



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.10.2022
Kabul Tarihi : 23.01.2023

Received Date : 03.10.2022
Accepted Date : 23.01.2023

BETON DOLGULU ÇELİK TÜP KOLONLARIN YANGIN PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF FIRE PERFORMANCE OF CONCRETE FILLED STEEL TUBE COLUMNS

Ç. Özge ÖZELMACI DURMAZ^{1*} (ORCID: 0000-0002-9517-776X)
Süleyman İPEK² (ORCID: 0000-0001-8891-949X)
Dia Eddin NASSANİ¹ (ORCID: 0000-0002-4196-8822)
Esra METE GÜNEYİŞİ³ (ORCID: 0000-0002-4598-5582)

¹Hasan Kalyoncu Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

²Bingöl Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Bingöl, Türkiye

³Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ç. Özge ÖZELMACI DURMAZ, ocigdem.ozelmaci@hku.edu.tr

ÖZET

Beton dolgulu çelik tüp (BDÇT) kolonlarda, çelik betonu sararak basınç dayanımını artırırken beton çeliğin yerel burkulmasını geciktirir. Bu çalışma ile BDÇT kolonların yangın direncini etkileyen faktörleri kapsayan çalışmalar ile ilgili son gelişmeleri derleyip literatüre kazandırmak amaçlanmıştır. Dolgu türlerine göre yüksek yangın direnci sırasıyla donatılı beton, çelik lifli beton ve yalın beton dolgulu çelik tüp kolonlardan, kesit tipine göre sırasıyla dairesel, eliptik, kare ve dikdörtgen kesitli kolonlardan elde edilmektedir. Kolon kesit alanının büyümesi ile yangın direnci artmaktadır. Çelik tüpün dayanımının artması, yangın direncinin azalmasına yol açarken, çelik tüp kalınlığının önemli etkisinin olmadığı anlaşılmaktadır. Bazı çalışmalarda beton dayanımının artmasıyla yangın direncinin arttığı, bazılarında ise azaldığı bildirilmektedir. Ayrıca, karbonatlı agrega içeren beton ile üretilen BDÇT kolonlar silikalı olanlara göre daha yüksek yangın direnci sağladığı elde edilen bulgular arasındadır. BDÇT kolonların yangın direnci uygulanan yük seviyesi ve eksantrisiteden oldukça etkilenmektedir ve her ikisi ile ters orantılıdır.

Anahtar Kelimeler: Beton dolgulu çelik tüp, kompozit kolon, taşıma kapasitesi, yangın performansı

ABSTRACT

In concrete filled steel tube (CFST) columns, while steel confines the concrete and increases the compressive strength, concrete delays the local buckling of the steel. With this study, it is aimed to compile the latest developments related to the factors affecting fire resistance of CFST columns and bring them to the literature. According to infill types, high fire resistance is obtained from steel bar reinforced, steel fiber reinforced and plain CFST columns, respectively, and circular, elliptical, square and rectangular columns according to section type. The fire resistance increases with the increase of the column cross-sectional area. While the increase in the strength of the steel tube leads to a decrease in the fire resistance, it is understood that the thickness of the steel tube does not have a significant effect. In some studies, it is reported that the fire resistance increases with the increase of concrete strength, while in others it decreases. In addition, it is among the findings obtained that the CFST columns produced with concrete containing carbonated aggregate provide higher fire resistance than those with silica. The fire resistance of CFST columns is highly affected by the applied load level and eccentricity and is inversely proportional to both.

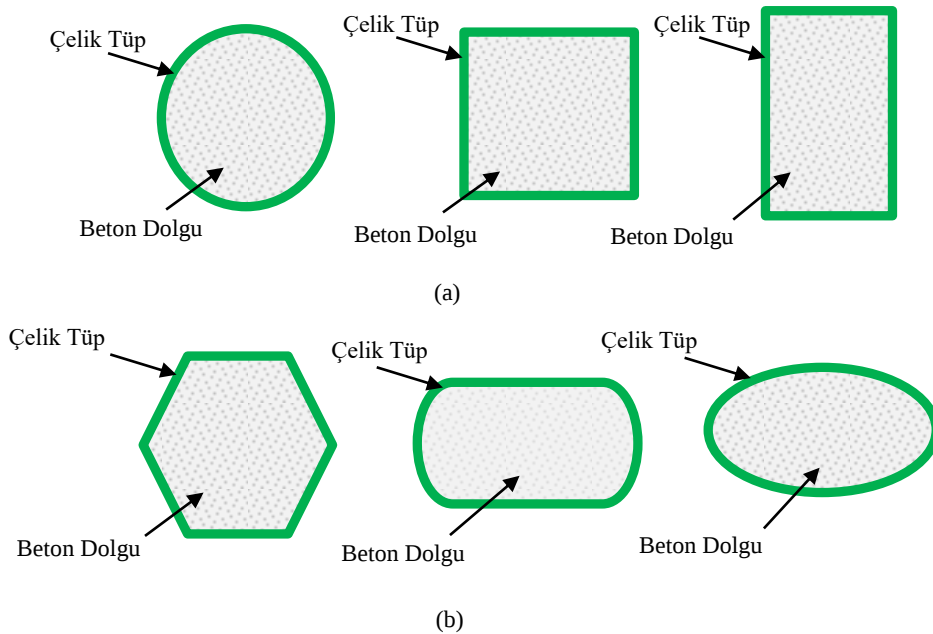
Keywords: Concrete filled steel tube, composite column, bearing capacity, fire performance

GİRİŞ

Beton dolgulu çelik tüp (BDÇT) kolonlar, çelik bir tüp ve tüpün içine doldurulan beton bir çekirdekten oluşan kompozit yapı elemanlarıdır (Yin vd., 2006). Kompozit kolonun bu iki bileşeni birbirini ideal şekilde tamamlar (Romero vd., 2011; Kodur, 2007). Beton ve çeliğin bu birlikteliğinde temel olarak betonun basınç dayanımı ve çeliğin çekme dayanımı özelliklerinden faydalanılır ve bu sayede de hem basınç hem de çekme yüklerine dayanan bir yapı elemanı elde edilir (İpek & Güneyisi, 2020; Güneyisi vd., 2016). BDÇT kolonlarda, çelik betonu sararak basınç dayanımını artırırken beton da çeliğin yerel burkulmasını geciktirir (Alhatmey, 2020; Sancioğlu vd., 2019; Dai & Lam, 2012; Romero vd., 2011; Kodur, 2007).

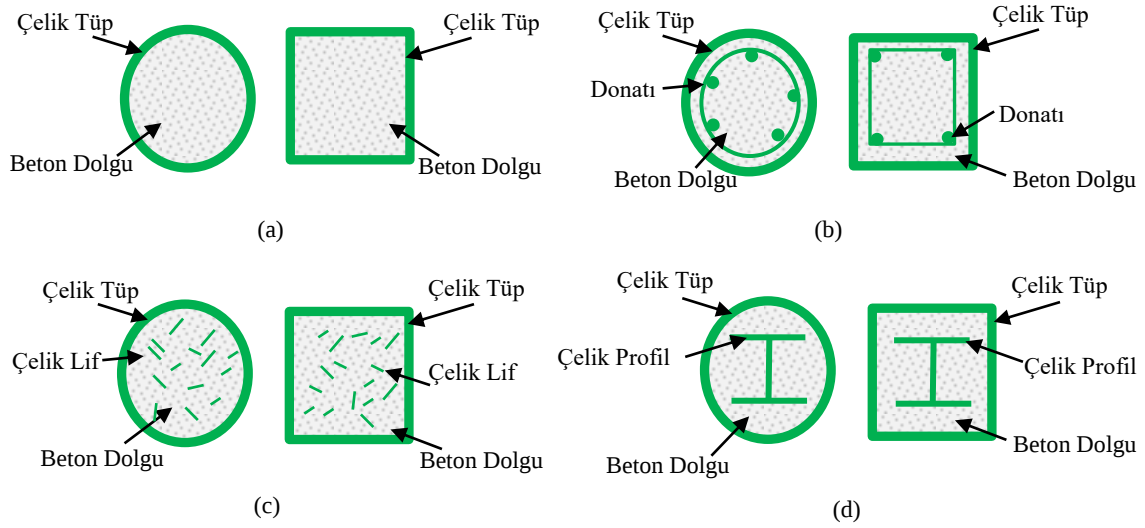
Bu bağlamda, BDÇT kolonlar hem beton hem de çeliğin üstün özelliklerine sahiptir (İpek & Güneyisi, 2020; Etili, 2021). Çelik yüksek rijitlik, süneklik ve mukavemet performansı, beton ise yüksek basınç dayanımı ve ekonomik bir tasarım sunar (Alhatmey, 2020). Bu nedenle geleneksel betonarme veya çelik kolonlara kıyasla oldukça avantajlıdır. Betonun sınırlayıcı etkisiyle çeliğin yerel burkulması gecikir, yerel burkulma sonrası oluşan dayanım problemleri azalır. Öte taraftan, çeliğin sarma etkisiyle de betonun mukavemeti ve böylece kolonun dayanımı ve sünekliği artar (İpek vd., 2021). Ayrıca çelik tüp içerisindeki beton çekirdeğin yangına karşı korunmasını sağlar ve betondaki sıcaklık artışı nispeten geciktirir. Beton ve çelik benzerlerine göre BDÇT kolonlar daha yüksek yangın direncine sahiptir (Alhatmey, 2020). BDÇT kolonlar sağladıkları yüksek dayanım, süneklik, enerji emilim kapasitesi, yük taşıma kapasitesi ve yangın direnci gibi özellikleriyle yapısal açıdan avantajlı olup, çelik tüp kalıp görevi gördüğünden, önemli ölçüde insan gücü, inşaat maliyeti ve zaman tasarrufu da sağlar (Etili and Güneyisi, 2022a). BDÇT kolonların daha küçük kesit alanlarıyla daha yüksek yük taşıma kapasitesine ulaşması bu kolonları mimari açıdan da avantajlı hale getirir. Bu sayede daha fazla alan kullanımı sağlar. Çeliğin kalınlığı, betonun mukavemeti gibi parametreler farklılaştırılarak farklı yük taşıma kapasitelerine sahip benzer kesitlerde kolonlar imal edilebilir. Bu da kolon boyutunda artış olmadan estetik bir görünüm sağlar (İpek vd., 2021; Alhatmey, 2020; Wang vd., 2019; Ukanwa vd., 2017; Güneyisi vd., 2016; Rush vd., 2012; Kodur, 2007; Yin vd., 2006; Kodur & Lie, 1995; Lie & Chabot, 1992).

BDÇT kolonların kesit ve dolgu modeline göre çeşitli türleri vardır. Kesit tipine göre BDÇT kolonlar Şekil 1'de gösterilmiştir. Bunlardan kare, dikdörtgen ve dairesel kesitli olanlar (a) daha yaygın kullanılanlardır. Çokgen, eliptik ve yuvarlak uçlu dikdörtgen kesitli olanlar (b) ise genellikle estetik açıdan kullanımı amaçlanan daha özel türlerdir (Kalemi, 2016).



Şekil 1. BDÇT Kolonlar İçin Kesit Modelleri: a) Yaygın Modeller b) Özel Modeller (Kalemi, 2016)

Dolgu türüne göre BDÇT kolonlar ise Şekil 2’de gösterilmiştir. BDÇT kolonların üretiminde kullanılan dolgu türü donatısız beton (buradan sonra bu beton tipi için yalın tabiri kullanılacaktır) (a), donatılı beton (b), çelik lifli beton (c) veya çelik profil gömülü beton (d) olmak üzere farklı türlerde olabilir (Alhatmey, 2020).



Şekil 2. Dolgu Türüne Göre BDÇT Kolon Tipleri: (a) Donatısız (Yalın) Beton, (b) Donatılı Beton, (c) Çelik Lifli Beton, (d) Çelik Profil Gömülü Beton (Alhatmey, 2020)

Açık deniz ve deniz yapıları, köprüler, kuleler, tüneller, yeraltı treni platformları, stadyumlar, yüksek katlı binalar, BDÇT kolonların kullanıldığı çeşitli mühendislik yapılarıdır (Etli and Güneyisi, 2022b; Alhatmey, 2020; Sancioğlu, 2020; İpek & Güneyisi, 2019; Wang vd., 2019; Güneyisi vd., 2016; Yin vd., 2006). BDÇT kolonların yüksek dayanım, rijitlik ve yüksek süneklik performansı göstermesi bu tür yüksek performanslı yapısal eleman ihtiyacı duyan yapılarda tercih edilmesinin başlıca nedenleridir. Ayrıca, yüksek yangın direncine sahip olması BDÇT kolonları oldukça avantajlı hale getirmektedir.

BDÇT kolonlarda beton ve çelik malzemelerinin etkileşimi daha iyi yangın direnci sunar. 600 °C’nin üzerindeki sıcaklıkların olduğu bir yangın esnasında çelik zayıflar ve beton çekirdek olmadan çelik kolonların stabilitesi tehlikeye girer (Wang vd., 2019). Çelik tüp beton ile doldurulduğunda ise çelik, rijitliğini ve dayanımını kaybederken yükü beton çekirdeğe aktarır. Beton çekirdek çeliğin burkulmasını geciktirir. Ayrıca, betonun düşük ısı iletkenliği sayesinde sıcaklık artışı yavaşlar. Çelik tüp ise beton çekirdeği doğrudan yangına maruz kalmaktan korunur. Çelik ve betonun yangına maruz kaldığında gösterdiği bu davranış sayesinde sadece beton veya sadece çelik benzerlerine kıyasla daha üstün bir yangın direnci sunar (Alhatmey, 2020; Wang vd., 2019; Rush vd., 2012; Kodur, 2007).

Literatürde, BDÇT kolonların yangın direnci üzerine çeşitli deneysel ve nümerik çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmalarda BDÇT kolonların yangın direnci test edilmiş, çeşitli parametrelerin yangın direnci üzerindeki etkisi incelenmiş ve tasarım modelleri oluşturularak bu tarz elemanların yangın dirençleri öngörülme çalışılmıştır. BDÇT kolonların kesit türünün yangın direnci üzerine etkisinin incelendiği çalışmalarda, kare, dikdörtgen, dairesel ve eliptik kesit türlerinin kolonların yangın direnci üzerine etkisi incelenmiştir (Han vd., 2013; Dai & Lam, 2012; Yin vd., 2006; Lie & Chabot, 1992). Bu kapsamda, Lie ve Chabot (1992), BDÇT kolonların yangın direncini öngören basit tasarım denklemleri geliştirmeyi amaçlayan bir araştırma programının parçası olarak yalın BDÇT kare ve dairesel kesitli kolonların yangın direncini test ettikleri bir çalışma gerçekleştirmişler. Öte taraftan, Yin vd. (2006) ise eksenel yüklü BDÇT kare ve dairesel kesitli kolonların yangın direncini karşılaştırmışlar. Benzer şekilde, Dai ve Lam (2012), yaptıkları sonlu elemanlar analizi (SEA) tabanlı çalışmada kolon kesit tipinin yangın direnci üzerindeki etkisini incelemişler. Eksenel yüklü kare, dikdörtgen, dairesel ve eliptik kesitli BDÇT kolonları, ortam sıcaklığında eşit kesit mukavemeti, eşit çelik kesit alanı ve eşit beton kesit alanı olmak üzere üç farklı kategoride test etmiş ve kolonların sıcaklık dağılımı, kritik sıcaklığı ve yangına maruz kalma süresi geliştirilen simülasyon yöntemiyle elde edilmiştir. Han vd. (2013) de kesit tipinin, BDÇT kolonların yangın direnci üzerine etkisi ile ilgili bir çalışma gerçekleştirmişler. Bu çalışmada, kesit tipine ek olarak, yük seviyesi ve kesit boyutunun etkisi de incelenmiştir. Numuneler eksenel

basınç yükü altında test edilmiş ve elde edilen bulgular neticesinde SEA yöntemi kullanılarak bir tasarım modeli geliştirilmiştir.

Yalın BDÇT kolonlara ek olarak donatılı beton, çelik lifli beton ve çelik profil gömülü beton gibi dolgu tiplerinin yangın direnci üzerine etkisi üzerine de çalışmalar mevcuttur (Mao vd., 2020; Ekmekyapar & Alhatmey, 2019; Tao vd., 2016; Kodur & Lie, 1995). Bir araştırma programı kapsamında, Kodur ve Lie (1995), çelik lifli BDÇT dairesel kesitli kolonların yangın direncini belirlemek için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişler. Bu çalışmada, dolgu tipine ek olarak kolon boyutu ve yük seviyesi de araştırılmıştır. Ayrıca, Tao vd. (2016), yalın ve donatılı, kare ve dairesel kesitli BDÇT kolonların yangın direncini inceleyip, elde ettikleri bulgular sonucunda SEA yöntemiyle bir tasarım modeli geliştirmişler. Ek olarak, Mao vd. (2020), çelik profil gömülü, kare kesitli BDÇT kolonların yangın direncini incelemiş ve çalışma kapsamında bir tasarım modeli geliştirmişler. Öte taraftan, Ekmekyapar ve Alhatmey (2019), BDÇT kolonların yangın direncini arttırmak amacıyla çelik tüpün iç kısmına belirli aralıklarla dairesel etriye şeklinde donatıları etmiş ve yangın direncini kıyaslayabilmek için yangına maruz bırakılan ve bırakılmayan numuneler eksenel yük altında test edilmiştir.

Literatürde, kolon kesit tipinin ve dolgu türünün yangın direncine etkisine ek olarak, BDÇT kolonların eksenel ve eksantrik gibi farklı yükleme şekilleri altındaki yangın direnci de incelenmiştir (Romero vd., 2011; Ukanwa, 2017). Bu kapsamda, Romero vd. (2011), eksenel yüke maruz kalan normal dayanımlı ve yüksek dayanımlı betonla doldurulmuş ve yük seviyeleri farklı, dairesel kesitli BDÇT kolonların yangın direncini incelemişler. Bu çalışmada, yalın beton, donatılı beton ve çelik lifli beton olmak üzere çekirdek tipinin yangın direncine etkisi incelenmiştir. Ukanwa vd. (2017) ise çalışmasında, yalın beton, donatılı beton ve çelik lifli beton beton dolgulu çelik tüp kolonların eksantrik yükleme altında yangın direncini incelemişler.

Literatürde yer alan bazı çalışmalarda, çelik ve betonun özelliklerinin BDÇT kolonların yangın direnci üzerine etkisi araştırılmıştır (Xiong & Liew, 2021; Wang & Young, 2013; Lu vd., 2009). Lu vd. (2009), yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen beton dolgulu çelik tüp kolonların yangın direncini inceledikleri bir çalışma gerçekleştirmiş ve bu çalışmada, kolonların yangın davranışını simüle etmek amacıyla SEA yöntemiyle bir tasarım modeli geliştirmişler. Wang ve Young (2013), yüksek dayanımlı yapı çeliğinin BDÇT kolonların yangın direncine etkisini incelemiş ve çalışma kapsamında SEA yöntemiyle bir tasarım modeli geliştirmişler. Benzer şekilde, Xiong ve Liew (2021), ultra yüksek dayanımlı beton ve yüksek dayanımlı çelik kullanılarak üretilen BDÇT kolonların yangın dirençleri üzerine deneysel ve analitik çalışmalar gerçekleştirmişler.

Yapılan deneysel çalışmaların sonucunda araştırmacılar, BDÇT kolonların yangın direncini hesaplamak için yöntemler geliştirmişler. Kodur (2007), tasarım ve yapım aşamasında BDÇT kolonların yangın direncini belirleme konusunda faydalı olacak bir kılavuz geliştirmiştir. Benzer şekilde, Espinos vd. (2012) tarafından eksenel yüklü yalın BDÇT kolonların yangına karşı direncini hesaplamak için Eurocode 4'e dayalı bir yöntem sunulmuştur.

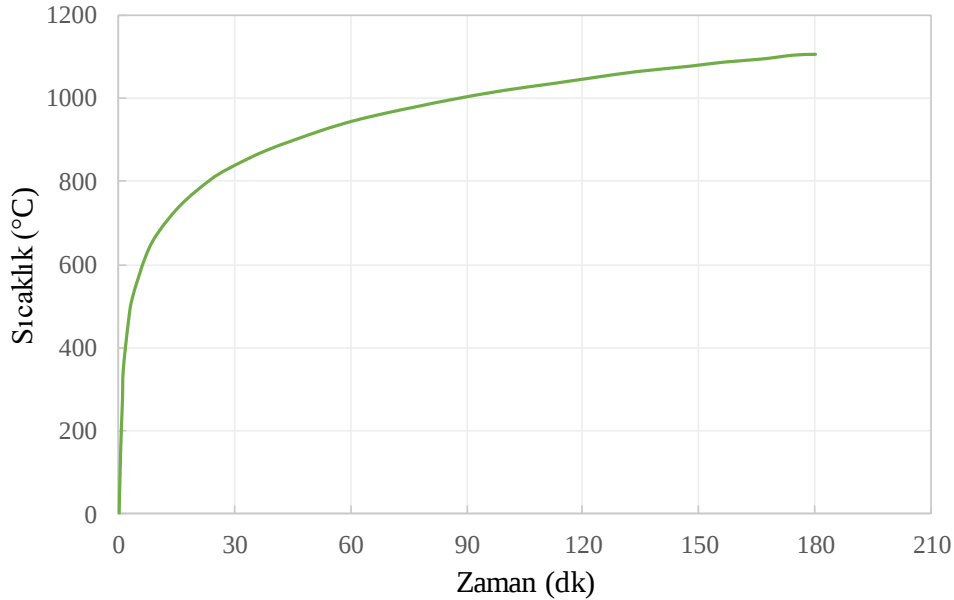
BDÇT KOLONLARIN YANGIN DİRENCİ

BDÇT kolonlar, beton ve çelik benzerlerine kıyasla daha iyi yangın direnci sağlar (Alhatmey, 2020). Çelik tüp, içerisindeki betonun doğrudan yangına maruz kalmasını önlerken aynı zamanda betondaki sıcaklık artışını geciktirir. Daha düşük termal iletkenliğe sahip olan beton, yangın sırasında çeliğin burkulmasını önler ve mukavemet göstermeye devam etmesini sağlar (Alhatmey, 2020; Dai & Lam, 2012; Romero vd., 2011; Kodur, 2007). Sıcaklığın seviyesi ve süresine bağlı olarak çelik ve beton malzeme özelliklerini kaybetmeye başlar. Çelik yüksek termal iletkenliği nedeniyle betondan ayrılma eğiliminde olduğundan yüksek sıcaklıklarda çelik ve beton arasındaki bağ zamanla azalır (Dai & Lam, 2012).

Literatürde BDÇT kolonlar, standart yangına maruz kalma koşulları altında test edilmiştir. Çalışmalarda genel olarak gaz fırınları kullanılmaktadır. Öncelikle kolonların uç plakaları koruma altına alınarak, fırın içerisine uygun şekilde yerleştirilerek sabitlenir. Daha sonra belirli noktalarda sıcaklık ölçümleri yapılabilmesi için ısı çiftleri yerleştirilir. Kolonları, yangına maruz bırakmadan önce yük uygulanır ve bu yük test süresince sabit tutulur. Yangın koşullarını sağlamak için fırın içerisindeki sıcaklık değişimi, Şekil 3'te gösterilen ISO 834-1 (1975) sıcaklık-zaman eğrisi takip edilerek gerçekleştirilir. Sıcaklık artışı neticesinde kolonun kırıldığı veya burkulduğu zaman ve sıcaklık, elemanın yangın direncini belirler (Ukanwa vd., 2017; Lu vd., 2009; Romero vd., 2011; Han vd., 2013; Tao vd., 2016).

Literatürde BDÇT kolonların yangın anındaki deformasyonu 4 aşamada açıklanmıştır. İlk aşamada, ısıl genleşme katsayısı daha yüksek olan ve daha hızlı ısınan bir malzeme olduğundan çelik, betona göre daha hızlı genleşir. Böylece uzunlamasına genişleyen çelik tüp, yükün büyük kısmını taşır. Akabinde yanal genleşme de gösteren çelik

ile beton arasında bir boşluk oluşur ve betona ısı geçişi daha yavaş olur. İkinci aşamada, çelik, üzerine aldığı yükten ve sıcaklık artışıyla beraber düşen akma dayanımından ötürü hızla kısalır ve bir noktada yük taşıyamaz hale gelir. Yaklaşık 20-30 dakika içerisinde çeliğin hızla kısalarak büzülmesi, yükün beton çekirdeğe aktarılmasına yol açar. Üçüncü aşamada, betonun düşük termal iletkenliği sayesinde elemandaki sıcaklık artışı yavaşlamaya başlar. Bu aşamada beton çekirdek daha fazla yük taşımaya başlar. Betondaki bozulma belirli bir seviyeye gelene kadar yük, beton çekirdek tarafından taşınmaya devam eder. Dördüncü ve son aşamada ise sıcaklık artışı devam ettikçe beton mukavemetini yitirir ve kolon artık yük taşıyamaz. Betonun kırıldığı veya burkulduğu bu an kolonun yangın direnci olarak ifade edilir (Alhatmey, 2020; Wang vd., 2019; Rush vd., 2012; Kodur, 2007).



Şekil 3. ISO 834 Zaman-Sıcaklık Eğrisi (ISO 834-1, 1975)

BDÇT kolonların yangın direncinin analizi karmaşık bir süreçtir. Farklı termal ve mekanik özelliklere sahip iki malzemeden oluşması nedeniyle yangın direnci incelenirken, sıcaklık dağılımı, yangının seviyesi, yangın süresi ve yükleme etkisi gibi değişkenlerin yanı sıra malzeme özelliklerinin de yangın performansına etkisinin bilinmesi gerekir.

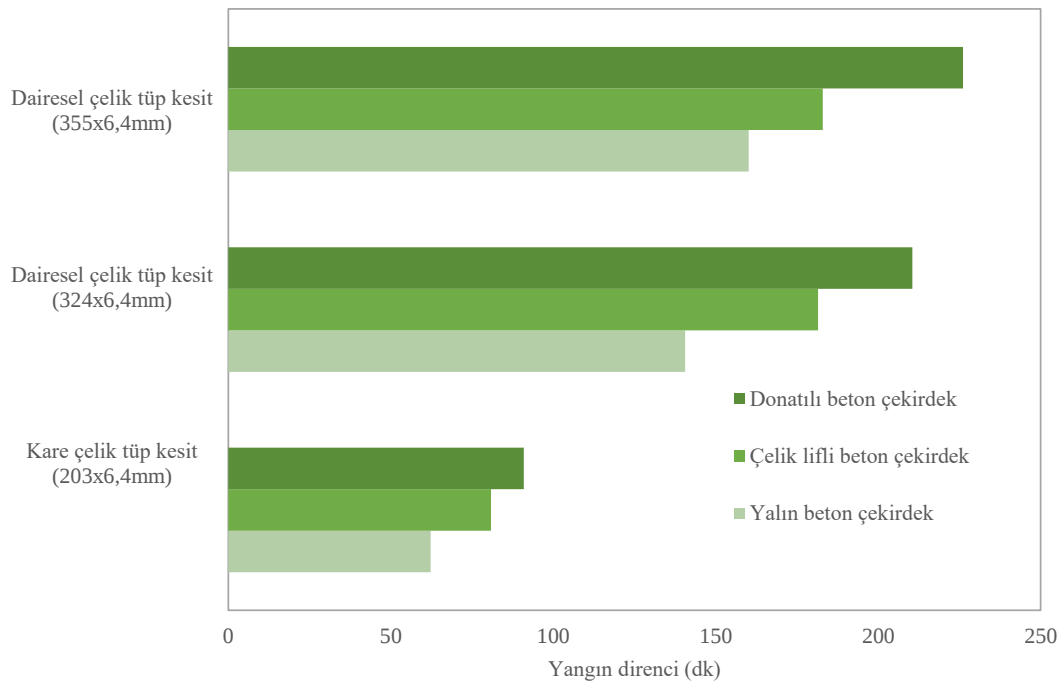
BDÇT KOLONLARIN YANGIN DİRENCİNİ ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Beton Dolgu Tipi

BDÇT kolonların yangın direnci, çelik akma dayanımına ulaştıktan sonra içerisinde bulunan dolgunun türüne bağlıdır (Kodur, 2007). Burada dolgu türü: yalın beton, donatılı beton ve çelik lifli beton olarak sınıflandırılabilir. Literatürdeki mevcut çalışmalar incelendiğinde, yalın beton ile üretilen BDÇT kolonların yangın direnci açısından en ekonomik kolon türü olduğu sonucuna varılabilir. Ancak bazı durumlarda, özellikle kolon boyutunun büyümesiyle yalın BDÇT kolonların yangın direncinin diğerlerine göre nispeten daha düşük olduğu görülmektedir. Donatılı BDÇT kolonlarda, donatılar çatlak yayılmasını ve ani mukavemet kaybını engeller. Kolonun yük taşıma kapasitesinin ve yangın direncinin artmasını sağlar. Çelik lif kullanımı BDÇT kolonların yangın direncini, donatılı olanlar ile kıyaslanabilir derecede artırır. Yük taşıma kapasitesi de belli bir dereceye kadar artar. Ancak donatı ve çelik lif kullanımı maliyeti de arttıracaktır (Kodur, 2007).

Kodur ve Lie (1995) bir çalışmada çelik lifli BDÇT kolonların yangın direncini incelemişler. Çalışma kapsamında, çelik lifli BDÇT kolonların yalın BDÇT kolonlara kıyasla daha yüksek yangın direnci gösterdiği ve çelik liflerin erken çatlamayı önlemeye ve basınç dayanımını arttırmaya katkıda bulunduğu sonucuna varılmıştır. Tao vd. (2016) ise yaptıkları bir çalışmada donatının BDÇT kolonların yangın direnci üzerindeki etkisini araştırmışlar. Deney sonuçları, donatının yangın direnci üzerindeki etkisinin çok önemli olmadığını göstermiştir. Aynı özelliklerde donatılı bir numunenin yangın direnci, donatısız (yalın) olan numune için ölçülen 122 dakikalık yangın direncinden biraz daha (143 dakika) yüksek ölçülmüştür. Ancak, başka iki benzer numune karşılaştırıldığında ise donatılı numunenin

174 dakikalık bir yangın direncine sahip olduğu, donatısız (yalın) numunenin 197 dakikalık yangın direncinden daha düşük bir sürede göçtüğü görülmüştür. Donatı varlığının yangın direncini arttırması beklenirken elde edilen bu iki farklı sonuç donatı oranının düşüklüğü, yük eksantrikliği veya fırından kaynaklı diğer etkiler gibi nedenlere bağlanmıştır. Kodur (2007) gerçekleştirdiği bir başka çalışmada, daha önce yaptıkları deneysel çalışmaların sonucunda elde ettikleri verilere dayanarak dolgu türünün bu tarz kolonların yangın direncine etkisini incelemişler. Bu çalışmalar sonucunda sunulan grafiklere göre, test sonunda donatılı ve çelik lifli beton ile üretilmiş BDÇT kolonun deformasyon davranışının benzer olduğu belirtilmiştir (Kodur, 2007). Çelik lifli betonun testin başlarında donatılı betona nazaran daha yüksek deformasyon göstermesini ise çelik lifli betonun yüksek termal özellikleri ile ilişkilendirmişler. Şekil 4'te de gösterildiği gibi, donatılı BDÇT kolonların çelik lifli BDÇT kolonlara göre yangın direncinin daha yüksek olduğu ve yalın BDÇT kolonların performansının ise her ikisinininkinden daha düşük olduğu belirtilmiştir (Kodur, 1999). Kodur (2007), yalın BDÇT kolonların yangına iki saate kadar dayanabildiği, donatılı ve çelik lifli BDÇT kolonların üç saat veya daha fazla bir süre yangına dayanabileceğini, bu nedenle iki saatten uzun yangın direnci gerektiğinde beton tipinin çelik lifli veya donatılı olarak tercih edilmesi gerektiğini belirtmiştir. Ayrıca Kodur (2007), narin ve eksantrik yüklü kolonlarda da çelik lifli veya donatılı beton kullanımını önermektedir. Eksantrik yükün çok fazla olduğu durumlarda da yine yalın betonun yetersiz kalacağını, bu nedenle donatılı beton kullanımı gerektiğini dile getirmiştir. Mao vd. (2020) ise çalışmalarında BDÇT içerisine gömülü profilin yangın direncine etkisini araştırmışlar. Çalışma sonucunda profil çelik oranı arttıkça yangın direncinin arttığı bunun da profil çeliğin beton üzerindeki sarma etkisi ile yangın altında taşıma kapasitesi için uygun koşullar sağlamasından ötürü olduğu belirtilmiştir.



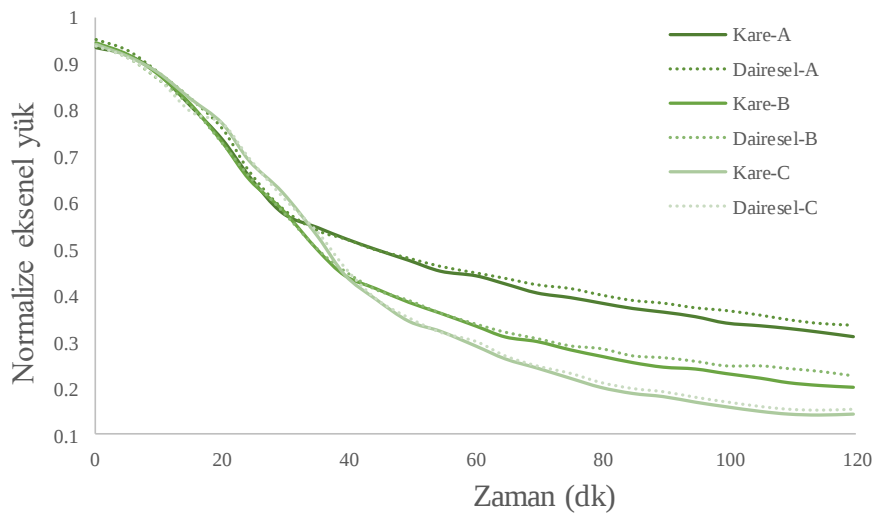
Şekil 4. Beton Dolgu Türünün Yangın Direncine Etkisi (Kodur, 1999)

Kesit Türü

Kesit tipinin BDÇT kolonların yangın direnci üzerinde etkisi incelendiğinde en yüksek yangın direncinin dairesel kesitli kolonlarda elde edildiği, eliptik kesitli kolonların yangın direncinin dairesel kesitlilere göre daha az olduğu anlaşılmaktadır. Kare kesitli kolonların yangın direnci ise dikdörtgen kesitlilere göre daha fazla, eliptik kesitlilere göre ise daha azdır (Wang vd., 2019; Rodrigues & Laim, 2017; Espinos vd., 2015; Dai & Lam, 2012).

Dairesel kesitli kolonlarda sıcaklık arttıkça çelik tüp beton çekirdeği üniform olarak sınırlar, bu da hem mukavemette hem de deformasyonda artışa katkı sağlar. Kare veya dikdörtgen kesitli kolonlarda ise üniform sınırlama vesilesiyle deformasyonda önemli bir artış görülürken, mukavemette deformasyona kıyasla daha düşük bir artış elde edilir. Ayrıca sıcaklık artışıyla dairesel kesitli kolonlar üniform olarak ısınırken, kare kesitli kolonlarda köşeler daha hızlı ısınır ve bu da kesit içerisinde termal gerilmelere neden olur (Wang vd., 2019).

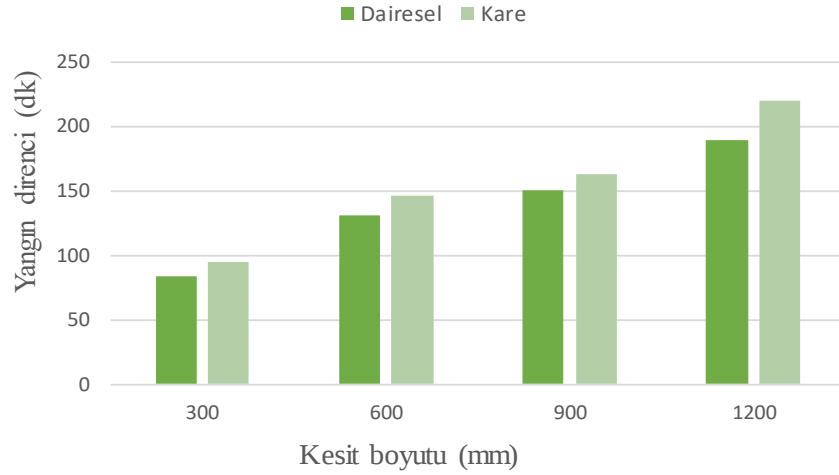
Lie ve Chabot (1992) kare ve dairesel kesitli, yalnız BDÇT kolonların yangın direncini belirlemek için 44 kolon üzerinde yaptıkları deneysel çalışmada, eşdeğer kesit alanı için dairesel kesitli kolonların yangın direncinin kare kesitli kolonlardan nispeten daha yüksek olduğunu rapor etmiştir. Benzer şekilde, Yin vd. (2006), kare ve dairesel kesitli BDÇT kolonların yangın direncini kıyasladığı çalışmada, Şekil 5'te de gösterildiği gibi, aynı boyut ve özelliklere sahip dairesel kesitli kolonların kare kesitli olanlara (şekildeki A, B ve C etiketli kolonlar aynı boyut ve özelliklere sahiptir) nazaran biraz daha yüksek yangın direnci gösterdiğini bildirmişler. Kodur (2007) da dairesel ve kare kesitli BDÇT kolonlar üzerinde yaptığı bir çalışmada, dairesel kesitli BDÇT kolonlarda aynı kesit alanına sahip kare kesitli BDÇT kolonlardan daha yüksek yangın direnci elde edildiğini belirtmiştir. Ayrıca, Dai ve Lam (2012), dört farklı kesitte (dairese, kare, eliptik ve dikdörtgen) ürettikleri BDÇT kolonların yangın sırasında sergilediği yapısal davranışı incelemek üzere SEA tabanlı bir çalışma yapmışlar. Bu kolonları ortam sıcaklığında eşit kesit mukavemeti, eşit çelik kesit alanı ve eşit beton kesit alanı olmak üzere üç farklı kategoride test etmişler. Eşit kesit mukavemeti ve eşit çelik kesit alanına sahip kolonlar için, dairesel kesitli kolonların, kırılmadan önce en uzun yangına maruz kalma süresine sahip olduğu, bunu eliptik, kare ve dikdörtgen kesitli kolonların izlediğini bildirilmişler. Ancak eşit beton kesit alanı olan kolonlarda kare ve dikdörtgen kesitli kolonların yangına maruz kalma süresinin, dairesel ve eliptik kesitli kolonlara göre daha uzun olduğu belirtilmiştir.



Şekil 5. Kesit Türünün Yangın Direncine Etkisi (Yin vd. 2006)

Kesit Alanı

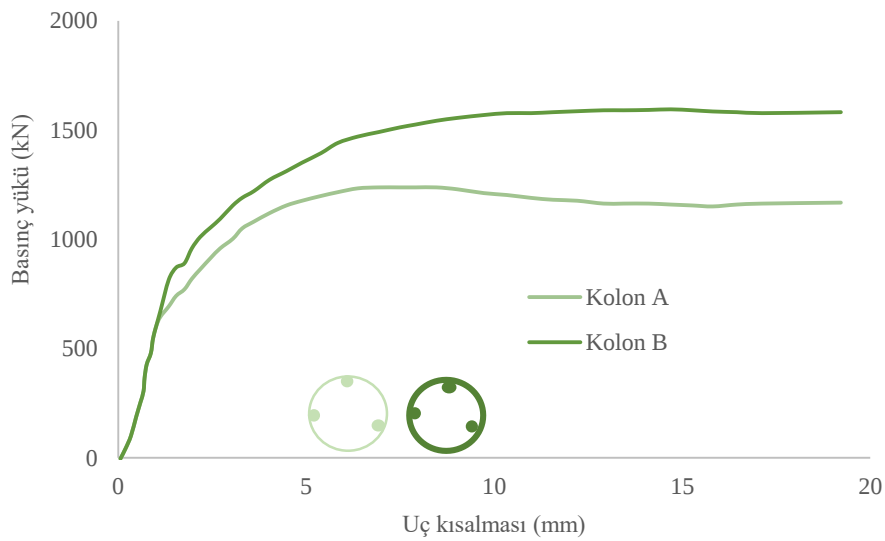
BDÇT kolonların kesit alanının büyümesi (çapı veya eninin artması) ile yangın direncinde olumlu gelişme görülmesi, içerisinde bulunan betonun artması ve buna bağlı olarak sıcaklık geçişinin yavaşlaması nedeniyle beklenen bir sonuçtur (Wang vd., 2019; Yin vd., 2006). Bu bağlamda yapılan çalışmalardan biri olan Lie ve Chabot'ın (1992) çalışmada, kare ve dairesel kesitli, yalnız BDÇT kolonların yangın direnci deneysel olarak irdelenmiştir. Gerçekleştirilen bu çalışmada parametrelerden biri de kesit alanı (boyutları) olarak belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, artan kesit boyutlarının (çap (D) veya en (B)) daha yüksek yangın direncine vesile olduğu bildirilmiştir. Bu durum beton çekirdeğin ısı kapasitesinin kütlesi ile doğru orantılı olarak artmasıyla ilişkilendirilmiştir. Daha büyük kesit boyutlarına sahip kolonlarda sıcaklığın daha küçük boyutlulara göre daha yavaş yükseldiği belirtilmiştir. Yin vd. (2006), kare ve dairesel kesitli BDÇT kolonların yangın direncini kıyasladığı çalışmada, kesit alanının yangın direnci üzerindeki etkisini incelemişler. Genel olarak, kesit alanı ne kadar küçük olursa, yangın direncinin o derece azalacağı bildirilmiştir. Bu durum, kesit alanı küçüldükçe ısının daha hızlı aktarılabilmesine ve dolayısıyla malzemelerin bozulmasının da o kadar hızlı olmasına bağlanmıştır. Han vd. (2013), standart yangın testi koşulları altında eksenel yüklenmiş beş adet kare ve dairesel kesitli BDÇT kolonun davranışını incelemişler. Şekil 6'da da gösterildiği gibi bu çalışma neticesinde kesit boyutunun (D veya B), yangın direnci üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve kesit boyutunun artmasıyla yangın direncinin önemli ölçüde arttığı bildirilmiştir. Kesit boyutu 300 mm'den 1200 mm'ye artırıldığında, yangın direncinin dairesel kesit için 83 dakikadan 188 dakikaya ve kare kesit için 97 dakikadan 222 dakikaya çıktığı bildirilmiştir. Han vd. (2013), bu artışın, daha büyük kesitli bir BDÇT kolonlarda daha fazla beton olmasından ötürü anlaşılabilir bir artış olduğunu, daha fazla beton olduğunda iç kısımdaki sıcaklık artışının daha yavaş olacağını ve bunun da yangın direncini arttıracığını belirtmişlerdir.



Şekil 6. Kesit Boyutunun Yangın Direncine Etkisi (Han vd. 2013)

Çelik Tüpün Kalınlığı

Literatürdeki çelik tüp kalınlığının BDÇT kolonların yangın direnci üzerindeki etkisini inceleyen çalışmalara bakıldığında bu parametrenin yangın direnci üzerinde önemli derecede etkili olmadığı sonucu çıkarılabilir (Wang vd., 2019). Lie ve Chabot (1992) kare ve dairesel kesitli, yalın BDÇT kolonların yangın direncini belirlemek için yaptıkları deneysel çalışmada incelenen parametrelerden biri de çelik tüpün kalınlığıydı. Çalışmada, aynı yük altında test edilen kolonlar için çelik tüp kalınlığının 4.78 mm'den 6.35 mm'ye çıkarılmasının yangın direncini 76 dakikadan 81 dakikaya çıkardığı rapor edilmiştir. Oysa başka iki numune üzerinde yapılan test sonucunda tersi bir sonuç elde edildiği, çelik tüpün kalınlığının artmasıyla yangın direncinin düştüğü bildirilmiştir. Söz konusu çalışma kapsamında, çelik tüpün kalınlığının yangın direnci üzerinde çok az etkili olduğu belirtilmiştir. Alhatmey (2020), tezinde aynı özellikte numuneleri farklı çelik tüp kalınlıklarıyla hazırlayıp yangın direncini test etmiştir. Şekil 7'de de gösterildiği gibi çelik tüp kalınlığı daha fazla olan BDÇT kolonların (kolon B) daha az olan kolonlara (kolon A) göre daha iyi performans gösterdiğini, kalınlığın artmasının üstün süneklik, daha yüksek tokluk ve daha yüksek rijitlik sağladığını belirtmiştir. Yangına maruz kaldığında aynı malzeme özelliği ve donatı oranına sahip, daha kalın (5.63 mm) çelik tüp ile üretilmiş kolonların daha ince (3.15 mm) çelik tüp ile üretilene oranla %28.6 daha fazla basınç kapasitesi sergilediğini rapor etmiştir.

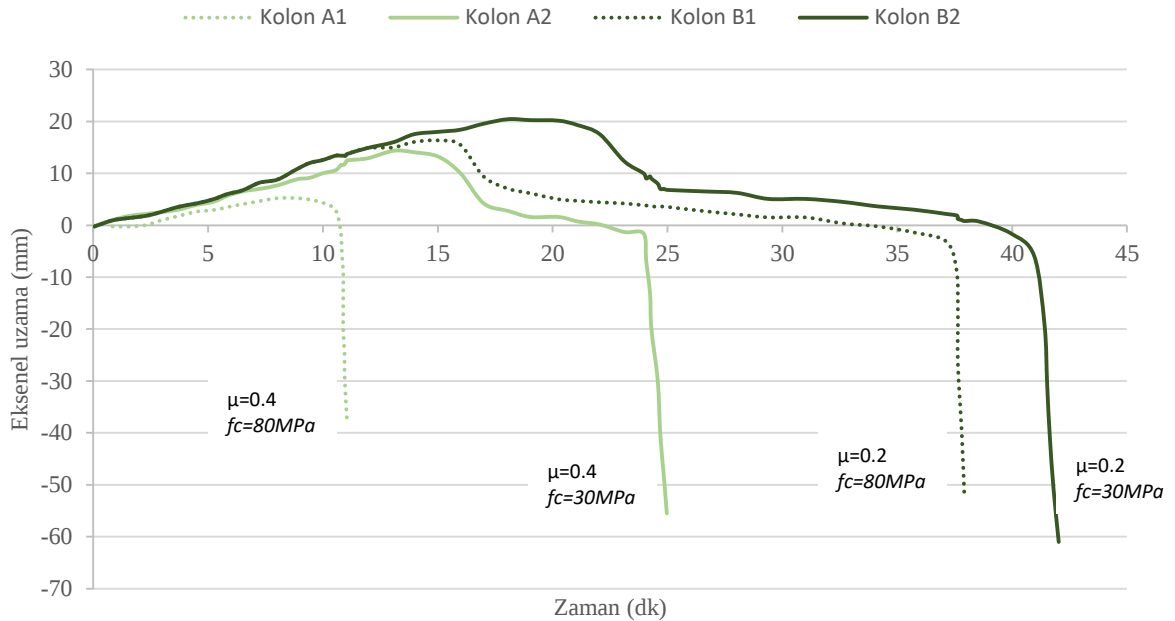


Şekil 7. Çelik Tüp Kalınlığının Kalıntı Basınç Yüküne Karşılık Uç Kısalmasına Etkisi (Alhatmey, 2020)

Çelik ve Betonun Dayanımı

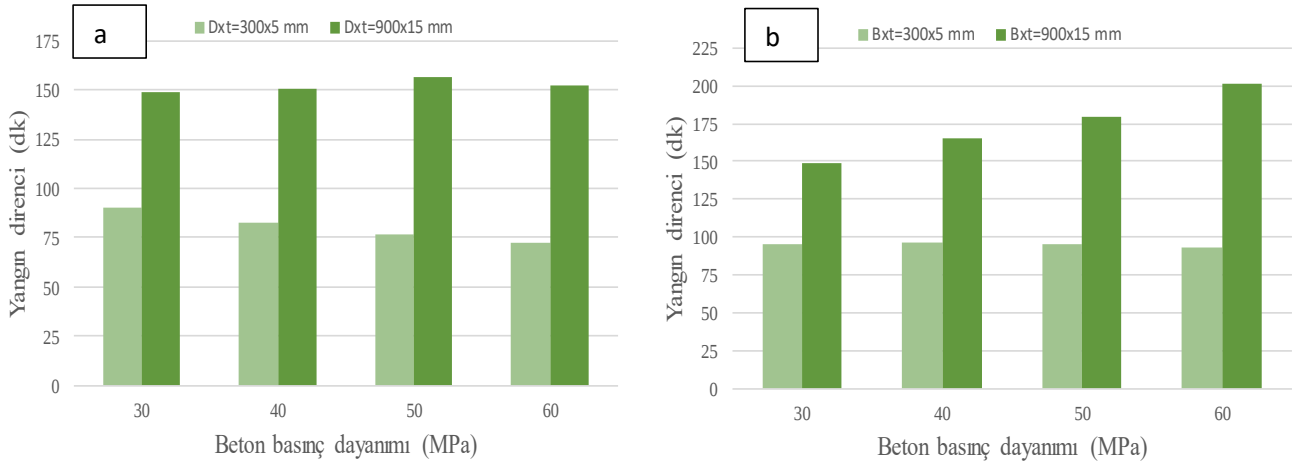
Literatürdeki çalışmalar, BDÇT kolonların yangın direncinin çeliğin mukavemetinin artmasıyla azaldığını göstermektedir (Wang vd., 2019). Betonun basınç dayanımıyla ilgili ise literatürde farklı sonuçlar mevcuttur. Diğer bir deyişle, literatürde betonun basınç dayanımının artmasıyla BDÇT kolonun yangın direncinin arttığına (Yao vd., 2016; Han vd., 2013; Moliner vd., 2013; Tondini vd., 2013; Wang & Young, 2013) ve azaldığına (Mao vd., 2020; Romero vd., 2011; Chung vd., 2008; Kodur, 1998; Lie & Caron, 1988) yönelik sonuçların bildirildiği çalışmalar yer almaktadır.

Romero vd. (2011), normal ve yüksek dayanımlı beton kullanarak ürettikleri BDÇT kolonlar üzerinde yangın direnci deneyleri gerçekleştirmişler. Şekil 8'de gösterildiği gibi yalın beton ile hazırlanmış BDÇT kolonlar için, aynı yük seviyesinde (μ) normal dayanımlı beton (30 MPa) ile üretilen kolonların yüksek dayanımlı beton (80 MPa) ile üretilenden daha iyi yangın direncine sahip olduğu bildirilmiştir. 0.4 yük seviyesine sahip numunelerde (Kolon A) beton dayanımı 30 MPa'dan 80 MPa'ya yükseltildiğinde yangın direnci 25 dakikadan 11 dakikaya düşmüştür. 0.2 yük seviyesine sahip numunelerde (Kolon B) beton dayanımı 30 MPa'dan 80 MPa'ya yükseltildiğinde yangın direnci 42 dakikadan 38 dakikaya düşmüştür. Ayrıca, aynı çalışmada, aynı kesit alanına ve yük seviyelerine sahip donatılı ve çelik lifli BDÇT kolonlar için de aynı sonuçlara varıldığı belirtilmiştir. Benzer şekilde, Mao vd. (2020), betonun dayanımının, BDÇT kolonların yangın direncine etkisi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışmada donatılı BDÇT kolonlar incelenmiş olup, beton dayanımının 30MPa'dan 60MPa'ya çıkarılmasıyla yangın direncinin %11 azaldığı bildirilmiştir. Bu sonuç ise sıcaklığın artmasıyla betonun dayanımının giderek azalması ve daha yüksek dayanıma sahip betonun, yüksek sıcaklıkta daha fazla dayanım kaybı yaşaması ile ilişkilendirilmiştir. Çalışmada, beton dayanımının, BDÇT kolonlarının yangın direnci üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu belirtilmektedir.



Şekil 8. Beton Basınç Dayanımının Yangın Direncine Etkisi (Romero vd. 2011)

Han vd. (2013) gerçekleştirdikleri deneysel çalışmada, Romero vd. (2011) ve Mao vd. (2020) tarafından yapılan çalışmada elde edilen bulguların tersi bir sonuca vardılar. Bu çalışmada, standart yangın testi koşulları altında eksenel yüke tabi tutulan beş adet kare ve dairesel kesitli BDÇT kolonun davranışını incelemişler. Çalışma kapsamında, beton dayanımının BDÇT kolonların yangın direnci üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Şekil 9'da gösterildiği gibi kolonların kesit boyutu nispeten daha küçük olduğunda, beton dayanımının yangın direnci üzerinde orta derecede bir etkiye sahip olduğu, kesit boyutu büyük olan kolonlarda ise yangın direncinin genellikle beton dayanımının artmasıyla arttığı bildirilmiştir. Wang ve Young (2013), bir çalışmada yüksek dayanımlı çeliğin BDÇT kolonların yangın direnci üzerine etkisini incelemişler. Çalışma sonucunda aynı malzeme ve boyut özelliklerine sahip BDÇT kolonlarda, beton dayanımı 30 MPa'dan 50 MPa'ya çıkarıldığında yangın direncinin 151 dakikadan 227 dakikaya yükseldiği gözlemlenmiştir.

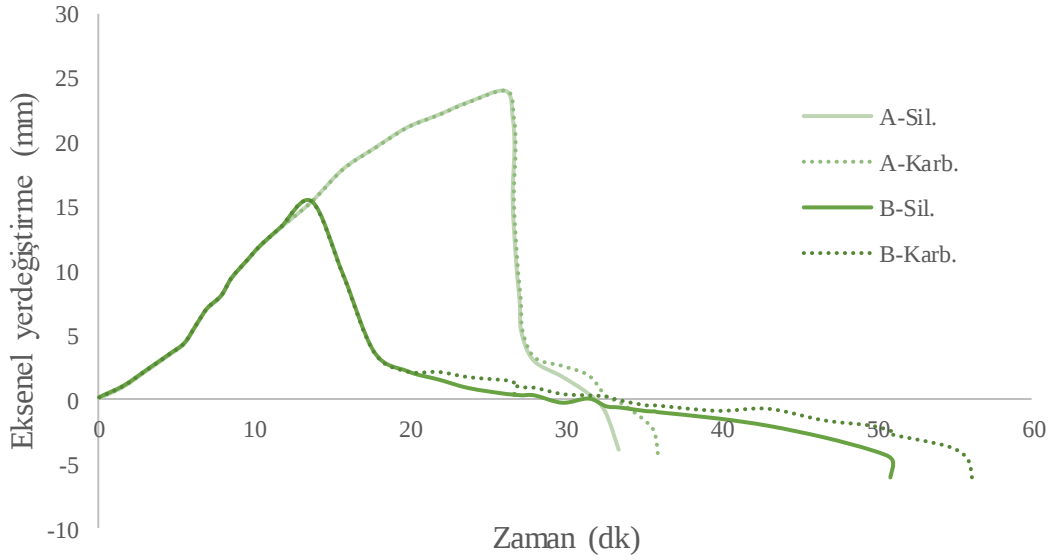


Şekil 9. Beton Basınç Dayanımının Yangın Direncine Etkisi (a) Dairesel, (b) Kare (Han vd. 2013)

Wang ve Young (2013) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, çeliğin dayanımı 275 MPa iken yangın direncinin 151 dakika, 460 MPa iken 73 dakika, 690 MPa iken 46 dakika olduğu rapor edilmiştir. Çalışma sonucunda, aynı yük oranına sahip kolonlarda, çeliğin mukavemetinin artmasıyla yangın direncinin azaldığı, betonun mukavemetinin artmasıyla ise arttığı bildirilmektedir. Xiong ve Liew (2021), ultra yüksek dayanımlı beton ve yüksek dayanımlı çelik ile üretilen BDÇT kolonlarının yapısal davranışını daha iyi anlamak için, yangın dirençleri üzerine deneysel ve analitik çalışmalar yapmışlar. Çalışma sonucunda çeliğin dayanımının artmasıyla yangın direncinde %21'e kadar azalma olduğunu bildirilmektedir. Ultra yüksek dayanımlı beton kullanılmasıyla yangın direncinin arttığını ve bu durumun ultra yüksek dayanımlı betonun yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans göstermesinden kaynaklandığını belirtmişlerdir.

Agrega Tipi

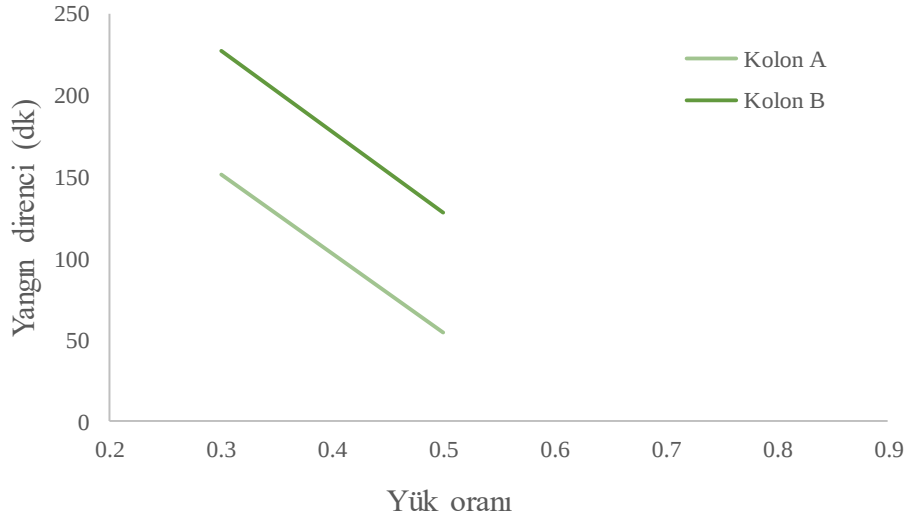
Beton üretiminde kullanılan agregat türü de BDÇT kolonların yangın direnci üzerinde fark edilir bir etkiye sahiptir. Agreganın türü betonun genleşme katsayısını, ısı transferini ve hava boşluğu oluşumunu etkileyebilmektedir. Bunun neticesinde betonun mukavemetini ve kırılma modunu da etkilemektedir (Rush vd., 2012). Beton üretiminde kullanılan agreganın BDÇT kolonların yangın direnci üzerindeki etkisinin incelendiği, Kodur (2007) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, betonun üretiminde karbonatlı agregat kullanımının silikalı agregaya göre %10 daha fazla yangın direnci sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Lie ve Chabot (1992) ise kare ve dairesel kesitli, yalnız BDÇT kolonların yangın direncini belirlemek için yaptıkları deneysel bir çalışmada beton üretiminde kullanılan agregat tipinin de etkisi incelemişler. Bu çalışmada, daha önce geleneksel betonarme kolonlarda agregat tipinin etkisinin incelendiğini ve karbonatlı agregat kullanımının silikalı agregaya göre neredeyse iki kat daha yüksek yangın direnci sağladığını bildirilmektedir. Ancak BDÇT kolonlar üzerine yapılan çalışmalarda ise agregat tipinin etkisi konusunda daha az kesin sonuçlar elde ettiklerini, buna rağmen karbonatlı agregat içeren beton kullanılarak daha iyi performansın beklenebileceğine dair göstergeler olduğunu bildirmişler. Wang ve Young (2013) tarafından gerçekleştirilen ve yüksek dayanımlı çeliğin BDÇT kolonların yangın direnci üzerine etkisinin incelendiği bir çalışmada parametrelerden biri de agregat tipiydi. Şekil 10'da gösterildiği gibi çalışma kapsamında, karbonatlı agregat içeren beton ile üretilen BDÇT kolonların silikalı olanlara göre daha yüksek performans sağladığı sonucuna varılmıştır. Aynı çelik ve beton özelliklere sahip kolonlar üzerinde yapılan testler sonucunda karbonatlı agregat içeren kolonun (A-Karb.) yangın direnci 36 dakika ölçülürken silikalı agregat içeren kolonun (A-Sil.) yangın direnci 33.5 dakika olarak ölçülmüştür. Aynı özelliklere sahip başka iki kolon için ise, karbonatlı agregat içeren kolonun (B-Karb.) yangın direnci 56 dakika ölçülürken silikalı agregat içeren kolonun (B-Sil.) yangın direnci 51 dakika olarak ölçülmüştür.



Şekil 10. Agrega Tipinin Yangın Direncine Etkisi (Wang ve Young, 2013)

Yük Seviyesi

Yük seviyesi, ortam sıcaklığında kolona uygulanan yükün kolonun yük taşıma kapasitesine oranı olarak tanımlanır (Han vd., 2013; Wang & Young, 2013; Dai & Lam, 2012). Herhangi bir kolon tipinin yangın direnci, uygulanan yük seviyesi ile ters orantılıdır; artan yük seviyesi azalan yangın direnci süresi ile sonuçlanır (Wang vd., 2019; Dai & Lam, 2012; Kodur, 1998). Lie ve Chabot (1992) yük seviyesinin kare ve dairesel kesitli, yalın BDÇT kolonların yangın direncine etkisini inceledikleri bir deneysel çalışma gerçekleştirmişler. Çalışma sonucunda, yük seviyesi arttıkça yangın direncinde azalma gözlemlendiği bildirilmektedir. Bir numunenin yük seviyesinin %74'ten %141'e yükseltilmesiyle yangın direncinin 133 dakikadan 70 dakikaya düştüğü rapor edilmiştir. Çalışma neticesinde yük seviyesinin kolonun yangın direnci üzerinde önemli bir etkisi olduğu ve bu etkinin daha büyük çapa sahip kolonlarda nispeten daha fazla gözlemlendiği belirtilmektedir. Benzer şekilde, Romero vd. (2011) de, normal ve yüksek dayanımlı beton kullanılarak üretilen BDÇT kolonlar üzerinde yangın direnci deneyleri gerçekleştirmişler. Yük seviyesi arttıkça hem normal hem de yüksek dayanımlı beton ile üretilen BDÇT kolonların yangın direncinin azaldığını gözlemlemişler. Çalışmada %20, %40 ve %60 yük seviyeleriyle yapılan testler sonucunda, %40 ve %60 yük seviyelerinde 30 dakikadan az, %20 yük seviyesinde 30 dakikanın üzerinde yangın direnci süresi elde ettiklerini bildirmişler. Ayrıca, Han vd. (2013), standart yangın testi koşulları altında eksenel yüke tabi tutulan beş adet kare ve dairesel kesitli BDÇT kolonun davranışını incelemişler. Bu çalışma neticesinde, yük seviyesinin BDÇT kolonların yangın direncini etkileyen önemli bir faktör olduğu bildirilmiştir. Çalışma sırasında yük seviyesi 0.3'ten 0.6'ya yükseltilmesiyle, yangın direncinin yaklaşık %70-75 oranında azaldığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, Wang ve Young (2013), bir çalışmada çeliğin mukavemetinin BDÇT kolonların yangın direnci üzerine etkisini incelemişler. Şekil 11'de gösterildiği gibi yük seviyesi arttıkça kolonların yangın direncinin azaldığı bildirilmiştir. Aynı boyutlara ve malzemelere sahip, beton dayanımı 30 MPa olan iki kolonun (kolon A) yük seviyesi 0.3'ten 0.5'e yükseltildiğinde yangın direncinin 151 dakikadan 54 dakikaya düştüğü rapor edilmiştir. Aynı şekilde aynı boyutlara ve malzemelere sahip, beton dayanımı 50 MPa olan kolonun (kolon B) yük seviyesi 0.3'ten 0.5'e yükseltildiğinde yangın direncinin 227 dakikadan 128 dakikaya düştüğü belirtilmiştir. Lu vd. (2009), standart yangına maruz kalan, yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen beton dolgu çelik tüp kolonların davranışına ilişkin bir araştırma gerçekleştirmişler. Bu çalışma kapsamındaki aynı kesit boyutuna sahip iki kolona ait sonuçlar incelendiğinde yük seviyesi 0.17'den 0.44'e yükseltildiğinde yangın direncinin 90 dakika civarından 26 dakikaya düştüğü görülmektedir. BDÇT kolonlarının yangın direncini etkileyen en önemli faktörlerden birinin yük seviyesi olduğu ve yangın direncinin genellikle yük seviyesinin artmasıyla azaldığı bildirilmektedir.



Şekil 11. Yük Oranının Yangın Direncine Etkisi (Wang ve Young, 2013)

Eksantriklik

Yalın BDÇT kolonların yangın direnci üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, bu kolonların eksantrik yüklemeye oldukça etkilendiği görülmektedir. Diğer tüm parametreler aynı iken, yüklemeye oluşan veya artan eksantrikite ile birlikte yangın direncinde büyük azalmalar meydana gelmektedir (Espinosa vd., 2015; Moliner vd., 2013). Lie ve Chabot (1992), kare ve dairesel kesitli yalın BDÇT kolonların yangın direncini belirlemek için yaptıkları deneysel çalışmada incelenen parametrelerden biri de yüklemeye eksantrikite. Çalışma kapsamında, bir BDÇT kolon numunesine eksantrik yük uygulanmış ve eksantrik yüklemenin, BDÇT kolonların yangın direncini önemli bir seviyede etkilediği sonucuna varılmıştır. Eksenel yük uygulanması durumunda elde edilen 73 dakikalık yangın direncinin, yükün eksantrik olması durumunda 33 dakikaya düştüğü bildirilmiştir. Öte taraftan, Lu vd. (2009), standart yangına maruz kalan yüksek dayanımlı kendiliğinden yerleşen beton dolgu çelik tüp kolonların davranışına ilişkin yaptıkları bir araştırma sonucunda, Lie ve Chabot (1992) ile ters düşen bir tespitte bulunmuşlar. Eksantrikliğin BDÇT kolonların yangın direnci üzerinde etkisinin çok az olduğunu bildirmişler. Kodur ve Lie (1995) ise, çelik lifli BDÇT kolonların yangın direncini inceledikleri bir çalışmada eksenel yüke maruz bırakılan 5 ve eksantrik yüklü 1 adet BDÇT kolonu test etmişler. Çalışma sonucunda eksenel yüke maruz bırakılan beş BDÇT kolonun kırılma modunun basınç kırılması olduğu, eksantrik yüklü BDÇT kolonun ise burkulma kırılması modunda kırıldığı rapor edilmiştir. Benzer şekilde, Ukanwa vd. (2017), eksantrik yüklü, kare BDÇT kolonların yangın direnci üzerine yaptığı çalışmada eksantriklik seviyesinin artmasıyla yangın direnci süresinin azaldığı sonucu rapor edilmiştir.

BDÇT KOLONLARIN YANGIN DİRENCİNİ ÖNGÖRMK İÇİN KULLANILAN STANDARTLAR

BDÇT kolonların yangın direncini öngören tasarım yaklaşımları için literatürde birtakım çalışmalar mevcuttur (Aribert vd., 2008; Wang & Orton, 2008; Kodur, 2007; Lennon vd., 2007; CEN, 2005). Bu yaklaşımlardan en çok kullanılanlar ise Eurocode 4 (CEN 2005) tarafından önerilen ve Kodur (2007) tarafından geliştirilen tasarım yaklaşımlarıdır (Rush vd., 2012).

Eurocode 4 (EC4), kompozit kolonların tasarımı için en çok dikkate alınan uluslararası standarttır (Espinosa vd., 2012). Bu standart, kompozit kolonların yangın direnci tasarımı için tablolatırılmış yöntem, basit hesaplama modelleri ve gelişmiş hesaplama modelleri olmak üzere üç alternatif yaklaşım sunmaktadır (Ukanwa vd., 2017). Tablolatırılmış yöntem, belirli bir yük seviyesi altında yangın direncini belirlemek için minimum kesit boyutu ve donatı oranı bilgisini içeren bir yöntemdir (Ribeiro vd., 2008). Bu yöntem EC4 (2005) yöntemleri arasında en basit yöntemdir. Ancak bu yöntemin uygulanabilirliği oldukça kısıtlıdır (Rush vd., 2012). İkinci yaklaşım, en yaygın olanıdır ve kompozit kolonların yangın direncini hesaplamak için elastik burkulma teorisine dayalı bir yöntem sunmaktadır. Korunmasız beton dolgu içi boş kolonlar için özel bir yöntem de aynı yönetmeliğin H ekinde verilmektedir (Espinosa vd., 2012). H ekinin karmaşıklığı ve narin kolonlar için güvenli olmayan sonuçlar verdiği birçok çalışmada kanıtlandığından, beton dolgu içi boş kolonlar için de tüm kompozit kolonları içeren ikinci yaklaşımın ilkelerini takip etmek araştırmacılar tarafından daha çok tercih edilen bir yol olmuştur (Leskela, 2009;

Aribert vd., 2008; Wang & Orton, 2008; Wang, 2000; Wang, 1997). Üçüncü yöntem elemanın gerçekçi yangın davranışını simüle edebilen sonlu elemanlar yöntemine dayanır. Bu yöntem kolonun davranışının daha doğru bir şekilde tahmin edilmesini sağlar ancak genellikle uygulayıcıların erişiminin dışındadır. Bu nedenle yalnızca çok özel tasarım durumlarına uygulanır (Espinos vd., 2012; Rush vd., 2012).

Öte taraftan, Kodur (2007) kare ve dairesel kesitli BDÇT kolonların yangın direncini etkileyen ana parametreleri içeren tek bir tasarım denklemi sunmuştur. Bu denklemde BDÇT kolonların yangın direnci; betonun basınç dayanımı, kolonun etkin boyu, kolonun çapı (veya eni), uygulanan yük ve bir katsayıya bağlı bir formül ile ifade edilmiştir. Bu yöntem kolonun şekli, dolgu tipi, kolondaki donatı oranına ve agrega tipi gibi parametrelere göre BDÇT kolonların yangın direncini doğrudan hesaplar (Rush vd., 2012).

Romero vd. (2011), normal ve yüksek dayanımlı beton kullanılarak hazırlanan BDÇT kolonlar üzerinde yangın direnci deneyleri gerçekleştirmişler. Bu amaçla beton dayanımı 30 MPa ve 80 MPa olan kolonlar test edilmiştir. Çalışma sonuçları EC4'te (2005) önerilen yöntemle belirlenen yangın dirençleri ile kıyaslanmış ancak EC4 (2005) hesaplama modelinin uygulama alanının C20/25 ve C50/60 sınıfı betonlar arasında sınırlı olduğu, bu nedenle çalışmadaki yüksek dayanımlı beton numunelerin modelin uygulama alanı dışında kaldığı belirtilmiştir. EC4 (2005) tasarım modelinde bazı eksiklikler olduğu, tüm kompozit kolonları içeren ikinci yaklaşımın genel ilkelerin takip edilmesinin daha uygun olduğu bildirilmiştir. Bununla birlikte, ısıl gerilmelerin etkisini hesaba katan indirgeme katsayılarının da EC4'te (2005) verilmediği belirtilmektedir.

Han vd. (2013) standart yangın testi koşulları altında eksenel yüke tabi tutulan beş dairesel ve kare kesitli BDÇT kolonun davranışını incelemiş olup çalışma kapsamında, BDÇT kolonların üretiminde paslanmaz çelik kullanmış ve sonuçları üç farklı yangın direnci tasarım yaklaşımı ile kıyaslamışlar. EC4'te test edilen bir numune için tahmin edilen yangın direnci değerlerinin yer almadığı, bir numunenin de kesit boyutlarının bu standartta karşılığının olmadığı belirtilmiştir. Çalışma sonucunda yangın dirençlerinin kıyaslandığı üç yaklaşımdan da daha yüksek sonuçlar elde edildiği rapor edilmiştir. Bir numunenin yangın direnci, EC4 (2005) tarafından önerilen ve Kodur (2007) tarafından geliştirilen modellere göre 75 dakika olarak tahmin edilirken deney sonucunda 148 dakika olarak tespit edilmiştir.

SONUÇ

BDÇT kolonların yangın direncinin tahmin edilmesi birçok parametreye dayanan karmaşık bir olaydır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde malzeme ve boyut özelliklerinin BDÇT kolonların yangın direnci üzerinde etkili olduğu açıkça görülmektedir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde, BDÇT kolonların yangın direnci üzerinde en etkili parametrelerden birinin dolgu tipi olduğu anlaşılmıştır. Kesit türünün etkisine bakıldığında ise en yüksek yangın direncinin sırasıyla dairesel kesitli, eliptik kesitli, kare kesitli ve dikdörtgen kesitli kolonlarda elde edildiği sonucuna varılmıştır. Kesit alanının büyümesi (çapı veya eninin artması) ile yangın direncinde olumlu gelişmeler görülmüştür. Kesit alanının ve beton dayanımının BDÇT kolonların yangın direnci üzerinde çelik dayanımına kıyasla önemli ölçüde etkisi olduğu anlaşılmıştır. Çelik dayanımı arttıkça BDÇT kolonların yangın direncinin azaldığı gözlemlenmiştir. Beton dayanımının etkisi üzerine ise farklı sonuçlar elde edilmiş olup, bazı çalışmalarda beton dayanımının artmasıyla yangın direncinin arttığı, bazılarında ise azaldığı rapor edilmiştir. Çelik tüp kalınlığının önemli bir etkisinin olmadığı sonucuna varılmıştır. Çalışmalar incelendiğinde karbonatlı agrega içeren kolonun silikalı agrega içeren kolonun yangın direncinden biraz daha yüksek olduğu anlaşılmıştır. Yük seviyesinin ise BDÇT kolonların yangın direnci üzerinde ters orantılı şekilde oldukça etkili bir parametre olduğu çalışmalar sonucunda gözlemlenmiştir. Eksantrik yüklemenin etkisine bakıldığında da benzer şekilde yüklemeye oluşan veya artan eksantrite ile birlikte yangın direncinde büyük azalmalar meydana geldiği anlaşılmıştır.

Bu parametrelerin etkileri ve etki derecelerinin bilinmesi BDÇT kolonların yangın direncini tahmin eden tasarım modelleri geliştirmek için gereklidir. Uygun şekilde doğrulanmış bir model, çeşitli kolon parametreleri üzerinde parametrik çalışmalar yapılmasını ve çok sayıda numuneyi test etmeye gerek kalmadan kolon tasarımı için basit analitik formüller ve prosedürler geliştirilmesini kolaylaştırır. BDÇT kolonlar gibi yapı elemanlarının, modern yapının yük taşıma sistemini oluşturması ve yangın dirençleri hakkında bilgi birikiminin henüz yeterli olmaması nedeniyle doğruluğu yüksek tasarım modellerinin geliştirilmesi önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Alhatmey, I. A. H. (2020). Residual Strength Capacity of Fire-Exposed Concrete Filled Steel Tube Columns. Doctoral Thesis. Gaziantep University, Institute of Natural and Applied Science, Gaziantep.
- Aribert, J.M., Renaud, C., & Zhao, B. (2008). Simplified Fire Design for Composite Hollow-Section Columns. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings. (161(6), pp. 325-336).
- CEN (2005). BS EN 1994-1-2, Eurocode 4 Design of Composite Steel and Concrete Structures Part 1-2: General Rules-Structural Fire Design. Brussels, Belgium.
- Chung, K., Park, S., & Choi, S. (2008). Material Effect for Predicting the Fire Resistance of Concrete-Filled Square Steel Tube Column Under Constant Axial Load. *Journal of Constructional Steel Research*, 64 (12), 1505–1515. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2008.01.002>
- Dai, X. H., & Lam, D. (2012). Shape Effect on the Behaviour of Axially Loaded Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns at Elevated Temperature. *Journal of Constructional Steel Research*, 73, 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.02.002>
- Ekmekyapar, T., & Alhatmey, I. A. H. (2019). Post-Fire Resistance of Internally Ring Stiffened High Performance Concrete Filled Steel Tube Columns. *Engineering Structures*, 183, 375-388. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.024>
- Espinos, A., Romero, M. L., Serra, E., Hospitaler, A. (2015). Circular and Square Slender Concrete-Filled Tubular Columns Under Large Eccentricities and Fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 110, 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.011>
- Espinos, A., Romero, M. L., & Hospitaler, A. (2012). Simple Calculation Model for Evaluating the Fire Resistance of Unreinforced Concrete Filled Tubular Columns. *Engineering Structures*, 42, 231-244. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.04.022>
- Etlı, S. (2021). Analytical Evaluation of Behavior of Composite Columns Under Axial Load. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 7(3), 526-536. <https://doi.org/10.29132/ijpas.991166>
- Etlı, S., & Güneyisi, E. M. (2022a). Effect of Using Eccentric Braces with Different Link Lengths on the Seismic Demand of CFST Column-Composite Beam Frames Subjected to Near-Field and Far-Field Earthquakes. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00994-8>
- Etlı, S., & Güneyisi, E. M. (2022b). Effect of nonlinear modeling approaches used for composite elements on seismic behavior of composite framed buildings. *Sadhana*, 47, 91. <https://doi.org/10.1007/s12046-022-01871-w>
- Güneyisi, E. M., Gültekin, A., & Mermerdaş, K. (2016). Ultimate Capacity Prediction of Axially Loaded CFST Short Columns. *International Journal of Steel Structures*, 16 (1), 99-114. <https://doi.org/10.1007/s13296-016-3009-9>
- Han, L. H., Chen, F., Liao, F. Y., Tao, Z., & Uy, B. (2013). Fire Performance of Concrete Filled Stainless Steel Tubular Columns. *Engineering Structures*, 56, 165-181. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.05.005>
- ISO 834 (1975). Fire-Resistance Tests-Elements of Building Construction, International Standard ISO 834, Geneva.
- İpek, S., Güneyisi, E. M., Mermerdaş, K., & Algin, Z. (2021). Optimization and Modeling of Axial Strength of Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular Columns Using Response Surface and Neural-Network Methods. *Journal of Building Engineering*, 43, 103128. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103128>

İpek, S., & Güneyisi, E. M. (2020). Nonlinear Finite Element Analysis of Double Skin Composite Columns Subjected to Axial Loading. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20 (1), 1-25. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-0012-x>

İpek, S., & Güneyisi, E. M. (2019). Ultimate Axial Strength of Concrete-Filled Double Skin Steel Tubular Column Sections. *Advances in Civil Engineering*, 219 (11), 1-19. 6493037. <https://doi.org/10.1155/2019/6493037>

Kalemi, B. (2016). Numerical Modeling and Assessment of Circular Concrete-Filled Steel Tubular Members. Master in Science Thesis, Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia.

Kodur, V. K. R. (2007). Guidelines for Fire Resistant Design of Concrete-Filled Steel HSS Columns - State-of-the-Art and Research Needs. *Steel Structures*, 7, 173-182.

Kodur, V. K. R. (1999). Performance-Based Fire Resistance Design of Concrete-Filled Steel Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 51 (1), 21-36. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00003-6)

Kodur, V. K. R. (1998). Design Equations for Evaluating Fire Resistance of SFRC-Filled HSS Columns. *Journal of Structural Engineering*, 124 (6), 671-677. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1998\)124:6\(671\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:6(671))

Kodur, V. K. R., & Lie, T. T. (1995). Experimental Studies on the Fire Resistance of Circular Hollow Steel Columns Filled with Steel-Fibre-Reinforced Concrete (Internal Report No. 691). Canada: NRC-IRC.

Lennon, T., Moore, D.B., Wang, Y.C. & Bailey, C.G. (2007). Designers' Guides to the Eurocodes. London: Thomas Telford Publishing.

Leskela, M. V. (2009). Inconsistencies in the Fire Design Rules of Composite Columns to EN 1994-1-2. Steel Concrete Composite and Hybrid Structures, 489-494. Leeds, England.

Lie, T. T., & Chabot, M. (1992). Experimental Studies on the Fire Resistance of Hollow Steel Columns Filled with Plain Concrete (Internal Report No. 611). Canada: NRC-IRC.

Lie, T. T., & Caron, S. E. (1988). Fire Resistance of Circular Hollow Steel Columns Filled with Siliceous Aggregate Concrete. (Test Results, Internal Report No. 570). Canada: NRC-IRC.

Lu, H., Zhao, X. L., & Han, L. H. (2009). Fire Behaviour of High Strength Self-Consolidating Concrete Filled Steel Tubular Stub Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 65, 1995-2010. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2009.06.013>

Mao, W. J., Wang, W. D., & Xian, W. (2020). Numerical Analysis on Fire Performance of Steel-Reinforced Concrete-Filled Steel Tubular Columns with Square Cross-Section. *Structures*, 28, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.08.043>

Moliner, V., Espinos, A., Romero, M.L., & Hospitaler, A. (2013). Fire Behavior of Eccentrically Loaded Slender High Strength Concrete-Filled Tubular Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 83, 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.01.011>

Ribeiro, J. C. L., Fakury R. H., & de Las Casas, E. B. (2008). Eurocode Structural Fire Design and its Application for Composite Circular Hollow Section Columns. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, 30 (1), 39-46. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782008000100006>

Rodrigues, J. P. C., & Laim, L. (2017). Fire Resistance of Restrained Composite Columns Made of Concrete Filled Hollow Sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 65-76. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.02.011>

- Romero, M. L., Moliner, V., Espinos, A., Ibanez, C., Hospitaler, A. (2011). Fire Behavior of Axially Loaded Slender High Strength Concrete-Filled Tubular Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 67, 1953-1965. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.06.012>
- Rush, D., Bisby, L., Jowsey, A., Melandinos, A., & Lane, B. (2012). Structural Performance of Unprotected Concrete-Filled Steel Hollow Sections in Fire: A Review and Meta-Analysis of Available Test Data. *Steel and Composite Structures*, 12 (4), 325–350. <https://doi.org/10.12989/scs.2012.12.4.325>
- Sancioğlu, S., İlgin, A., Çarbaş, S., & Akın, K. (2019). Beton Dolgulu Çelik Kirişlerin Eğilme Etkisinin Analitik Olarak İncelenmesi. 8. Uluslararası Çelik Yapılar Sempozyumu (pp. 416-421).
- Sancioğlu, S. (2020). Beton Dolgulu Çelik Kirişlerin Eğilme Etkisinin Deneysel ve Analitik Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. KTO Karatay Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.
- Tao, Z. Ghannam, M., Song, T.Y., & Han, L. H. (2016). Experimental and Numerical Investigation of Concrete-Filled Stainless Steel Columns Exposed to Fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 118, 120–134. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.11.003>
- Tondini, N., Hoang, V.L., Demonceau, J.F., & Franssen, J. M. (2013). Experimental and Numerical Investigation of High-Strength Steel Circular Columns Subjected to Fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 80, 57–81. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2012.09.001>
- Ukanwa, K. U., Lim, J. B. P., Sharma, U. K., Hicks, S. J., Abu, A., & Clifton, G. C. (2017). Behaviour of Continuous Concrete Filled Steel Tubular Columns Loaded Eccentrically in Fire. *Journal of Constructional Steel Research*, 139, 280–287. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.09.030>
- Wang J. H., He, J., & Xiao, Y. (2019). Fire Behavior and Performance of Concrete-Filled Steel Tubular Columns: Review and Discussion. *Journal of Constructional Steel Research*, 157, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.02.012>
- Wang K., & Young, B. (2013). Fire Resistance of Concrete-Filled High Strength Steel Tubular Columns. *Thin-Walled Structures*, 71, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.05.005>
- Wang, Y.C., & Orton, A. (2008). Fire Resistant Design of Concrete Filled Tubular Steel Columns. *The Structural Engineer*, 86 (19), 40-45.
- Wang, Y. C. (2000). A Simple Method for Calculating the Fire Resistance of Concrete-Filled CHS Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 54 (3), 365-386. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(99\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(99)00061-9)
- Wang, Y. C. (1997). Some Considerations in the Design of Unprotected Concrete-Filled Steel Tubular Columns Under Fire Conditions. *Journal of Constructional Steel Research*, 44 (3), 203-223. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(97\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(97)00060-6)
- Xiong, M. X., & Liew, J. Y. R. (2021). Fire Resistance of High-Strength Steel Tubes Infilled with Ultra-High-Strength Concrete Under Compression. *Journal of Constructional Steel Research*, 176, 106410. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2020.106410>
- Yao, Y., Li, H., Guo, H., & Tan, K. (2016). Fire Resistance of Eccentrically Loaded Slender Concrete Filled Steel Tubular Columns. *Thin-Walled Structures*, 106, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.04.025>
- Yin, J., Zha, X. X., & Li, L.Y. (2006). Fire Resistance of Axially Loaded Concrete Filled Steel Tube Columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 62, 723–729. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2005.11.011>