

Yeni Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne Göre Çelik Yapı Tasarımı

Mustafa Zorlu¹ Bülent Akbaş²

¹ Doktora Öğrencisi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze-Kocaeli & İnşaat Yüksek Mühendisi, Avrasyaconsult-Marmaray Proje Ofisi, Yüksel Proje Uluslararası AŞ, İstanbul

² Prof. Dr., İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gebze Teknik Üniversitesi, Gebze-Kocaeli
muszorlu@hotmail.com & mzorlu@avrasyaconsult.com

Öz

Mevcut Türk Deprem Yönetmeliği (TDY-2007) değiştirilerek Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2016) adı altında 2016 yılı itibarıyla taslak olarak Mühendislik camiasının görüşüne sunulmuştur. Taslak yönetmelik içerik olarak yeni yapı tasarımı, mevcut binaların analizi ve güçlendirilmesi, çelik yapılar, ahşap yapılar, ön üretilmiş betonarme taşıyıcı sistemler, hafif çelik binalar, yığma binalar, deprem yalıtımı yapılacak binalar, zemin ve temel tasarımları, zemin dayanma yapıları gibi ana başlıkları barındırmaktadır. TBDY-2016, yapıların sismik tasarımı için göz önüne alınacak Tasarım İvme Spektrumu'nun çıkarım yöntemindeki değişiklik ile birlikte Betonarme ve Çelik yapıların tasarımına yönelik önemli yenilikler de getirmiştir. Bu çalışmamızda, Çelik yapı tasarımına yönelik yenilikleri incelemek adına 2 adet çelik bina yapısal analiz programları kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Daha evvel ASCE 7 (2005) kriterlerine göre analiz edilmiş olan 4- ve 9-katlı ofis binası niteliğindeki iki adet Çelik yapı TBDY-2016 gereklilikleri dikkate alınarak yeniden tasarlanmıştır. Her iki yapı da bir doğrultuda Yüksek Süneklikli Moment Çerçevesi (YSMÇ) taşıyıcı sistem ve buna dik doğrultuda Yüksek Süneklikli Çaprazlı Çerçeve (YSÇÇ) taşıyıcı sistem olarak ETABS programı ile analiz edilmiştir. Çelik yapılara ilişkin sonuçlar, eski ve yeni yönetmeliğin tasarım taban kesme kuvveti, görelî kat ötelemeleri ve kapasite tasarım ilkeleri bakımından mukayese edilmesi ve analiz neticesinde belirlenen Moment Çerçevesine ait kiriş ve kolon kesitlerinin ASCE tasarımında elde edilen kesitler ile mukayesesi olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Yeni Türk Deprem Yönetmeliği, Sismik Tasarım, Çelik Yapıların Tasarımı

Giriş

Ülkemizde bina türü yapılara yönelik deprem yer hareketine ilişkin uyulması gereken tasarım ölçütleri, çağdaş düzeydeki ilk deprem yönetmeliği olan “Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik (ABYYHY-1997)”de düzenlenmiştir. Söz konusu

Afet Yönetmeliği, 2007 yılı başı itibarıyla resmen yürürlüğe giren “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (DBYBHY-2007)” [2] olarak değiştirilmiştir. DBYBHY-2007’de mevcut binaların değerlendirilmesi ve güçlendirilmesine yönelik eklenen bölüm ile birlikte çelik yapıların tasarım ve hesap kuralları ile alakalı 4. Bölüm’de önceki yönetmeliğe göre köklü değişikliklere gidilmiştir. Bu değişiklikler bir tarafa bırakılırsa, 1997 Deprem Yönetmeliği’nde yaklaşık 20 yıl sonra çok daha kapsamlı bir değişikliğe gidilmiş ve yeni yönetmelik “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2016)” [1] adıyla 2016 yılında taslak olarak yayınlanmıştır. TBDY-2016, son yirmi yılda deprem mühendisliğinde meydana gelen gelişmelerin epreme dayanıklı bina tasarım gereklilikleri olarak ortaya konulduğu önemli yenilikleri barındırmaktadır.

TBDY-2016’da getirilen önemli yeniliklerin başında yapıların sismik tasarımı için göz önüne alınacak Tasarım İvme Spektrumu’nun çıkarım yöntemi gelmektedir. Öyle ki Tasarım İvme Spektrumu, benzer nitelikteki ASCE ve IBC gibi uluslararası şartnamelerde de öngörülen Kısa Periyot Bölgesi için Harita Spektral İvme Katsayısı (S_s), 1.0 Saniye Periyot Bölgesi için Harita Spektral İvme Katsayısı (S_1) ve bu parametrelere bağlı olan Yerel Zemin Etki Katsayıları (F_s & F_1) ile ilişkilendirilerek tayin edilmektedir. Yönetmelikte 4 adet deprem düzeyinden bahsedilmektedir. Tasarıma esas deprem yer hareketi olan DD-2, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan ve 475 yıllık tekrarlanma periyoduna sahip Deprem Düzeyi olarak öngörülmüş olup halihazırda kullanılan DBYBHY-2007 yönetmeliği ile bu bağlamda paralellik göstermektedir. Ayrıca ilk bakışta göze çarpan yenilikler olarak, Dayanım Göre Tasarım yönteminin yanında Şekil Değiştirmeye Göre Tasarım yönteminin belli şartlarda zorunlu kılınması, Hafif Çelik Binalar, Ön Üretilmiş Betonarme Taşıyıcı Sistemler, Ahşap Yapılar, Deprem Yalıtımı Yapılacak Binalar, Yüksek Bina ($h > 70,0m$) Tasarımı ve Performans Hedeflerine Göre Yeni Yapı Tasarımı için uyulması gereken hükümlerin bulunduğu bölümler sayılabilir. Detaya girildiğinde ise deprem bölgelerinde yapılacak binalar için minimum beton dayanım sınıfının BS25 olarak değiştirilmiş olması, betonarme taşıyıcı elemanlar için çatlamış kesit atalet değerlerinin kullanılması zorunluluğu, eşdeğer deprem yükü yöntemindeki kavramsal değişiklik ve bu yöntemde göz önüne alınan bina hakim doğal titreşim periyodu için yapı yüksekliğine bağlı sınırlama getirilmesi, göreceli kat öteleme sınır değerindeki değişiklik ve ikinci mertebe etkilerinin hesaba katılmasına dair amprik yaklaşım, düşey deprem etkisinin de hesaba katılması gerekliliği, taşıyıcı sistem modelleme kuralları, deprem etkilerini içeren yük birleşimlerinin belirlenmiş olması, çelik yapılarda tipik moment çerçevesi birleşim detaylarına dair uygulama sınırlarının geliştirilmiş olması, çelik çaprazlı çerçeve sistemlere ilişkin tipik birleşim detaylarının verilmiş olması ve çelik yapıların performans hedeflerinin değerlendirmesinde göz önüne alınacak kapasite ölçütlerinin belirlenmiş olması da öne çıkan belirgin değişiklikler olarak göze çarpmaktadır.

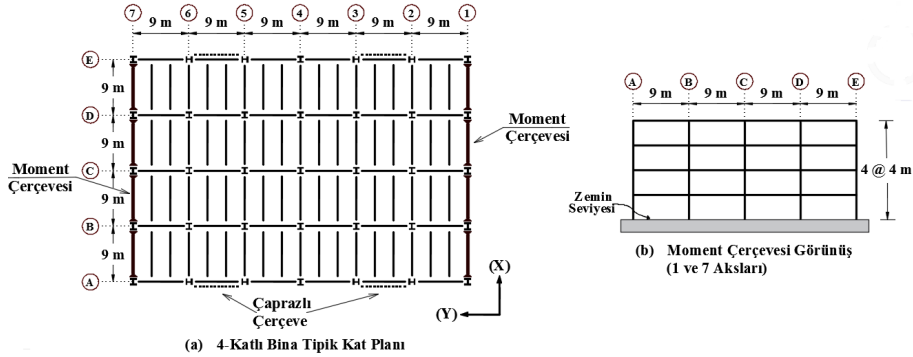
Bu çalışmanın temel amacı, deprem yükleri altında bina tasarımında yukarıda ifade edilen değişikliklere bir nebze de olsa dikkat çekebilmek adına halihazırda kullanımda olan DBYBHY-2007’den farklı yaklaşımlarla TBDY-2016’da getirilen gereksinimlerin bir kısmını uygulamalı olarak Tasarım Mühendislerinin dikkatine sunmaktır. Bu amaçla, daha evvel ASCE 7 (2005) kriterlerine göre analiz edilmiş olan 4- ve 9-katlı ofis binası niteliğindeki iki adet örnek Çelik yapı, TBDY-2016 gereklilikleri dikkate alınarak yeniden tasarlanmıştır. Her iki yapı da bir doğrultuda Yüksek Süneklikli Moment Çerçevesi (YSMÇ) taşıyıcı sistem ve buna dik doğrultuda Yüksek Süneklikli Çelik Çaprazlı (YSÇÇ)

taşıyıcı sistem olarak ETABS programı ile analiz edilmiştir. Söz konusu yapıların TBDY-2016'ya uygun sismik tasarımı, bu yönetmelik ile getirilen yeni sismik tasarım yaklaşımının aşamalı olarak detaylandırılmasıyla ortaya konulmuştur. Çelik yapılara ilişkin sonuçlar, eski ve yeni yönetmeliğin tasarım taban kesme kuvveti, görelî kat ötelemeleri ve kapasite tasarım ilkeleri bakımından mukayese edilmesi ve analiz neticesinde belirlenen Moment Çerçevesine ait kiriş ve kolon kesitlerinin ASCE tasarımında elde edilen kesitler ile mukayesesi olarak sunulmuştur.

TBDY-2016 Uyarınca Sismik Tasarım

4-Katlı ve 9-Katlı Ofis Binası Taşıyıcı Sistem Tanımı

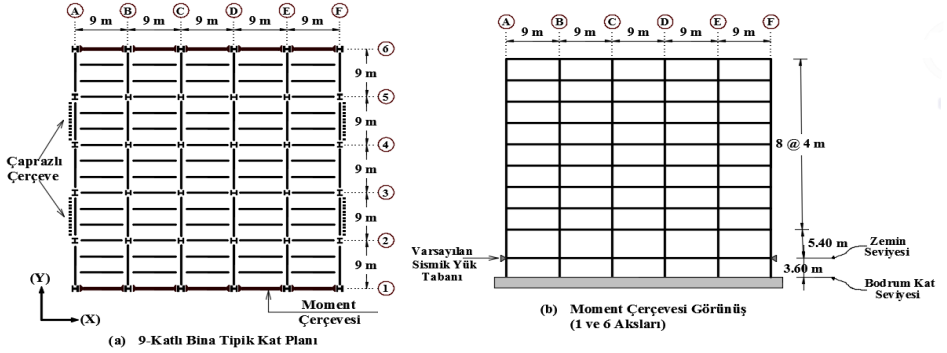
Bu çalışmada, plan ve görünüş detayları Şekil 1 ve 2'de gösterilen 4-Katlı ve 9-Katlı ofis binası niteliğindeki iki adet çelik yapı üç boyutlu olarak modellenmiş ve taşıyıcı sistemleri TBDY-2016 [1] yönetmeliğine uygun şekilde tasarlanmıştır. Söz konusu yapılar, taban alanları ve düşey ve yatay yük taşıyıcı sistem modelleme kabulleri bakımından, 1994 Northridge depremi sonrası FEMA sponsorluğundaki araştırma çalışmalarının bir parçası olarak geliştirilen ve tipik taşıyıcı sisteme sahip olan yapılardır (FEMA, 2000b). Şekil 1'de görüldüğü üzere 4-katlı olan bina plan boyutları 36m×54m, birbirine dik doğrultularda dört (×9m) ve altı (×9m) eşit açıklığa sahip ve tipik kat yüksekliği 4 m olan bir yapıdır. Moment Çerçevesinde kolonların temel bağlantısı ankastre olarak kabul edilmiştir.



Şekil 1. 4-Katlı Bina Tipik Kat Planı (a) ve Moment Çerçevesi (b) Görünüş Detayları

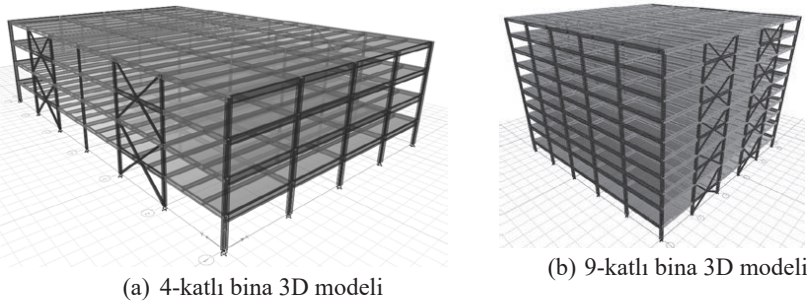
Şekil 2'de detayları görünen 9-katlı bina ise 45m×45m taban alanlı, her iki doğrultuda da beş (×9m) eşit açıklığa sahip ve tipik kat yüksekliği 4 m olan bir yapıdır. Bu yapı 3.6m yüksekliğinde bir bodrum kata sahip olup giriş kat yüksekliği 5.4m olacak şekilde tasarlanmıştır (bknz. Şekil 2/b). Bodrum kat seviyesinde kolon ile temel bağlantısında basit mesnet kabulü yapılmış olup çevre bodrum kat perdesinin bu seviyede yatay deplasmanı engellediği varsayımıyla sismik yük tabanı olarak zemin kat seviyesi kabul edilmiştir.

Taşıyıcı sistem, yapı planında teşkil edilen dış çerçevelerin bütün yatay yükleri karşılaması, buna mukabil içteki çerçevelerin sadece düşey yükleri taşıyacak şekilde boyutlandırılması ilkesine uygun tasarlanmıştır. Bu bağlamda her iki binanın bir doğrultudaki sismik yük taşıyıcı sistemi dış çerçevede Yüksek Süneklikli Moment Çerçevesi (YSMÇ), buna dik doğrultuda ise Yüksek Süneklikli Merkezi Çaprazlı Çerçeve (YSÇÇ) olarak tasarlanmıştır. Her bir YSMÇ ilgili doğrultudaki toplam sismik yüklerin $\frac{1}{2}$ 'sini, her bir YSÇÇ ise $\frac{1}{4}$ 'ünü karşılamaktadır. Taşıyıcı sistemde iç çerçevelerdeki kirişler düşey yük kolonlarına basit mesnetli bağlı olarak tasarlanmış olup yanıl yük taşımadıkları kabul edilmiştir. Taşıyıcı sistemi gösteren üç boyutlu (3B) analiz modeli görünüşleri Şekil 3'deki gibidir.



Şekil 2. 9-Katlı Bina Tipik Kat Planı (a) ve Moment Çerçevesi (b) Görünüş Detayları

Binaların doğrusal analizleri 29614 sayılı Resmi Gazete (04.02.2016) ile yayınlanan “Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik” [3]’de belirtilen Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) hükümlerine uygun olarak yapılmıştır. Normal katlarda eleman ağırlıkları hariç sabit yükler 5.0 kN/m^2 , hareketli yükler ise 3.0 kN/m^2 (çatı katında 4.0 kN/m^2 ve 1.0 kN/m^2) olarak sisteme etki ettirilmiştir. Tüm yapısal elemanlar, akma dayanımı $F_y=345 \text{ Mpa}$ olan yapısal çelik kalitesindeki Avrupa geniş başlıklı kesitler (HD, HE, IPE ve Kutu Profil) kullanılarak boyutlandırılmıştır. Kat döşemeleri Rijid Diyafram olarak modellenmiştir. TBDY-2016 gereklilikleri ve YDKT hükümlerine uygun olarak boyutlandırılan çerçeve sistemlere ilkin kesit bilgileri Tablo-3’de sunulmuştur.



(a) 4-katlı bina 3D modeli

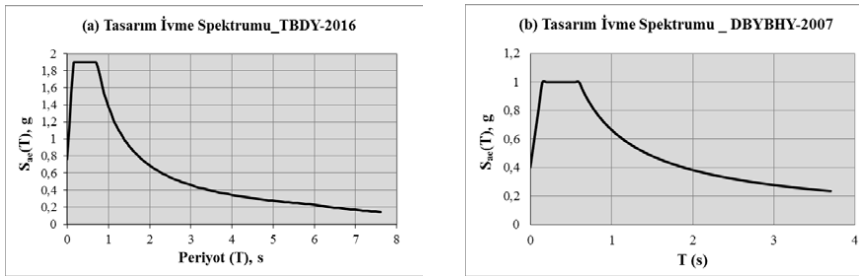
(b) 9-katlı bina 3D modeli

Şekil 3. 4-katlı (a) ve 9-katlı (b) Binaların 3B Görünüşleri

TBDY-2016 Uyarınca Sismik Tasarım Değişkenleri

TBDY-2016 uyarınca Elastik Tasarım İvme Spektrumu, DBYBHY-2007’de belirtilen yöntemden farklı olarak yerel deprem ve zemin koşullarını temsil eden değişkenlere bağlı olarak belirlenmektedir. Sismik tasarım değişkenleri TBDY-2016 Bölüm 2, Bölüm 3 ve Bölüm 4’de belirtilen esaslara göre aşamalı olarak aşağıdaki gibi belirlenmiştir. Ayrıca DBYBHY-2007 uyarınca elde edilen İvme Spektrumu ile de karşılaştırma yapılmıştır.

- Tasarım esas deprem yer hareketi düzeyi, 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan “DD-2” standart tasarım yer hareketidir. Söz konusu binaların Gebze Teknik Üniversitesi (GTÜ) yerleşkesinde inşa edileceği kabulü ile kısa periyod bölgesi ve 1.0 saniye periyod bölgesi için Harita Spektral İvme Katsayıları $S_s=1,58g$ ve $S_1=0,82g$ olarak belirlenmiştir [4].
- Bölgenin Yerel Zemin Sınıfı SPT/N değerlerinin $15 < N < 50$ olması sebebiyle TBDY-2016 Tablo 16.1 uyarınca “ZD”dir [10]. Fakat yapılan ön tasarımda, özellikle 9-katlı binanın YSMÇ doğrultusunda, yönetmeliğin öngördüğü göreceli kat ötelenme sınırının mevcut yapısal profil tablolarındaki Avrupa kesitleri ile sağlanamadığı görülmüştür. Bu sebeple tasarım, bölgenin “ZC” Yerel Zemin Sınıfına uygun olduğu kabulüne göre yapılmıştır.
- Yerel Zemin Etki Katsayıları Tablo 2.1 ve 2.2 uyarınca $F_s=1.2$ ve $F_1=1.4$ ’dür.
- Tasarım Spektral İvme Katsayıları “ S_{DS} ”= $S_s F_s= 1.896 g$ ve “ S_{D1} ”= $S_1 \gamma_F F_1 = 1.378 g$ ’dir. $\gamma_F=1.2$ olup yönetmeliğin 2.3.3 maddesi gereği $L_F < 15$ km kabulü ile faya yakınlık katsayısını ifade etmektedir. Bu noktada TBDY-2016, benzer uluslararası yönetmeliklerden (*ASCE, IBC vb.*) farklılık göstermektedir.
- Tasarım Spektrumu Köşe Periyotları $T_A=0.2(S_{D1}/S_{DS})= 0.145 s$ ve $T_B= S_{D1}/S_{DS}=0,727 s$.
- Yatay Elastik Tasarım İvme Spektrumu yönetmeliğin 2.3.5 maddesi uyarınca Şekil 4(a)’daki gibi elde edilmiştir. Bu noktada DBYBHY-2007 uyarınca, Deprem Bölgesi ‘1’, Etkin Yer İvme Katsayısı ‘ $A_0=0.4$ ’, Bina Önerm Katsayısı ‘ $I=1.0$ ’, Yerel Zemin Sınıfı ‘Z3’, Spektrum Karakteristik Periyotları ‘ $T_A=0.15$ ’ ve ‘ $T_B=0.60$ ’ değişkenlerine bağlı olarak elde edilen ivme spektrumu da karşılaştırma yapmak amacıyla Şekil 4(b)’deki gibi belirlenmiştir.



Şekil 4. TBDY-2016 (a) ve DBYBHY-2007 (b) uyarınca İvme Spektrumları

- Bu aşamada binaların Performans Hedefi ve Tasarım Yaklaşımının belirlenmesi için gerekli Bina Kullanım Sınıfı (BKS), Bina Önem Katsayısı (I), Deprem Tasarım Sınıfı

(DTS) ve Bina Yükseklik Sınıfı (BYS) gibi değişkenler söz konusu yapıların yükseliği (H_N) ve ' S_{DS} ' katsayısına bağlı olarak Tablo-1'de gösterildiği gibi belirlenmiştir.

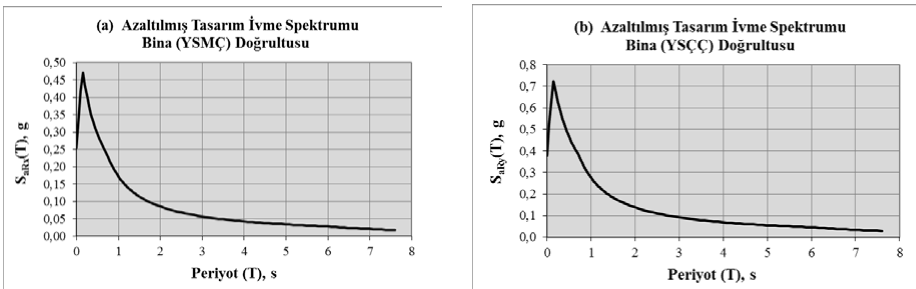
Tablo 1. Performans Hedefi ve Tasarım Yaklaşımı Değişkenleri

Değişken	4-Katlı Bina ($H_N=16.0m$)	9-Katlı Bina ($H_N=37.40m$)
'BKS':	Ofis Binaları için; BKS=3	Ofis Binaları için; BKS=3
'T':	Ofis Binaları için; I=1.0	Ofis Binaları için; I=1.0
'DTS':	$1.0 \leq S_{DS}=1.58$ & BKS=3 ise; DTS=1	$1.0 \leq S_{DS}=1.58$ & BKS=3 ise; DTS=1
'BYS':	$DTS=1$ & $10.5 < H_N \leq 17.5$ ise; BYS=6	$DTS=1$ & $28 < H_N \leq 42$ ise; BYS=4

- Yukarıdaki bilgiler ışığında yönetmeliğin Tablo 3.4/a'sı uyarınca (DD-2 için, $DTS=1$ & $BYS \geq 2$) her iki bina için göz önünde bulundurulacak normal performans hedefi Can Güvenliği (CG) ve tasarım yaklaşımı da Dayanıma Göre Tasarım (DGT)'dir.
- DGT hesap yönteminde doğrusal elastik deprem yüklerinin azaltılmasında esas alınacak Deprem Yüğü Azaltma Katsayısı $R_a(T)$ yeni yönetmelikte, Taşıyıcı Sistem Davranış Katsayısı (R), Dayanım Fazlalığı Katsayısı (D) ve Yapı Önem Katsayısı (I)'na bağlı olarak belirlenmektedir. Yönetmeliğin Tablo 4.1/c'si uyarınca YSMÇ için $R=8$ ve $D=3$, YSCÇ için ise $R=5$ ve $D=2$ 'dir. DBYBHY-2007'den farklı olarak yeni yönetmelikte $R_a(T)$ 'nin Tasarım İvme Spektrumu'ndaki Köşe Periyod uygulama sınırının T_B olarak değiştirildiği görülmektedir. Yeni yönetmeliğin 4.2.1.4 maddesi uyarınca;

- $T > T_B$ ise YSMÇ için $R_a(T)=8$ ve YSCÇ için $R_a(T)=5$,
- $T \leq T_B$ ise YSMÇ için $R_a(T)=3+5(T/T_B)$ ve YSCÇ için $R_a(T)=2+3(T/T_B)$, olmaktadır.

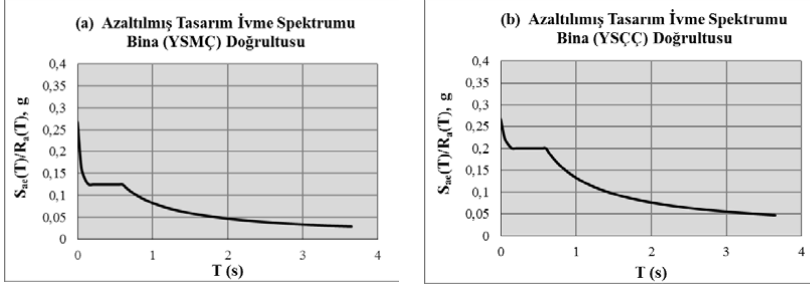
Bu doğrultuda TBDY-2016 uyarınca taban kesme kuvveti, elemanlara etkiyecek kuvvetler ve kat ötelenmelerinin belirlenmesinde kullanılacak Azaltılmış Tasarım İvme Spektrumu YSMÇ ve YSCÇ için Şekil-5'de gösterildiği gibi elde edilmiştir.



Şekil 5. TBDY-2016 Azaltılmış Tasarım İvme Spektrumları (a) YSMÇ & (b) YSCÇ

- Bu noktada yapıya etkiyecek deprem yükünün birincil etkeni olan yatay ivmenin güncel ve yeni taslak yönetmelik gereklilikleri altında ne oranda farklılaştığını kıyaslayabilmek adına azaltılmış tasarım ivme spektrumu DBYBHY-2007 Madde 2.8.1'e de uygun

olarak Şekil-6'daki gibi elde edilmiştir. Söz konusu yönetmelik uyarınca YSMÇ için $R=8$ ve YSÇÇ için $R=5$ olup, $R_a(T)$ 'nin spektrum köşe periyod uygulama sınırı ise T_A 'dır.



Şekil 6. DBYBHY-2007 Azaltılmış Tasarım İvme Spektrumları (a) YSMÇ & (b) YSÇÇ

- TBDY-2016 uyarınca hesapta göz önüne alınacak ivme değerlerinin DBYBHY-2007 ivme değerlerine nispeten yaklaşık 2.1 kat daha elverişsiz olduğu görülmektedir (örn. 1.0s periyod noktası için YSMÇ yönünde 0.17g/0.08g ve YSÇÇ yönünde 0.28g/0.133g).
- Çelik yapıların tasarımında göz önüne alınan YDKT yaklaşımında kullanılacak yük birleşimleri, yönetmeliğin 9.2.5 ve 9.2.6 maddelerinde tarif edilmektedir. DBYGHY-2007'den farklı olarak, yeni yönetmeliğin 4.4.3 ve 4.4.4 maddeleri gereğince Düşey Deprem Etkisi ($E_d^{(Z)}$) de yaklaşık yöntemle ilave Sabit Yük (G) etkisi olarak yük birleşimlerinde hesaba katılmaktadır. Yük birleşimleri aşağıda belirtildiği gibidir.

i) 1.4G

ii) 1.2G + 1.6Q

iii) $1.2G + Q + E_d^{(H)} + 0.3E_d^{(Z)} \rightarrow (1.2G + *0.38G) + Q + E_d^{(H)}$

iv) $0.9G + E_d^{(H)} - 0.3E_d^{(Z)} \rightarrow (0.9G - *0.38G) + E_d^{(H)}$

v) $1.2G + Q + DE_d^{(H)} + 0.3DE_d^{(Z)} \rightarrow (1.2G + *1.14G) + Q + 3E_d^{(H)}$

vi) $0.9G + DE_d^{(H)} - 0.3DE_d^{(Z)} \rightarrow (0.9G - *1.14G) + 3E_d^{(H)}$

* TBDY-2016 Madde 4.4.3.2; $E_d^{(Z)} \approx (2/3) S_{DS} G = (2/3) \times 1,896 \times G \approx 1,264G$

Dayanım fazlalığı katsayısı YSMÇ için $D=3$ ve YSÇÇ için $D=2$ olup yukarıda ifade edilen nihai yük birleşimleri örnek olması açısından YSMÇ'nin tahkikinde kullanılan birleşimler olarak gösterilmiştir. Dikkat edileceği üzere (iii) ve (v) no.lu birleşimlerde sabit yük etkisi ciddi oranda artmıştır. Narinlik etkisi bakımından Çelik Yapılarda bu durum ilave tesirlere neden olacaktır. Bununla birlikte (vi) no.lu kombinasyon sonucunda oluşacak negatif sabit yük etkisi de birleşim noktalarının tahkikinde ilave tesilere neden olabilecektir (örn. YSMÇ'nin temel bağlantı detayının eğilme kapasitesi).

Analiz Sonuçları

Sismik hesap yöntemi olarak Mod Birleştirme Yöntemi (MBY) tercih edilmiştir. %5 ek dış merkezlik etkileri göz önüne alınmıştır. Binalarda yönetmelikte öngörülen planda ve düşeyde düzensizlik mevcut değildir. TDBY-2016 madde 4.8.4'e uygun olarak, MBY'den elde edilen toplam taban kesme kuvveti ile Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemine (EDYY) göre belirlenen taban kesme kuvveti karşılaştırılmış ve gerekli durumda yükler arttırılmıştır. TDBY-2016'da EDYY yönteminde hesaba katılacak temel periyot için yapı yüksekliğine bağlı olarak $T_p^{\max}=0.04H_N$ sınırlaması getirilmiştir. Bu şekilde bir sınırlama DBYBHY-2007'de öngörülmemektedir. Bu noktada TDBY-2016, benzer uluslararası yönetmeliklerle paralellik göstermektedir (örn. ASCE 7-10). Binaların temel periyotları (T_p), yaklaşık yöntemle hesaplanan periyotlar ($T_p^{\max}$), EDYY'ye göre hesaplanan taban kesme kuvveti (V) ve MBY ile elde edilmesi gereken hesaba esas minimum taban kesme kuvveti (V_t) Tablo 2'de sunulmuştur. Yönetmelikler arasında kıyaslama yapabilmek adına aynı değerler DBYBHY-2007 uyarınca da hesap edilerek söz konusu tabloya işlenmiştir.

Tablo 2. TDBY-2016 ve DBYBHY-2007 Uyarınca Taban Kesme Kuvvetleri

	Bina	Deprem Yönü	T_p (sn)	$T_p^{\max}$ (sn)	T_{hesap} (sn)	$S_{aR}(T)$ (m/sn ²)	Top. Kütle (kN.sn ² /m)	V (kN)	V_t (kN)
TBDY 2016	4-Katlı	YSMÇ	0.87	0.65	0.65	0.254	5014.4	12479.8	9983.8
		YSÇÇ	0.48	0.65	0.48	0.475	5014.4	23365.8	19430.3
	9-Katlı	YSMÇ	2.14	1.49	1.49	0.115	12326.7	13906.4	11125.1
		YSÇÇ	1.43	1.49	1.43	0.193	12326.7	23338.5	21064.4
DBYBHY 2007	4-Katlı	YSMÇ	0.87	-	0.87	0.093	5014.4	4567.8	3818.5
		YSÇÇ	0.48	-	0.48	0.20	5014.4	9838.2	7951.1
	9-Katlı	YSMÇ	2.14	-	2.14	0.045	12326.7	5457.2	4759.3
		YSÇÇ	1.43	-	1.43	0.10	12326.7	12065.8	10178.5

Tablo 2'de görüldüğü üzere TBDY-2016 uyarınca hesap edilen 4- ve 9-katlı binalara etkiyecek taban kesme kuvvetleri, DBYBHY-2007'ye göre hesap edilen kuvvetlerden yaklaşık 2~2.5 kat daha fazladır. Bu durumun başlıca nedeni, Şekil 4 ve Şekil 5'de sonuç olarak gösterildiği üzere, yeni yönetmeliğin yapılara etkiyecek spektral ivme değerlerinin yerel deprem ve zemin koşullarına bağlı olarak Türkiye'nin her bölgesi için ayrı ayrı belirlenmesi neticesinde ivme değerlerinin artmış olmasıdır. Tablo 2'de gösterilen tesirlere ve yük birleşimlerine bağlı olarak, TBDY-2016 gerekliliklerine uygun belirlenen taşıyıcı eleman kesitleri Tablo 3'de gösterildiği gibidir.

Tablo 3. TBDY-2016 Uyarınca Analiz Neticesinde Belirlenen Eleman Kesitleri

Kat	Yüks. Sünek. Moment Çerçevesi			Yüks. Sünek. Çapraz Çerçeve		Düşey Yük Çerçeve Sistemi		
	Dış Kolon	İç Kolon	Kiriş	Çapraz Elemanı	Kolon	Kolon	Tali Kiriş	Ana Kiriş
4-Katlı B.	4	HD 400×677	HD 400×818	HE 800B	TUBO 160×160×17.5	HE 280B	HE 220 B	IPE A 450
	3	HD 400×677	HD 400×818	HE 800B	TUBO 200×200×20	HE 280B	HE 220 B	IPE A 500
	2	HD 400×818	HD 400×990	HE 900B	TUBO 220×220×20	HD 320×300	HE 280 B	IPE A 500
	1	HD 400×818	HD 400×990	HE 900B	TUBO 240×240×20	HD 320×300	HE 280 B	IPE A 500
9-Katlı Bina	9	HD 400×509	HD 400×634	HE 600B	TUBO 140×140×20	HE 280B	HE 220 B	IPE A 450
	8	HD 400×509	HD 400×634	HE 600B	TUBO 180×180×20	HE 280B	HE 220 B	IPE A 500
	7	HD 400×634	HD 400×744	HE 700B	TUBO 180×180×20	HD 400×216	HE 280 B	IPE A 500
	6	HD 400×634	HD 400×744	HE 700B	TUBO 200×200×20	HD 400×216	HE 280 B	IPE A 500
	5	HD 400×744	HD 400×990	HE 800B	TUBO 200×200×20	HD 400×382	HE 320 B	IPE A 500
	4	HD 400×744	HD 400×990	HE 800B	TUBO 200×200×25	HD 400×382	HE 320 B	IPE A 500
	3	HD 400×818	HD 400×990	HE 800B	TUBO 200×200×25	HD 400×551	HD 360×162	IPE A 500
	2	HD 400×818	HD 400×1086	HE 900B	TUBO 240×240×25	HD 400×551	HD 360×162	IPE A 500
	1	HD 400×990	HD 400×1086	HE 900B	TUBO 240×240×25	HD 400×818	HD 360×196	IPE A 500
	B1	HD 400×990	HD 400×1086	HE 600B	TUBO 240×240×25	HD 400×818	HD 360×196	IPE A 500
								IPE O 600

Sismik Elemanların Enkesit Koşulları Kontrolü

TBDY-2016'da sismik elemanların Enkesit Narinlik Oranı Koşulları DBYBHY-2007'ye göre elverişsiz yönde değiştirilmiştir. Öreğin, YSÇÇ'de çapraz elemanları kutu kesitli olup yeni yönetmelikte sünek düzeyi yüksek olarak tasarlanan söz konusu elemanlar için Narinlik Oranı (b/t) sınırı ($0.55\sqrt{E/F_y}$) olarak belirtilmiştir. DBYBHY'de bu sınır ($0.7\sqrt{E/F_y}$)'dir. Aynı şekilde kolon ve kiriş elemanları için de narinlik oranı uygulama sınırlarının mevcut yönetmelikteki sınır değerlere nazaran elverişsiz yönde değiştirildiği görülmüştür [örn, $C_a \leq 0.125$ ise $h/t_w < 2.45\sqrt{E/F_y}(1-0.93C_a)$]. Bu bağlamda Tablo 3'de belirtilen tüm sismik yük elemanlarının enkesit narinlik oranı koşullarını sağladığı teyit edilmiştir.

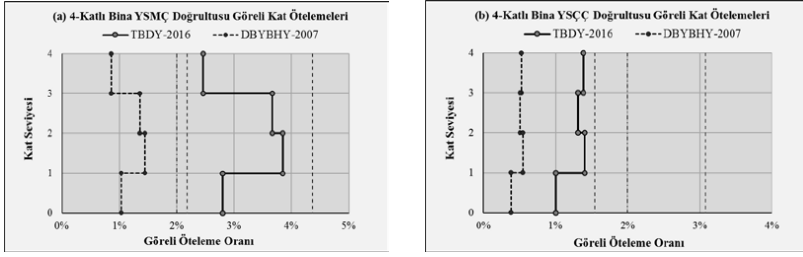
Görelî Kat Ötelemelerinin Sınırlandırılması ve İkinci Mertebe Etkileri

DBYBHY-2007 madde 2.10 uyarınca etkin görelî kat öteleme sınırı ($\delta_{i,max}/h_i$) ≤ 0.02 'dir. TBDY-2016'da ise görelî kat ötelemesi sınır değeri olarak, bina taşıyıcı elemanları ile ikincil elemanlar olan duvarlar ve cephe elemanlarının arayüzlerinde esnek derz veya esnek bağlantı detayı olup olmadığına bağlı olarak iki farklı sınır değeri belirtilmiştir. Şöyle ki;

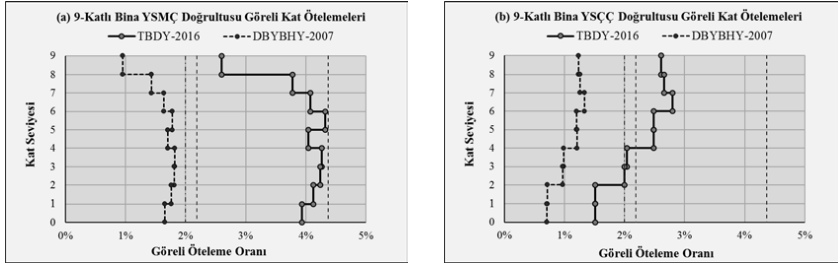
- Esnek derz detayı kullanılmaması durumunda; $\lambda(\delta_{i,max}/h_i) \leq 0.008$,
- Esnek derz detayı kullanılması durumunda; $\lambda(\delta_{i,max}/h_i) \leq 0.016$, olmaktadır.

Bu ifadelerde (λ) katsayısı binanın göz önüne alınan deprem doğrultusundaki hakim titreşim periyodu için 50 yılda aşılma olasılığı %50 olan "DD-3" deprem yer hareketine ait elastik tasarım spektral ivme değerinin "DD-2" depreminin elastik tasarım spektral ivme değerine oranı ($Sae(T)^{DD-3}/Sae(T)^{DD-2}$) olarak ifade edilmektedir. TBDY-2016'nın bu yaklaşımıyla her bina ve her doğrultu için deprem ve taşıyıcı sistem özelliklerine bağlı olarak farklı görelî kat öteleme sınır değeri tatbik edilecektir. Öyle ki 4-katlı binanın YSMÇ doğrultusunda $\lambda=0.366$ ve YSÇÇ doğrultusunda $\lambda=0.519$, buna mukabil 9-katlı binanın her iki doğrultusu için $\lambda=0.366$ olarak hesaba katılmıştır. Bu bağlamda, eleman kesit bilgileri Tablo 3'de verilen binalarımızın ofis tipi yapı olduğu, cephe kaplamasının bina dış yüzünde

olacağı ve böylece uygun esnek bağlantı detayının sağlandığı varsayımıyla görel kat öteleme sınır değeri 0,016 olarak kabul edilmiştir. Bu doğrultuda $[(\delta_{i,max}/h_i) \leq (0.016/\lambda)]$ olduğu kabulüyle Görel kat öteleme sınır değeri, 4-katlı binanın YSMÇ doğrultusunda 4.37%, YSÇÇ doğrultusunda 3.08% ve 9-katlı binanın her iki doğrultusu için 4.37% olarak belirlenmiş olup DBYBHY-2007 ile mukayese edilmiş sonuçlar Şekil 7 ve Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 7. 4-Katlı Bina Görel Kat Öteleme Değerleri (a) YSMÇ ve (b) YSÇÇ



Şekil 8. 9-Katlı Bina Görel Kat Öteleme Değerleri (a) YSMÇ ve (b) YSÇÇ

Şekil 8(a) ve Şekil 9(a)’da görüleceği üzere TB DY-2016 uyarınca yapılan çözümde özellikle YSMÇ doğrultusunda 4- ve 9-katlı yapı için sırasıyla 3.85% (2.kat) ve 4.32% (6.kat) görel kat öteleme değerleri elde edilmiş olup öngörülen sınır değere (4.37%) oldukça yakındır. Buna mukabil aynı kesitler ile DBYBHY-2007’ye uygun yapılan çözümde 2.0% sınır değeri rahatlıkla sağlanmaktadır.

TB DY-2016’ya uygun tasarımda karşımıza çıkan bir diğer yenilik ise ikinci mertebe etkilerinin değerlendirme yöntemidir. DBYBHY-2007’de İkinci Mertebe Gösterge Değeri (θ_I)’nin herhangi bir katta sağlanamaması durumunda taşıyıcı sistem rijitliğinin yeterli oranda artırılması şart koşulmaktadır. Buna mukabil TB DY-2016’da, dayanım fazlalığı katsayısı (D), taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) ve taşıyıcı sistem histeretik davranış katsayısı ($C_h=I$)’na bağlı olarak değiştirilen ikinci mertebe gösterge sınır değerinin ($\theta_{II,max} \leq 0.12D/C_hR$) her hangi bir katta sağlanamaması durumunda, taşıyıcı sistem rijitliğinin artırılması seçeneğine alternatif olarak, göz önüne alınan deprem doğrultusundaki tüm iç kuvvetlerin İkinci Mertebe Büyütme Katsayısı ($\beta_{II}=0.88+C_hR\theta_{II,max}/D \geq 1$) ile artırılarak hesap yapılabileceği belirtilmektedir. Bu doğrultuda yapılan tahkikler neticesinde 4-katlı binada ($\theta_{II,max}$) sınır değeri her iki doğrultuda da sağlanmış iken, 9-katlı binanın YSMÇ doğrultusundaki 1.katta sınır değeri

sağlanamamış ve bu yöndeki tüm iç kuvvetler $\beta_{II}=1,025$ oranında artırılarak hesap yapılmıştır. Bu duruma ilişkin hesap özeti aşağıdaki gibidir.

9-Katlı Bina YSMÇ Doğrultusu İkinci Mertebe Büyütme Katsayısı

$\theta_{II,max}^{(X)} = 0,0535$	1. kat
$R^{(X)} = 8$	TBDY-2016 Tablo 4.1
$D^{(X)} = 3$	TBDY-2016 Tablo 4.2
$C_h = 1$	TBDY-2016 Madde 4.9.2.2
$0,12D/(C_h R^{(X)}) = 0,045$	TBDY-2016 Madde 4.9.2.2
$\theta_{II,max}^{(X)} \leq 0,12D/(C_h R^{(X)}) = \text{Sağlanamadı}$	TBDY-2016 Madde 4.9.2.2
$\beta_{II}^{(X)} = 1,025$	TBDY-2016 Madde 4.9.2.3

YSÇÇ Stabilité Hesapları

DBYBHY-2007’de süneklik düzeyi yüksek merkezi çapraz elemanlar için öngörülen Narinlik Oranı (KL/i) sınır değeri ‘ $4.0\sqrt{E/F_y}$ ’ iken bu sınır TBDY-2016’da ‘ $KL/i \leq 200$ ’ olarak değiştirilmiştir. 4- ve 9-katlı binalarımızın YSÇÇ’deki tüm çapraz elemanlarında narinlik şartı sağlanmış olup kritik elastik burkulma gerilmesine bağlı olarak hesap edilen basınç yükü dayanım kapasiteleri de (ϕP_n) yeterli bulunmuştur. Bu bağlamda 4- katlı binanın birinci kat seviyesindeki çapraz elemanlarında ‘ $\phi P_n = 3944,5 \text{ kN} > P_u = 3903,0 \text{ kN}$ ’, 9- katlı binanın birinci kat seviyesindeki elemanlarda ise ‘ $\phi P_n = 4202,2 \text{ kN} > P_u = 4173,2 \text{ kN}$ ’ sağlandığı görülmüştür.

YSÇÇ taşıyıcı sisteminde kolon elemanlarında narinli şartı ‘ $KL/i \leq 4.0\sqrt{E/F_y}$ ’ olarak belirlenmiştir. Tüm kolon elemanları narinlik şartını sağlamaktadır. TBDY-2016 madde 9.6.2.4 uyarınca çaprazlı çerçevedeki kolon ve kiriş elemanı dayanımlarının belirlenmesinde yük birleşimlerdeki deprem etkilerinin yerine çapraz elemanlarının çekme ve basınç dayanımlarının göz önüne alındığı mekanizma durumlarından elde edilen elverişsiz yük etkileri kullanılacaktır. Bu gereklilik esasen çelik çaprazlı çerçevelerde optimize tasarım yapılması doğrultusunda tasarımcıyı yönlendirmektedir. Gerektiğinden fazla dayanıma sahip olarak boyutlandırılacak çapraz elemanı, kapasitesi doğrultusunda, sistemdeki kolon ve kiriş eleman boyutlarının da nispeten elverişsiz olması sonucunu doğuracaktır. Bu doğrultuda 4-katlı binamızın birinci katındaki kolon elemanı, öngörülen mekanizma durumunda, sistemdeki çapraz elemanlarının kapasitelerine bağlı ‘ $P_u = 1.58G + Q + \Sigma(T + P_2)\cos\theta$ ’ yükleme kombinasyonu altında ‘ $\phi P_n = 9886,8 \text{ kN} > P_u = 8862,4 \text{ kN}$ ’ değerini, 9-katlı binamızın birinci katındaki kolon elemanı ise ‘ $\phi P_n = 27480,5 \text{ kN} > P_u = 27392,8 \text{ kN}$ ’ değerini sağlamıştır. Buna mukabil, deprem etkili yük birleşimleri ($1.96G + Q + 2E_d^{(HY)}$) ise 4- ve 9-katlı binamızda bu seviyede sırasıyla ‘ $P_u = 10351,1 \text{ kN}$ ’ ve ‘ $P_u = 32168,9 \text{ kN}$ ’ yük etkileri vermektedir.

YSMÇ Stabilité Hesapları

YSMÇ’deki kolon ve kiriş elemanların tasarımında görelî kat öteleme sınırlaması ile birlikte kolonların kirişlerden daha güçlü olması koşulu ($\Sigma M_{pc}/\Sigma M_{pb} \geq 1$) belirleyici etken

olmuştur. DBYBHY-2007'den farklı olarak TBDY-2016'da, kolon elemanı eğilme kapasitesi hesabında elverişsiz normal kuvvet etkisi de göz önüne alınmakta ' $\Sigma M_{pc} = \Sigma W_{pc}(F_{yc} - P_{uc}A_g)$ ', kiriş elemanı kapasitesi hesabında ise eleman üzerindeki sabit ve hareketli yük etkisiyle hesaplanan ilave eğilme etkisi (M_{uv}), artık kapasite katsayısı ($1.1R_y$) ile ayrıca artırılmamaktadır ' $\Sigma M_{pb} = \Sigma(1.1R_y W_{pc}F_{yb} - M_{uv})$ '. Bu bağlamda 4- katlı binanın ikinci kat seviyesindeki iç düğüm noktasında $\Sigma M_{pc}/\Sigma M_{pb}=1.13$, 9-katlı binanın ise birinci kat seviyesindeki iç düğüm noktasında $\Sigma M_{pc}/\Sigma M_{pb}=1.26$ olarak sağlanmıştır. Ayrıca tüm kolon ve kiriş elemanlarının kesme, eğilme ve normal kuvvet etkileri altındaki dayanım kontrolleri yeni Çelik Yapılar Yönetmeliği'ndeki gerekliliklere uygun olarak yeterli güvenlikte sağlanmıştır.

Aynı özellikteki 4- ve 9-katlı iki adet yapı J. Shen, T.A. Sabol, B. Akbaş ve N. Sutchiewcharn [5] tarafından yürütülen bir çalışma kapsamında, söz konusu yapıların USA-Los Angeles'da yapıldığı varsayımıyla $S_s=2.0g$, $S_1=1.0g$ ve $R=8$ değerleri gözetilerek, ASCE 07 (2005) [6] gerekliliklerine uygun çözümlenmiş ve her iki bina sırasıyla 6405.5 kN ve 8675.0 kN taban kesme kuvvetine göre boyutlandırılmıştır. Bu çalışma neticesinde belirlenen YSMÇ taşıyıcı sistemine ait eleman kesitleri Tablo 4'de gösterilmiştir. TBDY-2016 uyarınca belirlenen taban kesme kuvvetlerinin (Tablo 2) ASCE 07'ye nazaran ~ 1.50 & 1.30 kat mertebelerinde daha fazla olmasına rağmen, görelî kat ötelemesinde elverişli olan sınır değerin (4.37%) gözetilmesi gibi etkenler de düşünüldüğünde sismik yük altında her iki yönetmelik açısından benzer tasarım sonucunun elde edildiği çıkarımı yapılabilir.

Tablo 4. ASCE 07 Uyarınca Analiz Neticesinde Belirlenen Eleman Kesitleri [5]

(a) 4-Kalı Bina YSMÇ Eleman Kesitleri				(b) 9-Kalı Bina YSMÇ Eleman Kesitleri			
Kat	Dış Kolon	İç Kolon	Kiriş	Kat	Dış Kolon	İç Kolon	Kiriş
4	W 14×257	W 14×342	W 27×94	9	W 14×257	W 14×311	W 24×55
3	W 14×257	W 14×342	W 30×148	8	W 14×257	W 14×311	W 27×94
2	W 14×342	W 14×426	W 30×148	7	W 14×311	W 14×426	W 30×132
1	W 14×342	W 14×426	W 30×148	6	W 14×311	W 14×426	W 30×132
				5	W 14×398	W 14×500	W 33×141
				4	W 14×398	W 14×500	W 33×141
				3	W 14×455	W 14×550	W 33×141
				2	W 14×455	W 14×550	W 33×141
				1	W 14×550	W 14×730	W 36×194
				B1	W 14×550	W 14×730	W 36×194

Sonuçlar

Bu çalışmada sismik yük taşıyıcı sistemi bir doğrultuda süneklik düzeyi yüksek moment çerçevesi ve buna dik doğrultuda süneklik düzeyi yüksek çaprazlı çerçeve olan 4- ve 9-katlı ofis niteliğindeki iki adet çelik yapı TBDY-2016 gerekliliklerine uygun olarak boyutlandırılmıştır. Tasarım aşamasında mevcut deprem yönetmeliği (DBYBHY-2007) gereklilikleri ile karşılaştırmalar yapılarak göze çarpan farklılıklar irdelenmiştir. TBDY-2016 uyarınca tasarım, 50 yılda aşılma olasılığı %10 olan ‘DD-2’ deprem düzeyi etkileri altında ve Yük ve Dayanım Katsayıları ile Tasarım (YDKT) hükümlerine uygun olarak yapılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

- TBDY-2016 uyarınca spektral ivme değerleri yerel deprem ve zemin koşullarını temsil eden değişkenlere bağlı olarak belirlenmekte olup DBYBHY-2007’ye göre yaklaşık 2.1 kat mertebesinde elverişsiz değerlerdedir. Bu doğrultuda örnek yapılarımıza etki edecek taban kesme kuvvetleri yeni yönetmelik uyarınca 2~2.5 kat mertebesinde daha fazladır.
- Çelik yapılarda moment çerçevelerinin boyutlandırılmasında önemli etken olan görelî kat ötelemesi sınır değeri TBDY-2016’da taşıyıcı elemanlar ile ikincil mimari elemanlar arasındaki bağlatı detayının esnekliğine bağlı olarak değiştirilmiştir. Ayrıca ilgili formüldeki ‘ λ ’ katsayısına bağlı olarak bu sınır şartları her bölge ve yapı tipi için farklılık gösterecektir. Örnek yapılarımızın YSMÇ yönünde esnek bağlantı detayı uygulandığı varsayımıyla elverişli olan ‘ $\delta_i/h_i=0.016/\lambda=0.016/0.366=4.37\%$ ’ sınır şartı kontrol edilmiştir. Nispeten elverişli olan bu sınır şartına rağmen, binalarımıza etki eden deprem kuvvetleri altında, yapısal eleman olarak profil tablolarında mevcut Avrupa geniş başlıklı kesitlerin (HD & HE) yaklaşık maksimumları kullanılmak suretiyle tasarım yapılmıştır (HD 400×990, HD 400×1086 & HE 900B).
- TBDY-2016, süneklik düzeyi yüksek çelik çaprazlı çerçevelerde öngörülen mekanizma durumunda, sistemdeki çapraz elemanlarının kapasitelerine bağlı olarak kolon ve giriş elemanlarının boyutlandırılması ve böylece optimize tasarım yapılması doğrultusunda tasarımcıyı yönlendirmektedir. Bu doğrultuda örnek yapılarımızın YSCÇ’deki kolon elemanlarında yaklaşık %17 oranında elverişli kesitlerle boyutlandırma yapılmıştır.
- Örnek yapılarımızın ASCE 07’ye uygun tasarımından elde edilen YSMÇ eleman kesitleriyle karşılaştırma yapıldığında, TBDY-2016 uyarınca benzer boyutlandırma sonuçlarının elde edildiği görülmüştür.

Kaynaklar

- [1] TBDY 2016, Taslak Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Türkiye Cumhuriyeti Başbakanlık Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara, 2016.
- [2] DBYBHY 2007, Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, Türkiye Cumhuriyeti Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Ankara, 2007.
- [3] Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik (RG no. 29614), Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2016.
- [4] www.koeri.boun.edu.tr, Boğaziçi Üniversitesi Kandilli Rasathanesi Spektral İvme Haritaları, İstanbul, 2016.
- [5] J. Shen, T.A. Sabol, B. Akbas, N. Sutchiewcharn, Seismic Demand on Column Splices in Steel Moment Frames, Engineering Journal Fourth Quarter (2010) 223.
- [6] ASCE 07, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ASCE 7–10, American Society of Civil Engineers, Virginia, 2010.
- [7] AISC 360, Specification for Structural Steel Buildings, AISC 360–10, American Institute of Steel Construction Inc, Chicago, IL, 2010.
- [8] J. Shen, C. Carter, B. Akbas, N. Sutchiewcharn, R. Wen, Seismic performance evaluation of braced frames with and without design ductility, Technical Report Submitted to American Institute of Steel Construction, 2012.
- [9] J. Shen, R. Wen, B. Akbas, B. Doran, E. Uckan, Seismic Demand on brace-intersected beams in two-story story X-braced frames, Engineering Structures 76 (2014) 295-312.
- [10] Marmaray CR3 Projesi Fatih İstasyonu (Gebze Teknik Üniversitesi Kampüsü) Geoteknik Değerlendirme Raporu, T.C. Ulaştırma Bakanlığı AYGM Marmaray 1. Bölge Müdürlüğü, İstanbul, 2013.
- [11] ETABS (2016), Integrated Building Design Software, version 16.1.0, Computers and Structures, Berkeley, CA.