



## Eksenel Yüke Maruz Çelik Boru ve Kutu T-birleşimlerinin Yangın sonrası Davranışı

### Post-fire Behaviour of Axially Loaded Steel Pipe and Box T-joints

Emre Özyurt <sup>1\*</sup> 

<sup>1</sup> Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gümüşhane, TÜRKİYE  
Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [emre.ozyurt@gumushane.edu.tr](mailto:emre.ozyurt@gumushane.edu.tr)

Geliş Tarihi / Received: 07.12.2021

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 25.07.2022

DOI:10.21205/deufmd.2023257302

*Atıf şekli/ How to cite:* ÖZYURT, E. (2023). Eksenel Yüke Maruz Çelik Boru ve Kutu T-birleşimlerinin Yangın sonrası Davranışı. DEÜ FMD 25(73), 9-20.

#### Öz

Bu çalışma, boru ve kutu profillerden oluşmuş kafes sistem T-birleşimlerinin eksenel yük altında yangın sonrası davranışlarını sonlu elemanlar yöntemi kullanarak incelemeyi amaçlamaktadır. Bunu için farklı geometrik özelliklere sahip T-birleşimler sonlu elemanlar programı kullanılarak modellenildi. Öncelikle ısı transfer analizi yapılarak, oluşturulan sayısal modeller ISO 834 yangın eğrisine bağlı olarak ısıtıldı ve sonra soğutuldu. Yangın sonrası artık gerilmelere ve deformasyonlara maruz kalmış birleşimlere, maksimum dayanıma ulaşmaya kadar örgü elemanı ucundan eksenel yük uygulandı. Tüm birleşimlerde göçme sınır durumu başlık elemanı cidarında plastikleşme olarak tespit edildi. Yangın öncesi ve sonrası birleşimlerin dayanımları karşılaştırıldı. Sayısal sonuçlardan elde edilen bilgilere göre yangın sonrası tübüler T-birleşimlerin dayanımları %23,5 'a kadar düşmektedir. Ayrıca, birleşimler üzerindeki sıcaklık dağılımları, örgü-başlık eleman oranlarına ve başlık elemanın et kalınlıklarına bağlı olarak değişmektedir. Yangın sonrasında oluşan artık gerilme ve deformasyonlar boru ve kutu T-birleşimlerin dayanımlarına önemli derecede etki etmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Artık Gerilme, Kafes Sistem, Sonlu Elemanlar, Tübüler Profil, Yangın, Yüksek Sıcaklık

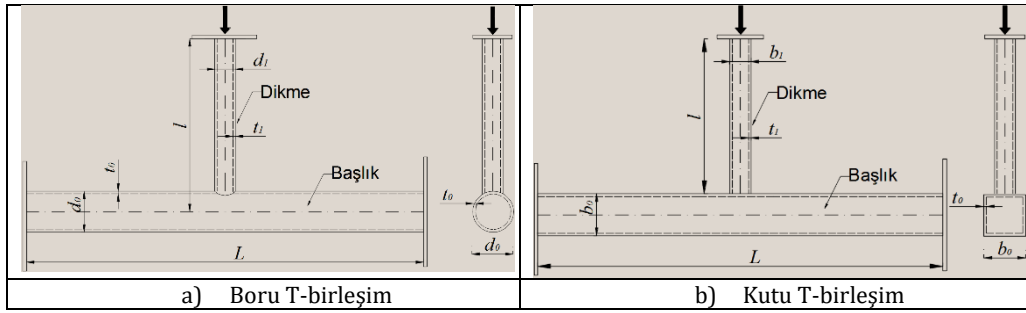
#### Abstract

This study aims to investigate the post-fire behavior of truss system T-joints made of pipe or box profiles under axial load using the finite element method. Hence, T-joints with different geometrical properties were modeled using the finite element program. First of all, heat transfer analysis was performed and the numerical models were heated based on the ISO 834 fire curve and then the joints were cooled. An axial load was applied from the end of the brace member to the joints, which were exposed to residual stresses and deformations after the fire, until they reached the maximum capacity. Each joint was failed due to plastification on the wall of the chord member. The strengths of the joints before and after the fire were compared. According to the findings obtained from the numerical results, the strength of tubular T-joints after fire decreases to up to 23.5%. In addition, the temperature distributions on the joints vary depending on the brace-to-chord member ratios and chord wall thicknesses. Residual stress and deformations after fire have a significant effect on the strength of both pipe and box T-joints.

**Keywords:** Elevated Temperature, Finite Element, Fire, Residual Stress, Tubular Sections, Truss

## 1. Giriş

Boru ve kutu profiller, hem estetik hem de mühendislik avantajlarından ötürü kafes sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bu tip sistemlerin en kritik noktalarından biri gerilme yığılmalarının olduğu birleşim bölgesidir. Bu kritik birleşim bölgesinin yangına maruz kalması durumunda, öncelikle genişleme ve soğuma aşamasına geçilince ise büzülme meydana gelecektir. Bu koşullar altında oluşabilecek artık gerilmelerden ötürü, yangına maruz kalmış ve soğumuş bir birleşimin eksenel yük taşıma kapasitesi önemli derecede değişkenlik gösterebilir. Bu çalışmanın amacı, yangın sonrası eksenel yüke maruz kalmış çelik ve tübüler T-birleşimlerin davranışını araştırmaktır. Ayrıca, Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar (CYTHYDE) [1] yönetmeliğinde boru ve kutu profillerden oluşmuş birleşimlerin tasarım yöntemleri mevcuttur. Ancak, yangına maruz kalmış birleşimler hakkında herhangi bir yöntem veya tavsiye sunulmamaktadır. Bu yüzden, birleşimlerin yangın sonrası davranışlarının tam olarak anlaşılması ve mevcut hesaplama yöntemlerinin yeniden kullanım potansiyelleri bu çalışma kapsamında incelenmiştir. Şekil 1, boru ve kutu T-birleşimlerinin tipik birer geometrik konfigürasyonlarını ve parametrelerini göstermektedir.



Şekil 1. Boru ve Kutu T-birleşimlerinin geometrik özellikleri

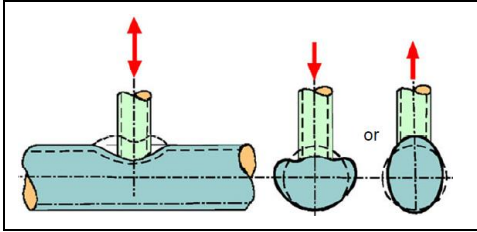
Figure 1. Geometrical parameters of pipe and box T-joints

Mevcut tasarım yönetmeliklerinde [1-3], örgü elemanındaki yerel burkulmanın önlenmesi amacıyla et kalınlığının çapına oranı ( $=d_1/t_1$ ) sınırlandırılmıştır. Başlık elemanında yerel burkulmaların engellenmesi için ise  $d_0/t_0$  oranı sınırlandırılmıştır. Ayrıca, birleşimlerde uygun kaynak kullanılarak kaynaktaki göçme önlenebilir. Başlık elemanının plastikleşmeye olan direnci zımbalamaya olan direncinden düşük olduğundan, kaynaklı birleşimlerin en kritik göçme modlarından biri başlık elemanında plastikleşmedir. Şekil 2, örgü elemanı basınç veya çekme kuvveti etkisi altındayken başlık elemanı cidarında oluşan tipik birer plastikleşme örneklerini göstermektedir. Bu tip birleşimlerin tasarım yöntemleri örgü elemanına uygulanan eksenel kuvvetin türünden (çekme veya basınç kuvveti) bağımsızdır. Bunun

sebebi, mevcut yönetmeliklerdeki tasarım yöntemlerinin en kritik olan yükleme durumuna (basınç etkisi altındaki birleşimler için) göre geliştirilmiş olmasıdır.

Kaynaklı boru ve kutu birleşimlerin yangın sırasındaki davranışı, literatürde mevcut olan araştırma çalışmalarında kapsamlı olarak incelenmiştir. Tan ve ark. [4] yangına maruz beş tam ölçekli boru T-birleşimlerini test etmişlerdir ve birleşimlerin dayanımında %77,5'lik bir azalma saptamışlardır. Ozyurt ve ark. [5-7] farklı sıcaklıklarda boru şeklindeki T-, Y-, X-, N- ve K-birleşimlerinin eksenel yük taşıma kapasitesini incelemek için parametrik bir çalışma yürütmüştür. Sayısal analizlere göre, örgü eleman(lar)ın basınç altında olduğu T-, Y- ve X-birleşimleri için ve örgü elemanlarının zıt yükler altında olduğu K- ve N-birleşimleri için,

yüksek sıcaklıklardaki birleşimin eksenel yük taşıma kapasitesindeki düşüş miktarı ile çeliğin akma gerilmesindeki azalma oranı benzer çıkmıştır. Bunun sebebi, yüksek sıcaklıktan ötürü birleşim bölgesinde meydana gelen yerel yerdeğiştirmeler nedeniyle oluşan ikinci mertebe etkisi olarak belirtilmiştir. Lan ve ark. [8-10] yüksek sıcaklıklarda T-, Y-, X-, N- ve K-birleşimlerinin dayanımlarını incelemişlerdir. Birleşimlerin dayanımlarındaki azalmanın, kullanılan çeliğin elastisite modülü ile akma gerilmesindeki değişime bağlı olduğunu tespit etmişlerdir. Shao ve ark. [11-13] başlık elemanındaki basınç gerilmesinin etkisi dikkate alınarak T- ve K-birleşimlerinin yüksek sıcaklıklardaki performansını incelemişlerdir. Ancak, yangın sonrasındaki boru ve kutu birleşimlerinin performansı üzerine bir çalışma yapılmamıştır. Gao ve ark. [14, 15] yangın altında güçlendirilmiş T-birleşimlerinin sismik davranışını ve dayanımlarını, deneysel ve sonlu elemanlar yöntemi ile araştırmışlardır. Xu ve ark. [16], deprem sonrası yangına maruz levha ile güçlendirilmiş T-birleşimlerinin dayanımlarını sayısal analizler ile incelemişlerdir. Örgü eleman genişliğinin, başlık eleman kalınlığının ve güçlendirme levhası kalınlığının, deprem sonrası yangının direnci üzerinde büyük etkisi olduğunu belirtmişlerdir.



Şekil 2. Başlık elemanı cidarında plastikleşme [3]

Figure 2. Chord face plastification [3]

Yangın sonrası tübüler birleşimler üzerine yapılan çalışmalar ise sınırlıdır. Jin ve ark. [17], boru şeklindeki T birleşimlerinin yangın sonrası davranışı üzerinde deneysel ve parametrik bir çalışma gerçekleştirmiştir. Ancak sadece bir adet birleşim test edilmiş ve yapılan sayısal çalışmalarda ise kabuk elemanlar kullanıldığı için enkesit boyunca oluşabilecek artık gerilmeler ihmal edilmiştir. Gao ve ark. [18] beton dolgululu T-birleşiminin yangın sonrası davranışını incelemişlerdir. Deneysel ve sayısal

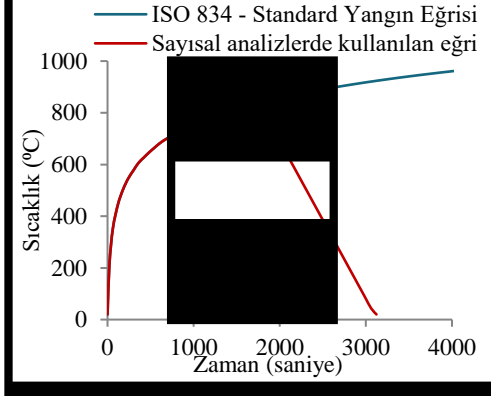
sonuçlara göre, beton dolgusu birleşimin yangın esnasında performansını önemli derecede arttırdığı ancak, yangın sonrasındaki davranışını ise betonadaki hasarın onarılmaz olması sebebiyle olumsuz bir etkisi olduğu tespit edilmiştir. Pandey ve ark. [19] soğuk haddelenmiş yüksek mukavemetli çelik boru T- ve X-birleşimlerinin yangın sonrası davranışını araştırmışlardır. Yazarlar, CIDECT [20] ve Eurocode 3 [2]'te verilen mevcut tasarım kurallarının, yangın sonrası statik dayanımları tahmin etmek için uygun olmadığını vurgulamışlardır.

Literatür araştırmasından görüleceği üzere, yangın esnasında veya sonrasında tübüler birleşimlerin davranışları, yüksek sıcaklıkla artan deformasyonların ve kötüleşen mekanik özelliklerin etkisinde kalmaktadır. Bu yüzden bu çalışma, eksenel yük etkisindeki boru ve kutu profillerden oluşmuş T-birleşimlerin yangın sonrası davranışlarını ve dayanımlarını sonlu elemanlar yöntemi ile incelemeyi amaçlamaktadır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada, boru veya kutu profillerden oluşan kafes sistem T-birleşimlerinin yangın sonrası davranışları ve dayanımları çok sayıda sonlu eleman analizleri ile incelenmiştir. Sayısal analizler için doğrusal olmayan sonlu eleman yazılımı ABAQUS v6.17 kullanılmıştır.

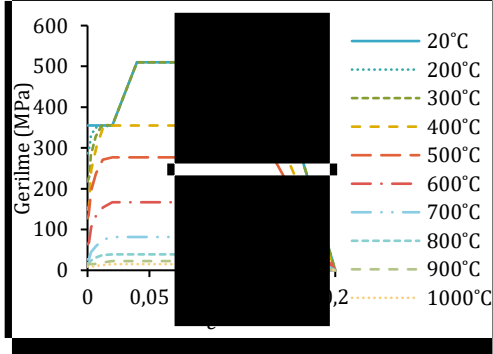
Yapısal yangın tasarımını gerçekleştirirken, ilk adım bir yangın senaryosu seçmektir (termal yükleme). Termal yük için yaygın olarak ISO 834 standart yangın sıcaklık-zaman eğrisi kullanılmaktadır. Farklı geometrik ve malzeme parametrelerine sahip tübüler birleşimler üzerine yapılmış birçok farklı çalışmada [4, 14, 21-25], kritik sıcaklıkların farklı yük oranlarında 500 °C ile 700 °C arasında değiştiğini göstermektedir. Bu yüzden, sayısal analizlerde, yangın sonrası davranışın incelenmesi için soğuma evresini içeren Şekil 3'de kırmızı eğri ile gösterilen sıcaklık-zaman eğrisi kullanılmıştır.



Şekil 3. Parametrik çalışmada kullanılan sıcaklık değişimi

Figure 3. Temperature variation used in parametric study

Yapılan tüm sayısal analizlerde S355 çelik sınıfı kullanılmıştır. Karakteristik akma gerilmesi ve çekme mukavemeti, normal sıcaklıklarda, sırasıyla 355 MPa ve 510 MPa olarak kabul edilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda ise gerilme-birim şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) eğrileri ve elastisite modülü, Şekil 4'te gösterildiği gibi Eurocode 1993-1-2 [26] temel alınarak elde edilmiştir. Yazarın önceki çalışmasında [27] detaylıca gösterildiği gibi, gerçek  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi, büyük deformasyonlar nedeniyle logaritmik bir  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisine dönüştürülmüştür.



Şekil 4. EN 1993-1-2'ye göre yüksek sıcaklıklarda S355 sınıfı çeliğin mühendislik  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrileri

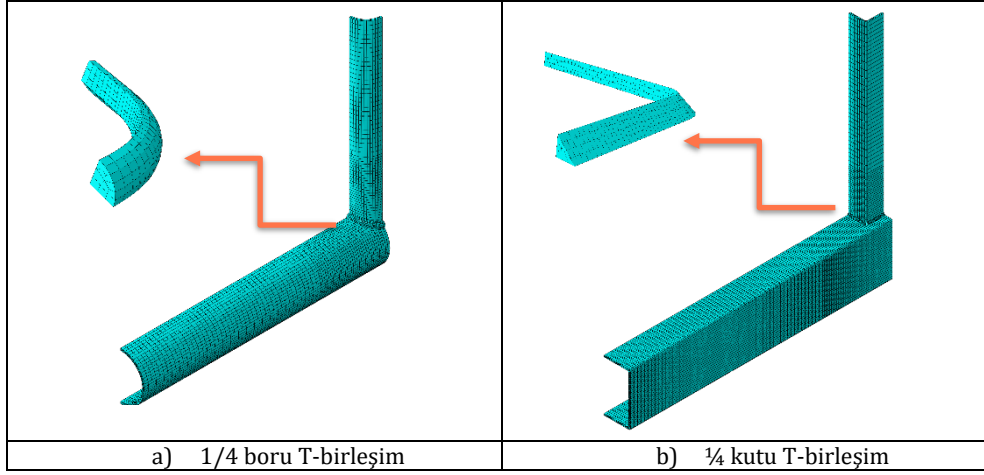
Figure 4. Engineering  $\sigma$ - $\epsilon$  curves of S355 steel grade at elevated temperatures based on EN-1993-1-2

Parametrik çalışmada, yangın sonrası T-birleşimlerinin analizi iki ana adımdan oluşmuştur. İlk adımda, Şekil 3 'deki sıcaklık-zaman eğrisi kullanılarak ısı transfer analizi gerçekleştirilmiştir. Böylece birleşim üzerindeki zamana bağlı sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. İkinci adımda ise termal-gerilme analizi gerçekleştirilerek yangın sonrası birleşimin analizi tamamlanmıştır.

## 2.1. Sonlu elemanlar modelinin oluşturulması

Birleşimlerin yangın sonrası davranışlarını araştırmak için farklı geometrik özellikler dikkate alınarak bir dizi boru ve kutu profillerden oluşmuş kafes sistem T-birleşimi sayısal analizler ile modellenmiştir. Tablo 1 'de sayısal modellerin geometrik özellikleri mevcuttur.

Termal analizlerde, başlık, örgü ve kaynak geometrileri için DC3D8 katı elemanları kullanılırken, gerilme analizlerinde ise C3D8R katı elemanları kullanılmıştır. Hem hesaplama süresinden hem de depolamadan tasarruf etmek için hem statik hem de termal yükleme ve sınır koşullarındaki simetri nedeniyle boru ve kutu T-birleşimlerinin sadece dörtte biri modellenmiştir. Tüm birleşimin dörtte biri kullanıldığından, simetri eksenlerdeki kenarlara uygun sınır koşulları tanımlanmıştır. Ayrıca, başlık elemanı ucundan sadece düşey yer değiştirmeler sınırlandırılarak genişmeden ötürü oluşabilecek ekstra iç gerilmelerin oluşması engellenmiştir. Şekil 5, tipik birer boru ve kutu T-birleşimlerine ait ağ düzenini göstermektedir. Sayısal simülasyonlar ile kaynak geometrisinin modellenmesine gelince, Şekil 5'te gösterildiği gibi ABAQUS 'te "sweep" komutu kullanılarak üç boyutlu katı elemanlar oluşturulmuştur. Ağ boyutlarının optimizasyon çalışması sonrasında, birleşim bölgesindeki optimum ağ boyutu 5 mm ve diğer bölgelerdeki ağ boyutu ise 10 mm olarak bulunmuştur. Ayrıca, profillerin enkesitlerinde en az iki sıra mesh (ağ) olacak şekilde ayarlanarak gerilme dağılımlarının detaylıca incelenmesi mümkün kılınmıştır. Kaynak geometrisinde ise optimum ağ boyutu 3 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 5. T-birleşimlerinin tipik birer ağ düzeni

Figure 5. Typical mesh layout of T-joints

Tablo 1. Sayısal analizlerde kullanılan birleşimlerin geometrik özellikleri

Table 1. Geometrical parameters used in numerical analysis

Birleşim Numarası	$d_0$ (mm)	$t_0$ (mm)	L (mm)	$d_1$ (mm)	$t_1$ (mm)	l (mm)	$\beta$ ( $d_1/d_0$ )	$\gamma$ ( $d_0/2t_0$ )
BT1	244,5	8,0	2500	114,3	8,0	1000	0,47	15,3
BT2	244,5	8,0	2500	139,7	8,0	1000	0,57	15,3
BT3	244,5	8,0	2500	168,3	8,0	1000	0,69	15,3
BT4	244,5	8,0	2500	193,7	8,0	1000	0,79	15,3
BT5	244,5	10,0	2500	168,3	10,0	1000	0,69	12,2
BT6	244,5	12,5	2500	168,3	12,5	1000	0,69	9,8
KT1	200,0	8,0	2000	60,0	8,0	800	0,30	12,5
KT2	200,0	8,0	2000	100,0	8,0	800	0,50	12,5
KT3	200,0	8,0	2000	140,0	8,0	800	0,70	12,5
KT4	200,0	8,0	2000	150,0	8,0	800	0,75	12,5
KT5	200,0	5,0	2000	100,0	5,0	800	0,50	20,0
KT6	200,0	10,0	2000	100,0	10,0	800	0,50	10,0

Başlık ve örgü elemanları, ABAQUS'te "tie" komutu kullanılarak kaynak geometrisine bağlanmıştır. Örgü elemanından başlık elemanına yük aktarma mekanizmasının oluşturulabilmesi için temas etkileşimini dikkate almak gerekir. Sonlu eleman analizlerinde bu temas yüzeylerinin etkileşimi için, ABAQUS'te

master-slave algoritması kullanılarak doğrusal olmayan temas etkileşimi tanımlanabilir. Bu nedenle, başlık ve örgü elemanlarının kaynak elemanları ile temas halinde olan yüzeyleri "master surface" olarak, kaynak geometrisi ise "slave surface" olarak seçilmiştir.

## 2.2. Isı transfer analizi

Gerilme analizinden önce ısı transfer analizi yapılarak birleşimler üzerindeki sıcaklık dağılımları hesaplanmalıdır. Termal analiz için, konvektif ve radyasyon ısı transfer katsayıları sırasıyla  $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  ve  $0,7$ 'dir [26]. Çeliğin yoğunluk, ısı iletkenlik, özgül ısı gibi diğer termal özellikleri de Eurocode 1993-1-2'tan [26] alınmıştır. Ayrıca sayısal modelde mutlak sıfır sıcaklığının ve Stefan-Boltzmann'ın fiziksel sabitleri sırasıyla  $-273.15$  ve  $5.67 \times 10^{-8}$  olarak tanımlanmıştır [26].

## 2.3. Gerilme analizi

Isı transfer analizinde sıcaklık dağılımları elde edildikten sonra birleşimlere termal ve statik yük uygulamak için gerilme analizi yapılmıştır. Gerilme analizinin ilk aşamasında, ısı transfer analizden elde edilen sıcaklık dağılım verilerine göre termal yükün birleşime uygulanması gerekmektedir. Bu nedenle, ABAQUS'teki "predefined field" modülü kullanılarak birleşimin her bir katı eleman ağındaki zamana bağlı sıcaklık dağılımları tanımlanmıştır. Bu aşamanın sonunda yangın sonrası birleşimin artık gerilme ve deformasyon verileri elde edilmiştir.

İkinci aşamada ise yangın sonrası oluşan bu artık gerilmeler ve deformasyonların, T-birleşiminin eksenel yük taşıma kapasitesine ve göçme moduna olan etkilerinin incelenmesi gerekmektedir. Bunun için, ABAQUS'teki Statik, Riks yöntemi seçilerek örgü elemanına eksenel yük uygulanmıştır. Bu yöntem sayesinde plastik aşamada doğrusal olmayan şekil değiştirmeleri ve gerilmeleri elde etmek mümkün olmuştur. Tüm sayısal analizlerde von-Mises akma kriteri ve izotropik pekleşme kuralları kullanılmıştır.

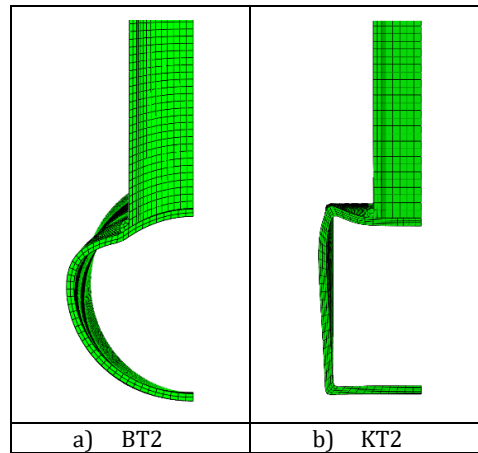
## 3. Bulgular

Tablo 1 'de belirtilen boru ve kutu T-birleşimlerinin yangın sonrası sıcaklık dağılımları, artık gerilmeleri, deformasyonları, dayanımları ve göçme modları incelenmiştir. Referans olması bakımından yangına maruz kalmamış aynı birleşimler için normal sıcaklıklarda dayanımları sonlu elemanlar yöntemi ile hesaplanmıştır.

Sayısal analizlerde dikkate alınan tüm birleşimlerin yangın öncesi ve sonrası göçme modları başlık elemanında plastikleşmedir. Şekil 6 'te örnek olarak birer boru ve kutu T-birleşimlerinin deformasyonlarını göstermektedir.

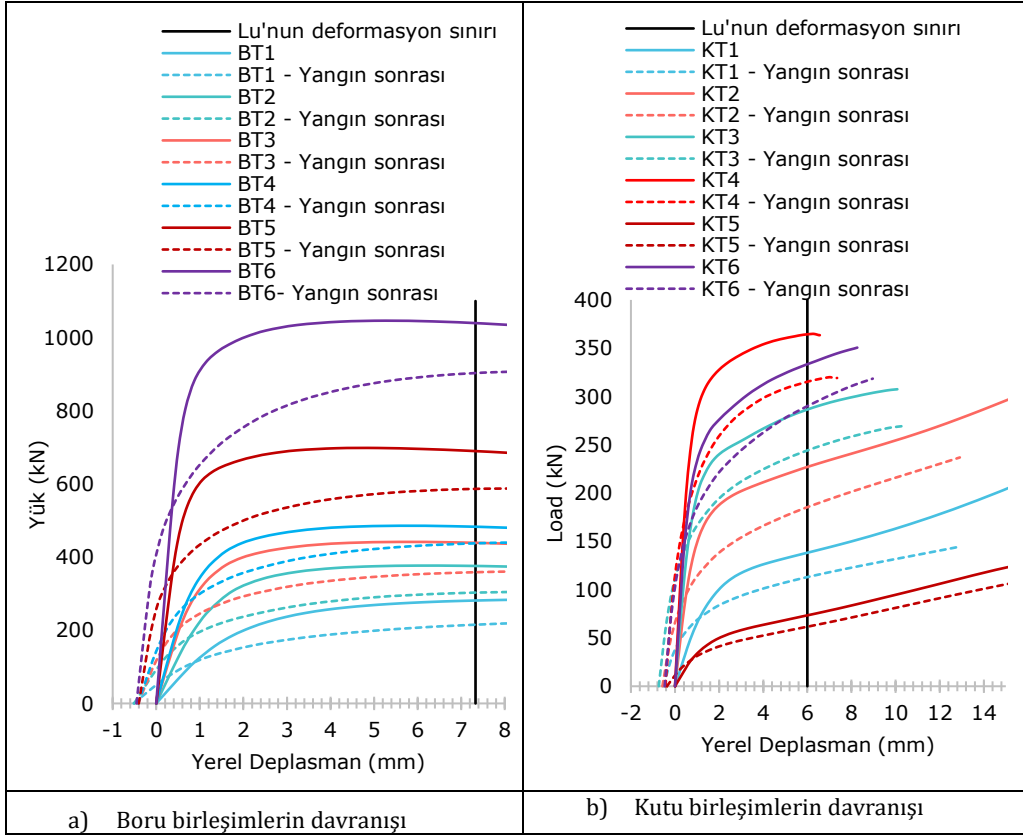
Hem boru hem de kutu profillerden oluşan kafes sistem birleşimlerinde göçme, kaynak bölgesinin hemen ucunda oluşan plastik mafsallaşmadan ötürü kaynaklanmaktadır. Ayrıca, bu tip birleşimlerin (tübüler birleşimler) dayanımlarını belirlemek için genel olarak Lu'nun deformasyon sınırı kullanılır [28]. Bu sınır durumuna göre başlık elemanı üzerindeki yerel deformasyon başlık çapının (boru birleşimler için) veya genişliğinin (kutu birleşimler için) %3'ünü aşmazsa, birleşimin dayanımı yerel deplasman-yük eğrisindeki tepe noktasına eşittir. Aksi durumda, birleşimin dayanımı %3 'lük yerel deformasyona karşılık gelen yüke eşittir.

Şekil 7, boru ve kutu T-birleşimlerinin yangın öncesi ve sonrası yerel deplasman ve yük eğrilerini karşılaştırmaktadır. Normal sıcaklıklardaki boru T-birleşimlerinin dayanımı Şekil 7a 'daki düz çizgi ile oluşan eğrilerin tepe noktasına eşittir. Çünkü %3 'lük deformasyon sınırından önce maksimum dayanıma ulaşılmıştır. Aynı birleşimlere ait yangın sonrasıdaki dayanım ise %3 'lük göreceli deplasmana denk gelen yüke eşittir. Bir başka deyişle, yangın sonrası boru birleşimlerin dayanımlarını kullanılabilirlik sınır durumu belirlemiştir. Yangına maruz veya olmayan kutu T-birleşimlerin dayanımları Şekil 7b 'de gösterildiği gibi %3 'lük yerel deformasyona denk gelen yüke eşittir. Bunun sebebi, kutu birleşimin başlık yüzünde çekme membran eylemi gerçekleşerek pekleşme meydana gelmektedir ve eğride belirgin bir tepe noktası oluşmamaktadır.



Şekil 6. T-birleşimlerinin deformasyonları

Figure 6. Deformed shapes of T-joints



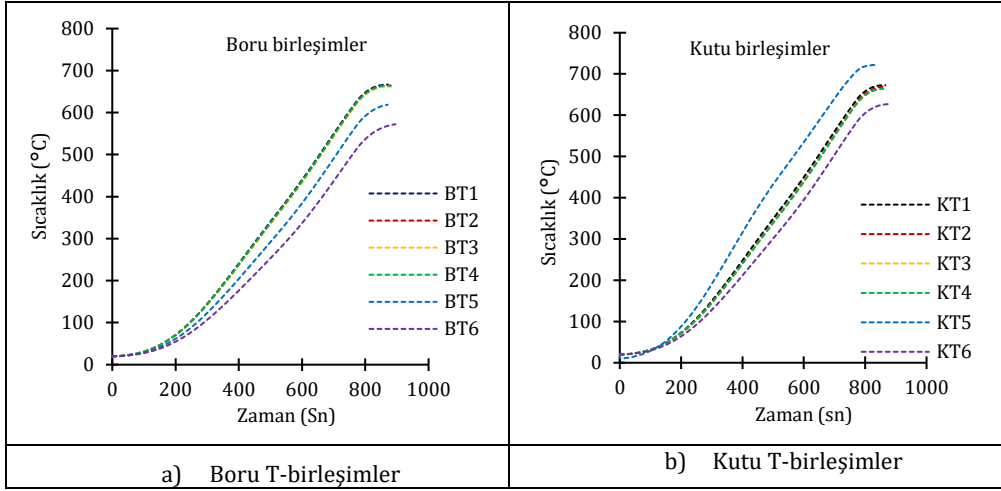
Şekil 7. Boru ve kutu T-birleşimlerinin yangın öncesi ve sonrası yerel deplasman-yük eğrileri

Figure 7. Local displacement-load curves of pipe and box T-joints before and after fire

Tüm birleşimler yangın anında Şekil 3 'te verilen sıcaklık zaman eğrisine maruz bırakılarak ısıtılmıştır. Tablo 1 'de belirtilen farklı geometrik özelliklere sahip birleşimlerin maksimum sıcaklığa maruz kalmış örgü elemanları üzerindeki sıcaklık zaman eğrilerinin karşılaştırmaları Şekil 8 'de gösterilmektedir. Hem boru hem de kutu birleşimlerde sıcaklık dağılımını etkileyen en önemli faktörün  $\gamma$  olduğu görülmektedir.  $\gamma$  oranı azaldıkça birleşim üzerindeki sıcaklık azalmaktadır. Profillerin et kalınlığı ile  $\gamma$  arasında ters bir ilişki olduğundan et kalınlığının azalması durumunda ısı transferi

daha hızlı gerçekleşmektedir. Bu sebepten, maksimum sıcaklık  $\gamma$  ile doğru orantılıdır. Ancak geometrik özelliklerden  $\beta$  birleşimin dayanımına önemli derecede etki etmesine rağmen, sıcaklık dağılımına etkisi önemsizdir. BT1, BT2, BT3 ve BT4 birleşimlerdeki ölçülen en yüksek sıcaklıklar ortalama olarak 665 °C 'dir. BT5 ve BT6 birleşimlerinde sırayla, 620 °C ve 572 °C 'dir. Kutu birleşimlerine gelince, KT1, KT2, KT3 ve KT4 birleşimlerdeki ölçülen en yüksek sıcaklıklar ortalama olarak 670°C 'dir. KT5 ve KT6 birleşimlerinde sırayla, 721 °C ve 629 °C 'dir.



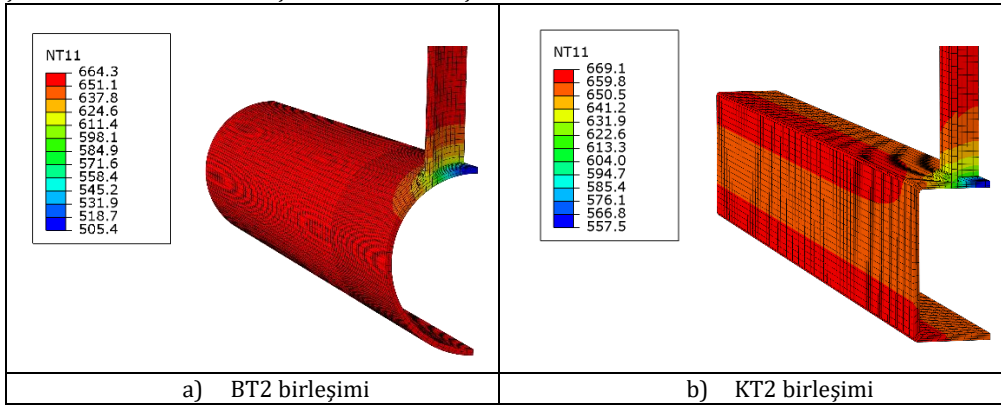


**Şekil 8.** Farklı geometrik özelliklere sahip boru ve kutu T-birleşimlerinin sıcaklık -zaman eğrilerinin karşılaştırılması

**Figure 8.** Comparison of temperature-time curves of pipe and box T-joints with various geometrical parameters

Şekil 9, boru ve kutu birleşimlerine ait örnek birer sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Genel olarak başlık ve örgü elemanları üzerindeki sıcaklıklar düzgün bir şekilde dağılıma sahip olurken birleşim bölgesindeki sıcaklıklar diğer bölgelere oranla daha soğuktur. Şekil 9a ve b 'deki en düşük sıcaklıklar başlık

elemanı üzerinde sıcaklığa direk olarak maruz kalmayan bölgelerde 505 °C ve 557 °C olarak tespit edilmiştir. Bunun sebebi birleşim bölgesindeki kaynak geometrisi rijitliği arttırdığı gibi aynı zamanda ısı transfer hızını düşürmektedir.



**Şekil 9.** BT2 ve KT2 birleşimlerinin sıcaklık dağılımları (Birimler °C 'dir.)

**Figure 9.** Temperature distributions of BT2 ve KT2 joints (Units in °C)

Tablo 2 boru ve kutu T-birleşimlerinin yangın öncesi ve sonrası dayanımlarını karşılaştırmaktadır. Kutu birleşimlerde yangın sonrasında göre en büyük fark %20,8 seviyelerinde iken boru birleşimlerde bu fark %

23,5 seviyelerine kadar çıkmaktadır.  $\beta$  oranı arttıkça her iki profil türünden oluşan birleşimlerdeki dayanım farkı artmaktadır. Bunun sebebi,  $\beta$  oranı arttıkça başlık elemanı üzerindeki sıcaklığa maruz kalmamış alan



artmaktadır. Ayrıca, yangın sonrası dayanım farkı,  $\gamma$  ile doğru orantılıdır. Elemanların et kalınlığının artması sıcaklık farkını azalttığı için

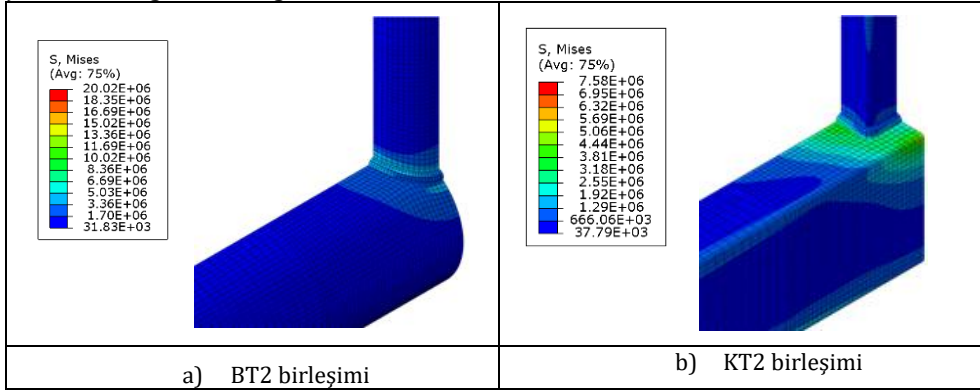
**Tablo 2.** Boru ve kutu T-birleşimlerinin yangın öncesi ve sonrası dayanımları

**Table 2.** Pre-fire and post-fire strengths of pipe and box T-joints

Birleşim Numarası	Kutu Birleşimler			Boru Birleşimler			
	Yangın öncesi dayanım (kN)	Yangın sonrası dayanım (kN)	Fark (%)	Birleşim Numarası	Yangın öncesi dayanım (kN)	Yangın sonrası dayanım (kN)	Fark (%)
KT1	139,2	118,3	15,0	BT1	281,4	228,5	18,8
KT2	226,5	185,8	18,0	BT2	376,7	302,6	19,7
KT3	286,4	231,4	19,2	BT3	441,6	337,8	23,5
KT4	366,8	314,8	14,2	BT4	486,1	413,8	14,9
KT5	73,2	58,0	20,8	BT5	698,3	586,4	16,0
KT6	334,0	290,2	13,1	BT6	1046,3	903,2	13,7

Sonuç olarak, yangın sonrası birleşimlerin dayanımları artık gerilmelerden ötürü önemli derecede düşmektedir. Şekil 10 yangın sonrası boru ve kutu T-birleşimlerinde oluşan artık gerilmelerin dağılımlarını göstermektedir. Şekilde artık gerilmeleri göstermektedir. Artık

gerilmeler, genleşmeler ve büzölmelerden ötürü oluşmaktadır. Bunun için, yangına uğramış boru ve kutu birleşimler için artık gerilmelerden ötürü oluşan dayanım kaybının dikkate alınması gerekmektedir.



**Şekil 10.** Yangın sonrası boru ve kutu birleşimlerde oluşan artık gerilmelerin dağılımı (Birimler  $\text{kg/m}^2$  dir.)

**Figure 10.** Distribution of residual stresses occurring in pipe and box joints after fire (Units in  $\text{kg/m}^2$ )

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Boru ve kutu T-birleşimlerin yangın sonrası davranışları sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak detaylı olarak incelenmiştir. Farklı geometrik özelliklerden oluşan T-birleşimlerinin sıcaklık dağılımları, artık gerilmeleri, deformasyonları, dayanımları ve göçme modları sayısal analizler ile tespit edilmiştir. Referans olması bakımından yangın öncesi birleşimlerin normal sıcaklıklardaki davranışları da ele alınmıştır. Örgü-başlık eleman oranı ( $\beta$ ), başlık elemanının et kalınlığına oranı ( $\gamma$ ) ve profil türlerinin yangın sonrası T-birleşimler üzerine etkileri araştırılmıştır.

Sayısal sonuçlar, artık gerilmeler ve deformasyonlardan ötürü yangın sonrası tübüler T-birleşimlerin dayanımlarının önemli derecede düştüğünü ortaya koymuştur. Yangın öncesi ve sonrası birleşimlerin göçme modları başlık elemanında plastikleşme olarak tespit edilmiştir. Ayrıca, birleşimlerin dayanımları Lu 'nun deformasyon sınırı kullanılarak belirlenmiştir.

Isı transferi verilerine göre hem boru hem de kutu birleşimlerde tespit edilen maksimum sıcaklığa etki eden parametre  $\gamma$  'dır. Maksimum sıcaklık  $\beta$  'dan ve profil türünden bağımsızdır. Dikkate alınan birleşimlerin maksimum sıcaklıkları 572 °C ile 721 °C arasında değişmektedir. Bu sıcaklık aralığında çeliğin mekanik özelliklerinde büyük değişimler meydana gelir. Bu yüzden, ısı transferi analizinde Şekil 3 'te verilen eğri kullanılmıştır. Ayrıca, boru ve kutu birleşimler üzerindeki sıcaklık dağılımları birbirine benzerdir. Başlık ve örgü elemanları üzerinde düzgün bir sıcaklık dağılımı mevcut iken birleşim bölgesindeki kaynak geometrisinde etkisinden dolayı doğrusal olmayan bir sıcaklık dağılımı meydana gelmektedir.

Bu çalışmada dikkate alınan tübüler T-birleşimlerin yangın sonrası dayanımı %23,5 'a kadar düşmektedir. Dayanımdaki düşüş profil türünden bağımsız olsada  $\beta$  ve  $\gamma$  oranlarının artması ile yangın sonrası dayanımdaki düşüş de artmaktadır. Sonuç olarak, yangına maruz kalmış boru ve kutu T-birleşimlerde artık gerilmeler dayanım kaybına sebep olabilmektedir. Bu çalışmada, birleşimlerin dayanımlarına etki eden başlıca ana faktörler ( $\beta$ ,  $\gamma$  ve profil türü) dikkate alınmıştır. Gelecekte yapılması planlanan çalışmalarda farklı

geometrik parametreler, örgü-başlık elemanlarına uygulanan yük koşulları ve örgü-başlık elemanları arasındaki açılar dikkate alınarak, yangın sonrası tübüler birleşimlerin davranışları incelenecektir.

#### 5. Discussion and Conclusion

The post-fire behavior of pipe and box T-joints was studied in detail using the finite element method. Temperature distributions, residual stresses, residual deformations, strengths and failure modes of T-joints with different geometrical parameters were obtained by numerical analysis. For reference, the behavior of pre-fire joints at normal temperatures was also discussed. The effects of brace-to-chord member ratio ( $\beta$ ), chord member to wall thickness ratio ( $\gamma$ ), and profile types on T-joints after fire were investigated.

Numerical results revealed that the strengths of tubular T-joints were significantly reduced after fire due to residual stresses and residual deformations. The failure modes of the joints before and after the fire were determined as plastification in the chord face. In addition, the strengths of the joints were obtained based on the deformation limit of Lu.

Based on the heat transfer analyses, the parameter affecting the maximum temperature detected in both pipe and box joints is  $\gamma$ . The maximum temperature is independent of  $\beta$  and profile type. The maximum temperatures of the considered joints vary between 572 °C and 721 °C. In this temperature range, great changes occur in the mechanical properties of the steel. Therefore, the curve given in Figure 3 was used in the heat transfer analysis. Also, the temperature distributions on the pipe and box joints are similar to each other. While there is a uniform temperature distribution on the chord and brace members, a non-linear temperature distribution occurs due to the effect of the weld geometry in the intersection area.

The post-fire strength of tubular T-joints considered in this study drops down to 23.5%. Although the decrease in strength is independent of the profile type, the decrease in post-fire strength also increases with the increase of  $\beta$  and  $\gamma$  ratios. As a result, residual stresses in exposed pipe and box T-joints can cause strength loss. In this study, the main

geometrical parameters ( $\beta$ ,  $\gamma$  and profile type) affecting the strength of the joints were considered. In future studies, the behavior of tubular joints after fire will be examined by considering various geometric parameters, the load conditions applied to the brace-chord members and the angles between the brace-to-chord members.

### Kaynakça

- [1] CYTHYDE . Çelik Yapıların Tasarım, Hesap ve Yapımına Dair Esaslar. T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara; 2018.
- [2] CEN. 2005. Design of Steel Structures, EN 1993-1-8- Design of Joints, London: Brussels, Belgium ,138s.
- [3] Wardenier J., Kurobane Y., Packer J., van der Vegte G.J., Zhao X. 2008. Design guide for circular hollow section (CHS) joint under predominantly static loading, Second Edition, Verlag TUV Rheinland, Germany, Cidect.
- [4] Tan, K.H., Fung, T.C., Nguyen, M.P. 2012. Structural behaviour of CHS T-joints subjected to brace axial compression in fire condition, Journal of Structural Engineering, Cilt. 139 (1), s. 73-84. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000604
- [5] Ozyurt E. 2020. Finite element study on axially loaded reinforced Square Hollow Section T-joints at elevated temperatures, Thin-Walled Structures, Cilt. 148, s.1-16. DOI: oi.org/10.1016/j.tws.2019.106582
- [6] Ozyurt E., Wang Y. 2018. Resistance of Axially Loaded T-and X-Joints of Elliptical Hollow Sections at Elevated Temperatures–A Finite Element Study, Structures, Cilt. 14, s. 15-31. DOI: 10.1016/j.istruc.2018.01.004
- [7] Ozyurt E., Wang Y., Tan K. 2014. Elevated temperature resistance of welded tubular joints under axial load in the brace member, Engineering Structures, Cilt. 59, s.574-86. DOI: 10.1016/j.engstruct.2013.11.014
- [8] Lan X., Huang Y. 2016. Structural design of cold-formed stainless steel tubular X- and T-joints at elevated temperatures, Thin-Walled Structures, Cilt. 08, s.270-279. DOI: 10.1016/j.tws.2016.08.014
- [9] Lan X., Huang Y., Chan T.M., Young B. 2018. Static strength of stainless steel K- and N-joints at elevated temperatures, Thin-Walled Structures, Cilt. 122, s.501-509. DOI: 10.1016/j.tws.2017.10.009
- [10] Lan X., Wang F., Luo Z., Liu D., Ning C., Xu X. 2016. Joint strength reduction factor of internally ring-stiffened tubular joints at elevated temperatures. Advances in Structural Engineering, Cilt. 19, s.1650-1660. DOI: 10.1177/1369433216648049
- [11] Shao Y-B., Zheng Y., Zhao H., Yang D. 2016. Performance of tubular T-joints at elevated temperature by considering effect of chord compressive stress, Thin-Walled Structures, Cilt. 98, s.533-546. DOI: 10.1016/j.tws.2015.10.022
- [12] Shao Y-B., Zhao H., Yang D. 2017. Discussion on two methods for determining static strength of tubular T-joints at elevated temperature, Advances in Structural

### 6. Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Engineering, Cilt. 20, s.704-21. DOI: 10.1177/1369433216662287

[13] Shao Y-B., He S., Yang D. 2017. Prediction on static strength for CHS tubular K-joints at elevated temperature, Journal of Civil Engineering, Cilt. 21, s.900-911. DOI: 10.1007/s12205-016-0805-x

[14] Gao F., Guan X-Q., Zhu H-P., Xia Y. 2015. Hysteretic behaviour of tubular T-joints reinforced with doubler plates after fire exposure. Thin-Walled Structures. Cilt. 92, s.10-20. DOI: 10.1016/j.tws.2015.02.010.

[15] Gao F., Tang Z., Guan X., Zhu H., Chen Z. 2018. Ultimate strength of tubular T-joints reinforced with doubler plates after fire exposure. Thin-Walled Structures. Cilt. 132 s.616-628. DOI: 10.1016/j.tws.2018.09.021.

[16] Xu J., Jiang W., Han J., Wang J. 2022. Fire resistance of reinforced SHS T-joints considering gradient temperature effect under post-earthquake fire. Cilt.191 s.1-18. DOI: 10.1016/j.jcsr.2022.107195.

[17] Jin M., Zhao J., Chang J., Zhang D. 2012. Experimental and parametric study on the post-fire behavior of tubular T-joint, Journal of Constructional Steel Research, Cilt. 70, s.93-100. DOI: 10.1016/j.jcsr.2011.07.018

[18] Gao F., Zhu H., Liang H., Tian Y. 2017. Post-fire residual strength of steel tubular T-joint with concrete-filled chord, Journal of Constructional Steel Research, Cilt. 139, s.327-338. DOI: 10.1016/j.jcsr.2017.09.015

[19] Pandey M., Young B. 2021. Post-fire behaviour of cold-formed high strength steel tubular T-and X-joints, Journal of Constructional Steel Research, Cilt. 186, s. 1-26. DOI: 10.1016/j.jcsr.2021.106859

[20] Packer J.A., Wardenier J., Zhao X-L., van der Vegte G.J., Kurobane Y. 2009. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading, Second Edition. Verlag TUV Rheinland, 154s.

[21] Gao F., Guan X-Q., Zhu H-P., Liu X-N. 2015. Fire resistance behaviour of tubular T-joints reinforced with collar plates, Journal of Constructional Steel Research, Cilt. 115, s.106-120. DOI: 10.1016/j.jcsr.2015.07.021

[22] Wang Y., Ozyurt E. 2021. Static resistance of axially loaded multiplanar gap KK-joints of Circular Hollow sections at elevated temperatures, Engineering Structures, Cilt.229, s.1-12. DOI: doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111676

[23] He S., Shao Y-B., Zhang H., Wang Q. 2015. Parametric study on performance of circular tubular K-joints at elevated temperature, Fire Safety Journal, Cilt.71, s.174-186. DOI: 10.1016/j.firesaf.2014.11.001

[24] Cirpici B.K. Predicting and comparing the fire performance of a small-scale composite structure,

Challenge Journal of Concrete Research Letters, Cilt. 12, s. 72-87. DOI: 10.20528/ejcr.2021.03.001

[25] Yang J., Shao Y., Chen C. 2014. Experimental study on fire resistance of square hollow section (SHS) tubular T-joint under axial compression, Advanced Steel Construction, Cilt. 10, s.72-84. DOI: 10.18057/ijasc.2014.10.1.5

[26] CEN. 2005. Design of Steel Structures, EN 1993-1-2-Structural Fire Design, Brussels, Belgium, 84s.

[27] Ozyurt E., Yılmaz M. 2019. Düzlem İçi Eğilme Momenti Altındaki Elips Enkesitli T-birleşimlerinin Dayanımları, Gumushane Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, Cilt.9, s.547-556. DOI: 10.17714/gumusfenbil.504444

[28] Lu L.H., De Winkel G.D., Yu Y., Wardenier J. 1994. Deformation limit for the ultimate strength of hollow section joints, Proceedings of the Sixth International Symposium on Tubular Structure, 14-16 Aralık, Melbourne, Australia, 341-347.