

Yüksek Sıcaklık Esnasında Betonarme Çeliklerinin Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

*¹Gökhan Kürklü and ¹Gökhan Görhan

*¹ Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Afyon Kocatepe University, Turkey

Özet

Bu çalışmada betonarme çelikleri üzerinde yangın ve yapının kullanımına bağlı olarak ortaya çıkan yüksek sıcaklık durumlarının etkileri incelenmiştir. Çalışmada kullanılmak üzere betonarme çelikleri olarak B420C sınıfı çelik belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan betonarme çeliklerinin çapı 12 mm dir. Mevcut yapılar dikkate alınarak üç yükleme durumu seçilmiştir. 0, 290 ve 365 MPa olarak üç yükleme koşulu seçilmiş ve karakteristik akma dayanımları aşılmamıştır. Beton örtü kalınlığı ve yangın süresine bağlı olarak çelik yüzeyine ulaşacak olan sıcaklık için 75, 150 ve 300 °C lik sıcaklıklar dikkate alınmıştır. Deneyde kullanılacak numunelerin fiziksel ve mekanik özellikler yüksek sıcaklık öncesi belirlenmiştir. Bu çeliklere yüksek sıcaklık, numuneler çekme cihazı bağlı ve hesaplanan gerilme durumunda bekletilirken sıcak hava tabancası ile uygulanmıştır. Isıölçer ve termal kamera ile hedeflenen sıcaklığa ulaşan numuneler tekrar yüklemeye maruz bırakılıp numune kopana kadar deney sürdürülmüştür. Bu çalışmanın sonucunda ön yükleme ve sıcaklık durumlarının çeliğin karakteristik özelliklerinde ciddi değişimler gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Bu çalışmaların ışığında mevcut yapı stoku ve tasarım aşamasındaki yapılar için yangın esnasında betonarme çelikler üzerindeki etkiler ve betonarme çeliklerin hangi aşamadan sonra yangından etkileneceği konusunda sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Yüksek Sıcaklık, Betonarme Çeliği, Yangın

Determination of Physical and Mechanical Properties of Reinforced Concrete Steels During High Temperature

Abstract

In this study, the effects of high temperature conditions that bring about with fire and the usage of in the building were investigated according to reinforced concrete steels. Steel grade B420C was used in the study. The reinforced concrete steels used in the operation are 12 mm in diameter. Three loading conditions were chosen: 0, 290 and 365 MPa but whose characteristic yield strengths have not been exceeded. Depending on the thickness of the concrete cover and the duration of the fire, the temperatures such as 75, 150 and 300 °C were taken into account for the heat to reach the steel surface. The physical and mechanical properties of the samples were determined before high temperature. These steels were applied with hot air guns while high temperature samples were connected and held in the calculated stress state. With thermo detector and thermal camera, the samples reaching the target temperature were subjected to reloading and the experiment were continued until the sample breaks. It has been determined that the preliminary loading and temperature conditions have resulted in significant changes in the characteristics of the steel. In the light of these studies, the effects on the reinforced concrete steels during the fire were obtained for the current building structure and design phase, and the progression of the reinforced concrete steels after the fire.

Key words: High temperature, Reinforced concrete steel, Fire

*Corresponding author: Asst. Prof. Dr. Gökhan KÜRKLÜ, Address: Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering Afyon Kocatepe University, 03200, Afyonkarahisar TURKEY. E-mail address: kurklu@aku.edu.tr, Phone: +902722281423

1. Giriş

Betonarme yapıların servis ömrü boyunca maruz kalabileceği çevresel etkilerden birisi de muhtemel bir yangın durumunda ortaya çıkacak yüksek sıcaklık durumudur. Betonarme yapının yüksek sıcaklığa maruz kalması, beton ve çelik konstrüksiyona zarar verir ve beton ile inşaat çeliği arasındaki ara yüzdeki bağın bozulmasına ve tüm yapının bütünlüğünün zayıflamasına neden olur [1-4]. Betonarme yapı elemanları yangın gibi yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı zaman donatı çeliklerinde ve betonun mekanik özelliklerinde sıcaklığa bağlı olarak yapısal kapasitelerinde bir bozulma oluşur [5]. Buna göre, betonarme bir yapının ısınma sonrası özellikleri, yangına maruz kalmanın ardından sağlam mı yoksa yıkılması gerekip gerekmediğini değerlendirmek için kritik önem taşır [6].

Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri, yirminci yüzyılın ortalarından beri araştırılmaktadır [7-9]. Teknik literatürde bulunan bu araştırmalar malzeme testleri ve eleman testleri olarak iki kategoriye ayrılabilir. Malzeme testinin sonuçları, sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkisi hakkında bilgi verirken (basınç dayanımı ve gerilme mukavemeti, elastikiyet modülü vb.), eleman testinden elde edilen sonuçlar ise betonarme yapı elemanlarının dayanımı ve davranış hakkında (kiriş, kolon, döşeme gibi).

Yüksek sıcaklık altında, betonarme çeliklerinin mekanik özelliklerinde önemli değişiklikler meydana gelmektedir. 200 °C'de dislokasyonların yoğun olduğu tane sınırlarında azot atomlarının difüzyonu ile çeliğin çekme mukavemetinde bir miktar artış meydana gelir. Mekanik dayanımlardaki azalmalar 300 °C aşıldığında artmaya başlamaktadır. Mekanik dayanım, sıcaklık 600 °C'ye ulaştığında %50, 800 °C de ise %80 oranında azalmakta ve 1200 °C ye ulaştığında ise tamamen kaybolmaktadır. Akma mukavemeti ise 400 °C'ye kadar etkilenmediği kabul edilirken, 600 °C'de %53, 800 °C de %89 ve 1000 °C'de ise %96 mertebesinde akma dayanımında kayıplar belirtilmiştir [10]. Yangın sona erdikten sonra, 600 °C lik sıcaklığa maruz kalmış çeliklerinde akma dayanımındaki düşüşler tamamen kalıcı olmamakta ve elastisite modülü soğuduktan sonra eski değerlerini alabilmektedir [11].

Donatı çubukları ile beton arasındaki aderans kuvveti ile ilgili yapılan çalışmalar, yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonun ve çeliğin mekanik özelliklerine ilişkin çalışmalara göre daha azdır. Sıcaklık arttıkça çelik ile beton arasındaki kenetlenme kuvvetinde kayda değer bir azalma olduğu belirtilmektedir. Yapılan çalışmaların bulguları incelendiğinde, betonun ve inşaat çeliği özelliklerinin 500 °C'yi aşan sıcaklıklara maruz kaldıklarında aderans dayanımının %30 ile %70 arasında değiştiğini ve bu değişimde inşaat çeliğinin çapının, gömme uzunluğunun, ısıtma ve soğutma rejiminin etkili olduğu belirtilmiştir [12-14]. Ayrıca beton ve donatı çubuklarının farklı parametrelerinin, çekme testleri kullanılarak oda sıcaklığında aderans dayanımı davranışına etkisi çeşitli araştırmalarda ve standartlarda ele alınmıştır [10,15-18]. Yine bir diğer çalışma inşaat çeliğinin ve beton ara birimindeki sıcaklıkların 500 °C'yi aştığında, bağlantının oda sıcaklığı değerinin yaklaşık% 60'ında kalacağını ve bunun, servis yükleri altında betonarme elemanlarının yük taşıma kapasitesini önemli ölçüde azaltabileceğini göstermektedir [19].

Beton örtüsü içerisindeki çelik donatıyı hem korozyona hem de yüksek sıcaklığa karşı koruyan bir özelliğe sahiptir. Betonun bu koruma özelliği yüksek sıcaklık ile bozulmakta ve zamanda

bağlı olarak çelik yüzeyine sıcaklık ulaşmaktadır. Bunun ile ilgili yapılan bir çalışmadaki sonuçlar 500 °C'yi aşan sıcaklıklarda betonarmenin hasar görmeye başladığı bilgisi ile incelenirse 2 cm'lik bir beton örtü kalınlığının altına 200 °C civarında bir sıcaklık ulaşmaktadır. Dış sıcaklık 600 °C'ye ulaştığında ise 2 cm'lik beton örtüsü 300 °C'lik bir sıcaklığı geçirmektedir [20].

Betonarme yapı elemanları hesaplanırken kullanılacak malzemelerin dayanımları istatistik dağılımı göz önünde bulundurularak, hesaplarda kullanılacak tasarım dayanımı değerleri karakteristik malzeme dayanımı değerlerinin bir malzeme katsayısına bölünmesi ile hesaplarda kullanılır. Bu taşıma gücü sınır durumu beton ve çelik için ayrı ayrı hesaplanır [21].

Tüm bu literatür özeti dikkate alındığında betonarme elemanların yüksek sıcaklığa mazur kalması durumu ya beton dayanımı açısından ya beton ile çelik arasındaki aderans açısından ya da yüksek sıcaklık sonrası çelikler üzerindeki etkiler açısından incelenmiştir. Oysaki betonarmeyi oluşturan betonun yanında çeliktir ve bu çelik yapı elemanı içerisindeyken statik ve dinamik yükler etkisindedir. Dolayısı ile yüksek sıcaklık esnasında bu yapı elemanları içerisindeki çeliğin davranışını gerçeğe yakın bir durumda inceleyebilmek için gerilim altındaki çeliğin incelenmesi gerekir. Bu çalışmada betonarme yapı tasarımı esaslarına göre betonarme çeliklerinin maruz kalabileceği yükleme durumları donatı üzerine etkimiş durumdayken yüksek sıcaklık uygulanmış ve bu sıcaklık esnasında çelik üzerindeki mekanik değişimler ele alınmıştır.

2. Materyal ve Metot

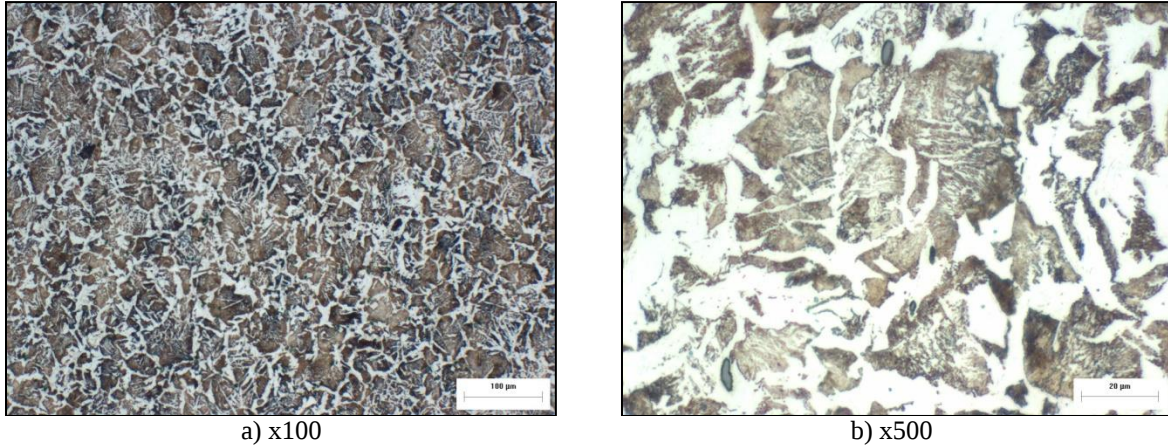
2.1. Materyal

Yüksek sıcaklık esnasında betonarme çeliklerinin mekanik özelliklerinin incelendiği bu çalışmada inşaat sektöründe en çok kullanılan B420C çeliği kullanılmıştır. 12 mm çapında, nervürlü yüzey şekline ait çelik donatının kimyasal kompozisyonu Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. B420C Tipi İnşaat Çeliğinin Kimyasal Kompozisyonu (%).

Çelik	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	N	Fe
B420C	0.27	0.30	0.80	0.03	0.05	0.07	0.29	0.14	0.01	98.04

B420C sınıfı çeliğin içyapısı Şekil 1'de verilmiştir % 0.27 oranındaki karbon miktarıyla bu orta karbonlu çeliğin içyapısı perlit+ferrit şeklindedir. Burada perlitik yapı geniş bir alanı kapsarken ferritler tane sınırlarında görülmektedir.



Şekil 1. Oda Sıcaklıkta B420C Sınıfı Çeliğin Mikro Yapısı

2.2. Metot

Betonarme yapıların kesit hesabında hedef, yapının kullanım süresi boyunca kullanım amacına uygun davranmasını sağlamaktır. Bu amaçla yapının servis ömrü boyunca yapıyı etkileyecek tüm yük ve şekil değiştirmeler dikkate alınarak yapının güvenliği tasarım aşamasında gerçekleşmesi gerekir. Bunun için betonarme yapı imalatında kullanılan beton ve çelik malzemenin öngörülen dayanımları sergilemesi hayati önem taşır. Bu amaçla hesaplarda kullanılacak tasarım dayanımı değerleri olarak karakteristik malzeme dayanım değerleri değil belirli bir katsayı ile azaltılmış dayanım değerleri kullanılmaktadır. Türk standartlarında çelik için kullanılan hesap dayanımı denklem 1'deki gibi hesaplanır [21].

$$\text{Çelik: } f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{ms} \quad (1)$$

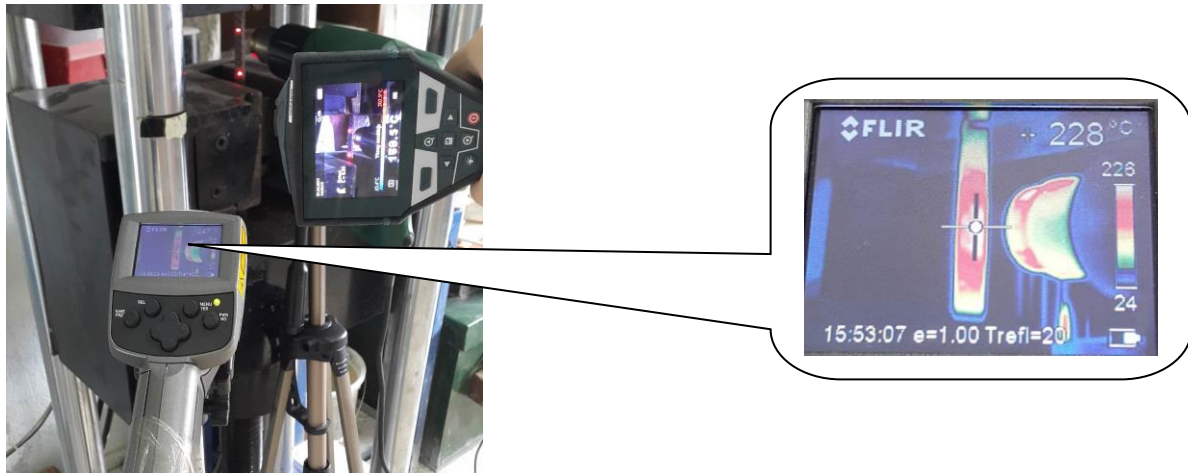
Burada f_{yd} : tasarım akma dayanımı, f_{yk} : karakteristik akma dayanımı ve γ_{ms} : malzeme katsayısını (çelik için: 1.15) ifade eder. Bu çalışmada kullanılan B420C çeliğinin karakteristik akma dayanımı (f_{yk}) 420 MPa ve tasarım akma dayanımı (f_{yd}) 365 MPa'dır. Bu çalışmada malzemenin ve mevcut yapıların durumları dikkate alındığı için üç farklı yükleme durumu dikkate alınmıştır. Buna göre bir ön gerilme olmayan durum, iki tasarım akma mukavemeti $\gamma_{ms}:1,15$ olan 365 MPa ve üçüncü olarak malzeme katsayısı olarak $\gamma_{ms}:1,45$ 'e denk gelen 290 MPa'lık gerilmeler altında yüksek sıcaklık uygulanmıştır.

Deneylerde hidrolik çeneli universal çekme cihazı kullanılmıştır. Beton örtü kalınlığını aşıp çelik donatı yüzeyine ulaşan sıcaklık simüle edildiğinden literatür bilgileri de dikkat alınarak 75, 150 ve 300 °C'lik sıcaklıklar seçilmiştir. Bu değişkenlere bağlı olarak oluşan deney setleri Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Deney Serileri

Numune	Çelik sınıfı	Çap (mm)	Gerilim	Sıcaklık °C
0-75	B420C	12	0	75
0-150	B420C	12	0	150
0-300	B420C	12	0	300
290-75	B420C	12	fyk/1,45	75
290-150	B420C	12	fyk/1,45	150
290-300	B420C	12	fyk/1,45	300
365-75	B420C	12	f _{yd} (fyk/1,15)	75
365-150	B420C	12	f _{yd} (fyk/1,15)	150
365-300	B420C	12	f _{yd} (fyk/1,15)	300
Referans	B420C	12	0	0

Deney düzeneği sabit bir mesafede sıcak hava tabancasının tripot yardımıyla kurulmasının ardından istenilen sıcaklığa kadar hava akımının Şekil 2’de görüldüğü gibi uygulanmasıyla gerçekleştirilmiştir. Ön gerilmeye maruz bırakılan çelik çubuklar üzerlerindeki gerilme hali devam ederken sıcaklığa maruz bırakılmışlardır ve nihai sıcaklığa ulaşınca çekme deneyi tamamlanmıştır. Bu süreç Şekil 3 de görüldüğü gibi termal kamera ve ısıölçer ile takip etmiştir.

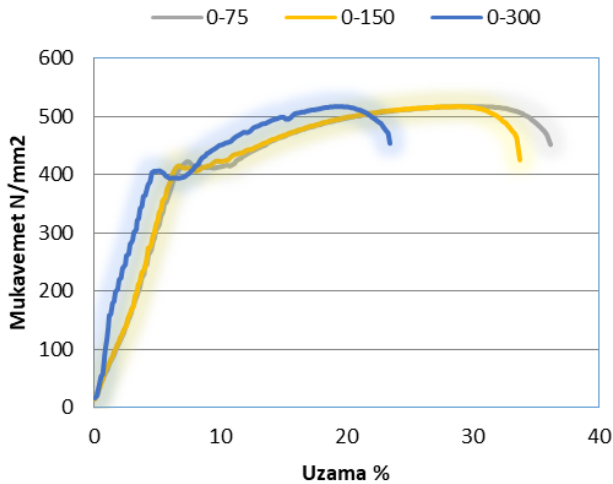
**Şekil 2.** Çekme Cihazı ve Sıcak Hava Tabancası Düzeneği**Şekil 3.** Deneyin Termal Kamera ve Isı Ölçer ile İzlenmesi

3. Bulgular

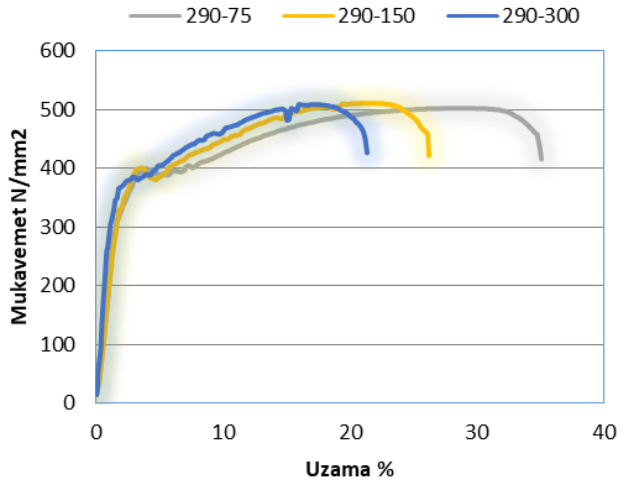
Yüksek sıcaklık esnasında betonarme yapı elemanları üzerinde gerçekleşen mekanik değişimlerin çelik donatı açısından incelendiği bu çalışmada, çekme cihazına bağlı numunelerin yüksek sıcaklık ve yük durumuna göre çekme deneyi sonuçları verilmiştir. Şekil 4’de verilen grafik çeliğin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın mı yoksa ön gerilmenin mi etkili olduğunu belirlemek için ön yükleme uygulanmadan sıcaklığa bağlı olarak gerçekleştirilen deney sonuçlarını göstermektedir. Buna göre çelik çubuklar üzerinde herhangi bir gerilme olmaksızın yüksek sıcaklık uygulandığında en belirgin değişiklik kopma uzamasında gerçekleşmektedir. Sıcaklık arttıkça kopma uzaması kısalmaktadır. Sıcaklık 300 °C’ye ulaştığında ise daha ciddi değişimler gözlemlenmekte ve akma mukavemeti azalmakta ve akma mukavemetinin altında çeliğin elastisite modülü artmaktadır.

Karakteristik akma mukavemetinin yaklaşık %31 altında, 290 MPa’lık gerilme altında yüksek sıcaklık uygulanan numunelerin çekme deneyi sonuçları Şekil 5’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre ön gerilmenin olması sıcaklığa bağlı olarak oluşan kopma uzamasındaki değişimi etkilememiş ve sıcaklığın artması ile kopma uzaması azalmıştır. Gerilmenin etkisi elastisite modülünün artması ile artış göstermiş, rölatif olarak ön gerilimsiz durumda seriler arasında sıcaklığın oluşturmuş olduğu fark burada azalmıştır.

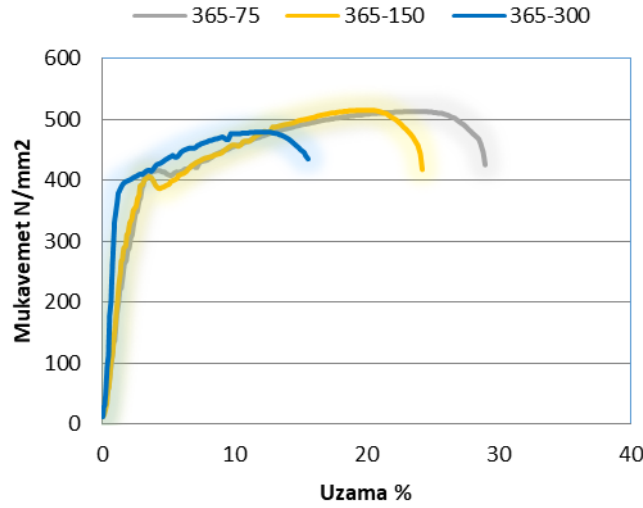
Karakteristik akma mukavemetinin yaklaşık %13 altında, 365 MPa’lık gerilme altında yüksek sıcaklık uygulanan numunelerin çekme deneyi sonuçları Şekil 6’da verilmiştir. Betonarme hesapları açısından nihai yükleme durumunu ifade eden bu yükleme hali yüksek sıcaklık açısından incelendiğinde sıcaklık arttıkça kopma uzaması azalmaktadır. Yine sıcaklığın artması ile çekme mukavemeti ve akma mukavemeti azalmaktadır. Elastisite modülü bu gerilme altında sıcaklığa bağlı olarak rölatif olarak artış göstermektedir. Ayrıca en yüksek gerilim ve en yüksek sıcaklık durumu olan 365-300 serisinde akma sahanlığı ortadan kalkmaktadır.



Şekil 4. Ön Yüklemesiz Durumda Gerilme-Uzama İlişkisi

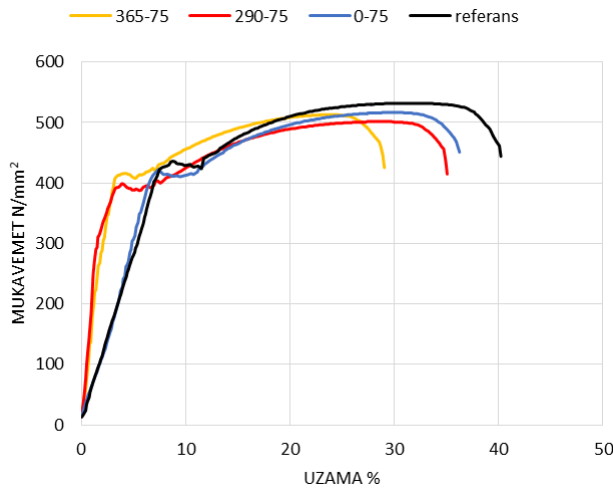


Şekil 5. 290 MPa’lık Ön Gerilmeli Durum

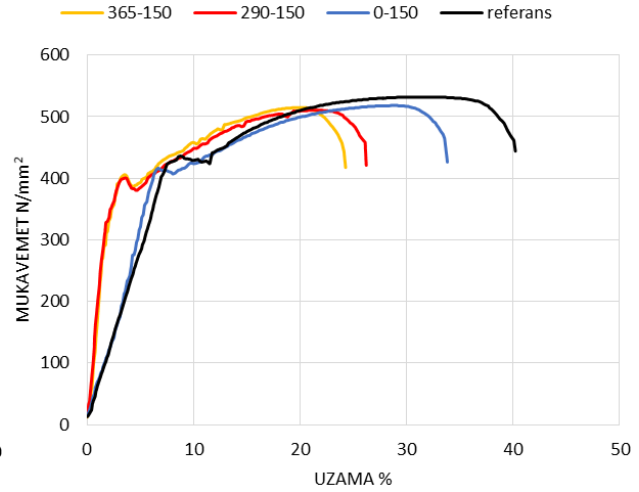


Şekil 6. 365 MPa'lık Ön Gerilmeli Durum

Konunun yüksek sıcaklık esnasında oluşan mekanik değişiklikler özelinde izahatının yapılabilmesi için Şekil 7, 8 ve 9'da yüksek sıcaklığa bağlı olan değişiklikler gerilme açısından ve herhangi gerilme ve sıcaklığa maruz kalmamış referans numuneler açısından sunulmuştur. Şekil 7'de 75 °C'de gerilimin ortaya çıkması ile gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin dikleştiği referansa göre elastisite modüllerinin arttığı ve diğer tüm mekanik özelliklerinin azaldığı görülmektedir.

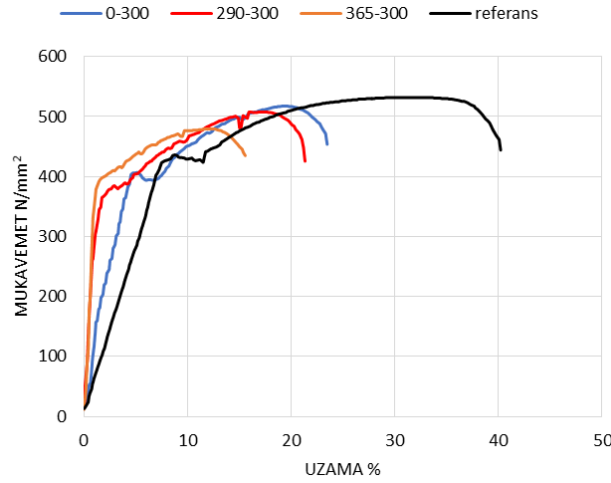


Şekil 7. 75 °C'de Betonarme Çeliklerin Gerilme-Uzama



Şekil 8. 150 °C'de Betonarme Çeliklerin Gerilme-Uzama

Şekil 8'de 150 °C'de gerilme durumlarına göre meydana gelen değişimler incelendiğinde gerilme-şekil değiştirme grafiklerinin referansa göre sola doğru kaydığı dolayısı ile sistemin yutacağı enerjinin azalması yani rezilyans modülü ve tokluğun düşmesi anlamına gelmektedir. Bu durum Şekil 9'da daha da belirgin halde gözlemlenmekte yüksek sıcaklık ve yüksek gerilim durumları betonarme çeliği üzerindeki değişimi net bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 9. 300 °C’de Betonarme Çeliklerin Gerilme-Uzama

Bulgular incelendiğinde yüksek sıcaklık durumunda beton örütüsünü aşan sıcaklıkların çelik yüzeyine ulaşması ile birlikte sıcaklığa ve gerilim durumuna göre mekanik değişiklikler oluşmaktadır. Bu değişikliklerin tasarım aşamasında ortaya konan kriterleri ne derece etkileyeceği Tablo 3’de görülebilmektedir. Karakteristik akma mukavemeti 420 MPa olan inşaat çeliğinin gerçek mukavemeti bu çalışmada kullanılan çelikler için standartlara uygun olarak 427 MPa çıkmıştır. Uygulanan yüksek sıcaklık ve ön gerilim durumlarının ardından akma mukavemeti 347 MPa değerine kadar gerilemiştir.

Tablo 3. Çekme Deneyi sonucu elde edilen mekanik değerler

Numune	Δl (mm)	Akma (MPa)	Çekme (MPa)	Fmax	Rm/Re	Kopma uz. (%)
0-75	29.0	419	516	58	1.231	24.16
0-150	27.0	416	518	58	1.245	22.50
0-300	18.3	406	517	58	1.273	15.25
290-75	33.1	392	501	56	1.278	27.58
290-150	23.9	382	510	57	1.335	19.91
290-300	19.8	347	507	57	1.461	16.50
365-75	26.1	412	513	58	1.245	21.75
365-150	22.0	392	514	58	1.311	18.33
365-300	18.1	394	517	58	1.312	15.08
referans	32.1	427	531	60	1.243	26.75

4. Tartışma

Betonarme yapıların kullanım ömrü sırasında yapısal güvenliği tehlikeye sokacak olumsuz koşullardan biri olan yangına bağlı yüksek sıcaklığın, yangın esnasında beton içerisinde gömülü

çeliğe yapı yerinde verebileceği etkiler bu çalışmada deneysel olarak ortaya konmuştur. Standartlara uygun bir şekilde üretilen betonarme çeliğinin, yapının ölü ve hareketli yükleri altındayken yangına maruz kaldığında her koşul için karakteristik akma mukavemeti olan 420 MPa değerinin altında kaldığı belirlenmiştir. Akma mukavemetinde %2 ila %19 arasında değer kaybına uğrayan seriler belirlenmiştir. Bu değişimde gerilimin etkisinden bahsedilebilir fakat doğrusal ilişkinin varlığı ortaya konulamaz. Gerilim değerinden ziyade gerilim var, gerilim yok şeklinde bir değerlendirme ile etkinin varlığı yorumlanabilir. Yüksek sıcaklıkta ise durum daha belirgin bir şekilde seyretmektedir. Sıcaklık değeri arttıkça akma mukavemeti değeri azalmaktadır. 290 MPa ön gerilme ve 300 °C sıcaklıkta en düşük akma mukavemeti 347 MPa olarak ölçülmüş ve tasarım akma dayanımının altına inilebilecek bir durum olarak saptanmıştır.

Sonuçlar

Mevcut binaların yapısal güvenliği belirlenirken yangın sonrası ortaya çıkan deformasyon ve dayanım azalması, üzerinde durulması gereken önemli konulardır. Betonarme yapı elemanlarını oluşturan beton ve çelik yüksek sıcaklığa karşı farklı sıcaklıklarda farklı davranışlar sergilemektedir. Çelik için en önemli koruyucu beton örtüsüdür. Bu beton örtüsünün kalınlığı ve uygun yapılmış olması betonarme elemanın ve içerisinde çelik çubuğun korunmasının sağlanması açısından etkilidir. Yangın esnasında çelik donatı yüzeyine ulaşan 300 °C'lik bir sıcaklığın yapmış olduğu etkilerin yanında beton örtü kalınlığı uygun olmayan yapılarda oluşacak hasarlar tasarımda ön görülmemiş ilave yükler ve hasarlar meydana getirebilecektir. Yapılan bu çalışma ile betonarme yapıım esaslarında kullanılan “tasarım dayanımı” yaklaşımlarının yerinde olduğu ve gerek betonarme normlarının gerekse yangına dayanıklı yapı tasarımı normlarının ortaya koymuş olduğu paspayı veya beton örtü kalınlığı olarak adlandırılan tabakanın yangın anında çelik donatı için hayati önem taşıdığı anlaşılmıştır.

Teşekkür

Yazarlar, bu çalışmayı maddi olarak destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (BAPK Proje No: 16.KARİYER.185) teşekkür eder.

Kaynaklar

- [1] Diederichs, U.; Schneider, Ulrich. Bond strength at high temperatures. Magazine of Concrete Research, 1981, 33.115: 75-84.
- [2] MORLEY, P. D.; ROYLES, R. Response of the bond in reinforced concrete to high temperatures. Magazine of Concrete Research, 1983, 35.123: 67-74.
- [3] Haddad, R. H.; Al-Saleh, R. J.; Al-Akhras, Nabil M. Effect of elevated temperature on bond between steel reinforcement and fiber reinforced concrete. Fire Safety Journal, 2008, 43.5: 334-343.
- [4] Bingöl, A. F; Gül, R. Residual bond strength between steel bars and concrete after elevated temperatures. Fire Safety Journal, 2009, 44.6: 854-859.

- [5] Kodur, V. K. R.; Agrawal, A.. Effect of temperature induced bond degradation on fire response of reinforced concrete beams. *Engineering Structures*, 2017, 142: 98-109.
- [6] Yang, H., et al. Evaluation of bond performance between deformed bars and recycled aggregate concrete after high temperatures exposure. *Construction and Building Materials*, 2016, 112: 885-891.
- [7] Menzel, C.A. Tests of the fire resistance and thermal properties of solid concrete slabs and their significance. National Emergency Training Center, 1943.
- [8] Binner, C. R.; Wilkie, C. B.; Miller, P. Heat Testing of High Density Concrete, Supplement: Declassified Report HKF-1. US Atomic Energy Commission, 1949.
- [9] Xiao, J; König, G. Study on concrete at high temperature in China—an overview. *Fire safety journal*, 2004, 39.1: 89-103.
- [10] BS EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of Concrete Structures. General Rules. Structural Fire Design, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- [11] Akman M.S., 2000. *Yapısal Hasarlar ve Onarım İlkeleri*”, İnşaat Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, ISBN 975-375-410-7 İstanbul, Türkiye.
- [12] Li, M; Qian, C X; SUN, W. Mechanical properties of high-strength concrete after fire. *Cement and concrete research*, 2004, 34.6: 1001-1005.
- [13] Report No: NISTIR 5934. Fire Performance of High Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art, by L.T. Phan, Building and Fire Research Laboratory, NIST Gaithersburg, MD 20899; Dated December 1996.
- [14] Georgali, B.; Tsakiridis, P. E. Microstructure of fire-damaged concrete. A case study. *Cement and Concrete Composites*, 2005, 27.2: 255-259.
- [15] BS EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of Concrete Structures. General Rules. Structural Fire Design, European Committee for Standardization, Brussels, 2005.
- [16] EN-197-1. Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. TSE. Ankara. 2012.
- [17] TS EN 206-1. Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk. TSE. Ankara. 2017.
- [18] Tolentino, E, et al. Effects of high temperature on the residual performance of Portland cement concretes. *Materials research*, 2002, 5.3: 301-307.
- [19] Morley, P. D.; Royles, R. The influence of high temperature on the bond in reinforced concrete. *Fire Safety Journal*, 1980, 2.4: 243-255.
- [20] Ergün, A, et al. The effect of cement dosage on mechanical properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire safety journal*, 2013, 55: 160-167.
- [21] TS500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Şubat 2000, TSE, Ankara.