

Çelik Yapılarda Kullanılan Birleşim Elemanlarının Yangın Etkisinin Deneysel Olarak İncelenmesi

Casim YAZICI¹, Abdulhadi KOŞATEPE^{2*}

ÖZET: Bu çalışmada, yüksek sıcaklıklara (600 °C, 800 °C ve 1000 °C) maruz kalmış bulon ve vidaların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Gerilme şekil değiştirme, elastisite modülü, verim ve nihai dayanımlar gibi artık mekanik özellikler ve ayrıca bulonların göçme modları çeşitli hedef sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra kontrol numuneleri ile karşılaştırmaları yapılmıştır. Sıcaklık seviyesi, ham madde çeliklerinin kimyasal kompozisyonu ve 12.9 dayanım sınıfı bulonların üretim sürecinde ısıtma işlemi özelliklerinin artık mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Testlerden elde edilen veriler, bulonların, 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda artık gerilmede hızlı bir azalma olduğunu ve 800 °C'ye maruz kaldıktan sonra nihai dayanımın % 48.6'sine ulaştığını gözlemlenmiştir. Birleşim araçlarının karbon miktarı ve bulon üretiminde temperleme sıcaklığı dışında, bulonların ve vidaların artık mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediği görülmektedir.

Anahtar Kelimeler: : Çelik birleşim, vida, bulon, yangın etkisi

Experimental Investigation of Fire Effect of Joint Elements Used in Steel Structures

ABSTRACT: In this study, mechanical properties of bolts and screws exposed to high temperatures (600 °C, 800 °C and 1000 °C) were investigated. Residual mechanical properties such as tensile deformation, elastic modulus, yield and final stress, as well as failure modes of bolts, were compared with control samples after exposure to various target temperatures. Temperature level, chemical composition of raw material steels and the effect of heat treatment properties on residual mechanical properties during the production process of 12.9 degree bolts were investigated. Data from the tests show that the bolts have a rapid reduction in residual strength when heated to temperatures above 400 °C and reach 48.6 % of the final power after exposure to 800 °C. Apart from the carbon content of the coupling means and the tempering temperature in bolt production, it is seen that the bolts and screws now significantly affect the mechanical properties.

Keywords: Steel joint, screw, bolt, fire effect

¹Casim YAZICI (Orcid ID: 0000-0002-2061-4275), Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Doğubeyazıt Ahmed-i Hani Meslek Yüksekokulu, Ağrı, Türkiye

²Abdulhadi KOŞATEPE (Orcid ID: 0000-0002-7767-4981), Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Patnos Meslek Yüksekokulu, Ağrı, Türkiye

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: Casim Yazıcı, e-mail: cyazici@agri.edu.tr

Bu çalışma 19-22 Haziran 2019 tarihinde Ağrı'da düzenlenen 4. Uluslararası Temel ve Uygulamalı Bilimlerdeki Gelişmeler Konferansı'nda sözlü sunum olarak sunulmuştur.

GİRİŞ

Çelik yapılarda, birleşim malzemesi olarak kullanılan; bulon, perçin, kaynak, vida ve depolama raf birleşimleri gibi yaygın olarak kullanılan birleşim tipleri mevcuttur. Bu birleşim araçları birleştireceği iki malzeme arasında rijit veya yarı rijit bir birleşim oluşturur. Çelik yapılarda yangın etkisine karşı dayanıklı bir yapı veya elemanlardan beklenen taşıma kapasitesi gibi görevleri yangın etkisinde belirli bir zaman aralığında bu görevlerini yerine getirmelidir. Yapıları yangın etkisinden korumak için öncelikli olarak yapının yangın etkisi altında nasıl davranış sergileyeceğini belirlememiz önem teşkil etmektedir. Yangın etkisi altında çelik çerçeve sistemlere plastik teorisi uygulanmaktadır. Bu teori yardımı ile yapıda meydana gelecek çökme miktarları belirlenebilmektedir. Çelik yapılarda en büyük belirsizliği oluşturan eleman birleşimlerdir. Bu nedenle çelik yapılarda taşıyıcı elemanlar hakkında çeşitli deneysel ve nümerik çalışmalar yürütülmüştür. Çelik yapı elemanlarının yangın etkisine karşı dayanımları bilindiği için burada önemli olanın birleşim malzemesi olarak kullanılan vida ve bulonların karakteristik özelliklerinin yangın etkisi altında performansları önem teşkil etmektedir (Sanrı, 2004). Yüksek sıcaklıklara maruz kalan bulonların artık mekanik özellikleri üzerinde yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarını sunmaktadırlar (Choi ve ark., 2014). Gerilme-şekil değiştirme, elastisite modülü, verim ve nihai dayanım gibi artık mekanik özellikler ve bulonların göçme modları, çeşitli hedef sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra değerlendirilmiştir. Sıcaklık seviyesi, hammadde çeliklerinin kimyasal kompozisyonu ve bulonların üretim sürecinde ısı işlem özelliklerinin artık mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Testlerden elde edilen veriler, bulonların, 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara ısıtıldığında artık güçte hızlı bir azalma olduğunu ve 800 °C'ye maruz kaldıktan sonra nihai gücün % 50'sine ulaştığını göstermektedir (Lou ve ark., 2015). Çelikte bulunan karbon miktarının sıcaklığı ve bulon üretimindeki sıcaklığı dışında, bulonların artık özelliklerini önemli ölçüde etkiler (EN, 1993). Testlerden elde edilen veriler, bulonların sıcaklığa bağlı artık mekanik özelliklerini değerlendirmek için bir dizi tahmin denklemi önermek için kullanılır (Kodur ve ark., 2017).

Metrik 6 bulonlar, molibden ve krom ile birlikte daha yüksek karbon içeren yüksek mukavemetli alaşımlı çeliklerin söndürülmesi ve sıkıştırılmasıyla üretilir. Yüksek mukavemetli çeliklerin farklı kimyasal bileşenleri, üretim sıcaklığı, bulonların mekanik özelliklerinin bozulmasına neden olmaktadır. Bu bulonların sıcaklığa maruz kaldıktan sonra davranışları konusunda sınırlı araştırmalar bildirilmiştir (Kirby, 1995). Spesifik olarak, gerçekçi yangın senaryolarında karşılaşıldığı gibi, ısıtma ve soğutma aşamasına tabi tutulduktan sonra metrik 6 bulonların artık mekanik özellikleri hakkında mevcut veri yoktur. Bu sınırlamaların üstesinden gelmek için, kalan mekanik özellikleri değerlendirmek için metrik 6 bulonlar üzerinde deneysel bir çalışma yürütülmüştür. Testlerden elde edilen veriler, ısıtma-soğutma fazının artık gerilme-şekil değiştirme, elastisite modülü, verim ve nihai dayanımın yanı sıra bulonlardaki göçme modları üzerindeki etkisini araştırılacaktır. Bu çalışma konusunun temel odak noktalarından bir diğeri ise yangın esnasında birleşim malzemeler, giriş veya kolonda göçmenin öncelikli olarak hangisinde meydana geleceğidir.

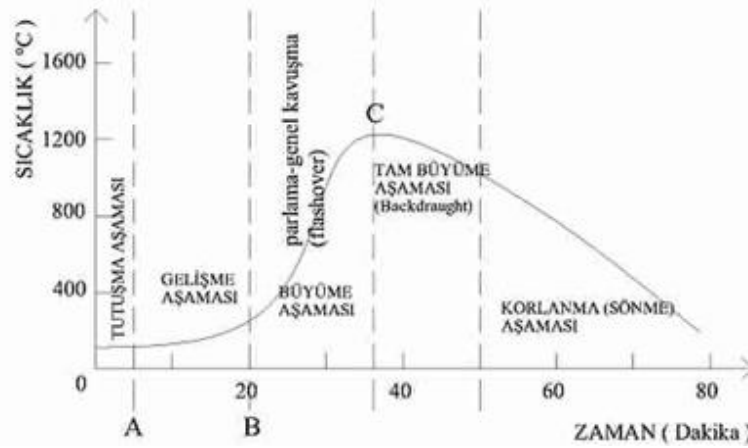
MATERYAL VE YÖNTEM

Mekanik özellikleri değerlendirmek için tam boy bulon ve vidalar üzerine farklı sıcaklıklar maruz bırakılarak testler yapılmıştır. Isıtılmamış bulon ve vidaların referans dayanımını değerlendirmek için oda sıcaklığında çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Ayrıca, bulonların önceden belirlenmiş bir sıcaklığa kadar ısıtıldığı, daha sonra çevre sıcaklığına soğutulduğu ve gerilme yüklemesine maruz bırakılarak göçme moduna karşı test edildiği artık gerilme dayanımı testleri belirlenmeye çalışılmıştır. Bir yangın olayı 5 evreden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla; tutuşma, gelişme, büyüme, tam büyüme ve sönme evreleridir (İplikçi, 2006). Yanma olayında "Sıcaklık-Zaman" ilişkisi Şekil 1'de gösterilmiştir.

Çekme testleri ve gerilme şekil değiştirme grafikleri malzemenin mekanik özelliklerini en iyi karakterize eden yöntemdir. Bundan dolayı bu grafiklerin iyi analiz edilmesi önem teşkil etmektedir.

Örneklerin ısıtılmasında yüksek sıcaklıklı Elektro-mag TT109 model bir fırın (Şekil 2a) kullanılmıştır. Üniversal test cihazı INSTRON 8874 model çift eksenli (eksenel & burulma) yorulma test cihazında (Şekil 2b), yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra çekme testine tabi tutulmuştur. Deneysel işlem adımları aşağıdaki gibidir:

- 1) Her test sıcaklığı altında iki örnek yüksek dayanımlı bulon örneği; doğal soğutma suyu soğutması) aynı anda yüksek sıcaklık fırınına yerleştirildi.
- 2) Isıl işlemden sonra, soğutma numuneleri doğal soğumaya bırakıldı.
- 3) Isıl işlemden sonra, göçme modlarına kadar INSTRON üniversal test cihazı ile eksenel çekmeye maruz bırakılmıştır.
- 4) Deneysel numuneleri ısıtılma işlemine tabi tutulmadan önce ve ısıtılma işlemine tabi tutulduktan sonra çap ölçümlerine tabi tutulmuştur.



Şekil 1. Yangının sıcaklık-zaman ilişkisi (Özberk, 2010)

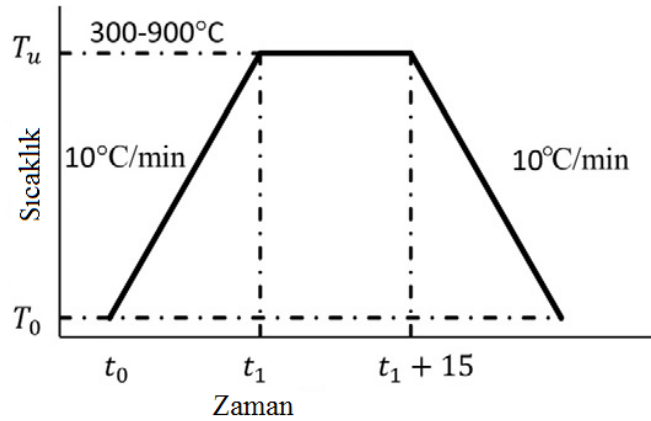
Çap ölçümleri, dijital kumpas ile bulon ve vidalardan her bir numune için hata oranını minimize etmek ve doğru sonucu elde etmek amacı ile 10 kez çap ölçümü yapılarak deneyler aşamasında ortalama değerler kullanılmıştır. Bu ölçümler yapıldıktan sonra numuneler INSTRON test cihazına girilerek gerilme-şekil değiştirme ve yük uzama miktarlarının verileri alınacak şekilde program ayarlamaları yapılmıştır. Örneklerin yer değiştirme yük eğrisi elde edilmiştir. Statik çekme testi sırasında ön yükleme gereklidir. Tasarlanan yüklerin % 10' u (yaklaşık 10kN) ilk önce uygulanır ve 1 dakika tutuldu. Daha sonra, numuneler kopuncaya kadar düzenli olarak yüklenmeye devam edildi. Yükleme hızı 5 mm/dak. olarak ayarlandı (Liu ve ark., 2017). Statik gerilme testi farklı sıcaklıklara maruz kalan bulon ve vidalar için sabit yükleme hızında gerilme şekil değiştirme ve yük uzama eğrileri elde edilmiştir. Testlerden elde edilen veriler bir bilgisayar aracılığıyla kaydedildi ve testler sırasında çeşitli zamanlarda görsel gözlemler yapıldı. Vida ve bulonların ısıtmak için manuel ayarlı kül fırını kullanıldı (Şekil 2a). Biri numuneye diğeri fırına monte edilmiş iki K tipi termokulp, sırasıyla numunenin ve fırının sıcaklığını kaydetti. Bulonlar çevre sıcaklığından belirli hedef sıcaklığa ulaşana kadar 10 °C/dak. hızında ısıtıldı. Isıtma için üç hedef sıcaklık (T) 600, 800 ve 1000 °C seçilmiş olup bu sıcaklıklara sırası ile 60, 80 ve 100 dakikada ulaşılmıştır. Testlerde kullanılan ısıtma soğutma sıcaklığı rejimi Şekil 3' de gösterilmektedir. Örnek hedef sıcaklığa ısıtıldıktan sonra, bulon boyunca eşit (sabit) bir sıcaklık dağılımı sağlamak için 90 dakikalık bir süre boyunca sabitlendi (Kodur, 2010). Soğutma aşamasında, fırın kapatıldı ve numuneler dışarı alınarak doğal olarak oda sıcaklığına

soğumalarına izin verildi. Normal şartlarda soğutulmasının ardından numunelerin ortam sıcaklığında çekme dayanımı testleri yapılmıştır.

Yapılan araştırmada ısı işlem öncesi ve sonrası hassas terazi yardımı ile bulon ve vidaların ağırlıkları ölçülmüştür. Isıl işleme maruz kalan test numunelerinin sıcaklık artıca numunelerin oksitlenmesinden kaynaklanan kısmen ağırlık artışı gözlemlenmiştir. Isıl işleme maruz kaldıktan sonra ise dijital kumpas ile her bir deney numunesinden 10 adet ölçüm alınarak bunların ortalaması test cihazına girilmiştir.



Şekil 2. Yüksek sıcaklıklı kül fırını ve çift eksenli hidrolik yorulma test cihazı



Şekil 3. Sıcaklık-zaman ilişki eğrisi

Çelik bulonların çekme dayanımı, bulonlu birleşimlerin ısı işlem sonrası tepkisini değerlendirmek için önemli bir parametredir. Bulonların artık gerilmeleri yalnızca kimyasal bileşim ve bulonların ısı işlem tipine göre değil aynı zamanda bulonların maruz kaldığı en yüksek sıcaklık seviyesine göre de değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada, ısıtılmış ardından soğutulmuş bulon ve vidaların göçme modlarını belirlemek için gerilme dayanımı testleri yapılmıştır. Hem M6 (8.8-100 mm) bulon hem de 5.5/6.3*90 vidalarındaki eğilimler benzer bir desen izlediğinden, M6 bulon ve 5.5/6.3*90 vidalar için elde edilen sonuçlar M6 bulonlarıyla karşılaştırılmıştır. M6 bulon ve 5.5/6.3*90 vidalarının nihai kuvveti için azaltma faktörleri Çizelge 3 ve Çizelge 4'de verilmiştir. 5.5/6.3*90 vidaların, nihai mukavemetini sıcaklık artıca yitirmekte ve artık mukavemet 800 °C'den soğuduktan sonra yaklaşık 0.55'e düşmektedir. Öte yandan, M6 bulonları, güçlerinin çoğunu yaklaşık 300 °C'ye kadar koruduğu gözlemlenmiştir. 300 °C ısıtma döngüsünün ötesinde, M6 bulonları artık nihai güçlerini hızla kaybederler. Bu nedenle, sıcaklığın M6 bulon ve 5.5/6.3*90 vidalarının artık mekanik özellikleri üzerindeki etkisi sırasıyla 300 °C ve 500 °C'ye kadar daha az belirgin olduklarından dolayı kritik sıcaklık

olan 600°C ısıtma işlemlere başlanılmıştır (Kodur, 2017). Bununla birlikte, bulonlar yukarıda belirtilen tepe sıcaklıklarının ötesine ısıtıldığında, artık kuvvetleri benzer bir şekilde hızla düşer (Kodur ve Aziz, 2014).

Çizelge 1. Isıl işleme maruz kalmış numunelerin elastisite modülü ve akma dayanımı

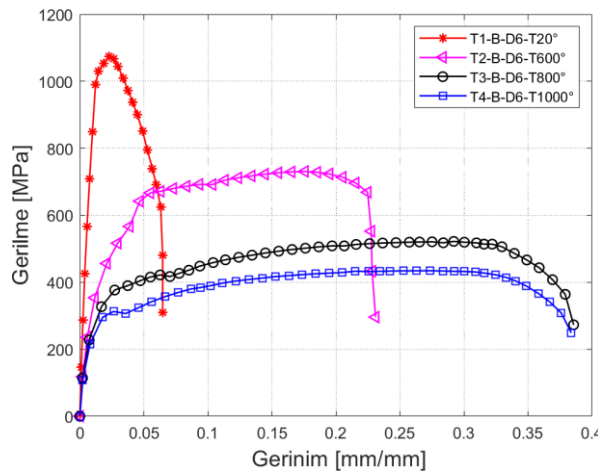
Sıcaklık °C	Bulon			Vida		
	Elastisite modülü E (Mpa)	Akma dayanımı Fy (Mpa)	Nihai dayanım Fu (Mpa)	Elastisite modülü E (Mpa)	Akma dayanımı Fy (Mpa)	Nihai dayanım Fu (Mpa)
20	76.518	861.52	1078	39.403	854.16	1020
600	30.601	582.93	732	39.157	683.45	764
800	25.824	387.16	524	34.831	358.19	453
1000	27.288	327.41	436	41.800	198.87	259

BULGULAR VE TARTIŞMA

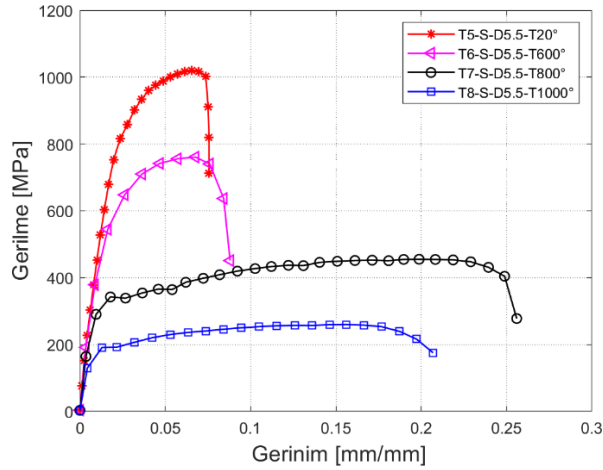
Testlerden elde edilen sonuçlara dayanarak, ısıtma-soğutma fazının artık gerilme-şekil değiştirme etkisi, ısıtma sonrası güç ve elastisite modülü üzerine çıkarımlar yapılmıştır. Vida ve bulonların kimyasal içerikleri Çizelge 2’de verilmiştir.

Şekil 4’de de görüleceği gibi, bulonların 800 °C'nin üzerinde ısıtılması ve soğuması durumunda daha sünek davranış sergiler. Bulon ve vidalar 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra mukavemetlerinde önemli bir azalma tespit edilmiştir. Bu eğilim, bulonda farklı, vidalarda daha farklı oldukları için Şekil 4 ve Şekil 5’de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde ısıtma işlemi uygulanan bulonlar 600 °C sınırına geldiklerinde maksimum dayanımlarında bir düşüş gözlemlenmiştir. Diğer taraftan enerji yutma kapasiteleri artarak 800 °C ve 1000 °C de birbirlerine yakın eğriler sergilemekte olup bunlar Şekil 4’de verilmiştir. Bu deneysel sonuçların daha önce yapılmış çalışmalar ile örtüştüğü görülmektedir (Kodur, 2017).

Vidalı numuneler için yapılan deneyler sonucunda gerilme-şekil değiştirme grafikleri Şekil 5’de verilmiştir. Vidaların gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin farklı ısılarda işlemlerin uygulanması neticesinde eğriler arasında karakteristik özellikleri farklılıklar göstermiştir. Vidalar için yürütülmüş olan deneysel çalışmada literatür için önemli bir kaynak sunmaktadır. Isıl işlem sonucu dayanımlarında azalma olurken şekil değiştirmeler devam etmiş olup bunun neticesinde de enerji yutma kapasiteleri artmıştır (Lu, 2011).



Şekil 4. Bulonların ısıtma işlemi sonucunda gerilme-gerinim grafiği



Şekil 5. Vidaların ısıtılma işlemi sonucu gerilme-gerinim grafiği

Çizelge 2. Bulon ve vidaların kimyasal içerikleri

Malzeme	Kimyasal içerikler (%)															
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Cu	Ti	Pb	Sn	Ce	B	Fe
0 °C bulon	0.2684	0.1226	0.9570	0.0086	0.0058	0.2091	0.0125	0.0412	0.0171	0.0605	0.0329	0.0023	0.0177	0.0034	0.0024	98.20
1000 °C bulon	0.2455	0.0648	1.0170	0.0255	0.0002	0.1953	0.0080	0.0696	0.0301	0.0850	0.0326	0.0025	0.0004	0.0042	0.0003	98.20
600 °C bulon	0.2435	0.0630	0.9920	0.0231	0.0012	0.1901	0.0053	0.0659	0.0295	0.0813	0.0310	0.0024	0.0032	0.0039	0.0020	98.30
600 °C vida	1.2040	0.1611	1.3530	0.0290	0.0886	0.0490	0.0206	0.0138	0.0406	0.0340	0.0787	0.0005	0.0004	0.0010	0.0099	96.90

Isıl İşlem Sonrası Nihai Dayanım

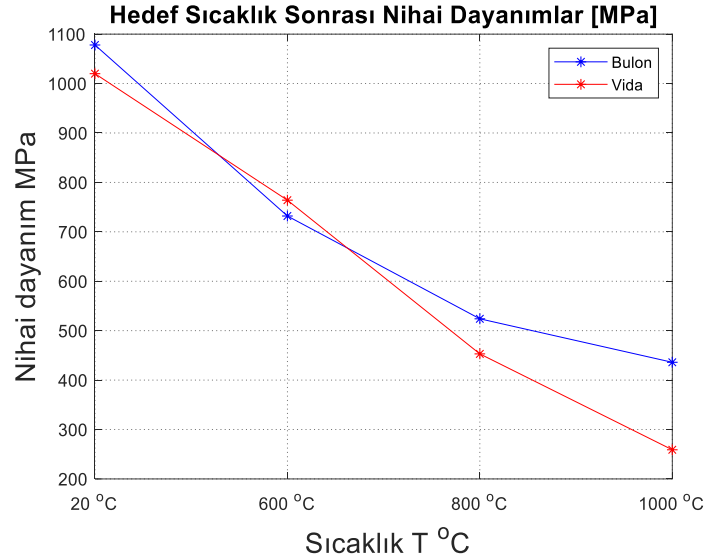
Çelik bulonların çekme mukavemeti, bulonlu birleşimlerin ısıtılma işlemi sonrası tepkisini değerlendirmek için önemlidir. Bulonların artık gerilmeleri yalnızca kimyasal bileşim ve bulonların ısıtılma işlemi tipine göre değil aynı zamanda bulonların maruz kaldığı en yüksek sıcaklık seviyesine göre de değiştiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada, ısıtılma işlemi maruz kalmış sonrasında soğutulmuş bulonların göçme modlarını belirlemek için gerilme şekil değiştirme testleri yapılmıştır. Hem M6 hem de 5.5/6.3*90 bulon ve vidaların eğilimleri benzer bir grafik izlediğinden, M6 için elde edilen sonuçlar 5.5/6.3*90 vidaları ile karşılaştırılmıştır. Bulon ve vidalarda gerilme şekil değiştirme eğrilerinin farklı olması kimyasal içeriklerinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır (Kodur, 2017). Bu nedenle, sıcaklığın M6 bulonların artık mekanik özellikleri üzerindeki etkisi 600 °C'ye kadar daha belirgin 800 °C ve 1000°C de tamamen farklı mekanik özellik göstermektedirler. Sünekliği geri kazanmak için çelik, karbon atomlarının martenzit çeliğine difüzyonuna izin veren 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara yeniden ısıtılır (Meyers, 2009). Isıtmalı koşullar altında, çeliğin sıcaklığı tavlama sıcaklığına ulaştığında, kuvvet veren mikro yapıyı (karbon zengini martenzit) karbon atomlarının difüzyonu nedeniyle sertliğini yitirir. Bu, M6 bulonlarda, temperleme sıcaklığının ötesinde, ısınmaya maruz kaldıktan sonra hızlı gerilme kaybına neden olur. Isıtılma işlemi M6 bulonlarının ve 5.5/6.3*90 vidalarının göçme modları sırası ile Şekil 6 ve Şekil 7'de verilmiştir. Bulon ve vidaların yüksek sıcaklıklardaki nihai dayanımları ve enerji yutma kapasiteleri sırası ile Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.



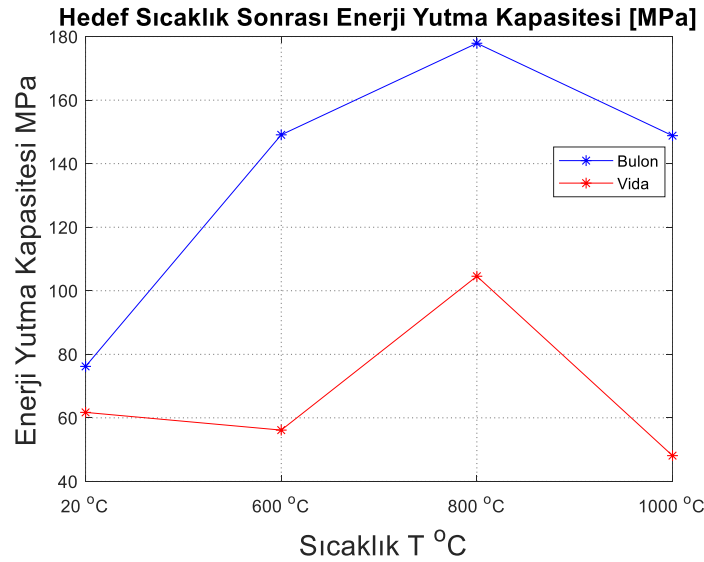
Şekil 6. Isıl işlem sonrası M6 bulonların göçme modları



Şekil 7. Isıl işlem sonrası 5.5/6.3*90 vidalarının göçme modları



Şekil 8. Hedef sıcaklık sonrası nihai dayanımlar



Şekil 9. Hedef sıcaklık sonrası enerji yutma kapasitesi

Artık Akma Dayanımı ve Elastisite Modülü

Bulonların artık akma dayanımı, ortam sıcaklığına soğuduktan sonra, gerilme eğrisinin kesişme noktasını ve orantılı çizgiyi % 0.2 gerginlikle dengeleyen % 0.2 gerilmeye karşılık gelen gerilme olarak değerlendirilir. Deneysel prosedürde kullanılan numunelerin tamamı hedeflenen sıcaklıklara 90 dakika maruz bırakılıp atmosferik ortamda soğutularak eksenel çekme testine tabi tutulmuştur. Sonuçların gözden geçirilmesi, ısıtma sıcaklığının ne kadar yüksek olduğunu, bulonlardaki artık akma dayanımının düşük olduğunu göstermektedir. M6 bulonları, 600 °C'nin üzerinde ısıtıldığında genişler ve artık verim gücü sağlar ve oda sıcaklığında bunun % 35'ine ulaşır. Bu eğilim, 400 °C ısıtma döngüsüne kadar artık akma dayanımı kaybı bulunmayan M6 bulon ve 5.5/6.3*90 vidaları için farklıdır. 400 °C ısıtma döngüsünün ötesinde bir sıcaklığa maruz kaldığında, M6 bulonları artık verim kuvvetlerini hızlı bir şekilde kaybeder ve aynı zamanda daha yüksek bir oranda uzar. 800 °C de, M6 bulonlarındaki artık akma dayanımı, oda sıcaklığı akma dayanımının % 26'sına ulaşır (ısıtma olmadan). Genel olarak, 5.5/6.3*90 vidaların artık akma dayanımı 400-800 °C ısıtma çevrimleri boyunca M6 bulonlardan

(yaklaşık % 10–15) daha düşüktür. Bu yine M6 bulon ve 5.5/6.3*90 vidalarının imalatında kullanılan iki tip çeliğin kimyasal kompozisyonlarındaki farklılıklara atfedilir. Bulon ve vidalar için çekme dayanımlarının azaltma faktör değerleri Çizelge 3’de verilmiştir.

Çeşitli ısıtma çevrimlerinden sonra M6 bulon ve 5.5/6.3*90 vidalarının artık elastisite modülleri, ilk doğrusal eğrinin teğet modülü olarak karşılık gelen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden değerlendirilir (Şekil 4). Artık modül faktörü, ısıtma soğutma döngüsünden sonra modülün ortam sıcaklığında başlangıç modülüne oranı olarak hesaplanır. Bulonların ısıtma çevrimi 500 °C'nin altında olduğunda, bulonların elastisite modüllerinin çoğunu yeniden kazandığı görülebilir. 600 °C'nin üzerine ısıtıldığında, her iki bulon grubu da elastisite modülünde önemli ölçüde değişimler görülmektedir (Kodur, 2017). 650 °C ısıtma-soğutma döngüsünden sonra elastisite modülün en az % 75'i geri kazanılır. Yukarıda verilen sonuçlar açıkça, bulonlardaki artık direncinin geleneksel yapısal çeliğinkine farklı bir eğilim izlediğini gösterir ve bu kabul edilen imalat işlemine bağlanabilir. Bu bulonlarda kullanılan yüksek mukavemetli özel çelik için Şek 6’da görüldüğü üzere, bulonlar 400 °C'nin altında ısınmaya maruz kalır ise, soğuduktan sonra güçlerinin çoğunu geri kazanabilirler. 400 °C ısıtma döngüsünün ötesinde bulonlar, geleneksel karbon çeliğine kıyasla mukavemetinde önemli bir azalma görülmektedir. 800 °C'nin üzerindeki ısıtma sıcaklıkları için bulonlar, akma dayanımının yaklaşık % 70'ini kaybeder; bu, geleneksel karbon çeliğinden çok daha fazladır. Bulon ve vidalar için artık elastisite modülü için azaltma faktör değerleri Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 3. Bulon ve vidaların nihai dayanımları için azaltma faktörleri

Sıcaklık °C	Bulon		Vida	
	Nihai Dayanım (Mpa)	Azaltma Faktörü	Nihai Dayanım (Mpa)	Azaltma Faktörü
20	1078	1.000	1020	1.000
600	732	0.679	764	0.749
800	524	0.486	453	0.444
1000	436	0.404	259	0.254

Çizelge 4. Bulon ve vidaların Elastisite Modülü için azaltma faktörleri

Sıcaklık °C	Bulon		Vida	
	Elastisite Modülü (Mpa)	Azaltma Faktörü	Elastisite Modülü (Mpa)	Azaltma Faktörü
20	76.518	1.000	39.403	1.000
600	30.601	0.4	39.157	0.994
800	25.824	0.337	34.831	0.884
1000	27.288	0.357	41.800	1.061

Enerji Yutma Kapasitesi ve Rezilyans Modülü

Enerji yutma kapasitesi, deney numunelerinin kırılmaya kadar ki deformasyon bölgeleri içerisinde birim hacim başına enerji yutma yeteneğidir. Enerji yutma kapasitesi gerilme-şekil değişimi eğrisi altında kalan alan olarak tanımlanır (Ritchie ve ark., 1973). Rezilyans ise elastik şekil değişimi esnasında numunenin depoladığı enerji anlamına gelir (Huner, 2014). Bu enerji, gerilme-şekil değişimi eğrisinin elastik bölge altında kalan alana eşittir. Isıl işleme maruz kalmış numunelerin enerji yutma kapasiteleri ve rezilyans değerleri Çizelge 5’de verilmiştir. Bulonların enerji yutma kapasiteleri 800 °C’ye kadar artar ve 1000°C de ise tekrar düşmektedir. Vidalarda ise 600°C’de bir düşüş gözlemlenirken 800°C de tekrar artıp 1000 °C de tekrar düşmektedir. Rezilyans modülü ise bulonlarda 600 °C de pek değişmeyip 800 °C ve 1000 °C de düşüş sergilemekte iken vidalarda ise sıcaklık değeri arttıkça düşüş gözlemlenmiştir.

Çizelge 5. Enerji yutma kapasitesi ve rezilyans modülü

Test No	Elastisite modülü E (Mpa)	Akma dayanımı Fy (Mpa)	Enerji yutma kapasitesi (Mpa)	Rezilyans (Mpa)
T1-B-D6-T20	76.518	861.52	76.194	15.1530
T2-B-D6-T600	30.601	582.93	149.078	15.6907
T3-B-D6-T800	25.824	387.16	177.895	6.7800
T4-B-D6-T1000	27.288	327.410	148.816	4.6393
T5-S-D5-T20	38.265	954.160	61.720	8.3537
T6-S-D5-T600	35.369	683.450	56.144	4.4296
T7-S-D5-T800	25.276	358.190	104.570	2.8560
T8-S-D5-T1000	16.988	198.870	48.109	1.4763

Göçme Modları

Şekil 6 ve 7’de ısıtma ve soğutma döngüsüne tabi tutulduktan sonra bulon ve vidalarda göçme modları verilmiştir. Çoğu durumda bulonların boyun kısmında sünek bir bozulma elde ettiği ve kırılma bir göçme olmadığı görülebilir. M6 bulon ve 5.5/6.3*90 vidalarının, uzunlamasına eksene açılı olarak makaslama veya eğik kırılma durumunda başarısız olmaları muhtemeldir. M6 bulon çapının artırılmasıyla, boyun verme geometrisi daha kalın bulonlar için kırılma yüzeyinin tipik özelliğidir. Çünkü geometrileri gerilmenin eşit şekilde dağılmasına izin vermez (Şekil 8). M6 bulon ve 5.5/6.3*90 vidalarında, başarısızlık 900 °C ısıtma döngüsündeki boyun vermesinden kaynaklanır (Şekil 6 ve 7). Bu mekanizmanın somun ve bulon dişleri arasındaki uyum ve etkileşim derecesi ile kontrol edilerek bulunmuştur. Boyun vermeden sonra kırılma süreci, boyunluk bölgesinin merkezine yakın, yüksek gerilmeli eksene paralel olarak dik bir şekilde düz bir yüzey oluşturarak, iç boşlukların veya boyun bölgesi merkezine yakın çatlakların gelişmesi ile başlar (Shiple, 2017). Genel plastik gerilme kritik bir seviyeye ulaştığında, çekirdeği boşaltır ve bulonun içinde büyür. Başlangıçta eş eksenli, şekilleri genel stres alanına göre değişir. Boşluklar birleştikçe, stres konsantrasyon etkisinden dolayı bitişik alanlara genişlerler. Bulon kesitinin merkezi temelde ayrıldığında, bu başarısızlık dışa doğru büyür. Elastoplastik davranışlarda kısıtlamalar değiştiğinden, maksimum kayma düzlemi (gerilme eksenine yaklaşık 45°) tercih edilir ve kabın yanlarını oluşturan bu düzlemler boyunca daha fazla büyüme meydana gelir (Meyers, 2009). Isıl işlem sonucu meydana gelen değişiklikler, en yüksek ısıtma sıcaklığı bulonun imalat işleminde (geçiş sıcaklığı) kullanılan tavlama sıcaklığını aştığında oldukça belirgindir. Bunun nedeni, bulonlardaki martenzit çeliğinin, geçiş sıcaklığı bölgesinde çarpıcı bir süneklik yoğunluğuna maruz kalmasıdır. Böylece, M6 bulonlarındaki yassı bölgenin büyüklüğü azalır ve 650 °C’ye ısıtıldığında ve soğuduğunda eğimli-kırılma bölgesi alanının büyümesine neden olur. 650 °C ila 700 °C ısıtma soğutma döngüsünde, elyafli bölge alanı yayılır ve radyal desenler büzülür veya kaybolur.

Bunların yanı sıra, 800 °C’nin üzerinde ısıtıldığında ve soğutulduğunda tüm kırılma yüzeyleri tüm bulonlarda düz lifli hale gelir (Şekil 6). Bunun nedeni, çeliğin kristal yapısındaki, daha az yoğun bir şekilde paketlenmiş hacim merkezli tetragonal martenzitten, ferritin daha yoğun bir şekilde paketlenmiş gövde merkezli kübik yapısına geçmesidir. Isıl işleme maruz kaldıktan ve soğuduktan sonra çelik çerçeveli yapıların artık kapasitesini değerlendirmek için yüksek dayanımlı bulonlara özgü artık mekanik özelliklere ihtiyaç duyulmaktadır (Kodur ve ark., 2011). Bulon ve vidalarda yapılan testlerden elde edilen sonuçlar açıkça ısıl işlem sonrası özelliklerinin geleneksel karbon çeliğinkinden önemli ölçüde farklı olduğunu göstermektedir. Bu testlerden elde edilen parametreler ışığında, artık elastisite modülünü değerlendirmek için elastisite modüllerindeki değişim karakteristik bir veridir.

SONUÇ

Isıtma seviyesi 600 °C’nin altında olduğunda, bulonların artık gerilme-şekil değiştirme eğrisi oda sıcaklığında numunelerin eğrileri ile benzerlikler göstermektedir (Kodur, 2017). Bulonların, 600 °C’nin üzerinde ısıtıldığında çekme dayanımlarında yaklaşık olarak % 40 gibi bir dayanım kaybı söz konusu

iken şekil değiştirmelerinde ise yaklaşık olarak 3.5 kat daha fazla uzamaktadır. Bulon ve vidalar, yaklaşık 600 °C ısıtma-soğutma döngüsüne kadar nihai gerilme dayanımlarının büyük bir kısmını korurlar. 600 °C'nin üzerinde ısıtma-soğutma döngüsünün ötesinde, bulonlar artık direncini hızlı bir şekilde kaybeder ve oda sıcaklığında (mukavemetsiz) en yüksek dayanımın % 46'sına ulaşır. Bulon ve vidalar, 600 °C ısıtma-soğutma döngüsüne kadar artık akma dayanımında fazla bir düşüş yaşamaz. 600–800 °C'ye ısıtıldığında, bulonlar hızlı bir şekilde gevşek artık verim gücü sağlar. Toplam M6 bulon ve 5.5/6.3*90 vidalarının artık akma dayanımı 400-800 °C ısıtma çevrimleri boyunca M6 numunelerinden (yaklaşık% 10-15) daha düşüktür. Bulon ve vidalar, ısıtma ve soğumaya maruz kaldıklarında boyun bölgesinde sünek bir bozulma gözlemlenmiştir. Bulonlardaki gerilme kırılma modları, elde edilen ısıtma sıcaklığı seviyesinde etkilendiği gözlemlenmiştir.

Bir çelik yapının tamamı göz önüne alındığında 800 °C üstündeki sıcaklıklarda birleşim malzemelerinin kırılganlıkta önce göçeceği ve can kaybına neden olacağı çekme gerilmesi dayanım kayıplarından anlaşılmaktadır.

Bulonların artık özellikleri için önerilen azaltma faktörünün kullanılması, yangında yapıya zarar veren çelik yapıların artık gerilmelerin kapasitesinin daha iyi değerlendirilmesine yol açabileceği düşünülmektedir.

Deneysel prosedürde kullanılan bulon ve vidaların 1000 °C sıcaklığında Elastisite modülünde artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin açıklanabilmesi için 800-1000 °C arasındaki sıcaklıklar detaylı olarak incelenerek açıklanabilir.

KAYNAKLAR

- Choi I, Chung K, Kim D, 2014. Thermal and mechanical properties of high-strength structural steel HSA800 at elevated temperatures. *Materials and Design* 63: 544–551.
- EN 1993-1-8 (2005) (English): Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].
- Huner U, 2014. Çeşitli Elyafarla Takviye Edilmiş Termoplastik Kompozitlerin Levha Ekstrüzyonunun Ve Özelliklerinin İncelenmesi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi (Basılmış).
- İplikçi E, 2006. Yüksek Binalarda Yangın Güvenlik Önlemlerinin Analizi Ve Yangın Güvenlikli Bina Tasarımına İlişkin Performans Kriterlerinin Ortaya Konulması, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Kirby BR, 1995. The behaviour of high-strength grade 8.8 bolts in fire. *Journal of Constructional Steel Research* 33:3-38.
- Kodur V, Asce F, Dwaikat M, Fike R, 2010. High-Temperature Properties of Steel for Fire Resistance Modeling of Structures. *Journal of Materials in Civil Engineering* 22: 423-434.
- Kodur VK, Aziz EM, 2014. Effect of temperature on creep in ASTM A572 high-strength low-alloy steels. *Materials and Structures* 48:1669–1677.
- Kodur V, Yahyai M, Rezaeian A, Eslami M, Poormohamadi A, 2017. Residual mechanical properties of high strength steel bolts subjected to heating-cooling cycle. *Journal of Constructional Steel Research* 131: 122–131.
- Liu H, Liu D, Chen Z, Yu Y, 2017. Post-fire residual slip resistance and shear capacity of high-strength bolted connection. *Journal of Constructional Steel Research* 138: 65–71.
- Lou GB, Zhu MC, Li M, Zhang C, Li GQ, 2015. Experimental research on slip-resistant bolted connections after fire. *Journal of Constructional Steel Research* 104: 1–8.

- Lu W, Mäkeläinen P, Outinen J, Ma Z, 2011. Design of screwed steel sheeting connection at ambient and elevated temperatures. *Thin-Walled Structures* 49: 1526–1533.
- M. Meyers KC, 2009. *Mechanical Behavior of Materials*. No: 882, pp. 396-407 Cambridge, ABD.
- Özberk DD, 2010. Çelik Yapılarda Pasif Yangından Koruma Yöntemlerinin Karşılaştırmalı Maliyet Analizi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Ritchie RO, Knott JF, Rice JR, 1973. On the relationship between critical tensile stress and fracture toughness in mild steel. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 21:395-410.
- Sanrı I, 2004. *Steel Frames Under Fires*, Boğaziçi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi (Basılmış).
- Shingley, W.T. Becker and R.J, 2017. *Failure Analysis and Prevention*. No: 87, pp. 36-47 Boston, ABD.