



Moment Aktaran Çelik Çerçeve Sistemlerde Doğrusal Olmayan Davranışa Bağlı Yanal Yük Dağılımının İncelenmesi

Investigation of lateral load distribution in steel moment frame based on nonlinear behavior

Mehmet Fatih ARAT^{1*}, Hakan Tacettin TÜRKER²

¹Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, mehmetfatiharat@yandex.com, ORCID: 0000-0001-5433-1583

²Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, hakanturker@uludag.edu.tr, ORCID: 0000-0001-5820-0257

MAKALE BİLGİLERİ

Makale Geçmişi:

Geliş 12 Ocak 2022
Revizyon 17 Mart 2022
Kabul 17 Mart 2022
Online 30 Mart 2022

Anahtar Kelimeler:

Eşdeğer deprem yükü dağılımı, Kat kesme kuvveti dağılımı, Performans tabanlı plastik tasarım, Şekil değiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım

ÖZ

Günümüz yönetmelikleri binaların tasarımında, tasarım depremi altında taşıyıcı sistemde doğrusal olmayan şekil değiştirmeler oluşacağını öngörmektedir. Katlara etkiyen deprem yük dağılımları dayanım esaslı yöntemlerde, binanın lineer elastik davranışında bulunan mod şekillerine bağlı olarak bulunmaktadır. Eşdeğer deprem yükü yönteminde 1. mod şeklini veren yük dağılımı esas alınarak katlara uygulanacak kuvvetler bulunmaktadır. Bir şekil değiştirme tabanlı tasarım yöntemi olan Performans Tabanlı Plastik Tasarım (PTPT) metodunda önerilen bina yanal yük dağılımı yapının elastik ötesi davranışı dikkate alınarak bulunmuştur. Bu çalışmada Deprem yönetmeliğinde bina tipi yapıların tasarımında kullanmak için verilen yanal yük dağılımı ile performans tabanlı plastik tasarım yönteminde verilen yanal yük dağılımları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yöntemiyle elde edilmiş kat kesme kuvveti dağılımı TBDY-2018 Deprem yönetmeliğinde ve performans tabanlı tasarım yönteminde kullanılan yanal yük dağılımları ile kıyaslanmıştır. Performans tabanlı plastik tasarım (PTPT) ve şekil değiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım (ŞGDT) yöntemleriyle tasarlanmış 4 ve 9 katlı moment aktaran çelik çerçeve (MAÇÇ) sistemler inceleme için kullanılmıştır. İncelenen yapılardan elde edilen kat kesme kuvveti dağılımlarının yönetmeliklerde belirtilen eşdeğer deprem yükü dağılımından elde edilen kat kesme kuvveti dağılımıyla uyum içinde olmadığı görülmüştür.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 12 January 2022
Received in revised form 17 March 2022
Accepted 17 March 2022
Available online 30 March 2022

Keywords:

Equivalent lateral load distribution, Story shear distribution, Performance-based plastic design, deformation-based design,

ABSTRACT

It is known that nonlinear deformations will occur under severe earthquakes in structures designed according to today's regulations. Lateral load distributions acting on the floors are found in strength-based methods, depending on the mode shapes in the linear elastic behavior of the building. In the equivalent lateral load method, forces are applied to the floors based on the load distribution that gives the 1st mode shape. The lateral load distribution of the building proposed in the Performance-Based Plastic Design method, which is a displacement-based design method, was found by considering the inelastic behavior of the structure. In this study, the lateral load distribution given in the earthquake code for use in the design of building-type structures and the lateral load distributions given in the performance-based plastic design method were compared. For this purpose, the floor shear force distribution obtained by the nonlinear calculation method in the time history is compared with the lateral load distributions used in the earthquake code and performance-based design method. 4- and 9-storey moment-transmitting steel frame systems designed with performance-based plastic design and evaluation and design methods according to strain were used for the study. It has been observed that the story shear force distributions obtained from the examined structures are not in harmony with the story shear force distribution obtained from the equivalent earthquake load distribution specified in the regulations.

Doi: 10.24012/dumf.1056869

* Sorumlu Yazar

Giriş

Yapıların deprem etkisi altındaki tasarımında eleman özelliklerinin yapı boyunca dağılımının performans üzerindeki etkisi yüksektir. Yapıda uygun olmayan rijitlik ve dayanım dağılımının oluşması yapının deprem altında istenmeyen davranışlar sergilemesine neden olabilmektedir. Birçok yapının yıkılma nedeni olan yumuşak kat mekanizması düzensiz olan rijitlik veya dayanım dağılımından kaynaklanmaktadır [1]. Düzensizlik dağılımının başlıca nedenlerinden biri eşdeğer deprem yükü dağılımının yapının doğrusal olmayan davranışını tam olarak yansıtamamasıdır [2, 3].

Yönetmeliklere göre yapılar tasarlanırken elastik tasarım yöntemlerinden eşdeğer deprem yükü yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır [4]-[6]. Yöntemde deprem altında yapıda oluşacak eylemsizlik kuvveti eşdeğer deprem yükleri ile temsil edilir. Eşdeğer deprem yükü dağılımı kat kütlelerinin yığılı olarak kabul edildiği çok serbestlik dereceli elastik bir konsol sistemin hakim mod şekline göre belirlenir [7]. Elastik sisteme göre belirlenen dağılımın aksine, yapının şiddetli depremler altında doğrusal olmayan şekil değiştirmeler yapacağı bilinmektedir. Yönetmelikler genellikle doğrusal olmayan davranışı deprem yükü azaltma katsayısı gibi mühendislik varsayımlarına dayanan yöntemlerle için içine dahil ederler. Bundan dolayı yönetmeliklerdeki yaklaşım doğrusal olmayan davranışı tasarım sürecine daha kesin şekilde dahil edebilmek için performans tabanlı tasarım metodolojisine bağlı yeni yöntemler geliştirilmiştir [9]. Bu yöntemlerde kullanılacak eşdeğer deprem yükü dağılımları yapının doğrusal olmayan davranışını doğru şekilde temsil etmelidir. Lee ve Goel [10], belli deprem kayıtları altında yapılarda oluşan göreceli maksimum kat kesme kuvvetlerini kullanarak belirledikleri kat kesme kuvveti dağılımıyla yapıların doğrusal olmayan durumunu göz önüne alan bir eşdeğer deprem yükü dağılımı önermiştir. Chao vd. [11]'de zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemini kullanarak moment aktaran çelik çerçeve, dış merkez çelik çerçeve, merkezi çaprazlı çelik çerçeve [12] ve özel moment aktaran kafes çerçeve [13] taşıyıcı sisteme sahip yapıların kat kesme kuvveti dağılımlarını belirlemiştir. Elde ettiği sonuçların yönetmeliklerce verilen eşdeğer deprem yükü dağılımlarından elde edilen kat kesme kuvveti dağılımlarına uymadığını belirtmiştir. Gholamrezatabar vd. [14] moment aktaran çelik çerçeve sistemlerin eşdeğer deprem yükü dağılımlarını incelemek için parametrik bir çalışma yaparak zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz yöntemleriyle kat kesme kuvveti dağılımlarını belirlemiştir. Yapılan Parametrik çalışmada performans tabanlı plastik tasarım yöntemi kullanılarak tasarlanmış yapılar incelenmiştir.

Bu çalışmada ise doğrusal olmayan zaman tanım alanında analiz (DOZTAA) yöntemi kullanılarak elde edilen eşdeğer deprem yükü dağılımları ve kat kesme kuvveti faktörleri incelenmiştir. Tasarımları performans tabanlı plastik tasarım (PTPT) ve şekil değiştirmeye göre değerlendirme ve tasarım (ŞGDT) yöntemleriyle yapılmış 4 ve 9 katlı moment aktaran çelik çerçeve sistemlere sahip yapılar kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar TBDY-2018'de ve PTPT yönteminde kullanılan eşdeğer deprem yükü dağılımlarıyla kıyaslanmıştır.

Materyal ve Yöntem

Bu çalışmada DOZTAA kullanılarak yapılardan elde edilen maksimum eşdeğer deprem yükü dağılımları ve kat kesme kuvveti faktörü, TBDY-2018 yönetmeliğinde ve Chao vd. [11] tarafından önerilen eşdeğer deprem yükü dağılımlarıyla kıyaslanmıştır. Kıyaslama amacıyla Moment Aktaran Çelik Çerçeve (MAÇÇ) sisteme sahip PTPT ve ŞDGT yöntemlerine göre tasarlanmış 4 ve 9 katlı yapılar kullanılmıştır. Yapılara ait geometrik değerler, malzeme özellikleri ve yük değerleri literatürdeki değerlerle aynı alınmıştır. ŞDGT yönteminin uygulaması ile ilgili detaylar TBDY-2018 [4] ve FEMA 356 [9]'dan elde edilmiştir. İki yöneme göre tasarlanan yapıları kıyaslamak için DOZTAA kullanılmıştır. Tüm analizler Sap 2000 v20.1 [19] sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

Yanal Yük Dağılımları

Yönetmeliklerde genellikle Denklem 1'de verilen yüksekliğe bağlı eşdeğer deprem yükü dağılımı kullanılmaktadır [6, 16, 17]. Denklem 1 ilk olarak ATC 3-06 [18] tarafından kabul edilmiştir. Burada F_i i.kata gelen eşdeğer deprem yükünü, V taban kesme kuvvetini, w_i i. kattaki kat kütlelerini, h_i i. katın zemin seviyesinden yüksekliğini, k yönetmeliklerde farklı değerler alan üstel bir ifadeyi göstermektedir. Yapının elastik davranışı gözlemlendiğinde hakim periyot değeri 0.5 sn.'den küçük yapılar düzgün bir dağılıma sahipken ($k=1$), periyodu 2.5 sn.'den büyük yapılarda dağılımın ise parabolik bir eğri ($k=2$) olduğu görülmüştür. Hakim periyodun 0.5 sn. ile 2.5 sn. arasında olduğu yapılar ise interpolasyon yöntemiyle $k=1$ ile $k=2$ değerleri arasında değerler alır.

$$F_i = \left(\frac{w_i h_i^k}{\sum_{j=1}^n w_j h_j^k} \right) \cdot V \quad (1)$$

Daha sonra UBC 97'de yüksek modların etkisini sisteme dahil edebilmek için en üst kata Denklem 2'de hesaplanan yüke ek olarak tekil bir yük [4,5],[16-18] eklenmektedir.

$$F_i = \left(\frac{w_i h_i^k}{\sum_{j=1}^n w_j h_j^k} \right) \cdot (V - F_t) \quad (2)$$

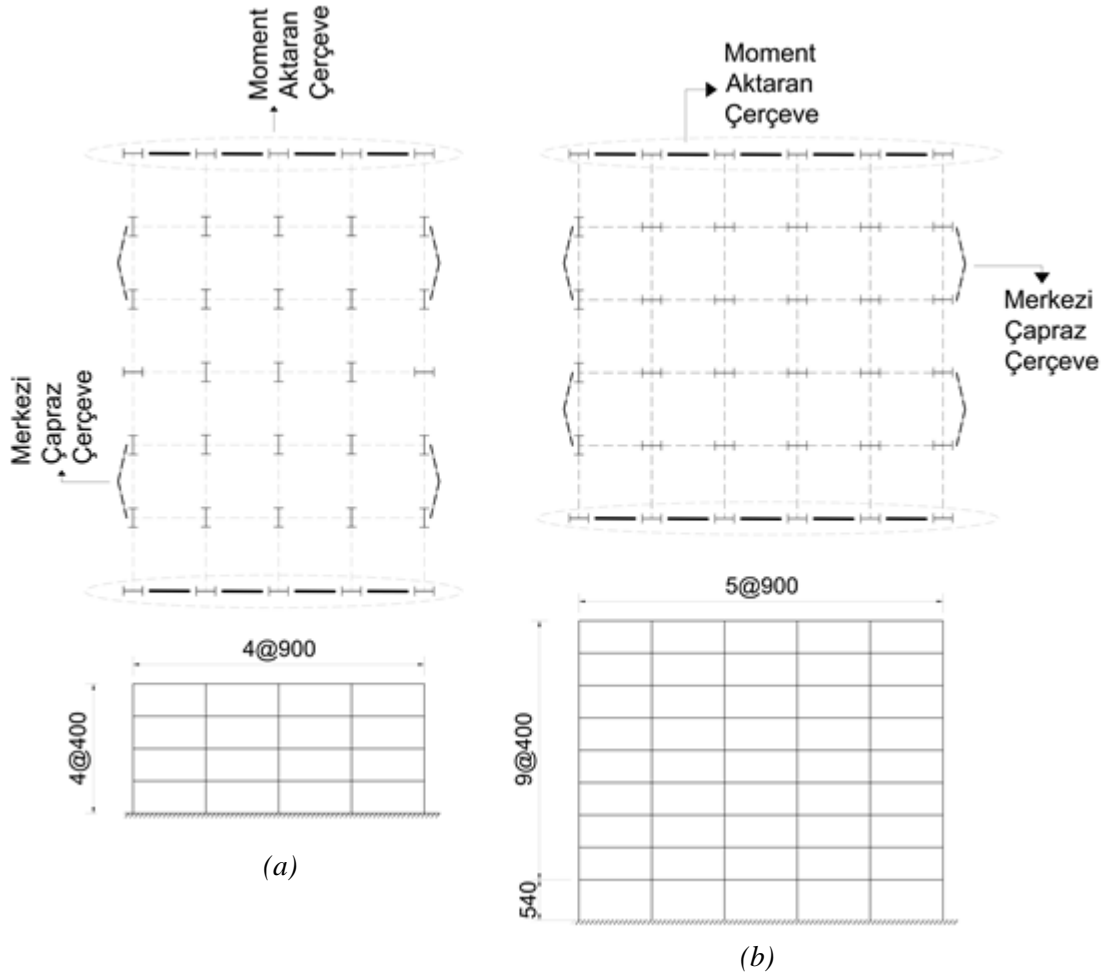
Lee ve Goel [10] yaptıkları çalışmada yapıların deprem altındaki doğrusal olmayan davranışını eşdeğer deprem yükü dağılımında yansıtılabilmek için farklı bir yaklaşımla yeni bir formül önermiştir (Denklem 3).

$$F_i = C_{vi}' \cdot V \quad (3)$$

$$C_{vi}' = (\beta_i - \beta_{i+1}) \cdot \left(\frac{w_n h_n}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \right)^{\alpha T^{-0.2}} \quad (4)$$

$$\beta_i = \frac{V_i}{V_n} = \left(\frac{\sum_{j=i}^n w_j h_j}{w_n h_n} \right)^{\alpha T^{-0.2}} \quad (5)$$

Yukarıdaki denklemlerde β_i kat kesme kuvvetini, w_n en üst katın kütlelerini, h_n zeminden en üst kata kadar olan yüksekliği, α ise Chao ve diğ. [11]'de 0.75 olarak önerilen sabit sayıyı temsil etmektedir.



Şekil 1. Tasarımı yapılan yapıların planları (a). 4 katlı MAÇÇ sisteme sahip bina, (b). 9 katlı MAÇÇ sisteme sahip bina

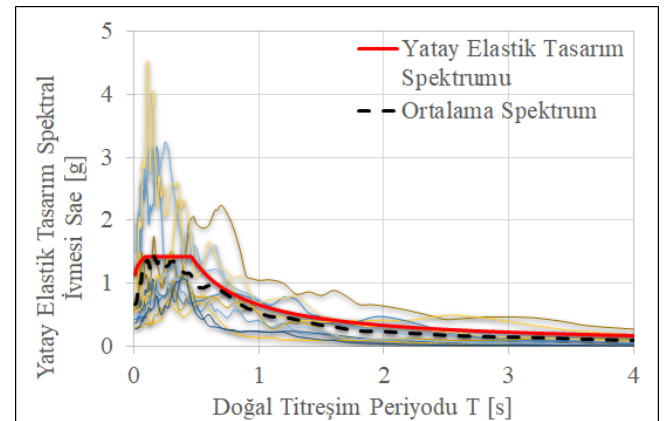
İncelenen Yapı Modelleri

Bu çalışma kapsamında tasarımları ŞDGT ve PTPT yöntemleriyle gerçekleştirilmiş 4 ve 9 katlı iki adet yapı incelenmiştir. Yatay yük taşıyıcı sistemleri x yönünde moment aktaran çelik çerçeve, y yönünde ise çaprazlı çelik çerçeveldir. Yapıların plan görünüşleri Şekil 1’de gösterilmiştir. Tüm yapı sistemlerinde malzeme olarak ASTM A992 Grade 50 kullanılmıştır. Çatı katında 4.3 kN/m^2 ölü yük ve 1 kN/m^2 hareketli yük, normal katlarda 5.3 kN/m^2 ölü yük ve 3 kN/m^2 hareketli yük kullanılmıştır. Yapıların tasarımında kullanılan deprem parametreleri Tablo 2’de verilmiştir [20].

Tablo 1. Deprem parametreleri

Parametre	Değer
Bina Önem Katsayısı (I)	1
Zemin Sınıfı	ZB
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (S_s)	1.58
1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_1)	0.82
Deprem Tasarım Sınıfı (DTS)	1
Kullanılacak Deprem Düzeyi	DD-2

Çalışmada kullanılan 4 ve 9 katlı iki yapının kesitleri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4 ‘de verilmiştir. İncelemelerde kullanılan doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemi için kullanılan 11 farklı deprem kaydı Tablo 5’te belirtilmiştir. Deprem kayıtlarından elde edilen spektrumların yatay elastik tasarım spektrumu ile kıyaslanması Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. DD-2 düzeyi yatay elastik tasarım spektrumu ile uyumlu yer hareketlerinden elde edilmiş spektrumlar

Tablo 3. 4 katlı yapının kesitleri

KAT	ŞDGT			PTPT		
	Dış kolon	İç kolon	Kiriş	Dış kolon	İç kolon	Kiriş
4	H400x422	H400x551	HE700A	H400x393	H400x678	HE500A
3	H400x422	H400x551	HE700A	H400x393	H400x678	HE650A
2	H400x551	H400x634	HE800A	H400x467	H400x744	HE800A
1	H400x551	H400x634	HE800A	H400x467	H400x744	HE800A

Tablo 4. 9 katlı yapının kesitleri

KAT	ŞDGT			PTPT		
	Dış kolon	İç kolon	Kiriş	Dış kolon	İç kolon	Kiriş
9	H400x382	H400x463	HE600A	H400x393	H400x593	HE400A
8	H400x382	H400x463	HE600A	H400x393	H400x593	HE500A
7	H400x463	H400x634	HE700A	H400x393	H400x593	HE600A
6	H400x463	H400x634	HE700A	H400x551	H400x818	HE650A
5	H400x509	H400x818	HE800A	H400x551	H400x818	HE700A
4	H400x509	H400x818	HE800A	H400x634	H400x900	HE800A
3	H400x634	H400x818	HE800A	H400x634	H400x900	HE800A
2	H400x634	H400x900	HE900A	H400x744	H400x990	HE800A
1	H400x818	H400x900	HE900A	H400x744	H400x990	HE800A

Tablo 5. Doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yönteminde kullanılan deprem kayıtları [15]

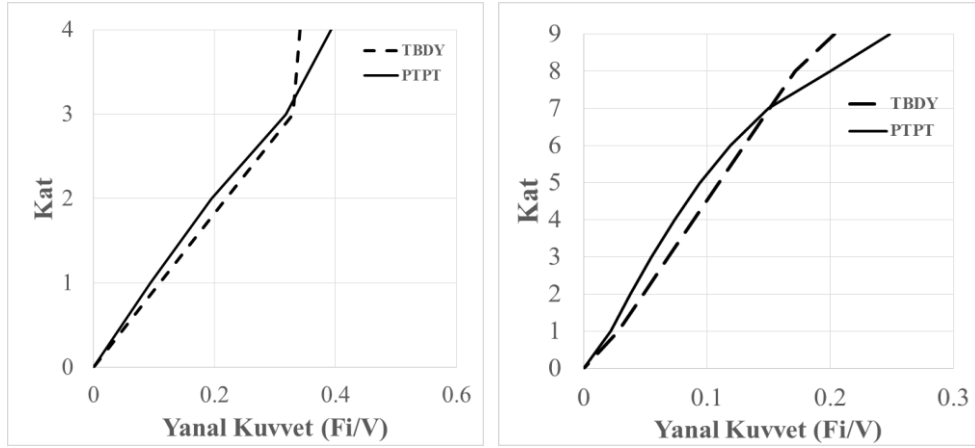
Kayıt Numarası	Deprem Adı	İstasyon
495	Nahanni_ Canada	Site 1
825	Cape Mendocino	Cape Mendocino
983	Northridge-01	Jensen Filter Plant Generator Building
1013	Northridge-01	LA Dam
1052	Northridge-01	Pacoima Kagel Canyon
1108	Kobe_ Japan	Kobe University
1111	Kobe_ Japan	Nishi-Akashi
1612	Duzce_ Turkey	Lamont 1059
1618	Duzce_ Turkey	Lamont 531
3548	Loma Prieta	Los Gatos - Lexington Dam
4456	Montenegro_ Yugoslavia	Petrovac - Hotel Olivia

BULGULAR VE TARTIŞMA

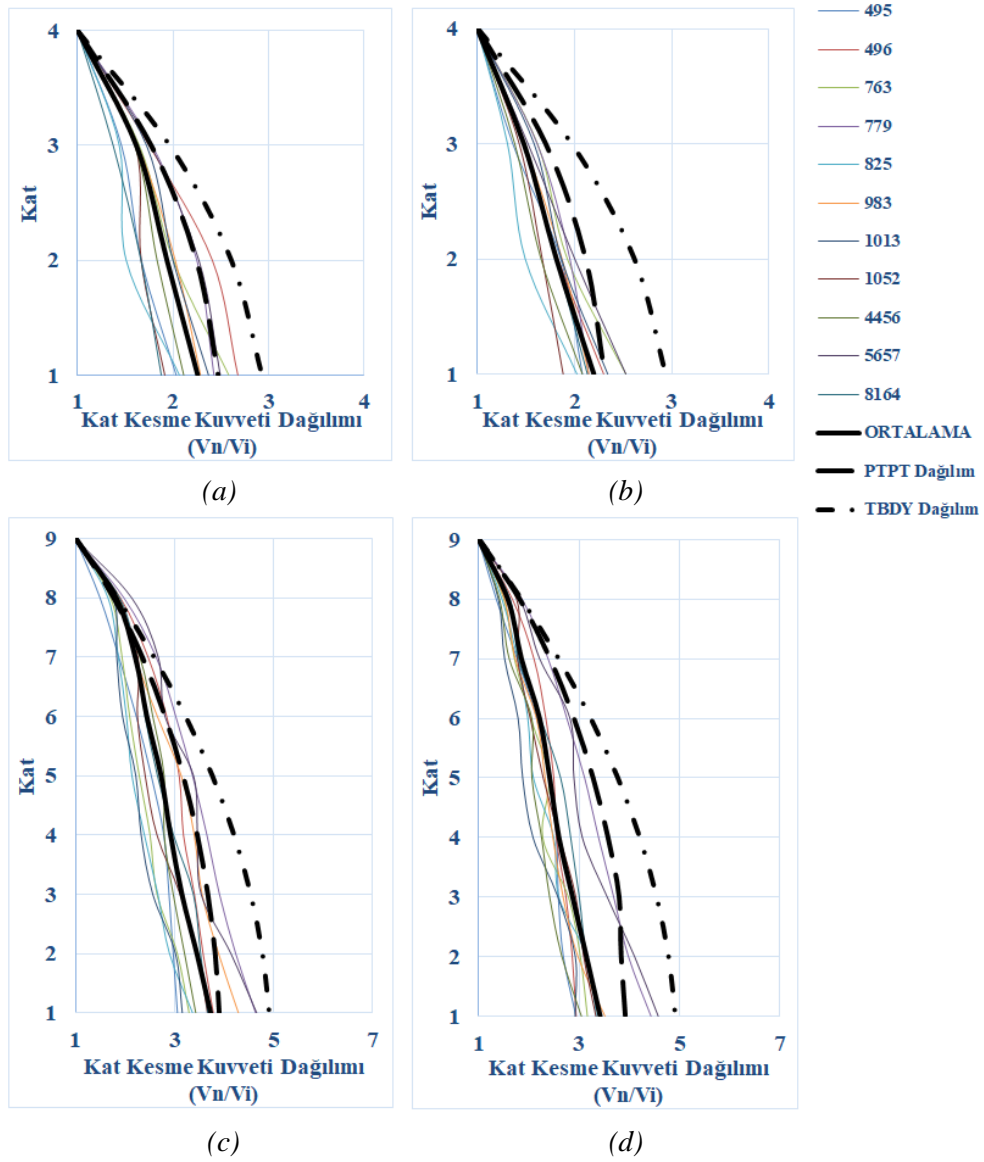
TBDY-2018'de verilen ve PTPT yönteminde kullanılan eşdeğer deprem yükü dağılımlarının karşılaştırılması için öncelikle kullanılan örnek iki yapının deprem yükü taşıyıcı sistemlerinin eleman ağırlıkları verilmiştir (Tablo 6). İncelenecek iki yapının toplam ağırlıkları birbirine yakındır. Bununla birlikte PTPT yöntemine göre tasarlanan yapılarda kolon ağırlıkları TBDY-2018'e göre nispeten fazla iken, kiriş elemanların ağırlıklarının fazla olduğu görülmüştür. Yöntemlerde kullanılan eşdeğer deprem yükü dağılımlarının kıyaslanması Şekil 3'te verilmiştir. Şekil 3.a'da 4 katlı yapı için ele alınan karşılaştırmada en üst kat haricinde dağılımların birbirine yakın değerlerde olduğu görülmüştür. En üst katta ise PTPT yönteminde kullanılan dağılımın daha yüksek değere sahip olduğu görülmüştür. Şekil 3.b'de PTPT yönteminde kullanılan dağılımın alt katlarda TBDY-2018'e göre nispeten daha düşük değerlerde olduğu en üst iki katta ise TBDY-2018 değerinin daha düşük değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 6. Yapı ağırlıkları ve karşılaştırılması

	4 Kat (kN)			9 Kat (kN)		
	Kiriş	Kolon	Toplam	Kiriş	Kolon	Toplam
PTPT	280.4	469.7	750.1	772.0	1626.1	2398.1
ŞDGT	302.6	431.5	734.1	856.2	1466.9	2323.1
PTPT/ŞDGT	0.926	1.088	1.02	0.902	1.108	1.03



Şekil 3. Yanal kuvvet dağılımları (a). 4 katlı yapı, (b). 9 katlı yapı



Şekil 4. DOZTAA yönteminden elde edilen kat kesme kuvveti dağılımlarının, PTPT ve TBDY-2018'de verilen dağılımlarla kıyaslanması (a). 4 katlı ŞDGT, (b). 4 katlı PTPT, (c). 9 katlı ŞDGT, (d). 9 katlı PTPT

Şekil 4'te ŞDGT ve PTPT yöntemlerine göre tasarlanmış yapılardan elde edilen kat kesme kuvveti dağılımları verilmiştir. 11 farklı deprem kaydı altında doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yönteminden elde edilen sonuçların ortalaması ve PTPT ile TBDY-2018'de kullanılan yanal yük dağılımlarından elde edilen kat kesme kuvveti dağılımları verilmiştir. PTPT yönteminde kullanılan dağılım TBDY-2018 yöntemine nazaran, doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemindeki sonuçlara daha yakın değerler vermiştir. TBDY-2018 yöntemindeki dağılımdan elde edilen sonuçlarla PTPT ve ortalama sonuçlar kıyaslandığında üst katlarda daha düşük, alt katlarda ise daha yüksek kat kesme kuvveti talebinin oluştuğu görülmüştür.

SONUÇ

Bu çalışmada yapının doğrusal olmayan davranışını dikkate alan yanal yük dağılımı ile yönetmeliklerce verilen yanal yük dağılımı incelenmiştir. Yanal yük dağılımının yapının doğrusal olmayan davranışını doğru şekilde yansıtması tasarım sürecinin önemli adımlarındandır. Yapılan incelemede doğrusal olmayan zaman tanım alanında hesap yöntemleri kullanılarak elde edilen maksimum kat kesme kuvveti dağılımları PTPT ve TBDY-2018'de belirtilen eşdeğer deprem yükü dağılımlarıyla karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre PTPT yönteminde kullanılan eşdeğer deprem yükü dağılımı TBDY-2018'e göre nispeten doğrusal olmayan davranışa daha yakın sonuçlar vermiştir.

Kaynaklar

- [1] R. K. Mohammadi, M. H. El Naggar, H. Moghaddam, "Optimum strength distribution for seismic resistant shear buildings", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 41, pp.6597–6612, 2004.
- [2] Sutat Leelataviwat, "Drift and yield mechanism based seismic design and upgrading of steel moment frames", *Doktora Tezi, İnşaat Mühendisliği, University of Michigan*. 1998.
- [3] Hajirasouliha, H. Moghaddam, "A new lateral force distribution for seismic design of structures", *ASCE Journal of Structural Engineering*, vol. 135, no. 8, pp. 906–915, 2009.
- [4] TBDY-2018, Deprem etkisi altında binaların tasarımı için esaslar, Afet ve Acil Durum Başkanlığı, Ankara, 2018.
- [5] ASCE/SEI 7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers, Virginia, 2010.
- [6] International Code Council (ICC), 2006. International Building Code, ICC, Birmingham, Ala.
- [7] S. B. Kharmale, S. Ghosh, "Performance-based plastic design of steel plate shear walls". *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 90, pp. 85–97, 2013.
- [8] G.C. Hart, "Earthquake forces for the lateral force code", *Struct. Des. Tall Special Build*, vol. 9, pp. 49–64, 2000.
- [9] FEMA 356, *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings*, Washington, 2000.
- [10] S-S. Lee, S.C. Goel "Performance-Based design of steel moment frames using target drift and yield mechanism", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Canada, Dept. of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, vol. 01, no. 17, 2001.
- [11] S. H. Chao, S. C. Goel, S. S. Lee, "A seismic design lateral force distribution based on inelastic state of structures", *Earthquake Spectra*, vol. 23, no. 3, pp. 547–569, 2007.
- [12] S. H. Chao, C. G. Subhash, "A seismic design method for steel concentric braced frames (CBF) for enhanced performance", *Proceedings of Fourth International Conference on Earthquake Engineering*, Taiwan, 2006.
- [13] S. H. Chao, C.G. Subhash, "Performance-based plastic design of special truss moment frames", *AISC Engineering Journal*, vol. 45, no. 2, pp. 127, 2008.
- [14] Gholamrezatabar, B. Ganjavi, G. Ghodrati Amiri, M. A. Shayanfar, "Modified Seismic Design Lateral Force Distribution for the Performance-Based Plastic Design (PBSD) of Steel Moment Structures Considering Soil Flexibility", *Scientia Iranica*, vol. 27, pp. 1050–1066, 2019.
- [15] M. F. Arat, "PTPT yöntemi ile ŞDGT yönteminin kıyaslanması," *Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Fakültesi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye*, 2020.
- [16] UBC, *Uniform Building Code*, International Conference of Building Officials, Whittier, 1994.
- [17] NEHRP, *Recommended Provisions for the Development of Seismic Regulation for New Buildings*, Building Seismic Safety Council, Washington, DC, 1994.
- [18] ATC-3-06, *Tentative provisions for the development of seismic regulations for buildings*. Applied Technology Council, San Francisco, California, 1978.
- [19] "SAP2000: Integrated Structural Analysis & Design Software." *Computer and Structures*, Berkeley, CA, 2020.
- [20] M. Zorlu, B. Akbaş, J.J. Shen, O. Şeker, "Contribution of gravity frames to seismic performance of steel moment resisting frames", *International conference on earthquake engineering and seismology*, Eskişehir, 2018.