

YANGINDA ELİPS ENKESİTLİ EKSENEL YÜK TAŞIYAN ÇELİK KOLONLARIN DAVRANIŞI

*Emre ÖZYURT**

Alınma: 11.05.2017; düzeltme: 16.11.2017; kabul: 13.03.2018

Öz: Bu makale, elips enkesitli içi boş profillerden oluşmuş kolonların yüksek sıcaklıktaki davranışlarını anlamak için sayısal bir çalışmanın sonuçlarını sunmaktadır. Doğrusal olmayan sonlu elemanlar yazılımı olan ABAQUS v6.14-1 kullanılarak, narinliğin, sıcaklıktan dolayı gerçekleşen eksenel zorlanma oranının ve başlangıçta uygulanan eksenel yük seviyesinin yüksek sıcaklıklarda EHS çelik kolonların yangın dayanımına etkilerini araştırmak için çok sayıda sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Düzgün sıcaklık dağılımı varsayılmıştır. Sonlu eleman simülasyon sonuçları, mevcut tasarım yönteminin güvenli olup olmadığını kontrol etmek için Eurocode EN 1993-1-1 ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları yönetmeliklerindeki denklemler kullanılarak hesaplanan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Eksenel olarak sıkıştırılmış EHS çelik kolonların kritik sıcaklıklarının hesaplanması için mevcut yöntemin güvensiz olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, yeni bir basit tasarım yöntemi tanıtıldı.

Anahtar Kelimeler: Elips Enkesitli içi boş profiller (EHS), Yüksek sıcaklıklar, Oda sıcaklığı, Sonlu elemanlar, Yangın dayanımı.

The Behaviour of Steel Elliptical Hollow Section Columns Subjected to Axial Load In Fire

Abstract: This paper presents the results of a numerical study to understand the behavior of Elliptical Hollow Section (EHS) columns at elevated temperatures. A large number of numerical studies have been carried out using the non-linear finite element software ABAQUS v6.14-1 to investigate the influence of slenderness, axial restraint stiffness ratio due to temperature and initial applied load level on the fire resistance of EHS steel columns at high temperatures. The uniform temperature distribution is assumed. The Finite Element simulation results have been compared with the calculation results using the Eurocode EN 1993-1-1 and Turkish design guide equations in order to check whether the current design method is safe or not. It has been found that the current method for calculating critical temperatures of axially restrained EHS steel column is unsafe. Therefore, a new simple design method has been introduced.

Keywords: Elliptical Hollow Section (EHS), Elevated temperature, Ambient temperature, Finite Element, Fire resistance.

1. GİRİŞ

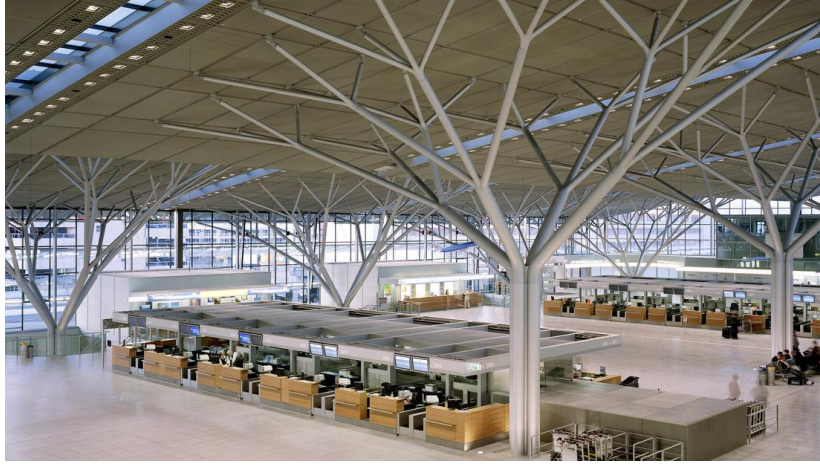
Elips enkesitli profiller (EHS), estetik, narin görünüm ve yüksek dayanım gibi olumlu özelliklerinden dolayı son yıllarda çelik yapı tasarımında kullanılmaya başlanmıştır. EHS profillerin popüler olmasını sağlayan nedenlerin başında, dış cepheye bakan narin görünüşleriyle birlikte kuvvetli eksenli doğrultusunda sağlamış oldukları yüksek dayanımlarıdır. Bu özelliklerinin dışında, içi boş profiller ile dizayn edilen yapılar, yüzey alanları açık profillerle üretilmiş yapılara göre daha küçük olacağı için korozyona veya yangına karşı koruma nedeniyle kullanılan malzemelerde tasarruf sağlamaktadır. Bahsedilen bu tür avantajlarından

* Emre ÖZYURT, Gümüşhane Üniversitesi, Müh. ve Doğa Bil. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, 29100, Gümüşhane
İletişim Yazarı: Emre ÖZYURT (emre.ozyurt@gumushane.edu.tr)

ötürü; köprüler, havaalanları, stadyumlar, sergi salonları gibi yapıların inşasında EHS profiller kullanılmaktadır (Şekil 1).

Yerel bina yangınlarında, ısıtılmış bir kolonun termal genişmesi, kolonu çevreleyen soğuk yapısal elemanlar tarafından ısıtılan kolonun birleşim yerlerinde eksenel hareketi sınırlandırılacaktır. Eksenel hareketi sınırlanan (eksenel zorlanmalara maruz kalmış) kolonun yangındaki davranışı, eksenel hareketi sınırlanmamış (eksenel zorlanmalara maruz kalmamış) kolonun davranışından farklıdır. Yüksek sıcaklıklarda eksenel olarak zorlanan kolonda, başlangıçta kolona uygulanan eksenel basınç kuvveti termal genişleme nedeniyle artar. Termal genişmeden dolayı oluşan eksenel basınç kuvveti ve başlangıçta kolona uygulanan eksenel basınç kuvvetinin toplamı yeterince yüksek olduğunda kolon çöker.

Bu makalede; EHS çelik profillerden yapılmış eksenel yük altındaki kolonların yangın durumunda sayısal analizler ile davranışlarının açıklanması amaçlanmıştır. Bunun için, doğrusal olmayan sonlu elemanlar yazılımı kullanılarak, yüksek sıcaklıklarda eksenel yük taşıyan EHS çelik kolonlar çeşitli parametreleri göz önüne alarak çok sayıda modellemeler yapılmıştır. Bu parametreler; narinlik, başlangıçta uygulanan yük seviyesi ve sıcaklıktan dolayı gerçekleşen eksenel zorlanma oranıdır.



Şekil 1:
Stuttgart havaalanı, Almanya

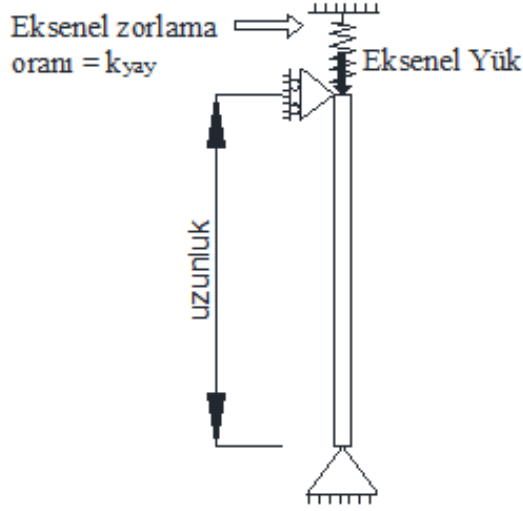
Wang ve Moore (1994a; 1994b), yüksek sıcaklığa maruz kalmış çelik kolonlarda eksenel zorlanmalardan ötürü oluşacak ekstra eksenel yükleri hesaplamak için bir yöntem geliştirmişlerdir. Şekil 2 de eksenel zorlanmaların modellenmesi gösterilmiştir. Ancak, çalışmalarında elips enkesitli profiller dikkate alınmamıştır.

Ali vd. (1998), çelik kolonlarda, narinliğin, kolona uygulanan başlangıç yük seviyesinin ve eksenel zorlanma oranının kritik sıcaklığa olan etkilerini araştırmak için 37 test yapmışlardır. Test sonuçlarına göre, eksenel zorlanmalardan ötürü genişleyen kolonlar, ilave yüklere maruz kaldıkları için başlangıçta öngörülen kritik sıcaklık değerlerini düşürmektedir.

Franssen (2000), SAFİR yazılımını kullanarak, sayısal analizler ile sıcaktan dolayı gerçekleşen eksenel zorlanmalara maruz kalmış çelik kolonların yüksek sıcaklıklardaki davranışlarını incelemiştir. Şekil 3, eksenel zorlanmalara maruz kalmış tipik bir çelik kolonun yüksek sıcaklıklardaki davranışını göstermektedir. Franssen, çalışmalarının sonucunda, kritik sıcaklığın kolonun burkulduğu zaman ($T_{burkulma}$) olarak değerlendirmeyip, burkulduktan sonra kolona uygulanan başlangıç yük seviyesine gelinceye kadar olan sürenin ($T_{göçme}$) dikkate alınması gerektiğini savunmuştur.

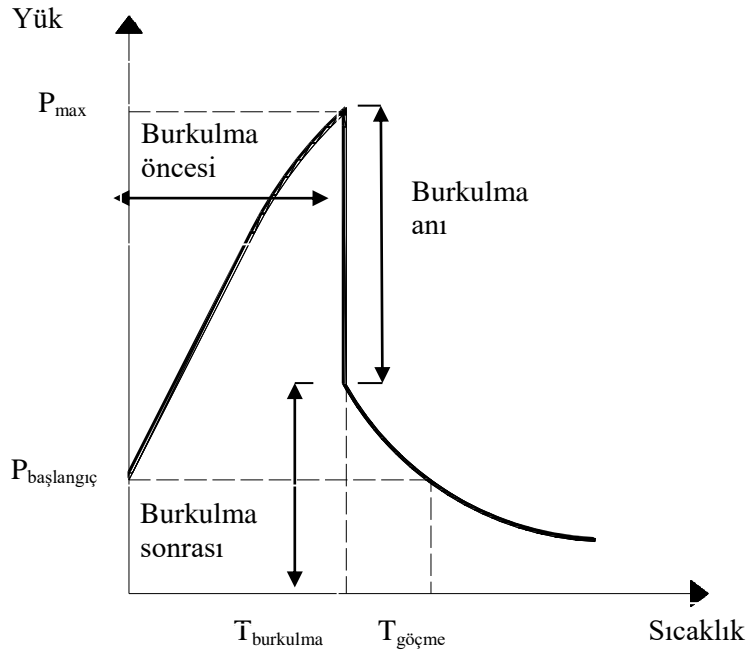
Wang (2004), farklı eksenel zorlanmalara maruz kalmış çelik kolonlarda, burkulma öncesi, anı ve sonrasındaki davranışlarını incelemek için kompleks bir analitik yöntem geliştirmiştir (Şekil 3). Bu analitik çalışmalar sonucunda, %10'dan daha az eksenel zorlanmalara maruz kalan

kolonlarda burkulmadan hemen sonra dayanım bütünüyle kaybedilmiştir. Bu sonuç gösteriyorki, yüksek sıcaklıklardaki basınç elemanlarının burkulma sonrası davranışları önemsizdir. Çünkü, yapılarda, genellikle sıcaklıktan dolayı gerçekleşen aksel zorlanma oranı %10'dan daha azdır.



Şekil 2:

Çelik kolonlarda aksel zorlamaların modeli (Wang ve Moore, 1994a)



Şekil 3:

Eksenel zorlanmalara maruz kalmış tipik bir çelik kolonun yüksek sıcaklıklardaki davranışı (Wang, 2004)

Çelik kolonların kritik sıcaklıklarının güvenli bir şekilde hesaplamalarının yapılması için regresyon analizi yöntemi kullanılarak basit bir analitik çözüm Wang vd. (Wang, Wang vd., 2010) tarafından geliştirilmiştir. Ancak, dikkate alınan kolonların hepsi H tipi açık

profillerdir. Bu geliştirilen yöntemde, öncelikle, eksenel zorlamalar olmadan mevcut yönetmelik ile hesaplanmış kritik sıcaklıklar (T_0) hesaplanması gerekmektedir. Daha sonra, Wang vd.'nin önerdiği yöntem kullanılarak, eksenel zorlanmalara maruz kalmış kolonların kritik sıcaklıklarındaki düşüş miktarı (ΔT_k) hesaplanabilmektedir. Son olarak, eksenel zorlanmalara maruz kalmış çelik kolonların kritik sıcaklıkları (1) numaralı denklem kullanılarak bulunabilmektedir.

$$T_k = T_0 - \Delta T_k \quad (1)$$

T_k eksenel zorlamaya maruz kalmış kolonun kritik sıcaklığı

T_0 eksenel zorlamaya maruz kalmamış kolonun kritik sıcaklığı

ΔT_k termal genleşmelerden ötürü kolonun kritik sıcaklığındaki düşüş

Termal genleşmelerden ötürü, kolonun kritik sıcaklığındaki düşüş (ΔT_k) için (2) numaralı denklem kullanılır. F_β , F_ρ ve F_λ ifadeleri sırasıyla; sıcaklıktan dolayı gerçekleşen eksenel zorlanmaların, uygulanan eksenel yük seviyesinin ve narinliğin kritik sıcaklıklara etkileridir.

$$\Delta T_k = F_\beta F_\rho F_\lambda \quad (2)$$

$$F_\beta = 7,329 - 7,220e^{-\beta/0,145} \quad (3)$$

$$F_\rho = 3,224 - 2,654\rho + 2,761\rho^2 \quad (4)$$

$$F_\lambda = 25,483 - 0,137\lambda + 0,001\lambda^2 \quad (5)$$

$$\beta = \frac{k}{k_{k,0}} \quad (6)$$

β sıcaklıktan dolayı gerçekleşen eksenel zorlanma oranı

ρ kolona uygulanan eksenel yükün kolonun taşıma gücüne oranı

λ narinlik

k eksenel zorlanmaların eksenel rijitliği

$k_{k,0}$ normal sıcaklıklardaki kolonun eksenel rijitliği ($k_{k,0} = \frac{EA}{l}$)

Literatür araştırmasından görüldüğü üzere, sıcaklık artışıyla birlikte termal genleşmeye çalışan çelik kolonlar, sıcaklıktan dolayı gerçekleşen eksenel zorlanmalar nedeniyle dizayn yüklerine ilave olarak eksenel kuvvetlere maruz kalmıştır. Bu durum, dizayn yüklerine göre hesaplanan kritik sıcaklıkların gerçekçi sonuçlar vermediğini göstermektedir. Ayrıca, kritik sıcaklığa etki eden parametreler (narinlik, kolona uygulanan dizayn yükünün oranı ve sıcaklıktan dolayı gerçekleşen eksenel zorlanma oranını) araştırılmıştır. Ancak, bu çalışmalarda EHS çelik kolonlarının yüksek sıcaklıklarda davranışları üzerine herhangi bir çalışmaya yer verilmemiştir. Çok yeni bir çalışmada, EHS kompozit kolonların yangın durumunda davranışları Rodrigues ve Laím (2017) tarafından testler ile incelenmiştir. Her iki araştırmacının yaptıkları çalışmalar iki adet EHS kompozit kolon ile sınırlı kalmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada, eksenel zorlanmalara maruz kalmış EHS çelik kolonların yüksek sıcaklıklardaki davranışları sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir.

2. SONLU ELEMAN MODELİNİN DOĞRULAMASI

Bu makalede, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak doğrusal olmayan sayısal analizler gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla ABAQUS / Standart v.6.14-1 (ABAQUS, 2014) paket programı

kullanılmıştır. Sayısal analizlerin doğrulanması önemlidir. Burada ifade edilmelidir ki, EHS çelik kolonlara ait herhangi bir çalışma olmadığından dolayı, sonlu eleman modelinin doğrulamasında, normal sıcaklıklarda modellenen sayısal analiz sonuçları ile Eurocode EN-1993-1-1 (CEN, 2005) ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (2016) yönetmeliklerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılacaktır. Doğrulan modelde belirlenen sonlu eleman ağ aralığı, eleman tipi, malzeme özelliği ve doğrusal olmayan analizlerde dikkate alınan zaman adımı gibi parametreler EHS çelik kolonları için gerçekleştirilecek sayısal analizlerde kullanılacaktır.

Yazar, yüksek sıcaklıklara maruz kalan kutu ve boru enkesitli kaynaklı birleşimler üzerine çalışmalar (Ozyurt, Wang vd., 2014; Ozyurt ve Wang, 2015; Ozyurt ve Wang, 2016) yapmış olup, yüksek sıcaklık modellemelerinde dikkate almış olduğu parametreleri bu çalışmada da kullanmıştır.

Bu başlık altında kullanılmış olan EHS kolonların geometrik özellikleri Tablo 1 de özetlenmiştir. Doğrulama için kullanılan elemanların seçiminde, farklı narinliğe sahip dört farklı enkesit kullanılmış ve uzunlukları sabit tutulmuştur.

Tablo 1. Doğrulama için kullanılan EHS kolonların geometrik özellikleri

Eleman Adı	Büyük Çap (mm)	Küçük Çap (mm)	Et Kalınlığı (mm)	Uzunluk (mm)
E150x75x6,3	150	75	6,3	3000
E200x100x10	200	100	10	3000
E250x125x10	250	125	10	3000
E300x150x10	300	150	10	3000

2.1. Malzeme Özellikleri

Bu çalışmada kullanılan EHS çelik kolonların malzeme özellikleri Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (2016) yönetmeliğinden alınmış olup, S355-H çelik sınıfıdır. Akma dayanımı (F_y) ve maksimum çekme dayanımı (F_u) sırasıyla, 355 N/mm^2 ve 510 N/mm^2 dir. Elastisite modülü ise 200 GPa olarak yönetmeliğe uygun olarak seçilmiştir. ABAQUS’de tanımlanacak olan gerilme-birim uzama eğrisi, (7) ve (8) nolu denklemler kullanılarak elde edilen değerler ile dönüştürme işlemi yapılarak girilmesi gereklidir (Boresi ve Schmidt, 2003). Çünkü, bu dönüştürme işlemi olmadan, doğrusal olmayan analizlerin ABAQUS kullanılarak yapılması mümkün olmamaktadır.

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (7)$$

$$\sigma_T = \sigma * (1 + \varepsilon) \quad (8)$$

ε birim uzama oranı

ε_T gerçek birim uzama oranı

σ gerilme

σ_T gerçek gerilme

2.2. Analitik Yöntem

Bu çalışmada, sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar, hem Eurocode EN-1993-1-1 (CEN, 2005) hem de Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (2016) yönetmelikleri ile karşılaştırılmıştır. Türk çelik yönetmeliğine (TS Enstitüsü, 2016) göre karakteristik basınç kuvveti dayanımı (9) numaralı denklem ile hesaplanmaktadır. Avrupa yönetmeliklerinde (CEN, 2005) ise (11) numaralı denklem kullanılmaktadır.

$$P_n = \left[0,658 \frac{F_y}{F_e} \right] F_y A_g \quad (9)$$

$$F_e = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L_c}{i} \right)^2} \quad (10)$$

$$P_n = \chi F_y A_g \quad (11)$$

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \leq 1.0 \quad (12)$$

$$\phi = 0,5[1 + 0,21(\lambda - 0,2) + \lambda^2] \quad (13)$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A_g F_y}{\pi^2 E I} \left(\frac{L_c}{i} \right)^2} \quad (14)$$

F_y akma gerilmesi

F_e elastik burkulma gerilmesi

A_g kayıpsız enkesit alanı

P_n karakteristik basınç kuvveti dayanımı

L_c burkulma boyu

χ burkulma için azaltma faktörü

λ boyutsuz narinlik

ϕ burkulma için azaltma faktörünü belirlemede kullanılan ifade

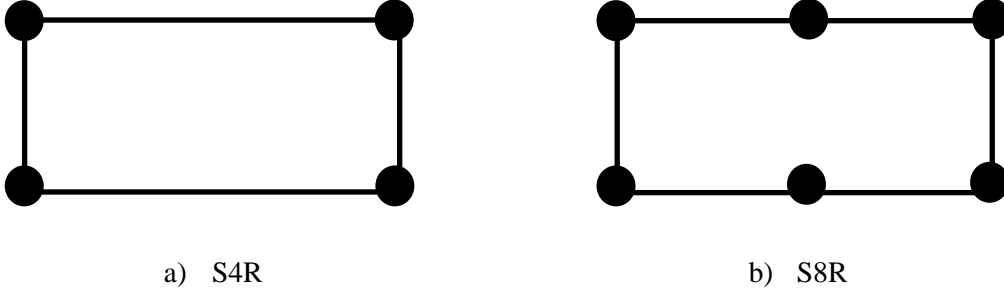
Yüksek sıcaklıklarda ise, çelik kolonun basınç dayanımını hesaplamak için, Eurocode EN-1993-1-2 (CEN, 2005) veya BS 5950 Part 8 (BSI, 2003) yönetmelikleri kullanılabilir. Mevcut yönetmeliklerdeki yöntem, kolona başlangıçta uygulanan yükün, kolonun normal sıcaklıklardaki basınç dayanım oranı ile bağlantılıdır. Ancak, bu durum her zaman doğru olmayabilir. Çünkü, yüksek sıcaklıklarda çelik kolon genişlemek isteyecek ve bu durum eğer kolonun bir ucu serbest değil ise eksenel zorlanmalardan ötürü ek yüklere maruz kalacaktır. Burada ifade edilmelidir ki, yüksek sıcaklıklarda kolon diğer yapısal elemanlar ile etkileşim içerisinde olacağından, mevcut yönetmeliklerdeki method güvenli sonuçlar vermeyebilir. Bu durum, kapsamlı bir şekilde parametrik çalışmalar bölümünde incelenmiştir.

2.3. Eleman Tipi

S8R (8 düğüm noktalı kabuk eleman) ve S4R (4 düğüm noktalı kabuk eleman) eleman tipleri ABAQUS'te mevcuttur. Bu eleman tipleri, ince enkesitli elemanların burkulma davranışlarını incelemek için uygundur (ABAQUS, 2014). S8R ve S4R eleman tipleri, her düğüm noktasında 6 serbestlik derecesine sahiptir. Şekil 4'te gösterilen iki farklı eleman tiplerinin, EHS çelik kolonlarının basınç dayanımına olan etkilerini araştırmak için farklı

geometrik parametrelere sahip EHS kolonları modellenmiştir. Boyları 3 metre ve farklı narınlığa sahip EHS kolonları dikkate alınmıştır.

Sayısal analizlerden elde edilen sonuçlar Eurocode EN-1993-1-1 (CEN, 2005) ve Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (2016) yönetmeliklerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.



Şekil 4:
Sayısal analizlerde kullanılan eleman tipleri (ABAQUS, 2014)

Tablo 2 den görüldüğü üzere, S8R ve S4R eleman tipleri gerçeğe yakın değerler verdiği saptanmıştır. Analiz sürelerinde çok az fark olduğu için parametrik çalışmalarda S8R eleman tipi kullanılmıştır. Ayrıca, iki farklı yönetmeliklerden elde edilen EHS kolonlarının basınç dayanımları arasında çok az fark olduğu görülmektedir.

Tablo 2. Analitik ve sayısal analiz sonuçlarının karşılaştırılması (Birimler kN cinsindedir.)

Kolonların özellikleri	Analitik Yöntem		Sonlu Elemanlar Yöntemi	
	Denklem (9)	Denklem (11)	S4R	S8R
E150x75x6,3	369	358	410	397
E200x100x10	1040	1058	1260	1201
E250x125x10	1542	1594	1780	1714
E300x150x10	2022	2124	2286	2206

2.4. Sayısal Analizlerin Mevcut Yönetmelikler ile Doğrulanması

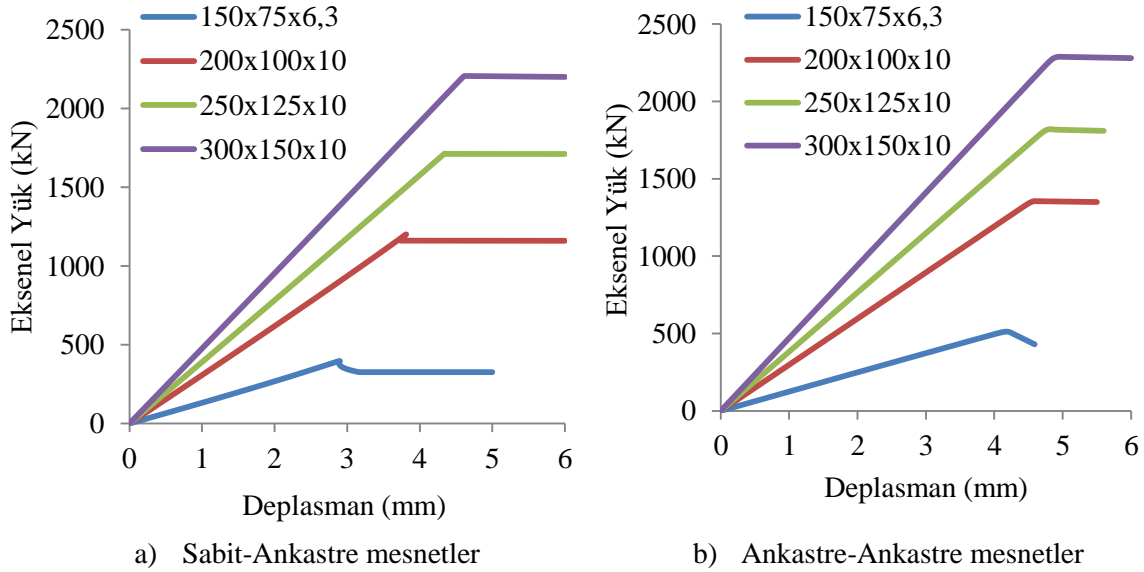
Sayısal analizlerin doğrulanması için S8R (8 düğüm noktalı kabuk eleman) eleman tipi kullanılarak, farklı mesnet koşulları ve geometrik özelliklere sahip EHS çelik kolonları ABAQUS'te modellenmiş ve bulunan sonuçlar, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları (2016) yönetmeliklerinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bir önceki başlıkta belirtildiği gibi, Avrupa ve Türk yönetmelikleri kullanılarak hesaplanan çelik kolonların basınç dayanımları önemsenmeyecek derecede bir fark olduğu için bu başlık altındaki karşılaştırmalarda, Türk yönetmeliği dikkate alınmıştır.

Mevcut yönetmelik ile sayısal analiz sonuçları **Tablo 3'**de gösterilmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen değerler, analitik yöntem ile elde edilenlere göre karşılaştırıldığında, maksimum %13'lük bir fark vardır. Ayrıca, yönetmelik kullanılarak hesap edilen EHS kolonların basınç dayanımı sonlu elemanlar ile elde edilenlerden her zaman daha düşük değerler vermiş olması, mevcut yöntemin oda sıcaklığındaki durumlarda güvenli sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ayrıca, doğrulanması yapılan tüm kolonlar için sayısal analizlerden elde edilen

yük-deplasman eğrileri Şekil 5’de gösterilmiştir. Sonuç olarak, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan EHS çelik kolonlar parametrik çalışmalarda kullanılabilir.

Tablo 3. Mevcut yönetmelik ile sayısal sonuçların karşılaştırılması

Kolonların Özellikleri		Analitik Yöntem (Denklem (9))	Sonlu Elemanlar Yöntemi	Oran (Analitik Yöntem/Sonlu elemanlar Yöntemi)
Ankastre-Sabit Mesnet	150x75x6,3 ($\lambda=97$)	369 kN	397 kN	0,93
	200x100x10 ($\lambda=74$)	1040 kN	1201 kN	0,87
	250x125x10 ($\lambda=58$)	1542 kN	1714 kN	0,90
	300x150x10 ($\lambda=47$)	2022 kN	2206 kN	0,92
Ankastre - Ankastre	150x75x6,3 ($\lambda=79$)	463 kN	512 kN	0,90
	200x100x10 ($\lambda=60$)	1185 kN	1356 kN	0,87
	250x125x10 ($\lambda=48$)	1671 kN	1821 kN	0,92
	300x150x10 ($\lambda=39$)	2136 kN	2289 kN	0,93



Şekil 5:

Doğrulama için kullanılan kolonların yük-deplasman eğrilerinin karşılaştırılması

3. PARAMETRİK ÇALIŞMALAR

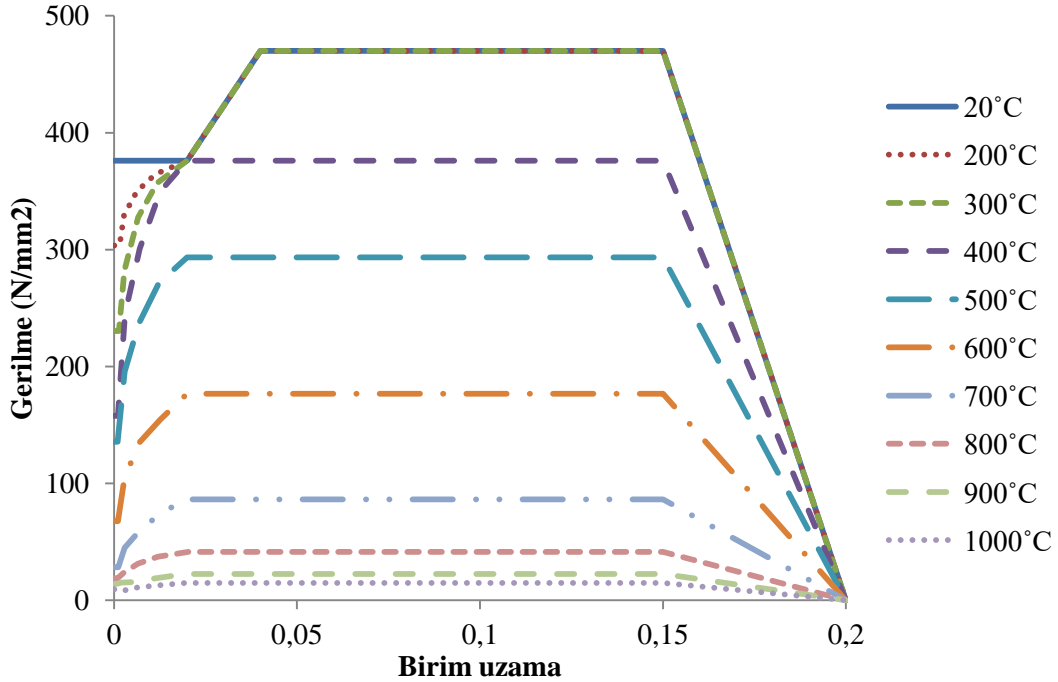
Bir önceki bölümde doğrulanmış sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, farklı parametreler ile eksenel yük altındaki EHS çelik kolonların yüksek sıcaklıklardaki davranışları bu bölümde incelenmiştir. Her bir simülasyon iki analizden oluşmuştur. Birinci analizde, modellenen kolonların burkulma modları belirlenmiştir. İkinci analizde ise, istenilen yük seviyesine ulaşmaya kadar kolonlara kuvvetler uygulanmıştır ve daha sonra sıcaklık artışına maruz

bırakılmıştır. Doğrusal olmayan geometrik ve malzeme özellikleri, sonlu elemanlar modellemelerine dahil edilmiştir. Ayrıca, zaman adımının maksimum ve minimum değerleri sırasıyla 0,1 ve 1E-08 dir. Parametrik çalışmalarda kullanılan malzeme özellikleri, Şekil 6 da gösterildiği gibi Eurocode EN-1993-1-2 (CEN, 2005) yönetmeliğine uygun olarak seçilmiştir. Elastisite modülü ise 200 GPa olarak yönetmeliğe uygun olarak kullanılmıştır.

3.1. Narinliğin Kritik Sıcaklıklara Etkileri

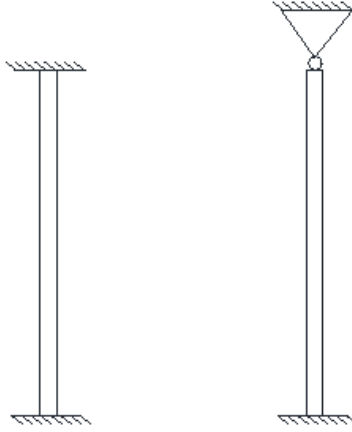
Bu başlık altında, farklı narinliğe sahip EHS çelik kolonların kritik sıcaklıklara olan etkileri incelenmiştir. Kolonlar, %30 kapasitelerine kadar yüklendikten sonra yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Şekil 7’de görüldüğü gibi, iki farklı mesnet koşulları dikkate alınmıştır. Narinliğin, kritik sıcaklıklara etkisini anlamak için, iki farklı sayısal modelleme incelenmiş ve sonuçlar yönetmeliklerde öngörülen kritik sıcaklıklar ile karşılaştırılmıştır. Birinci modellemede, eksenel zorlama olmadığı için yüksek sıcaklıklarda kolona uygulanan yük dışında ek bir yüke maruz kalmayacak şekilde mesnet koşulları seçilmiştir. Bundan dolayı, genişmeden ötürü oluşacak eksenel uzaması serbest bırakılmıştır. İkinci modelde ise, kolonun eksenel rijitliğine bağlı olarak, %2’lik eksenel zorlanma oranı kolon ucuna yerleştirilen bir yay ile sağlanmıştır. Bu durumda, genişleme miktarına bağlı olarak kolon, yüksek sıcaklıklarda ekstra eksenel yüklerle maruz kalmıştır.

Her iki ucu ankastre olarak mesnetlenmiş EHS kolonların kırılma anındaki deformasyonları Şekil 8’de gösterilmiştir. Kolonların kırılma sebepleri burkulma olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, analitik yöntem sonuçlarına göre kritik olan göçme türü ile sayısal analizler sonuçlarına göre de aynı göçme modu olduğu, simülasyon modellerinin doğru olarak oluşturulduğu sonucu çıkarılabilir.



Şekil 6:

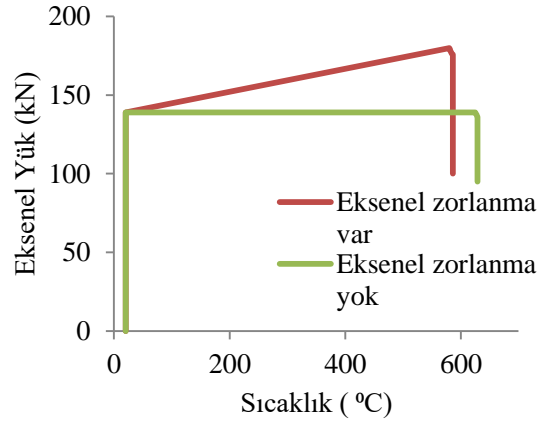
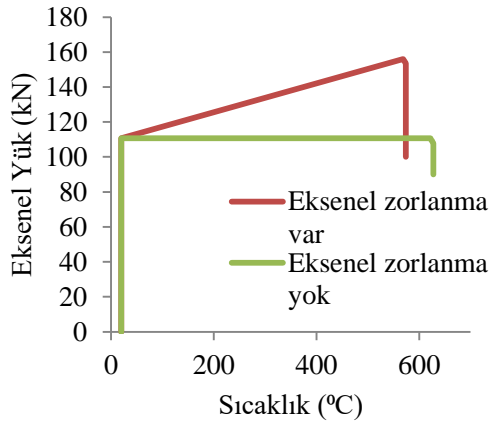
Yüksek sıcaklıklardaki çeliğin gerilme-birim uzama özellikleri (CEN, 2005)



a) Ankastre – Ankastre b) Ankastre – Sabit mesnet

Şekil 7:

Parametrik çalışmalarda incelenen mesnet koşulları



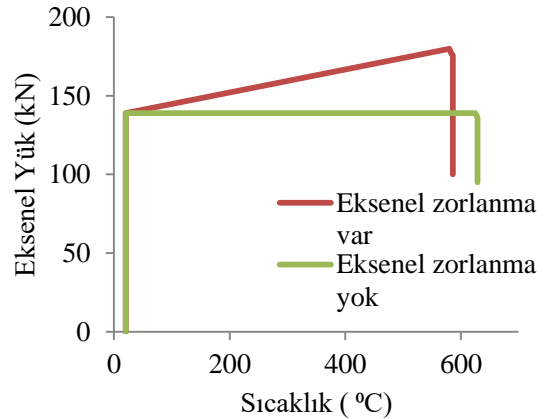
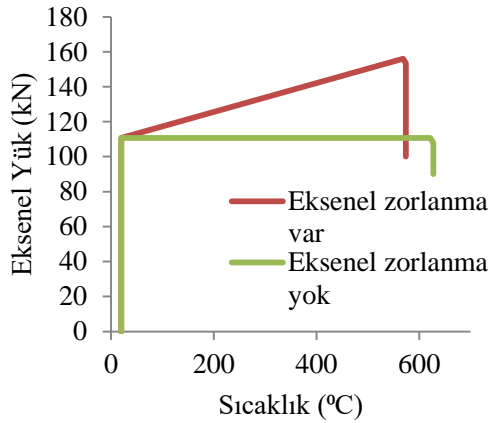
a) 150x75x6,3 (Ankastre-Sabit Mesnet)

b) 150x75x6,3 (Ankastre-Ankastre Mesnet)

Şekil 9:

Yük-sıcaklık eğrilerinin karşılaştırılması

, farklı narinliğe sahip, aksenal zorlanmaya maruz kalmış ve kalmamış kolonların kritik sıcaklıkları sayısal analizlerden elde edilmiş sonuçlar ile yönetmeliklerden elde edilmiş sonuçların karşılaştırılmasını özetlemektedir. Tüm kolonlar %30 başlangıç yük seviyesine kadar yüklenmiştir ve her kolona başlangıçta uygulanan yük miktarı ($P_{başlangıç}$)

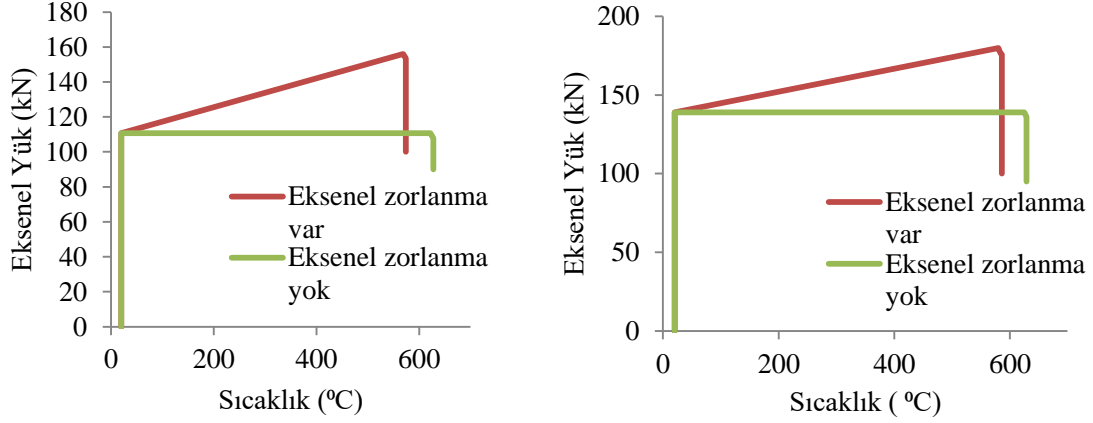


- c) 150x75x6,3 (Ankastre-Sabit Mesnet) d) 150x75x6,3 (Ankastre-Ankastre Mesnet)

Şekil 9:

Yük-sıcaklık eğrilerinin karşılaştırılması

'te gösterilmiştir. Yönetmeliklerin öngördüğü kritik sıcaklıklar, sıcaklıktan dolayı gerçekleşen eksenel zorlanmalardan bağımsızdır. Bu yüzden,



- e) 150x75x6,3 (Ankastre-Sabit Mesnet) f) 150x75x6,3 (Ankastre-Ankastre Mesnet)

Şekil 9:

Yük-sıcaklık eğrilerinin karşılaştırılması

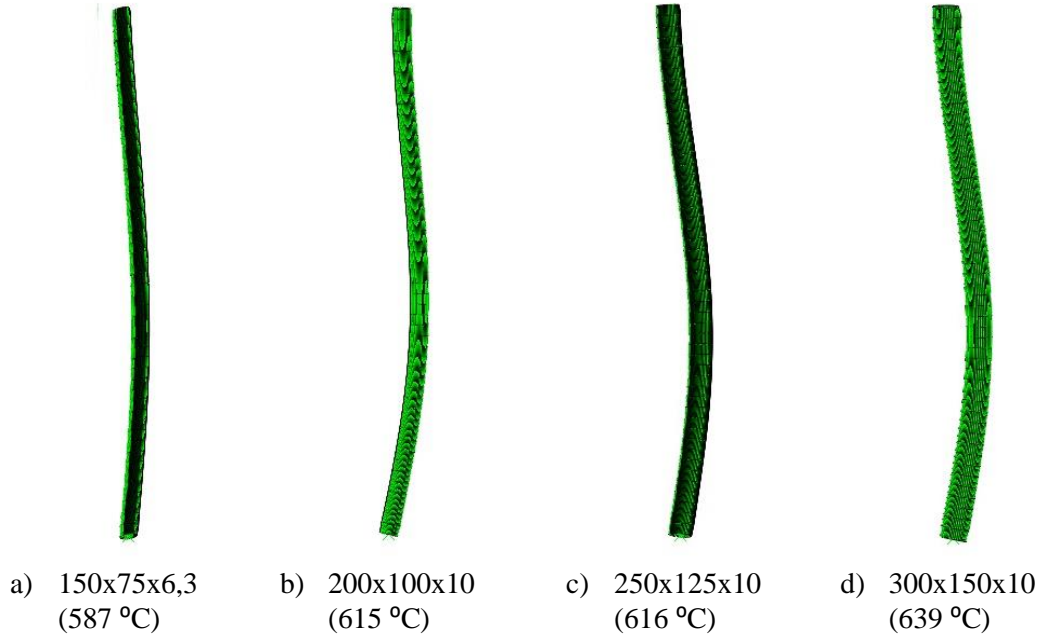
'te verilen analitik değerler hem eksenel zorlanmalara maruz kalmış hem de eksenel zorlanmalara maruz kalmamış kolonlara aittir. Karşılaştırmalardan görüldüğü üzere, eksenel zorlanmalara maruz kalmamış EHS kolonların kritik sıcaklıkları mevcut yönetmelikten elde edilen sonuçlar ile yaklaşıktır. Halbuki, eksenel zorlanmalara altında, EHS kolonların analitik yöntemle göre hesaplanan kritik sıcaklıkların her zaman sayısal analizlerden elde edilen sıcaklıklardan daha yüksek olduğunu göstermektedir. Çünkü, eksenel zorlanmalara maruz kalmış kolonlarda, termal genleşmelerden ötürü iç kuvvetler oluşmaktadır ve başlangıçta uygulanan eksenel yükte artış olmaktadır. Şekil 9, bu artış miktarını 150x75x6,3 kolonun farklı mesnet koşulları altında yük-sıcaklık eğrilerini göstermektedir. Bu başlık altında sadece narinliğin kritik sıcaklıklara olan etkilerini incelemek üzere olduğundan ötürü, kolonlara uygulanan eksenel zorlanmalar düşük (0,02) seviyededir, ve bu fark, en fazla 60 °C olduğu için önemsiz olarak düşünülebilir.

Sonuç olarak, farklı narinliğe sahip EHS kolonlar için yönetmeliklerin güvenli sonuçlar vermektedir. Eksenel zorlamaların kritik sıcaklıklara olan etkileri bir sonraki başlık altında incelenmiştir.

Tablo 4. Farklı narinliğe sahip EHS kolonların kritik sıcaklıklarının karşılaştırılması

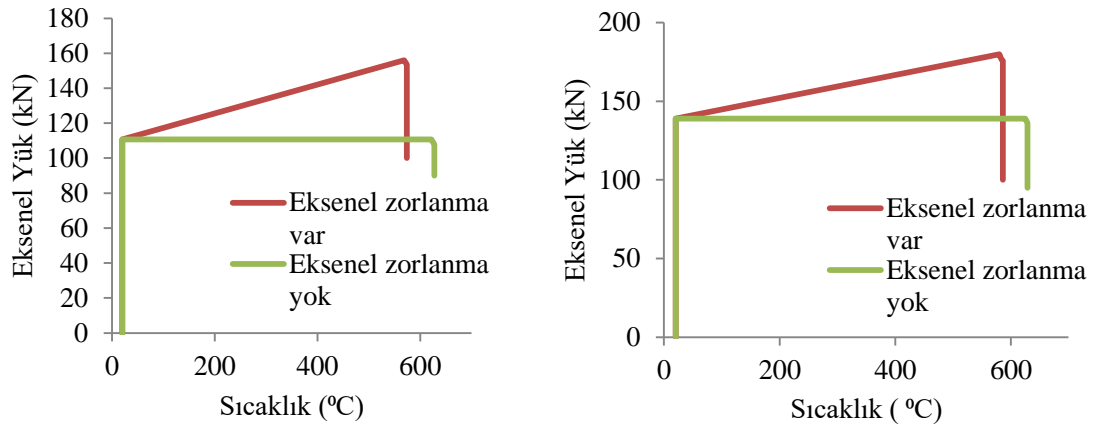
Kolonların Özellikleri		Eksenel zorlanma yok	Eksenel zorlanma var	Analitik Yöntem
Ankastre-Sabit Mesnet	150x75x6,3 ($\lambda=97$, $P_{\text{başlangıç}}=110,7$ kN)	628 °C	574 °C	635 °C
	200x100x10 ($\lambda=74$, $P_{\text{başlangıç}}=312,0$ kN)	621 °C	579 °C	635 °C
	250x125x10 ($\lambda=58$, $P_{\text{başlangıç}}=462,6$ kN)	634 °C	602 °C	655 °C
	300x150x10 ($\lambda=47$, $P_{\text{başlangıç}}=606,6$ kN)	648 °C	623 °C	655 °C

Ankastre - Ankastre	150x75x6,3 ($\lambda=79$, $P_{\text{başlangıç}}=138,9$ kN)	625 °C	587 °C	635 °C
	200x100x10 ($\lambda=60$, $P_{\text{başlangıç}}=355,5$ kN)	641 °C	615 °C	655 °C
	250x125x10 ($\lambda=48$, $P_{\text{başlangıç}}=501,3$ kN)	661 °C	616 °C	655 °C
	300x150x10 ($\lambda=39$, $P_{\text{başlangıç}}=640,8$ kN)	680 °C	639 °C	655 °C



Şekil 8:

Kırılma anında EHS kolonların deformasyonları (Eksenel zorlama oranı=0,02)



Şekil 9:

Yük-sıcaklık eğrilerinin karşılaştırılması

3.2. Eksenel Zorlanmaların Kritik Sıcaklıklara Etkileri

Bu çalışmada dikkat edilen bir diğer parametre ise eksenel zorlanmalardır. Yapılarda genellikle eksenel zorlanma oranları, kolonların eksenel rijitliklerinin % 10'nun altındadır. Sayısal analizlerde kullanılan kolonlara uygulanan eksenel zorlanma oranları şu şekildedir; 0,00, 0,02, 0,03, 0,05, 0,10 ve 0,30. Ayrıca, her bir kolon normal sıcaklıklarda % 30 kapasitelerine kadar kuvvet uygulandıktan sonra yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Kolonlara uygulanan yük miktarı bir önceki bölüm ile aynı değerlere sahiptir. Kritik sıcaklıklara olan etkilerini incelemek için sayısal analiz sonuçları yönetmeliklerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 5'de, farklı geometrik özelliklere ve mesnet koşullarına sahip EHS çelik kolonlarda, eksenel zorlanma oranının kritik sıcaklığa olan etkileri sayısal ve analitik sonuçlar ile özetlenmektedir. Sayısal sonuçlardan görüleceği üzere, kritik sıcaklıklar eksenel zorlanma oranı arttıkça düşmektedir. Çünkü, eksenel zorlanma oranının artması, düşük sıcaklıklarda bile genişlemelerden ötürü kolona sonradan gelecek ekstra eksenel yük değerlerini arttırmaktadır. Bir başka deyişle, yüksek eksenel zorlanmalara maruz kalmış kolonlar, düşük eksenel zorlanmalara maruz kalmış kolonlara göre daha fazla eksenel yük taşımış olmaktadır. Bunun sonucu olarak, kolonun yüksek sıcaklıktaki kapasitesi düşmektedir.

Ancak, yönetmeliklere göre öngörülen kritik sıcaklık eksenel zorlamalardan bağımsızdır. Tablo 5'deki sayısal analiz sonuçlarından görüldüğü üzere, eksenel zorlamalar kritik sıcaklığı 370 °C'ye kadar düşürmektedir. Bu yüzden, mevcut yönetmeliklerdeki yöntem eksenel zorlanmaların eklenmesi gerekmektedir.

Tablo 5. Farklı eksenel zorlanmalara mazruz kalmış EHS kolonların kritik sıcaklıklarının karşılaştırılması

Mesnet Koşulları	Kolonların Özellikleri	Sıcaktan Dolayı Gerçekleşen Eksenel Zorlanma Oranları						
		Analitik Yöntem	Sonlu Elemanlar Yöntemi					
			-	%0	%2	%3	%5	%10
Ankastre-Sabit Mesnet	150x75x6,3	635 °C	628 °C	574 °C	555 °C	504 °C	415 °C	258 °C
	200x100x10	635 °C	621 °C	579 °C	558 °C	499 °C	419 °C	306 °C
	250x125x10	655 °C	634 °C	602 °C	590 °C	555 °C	468 °C	325 °C
	300x150x10	655 °C	648 °C	623 °C	614 °C	560 °C	461 °C	313 °C
Ankastre-Ankastre	150x75x6,3	635 °C	625 °C	587 °C	569 °C	491 °C	413 °C	287 °C
	200x100x10	655 °C	641 °C	615 °C	570 °C	540 °C	491 °C	306 °C
	250x125x10	655 °C	661 °C	616 °C	581 °C	521 °C	471 °C	335 °C
	300x150x10	655 °C	680 °C	639 °C	561 °C	521 °C	450 °C	335 °C

3.3. Eksenel Yük Seviyesinin Kritik Sıcaklıklara Etkileri

Farklı büyüklükte eksenel yükler uygulanmış kolonlardaki kritik sıcaklıkların etkilerini incelemek için eksenel zorlamalara maruz kalmamış farklı geometrik özelliklere sahip EHS kolonlar üzerindeki çalışmalar bu başlık altında özetlenmiştir. Her bir kolonun maksimum yük taşıma kapasitesine göre, dört farklı yük oranı (0,30, 0,50, 0,70 ve 0,90) yüksek sıcaklıklarda

kullanılmıştır. Bölüm 3.1’de, %30 yük seviyesi için hesaplanmış olan yük miktarları, bu çalışmada farklı her bir yük seviyesi için orantılı olarak yeniden hesaplanmıştır. Ayrıca, iki değişik mesnet koşulları incelenmiştir.

Şekil 10, farklı sıcaklıklarda (20 °C, 400 °C ve kritik sıcaklık) ve mesnet koşullarında EHS 250x125x10 kolonlarındaki gerilme dağılımlarını göstermektedir. Her iki mesnet durumu için, Şekil 10’dan görüldüğü üzere, burkulma noktası civarında maksimum gerilmeye erişirken burkulma boyu boyunca ise gerilme yığılımı oluşmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda ise, gerilmeler burkulma bölgesi civarında önemli derecede artmıştır. Kritik sıcaklığa yaklaşıncaya, burkulma noktası civarında plastikleşmeler başlamıştır. Bu durum, incelenen tüm kolonlarda aynı davranışı göstermiştir.

Tablo 6, farklı eksenel yüklemelere maruz bırakılmış EHS kolonlarda kritik sıcaklıkları hem sayısal analiz sonuçlarına göre, hem de analitik sonuçlara göre karşılaştırmaktadır. Sonuçlardan görüldüğü üzere, her bir yük seviyesi için sayısal analizlerden elde edilmiş kritik sıcaklıklar analitik yöntemlerden elde edilmiş olanlar ile çok yakın değerler vermektedir. Bu gösteriyorki, eksenel zorlanmalara maruz kalmamış EHS kolonlarda, yönetmeliklerden elde edilen kritik sıcaklıklar güvenli sonuçlar vermektedir. Ayrıca, eksenel yük seviyesi, kolonun yüksek sıcaklıklardaki taşıma kapasitesini önemli derecede düşürmektedir.

Tablo 6. Farklı eksenel yüklere maruz bırakılmış EHS kolonların kritik sıcaklıklarının karşılaştırılması

Mesnet Koşulları	Kolonların Özellikleri	Analitik Yöntem				Sonlu Elemanlar Yöntemi			
		Eksenel Yük Seviyeleri				Eksenel Yük Seviyeleri			
		%30	%50	%70	%90	%30	%50	%70	%90
Ankastre-Sabit Mesnet	150x75x6,3	635 °C	545 °C	460 °C	-	628 °C	537 °C	440 °C	236 °C
	200x100x10	635 °C	545 °C	460 °C	-	621 °C	553 °C	444 °C	295 °C
	250x125x10	655 °C	580 °C	510 °C	-	634 °C	585 °C	529 °C	289 °C
	300x150x10	655 °C	580 °C	510 °C	-	648 °C	585 °C	527 °C	281 °C
Ankastre-Ankastre	150x75x6,3	635 °C	545 °C	460 °C	-	625 °C	565 °C	429 °C	283 °C
	200x100x10	655 °C	580 °C	510 °C	-	641 °C	573 °C	485 °C	276 °C
	250x125x10	655 °C	580 °C	510 °C	-	661 °C	597 °C	491 °C	283 °C
	300x150x10	655 °C	580 °C	510 °C	-	680 °C	587 °C	496 °C	283 °C

3.4. Eksenel Zorlanmalara Maruz Kalmış Kolonlarda Kritik Sıcaklıkları Hesaplama Yöntemi

Kritik sıcaklıklara etki eden üç önemli parametre (narinlik, eksenel zorlanma oranı ve başlangıçta uygulanan eksenel yükün maksimum taşıma kapasitesine oranı) önceki alt başlıklarda incelenmiştir. Eksenel zorlanmalara maruz kalmış EHS kolonlar için mevcut yönetmeliklere göre hesaplanan kritik sıcaklıklar, sayısal analizlerden elde edilenlerden büyük çıkmıştır. Kritik sıcaklıklara etki eden bu parametrenin mevcut yönetmeliklere eklenmesi gerekmektedir. Narinliğin ve eksenel yük seviyesinin, kritik sıcaklıklara olan etkileri ise

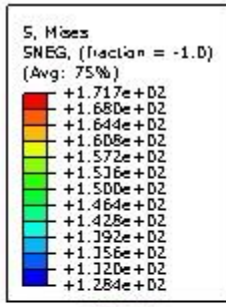
önemsizdir. Bu yüzden, EHS kolonların kritik sıcaklıklarının güvenli bir şekilde hesaplayabilmek için yeni bir yöntem bu başlık altında tanıtılmaktadır.

Wang vd. (Wang, Wang vd., 2010), H tipi açık profillerden oluşmuş, çelik kolonların kritik sıcaklıklarının güvenli bir şekilde hesaplamalarının yapılması için basit bir analitik çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Giriş bölümünde açıklanan bu yöntemin EHS kolonlar için uygulanabilirliği burada incelenmiştir. Tablo 7’de, narinliğin kritik sıcaklıklara olan etkileri için kullanılan EHS kolonlarının kritik sıcaklıkları Wang vd.’nin yöntemi ile karşılaştırmıştır. Daha önce açıklandığı gibi, sayısal analizler ile elde edilmiş kritik sıcaklıklar ile mevcut yöntemden elde edilenler arasında güvenli sayılmayacak derecede farklar vardır. Ancak, önerilen yöntemden bulunmuş kritik sıcaklıklar, sayısal analizlerden elde edilmiş olanlar ile çok yakın ve güvenli sonuçlar vermektedir.

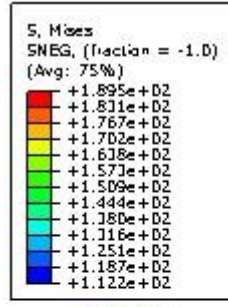
Bu çalışmada dikkate alınan bütün eksenel zorlamalara maruz kalan EHS kolonların kritik sıcaklıkları önerilen yöntem ile hesaplanmış ve mevcut yöntem ile karşılaştırılması Şekil 11’de gösterilmiştir. Şekil 11’den açıkça görüleceği gibi, mevcut yöntem güvenli sonuçlar vermemiştir. Wang vd.’nin H tipi açık profillerden üretilmiş çelik kolonlar için önerdiği yöntem, EHS kolonları için de güvenli sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Tablo 7. Sayısal analizlerden elde edilmiş EHS kolonların kritik sıcaklıklarının, mevcut ve önerilen yöntemlerle karşılaştırılması

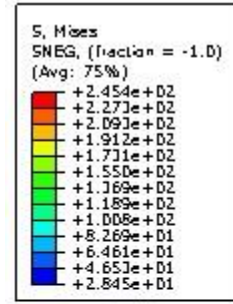
Kolonların Özellikleri	Mevcut Yöntem	Sıcaklık Azalışı	Önerilen Yöntem	Sayısal Analiz Sonuçları
150x75x6,3 ($\lambda=97, \beta=0,02, \rho=0,30$)	635 °C	60 °C	575 °C	574 °C
200x100x10 ($\lambda=74, \beta=0,02, \rho=0,30$)	635 °C	58 °C	577 °C	579 °C
250x125x10 ($\lambda=58, \beta=0,02, \rho=0,30$)	655 °C	58 °C	597 °C	602 °C
300x150x10 ($\lambda=47, \beta=0,02, \rho=0,30$)	655 °C	59 °C	596 °C	623 °C
150x75x6,3 ($\lambda=79, \beta=0,02, \rho=0,30$)	635 °C	58 °C	577 °C	587 °C
200x100x10 ($\lambda=60, \beta=0,02, \rho=0,30$)	655 °C	58 °C	597 °C	615 °C
250x125x10 ($\lambda=48, \beta=0,02, \rho=0,30$)	655 °C	59 °C	596 °C	616 °C
300x150x10 ($\lambda=39, \beta=0,02, \rho=0,30$)	655 °C	60 °C	595 °C	639 °C



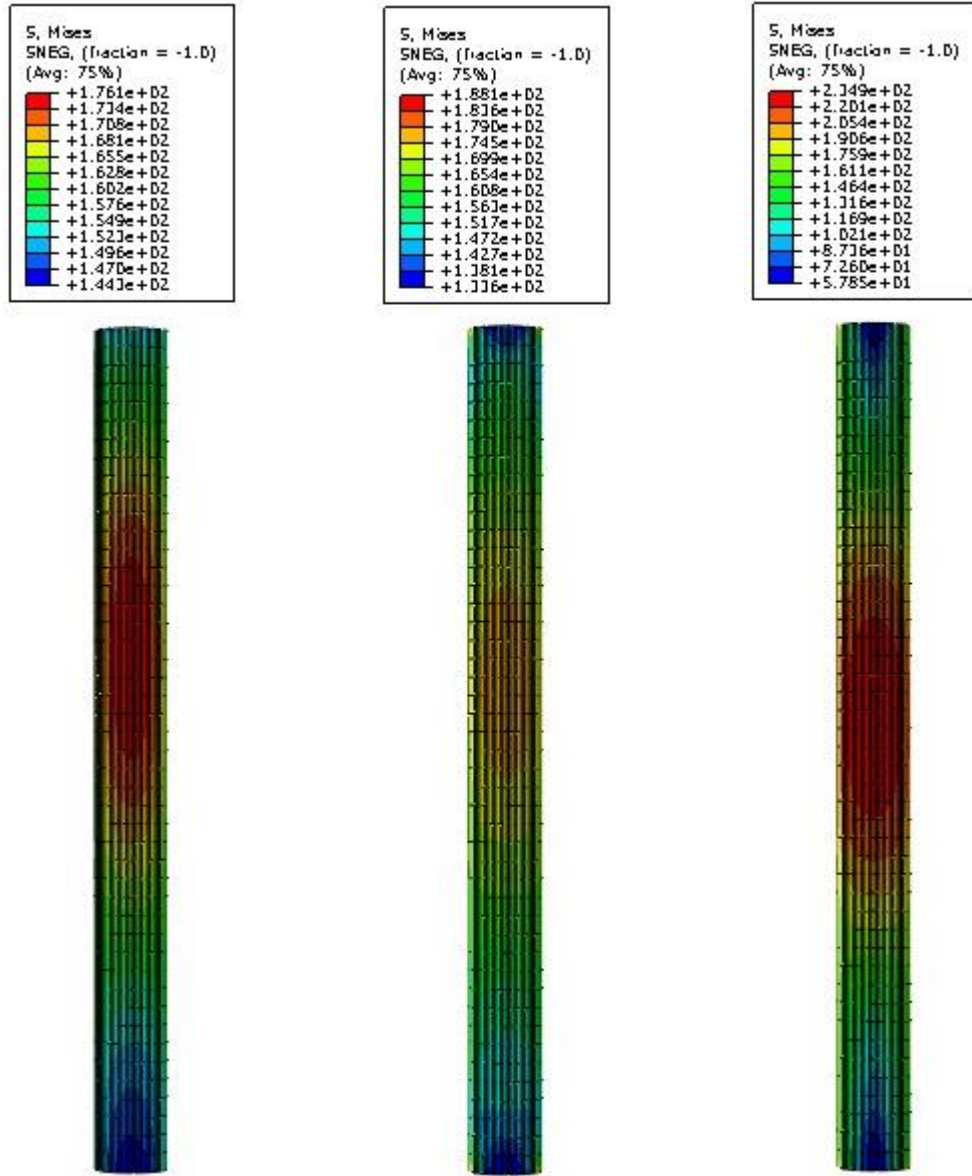
a) EHS 250x125x10
Ankastre-Sabit (20 °C)



b) EHS 250x125x10
Ankastre-Sabit (400 °C)

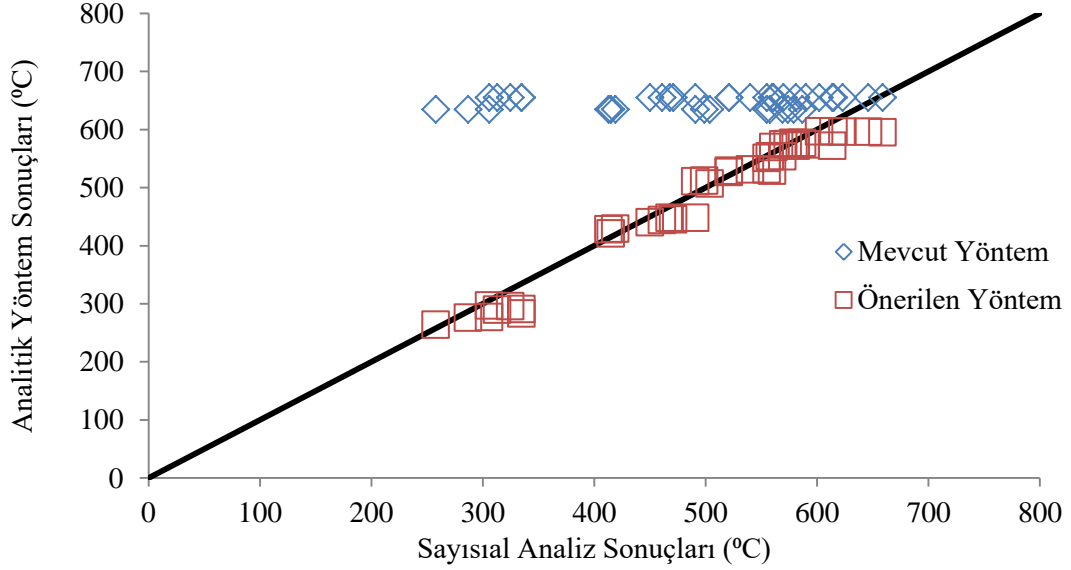


c) 250x125x10
Ankastre-Sabit (585 °C)



d) EHS 250x125x10 Ankastre-Ankastre (20 °C) e) EHS 250x125x10 Ankastre-Ankastre (400 °C) f) 250x125x10 Ankastre-Ankastre (597 °C)

Şekil 10:
EHS 250x125x10 kolonun farklı mesnet koşullarının farklı sıcaklıklardaki gerilme dağılımı



Şekil 11:

Mevcut ve önerilen yöntem ile hesaplanan kritik sıcaklıkların sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılması

Buradan çıkarılan sonuçta, mevcut yöntem EHS kolonlar için güvenli sonuçlar vermemektedir. Ancak, önerilen basit yöntemin kullanılması ile güvenli sonuçlar elde edilebilmektedir. Çünkü, mevcut yöntem, eksenel zorlanmaları dikkate almadığı için kritik sıcaklıklar her zaman gerçek değerlerden daha yüksek sıcaklıkları vermiştir. Halbuki, genişmeden ötürü kolonlara gelebilecek ek yükler, kolonların kritik sıcaklıklarını önemli derecede düşürebilmektedir.

3.5. Önerilen Yöntemin Bir Örnek ile Uygulaması

Bu bölümde, eksenel zorlanmalara maruz kalmış EHS çelik kolonların kritik sıcaklıklarını hesaplamak için önerilen yöntemin uygulaması bir örnek ile gösterilmiştir. Tablo 7'nin ilk satırında kritik sıcaklığı hesaplanan 150x75x6,3 kolonu seçilmiştir. Bir ucu ankastre, diğer ucu sabit mesnet olan kolonun narinliği 97 ($\lambda=97$), eksenel zorlanma oranı %2 ($\beta=0,02$) ve başlangıçta uygulanan yük seviyesi %30 ($\rho=0.30$)'dur.

Basınç elemanları için, narinliğe ve başlangıçtaki yük seviyesine göre belirlenen kritik sıcaklıklar BS 5950-8(BSI, 2003)'de verilen Tablo 8'e göre tespit edilmektedir. Burada belirtilmelidir ki, tespit edilen bu sıcaklık eksenel zorlanmalara maruz kalmamış basınç elemanları içindir. Bu örnek için verilen narinlik ve başlangıçta uygulanan yük seviyesine göre kritik sıcaklık 635 °C ($=T_0$)'dir.

Eksenel zorlanmalara maruz kalmış EHS çelik kolonların kritik sıcaklığındaki düşüş (2) numaralı denklem kullanılarak hesaplanabilir. Öncelikle, (2) numaralı denklem içindeki ifadeler (3, 4 ve 5) numaralı denklemler ile hesaplanmalıdır. Bu örnek için yapılan hesaplar sırası aşağıda gösterilmiştir.

$$F_{\beta} = 7,329 - 7,220e^{-\frac{0,02}{0,145}} = 1,04 \quad (15)$$

$$F_{\rho} = 3,224 - 2,654 * 0,30 + 2,761 * 0,30^2 = 2,68 \quad (16)$$

$$F_{\lambda} = 25,483 - 0,137 * 97 + 0,001 * 97^2 = 21,6 \quad (17)$$

(2) numaralı denklem kullanılarak, aşağıdaki gibi kritik sıcaklıktaki düşüş miktarı hesaplanır.

$$\Delta T_k = F_\beta F_\rho F_\lambda = 60 \quad (18)$$

Son olarak, (1) numaralı denklem kullanılarak, EHS çelik kolonun kritik sıcaklığı bulunabilir.

$$T_k = T_0 - \Delta T_k = 635 - 60 = 575 \text{ }^\circ\text{C} \quad (19)$$

Önerilen yöntem ile hesaplanan değer, Tablo 7’de sayısal analiz ile hesaplanan değere (574 °C) çok yakındır.

4. SONUÇLAR

Bu makalede, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak, elips enkesitli içi boş profillerden oluşmuş kolonların yüksek sıcaklıklardaki davranışları incelenmiştir. EHS çelik kolonların doğrulaması yapıldıktan sonra, narinliğin, eksenel zorlanma oranının ve eksenel yük seviyesinin yüksek sıcaklıklara maruz kalan EHS çelik kolonların kritik sıcaklıklarına etkilerini araştırmak için çok sayıda sayısal çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmadan elde edilen başlıca sonuçlar;

- EHS kolonlar, ABAQUS’ün kütüphanesinde mevcut olan S8R veya S4R eleman tipleri kullanılarak modellenebilirler.
- Mevcut yönetmelikler ile EHS çelik kolonların basınç dayanımları güvenli olarak hesaplanabilir.
- Mevcut yöntemler ile eksenel zorlamalara maruz kalmamış EHS çelik kolonların kritik sıcaklıkları güvenli olarak öngörülebilir.
- Mevcut yönetmelikler, eksenel zorlanmaları dikkate almadığı için, eksenel zorlanmalara maruz kalmış EHS çelik kolonların kritik sıcaklıklarını daha yüksek öngörerek, güvenli olmayan sonuçlar verebilir.
- Eksenel zorlanmalara sahip olan EHS kolonların kritik sıcaklıklarının hesaplanabilmesi için basit bir tasarım yöntemi tavsiye edilmiştir.

KAYNAKLAR

1. Abaqus, V. (2014) 6.14 documentation, *Dassault Systemes Simulia Corporation*.
2. Ali, F. A., P. Shepherd, M. Randall, I. Simms, D. J. O'Connor and I. Burgess (1998) The effect of axial restraint on the fire resistance of steel columns. *Journal of Constructional Steel Research*, 46, 305-306. doi:10.1016/s0143-974x(98)80036-9
3. Boresi, A. P. and R. Schmidt, J. 2003. *Advanced mechanics of materials*, John Wiley and Sons Press, USA.
4. BSI 2003, (2003). BS 5950: Part8: Code of Practice for the Fire Protection of Structural Steelwork, British Standard Institute, UK.
5. CEN EN 1993-1-8, (2005). *Design of Steel Structures, Design of Joints*, British Standard Institute, London.
6. CEN EN 1993-1-1, (2005). *Design of Steel Structures, General Rules and Rules for Building*, British Standard Institute, London.
7. CEN EN 1993-1-2, (2005). *Design of Steel Structures, Structural Fire Design*, British Standard Institute, London.
8. ÇYHY, (2016). *Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapım Esasları*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

9. Franssen, J.-M. (2000) Failure temperature of a system comprising a restrained column submitted to fire. *Fire Safety Journal*, 34,(2), 191-207. doi:10.1016/s0379-7112(99)00047-8
10. Ozyurt, E. and Y. Wang (2016) Effects of non-uniform temperature distribution on critical member temperature of steel tubular truss. *Engineering Structures*, 116, 95-106. doi: 10.1016/j.engstruct.2016.02.044
11. Ozyurt, E., Y. Wang and K. Tan (2014) Elevated temperature resistance of welded tubular joints under axial load in the brace member. *Engineering Structures*, 59, 574-586. doi: 10.1016/j.engstruct.2013.11.014
12. Ozyurt, E. and Y. C. Wang (2015) Effects of truss behaviour on critical temperatures of welded steel tubular truss members exposed to uniform fire. *Engineering Structures*, 88, 225-240. doi:10.1016/j.engstruct.2015.01.032
13. Rodrigues, J. P. C. and L. Laím (2017) Fire resistance of restrained composite columns made of concrete filled hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 133, 65-76. doi:10.1016/j.jcsr.2017.02.011
14. Wang, P., Y.-C. Wang and G.-Q. Li (2010) A new design method for calculating critical temperatures of restrained steel column in fire. *Fire Safety Journal*, 45,(6), 349-360. doi: 10.1016/j.firesaf.2010.07.002
15. Wang, Y. (2004) Postbuckling behavior of axially restrained and axially loaded steel columns under fire conditions. *Journal of structural Engineering*, 130,(3), 371-380. doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:3(371)
16. Wang, Y. and D. Moore (1994) The effect of frame continuity on the critical temperature of steel columns. *Third kenrensky conference on global trends in structural engineering*, Singapore.
17. Wang, Y. and D. Moore (1994) Effect of thermal restraint on column behaviour in a frame. *Fire Safety Science*, 4, 1055-1066. doi: 10.3801/iafss.fss.4-1055

