1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı
11-14 Ekim 2011 – ODTÜ – ANKARA

ENDÜSTRİYEL ÇELİK YAPILARIN SİSMİK DETAYLANDIRILMASI

Bülent AKBAŞ[1]

[1] *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Deprem ve Yapı Mühendisliği Anabilim Dalı, 41400 Gebze - Kocaeli*

Email: akbasb@gyte.edu.tr

ÖZET

Endüstriyel çelik yapılar çoğunlukla taşıyıcı sistemi merkezi çaprazlı çelik çerçeveler (MÇÇÇ'ler) olan sistemler ile inşa edilirler. MÇÇÇ'ler, çelik taşıyıcı sistemler arasında tasarımı en kolay taşıcı sistemlerdir, tüm hesaplar elle çok kolay bir şekilde yapılabilmektedir. MÇÇÇ'ler yüksek sünekliğe sahip olmalarına karşın moment çerçeveler ve dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler ile kıyaslandığında düşük sünekliğe, fazla bağlılığa ve enerji dağıtma kapasitesine sahiptirler. Tasarım deprem yer hareketleri sırasında çaprazlarda görülen erken kırılma ve çapraz birleşimlerinde gevrek kırılmalar MÇÇÇ'ler ile ilgili en büyük problemlerdendir. Tasarım deprem yer hareketleri altında MÇÇÇ'lerde 3-5 arası taşıyıcı sistem sünekliğine ihtiyaç bulunmaktadır. Taşıyıcı sistemin sünek davranabilmesi için çapraz elemanın ve çapraz birleşimlerinin mükemmel detaylandırılması gerekmektedir. Çapraz birleşimlerinde kırılma gevrek bir göçme modudur ve kapasite tasarımı ilkeleri uyarınca birleşim çapraz elemandan aktarılabilecek en büyük kuvvet gözönüne alınarak çapraz birleşimleri tasarlanmalıdır. Çapraz elemanlarda global burkulmayi engellemek için narinlik oranı ve lokal burkulmayı engellemek için ise genişlik/kalınlık (b/t) oranları sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlandırmalar, aşırı burkulma deformasyonundan dolayı çaprazlarda oluşabilecek kırılmayı engelleyecektir. Guse levhasının uçlarının serbest bir şekilde plastik dönmesine izin verilmelidir. Bunun için, guse levhası ve çapraz ucu arasında 2t'lik bir katlanma çizgisi oluşturulmalıdır. V ve ters V şeklindeki çapraz düzenlerinde çaprazlı açıklıktaki kirişlerin tasarımında basınç yükü etkisi altındaki çapraz elemanın burkulmasından doğacak dengelenmemiş kuvvet dikkate alınmalıdır.

ANAHTAR KELİMELER: Endüstriyel çelik yapılar, merkezi çaprazlı çelik çerçeveler, lokal burkulma, çapraz birleşimleri

1. GİRİŞ

Endüstriyel çelik yapılar çoğunlukla taşıyıcı sistemi merkezi çaprazlı çelik çerçeveler (MÇÇÇ'ler) olan sistemler ile inşa edilirler. MÇÇÇ'ler yüksek sünekliğe sahip olmalarına karşın moment çerçeveler ve dışmerkez çaprazlı çelik çerçeveler ile kıyaslandığında düşük sünekliğe sahiptirler. MÇÇÇ'lerin geçmiş depremlerdeki performansları iyi ve mükemmel olarak değerlendirilebilir. MÇÇÇ'ler süneklik düzeyi yüksek, orta ve normal olarak tasarlanıp inşa edilebilirler (ASCE/SEI 7-10, 2010). MÇÇÇ'lerin en büyük avantajları rijitlik ve dayanım şartlarını minimum ağırlıkla çok kolay bir şekilde sağlamaları ve tüm tasarım hesaplarının elle çok kolay bir şekilde yapılabiliyor olmasıdır (Akbaş vd. 2011). MÇÇÇ'ler tasarım için gerekli rijitlik ve dayanım şartlarını kolaylıkla sağlamalarına karşılık şiddetli deprem yer hareketleri altında doğrusal olmayan davranış beklenen taşıyıcı sistemler arasında en tercih edilen taşıyıcı sistem olamamaktadır (Akbaş vd. 2011). MÇÇÇ'lerin sınırlı enerji dağıtma kapasiteleri, düşük fazla bağlılıkları (redundancy), çevrimsel yüklemeler sırasında çaprazlarda görülen erken kırılma ve çapraz birleşimlerinde gevrek kırılmalar MÇÇÇ'ler ile ilgili en büyük problemlerdendir.

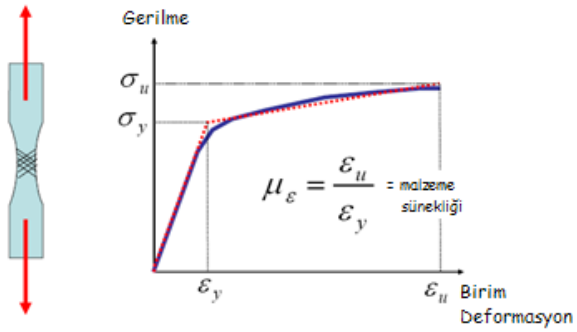
Mevcut Deprem Yönetmelikleri (ASCE/SEI 7-10, 2010; TDY, 2007) bina türü yapıların sismik performansları için geliştirilmiş olup bazı küçük değişikliklerle endüstri türü yapılar için de kullanılmaktadır. Binalara benzer

endüstri yapılarının farklı kullanım amaçları vardır ve endüstri standartlarına göre hazırlanmış özel kurallara göre tasarlanmaları gerekebilir.

Bu bildiride, endüstri yapılarında sık kullanılan MÇÇÇ'lerin sismik davranışları ve detaylandırılması anlatılmıştır. İlk olarak, çelik yapılarda taşıyıcı sistem – süneklik ilişkisi gözden geçirilmiş, binalar ve endüstri yapıları arasındaki benzerlikler ve farklılıklara kısaca değinilmiştir. Daha sonra süneklik düzeyi yüsek MÇÇÇ'lerin sismik tasarımı ve detaylandırılması ilgili detaylı bir değerlendirme yapılmıştır. 2007 senesinde yürürlüğe giren Türk Deprem Yönetmeliği (TDY, 2007) çelik yapıların tasarımı konusunda yeni kavramlar (kapasite tasarımı ilkeleri vb.) ve detaylandırma koşulları getirmiştir. Bu kavramların doğru bir şekilde anlaşılması ve uygulanması gerekmektedir.

2. TAŞIYICI SİSTEM DAYANIMI - SÜNEKLİK İLİŞKİSİ

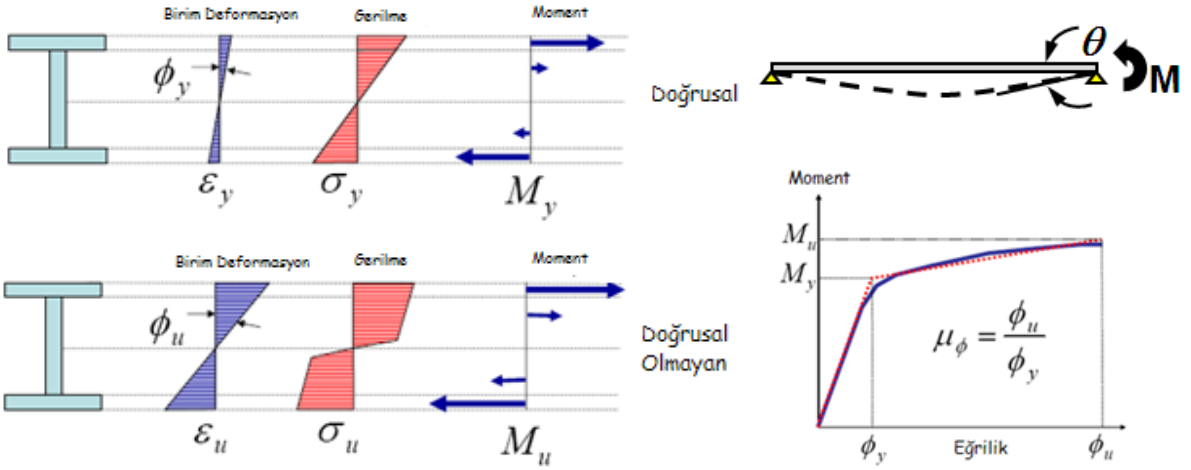
MÇÇÇ'lerin deprem yer hareketleri altındaki çevrimsel davranışından önce çelik bir elemanın statik yükler altındaki gerilme-birim deformasyon ilişkisinin anlaşılması gereklidir. Çelik bir elemana çekme deneyi uygulanarak akma sınırı, akma birim deformasyonu ve kopma birim deformasyonu bulunabilir. Malzeme sünekliği, kopma ve akma birim deformasyonlarının oranı olarak tanımlanır (Şekil 1).



Şekil 1. Çelik elemanın statik yükler altındaki davranışı ve malzeme sünekliği (Shen, 2011)

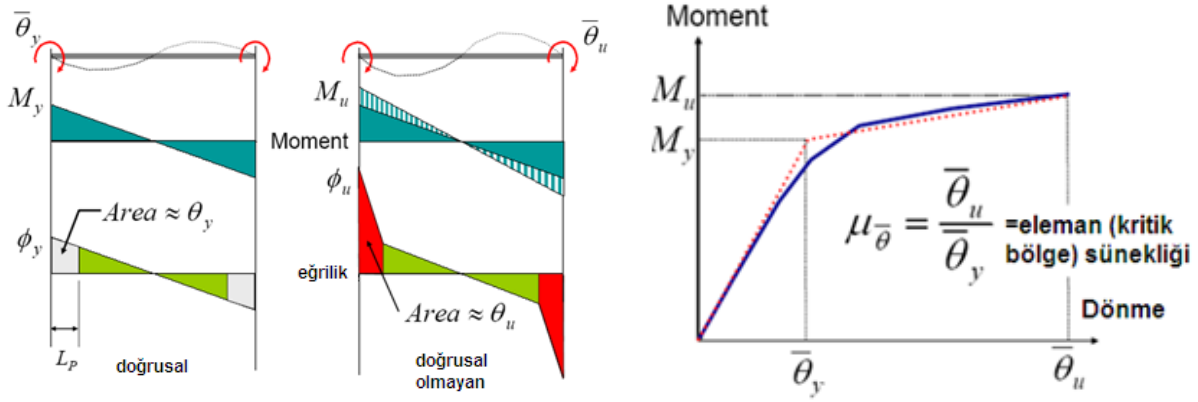
Çelik bir kirişte statik olarak artan eğilme etkisi altında kiriş enkesitinde gerilme-birim deformasyon değişimi ve idealize edilmiş moment-eğrilik ilişkisi Şekil 2'de gösterilmiştir. Artan eğilme etkisi altında en dış liflerden başlayarak tüm enkesit boyunca akma gerilmesine erişilinceye kadar kiriş yük taşımaya devam edecektir. Enkesit ortasındaki lifler akma dayanımlarına ulaşıncaya kadar en dış liflerdeki gerilmeler pekleşme etkisiyle bir miktar daha artacaktır. Bu da enkesitin limit moment taşıma kapasitesinde (M_u) akma moment kapasitesine (M_y) göre yaklaşık %10-20 oranında bir artışa neden olacaktır.

Deprem yükleri altında taşıyıcı sistemdeki enerji dağıtan elamanların (veya kritik bölgelerin) sünekliği, plastikleşen bölgenin plastik dönme kapasitesinin elastik dönmeye oranı olarak tanımlanır (Şekil 3). Eleman (veya kritik bölge) sünekliği ve enerji dağıtma kapasitesi ne kadar büyük olursa taşıyıcı sistem sünekliği de o kadar büyük olacaktır. Taşıyıcı sistem sünekliği ise taşıyıcı sistemin artan yatay kuvvetler altında yapabileceği en büyük yer değiştirmenin akma yer değiştirmesine oranı olarak tanımlanmaktadır (Şekil 4). Taşıyıcı sistemin yatay kuvvetler (deprem kuvvetleri) altında yapabileceği en büyük yer değiştirme taşıyıcı sistemin kritik elemanlarının enerji dağıtma kapasitelerine ve sünekliklerine bağlıdır. MÇÇÇ'lerin bu anlamda moment ve dış merkez çaprazlı çelik çerçevelere göre daha düşük sünekliğe sahip oldukları bilinmektedir.



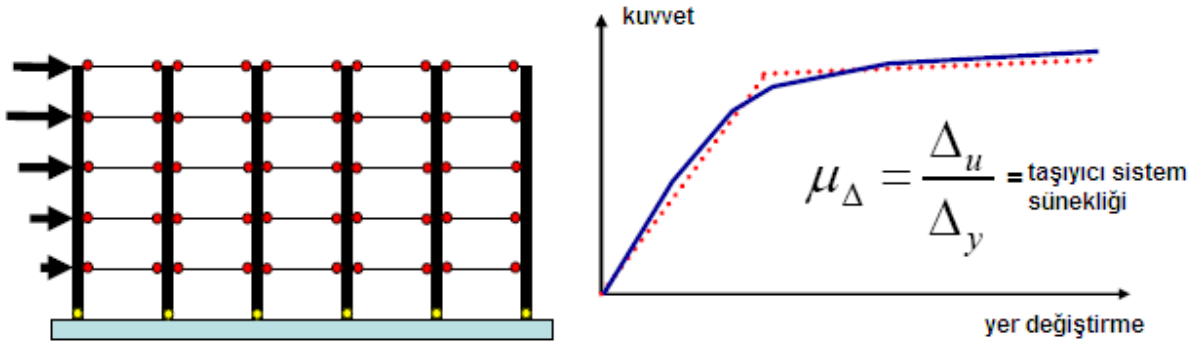
a.gerilme – birim deformasyon değişimi b.idealize edilmiş moment-eğrilik ilişkisi

Şekil 2. Eğilme etkisindeki çelik bir kirişin enkesitinde doğrusal olmayan davranış (Shen, 2011)



a.kritik bölgede doğrusal ve doğrusal olmayan davranış b.kritik bölgede moment-dönme ilişkisi

Şekil 3. Kritik bölgede idealleştirilmiş doğrusal olmayan davranış ve moment-dönme ilişkisi (Shen, 2011)

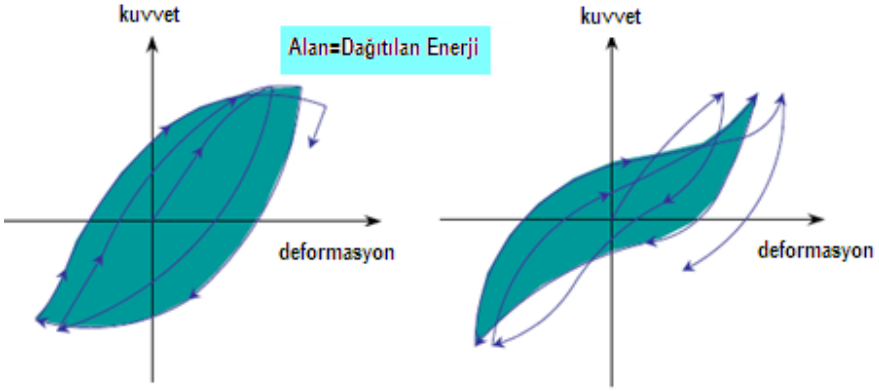


Şekil 4. Binalarda idealleştirilmiş doğrusal olmayan davranış ve taşıyıcı sistem sünekliği (Shen, 2011)

Depreme dayanıklı yapı tasarımı ve detaylandırmadaki ana kabulleri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

1. Yapı, büyük taşıyıcı sistem davranış katsayıları (R) için tasarlandığında iyi bir deprem performansı için çelik moment çerçevelerde 4-6 arası, çelik çaprazlı çerçevelerde ise 3-5 arası taşıyıcı sistem sünekliğine ihtiyaç bulunmaktadır.
2. Taşıyıcı sistem sünekliği kritik elemanların (veya bölgelerin) sünekliğine bağlıdır. Kritik elemanların (veya bölgelerin) yüksek süneklik göstermesi ve büyük miktarda enerji dağıtabilmeleri ise mükemmel bir detaylandırma gerektirir.

Çelik taşıyıcı sistemlerdeki kritik elemanlar (veya bölgeler) ANSI/AISC 341-05'de (2005) Kapasitesi Korunmuş Bölge (KKB) (protected zone) olarak tanımlanmışlardır. KKB'lerin deprem yer hareketi sırasında ortaya çıkacak büyük doğrusal olmayan deformasyonları karşılaması gerektiğinden deprem yer hareketi sırasında kapasitelerinin korunması gerekmektedir. Bu da KKB'ler için ek koşullar (saplama yapılmaması, delik açılmaması, kesme çivisi kullanılmaması vb.) getirmektedir. KKB'ler moment çerçevelerde kiriş uçları, MÇÇ'lerde çapraz elemanın kendisi, dışmerkez çaprazlı çelik çerçevelerde ise bağ kirişi olarak tanımlanmaktadır ANSI/AISC 341-05, 2005). KKB'lerin sünekliği ve enerji dağıtma kapasiteleri, deprem yer hareketi altında beklenen çevrimsel deformasyonları benzeştirecek deneyler ile belirlenebilir. Şekil 5'de yüksek enerji dağıtma kapasitesine sahip kritik elemanlara (bölgelere) ait örnekler verilmiştir.



a.çok iyi (moment birleşimi) b.iyi (çapraz)

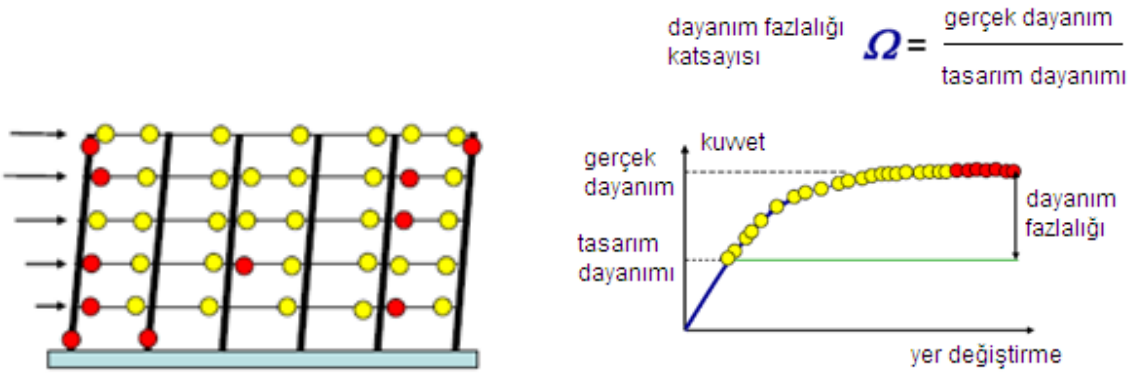
Şekil 5. Yüksek enerji dağıtma kapasiteli çevrimsel davranış örnekleri (Shen, 2008)

Deprem yönetmeliklerinde (ASCE/SEI 7-10, 2010; TDY, 2007) deprem yüklerinin azaltılmasında kullanılan taşıyıcı sistem davranış katsayısı (R) aşağıdaki özelikleri dikkate alır:

- gerekli süneklik sunumu (kapasitesi),
- dayanım fazlalığı,
- sönüm,
- benzer taşıyıcı sistemlerin geçmiş depremlerdeki performansları,
- fazla bağlılık (redundancy).

Yapılar gerçekte tasarlandıkları taban kesme kuvvetinden daha yüksek dayanıma sahiptirler. Bu fazla dayanım deprem yer hareketi sırasında yapıda oluşacak süneklik istemini azaltır. Örneğin, çelik bir çerçevenin tüm elemanları tasarım deprem kuvveti altında gerekli dayanıma göre boyutlandırılmış olsun (Şekil 6'da kırmızı noktada veya altında). Yapı gerçekte tasarım dayanımından daha fazla yük taşıyabilir (KKB'ler süneklik sunumunu (kapasitelerini) harcayana kadar) (Şekil 7).

Şekil 6. Tasarım dayanımı (Shen, 2011)

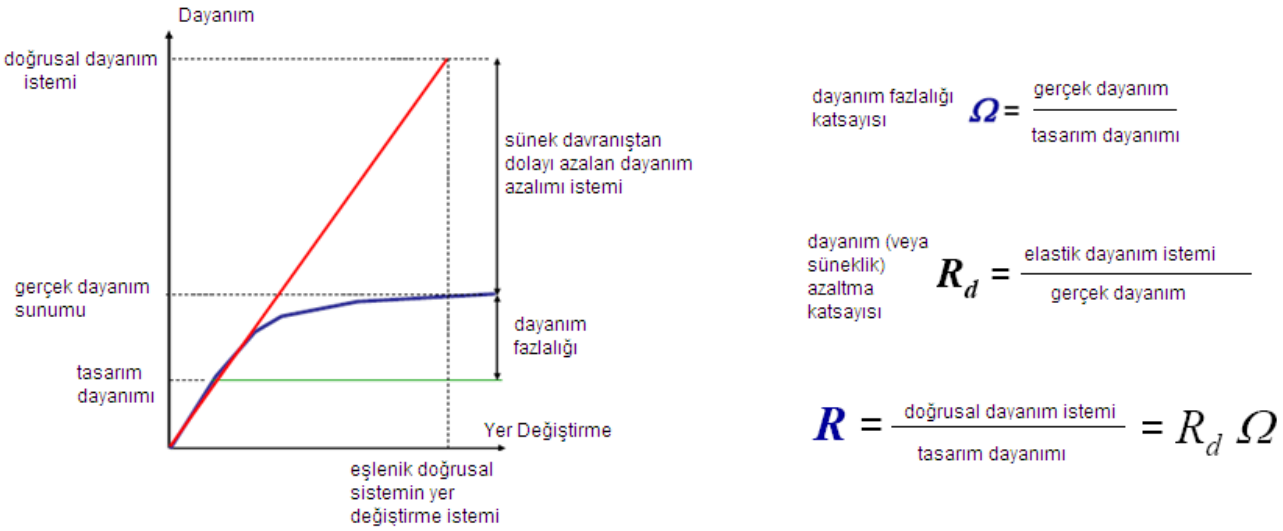


Şekil 7. Gerçek dayanım ve dayanım fazlalığı

Yapının sahip olduğu bu fazla dayanımın nedenleri şunlardır:

• fazla bağlılık (redundancy) derecesi yüksek olan sistemlerde KKB'lerin sırayla akması,
• malzemenin dayanım fazlalığı (gerçek ve beklenen akma dayanımı arasındaki fark),
• çevrimsel yükler altındaki pekleşme etkisi,
• tasarımda kullanılan malzeme katsayıları (kapasite azaltma katsayısı (LRFD) veya güvenlik katsayısı (ASD)),
• büyük eleman seçimi.

Taşıcı sistemin sahip olduğu dayanım fazlalığını belirlemek için deprem yönetmelikleri (ASCE/SEI 7-10, 2010; TDY, 2007) dayanım fazlalığı katsayısını kullanmaktadır (Not: TDY'de (2007) dayanım fazlalığı katsayısı olarak büyütme katsayısı terimi kullanılmaktadır). Dayanım fazlalığı gerçek dayanımın tasarım dayanımına bölünmesiyle elde edilir (Şekil 8). Dayanım fazlalığı katsayısı taşıyıcı sistemin gerçek dayanım fazlalılığının bir üst sınırı olarak da düşünülebilir. TDY'de (2007) deprem yüklerinin tamamının MÇÇÇ'lerle taşındığı durumlarda *R* katsayısını 5, çerçeveler ile birlikte taşındığı durumlarda ise 6 olarak vermektedir. Dayanım fazlalığı katsayıları ise MÇÇÇ'ler için 2'dir (TDY, 2007). Buna göre deprem yüklerinin tamamının MÇÇÇ'lerle taşındığı durumlarda süneklik istemi olarak 2.5, çerçeveler ile birlkte taşındığı durumlarda ise 3 olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 8. Gerçek dayanım ve süneklik sunumu

3. BİNA TÜRÜ YAPILAR VE ENDÜSTRİYEL YAPILARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Deprem yönetmelikleri (ASCE/SEI 7-10, 2010; TDY, 2007) bina türü yapıların sismik performansları için geliştirilmiş olup bazı küçük değişikliklerle endüstri türü yapılar için de kullanılabilir. Bina türü olmayan yapıların farklı kullanım amaçları vardır. Bu tür yapıların endüstri standartlarına göre hazırlanmış özel kurallara göre tasarlanmaları gerekebilir. Bina terimi genel olarak insan yerleşimi için barınak olarak kullanılan yapıları kapsamaktadır. Bu tanım yapının fonksiyonu göz önüne alınarak yapılmaktadır, fakat tanımda aşağıdaki yapısal özelliklerden bahsedilmemektedir (Shen, 2011):

a. yatay yük taşıyıcı siteminin parçası olan diyaframlar veya diğer yatay elemanlar,
b. toplam sismik ağırlığın, gerçek rijitliğin, sönümün belirlenmesinde önemli olan yapısal olmayan elemanlar.

ASCE/SEI 7-10'da (2010) binalara benzer ama bina türü olmayan, bina türünde tasarlanan ve inşa edilen yapıların aşağıdaki özelliklere sahip olması gerektiği belirtilmektedir:

- deprem yer hareketlerine maruz kaldığında binalara benzer şekilde davranmalıdır,
- binalarda kullanılan ana taşıyıcı sistemlere benzer taşıyıcı sistemlere sahip olmalıdır,
- yatay yükleri transfer etmek için diyafram ya da benzeri elemanlara sahip olmalıdır.

Binalar ve binalara benzer endüstri türü yapıları arasındaki benzerlikler ve farklılıklar ise aşağıdaki gibi sıralanabilir:

a. Deprem yükü taşıyıcı sistemleri benzerdir (ASCE/SEI 7-10'da (2010) Tablo 12.2-1 ve 15.4-1)
b. Deprem yükü taşıyıcı sistemlerde yatay yükleri transfer etmek için her iki yapı türünde de diyaframlar veya benzeri elemanlar vardır.
c. Yapısal olmayan elemanlarda ciddi farklılıklar vardır. Bina türü yapılardaki yapısal olmayan elemanlar insan yerleşimine hizmet eder, endüstri türü yapılarda ise yapısal olmayan elemanlar yapının işlevselliğine bağlı olarak farklı amaçlar için kullanılır (bu elemanların yapının sönümü, rijitliği ve dayanımı üzerindeki etkileri önemlidir).
d. Binalara benzer endüstri yapılarında genellikle kütle düzensizliği vardır (bu durumda eşdeğer yatay yük yöntemi kullanılamaz, mod birleştirme yönteminin kullanılması gerekecektir). Ayrıca bu tür yapılarda rijitlik düzensizliği de bulunmaktadır (ciddi burulma düzensizlikleri oluşabilir).

Deprem davranışını önemli ölçüde etkileyen parametreler cinsinden bina ve bina türü olmayan endüstri yapılarının ortak özellikleri aşağıdaki gibidir:

a. Deprem tehlikesi (yer ve zemin koşullarına bağlıdır, yapıdan yapıya değişiklik göstermez),
b. Yapının dinamik özellikleri: başlangıç rijitliği ve sönümü,
c. Yapısal konfigürasyon: plan ve düşey konfigürasyon,
d. Deprem yükü taşıyıcı sistemi,
e. Yapısal ve yapısal olmayan elemanlar arasındaki etkileşim.

Binalar ve binalara benzer endüstri türü yapıları arasındaki benzerlikler deprem yönetmeliklerinin doğrudan uygulanmasına yol açar. Farklılıklar ise tasarım adımları sırasında kendini gösterir. Örneğin, ASCE/SEI 7-10 (2010), endüstri yapılarının doğal titreşim periyodunun yaklaşık yöntem yerine daha gerçekçi bir yöntem ile bulunmasını gerektirmektedir.

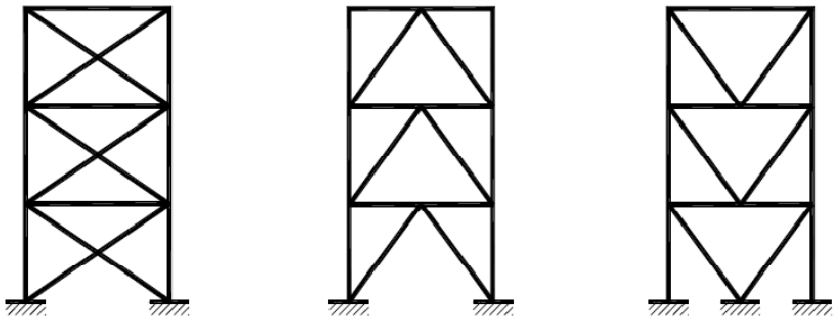
4. MERKEZİ ÇAPRAZLI ÇELİK ÇERÇEVELERİN (MÇÇÇ'lerin) DAVRANIŞI VE DAVRANIŞIN DETAYLANDIRMADAKİ ETKİLERİ

4.1 MÇÇÇ'lerin Sismik Davranışları

MÇÇÇ'ler binalara benzer endüstri yapıları için en etkili deprem yük taşıyıcı sistemi olarak kullanılmaktadır (özellikle 1994 Northridge depreminden sonra). MÇÇÇ'lerin geçmiş depremlerdeki performansları iyi ve

mükemmel olarak değerlendirilebilir. MÇÇÇ'ler süneklik düzeyi yüksek, orta ve normal olarak tasarlanıp inşa edilebilirler (ASCE/SEI 7-10, 2010). MÇÇÇ'lerin en büyük avantajları rijitlik ve dayanım şartlarını minimum ağırlıkla çok kolay bir şekilde sağlamaları ve tüm tasarım hesaplarının elle çok kolay bir şekilde yapılabiliyor olmasıdır. MÇÇÇ'ler tasarım için gerekli rijitlik ve dayanım şartlarını kolaylıkla sağlamalarına karşılık şiddetli deprem yer hareketleri altında doğrusal olmayan davranış beklenen taşıyıcı sistemler arasında en tercih edilen taşıyıcı sistem olamamaktadır (Akbaş vd. 2011). MÇÇÇ'lerin sınırlı enerji dağıtma kapasiteleri, düşük fazla bağlılıkları (redundancy), çevrimsel yüklemeler sırasında çaprazlarda görülen erken kırılma ve çapraz birleşimlerinde gevrek kırılmalar MÇÇÇ'ler ile ilgili en büyük problemlerdendir. MÇÇÇ'ler deprem yükü taşıyıcı sistemi olarak değişik düzenlerde kullanılmaktadır (Şekil 9).

MÇÇÇ'ler moment çerçevelere nazaran oldukça rijit olduklarından (eğer iyi detaylandırılmazlarsa gevrek de davranabilirler), deprem yönetmeliklerinde (ANSI/AISC 341-10, 2005; TDY, 2007) zaman içinde getirilen değişiklikler daha çok çapraz dayanımını ve rijitliğini arttırmak üzerine olmuştur. Bu da esas olarak doğrusal olmayan istemi minimize etmek için daha büyük tasarım yükleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir (en büyük yük etkisinin hesaplanması gibi). MÇÇÇ'ler daha önce bahsedildiği gibi rijitlik ve dayanım şartlarını kolaylıkla sağlamalarına karşılık şiddetli deprem yer hareketleri altında doğrusal olmayan davranış beklenen taşıyıcı sistemler arasında en tercih edilen taşıyıcı sistem olamamaktadır. Son yıllarda, süneklik ve yüksek enerji dağıtma kapasitesi için gerekli şartlar da yönetmeliklere eklenmiştir. Şiddetli deprem yer hareketleri sırasında MÇÇÇ'lerdeki çapraz elemanlar çevrimsel çekme ve basınç etkisinde (burkularak) büyük doğrusal olmayan deformasyonlara maruz kalmaktadırlar. Çapraz elemanın burkulma ve burkulma sonrası dayanımı, eğer uygun tasarlanmazsa, çekme dayanımından önemli ölçüde düşük olacaktır (Şekil 10a). Bu da MÇÇÇ'nin enerji dağıtma kapasitesini ve sünekliğini önemli ölçüde azaltmaktadır (Şekil 10b).

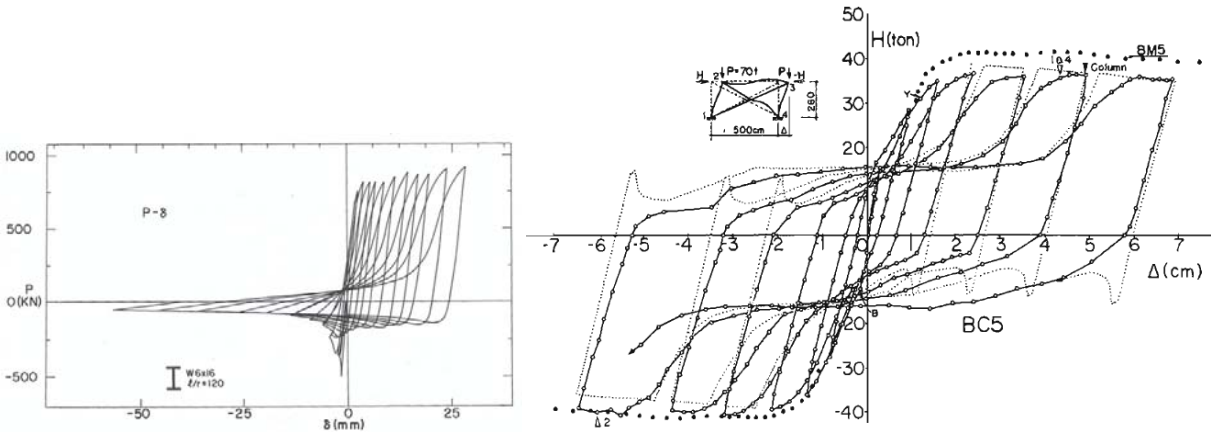


a.X çapraz b.ters V çapraz c.V çapraz

Şekil 9. Deprem bölgelerinde en sık kullanılan çapraz düzenleri

Çapraz elemanın çevrimsel davranışı iki tasarım parametresinden önemli ölçüde etkilenmektedir:

a. global burkulmayı önlemek için narinlik oranı,
b. lokal burkulmayı önlemek için genişlik/kalınlık (b/t) oranı.



a.basınç çubuğu (Engelhardt, 2007) b.tek katlı MÇÇ (Wakabayashi vd., 1974)

Şekil 10. Çelik çapraz elemanın ve MÇÇÇ'nin çevrimsel davranışı

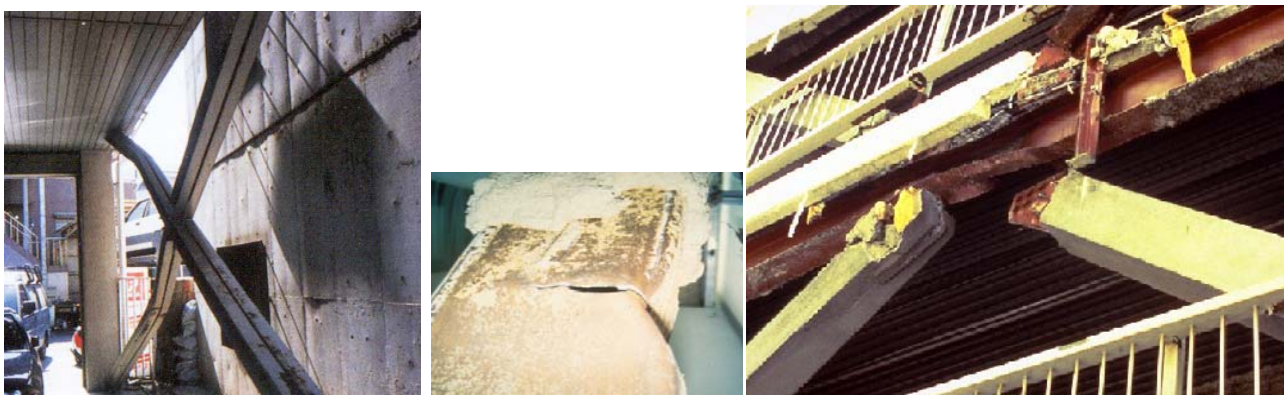
Plastik mafsal global burkulmadan sonra çaprazın orta noktasında ve guse levhasının yakınında oluşur. Eğer lokal burkulma önlenmişse bu plastik mafsal noktalarında plastik dönmeler neticesinde önemli miktarda enerji dağıtılacaktır. Tipik bir MÇÇÇ'de çaprazlar çok büyük olmayan %0.3-0.5'lik göreli kat ötelemesi oranına erişildiğinde burkulurlar. Şiddetli deprem yer hareketleri sırasında çaprazlardaki burkulma sonrası eksenel deformasyonlar akma deformasyonunun 10-20 katına çıkabilir (Shen, 2011). Bu derece büyük çevrimsel deformasyonları çaprazların erken kırılma olmadan karşılayabilmesi için uygun bir şekilde detaylandırılması gereklidir. MÇÇÇ'lerde en sık gözlenen gevrek hasar modları olarak;

a. aşırı burkulma deformasyonundan dolayı çaprazlarda oluşan kırılma (Şekil 11a),
b. çapraz birleşimlerinde kırılma (Şekil 11b)

sayılabilir. Burkulma deformasyonu arzu edilmesine karşılık çevrimsel yükler altında kırılma istenilmemektedir. Buradaki detaylandırma koşulu eğer doğrusal olmayan davranış bekleniyorsa sismik olarak kompakt kesit kullanılması şartıdır. Birleşimlerde kırılma, birleşimlerin, doğrusal olmayan tasarımda birleşimlere gelebilecek en büyük kuvvete göre tasarlanmasıyla engellenebilir.

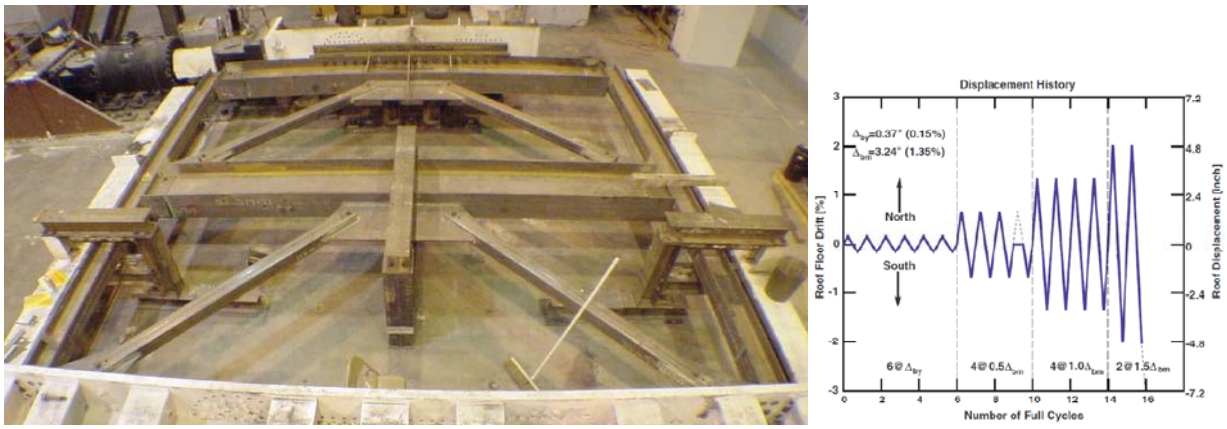
4.2. Süneklik Düzeyi Yüksek MÇÇÇ'lerdeki Limit Durumlar

Süneklik düzeyi yüksek MÇÇÇ'lerin yüksek doğrusal olmayan deformasyon sunumu sağlamaları beklenmektedir, çünkü doğrusal davranışın gerektirdiğinden daha düşük dayanıma göre tasarlanmaktadırlar (3'ün katları mertebesinde). Bu ciddi doğrusal olmayan deformasyonlar sadece çaprazlarda burkulmadan dolayı oluşabilir; bu da birleşimlerde, kolonlarda ve kirişlerde büyük bir dayanım istemi oluşturur. Şekil 12a'da Uriz (2005) tarafından iki katlı ters V şeklindeki bir MÇÇ'ye ait deney düzeneği görülmektedir. İkinci kat hizasında uygulanan yer değiştirme geçmişi Şekil 12b'de verilmiştir. Çerçevenin ilk katındaki çaprazlarda, taban levhalarına bağlanan birinci kat kolonlarında ve birinci kat hizasındaki kiriş-kolon birleşimlerinde büyük hasarlar oluşmuştur. Gözlenen hasarlar akma, lokal burkulna, lokal yırtılma, çaprazda kırılma, kolonda lokal burkulma ve birleşimde kırılmadır (Uriz, 2005). Alt kat çaprazlarında global burkulmayı takip eden lokal burkulmayla beraber (Şekil 13) çaprazların eksenel kuvvet taşıma kapasiteleri azalmıştır. Tüm hasarın alt katta oluşması sebebiyle yumuşak kat oluşmuş ve ilk önce çaprazlarda sonra da birinci kat kiriş-kolon birleşimlerinde kırılmalar gözlenmiştir (Uriz, 2005).



a.düzlem dışı burkulma ve çaprazda kırılma (Engelhardt, 2007) b. birleşimde kırılma (Shen, 2011)

Şekil 11. Çaprazlarda düzlem dışı burkulma ve birleşimde kırılma (Kobe Depremi 1995)



a.deney düzeneği b.yük geçmişi

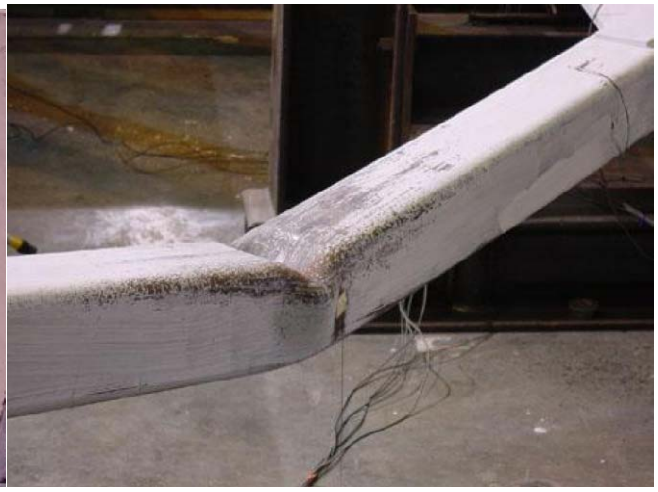
Şekil 12. İki katlı MÇÇ için deney düzeneği ve yük geçmişi (Uriz, 2005)

Bu deney sonuçlarına dayanarak yapılabilecek bazı gözlemler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Shen, 2011):

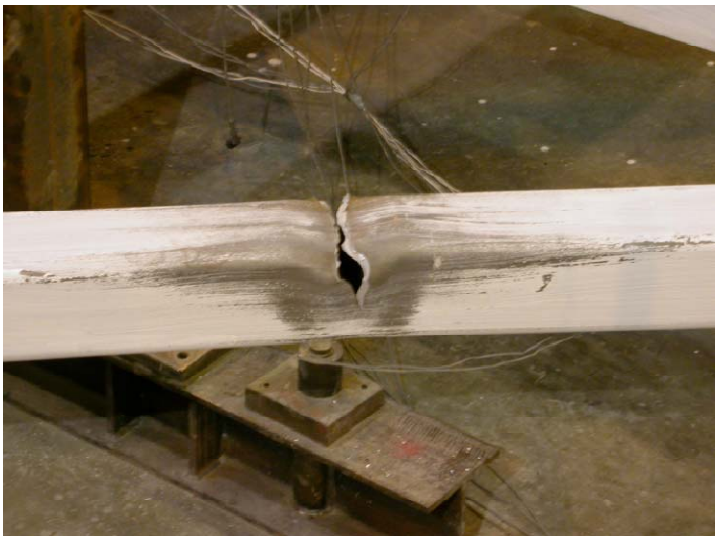
a. Deney çerçevesi süneklik düzeyi yüksek MÇÇÇ hükümlerine (narinlik oranı, b/t oranı, birleşim, kolon ve kiriş hakkındaki) uygun olarak boyutlandırılmıştır.
b. Doğrusal olmayan davranışın başlangıcında beklenildiği gibi çapraz eleman burkulmuştur.
c. Dikdörtgen kutu kesitlerde prematüre kırılma gözlenmiştir.
d. İlk kat kolonlarında ciddi gerilme artışları oluşmuştur.
e. Kirişler doğrusal davranmıştır.
f. Bu deney çerçevesi için R=6 ve Ω= 2 olduğu söylenebilir.

MÇÇÇ'lerin büyük fazla bağlılık (redundancy) derecesine olduklarını söylemek zordur. Bu sistemlerde enerji dağıtma mekanizması burkulma sonrası mekanizmaya bağlıdır. R=6, sünekliğin 3 olması anlamına gelmektedir. Süneklik düzeyi daha da düşük olan CBF'lerin sismik davranışları çok da iyi anlaşılabilmiş değildir. Bu gerçeklik deprem yönetmeliklerinde de yansıtılmıştır. Süneklik düzeyi daha düşük olan MÇÇÇ'ler sınırlı yüksekliklerde kullanılmaktadır ve oldukça katı detaylandırma şartları verilmektedir (Akbaş, 2011).

a.çaprazda global burkulma



b. çaprazda lokal burkulma



c.çaprazda kırılma

Şekil 13. Çaprazlarda oluşan hasarlar (Uriz, 2005)

5. SÜNEKLİK DÜZEYİ YÜKSEK MÇÇÇ'LERİN TASARIMI VE SİSMİK DETAYLANDIRILMASI

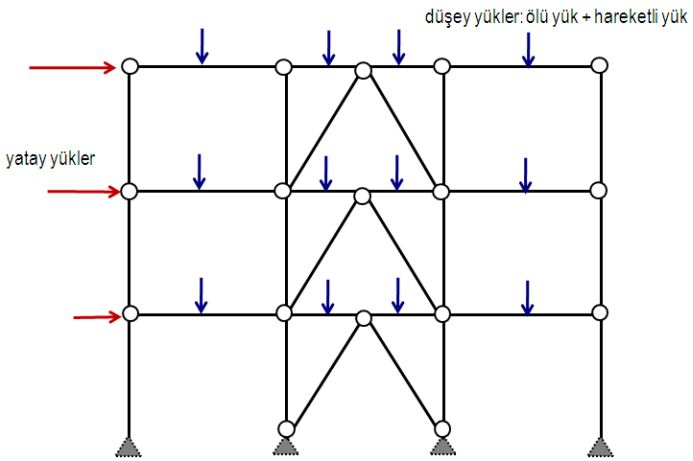
Geçmiş depremler ve laboratuar deneylerinden MÇÇÇ'lerin sınırlı sünekliği sahip oldukları ve bazı gevrek göçme modlarının (çapraz elemanın veya birleşim elemanının kırılması gibi) bulunduğu anlaşılmaktadır. Eğer çapraz elemanlar yeteri kadar kompakt değillerse önemli lokal burkulmalar olacaktır, bu da lokal burkulmanın olduğu noktalarda eğilme birim deformasyonlarının artmasına ve sünekliğin azalmasına yol açacaktır. Süneklik düzeyi yüksek MÇÇÇ'lerin tasarım depremine maruz kaldığında çaprazın burkulması ve çapraz elemanda plastik mafsal oluşumuyla birlikte büyük doğrusal olmayan deformasyonları karşılaması beklenmektedir. Tasarımda aşağıdaki hususlara dikkat edilmelidir:

a. Bütün birleşimler mafsallıdır (Şekil 14).
b. Sadece çaprazlı açıklıktaki çaprazlar, kirişler ve kolonlar deprem yükü (yatay yük) alırlar.
c. Çapraz eleman ile kiriş ve kolon elemanlar arasındaki birleşim çapraz elemandan daha güçlü yapılmalıdır.
d. Çaprazın çevrimsel davranışının narinlik oranı $(KL/r)_{max}$) ve b/t oranı sınırlanarak stabil olması sağlanmalıdır.

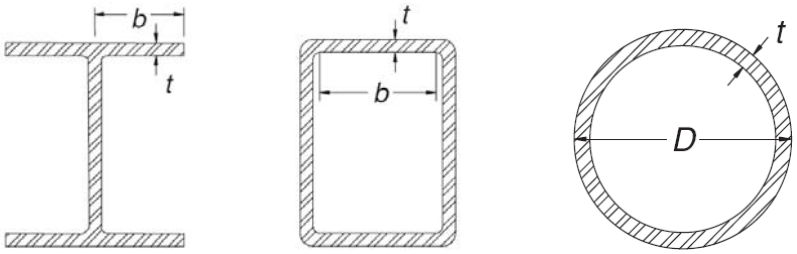
Çapraz elemanın narinliği aşağıdaki bağıntı ile sınırlandırılır (ANSI/AISC 341-05, 2005; TDY, 2007):

$$KL/r = 4.0\sqrt{E_s/F_y} \qquad (1)$$

Denklem 1'de K,efektif burkulma boyu katsayısı; L, çapraz elemanın boyu; r, burkulmadan sonraki eğilme eksenine göre çapraz elemanın atalet yarıçapı; E_s, elastisite modülü ve F_y, çeliğin akma dayanımıdır. Rijitleştirilmiş ve rijitleştirilmemiş çapraz enkesit elemanları için b/t oranları (Şekil 15) gerekli kompaktlık şartlarını sağlamalıdır. Süneklik düzeyi yüksek MÇÇÇ'ler için bu oranlar Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 14. MÇÇÇ'ler için yapısal model (Akbaş, 2011)

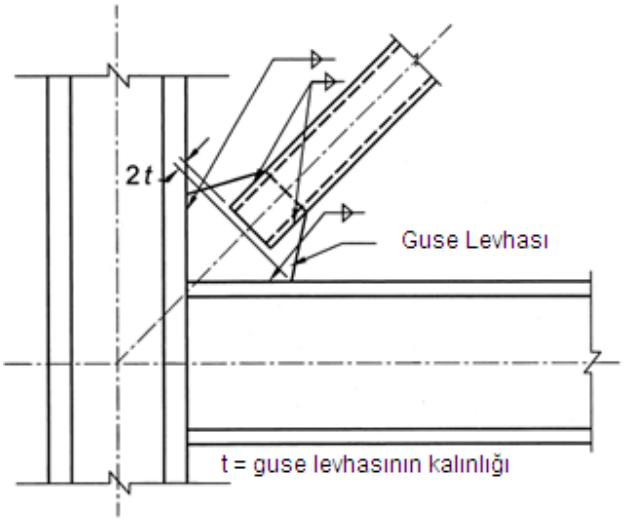


Şekil 15. Çapraz enkesit elemanları için b/t oranlarının tanımı (ANSI/AISC 341-05, 2005)

Tablo 1. Çapraz elemanlar için sınır b/t oranları

Eleman Tanımı	ANSI/AISC 341-05 (2005)	TDY (2007)
I Kesitler	$0.30\sqrt{E_s/F_y}$	$0.30\sqrt{E_s/F_y}$
Dikdörtgen Kutu Kesitler	$0.64\sqrt{E_s/F_y}$	$0.70\sqrt{E_s/F_y}$
Dairesel Kesitler	$0.044\ E_s/F_y$	$0.05\ E_s/F_y$

Şiddetli depremlerde MÇÇÇ'lerde gözlenen göçmelerin çoğu birleşimlerde meydana gelmiştir. Benzer şekilde laboratuar deneyleri de yönetmeliklere göre tasarlanan MÇÇÇ'lerde birleşimlerde göçme oluştuğunu ortaya koymuştur. Tipik tasarım uygulamasında birleşimler sadece eksenel yüklere göre tasarlanmasına karşılık iyi bir burkulma sonrası davranışı birleşim tasarımında ek dışmerkezliklerin de göz önüne alınması gerekliliğini ortaya koymuştur. Yani birleşim tasarımı birleşimin karşılaması gereken en büyük yüke göre yapılmalıdır. Eğer çapraz elemanın çevrimsel burkulma sonrası davranışının etkisi göz önüne alınırsa iyi bir birleşim performansı beklenmelidir. Guse levhasının düzleminde oluşacak çapraz burkulması için uç birleşimler çaprazda oluşacak en büyük eksenel kuvvet ve eğilme momentine göre tasarlanmalıdır. Birleşimin rijitliğini temsil edecek uygun bir efektif burkulma boyu katsayısının (K) kullanılması gerektiği unutulmamalıdır. Guse levhasına dik düzlemde oluşacak çapraz burkulmasında eleman ucundaki dönmelerden dolayı guse levhasının zayıf ekseninde eğilme oluşacaktır. Bunun sonucunda da çapraz ortasındaki plastik mafsallara ek olarak esnek uç koşulları oluşacaktır. İyi bir davranış elde etmek için guse levhasının uçlarının serbest bir şekilde plastik dönmesine izin verilmelidir. Bu nedenle, çapraz ucu ve guse levhası katlanma çizgisi arasındaki mesafe yeteri kadar uzun aynı zamanda da guse levhasının çapraz elemandan önce burkulmasını önlemek için yeteri derecede kısa olmalıdır (*2t* kuralı) (Şekil 16) (ANSI/AISC 341-05, 2005). *2t* kuralına uygun ve uygun olmayan çapraz-guse levhası birleşimlerine örnekler Şekil 17'de verilmiştir.



Şekil 16. Çapraz-guse levhası arasındaki *2t* koşulu (ANSI/AISC 341-05, 2005)

a.uygun b.uygun değil

Şekil 17. Katlanma çizgisi kuralına (*2t*) uygun ve uygun olmayan çapraz birleşimleri (Engelhardt, 2007)

Kapasite tasarımı ilkesi gereği birleşim kendisine bağlanan çapraz elemandan daha güçlü yapılmalıdır (kiriş-kolon birleşimleri de dahil). Birleşim için gerekli dayanım aşağıdakilerden küçük olanı olmalıdır:

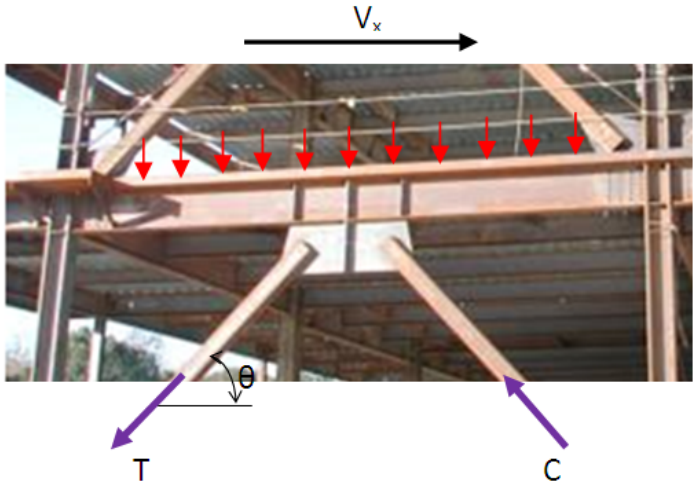
a. çapraza elemanın nominal eksenel çekme dayanımı ($R_y F_y A_g$).
b. analizlerden elde edilen çapraz tarafından birleşime aktarılacak en büyük kuvvet.

Çapraz elemanların ve birleşimlerinin tasarım çekme dayanımı efektif net kesitteki çekme kırılması ve blok kesme kırılması dayanımına göre hesaplanmalıdır ve en az yukarıda (a) maddesinde belirtilen çapraz elemanın gerekli dayanımına eşit olmalıdır.

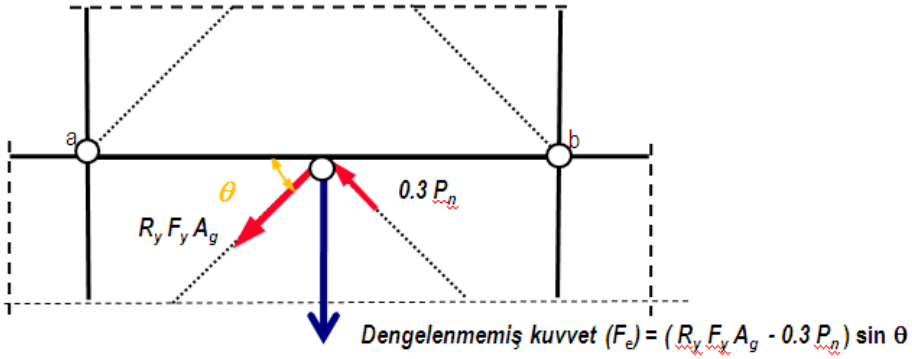
V ve Ters V Şeklindeki Çapraz Düzenleri İçin Ek Koşullar

V ve ters V şeklindeki çapraz düzenleri için yönetmeliklerde ek koşullar getirilmiştir (ANSI/AISC 341-05, 2005; TDY, 2007). Bu tür çapraz düzenleri deprem kuvvetleri ve düşey yük alırlar (Şekil 18). Bu durum çaprazlarla kesilen kirişlerde ters bir etki yaratabilir. Kiriş tasarımı aşağıdaki şartları sağlamalıdır:

a. Kiriş, kolonlar arasında süreli olmalıdır.
b. Kiriş, düşey ve hareketli yük kombinasyonlarından oluşacak etkileri çaprazların yok sayılması durumunda da güvenle taşıyacak şekilde tasarlanmalıdır.
c. Kiriş dengelenmemiş kuvvet (F_e) ve uygun yük kombinasyonu dikkate alınarak tasarlanacaktır (Şekil 19).
d. Kirişin üst ve alt başlıkları çaprazlarla kesiştiği noktada 2% $F_y A_f$'lik yatay kuvveti taşıyacak şekilde tasarlanacaktır (A_f =kiriş başlık alanı).
e. İstisna: (b) ve (c) maddelerinin çatı katı ve tek katlı binalarda uygulanmasına gerek yoktur.



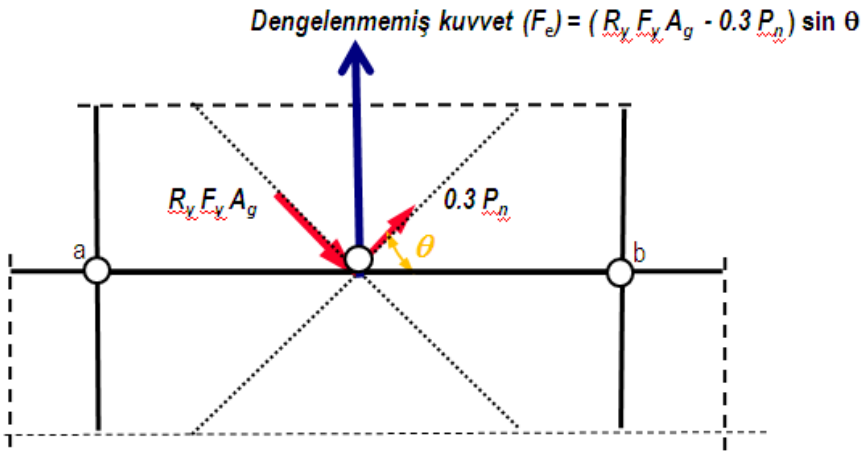
Şekil 18. Ters V şeklindeki çapraz düzeninde deprem ve düşey yük etkisi (Resim: Engelhardt, 2007)



Yük Kombinasyonları

LRFD:	ASD:
1.2D + 1.6L	G + Q + F_e
1.2D + 0.5L + F_e	

a.ters V şeklinde çapraz düzeni



Yük Kombinasyonları

LRFD:	ASD:
1.2D + 1.6L	G + Q
0.9D + F_e	0.9G + F_e

b. V şeklinde çapraz düzeni

Şekil 19. V ve ters V şeklindeki çapraz düzenleri için dengelenmemiş kuvvet ve uygun yük kombinasyonları (Akbaş, 2011)

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Endüstri türü yapılarda sıklıkla kullanılan MÇÇÇ'ler yüksek rijitliğe sahip olmalarının yanında düşük sünekliğe ve fazla bağlılığa (redundancy) sahiptirler. Bu sebeple, deprem yönetmeliklerinde istenilen rijitlik ve dayanım şartlarını kolaylıkla sağlamalarına karşılık sınırlı enerji dağıtma kapasiteleri ve çaprazlarda deprem yer hareketi sırasında oluşan erken kırılma ve çapraz birleşimlerindeki gevrek kırılmalar mükemmel detaylandırma gerektirmektedir. Bu bildiride, MÇÇÇ'lerin sismik davranışları ve detaylandırılması sunulmuştur. MÇÇÇ'lerin deprem yer hareketleri sırasında istenilen sünek davranışı gösterebilmesi ve yüksek enerji dağıtabilmeleri için uyulması gereken başlıca kurallar ve değerlendirmeler aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1. Tasarım deprem yer hareketleri altında MÇÇÇ'lerde 3-5 arası taşıyıcı sistem sünekliğine ihtiyaç bulunmaktadır. MÇÇÇ'lerde dayanım fazlalığı katsayısı 2 civarındadır.
2. Taşıyıcı sistemin sünek davranabilmesi için çapraz elemanın ve çapraz birleşimlerinin mükemmel detaylandırılması gerekmektedir. Çapraz birleşimlerinde kırılma gevrek bir göçme modudur ve kapasite tasarımı ilkeleri uyarınca birleşim çapraz elemandan aktarılabilecek en büyük kuvvet göz önüne alınarak çapraz birleşimleri tasarlanmalıdır.
3. Çapraz elemanlarda global burkulmayı engellemek için narinlik oranı ve lokal burkulmayı engellemek için ise genişlik/kalınlık (*b/t*) oranları sınırlandırılmalıdır. Bu sınırlandırmalar, aşırı burkulma deformasyonundan dolayı çaprazlarda oluşabilecek kırılmayı engelleyecektir.
4. Guse levhasının uçlarının serbest bir şekilde plastik dönmesine izin verilmelidir. Bunun için, guse levhası ve çapraz ucu arasında 2t'lik bir katlanma çizgisi oluşturulmalıdır.
5. V ve ters V şeklindeki çapraz düzenlerinde çaprazlı açıklıktaki kirişlerin tasarımında basınç yükü etkisi altındaki çapraz elemanın burkulmasından doğacak dengelenmemiş kuvvet dikkate alınmalıdır.

KAYNAKLAR

Akbaş, B. (2011). Advanced Steel Structures – I, Ders Notlar, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü.

Akbaş, B., Sutchiewcharn, N., Wen, R., Shen, J. (2011). Comparitive Study of Special and Ordinary Braced Frames, The Structural Design of Tall and Special Buildings (hakem değerlendirmesinde).

ASCE/SEI 7-10 (2010). Minimum Design Load for Building and Other Structures, American Society of Civil Engineers.

ANSI/AISC 341-05 (2005). Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.

ANSI/AISC 360-10 (2005). Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction.

Engelhardt, M.D. (2007). Design of Seismic-Resistant Building Structures: Concentrically Braced Frames, University of Texas at Austin, V1.

Shen, J. (2008). Seismic Detailing of Industrial Structures, Seminar for Fellow Structural Engineering at Minnesota.

Shen, J. (2011). Seismic Design of Steel Buildings Using AISC Seismic Provisions, Class Notes, CAE 525, Illinois Institute of Technology.

Uriz, P. (2005). Towards Earthquake Resistant Design of Concentrically Braced Steel Structures, Doctoral Dissertation, University of California at Berkeley.

Wakabayashi, M., Matsui, C., Minami, K., Mitani, I. (1974). Inelastic Behavior of Full-Scale Steel Frames with and without Bracings, Bulletin of Disaster Prevention Research Institute, 24:1, 1-23.