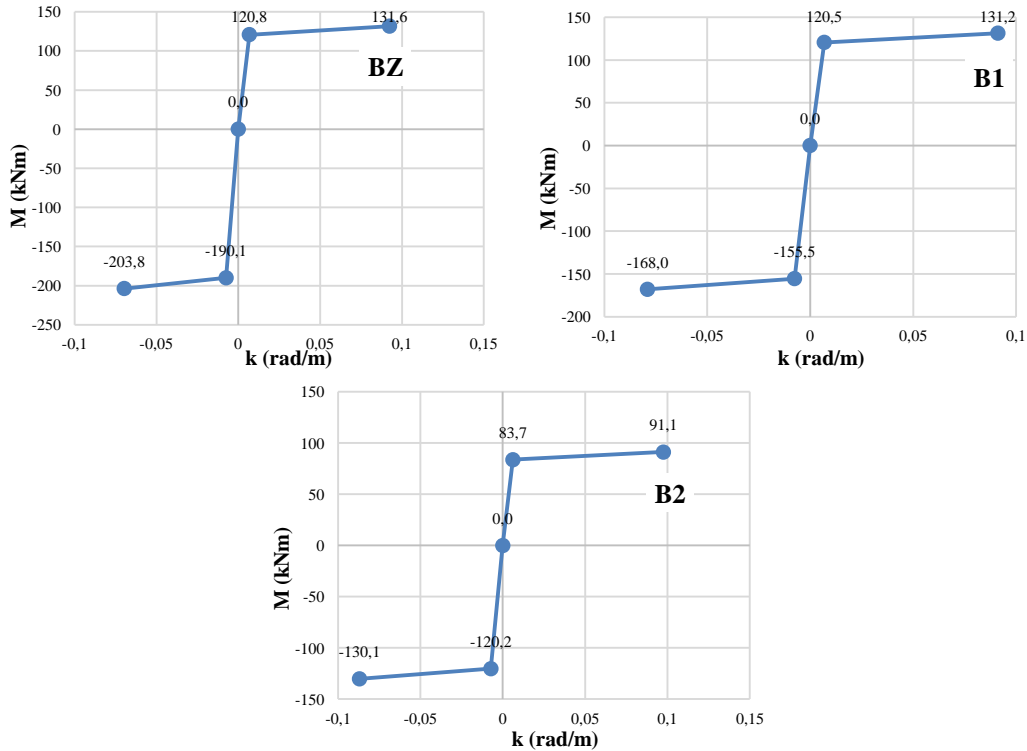
Doğrusal olmayan statik analizde, tasarlanan tek açıklıklı 3 katlı betonarme çerçevesel taşıyıcı sistemlerinin kolonların ve kirişlerin plastik mafsallık özelliklerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kolonların ve kirişlerin plastik mafsallık özelliklerinin hesaplanmasında SAP2000 programından yararlanarak 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. Kolonların plastik mafsallık özelliklerinin tanımlanmasında, kolonların moment - eğrilik ilişkisi ve 2 boyutlu normal kuvvet - moment etkileşim eğrilerinin belirlenmesi gerekmektedir. Kolonların moment-eğrilik ilişkisi ve normal kuvvet-moment etkileşim eğrilerinin hesaplanmasında SAP2000 programından faydalanılmıştır.

Kolonların moment – eğrilik ve iki boyutlu normal kuvvet – moment etkileşim grafikleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. TBDY 2018'e göre kolonların moment – eğrilik ilişkisi ve iki boyutlu normal kuvvet – moment etkileşim grafikleri

Doğrusal olmayan statik analizinde kullanılan kirişlerin plastik mafsal özelliklerinin tanımlanması için kirişlerin moment - eğrilik ilişkisinin bilinmesi gerekmektedir. Kirişlerin moment-eğrilik ilişkisinin grafikleri SAP 2000 programı ile elde edilerek Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. TBDY 2018'e göre kirişlerin moment – eğrilik ilişkisinin grafikleri

3.2. Kolonların ve Kirişlerin ASCE 41-17'ye Göre Plastik Mafsallık Özelliklerinin Belirlenmesi

Betonarme kirişlerin ve kolonların plastik mafsallık özellikleri ASCE 41-17'de Tablo 7 ve 8'de verilmiştir. Plastik mafsallık özellikleri Tablo 7 ve 8'e göre hesaplanarak SAP 2000 programına tanımlanmıştır.

Tablo 7. Doğrusal olmayan analizler için modelleme ve kabul kriterleri- betonarme kolonlar [13]

Modelleme değişkenleri	Kabul edilmiş kriterler		
	Plastik dönme açısı (Rad)		
	Performans seviyesi		
	IO	LS	CP
Plastik Dönme Açıları, a ve b (Rad). Artık dayanım oranı, c			
Net yükseklik boyunca yetersiz gelişme veya birleştirme ile kontrol edilmeyen kolonlar ^a			
$a = \left(0.042 - 0.043 \frac{N_{UD}}{A_g f_{cE}} + 0.63 \rho_t - 0.023 \frac{V_{yE}}{V_{CoIOE}} \right) \geq 0.0$			
$\frac{N_{UD}}{A_g f_{cE}} \leq 0.5$ için $b = \frac{0.5}{5 + \frac{N_{UD}}{0.8 A_g f_{cE} \rho_t f_{yTE}}} - 0.01 \geq a^a$	0.15 ^a ≤ 0.005	0.5b ^b	0.7b ^b
$c = 0.24 - 0.4 \frac{N_{UD}}{A_g f_{cE}} \geq 0.0$			
Net yükseklik boyunca yetersiz gelişme veya birleştirme ile kontrol edilen kolonlar ^c			
$a = \left(\frac{1}{8} \frac{\rho_t \cdot f_{yTE}}{\rho_t \cdot f_{yTE}} \right) \geq 0.0$			
$b = \left(0.012 - 0.085 \frac{N_{UD}}{A_g f_{cE}} + 12 \rho_t^0 \right) \geq a$	0.0	0.5b	0.7b
$c = 0.15 + 36 \rho_t \leq 0.4$			

Not: ρ_t , çekirdeğe yeterince sabitlenmediğinde hiçbir durumda 0.0175'ten fazla veya 0.0075'ten küçük alınmamalıdır. Tablodaki denklemler ρ_t değeri 0.0005'ten küçük olan kolonlar için geçerli değildir. V_{yE} / V_{CoIOE} , 0.2'den az alınmamalıdır. N_{UD} , yanal kuvvetlerin etkilerini açıklayan maksimum başıç eksenel yük hesabı olacaktır. Alternatif olarak, N_{UD} 'ün bir limit-durum analizine dayanarak değerlendirilmesine izin verilecektir.

^ab, $\frac{N_{UD}}{A_g f_{cE}} > 0.5$ 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.

^cKolonların, 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 sütunların parametrelerini asla aşmayacaktır.

^d Yeterli gelişme veya birleştirme ile kontrol edilen kolonlar için, birleşme bölgesinde sıfır alınacak, uzunluğu boyunca en az iki bağ grubu tarafından geçilmeyecektir.

^e ρ_t , 0.0075'ten daha fazla alınmaz.

Tablo 8. Doğrusal olmayan analizler için modelleme ve kabul kriterleri- betonarme kirişler [13]

Durum	Modelleme değişkenleri			Kabul edilmiş kriterler		
	Plastik Dönme Açıları (Rad)		Artık dayanım oranı	Plastik dönme açısı (Rad)		
	Performans seviyesi					
				IO	LS	CP
Durum 1: Eğilme davranışı kontrolündeki kirişler ^b						
$(\rho - \rho')$	Enine donatı	$\frac{V}{b_w d \sqrt{f_{cE}}}$	a	b	c	
≤ 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 ^b						
	Etriye Aralığı $\leq d/2$		0.003	0.020	0.2	0.0015 0.010 0.020
	Etriye Aralığı $\geq d/2$		0.003	0.010	0.2	0.0015 0.005 0.010
Durum 3: Açıklık boyunca yetersiz donatı ve bindirme boyu kontrolündeki kirişler ^b						
	Etriye Aralığı $\leq d/2$		0.003	0.020	0.0	0.0015 0.010 0.020
	Etriye Aralığı $\geq d/2$		0.003	0.010	0.0	0.0015 0.005 0.010
Durum 4: Kolon kiriş birleşim bölgesine yeterli derecede saplanmamış kirişler ^b						
			0.015	0.03	0.2	0.0100 0.020 0.030

Not: f_{cE} in lb/in² ve (MPa) olarak verilmiştir.

^a Tablodaki 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 mafsallık bölgesinde, etriye aralığı d/3 ten küçük olmalı, orta ve yüksek süneklik talebine sahip elemanlar için, kesme donatıları tasarım kesme kuvvetlerinin 3/4'ünü taşımalıdır. Aksi halde enine donatıların uygun olmadığı kabul edilir.

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

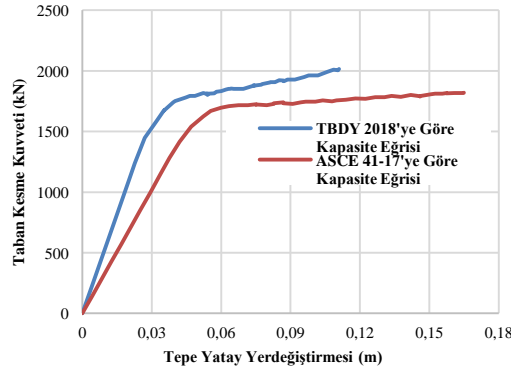
4. Araştırma Bulgular

İtme analizi, düşey yüklerin uygulanmasından ve idealleştirilmiş bir yanal yük modelinden oluşturulmaktadır. Yatay yükleme sırasında düşey yüklerin yerinde olduğunu düşünülmektedir. Doğrusal olmayan itme analizinde, yanal kuvvetler monotonik bir şekilde, adım adım uygulanmaktadır. Uygulanan yanal kuvvetler, ele alınan her kat seviyesinde kütle ve birinci mod şekil genliği ile orantılıdır. $P - \Delta$ etkileri hesaba katılmaktadır. Uygulamalarda birinci mod şekli kullanılmasına rağmen, yanal yük modeli için ters üçgen veya dikdörtgen şekil gibi modal olmayan bir şekil vektöründe kullanılabilir. İtme analizinde, yapının davranışı, taban kesme kuvveti ile tepe yatay yer değiştirmesi arasındaki ilişkiyi temsil eden bir kapasite eğrisi ile elde edilir. Bu, yöntem pratikte çok uygun ve kolay bir yöntemdir ve mühendisler tarafından kolayca gerçekleştirilmektedir. Uygulamada yaygın olarak kabul edilen bu yöntemde, tepe yatay yer değiştirmesi- taban kesme kuvveti eğrisinin (kapasite eğrisi) kullanıldığı kabul edilmektedir. Tek açıklıklı 3 katlı çerçevesel betonarme binanın itme analizlerinden elde edilen kapasite eğrileri verilmiştir (Şekil 5). Gerçekleştirilen analiz sonuçlarının ışığında elde edilen araştırma bulguları sırasıyla aşağıda verilmektedir.

4.1. Tepe Yatay Yerdeğiştirmesi - Taban Kesme Kuvveti Eğrilerinin Elde Edilmesi

Artımsal eşdeğer deprem yükü itme analizlerinin sonucunda tepe yatay yerdeğiştirmesi - taban kesme kuvveti eğrilerinin elde edilmesi amacıyla tek açıklıklı 3 katlı betonarme binanın doğrusal olmayan statik analizi SAP 2000 programı ile gerçekleştirilmiştir.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda yapı sistemlerinin tepe yatay yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti eğrileri elde edilmiştir. Yapı sistemlerinin tepe yatay yer değiştirmesi-taban kesme kuvveti karşılaştırmalı grafiği Şekil 5'te verilmektedir.



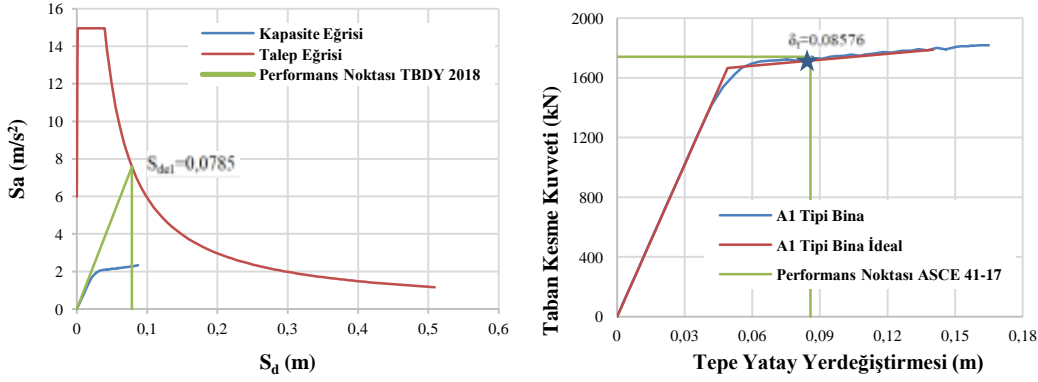
Şekil 5. Tek açıklıklı 3 katlı betonarme çerçevesel binanın kapasite eğrilerinin karşılaştırmalı grafiği

4.2. Yapı Sistemlerinin Performans Noktalarının Belirlenmesi

Üç açıklıklı 3 katlı yapı sisteminin performans noktasının belirlenmesi amacıyla her bir yapı sisteminin taban kesme kuvveti - tepe yatay yerdeğiştirmesi olan kapasite eğrileri, spektral ivme (S_a) - spektral yerdeğiştirme (S_d) eksen takımına dönüştürülmüştür. Deprem etkisi ve talep eğrisi olarak adlandırılan, eksenleri spektral ivme (S_a) - periyot (s_n) olan elastik ivme spektrumu eğrisine de eksen dönüşümü uygulanmış ve spektral ivme (S_a) - spektral yerdeğiştirme (S_d) eksen takımına dönüşümü yapılmıştır.

Farklı yönetmeliklere göre yapı sistemi için kapasite ve talep eğrileri aynı grafik üzerinde çizilerek, TBDY 2018 ve ASCE 41-17'deki bina performans noktaları belirlenerek sırasıyla Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'da yapı sistemi için binanın performans noktalarındaki tepe yatay yerdeğiştirme

istemlerinin bulunabilmesi için gerekli olan itme analizinin ilk adımında birinci moda ait doğrusal elastik spektral yerdeğiştirme (S_{de1}) belirlenmektedir.



Şekil 6. Tek açıklıklı 3 katlı binada x eksenini doğrultusu için kapasite ve talep eğrilerinin kesiştirilmesi.

Yukarıda verilen kapasite eğrilerinin başlangıç teğeti ile talep eğrisinin kesişim noktaları üç açıklıklı 3 katlı yapı sistemi içinde talep eğrisinin azalan koluna denk gelmektedir. TB DY 2018’de verilen formüller kullanılarak yapı sistemleri için x eksenini doğrultusundaki tepe yatay yer değiştirme istemi $u^{(p)}_{XN1}$ hesaplanmaktadır. Hesaplanan yer değiştirmelerin değerleri Tablo 9’de karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

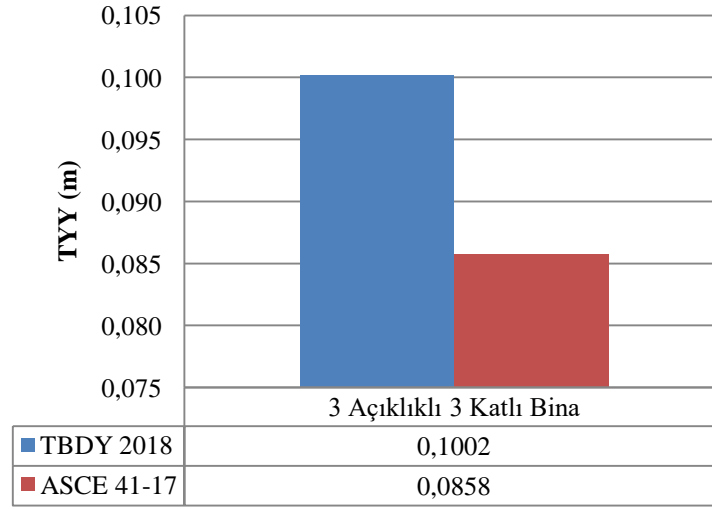
Tablo 9. TB DY 2018 ve ASCE 41-17’ye göre yapı sistemi için tepe yatay yer değiştirme istemi $u^{(p)}_{XN1}$ ’in değerleri

Parametreler	TB DY 2018	Birimler	Parametreler	ASCE 41-17	Birimler
$C_{R1} =$	1,0000	-	C_0	1,3000	-
$S_{de1} =$	0,0785	m	C_1	0,9972	-
$d_1^{(p)} = S_{d11} =$	0,0785	m	C_2	1,0000	-
$\Phi_{XN1} =$	0,0477	m	S_a	0,40329	m/s^2
$\Gamma_{X1} =$	26,7816	1/m	T_e	0,81247	s
$u^{(p)}_{XN1} =$	0,1002	m	δ_t	0,08576	m

$u^{(p)}_{XN1}$ tepe yatay yerdeğiştirme istemi büyüklüklerine yapı sistemlerinin performans noktası olarak tanımlanmaktadır. Yapı taşıyıcı sistemlerinin performans değerlendirme amacı ile tepe yerdeğiştirmesinden elde edilmektedir. SAP 2000 programı ile gerçekleştirilen itme analizlerinin sonuçlarından TB DY 2018’e göre 52. hesap adımı ve ASCE 41-17’ye göre 24. hesap adımı performans değerlendirmesinin yapılacağı hesap adımları olarak belirlenmektedir. İki farklı yönetmeliğine göre yapı sistemlerinde performans değerlendirmesinin yapılacağı adımlardaki istemler karşılaştırılarak grafikleri çizilmiştir.

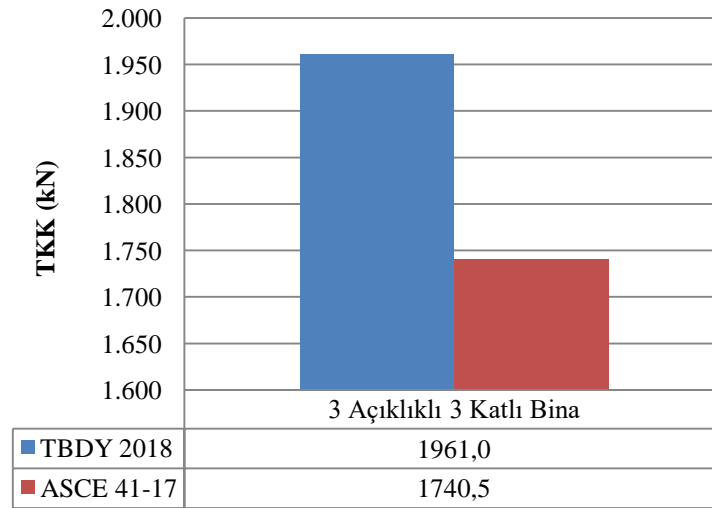
Yapı sistemlerinin performans noktasındaki deprem istemlerinin karşılaştırılması için tepe yatay yerdeğiştirmeleri, taban kesme kuvvetleri, kat kesme kuvvetleri ve görel kat ötelenmelerinin karşılaştırılması gerekmektedir.

İlk olarak TB DY 2018 ve ASCE 41-17’ye göre elde edilen tepe yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırılması amacıyla karşılaştırmalı grafiklerinin çizilmesi gerekmektedir. Tepe yatay yerdeğiştirmelerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 7’de gösterilmiştir.

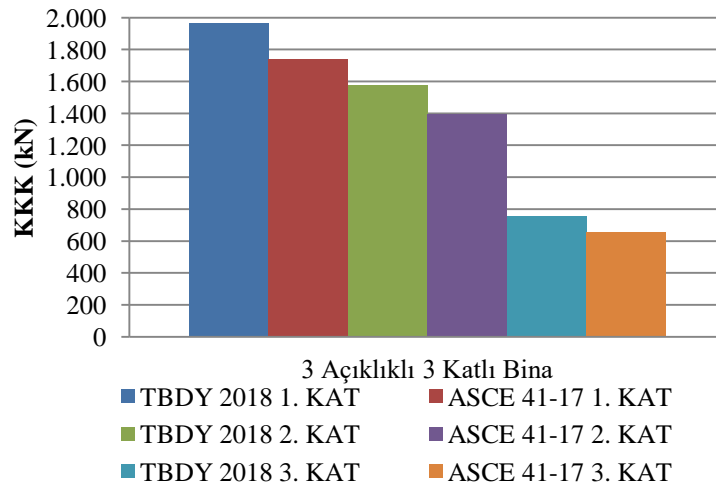


Şekil 7. Yapı sistemlerinin tepe yatay yerdeğiştirmesi sonuçlarının karşılaştırma grafiği

TBDY 2018 ve ASCE41-17 yönetmeliklerine göre SAP 2000 programının lineer olmayan itme analizi ile Taban Kesme Kuvvetleri hesaplanmıştır. Hesaplanan taban kesme kuvvetlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 8’de verilmiştir.



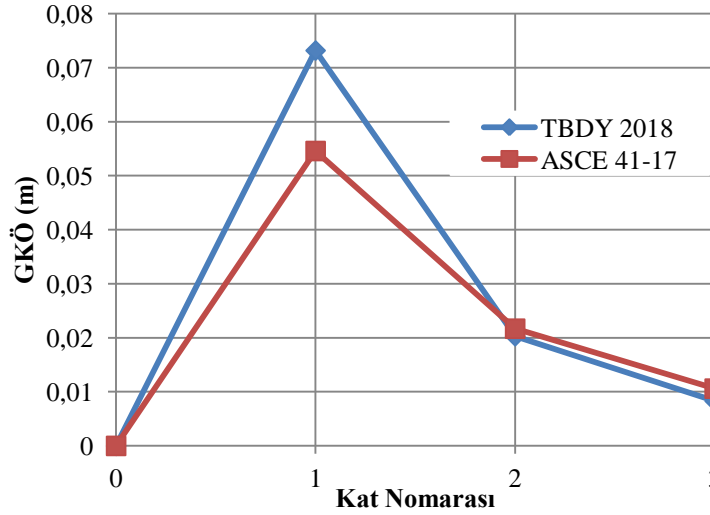
Şekil 8. Yapı sistemlerinin taban kesme kuvveti sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği



Şekil 9. Yapı sistemlerinin kat kesme kuvveti sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği

TBDY 2018 ve ASCE 41-17'ye göre lineer olmayan itme analizi ile Kat Kesme Kuvvetleri hesaplanmıştır. Hesaplanan kat kesme kuvvetlerinin karşılaştırmalı grafiği Şekil 9'de verilmiştir.

Görel kat ötelemeleri iki farklı yönetmeliğine göre doğrusal olmayan itme analizi ile elde edilmiştir. Elde edilen görel kat ötelemesi sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. Yapı sistemlerinin görel kat ötelemesi sonuçlarının karşılaştırma grafiği

5. Sonuç ve Öneriler

TBDY 2018 ve ASCE 41-17'ye göre tanımlanan düşey yük miktarı, plastik mafsal özellikleri ve çatlamış kesit rijitlik oranlarına göre elde edilen analiz sonuçları değişmektedir.

TBDY 2018'e göre hesaplanan tepe yer değiştirme miktarı ASCE 41-17'ye göre hesaplanan tepe yer değiştirme miktarından daha fazla elde edilmiştir.

TBDY 2018'e göre hesaplanan taban kesme kuvvetinin miktarı ASCE 41-17'ye göre elde edilen taban kesme kuvveti miktarından daha fazla elde edilmiştir.

TBDY 2018'e göre elde edilmiş kat kesme kuvvetlerinin miktarı ASCE41-17'ye göre hesaplanan kat kesme kuvvetlerinden daha fazla elde edilmiştir. Çünkü TBDY 2018'e göre tanımlanan etkin düşey yük miktarı ASCE 41-17'ye göre daha fazladır.

TBDY 2018'e göre elde edilen görel kat ötelemelerinin miktarı ASCE 41-17'ye göre elde edilen miktardan daha fazla elde edilmiştir. Araştırma bulguları ve elde edilen sonuçlara göre bu değişimler ASCE 41-17 ve TBDY 2018'e göre tanımlanan düşey yük miktarı ve değişiminin etkili olduğunu gözlemlenmiştir. İki yönetmeliğe göre elde edilen sonuçların farklı olmasının önemli nedenlerinden birisi de her iki yönetmelikte tanımlanan plastik mafsal özelliklerinin farklı olmasıdır.

Çalışmada incelenen tek açıklıklı 3 katlı betonarme çerçevesi sistemler için TBDY 2018 ve ASCE 41-17'ye göre elde edilen talep eğrileri karşılaştırılmıştır. TBDY 2018'e göre hesaplanan spektral yer değiştirme (S_d) değeri ASCE 41-17'ye göre elde edilen spektral yer değiştirme (S_d) değerinden daha küçük elde edilmiştir.

Kaynaklar

- [1]. Priestley MJN (1993) Myths and fallacies in earthquake engineering—conflicts between design and reality. *Bull N Z Natl Soc Earthq Eng* 26(3):329–341
- [2]. Liao W, Loh C-H, Wan S (2001) Earthquake responses of RC moment frames subjected to near-fault ground motions. *Struct Des Tall Spec Build* 10(3):219–229
- [3]. Kim S, D'Amore E (1999) Push-over analysis procedure in earthquake engineering. *Earthq Spectra* 15(6):417–434
- [4]. Bracci JM, Kunnath SK, Reinhorn AM (1997) Seismic performance and retrofit evaluation of reinforced concrete structures. *J Struct Eng* 123(1):3–10
- [5]. Gupta B, Kunnath SK (2000) Adaptive spectra-based pushover procedure for seismic evaluation of structures. *Earthq Spectra* 16(2):367–391
- [6]. Chopra AK, Goel RK (2002) “A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthq Eng Struct Dyn* 31(3):561–582
- [7]. Elnashai AS (2001) Advanced inelastic static (pushover) analysis for earthquake applications. *Struct Eng Mech* 12(1):51–69
- [8]. Inel M, Ozmen HB, Senel MS, Meral E, Palanci M (2010) Evaluation of factors affecting seismic performance of low and midrise reinforced concrete buildings. In: 9th international congress on advances in civil engineering, Paper No. ACE2010-SEE-132, September 27–30, 2010, Karadeniz Technical University, Trabzon, Turkey
- [9]. Krawinkler H (2006) Importance of good nonlinear analysis. *Struct Des Tall Spec Build* 15:515–531
- [10]. Chintanapakdee C, Chopra AK (2003) Evaluation of modal pushover analysis using generic frames. *Earthq Eng Struct Dyn* 32(3):417–442
- [11]. Krawinkler H (2006) Importance of good nonlinear analysis. *Struct Des Tall Spec Build* 15(5):515–531
- [12]. TBDY, 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, T.C. Bayındırlık ve İskân Bakanlığı, Ankara.
- [13]. ASCE 41-17. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings; American Society of Civil Engineers: Reston, VA, USA, 2017. [Cross Ref]
- [14]. SAP2000. Structural software for analysis and design, Computers and Structures, Inc. Version 20.0.0. USA.
- [15]. Karabulut, A., 2011. TDY 2007 Yönetmeliği ve FEMA 440 Raporunda Tanımlanan Doğrusal Olmayan Analiz Yöntemlerinin Mevcut Betonarme Binalar İçin Karşılaştırılması, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [16]. Sönmez, M., 2012. DBYBHY-07 ve ASCE 41-06'da tanımlanan doğrusal olmayan performans değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.
- [17]. Yüksel, S.B. ve Yağlıkçı, S., 2019, Betonarme binaların doğrusal olmayan hesap yöntemleri ile analizi üzerine bir çalışma, 2nd International Congress on Engineering and Architecture, Marmaris, Turkey.
- [18]. Yağlıkçı, S., 2020. Betonarme Binaların Doğrusal Olmayan Hesap Yöntemleri İle Analizi Üzerine Bir Çalışma, K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya.
- [19]. TS500, 2000, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, TSE, Ankara.
- [20]. ideCAD Statik IDS v10.05, 2018. Yapı Analiz Programı, ideYAPI Bilgisayar Destekli Tasarım Mühendislik Danışmanlık Taahhüt A.Ş., İstanbul.
- [21]. ACI 318-14, American Concrete Institute. 2014. Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Standards ACI 318–14 and ACI 318R-08. Farmington Hills: Michigan.