



Deprem Yükleri Etkisindeki Çelik Yapı Elemanların Birleşim ve Ekleri İçin Türkiye'deki Mevcut Yönetmeliklerde Tanımlanan Önçekmeli Yüksek Dayanımlı Yapısal Bulon Koşulların Değerlendirilmesi ve Deprem Tasarım İlkelerine Yönelik Öneriler

Review and Recommendations for Preloaded High Strength Structural Bolts Used for Steel Element Connections and Joints Under Seismic Loads Per Turkish Seismic Code Requirements and Design Principals

Ahmet Muhtar Çıtıptıoğlu* 

TAV Tepe Akfen Yatırım İnşaat ve İşletme A.Ş., Vadistanbul, Sarıyer, İstanbul

Öz

Yer hareketleri altındaki bir binanın taşıyıcı yapı sisteminin tasarımında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde belirlenen performans hedefini sağlamak için sünek tasarım ilkeleri esastır. Yönetmelikler, deprem yükleri etkisindeki elemanların birleşim ve eklerinde 8.8 veya 10.9 kalitesinde yüksek dayanımlı TS EN 14399 standardındaki bulonların tam önçekme verilerek kullanılmasını gerektirmektedir. Bu çalışmada deprem yükleri etkisindeki elemanların birleşim ve ekleri için Türkiye'deki mevcut yönetmeliklerde tanımlanan önçekmeli yüksek dayanımlı yapısal bulon koşulları incelenmektedir. TS EN 14399'de yaygın olarak kullanılan iki farklı HR ve HV tipi bulon düzeneklerinin yönetmelikte eşdeğer tutulmalarına rağmen, geometrileri farklı olmasından dolayı farklı şekilde davranmaktadır. Çekme yükleri altında HR tipi bulonların geometrisi, gövde kesitinin akarak sünek bir şekilde kopmasını sağlayacak şekilde biçimlendirilmiştir. HV bulonların dışı gövde boyunun kısa ve somunlarının ince olmasından dolayı çekme yükleri altında veya önçekme yükü uygulanırken dış sıyrılmaya sünek olmayan bir şekilde kopabilmektedir. Deprem sırasında yüklem döngüsünde bağlantılara etki eden yüklerin dayanım kapasitesini aşması durumunda dış sıyrılmaya bulonun kopması, birleşimin sünek olmayan bir sınır durumu yaratmış olacaktır. Deprem yükleri altında amaçlanan tasarım ilkelerine uygun olmayan bir şekilde dış sıyrılmaya birleşim elemanların yapı bütünlüğüne yaratacağı riskten dolayı Deprem Yönetmeliği'nde HV bulon düzeneklerin deprem yükleri etkisindeki elemanların birleşim ve eklerinde kullanılmasına izin verilmemesi önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Önçekme, Yüksek dayanımlı bulon, Çelik birleşim, Deprem tasarım, Sünek tasarım

Abstract

Provisions for preloaded high strength bolt for steel element connections under seismic loads in Turkish design codes are reviewed. Ductile design is essential to achieve targeted performance levels for load bearing structural systems under seismic loads in the Turkish Seismic Code. Codes require the use of preloaded 8.8 or 10.9 high strength bolts per TS EN 14399 for the connections of elements subjected to seismic loading. The most commonly used HR and HV type TS EN 14399 bolts are not differentiated in the code although their structural behavior is very different due to their geometry. HR type bolts are shaped to yield and fail in a ductile manner under axial loads. HV bolts have a shorter threaded length and thin nuts resulting in thread yielding and brittle thread stripping failure while preloading or under axial loads. Bolts failing with thread stripping during an earthquake will cause non-ductile connection failure. Due to risk of thread yielding and stripping which result in a connection behavior counter to seismic design principals the author recommends that HV type bolts not be allowed to be used in structural connections of steel elements resisting seismic loads in the Turkish design codes.

Keywords: Preload, High strength bolts, Steel connection, Seismic design, Ductile design

*Sorumlu yazarın e-posta adresi: citipit@gmail.com

1. Giriş

İnşaat yapılarında demir ve çelik kullanılmaya başlamasıyla yapısal elemanların perçinler ve sonra da yüksek mukavemetli bulonlar kullanılarak birleştirilmesi yaygınlaşmıştır. Geçmişte kaynak ve büyük yapısal kesitlerin eksikliği nedeniyle, özellikle binalardaki moment aktaran çerçevelerin bağlantılarında istenen yapıyı oluşturmak için çok sayıda perçin kullanılarak çeşitli kesit ve plakalar karmaşık bir şekilde birleştirilmiştir. Daha sonraları kaynak teknolojisi perçinlemenin yerini almış fakat birleşimlerin birkaç çelik eleman ve plakanın saha kaynağını gerektirecek şekilde tasarlanmasına devam edilmiştir. Perçin ve kaynak, vasıflı işçilik ve kapsamlı kalite kontrol gerektirmeleri nedeniyle saha uygulaması için pratik olmadığından, yüksek dayanımlı bulonların kullanımı perçin kullanımının yerini almıştır. Perçinlerde olduğu gibi doğrudan ezilme ve doğrudan çekme yerine veya buna ek olarak, bulonlara öncekme uygulayarak, sürtünme ve kenetleme yoluyla elemanları birbirine bağlayarak alternatif bir yük transfer mekanizması sağlanmaktadır.

Kaynaklı birleşimlerle karşılaştırıldığında, yüksek dayanımlı bulon kullanımının çeşitli avantajları bulunmaktadır. Saha dışında kalite kontrol önlemleri ile önceden üretildiğinden, kalite kontrol önlemleri ile önceden üretildiğinden, bulonlu birleşimlerde güvenilir bir şekilde mukavemet ve davranışının sağlanması daha kolay ve ucuzdur. Ayrıca sahada bulonların montajı vasıflı işçilik ve özel cihazlarla kalite kontrol önlemleri gerektirmez, montajı basittir ve minimum alet gerektirmektedir.

1994 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nin Kaliforniya Eyaleti'nde yaşanan Northridge depremini sonrasında çeşitli kaynaklı moment aktaran çerçeve birleşimlerinde ciddi çatlaklar ve hasarlar görülmesi nedeniyle yönetmeliklere daha katı tasarım kuralları getirilmiş ve kaynaklı birleşimler için deneysel ve/veya analitik yöntemlerle kanıtlanmış olmaları gerekliliği benimsenmiştir. Bu gelişmeyle bulonlu bağlantılara yönelik daha fazla ilgiye ve araştırmanın yapılmasına neden olmuştur. Kaynaklı bağlantıların kusurları ve daha sıkı tasarım kurallarının gerekliliği hakkındaki bulgular, yüksek dayanımlı bulonlar kullanarak alternatif bağlantıların ve onarım yöntemlerinin incelenmesini gündeme taşımıştır.

Yapılan araştırmalar da rijit olarak kabul edilen kaynaklı bağlantılarla karşılaştırıldığında, doğrudan bağlantı sağlamamasından dolayı geleneksel olarak bulonlu birleşimler yarı rijit olarak kabul edildiği görülmektedir. Bulonlu birleşimlerin göreceli olarak daha düşük rijitliğe sahip olur var

sayılır. Ancak yapılan deneyler, bulonlu birleşimlerin uygun şekilde tasarlandıklarında birleştirilen kirişlerinin tam moment kapasitesine ulaşabileceğini göstermiştir (Kasai vd. 1998). Bulonlu ve kaynaklı birleşimli çelik çerçevelerin şiddetli yer hareketi altında yer değiştirmeleri bakımından çok farklı olmadıkları da gözlemlenmiştir (Akbas ve Shen 1995).

Türk Bina Deprem Yönetmeliği ise (Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı 2018) bu çalışmaların ışığında, performans gereksinimlerinin karşılandığını doğrulamak için yalnızca önceden onaylanmış birleşimler veya test edilmiş birleşimlerin kullanılmasını gerektirmektedir. Yönetmelik tasarımcı için, geçerliliği kanıtlanmış iki farklı tam dayanımlı bulonlu birleşim tanımlanmaktadır. Ayrıca, bu birleşimlerde TS EN 14399 standardına uygun bulon kullanılmasını gerektirmektedir, ancak bu standart dahilinde farklı tip bulonların yapısal davranışı açısından bir ayırım yapmamaktadır.

Bu makale, deprem yükleri etkisindeki çelik yapı elemanların birleşim ve ekleri için yönetmeliklerde tanımlanan ve Türkiye'de yaygın olarak kullanılan TS EN 14399 standartlarına uygun HR ve HV tipi öncekmeli yüksek dayanımlı yapısal bulonların saha uygulamalarıyla davranışlarını incelemektedir. HV bulonların deprem yüklerini aktaran elemanların birleşim ve eklerinde amaçlanan tasarım ilkelerine uygun olmamasından ile özellikle montajı sırasında dış sıyrılma ihtimalinin kalite kontrol ile tespitinin zor olmasının yapı bütünlüğüne yaratacağı riskten dolayı kullanılmasına izin verilmemesi önerilmektedir.

2. Gereç ve Yöntem

Çalışmada, deprem yükleri etkisindeki çelik elemanların birleşimin tasarımında kullanılan öncekmeli yüksek dayanımlı bulonların uygulama koşulları ele alınmaktadır. Deprem yükleri etkisinde bir yapı değerlendirilirken, elemanların modellenmesinde kullanılan doğrusal olmayan yük-şekildeğiştirme davranış tiplerinin tanımları baz alınarak, bulonlu birleşimler için Türkiye'deki ilgili farklı yönetmeliklerde yer alan davranış şartları tespit edilmektedir.

Şartnamelerde tanımlanan farklı öncekmeli yüksek dayanımlı bulon tiplerinin yapısal davranışlarını inceleyen, literatürde farklı çalışmalar incelenmiştir. Bu çalışmalarda çekme yükleri altında bulonlarla fiziki deneyler ile detaylı sonlu eleman modelleri kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Bu çalışmada deneyler ve analizler ile elde

edilen sonuçlar, şartnamelerde tanımlanan farklı yük-şekildeğiştirme davranış tipleriyle karşılaştırılarak deprem yükleri altındaki davranışın tasarım ilkeleriyle uyumluluğu değerlendirilmektedir.

2.1. Deprem Yükleri Etkisindeki Çelik Yapı Tasarımı için Türkiye'de Geçerli Yönetmeliklerinde ve Standartlar

Deprem yükleri etkisinde çelik yapı elemanların birleşim ve eklerin tasarımında geçerli başlıca yönetmelik olan "Türkiye bina deprem yönetmeliği" ("Deprem Yönetmeliği" veya TBDY 18) İçişleri Bakanlığına bağlı Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığın yürüttüğü çalışmalar sonucunda hazırlanmış, 1 Ocak 2019 tarihinde yürürlüğe girmiştir. Yönetmeliğin 9. bölümünde "Deprem etkisi altında çelik bina taşıyıcı sistemlerinin tasarımı için özel kurallar" verilmiştir. Bu bölüm için yönetmelik ayrıca Çevre ve Şehircilik Bakanlığın çalışmalarıyla hazırlanıp, yapılan değişikliklerle en son 15 Şubat 2018'de yayınlanan "Çelik yapıların tasarım, hesap ve yapım esaslarına dair yönetmelik'e" (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2018) ("Çelik Yönetmeliği" veya ÇYTHYEDY 18) atıfta bulunmaktadır.

Çelik yönetmeliğin "Birleşim ve birleşim araçları" başlıklı 13. bölümünde birleşim elemanların tasarımı için kurallar yer almaktadır. Yüksek dayanımlı bulonlar için ilgili koşullar 13.3.3'te verilmektedir ve TS EN 14399-1 "Önyüklemeli yüksek mukavemet yapısal cıvatalama düzeneği" standardına atıfta bulunmaktadır. Ayrıca uygulama ve montaj kuralları için de TS EN 1090-2 "Çelik ve alüminyum yapı uygulamaları - Bölüm 1: Çelik yapılar için teknik gerekler" standardına yönlendirmektedir.

2.2. Deprem Yükleri Etkisinde Yapı Elemanların Doğrusal Olmayan Davranış Tanımı

Yer hareketleri altındaki bir binanın taşıyıcı yapı sistemi tasarımında Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'nde belirlenen performans hedeflerinin sağlanmasında sünek tasarım ve kapasite tasarımı ilkeleri esastır.

Deprem etkisi altında binaların değerlendirilmesi ve tasarımı için şekildeğiştirme yaklaşımıyla performans değerlendirilmesinde: Taşıyıcı sistem elemanlarının doğrusal olmayan iç kuvvet - şekildeğiştirme davranışı belirlenir; taşıyıcı sistemin performans hedef(ler)ine uygun deprem yer hareketleri altındaki doğrusal olmayan şekildeğiştirme ve dayanım talepleri elde edilip, öngörülen performans hedefleriyle karşılaştırması yapılır.

Mevcut binaların yer hareketi etkisinde değerlendirmesine ve güçlendirilmesine yönelik Amerikan şartnamesi ASCE

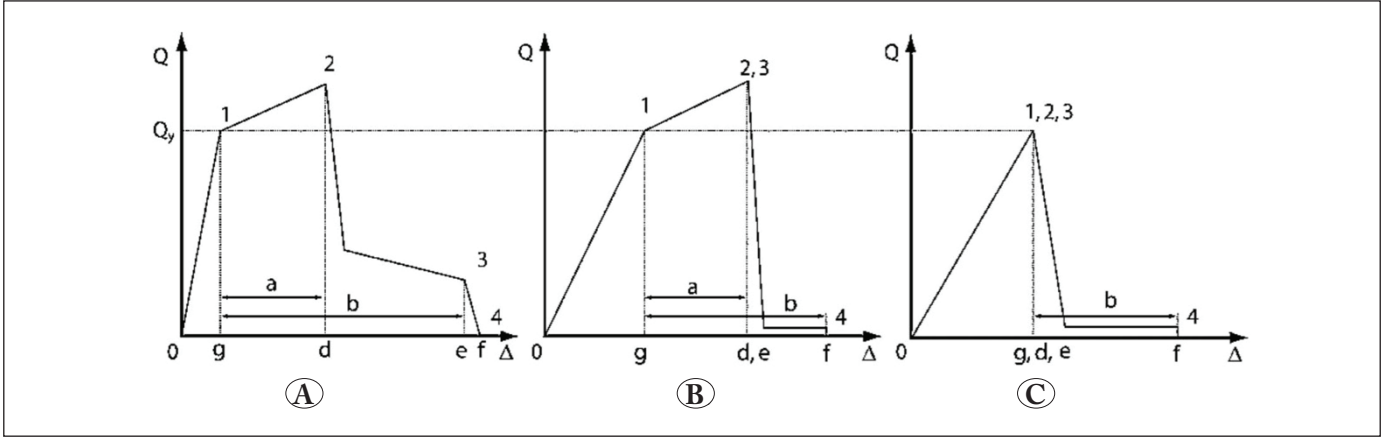
41-17'de verilen taşıyıcı sistemdeki elemanların sünek olan veya olmayan doğrusal olmayan farklı şekildeğiştirme davranışları Şekil 1'de gösterilmektedir. Burada üç farklı tip eleman davranışı tanımlanmaktadır:

- Tip 1, sünek şekildeğiştirme davranışında, elastik davranış (0-1 arası) sonrasında plastik davranış (1-3 arası) takip ediyor, sonrasında (3-4 arası) ise elemanın yük taşıma kabiliyeti kayboluyor. Plastik şekildeğiştirmede elemanın, dayanım kapasitesine erişildikten sonra (2-3 arası) az da olsa dayanım kapasitesi halen bulunmaktadır.
- Tip 2, sünek şekildeğiştirme davranışında, elastik davranış (0-1 arası) sonrasında plastik davranış (1-3 arası) takip ediyor. Elemanın dayanım kapasitesine erişildikten sonra (3) sonrasında ise elemanın yük taşıma kabiliyeti önemli ölçüde kayboluyor. Her iki tip davranışta plastik şekil değiştirmenin artan veya azalan eğimi olabilir ve bu davranış sergileyen elemanlar genelde şekildeğiştirme kapasitelerine göre değerlendirilir. Elemanların sünek davranışıyla şekildeğiştirme kapasitelerine göre değerlendirilmeleri için şartname: Tip 1 için Şekil 1(a)'daki parametrelere göre , Tip 2 için ise Şekil 1(b)'deki parametrelere göre olmasını gerektiriyor. Aksi durumda elemanın dayanım kapasitesine göre değerlendirilmesi gerekmektedir.
- Tip 3, gevrek veya sünek olmayan şekildeğiştirme davranışında, elastik davranış (0-1 arası) ile elemanın dayanım kapasitesine erişildikten sonra hemen dayanım kaybı (3-4 arası) olmaktadır. Bu davranış sergileyen elemanlar dayanım kapasitelerine göre değerlendirilir.

Kabul görülecek bir tasarım için, hesap sonunda elde edilen elemanların şekildeğiştirme ve dayanım taleplerinin performans kriterince belirlenen kapasitelerinin altında olduğu gösterilmesi hedeflenmektedir.

Bu ilkelerle uyumlu olarak, deprem kuvveti taşıyıcı sistemlerin birleşimleri için genel koşullar TBDY 18'in 9. bölümünde verilmektedir. Bu bölümde, 9.3'te süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çelik çerçeveler ile 9.4'te süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çelik çerçeveler için koşullar verilirken, Ek 9A'da birleşimlerin genel koşulları, Ek 9B'de ise bu kiriş-kolon birleşimlerin detaylarının boyutlandırılması verilmektedir.

Yönetmelik süneklik düzeyi yüksek moment aktaran çerçevelerin birleşimlerinin en az 0.04 radyan, süneklik düzeyi sınırlı moment aktaran çelik çerçevelerin birleşimlerinin ise en az 0.02 radyan görelî kat ötelemesi



Şekil 1. ASCE41-17'de tanımlanan doğrusal olmayan eleman yük-yerdeğiştirme ilişkileri: A) Tip 1 Sünek, B) Tip 2 Sünek ve C) Tip 3 Gevrek veya Sünek olmayan davranış.

açısını (görelî kat ötelemesi/kat yüksekliği) sağlayabilecek kapasitede olma koşulu tanımlamıştır. Bunun için, deneysel ve/veya analitik yöntemlerle geçerliliği kanıtlanmış olan detayların kullanılmasını veya geçerliliği kanıtlanmış olan çeşitli bulonlu birleşim detayı örnekleri ve bunların uygulama sınırlarını vermektedir. Belirlenen uygulama sınırları, birleşim elemanlarının, elastik olmayan şekil değiştirmelerin kiriş enkesitindeki akma nedeniyle meydana gelmesini sağlayacak yeterli dayanıma sahip olmaları esasına dayanmaktadır.

2.3. Kolon-Kiriş Birleşimlerinde Bulonların Doğrusal Olmayan Şekil Değiştirme Modeli ve Plastik Dönme Sınırları

Çelik yapıların şekil değiştirmeye göre performans değerlendirmesinde kullanılan itme yöntemleri veya zaman tanım alanında doğrusal olmayan hesap yönteminde taşıyıcı kiriş ve kolon elemanlarının uçlarında yığılı plastik mafsal olan çubuk sonlu elemanlarla modellenmesi yeterli olarak kabul edilir. Deprem Yönetmeliği'nde, bu hesap yöntemlerinde tam dayanımlı bulonlu alın levhalı birleşimler ile bulonlu başlık levhalı birleşimler için düğüm noktasında birleşimin rijitliğini ifade eden dönme yayları kullanılarak modellenmesi gerekmektedir. Çevrimsel davranış modeli olarak, çelik taşıyıcı sistemler için iç kuvvet-plastik şekil değiştirme bağıntılarında pekleşme etkisi göz ardı edilerek, yönetmelik elasto-plastik modelin kullanılmasını müsaade etmektedir (Şekil 2).

Hesaplanan şekil değiştirmelerin ilgili performans düzeyleri: Sınırlı Hasar (SH), Kontrollü Hasar (KH), ve Göçmenin Önlenmesi (GÖ) için izin verilen sınırlar Deprem Yönetmeliği Ek 5C bölümünde verilmiştir. Bu bölümde

moment aktaran çerçevelerin kolon-kiriş birleşim bölgeleri için farklı performans plastik dönme sınırları Çizelge 1'de verilmektedir.

Çizelgede yer verildiği gibi performans değerlendirmelerinde birleşimlerin dönme davranışında verilen plastik dönme sınırları dolayısıyla bulonların çekme yükleri altında sünek davranış beklentisi olduğu görülmektedir. Deprem Yönetmeliği'nde kolon-kiriş birleşimindeki bulonlu bağlantılarında, çekme yükü altındaki bulonların doğrusal olmayan çevrimsel davranış modeli ile üç farklı performans düzeyin plastik dönme sınırları Şekil 2'de ASCE41-17'deki tanımla beraber verilmiştir. Şekildeki ASCE41-17'de tanımlanan plastik dönme sınırları: *Immediate Occupancy* (IO), *Life Safety* (LS), ve *Collapse Prevention* (CP).

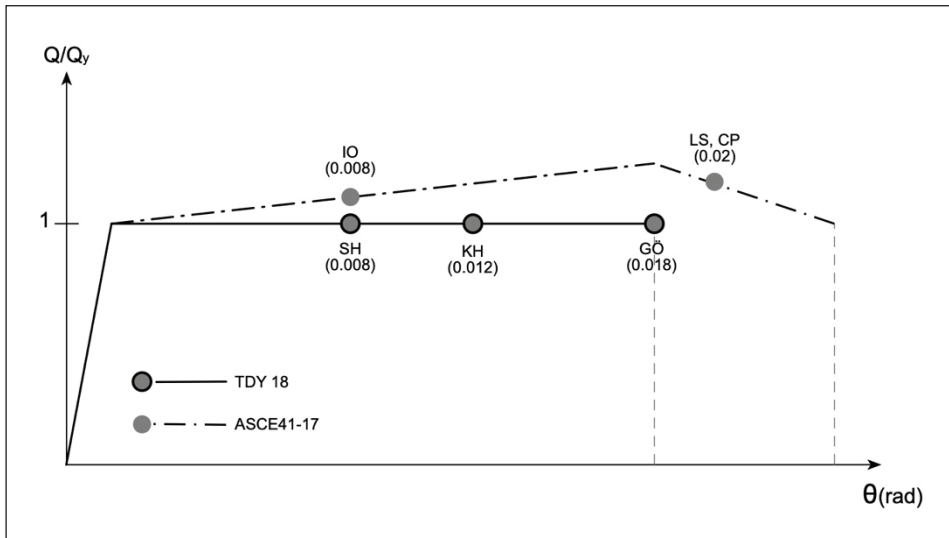
2.4. Deprem Yükleri Etkisinde Çelik Yapı Elemanları için Bulonlu Birleşimlerin Tasarımı

Geçerliliği kanıtlanmış iki farklı bulonlu birleşim Deprem Yönetmeliği'nde Ek 9B'da tanımlanmaktadır:

- Tam dayanımlı bulonlu alın levhalı birleşimler: Üç farklı tip alın levhalı birleşim detayı Şekil 3'te gösterilmektedir. İstenilen sünek davranış sağlamak için birleşim elemanları yeterli kapasiteyle akarak, sünek davranış sağlanır. Sünek olmayan gevrek bir göçmeyi engelleyecek şekilde detaylandırılmaktadır. Bu süreç kiriş, enkesitinin eğilme etkisinde akmaya ulaşması, alın levhasının eğilme etkisinde akmaya ulaşması, kolon panel bölgesinin akması, sonra ise çekme etkisindeki bulonların akması, kayma etkisindeki bulonların kırılması veya kaynaklı birleşim bölgelerinde kırılmalar olarak sıralanabilir.
- Bulonlu başlık levhalı birleşimler: Şekil 4'te tanımlanan koşullar, birleşim elemanlarının başlık levhasının

Çizelge 1. Deprem yönetmeliği'nde tanımlanan moment aktaran çelik çerçevelerde kolon-kiriş birleşim bölgesi plastik dönme sınırları.

Kolon-Kiriş Birleşim Tipi	Plastik Dönme Sınırları [rad]		
	SH	KH	GÖ
Tam Dayanımlı Bulonlu Alın Levhali Birleşim			
Alın levhasının akması durumu	0.01	0.025	0.04
Bulonların akması durumu	0.008	0.012	0.018
Bulonlu Başlık Levhali Birleşim			
Başlık levhası net kesitin veya bulonların kesmede akması	0.008	0.02	0.03
Başlık levhasının kaynağının veya plakanın kırılması	0.003	0.008	0.012
Tam nüfuziyetli küt kaynaklı birleşim			
	0.026 -0.00063d	0.0323 -0.00045d	0.043 -0.00060d
Kaynaklı zayıflatılmış kiriş enkesitli birleşim			
	0.025 -0.00015d	0.0525 -0.00023d	0.070 -0.00030d



Şekil 2. Deprem Yönetmeliği (TBDY 18) ve ASCE41-17'de birleşimlerde çekme yükü altındaki bulonların doğrusal olmayan çevrimsel davranış modelleri ile performans düzeyleri için plastik dönme sınırları

bitimine yakın bölgede bir plastik mafsalsın oluşmasını sağlayacak yeterli dayanım sağlayacak detaylandırma vermektedir.

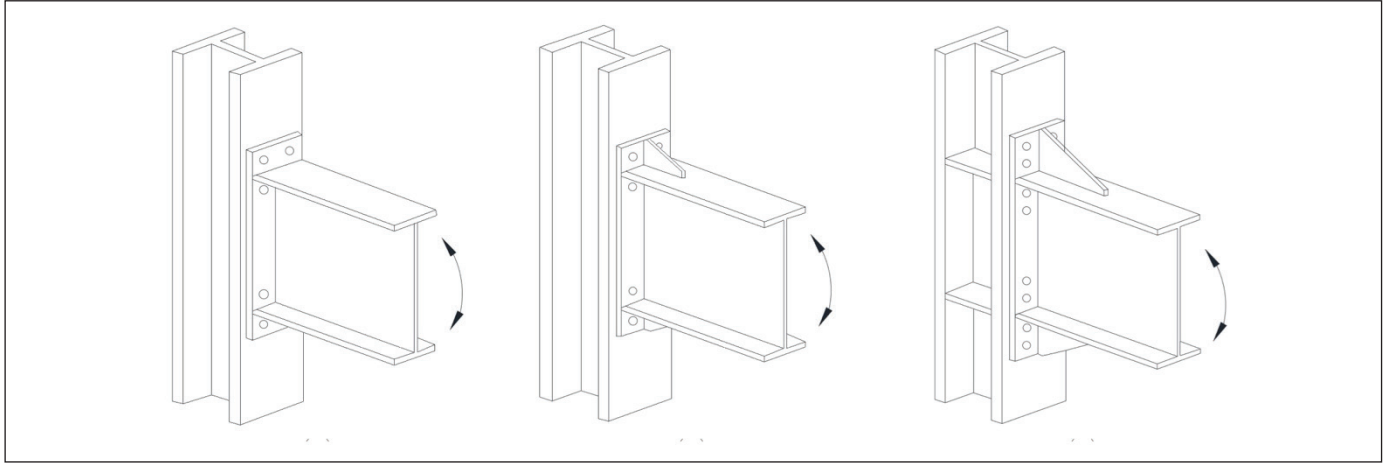
2.5 Çelik Elemanların Birleşimlerinde Kullanılan Yüksek Dayanımlı Bulonlar

Deprem Yönetmeliği, yukarıda tanımlanan deprem yükleri etkisinde olan, süneklik düzeyi yüksek ve sınırlı moment aktaran çelik çerçevelerin birleşim ve eklerinde kullanım için geçerliliği kanıtlanmış tam dayanımlı bulonlu alın levhali birleşimle, bulonlu başlık levhali birleşimler için tam öncekme uygulanmış yüksek dayanımlı 8.8 veya 10.9 bulon sınıfı kullanımını gerektirmektedir. Bulon sınıfı tanımındaki ilk hane ile belirtilen sayının yüz katı, MPa olarak çelik malzemenin çekme dayanımını; ondalık hanesi ise çeliğin akma dayanımını elde etmek için çekme dayanımının

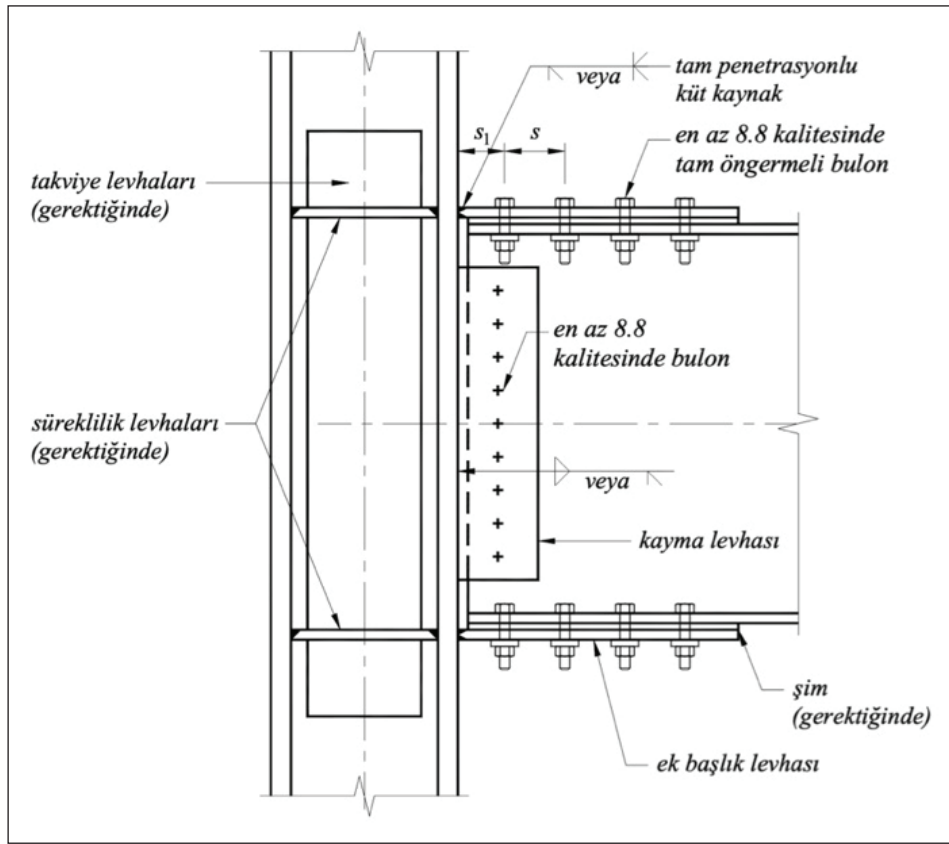
çarpanını belirtmektedir. Örneğin 8.8 kalitesindeki bir bulonun çelik malzemesinin asgari çekme dayanımı: $8 \times 100 = 800$ MPa; akma dayanımı ise $0,8 \times 800$ MPa = 640 MPa olur.

Öncekme yapılabilir yüksek dayanımlı bulonlar için Çelik Yönetmeliği, TS EN 14399 serisinde belirtilen bulonları tanımlamaktadır. Her yüksek dayanımlı malzeme ile üretilmiş bulon, öncekme uygulamaya müsait değildir. Bulonun üretiminde kullanılan çelik malzemesi dışında, öncekme yüklerine uygun bir geometri gerekmektedir. Bu nedenle öncekmeye uygun olarak geniş bulon başlığı, yük aktarımı sağlayacak oranda kalın somun ve uzun dış boyu gerekmektedir (Wallace, 2008).

Birleşimdeki bulonların kesme kuvveti etkisinde olduğu durumlarda ise bulonların dış açılmamış, gövde enkesitinin



Şekil 3. Deprem yönetmeliğinde (TBDY 18) tanımlanan, yeterliliği kanıtlanmış moment aktaran çelik çerçevelerde tam dayanımlı bulonlu alın levhali kiriş-kolon birleşimleri.



Şekil 4. Deprem yönetmeliğinde (TBDY 18) tanımlanan, yeterliliği kanıtlanmış moment aktaran çelik çerçevelerde tam dayanımlı bulonlu başlık levhali kiriş-kolon birleşimi.

kayma düzleminde olması ve birleşen parçalar arasındaki temas yüzeyin sürtünme katsayısı asgari olarak $\mu=0.20$ olacak şekilde hazırlanması gerekmektedir. Deprem yükleri etkisinde olmayan elemanların birleşim ve eklerinde ise Çelik Yönetmeliği'nde tanımlanan normal bulonların kullanılmasına izin vermektedir.

2.6. TS EN 14399 Öncekmeli Yüksek Dayanımlı Yapısal Bulon Düzenekleri

Deprem Yönetmeliği'nde TS EN 14399 serisinde tanımlanan öncekme uygulanabilir yüksek dayanımlı iki tip bulon, somun ve pul takımı bulunmaktadır: TS EN 14399-3 ve HR markalaması ile tanımlanan, 8.8 ve 10.9 malzeme sınıflarıyla üretilen bulon takımı ile TS EN 14399-4 ve HV

markalaması ile tanımlanan, 10.9 malzeme sınıfıyla üretilen bulon takımı. Avrupa'da öncekme uygulanan iki farklı bulon tipi bulunmaktaydı. TS EN 14399 serisi bu iki tipe yer verecek şekilde geliştirilmiştir.

HR bulon takımı İngiliz/Fransız yaklaşımına uygun eski BS 4395 standardına dayanarak geliştirilmiştir. HR kısaltmasının açılımı İngilizce yüksek dayanım anlamına gelen "*High Resistance*" kelimelerin baş harflerinden gelmektedir. Bu bulon tipinde, çekme yükü altında gövde enkesitinin plastik uzamasıyla, akarak sünekliliği sağlamak için somun kalın ve gövdedeki dişli kısmın boyu uzun tutulmaktadır. Kalın somunlar, öncekme yükü uygulaması sırasında veya aşırı yüklemeye altında, diş sıyrılmasına karşı dayanıklı olmasını sağlıyor. Bulonun somun dışındaki gövde kısmında akıp kopmasını sağlamak için, asgari olarak somun kalınlığı $\geq 0.9 \times D$ (bulon gövde çapı) olarak tanımlanmıştır. Bu anlamda ASTM F3125 bulon standardına benzemektedir. ASTM A325 bulonu HR 8.8, ASTM A490 ise HR 10.9 sınıfına denk düşünülebilir.

HV bulon takımı ise Alman yaklaşımına uygun DIN 6914 standardına dayanarak geliştirilmiştir. HV kısaltmasının açılımı Almanca yüksek dayanımlı öncekmeli bağlantı anlamına gelen "*Hochfest Vorgespannte Verbindung*" kelimelerin baş harflerinden gelmektedir. Bu bulon tipinde, daha ince somun ve gövdede dişli kısmın kısa olması nedeniyle, yük aktarımı için yeterli dişlinin olmamasından dolayı, çekme yükü altında somun altındaki dişlerin plastik şekil değiş-tirmesiyle sonuçlanıyor. Öncekme sırasında aşırı derecede yüklenmesi durumunda, HR tipi bulonların aksine, gövdenin akmasından ziyade dişlerin plastik şekil değiş-tirmesi nedeniyle kopma öncesi pek bir belirti vermemektedir. Somun kalınlığı yaklaşık olarak $0.8 \times D$ (bulon gövde çapı) olarak tanımlanmış olmalarından dolayı bu tip bulonlar diş sıyrılması nedeniyle kopabilmektedir. HV tipi bulonlar, öncekme yükü uygulaması sırasında aşırı yüklenmeye karşı daha hassas olmasından dolayı sahada daha fazla kalite kontrol gerektirmektedir (SIGN 2019). HR ve HV bulon takımları arasında davranışı etkileyen iki ana geometrik farkı Şekil 3'te gösterilmektedir.

2.7 Yüksek Dayanımlı Yapısal Bulon Düzeneklerine Öncekme Uygulama Yöntemleri

Kullanılan öncekme uygulamasından bağımsız olarak, birleşen yüzeyler birbiriyle tam temas sağlayacak şekilde önce basit sıkma işlemi uygulandıktan sonra, öncekme kuvveti uygulanır. Tüm bulonların dengeli bir şekilde sıkılmış olmasını sağlamak için, bağlantının en rijit noktasından, rijit olmayan noktasına doğru bulonlar sırayla

sıkılması gerekmektedir (TS EN 1090-1). Gerekirse birden fazla turda sıkma işlemi gerçekleştirilebilir.

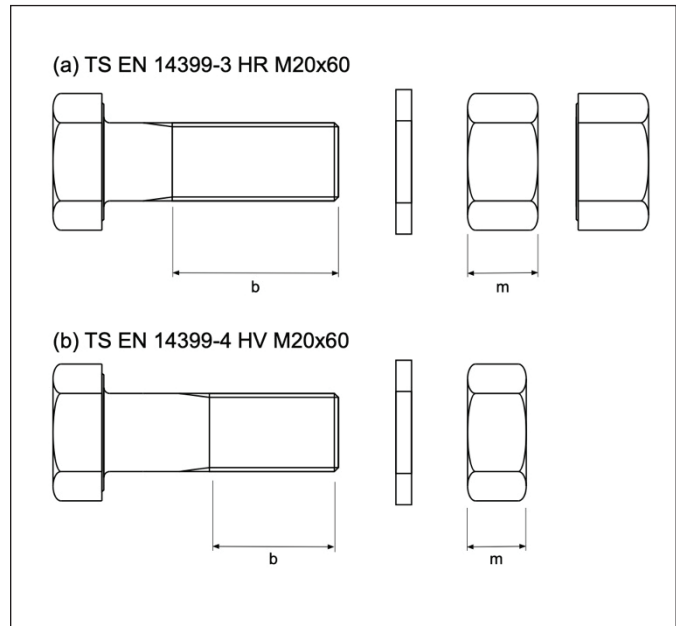
Bulonlara tam öncekme sağlamak için uygulanacak minimum çekme kuvveti bulon dayanımının %70'i olarak tanımlanmaktadır. Bulon sınıfı ve çapına göre, uygulanacak öncekme kuvveti bir çizelge ile Çelik Yönetmeliği'nde verilmiştir. Burada bulonlara öncekme kuvvetinin uygulanması için TS EN 1090-2 ile uyumlu olarak aşağıdaki farklı yöntemler tanımlanmıştır:

Somun Döndürme Yöntemiyle Öncekme

Bulon dişlerine üretimde uygulanmış yağ kaplaması ile sağlanan kayganlıkla, somunun bulon çapına ve uzunluğuna bağlı olarak belirlenen bir oranda döndürülmesi ile gerekli öncekme kuvvetinin uygulandığı yöntemdir. TS EN 1090-2'de iki aşamalı bir uygulama olarak tanımlanmaktadır. İlk aşamada kalibre edilmiş (tork) göstergeli sıkma anahtarıyla öncekme yükünü sağlayacak torkun %75'ine kadar sıkıldıktan sonra, belirlenen oranda somunun döndürülmesiyle de gerekli tam öncekme kuvveti uygulanmaktadır.

Göstergeli Sıkma Anahtarıyla Öncekme Uygulama Yöntemi

Bulon dişlerine üretimde uygulanmış yağ kaplaması ile sağlanan kayganlıkla, kalibre edilmiş (tork) göstergeli sıkma anahtarıyla öncekme yükünü sağlayacak torkun %75'ine kadar sıkıldıktan sonra, ikinci aşamada belirlenen öncekme



Şekil 5. TS EN 14399 standart serisinde (a) TS EN 14399-3 HR ve (b) TS EN 14399-4 HV ile tanımlanmış M20x60 bulon takımları arasındaki ana farklar: diş boyu (b) ve somun kalınlığı (m) gösterilmektedir.

yükünü sağlayacak torkun %110'una kadar sıkılmasıyla gerekli öncekme kuvvetin uygulandığı yöntemdir.

Çekme Kuvvetini Doğrudan Belirten Göstergeli Pul ile Öncekme Uygulama Yöntemi

HV veya HR sistemi bulonlara uygun üretilmiş, TS EN 14399-9'da tanımlanmış yük göstergeli pullar, fiziki olarak ezilip ve/ya boya püskürterek gerekli öncekme yüküne doğrudan ölçerek ulaşıldığını teyit edilmesini sağlar.

Çekme Kontrollü Bulon ile Öncekme Uygulama Yöntemi

TS EN 14399-10'da HRC (*High Resistance Calibrated*) sistemi olarak tanımlanan bulonun ucunda kalibre edilmiş geometrisiyle istenilen öncekme kuvvetine ulaşıncaya burularak kopan yivli bir parça bulunmaktadır. Bu uygulamada çift soketli dişli anahtar ile dış soket somunu kavrarken, iç soket ise bulonun dişlerin bittiği uçtaki yivli çıktıyı kavırıyor. İlk aşamada iç soket yivli ucu sabit tutarken, dış soket somunu saat yönünde döndürüp sıkıyor. İkinci aşamada somunu kavrayan dış soket sabit dururken, iç soket yivli ucu saatin ters yönünde yük uygulayarak, kalibre edilen yükte uç burularak kopup, bulonda gerekli öncekme kuvvete ulaşıldığını teyit edilmesini sağlar.

2.8. Bulon Dayanımın ve Davranışın Sağlanması için Tasarımcının ve Yüklenicinin Sorumlulukları

Sahada bulon takımının tüm parçalarıyla uygun ve temiz koşullarda muhafaza edilmesi için sıkı bir denetim gerekmektedir. Özellikle HV Sistemi bulonların yanlış somun eşleşmesi, bulonların uygun olmayan şekilde sahada saklanmasıyla dişlerin tozlanması gibi uygun olmayan koşullarla öncekme uygulaması sırasında dişlerin sıyırılması bir risk oluşturmaktadır. Halen yapımda en yaygın olarak kullanılan kalibre edilmiş göstergeli sıkma anahtarları ile öncekme uygulaması sırasında sıyırılması sonucunda uygulanan tork değeri kalibre edilen değere ulaşmış olmasına rağmen, somunun kitlenmesi nedeniyle, gerekli öncekme seviyesi sağlanmamış olur.

Bulon imalatında dişlerin uygun şekilde yağlanmasıyla, varsa galvaniz kaplamasıyla beraber, tanımlanan somun dönme kayganlığın sağlandığının ve bir düzenek olarak, somunun sıkılmasıyla EN 1090-2'de belirtilen koşullar ile aşırı sıkma ve hatalara karşı yeterli paylarla belirtilen sıkma yöntemleri kullanılarak gerekli öncekme yükünün güvenli bir şekilde sağlanabileceğini teyit etmek amacıyla TS EN 14399-2 "Önyüklemeye (öncekme) uygunluk deneyi" tanımlanmaktadır. Bu deney, yüksek dayanımlı bulonlarla ilgili Amerikan şartnamesi ASTM F3125'te tanımlanan "Rotational

Capacity Test" ile aynı amacı taşımaktadır (Wallace 2009). Üretici tarafından veya sonradan saha koşullarına uygun yapılan bu test ile belirlenen k-faktörü, bulona öncekme kuvveti uygularken somuna anahtar aracılığıyla uygulanan moment ile bulon çekme yükü arasındaki ilişkiyi ifade eder. Bulon tipi ve öncekme yöntemine göre k-faktörün nasıl belirleneceği ve ne sıklıkta yapılması gerektiği TS EN 1090-2 ve TS EN 14399-2'de, bulonun K-sınıfı aracılığıyla tanımlanmaktadır.

Tasarımda ise Çelik Yönetmeliği'nin "3.2 Hesap Raporu ve Uygulama Projelerine İlişkin Kurallar" bölümünde, tasarımcının hazırladığı proje hesap raporları ve uygulama proje çizimlerinde yapımda kullanılacak malzeme ve bulon sınıfları ile karakteristik dayanımlarıyla ilgili bilgileri, birleşim ve ek detayları ile bunlara ait hesaplar ayrıntılı olarak verilmesini gerektirmektedir. Uygulama veya imalat projelerinde yapı bileşenlerinin detaylarıyla birlikte, kullanılacak bulonların tipi sınıfı, çapı, pul ve somun özellikleri ile uygulanacak öncekme kuvvetlerin verilmesi gerekmektedir. İmalatçı ve yüklenici ise TS EN 1090-2 ye uygun olarak bulonların üretim sertifikalarını belgelemeleri ve saha uygulamalarındaki muayeneleri belgeledirmeleri gerekmektedir. Benzer şekilde Deprem Yönetmeliği'nin "9.13.2 Çelik Uygulama Projesi Çizimlerine İlişkin Kurallar" bölümünde bulonlu birleşim ve ek detaylarında kullanılan bulon cinsi, bulon ve delik çapları, rondela ve somun özellikleri ile bulonlara uygulanacak öncekme kuvveti ve sürtünme yüzeyi ile ilgili bilgiler verilmesini gerektirmektedir.

Kaynaklı birleşimlerle karşılaştırıldığında, yüksek dayanımlı bulonlu bağlantılarda öngörülen tasarım ilkelerine göre güvenilir mukavemet ve davranışı elde etmek göreceli olarak daha kolay ve ucuzdur. Fakat tasarım dokümanlarında bağlantılarda kullanılacak bulonların doğru tanımlanması, standartlara uygun bulonların bir takım olarak doğru parçaların bir arada kullanılıp, sahada doğru süreçlerle ve muayenelerle montajının özenle yapılması gerekmektedir.

2.9. Yük Altında TS EN 14399 Öncekmeli Yüksek Dayanımlı Bulonların Doğrusal Olmayan Davranışı

Öncekmeli yüksek dayanımlı iki farklı TS EN 14399 bulonu, HV ve HR tiplerinin yük-yerdeğiştirme davranışları ile kopma biçimlerini karşılaştırmak için D'Aniello vd. (2016) farklı çekme yük koşulları altında iki tip bulonlarla deneyler yaptılar. M16x100, M20x110, ve M24x120 boyutlarındaki HR, HV ve çift somunlu HV bulon düzenekleriyle: Monotonik çekme yüklemesi altında 2 deney, gerilme

genliği değişken çevrimsel yükleme altında 3 deney, ve sabit gerilme genliği değişken çevrimsel yükleme altında 2 deney, toplamda 63 deney gerçekleştirdi.

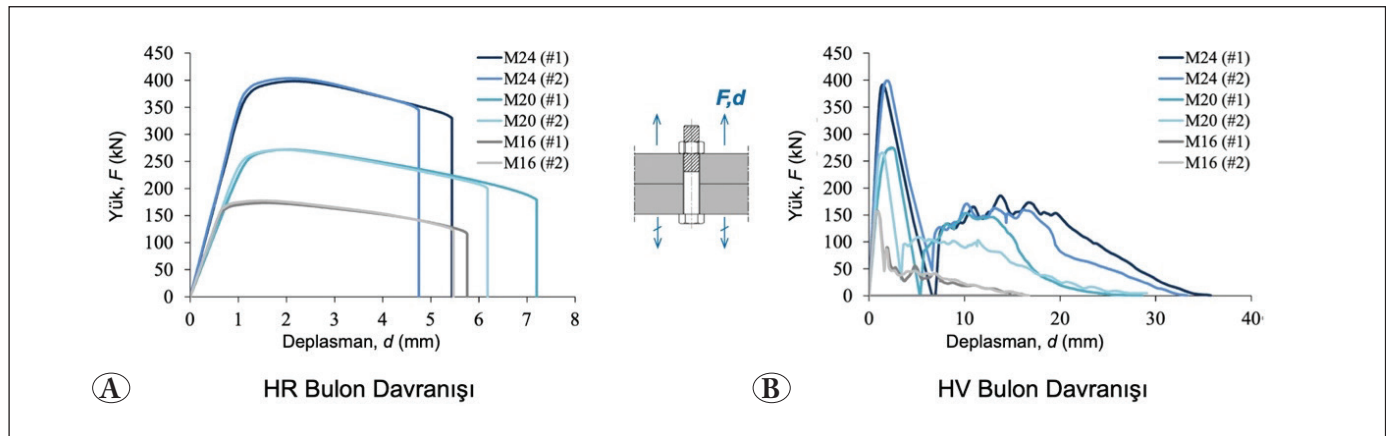
Şekil 6'da HR ve HV bulonların monotonik yük altındaki çekme davranışı gösterilmektedir. Şekil 6(a)'da ikişer M16, M20, ve M24 HR bulonu, deney düzeneğinde, öncekme yapıldıktan sonra doğrusal olmayan yük-yerdeğiştirme davranışlarının, ASCE41-17'de tanımlanan ve Şekil 1(b)'de gösterilen Tip 2 sünek eleman yük-yerdeğiştirme ilişkisiyle uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 6(b)'de ise ikişer tane M16, M20, ve M24 HV bulonu, deney düzeneğinde, öncekme yapıldıktan sonra doğrusal olmayan yük-yerdeğiştirme davranışlarının, ASCE41-17'de tanımlanan ve Şekil 1(c)'de gösterilen Tip 3 sünek olmayan eleman yük-yerdeğiştirme ilişkisiyle uyumlu olduğu görülmektedir.

3. Sonuç

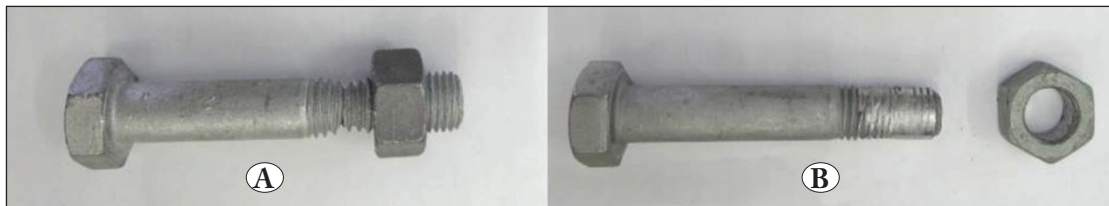
Bulonların temel iki kopma mekanizmaları Şekil 7'de gösterilmektedir. HR bulonların tümü yük altında gövdesindeki dişli kısmında boyun vererek (*necking*) akarak sünek bir şekilde koparken, HV bulonların tümü ise yük

altında dış sıyrılmasıyla sünek olmayan bir şekilde koptuğu gözlemlenmiştir.

Bulonların deneysel davranışını, detaylı sonlu eleman modelleriyle dişler arasındaki yük aktarımı ile kopma mekanizmaları farklı araştırmacılar (Grismo vd. 2106, Hu vd. 2016, D'Aniello vd. 2017) tarafından detaylı olarak incelemiştir. HR ve HV bulonlarının farklı davranışlarının bağlantı elemanlarının tümsel davranışına olan etkisini değerlendirmek için, D'Aniello vd. (2016) bileşen bazlı analitik hesap ile D'Aniello vd. (2017) de ise birleşim elemanların detaylı sonlu eleman analizleriyle bağlantı davranışlarını incelemektedir. Birleşimlerin elemanlarını çekme yoluyla bağlayan bulonların davranışları, doğrudan tümsel davranışı etkilediği görülmektedir. Bu çalışmalara göre bulonların kopma mekanizması, bağlantının kopma mekanizmasını doğrudan belirlemektedir. Bulonlar kapasiteye dayalı tasarlanırsa dahi HV tipi bulonların öncekme uygulanırken veya deprem yükleri altında aşırı yüklenmesi durumunda dişlerinin sıyrılma riski bulunduğundan beklenen sünek davranışın sağlanamamasının mümkün olmadığı görülmektedir.



Şekil 6. Monotonik çekme deneyleri sonucunda: A) HR bulonların sünek yük-yerdeğiştirme davranışı ile B) HV bulonların sünek olmayan yük-yerdeğiştirme davranışı gösterilmektedir (D'Aniello vd. 2017); deney düzeneğinin şematik kurgusu ortada şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 7. Çekme deneyi sonucunda bulonların farklı kopma mekanizmaları: A) M20 HR bulon gövdesindeki dişli kısmında boyun vererek (*necking*) akarak sünek bir davranışla kopması ile B) M20 HV bulon dişlerinin sıyrılmasıyla sünek olmayan bir davranışla kopması gösterilmektedir (D'Aniello vd. 2017)

4. Tartışma

HV tipi bulonları ve benzer dış sıyrılma olasılığı yüksek olan bulonlara yönelik daha sünek davranış sağlamaya yönelik farklı çalışmalar yapılmıştır. D'Aniello vd. (2016) HV bulonlara, Grimsno vd. (2016, 2017) ise farklı tip bulonlarla çift somun kullanılarak dış sıyrılmasını önleyip sünek davranış elde edilebileceğini deneylerle göstermiştir. Grimsno vd. (2017) somun konumunun, bulon sünekliliğine olan etkisini deneylerle incelemiş, bulonun bağlantı sağladığı kısımdaki gövdede (grip) kalan dişli kısmın artırılması veya tümünden dişli bir gövde kullanarak bulonun daha sünek bir davranış sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Hu vd. (2016) ise 8.8 sınıf bulonlarla, 10.9 sınıf somunun kullanılmasıyla dış sıyrılmasının önlenip, bulona sünek bir kopma mekanizma sağlanabileceğini deneylerle sergilemektedir. Bulonların davranışını sünekleştirecek bu farklı yöntemler, şartnamelerle uygun veya saha koşullarında uygulanması mümkün olmayabilir.

D'Aniello vd. (2017) sonlu elemanlarla HV ve HR bulon düzenek tiplerin bağlantı elemanlarıyla beraber olarak tümsel doğrusal olmayan davranışını analiz ettiklerinde, HV bulonlarıyla incelenen birleşimlerinin dayanım ve yerdeğiştirmelerini, Eurocode'da çelik yapıların bağlantıların tasarımıyla ilgili EN 1993-1-8 şartnamesiyle doğru modellenemediğini ve hesaplanan dayanımın güvenli tarafta kalmadığını tespit etmişlerdir. Şartnamenin HV davranışını hesaba katarak HR ve HV tipi bulonlarla oluşturulan bağlantıların farklı değerlendirilmesi gerektiğini belirtmişlerdir.

TS EN 14399 öncekme uygulanabilen farklı tip bulonları tanımlarken, yük altında doğrusal olmayan yük-yerdeğiştirme davranışları bakımından ayırt etmemektedir. HR bulonların gövdedeki dişli kısmın uzunluğu ile somun kalınlığı, çekme yükleri altında gövdenin akmasıyla, sünek bir şekilde kopacak şekilde boyutlandırılmıştır. HV tipi bulonlarda ise gövdedeki dişli kısmın daha kısa ve somunun da daha ince olmasından dolayı kopma, dişlerin akması ve sıyrılmasıyla olmaktadır. Yapılan deneylerde bu iki bulon tipinin farklı doğrusal olmayan davranış eğrilerinden ASCE41-17'de tanımlanmış farklı sünek ve sünek olmayan yük-yerdeğiştirme tipleriyle kıyaslandığında, çekme yükleri altında HR bulonların sünek, HV bulonların ise sünek olmayan, gevrek yük-yerdeğiştirme tipinde olduğu görülmektedir.

Tasarımda deprem yükleri altında yapının yerdeğiştirme-siyle, göçme olmadan çevrimsel dinamik yüklerin enerjisini sönlendiren sünek bir davranış elde etmek için

yapı elemanları boyutlandırılıp, detaylandırılmaktadır. Bulonların montajı sırasında öncekme uygulanırken veya dış yükler altında bulon dişlerinin akarak sıyrılmasıyla kopması ise birleşimin bütünlüğünü ve yapının dayanımı açısından kaçınılması gereken bir durumdur.

Yapılan bulonlu birleşim elemanların çekme deneylerinde bulonların kopma mekanizmasının, bağlantının davranışını etkilediği gösterilmiştir. Bu tespate dayanarak HV bulonların deprem yüklerini aktaran elemanların birleşim ve eklerinde amaçlanan tasarım ilkelerine uygun olmamasından ve montaj sırasında sıyrılma ihtimalinin kalite kontrol ile tespitinin zor olmasının yapı bütünlüğüne yaratacağı riskten dolayı kullanılmasına izin verilmemesi önerilmektedir.

5. Kaynaklar

- Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı 2018.** Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, *Resmi Gazete*, Sayı 30364, 18 Mart 2018.
- ASCE 41-17 2017.** Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings, American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia. Doi: 10.1061/9780784414859
- Akbas, B., Shen, J. 1995.** Seismic Design Study of P- Δ Effect on Steel Frames with Various Connections, *Proc 7th Nat. Conf. on Earthquake Eng.*, Canadian Association for Earthquake Engineering, Montreal, Canada.
- ASTM F3125/F3125M 2018.** Standard Specification for High Strength Structural Bolts and Assemblies, Steel And Alloy Steel, Heat Treated, Inch Dimensions 120 Ksi And 150 Ksi Minimum Tensile Strength, and Metric Dimensions 830 MPa And 1040 MPa Minimum Tensile Strength. ASTM International, West Conshohocken, PA. Doi: 10.1520/F3125_F3125M-18
- Çevre ve Şehircilik Bakanlığı 2018.** Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esaslarına Dair Yönetmelik 2018, *Resmi Gazete*, Sayı 30333, 15 Şubat 2018.
- D'Aniello, M., Cassiano D., Landolfo, R. 2016.** Monotonic and Cyclic Inelastic Tensile Response of European Preloadable Gr10.9 Bolt Assemblies, *J. Const. Steel Res.*, 124: 77–90. Doi: 10.1016/j.jcsr.2016.05.017
- D'Aniello, M., Cassiano D., Landolfo, R. 2017.** Simplified Criteria for Finite Element Modelling of European Preloadable Bolts, *Steel Comp. Struct.*, 24(6): 643–658. Doi: 10.12989/scs.2017.24.6.643
- EN 1998-1-8 2005.** Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints. *Eurocode 3*, Brussels, Switzerland.
- Grimsno, EL., Aalberg, A., Langseth, M., Clausena, AH. 2016.** Failure modes of bolt and nut assemblies under tensile loading, *J. Const. Steel Res.*, 126: 15–25. Doi: 10.1016/j.jcsr.2016.06.023

- Grimsmo, EL., Aalberg, A., Langseth, M., Clausena, AH. 2017.** How Placement of Nut Determines Failure Mode of Bolt-And-Nut Assemblies, *Steel Const.*, 10(3): 241-247. Doi: 10.1002/stco.201710025
- Hu, Y., Shen, L., Nie, S., Ya, B., Sha, W. 2016.** FE Simulation and Experimental Tests of High-Strength Structural Bolts Under Tension, *J. Const. Steel Res.*, 126: 174-186. Doi: 10.1016/j.jcsr.2016.07.021
- Kasai, K., Mao, C., Mayangarum, A. 1998.** Feasibility of Bolted Rigid and Semi-Rigid Connections For Seismic Regions, *Summary Report of the Third U.S.-Japan Workshop on Steel Fracture Issues*, Building Research Institute (BRI) of Japan, 469-481.
- RCSC 2020.** Specification for Structural Joints Using High-Strength Bolts, Research Council on Structural Connections, June 11, 2020.
- TS EN 1090-1 2011.** Çelik Yapı Uygulamaları, Bölüm 1: Yapısal Bileşenlerin Uygunluk Değerlendirme Gereklere, *TSE*, Ankara.
- TS EN 1090-2 2011.** Çelik ve Alüminyum Yapı Uygulamaları, Bölüm 1: Çelik Yapılar İçin Teknik Gereklere, *TSE*, Ankara.
- TS EN 14399-1 2006.** Önyüklemeli Yüksek Mukavemet Yapısal Cıvatalama Düzenekleri, Bölüm 1: Genel Gereklilikler, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14399-2 2006.** Önyüklemeli Yüksek Mukavemet Yapısal Cıvatalama Düzenekleri, Bölüm 2: Önyükleme Uygunluk Deneyi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14399-3 2006.** Önyüklemeli Yüksek Mukavemet Yapısal Cıvatalama Düzenekleri, Bölüm 3: HR Sistemi Altıköşe Başlı Cıvata ve Somun Düzenekleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14399-4 2006.** Önyüklemeli Yüksek Mukavemet Yapısal Cıvatalama Düzenekleri, Bölüm 4: HV Sistemi Altıköşe Başlı Cıvata ve Somun Düzenekleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14399-9 2006.** Önyüklemeli Yüksek Dayanımlı Yapısal Cıvatalama Takımları, Bölüm 9: HV veya HR Sistemi Yük Göstergeli Pullar, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 14399-10 2006.** Önyüklemeli Yüksek Dayanımlı Yapısal Cıvatalama Takımları, Bölüm 10: HRC Sistemi Öncekme Kuvveti için Tasarlanmış Bulon ve Somun Takımları, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- SIGN, 2018.** European Standards for Preloadable bolts, *Steel Industry Guidance Notes*, SN26/2008.
- Wallace, W. 2004.** You Can't Tension All Bolts, *Link Magazine*, Winter, 6(1).
- Wallace, W. 2009.** RC Tests, Nut Factors, And the Europeans, *Link Magazine*, Winter, 26(1).