



**BETONARME YAPI ELEMANLARINDA  
YANGIN ETKİLERİNİN SONLU ELEMANLAR  
ÇÖZÜMLEMESİ İLE İNCELENMESİ**

**Betül ALİŞ**

**Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL**

**Yüksek Lisans Tezi**

**İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**2020**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**BETONARME YAPI ELEMANLARINDA YANGIN ETKİLERİNİN  
SONLU ELEMANLAR ÇÖZÜMLEMESİ İLE İNCELENMESİ**

(Investigation of Fire Effects on Reinforced Concrete Structural Members  
via Finite Element Analysis)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Betül ALIŞ

Danışman: Doç Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL

Erzurum  
Temmuz, 2020

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü

TEZ KABUL VE ONAY TUTANAĞI

---

BETONARME YAPI ELEMANLARINDA YANGIN ETKİLERİNİN SONLU  
ELEMANLAR ÇÖZÜMLEMESİ İLE İNCELENMESİ

Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL danışmanlığında, Betül ALIŞ tarafından hazırlanan bu çalışma, 20/07/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Mekanik Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği /-oy çokluğu (-.../...)** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof. Dr. Habib UYSAL  
*Atatürk Üniversitesi*

Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL  
*Atatürk Üniversitesi*

Jüri Üyesi: Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI  
*Erzurum Teknik Üniversitesi*

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

**Prof. Dr. Mehmet KARAKAN**  
Enstitü Müdürü



## FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Graduate School of Natural and  
Applied Sciences

T.C.  
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ REKTÖRLÜĞÜ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

### ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL danışmanlığında sunulan “Betonarme Yapı Elemanlarında Yangın Etkilerinin Sonlu Elemanlar Çözümlemesi İle İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	2	30
Kuramsal Temeller	16	30
Materyal ve Yöntem	2	35
Bulgular	15	20
Tartışma	10	20
Tezin Geneli	8	25

**Not:** Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Betül ALIŞ	Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL
22.7.2020	22.7.2020
İmza:	İmza:

\* Tez ile ilgili YÖKTEZ'de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../... tarih ve ..... sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

## TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleŐtirilmesinde; engin bilgisinden, aydınlatıcı ve ufuk açıcı deneyimlerinden yararlandığım, çalışma boyunca bana yreklendirici ve yapıcı eleŐtiri atmosferi sağlayan danışman hocam Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL'a teşekkür ederim. KarŐılaŐtığım problemlerin çözümünde çalışma boyunca olduğu gibi gelecekte de rehberliğine ihtiyaç duyacağım değerli hocamın danışmanlığında bu tezin hazırlanmış olması benim için büyük bir ayrıcalık ve fırsat olduğu kadar mutluluk vericidir.

Tezin hazırlanması ve sonuçlandırılmasında cömert katkılarını, sonsuz sabır ve desteklerini benden esirgemeyen Dr. Öğr. Üyesi Burak Kaan ÇIRPICI, Dr. Öğr. Üyesi Muhammed Alperen ÖZDEMİR ve Dr. Öğr. Üyesi Gökçe AKGÜN'e teŐekkürü bir borç bilirim.

Tezin hazırlanmasında sağladığı katkı ve motivasyon sebebiyle bu süreçte bana destek olan değerli arkadaşım İnşaat Yüksek Mühendisi Muhammed Orhan ÖZTÜRK'e ayrıca minnettarım.

Bütün hayatım boyunca üzerimde büyük emekleri olan çok kıymetli babama, anneme ve her ihtiyacım olduğunda yanımda bulduğum kardeşlerime gösterdikleri özveri, anlayıŐ, sabır ve desteklerinden ötürü sonsuz teŐekkürlerimi sunarım.

**Betül ALIŞ**

**ÖZET**  
**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**BETONARME YAPI ELEMANLARINDA YANGIN ETKİLERİNİN**  
**SONLU ELEMANLAR ÇÖZÜMLEMESİ İLE İNCELENMESİ**  
**Betül ALİŞ**

**Danışman: Doç. Dr. Fatih Mehmet ÖZKAL**

**Amaç:** Bu çalışmada hem yapısal hem de yangın yükleri altında betonarme kirişlerin simülasyonunu gerçekleştirmek için güvenilir bir algoritmaya ulaşmayı ve bu sayede betonarme yapıların yangına güvenilirliği üzerine deneysel çalışmaları destekleyerek daha kolay bir yöntemle etkisini incelemek amaçlanmıştır.

**Yöntem:** Önerilen algoritma, ısısal çözümleme ile yapısal çözümlemenin ardışık bir bağlantı tekniği kullanılarak birleştirilmesine dayanılarak gerçekleştirilir. Bu çözümlerlerdeki yapı elemanları, ısıtma fazları sırasında ısısal ve mekanik tepkiyi yakalamak için iletkenlik, özgül ısı, gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, ısısal genleşme gibi ısısal ve yapısal özellikleri TS-EN-1991-1-2'ye göre, ANSYS yazılımı kullanılarak sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiştir. Bu çalışmada iki farklı kiriş modeli kullanılmıştır. Her iki kiriş ISO834 yangın eğrisine maruz bırakılmış olup, ilki kesme etkisi altında, ikincisi eğilme etkisi altında göçmesi beklenerek tasarlanmıştır.

**Bulgular:** Yangın sırasında yapısal bozulmalar, önemli ekonomik kayıplara, ciddi yaralanmalara ve ölümlere yol açar. Yangının yapısal güvenlik ve performans üzerindeki etkisini doğru bir şekilde tahmin etmek ve bu etkiyi azaltmanın yollarını belirlemek için yapılan araştırmalar, bina ve altyapı sektörlerinde sermaye yatırımlarındaki artışla birlikte son zamanlarda gittikçe çoğalmaktadır. Doğrusal olmayan termal sayısal çözümlerden kaynaklanan yangın süresi boyunca kirişler için ısı profilleri, literatürdeki deneysel sonuçlar ile uyumludur. Hem ısısal çözümleme hem de yapısal çözümler, geliştirilen sayısal modelin herhangi bir yangın altında betonarme kirişlerin davranışını simüle edebilmiştir.

**Sonuç:** Kalan taşıma kapasitesini değerlendirmek için gerçekleştirilen sayısal çözümlerinin sonuçları, literatürdeki sonuçlarla örtüşmüştür. Betonarme yapılarda yangının belli bir süre boyunca dayanımını arttırdığını, sıcaklık daha da artınca dayanımının neredeyse tamamını kaybettiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** ANSYS, betonarme, yüksek sıcaklık, sonlu elemanlar incelenmesi, nümerik çözümleme, birleşik ısısal-yapısal çözümleme

**Temmuz 2020, 194 sayfa**

**ABSTRACT**  
**MASTER THESIS**  
**INVESTIGATION OF FIRE EFFECTS ON REINFORCED CONCRETESE**  
**STRUCTURAL MEMBERS VIA FINITE ELEMENT ANALYSIS**  
**Betül ALİŞ**

**Supervisor: Assoc. Prof. Fatih Mehmet ÖZKAL**

**Purpose:** In this study, it was aimed to reach a reliable algorithm to perform simulation of reinforced concrete beams under both structural and fire loads, and thus, to support the experimental studies on the fire reliability of reinforced concrete structures and to examine its effect with an easier method.

**Method:** The proposed algorithm is based on combining thermal analysis and structural analysis using a sequential coordination technique. These analyzes use thermal and structural properties such as conductivity, specific heat, stress-strain relationship, thermal expansion to capture thermal and mechanical response during heating phases according to TS-EN-1991-1-2, using the finite element method over ANSYS software. Two different beam models were used in this study. Both beams are exposed to ISO834 fire curve, the first one is designed to fail under shear effect, the second one is expected to fail under bending effect.

**Findings:** Structural deterioration during fire leads to significant economic losses, serious injuries and deaths. Research to accurately estimate the effect of fire on structural safety and performance, and to identify ways to reduce this effect, has been increasing recently, alongside increase in capital investments in the building and infrastructure sectors. Throughout the fire period resulting from nonlinear thermal numerical analysis, heat profiles for beams are consistent with the experimental results in the literature. Both thermal analysis and structural analysis were able to simulate the behavior of reinforced concrete beams under any fire of the developed numerical model.

**Results:** The results of the numerical analysis, which were performed to evaluate the remaining carrying capacity overlapped with those in the literature. In reinforced concrete structures, it was observed that the fire increased its strength for a certain period of time and when the temperature increased, it lost almost all of its strength.

**Keywords:** ANSYS, reinforced concrete, high temperature, finite element analysis, numerical analysis, combined thermal-structural analysis

**July 2020, 194 pages**

## İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR .....	iii
ÖZET .....	iv
ABSTRACT .....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	x
TABLolar DİZİNİ.....	xx
GİRİŞ.....	1
Amaç ve Kapsam .....	1
Kaynak Özetleri .....	3
Yüksek sıcaklık üzerine yapılan deneysel çalışmalar .....	3
Yüksek sıcaklık üzerine yapılan nümerik çözümleme çalışmaları .....	10
KURAMSAL TEMELLER.....	18
Yangının Gelişimi .....	18
Tutuşma ve büyüme .....	19
Parlama.....	19
Tamamen gelişmiş yangın.....	19
Sönme.....	20
Standart Sıcaklık-Zaman Eğrisi .....	20
Yangın Yükünün Betona Etkisi .....	21
Mekanik özellikler .....	22
Isıl özellikler.....	31
Yangın Yükünün Çelik Donatıya Etkisi .....	34
Mekanik özellikler .....	34
Isıl özellikler.....	37
Yangın Yükünün Aderansa Etkisi.....	40
Betonarme Kirişlerde Kesme Etkisi.....	41
Kesme tehlikesi ve kesme kırılması .....	42
Betonarme Kirişlerde Eğilme Etkisi .....	44
MATERYAL ve YÖNTEM .....	49
Sonlu Elemanlar Yöntemi .....	49
Yapısal Çözümleme .....	49
Isısal Çözümleme .....	52



ANSYS’te Birleştirme Teknikleri ve Uygun Çözümleme Tipinin Seçimi .....	52
ANSYS Betonarme Kirişlerin Modellenmesi .....	54
Isıl çözümleme .....	55
Yapısal çözümleme .....	67
ANSYS’te Kiriş Modelleri.....	75
Eğilme çatlakları oluşarak göçmesi beklenen kiriş .....	77
Kesme çatlakları oluşarak göçmesi beklenen kiriş .....	78
Kiriş’in sonlu elemanlara bölünmesi ve bağ modellenmesi .....	79
ARAşTIRMA BULGULARI VE TARTIşMA .....	86
Eğilme Kirişleri .....	86
Eğilme kirişinin yük-sehim grafikleri .....	86
Eğilme kirişinin moment-eğrilik grafikleri .....	94
Eğilme kirişinin rijitlik-süneklik katsayıları .....	101
Eğilme kirişi betonunun ısı profilleri .....	102
Eğilme kirişi donatılarının ısı profilleri.....	109
Eğilme kirişi betonunun asal çekme gerilmeleri .....	116
Eğilme kirişinin asal basınç gerilmeleri .....	121
Eğilme kirişinin donatı gerilmeleri .....	126
Eğilme kirişinin beton üçüncü çatlak dağılımları .....	131
Kesme Kirişleri .....	135
Kesme kirişinin yük-sehim grafikleri.....	136
Kesme kirişinin moment-eğrilik grafikleri.....	144
Kesme kirişinin rijitlik-süneklik katsayıları.....	151
Kesme kirişi betonunun ısı profilleri.....	151
Kesme kirişi donatısının ısı profilleri.....	158
Kesme kirişi betonunun asal çekme gerilmeleri .....	166
Kesme kirişinin asal basınç gerilmeleri .....	171
Kesme kirişinin donatı gerilmeleri.....	176
Kesme kirişinin beton üçüncü çatlak dağılımları.....	181
SONUÇ.....	185
KAYNAKLAR.....	187
ÖZGEÇMİş.....	194

## KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

<b>ASTM E119</b>	Amerikan Yangın Eğrisi
<b>SEY</b>	Sonlu Elemanlar Yöntemi
<b>HSC</b>	Yüksek Mukavemetli Beton
<b>NSC</b>	Normal Mukavemetli Beton
<b>UTM</b>	Evrensel Test Makinesi
<b>CEM I</b>	Portland Çimentosu
<b>ACI</b>	Amerikan Beton Enstitüsü
<b>ISO834</b>	Iso Yangın Eğrisi
<b>3B</b>	Üç Boyutlu
<b>CEB- FIP</b>	CEB-FIB Model Kodu
<b>TS EN</b>	Türk Standartları Enstitüsü Yangın Yönetmeliği
<b>°C</b>	Santigrat derece
<b>Ca(OH)<sub>2</sub></b>	Kalsiyum hidroksit
<b>CaO</b>	Kalsiyum oksit
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Su
<b>φ</b>	Donatı çapı
<b>T<sub>0</sub></b>	Başlangıç sıcaklık için oda sıcaklığı
<b>T<sub>h</sub></b>	Saat cinsinden zaman
<b>f<sub>cr</sub></b>	Isıtmadan sonra kalan mukavemet
<b>ε<sub>or</sub></b>	Isıtma sonrası maksimum gerilme
<b>E<sub>pr</sub></b>	Isıtma sonrası maksimum gerilmedeki sekant elastik modülü
<b>E<sub>or</sub></b>	Başlangıç tanjant elastik modülü
<b>f<sub>c,θ</sub></b>	Basınç dayanımı
<b>ε<sub>c1,θ</sub></b>	F <sub>c,θ</sub> ' ye karşılık gelen gerilme
<b>ε<sub>cu1,θ</sub></b>	F <sub>c,θ</sub> ' ye karşılık gelen nihai gerilme
<b>ρ</b>	Yoğunluk
<b>C<sub>p</sub></b>	Özgül ısı
<b>K<sub>c</sub></b>	Saat cinsinden zaman
<b>f<sub>cr</sub></b>	Isıtmadan sonra kalan mukavemet
<b>λc</b>	Isıl iletkenlik katsayısı
<b>E<sub>s,θ</sub></b>	Doğrusal elastik aralığın eğimi

$f_{sp,\theta}$	Orantılılık sınırı
$\epsilon_{sp\theta}$	$F_{sp,\theta}$ 'ye karşılık gelen birim şekil değiştirme
$f_{sy,\theta}$	Maksimum gerilme seviyesi
$\epsilon_{sy\theta}$	$F_{sy,\theta}$ 'ye karşılık gelen birim şekil değiştirme
<b>S420</b>	Soğuk işlenmiş donatı çeliği
<b>M</b>	Moment
$V_d$	Kesme kuvveti
<b>a</b>	Kesme açıklığı
<b>d</b>	Kiriş etkili yükseklik oranının
$F_c$	Basınç bölgesi iç kuvvetler
$F_s$	Çekme bölgesi iç kuvvetler
$V_{cr}$	Kesitin kesmede çatlama dayanımı
$f_{ctd}$	Betonun tasarım eksenel çekme dayanımı
$b_w$	Kiriş genişliği
$V_w$	Etriyenin karşılamak zorunda olduğu kesme kuvveti
$S_k$	Sarılma bölgesinde etriye aralığı
$A_{sw}$	Etriye donatısının aralığı
$\rho_{min}$	Minimum donatı oranı
$f_{ctd}$	Betonun tasarım eksenel çekme dayanımı
$f_{yd}$	Donatı tasarım akma dayanımı

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Yangın üçgeni (Denoel, 2007) .....	18
Şekil 2. Yangın gelişimi (Khoury, 2008) .....	19
Şekil 3. Doğal yangına kıyasla standart yangın eğrisi (Wit, 2011).....	20
Şekil 4. Standart yangın eğrileri (Hacıemiroğlu, 2014) .....	20
Şekil 5. Farklı sıcaklıklarda betonun deneysel gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Chang et al. 2007) .....	23
Şekil 6. 20, 210, 416, 611 ve 795 °C'lik gerilme-gerinim eğrilerinin $f_c = 27$ MPa için deney sonuçları ile karşılaştırılması (Chang et al. 2006) .....	24
Şekil 7. Yüksek sıcaklıklarda beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi eğrisi (Eurocode-2, 2004).....	25
Şekil 8. Oda sıcaklığındaki (20°C) beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi eğrisi (EN 1992-1-1) .....	26
Şekil 9. Oda sıcaklığındaki (20°C) C25 sınıfı betonun gerilme-şekil değiştirme değerleri (Eurocode 1992-1-1) .....	27
Şekil 10. Betonun sıcaklık altındaki elastisite modülü değişimi (Hacıemiroğlu, 2014).....	28
Şekil 11. $f_{co} = 50$ MPa olan beton için yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımı değişimi (ASCE-ACI 426, 1973 ) .....	29
Şekil 12. Beton çekme dayanımının ( $f_{ck,t}$ ) yüksek sıcaklıklardaki azalmasını hesaplama için kullanılan $k_{c,t}(\theta)$ (TS-EN 1992-1-2) .....	30
Şekil 13. Hem yavaş ısıtmalı hem de hızlı ısıtmalı betonun çekme mukavemeti için azalma yüzdesinin değişimi (ASCECode78, 1973).....	30
Şekil 14. Silis agregalı beton için ısıl genleşme değerleri (Hacıemiroğlu, 2014).....	31
Şekil 15. Çeşitli nem içerikli yüksek sıcaklıklarda beton için özgül ısı değerlerinin karşılaştırması (TS-EN 1992-1-2).....	33
Şekil 16. Yüksek sıcaklık altında donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (TS-EN 1992-1-2) .....	35
Şekil 17. Yüksek sıcaklık altında donatı çeliğinin TS EN 1991-1-2'deki gerilme-şekil değiştirme parametreleri .....	36
Şekil 18. Çelik için sıcaklıkla değişen ısıl genleşme değerleri (Hacıemiroğlu, 2014).....	37
Şekil 19. Yüksek sıcaklıklarda çelik için ısıl genleşme katsayısının değişimi (ASCECode78, 1973) .....	38
Şekil 20. Yüksek sıcaklıklar altındaki çeliğin özgül ısı değerleri (Hacıemiroğlu, 2014) .....	39
Şekil 21. Çeliğin yüksek sıcaklıklarda gerilme kayma ilişkisi (Diederichs and Schneider,	

1981) .....	40
<b>Şekil 22.</b> Basit Kesme Altında Asal Gerilmeler ve Çatlaklar (Ersoy ve Özcebe, 2001) .....	43
<b>Şekil 23.</b> Homojen malzemeli kiriş eksenine dik kesit üzerinde asal gerilme doğrultularının değişimi (Arslan, 2005) .....	43
<b>Şekil 24.</b> Çekme gerilmesi düzlemlerinde beton ve donatıda etki diyagramı (Ersoy ve Özcebe, 2001) .....	44
<b>Şekil 25.</b> Betonarme kirişte şekil değiştirme ve iç kuvvet dağılımı.(Özhan, 2012).....	45
<b>Şekil 26.</b> Betonarme kirişte eğilme etkisi altında çatlak oluşumu.(Özhan, 2012) .....	46
<b>Şekil 27.</b> Beton ve çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi.(Özhan, 2012).....	47
<b>Şekil 28.</b> Ortalama bağ gerilmesi-sıyrılma eğrisi (CEP-FIB model kodu, 1990) .....	50
<b>Şekil 29.</b> Sıralı iki çözümleme adımları .....	53
<b>Şekil 30.</b> Doğrudan iki çözümleme adımları.....	53
<b>Şekil 31.</b> Çözümleme seçimi (ANSYS 18.2) .....	55
<b>Şekil 32.</b> SOLID70 (ANSYS 18.2) .....	55
<b>Şekil 33.</b> LINK33 (ANSYS 18.2) .....	56
<b>Şekil 34.</b> COMBIN39 (ANSYS 18.2).....	56
<b>Şekil 35.</b> Elemanların tanımlanması.....	57
<b>Şekil 36.</b> Elemanlara sabit değer (real constant) tanımlanması (ANSYS 18.2).....	58
<b>Şekil 37.</b> Betonun farklı sıcaklıklarda özgül ısı eğrisi (ANSYS 18.2).....	59
<b>Şekil 38.</b> Betonun farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayısı eğrisi (ANSYS 18.2) .....	60
<b>Şekil 39.</b> Betonun farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayısı eğrisi (ANSYS 18.2) .....	60
<b>Şekil 40.</b> Çeliğin farklı sıcaklıklarda özgül ısı eğrisi (ANSYS 18.2).....	61
<b>Şekil 41.</b> Çeliğin farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayısı eğrisi (ANSYS 18.2) .....	62
<b>Şekil 42.</b> Çeliğin farklı sıcaklıklarda yoğunluk değişimi eğrisi (ANSYS 18.2) .....	62
<b>Şekil 43.</b> Elemanlara malzeme özelliklerinin tanımlanması (ANSYS 18.2) .....	63
<b>Şekil 44.</b> Isıl çözümleme türünün seçilmesi (ANSYS 18.2) .....	64
<b>Şekil 45.</b> Konveksiyon yükünün uygulaması (ANSYS 18.2) .....	64
<b>Şekil 46.</b> İç sıcaklık tanımlaması (ANSYS 18.2).....	64
<b>Şekil 47.</b> Kesme kirişi yangını temsili .....	65
<b>Şekil 48.</b> Eğilme kirişi yangını temsili .....	66
<b>Şekil 49.</b> Konveksiyon yükünün yeri ve farklı film katsayısı değerleri (ANSYS 18.2).....	66
<b>Şekil 50.</b> ISO834 yangın eğrisi .....	67
<b>Şekil 51.</b> SOLID65 (ANSYS 18.2) .....	68
<b>Şekil 52.</b> LINK180 (ANSYS 18.2) .....	68
<b>Şekil 53.</b> Betonun farklı sıcaklıklarda elastisite modülü eğrileri (ANSYS 18.2) .....	69

<b>Şekil 54.</b> Betonun farklı sıcaklıklarda Poisson oranı eğrileri (ANSYS 18.2).....	70
<b>Şekil 55.</b> 20°C ile 900°C arasındaki sıcaklıklarda betonun gerilme-şekil değiştirme ilişkileri.....	70
<b>Şekil 56.</b> Farklı sıcaklıklardaki betonun malzeme özellikleri (ANSYS 18.2) .....	71
<b>Şekil 57.</b> Betonun farklı sıcaklıklarda ısıl genişleme katsayısı eğrileri (ANSYS 18.2).....	72
<b>Şekil 58.</b> Çelik donatının farklı sıcaklıklarda elastisite modülü eğrileri (ANSYS 18.2) .....	73
<b>Şekil 59.</b> Çelik donatının farklı sıcaklıklarda Poisson oranı eğrileri (ANSYS 18.2).....	73
<b>Şekil 60.</b> 20°C ile 900°C arasındaki sıcaklıklarda çelik donatının gerilme-şekil değiştirme ilişkileri.....	74
<b>Şekil 61.</b> Çelik donatının farklı sıcaklıklarda ısıl genişleme katsayısı eğrileri (ANSYS 18.2) .....	75
<b>Şekil 62.</b> ANSYS ısısal-yapısal çözümleme adımları .....	76
<b>Şekil 63.</b> Eğilme kirişi tasarımı .....	77
<b>Şekil 64.</b> Eğilme kirişi için kesme-moment diyagramı .....	77
<b>Şekil 65.</b> Kesme kirişi tasarımı .....	78
<b>Şekil 66.</b> Kesme kirişleri için kesme-moment diyagramı .....	78
<b>Şekil 67.</b> Kirişler için beton hacmi mesh görünümü (ANSYS 18.2) .....	79
<b>Şekil 68.</b> Eğilme kirişi için donatı hacmi mesh görünümü (ANSYS 18.2) .....	80
<b>Şekil 69.</b> Kesme kirişi için donatı hacmi mesh görünümü (ANSYS 18.2).....	80
<b>Şekil 70.</b> COMBIN39 elemanının SOLID65 ve LINK180 elemanlarının düğüm noktalarıyla birleştirilmesi (Özdemir, 2019).....	81
<b>Şekil 71.</b> Bağ gerilmesi-donatı sıyrılması modelleri (Özdemir, 2019) .....	82
<b>Şekil 72.</b> COMBIN39 için oda sıcaklığında kullanılan bağ gerilmesi-donatı sıyrılması modeli (Eligehausen et al. 1983).....	83
<b>Şekil 73.</b> 2 boyutlu Combin 39 beton ve donatı arasındaki bağlanma durumu (Khalaf et al. 2016) .....	83
<b>Şekil 74.</b> Farklı sıcaklık değerleri için ortalama bağ gerilmesi-donatı sıyrılması modeli.....	84
<b>Şekil 75.</b> Kirişlerin mekanik yükleme ve mesnet koşulları.....	85
<b>Şekil 76.</b> 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	87
<b>Şekil 77.</b> 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	87
<b>Şekil 78.</b> 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	88
<b>Şekil 79.</b> 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	88
<b>Şekil 80.</b> 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	89
<b>Şekil 81.</b> 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	89
<b>Şekil 82.</b> 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	90

Şekil 83. 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	90
Şekil 84. 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	91
Şekil 85. 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	91
Şekil 86. 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	92
Şekil 87. 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği.....	92
Şekil 88. Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinin taşıdığı maksimum yük değerleri.....	93
Şekil 89. Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinde meydana gelen maksimum sehim değerleri .....	93
Şekil 90. Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinin enerji tüketim kapasiteleri.....	94
Şekil 91. 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	94
Şekil 92. 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	95
Şekil 93. 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	95
Şekil 94. 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	96
Şekil 95. 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	96
Şekil 96. 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	97
Şekil 97. 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	97
Şekil 98. 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	98
Şekil 99. 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	98
Şekil 100. 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	99
Şekil 101. 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	99
Şekil 102. 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği.....	100
Şekil 103. Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinde meydana gelen maksimum moment değerleri.....	100
Şekil 104. Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinde meydana gelen maksimum moment anındaki eğrilik değerleri.....	101
Şekil 105. Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerindeki rijitlik katsayıları .....	101
Şekil 106. Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerindeki süneklik katsayıları.....	102
Şekil 107. Betonun ısı profili için kesit alma şekli temsili.....	102
Şekil 108. 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin beton iç kesit profili .....	103
Şekil 109. 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili.....	103
Şekil 110. 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili.....	104
Şekil 111. 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili.....	104
Şekil 112. 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili.....	105
Şekil 113. 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili.....	105

Şekil 114. 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışlerinin beton iç kesit profili.....	106
Şekil 115. 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışlerinin beton iç kesit profili.....	106
Şekil 116. 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışlerinin beton iç kesit profili.....	107
Şekil 117. 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışlerinin beton iç kesit profili.....	107
Şekil 118. 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışlerinin beton iç kesit profili.....	108
Şekil 119. 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışlerinin beton iç kesit profili.....	108
Şekil 120. 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	109
Şekil 121. 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	110
Şekil 122. 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	110
Şekil 123. 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	111
Şekil 124. 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	111
Şekil 125. 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	112
Şekil 126. 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	113
Şekil 127. 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	113
Şekil 128. 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	114
Şekil 129. 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	114
Şekil 130. 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	115
Şekil 131. 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kırıışinin donatı ısı profili.....	116
Şekil 132. 20°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	116
Şekil 133. 100°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	117
Şekil 134. 200°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	117
Şekil 135. 300°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	118
Şekil 136. 400°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	118
Şekil 137. 500°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	118
Şekil 138. 600°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	119
Şekil 139. 700°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	119
Şekil 140. 800°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	120
Şekil 141. 900°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	120
Şekil 142. 1000°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	120
Şekil 143. 1100°C'deki betonun asal çekme gerilmesi.....	121
Şekil 144. 20°C'deki betonun asal basınç gerilmesi.....	122
Şekil 145. 100°C'deki betonun asal basınç gerilmesi.....	122
Şekil 146. 200°C'deki betonun asal basınç gerilmesi.....	122
Şekil 147. 300°C'deki betonun asal basınç gerilmesi.....	123
Şekil 148. 400°C'deki betonun asal basınç gerilmesi.....	123



<b>Şekil 149.</b> 500°C'deki betonun asal basınç gerilmesi .....	124
<b>Şekil 150.</b> 600°C'deki betonun asal basınç gerilmesi .....	124
<b>Şekil 151.</b> 700°C'deki betonun asal basınç gerilmesi .....	124
<b>Şekil 152.</b> 800°C'deki betonun asal basınç gerilmesi .....	125
<b>Şekil 153.</b> 900°C'deki betonun asal basınç gerilmesi .....	125
<b>Şekil 154.</b> 1000°C'deki betonun asal basınç gerilmesi .....	126
<b>Şekil 155.</b> 1100°C'deki betonun asal basınç gerilmesi .....	126
<b>Şekil 156.</b> 20°C'deki donatıların gerilmesi .....	127
<b>Şekil 157.</b> 100°C'deki donatıların gerilmesi .....	127
<b>Şekil 158.</b> 200°C'deki donatıların gerilmesi .....	127
<b>Şekil 159.</b> 300°C'deki donatıların gerilmesi .....	128
<b>Şekil 160.</b> 400°C'deki donatıların gerilmesi .....	128
<b>Şekil 161.</b> 500°C'deki donatıların gerilmesi .....	129
<b>Şekil 162.</b> 600°C'deki donatıların gerilmesi .....	129
<b>Şekil 163.</b> 700°C'deki donatıların gerilmesi .....	129
<b>Şekil 164.</b> 800°C'deki donatıların gerilmesi .....	130
<b>Şekil 165.</b> 900°C'deki donatıların gerilmesi .....	130
<b>Şekil 166.</b> 1000°C'deki donatıların gerilmesi .....	131
<b>Şekil 167.</b> 1100°C'deki donatıların gerilmesi .....	131
<b>Şekil 168.</b> 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	132
<b>Şekil 169.</b> 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	132
<b>Şekil 170.</b> 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	132
<b>Şekil 171.</b> 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	132
<b>Şekil 172.</b> 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	133
<b>Şekil 173.</b> 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	133
<b>Şekil 174.</b> 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	133
<b>Şekil 175.</b> 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	134

<b>Şekil 176.</b> 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	134
<b>Şekil 177.</b> 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları.....	134
<b>Şekil 178.</b> 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları.....	135
<b>Şekil 179.</b> 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	135
<b>Şekil 180.</b> 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	136
<b>Şekil 181.</b> 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	137
<b>Şekil 182.</b> 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	137
<b>Şekil 183.</b> 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	138
<b>Şekil 184.</b> 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	138
<b>Şekil 185.</b> 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	139
<b>Şekil 186.</b> 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	139
<b>Şekil 187.</b> 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	140
<b>Şekil 188.</b> 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	140
<b>Şekil 189.</b> 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	141
<b>Şekil 190.</b> 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	141
<b>Şekil 191.</b> 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği .....	142
<b>Şekil 192.</b> Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerinin taşıdıkları maksimum taşıdıkları yük değerleri.....	142
<b>Şekil 193.</b> Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerinde meydana gelen maksimum sehim değerleri .....	143
<b>Şekil 194.</b> Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerinin enerji tüketim kapasiteleri.....	143
<b>Şekil 195.</b> 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	144
<b>Şekil 196.</b> 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	144
<b>Şekil 197.</b> 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	145
<b>Şekil 198.</b> 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	145
<b>Şekil 199.</b> 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	146
<b>Şekil 200.</b> 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	146
<b>Şekil 201.</b> 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	147
<b>Şekil 202.</b> 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	147
<b>Şekil 203.</b> 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	148
<b>Şekil 204.</b> 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	148

Şekil 205. 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	149
Şekil 206. 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği .....	149
Şekil 207. Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerinde meydana gelen maksimum moment değerleri.....	150
Şekil 208. Farklı sıcaklıklara maruz kalan kirişlerinde meydana gelen maksimum moment anındaki eğrilik değerleri .....	150
Şekil 209. Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerindeki rijitlik katsayıları .....	151
Şekil 210. Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerindeki süneklik katsayıları .....	151
Şekil 211. Betonun ısı profili için kesit alma şekli temsili.....	152
Şekil 212. 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	152
Şekil 213. 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	153
Şekil 214. 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	153
Şekil 215. 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	154
Şekil 216. 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	154
Şekil 217. 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	155
Şekil 218. 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	155
Şekil 219. 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	156
Şekil 220. 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	156
Şekil 221. 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	157
Şekil 222. 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	157
Şekil 223. 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili .....	158
Şekil 224. 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	159
Şekil 225. 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	159
Şekil 226. 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	160
Şekil 227. 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	160
Şekil 228. 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	161
Şekil 229. 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	162
Şekil 230. 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	162
Şekil 231. 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	163
Şekil 232. 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	163
Şekil 233. 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	164
Şekil 234. 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	165
Şekil 235. 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili .....	165
Şekil 236. 20°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	166
Şekil 237. 100°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	166

Şekil 238. 200°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	167
Şekil 239. 300°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	167
Şekil 240. 400°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	167
Şekil 241. 500°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	168
Şekil 242. 600°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	168
Şekil 243. 700°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	169
Şekil 244. 800°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	169
Şekil 245. 900°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	169
Şekil 246. 1000°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	170
Şekil 247. 1100°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri .....	170
Şekil 248. 20°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	171
Şekil 249. 100°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	172
Şekil 250. 200°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	172
Şekil 251. 300°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	172
Şekil 252. 400°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	173
Şekil 253. 500°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	173
Şekil 254. 600°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	174
Şekil 255. 700°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	174
Şekil 256. 800°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	174
Şekil 257. 900°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	175
Şekil 258. 1000°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	175
Şekil 259. 1100°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri .....	176
Şekil 260. 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı gerilmeleri.....	176
Şekil 261. 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı gerilmeleri.....	177
Şekil 262. 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	177
Şekil 263. 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	177
Şekil 264. 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	178
Şekil 265. 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	178
Şekil 266. 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	179
Şekil 267. 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	179
Şekil 268. 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	179
Şekil 269. 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	180
Şekil 270. 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	180
Şekil 271. 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri .....	181
Şekil 272. 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak	

dağılımları .....	181
<b>Şekil 273.</b> 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	181
<b>Şekil 274.</b> 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	182
<b>Şekil 275.</b> 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	182
<b>Şekil 276.</b> 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	182
<b>Şekil 277.</b> 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	183
<b>Şekil 278.</b> 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	183
<b>Şekil 279.</b> 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	183
<b>Şekil 280.</b> 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	183
<b>Şekil 281.</b> 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	184
<b>Şekil 282.</b> 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	184
<b>Şekil 283.</b> 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları .....	184

## TABLolar DİZİNİ

<b>Tablo 1.</b> Silis Agregaya Sahip Betonun Sıcaklığa Bağlı Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi (TS EN 1992-1-2).....	25
<b>Tablo 2.</b> Yüksek Sıcaklıkta Tek Eksenli Beton İçin Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisinin Matematiksel Modeli (EC 1992-1-2, 2004) .....	26
<b>Tablo 3.</b> TS EN 1992-1-2’de Verilen Soğuk İşlenmiş Donatının Gerilme – Birim Şekil Değişirme İlişkisine Ait Yüksek Sıcaklıklardaki Elastisite Modülü ve Gerilmelerdeki Kayıplar .....	35
<b>Tablo 4.</b> Doğrudan Yapısal-Isıl Çözömlerinde Kullanılan Elemanlar (ANSYS 18.2) .....	54
<b>Tablo 5.</b> LINK33 Elemanı İçin Örnek Gerçek Sabit .....	57
<b>Tablo 6.</b> Betonun Farklı Sıcaklıklarda Özgöl Isı Değerleri .....	58
<b>Tablo 7.</b> Betonun Farklı Sıcaklıklarda Isıl İletkenlik Katsayısı Değerleri .....	59
<b>Tablo 8.</b> Betonun Farklı Sıcaklıklarda Yoğunluk Değerleri.....	60
<b>Tablo 9.</b> Çelik Donatının Farklı Sıcaklıklarda Özgöl Isı Değerleri .....	61
<b>Tablo 10.</b> Çelik Donatının Farklı Sıcaklıklarda Isıl İletkenlik Katsayısı Değerleri .....	61
<b>Tablo 11.</b> Konveksiyon Yükü Detayları .....	66
<b>Tablo 12.</b> Betonun Farklı Sıcaklıklardaki Elastisite Modülü ve Poisson Oranı .....	69
<b>Tablo 13.</b> Farklı Sıcaklıklardaki Betonun Gerilme-Şekil Değişirme Değerleri .....	70
<b>Tablo 14.</b> Farklı Sıcaklıklardaki Beton İçin Isıl Genleşme Katsayısı Değerleri.....	71
<b>Tablo 15.</b> Çeliğin Farklı Sıcaklıklardaki Elastisite Modülü Ve Poisson Oranı .....	72
<b>Tablo 16.</b> Farklı Sıcaklıklardaki Çeliğin Gerilme-Şekil Değişirme Değerleri .....	74
<b>Tablo 17.</b> Farklı Sıcaklıklardaki Çelik İçin Isıl Genleşme Katsayısı Değerleri .....	75
<b>Tablo 18.</b> Eğilme Kirişinin Tasarım Tablosu .....	78
<b>Tablo 19.</b> Kesme Kirişlerinin Tasarım Tablosu.....	79
<b>Tablo 20.</b> Eğilme Kirişlerinin Sıcaklıklara Göre Maksimum Isı Değerleri.....	86
<b>Tablo 21.</b> Kesme Kirişlerinin Sıcaklıklara Göre Maksimum Isı Değerleri .....	136

# GİRİŞ

## Amaç ve Kapsam

Yangın sırasında yapısal bozulma ve çökme, her yıl birçok olayda görülür ve kaydedilir. Bu tür olaylar, önemli ekonomik mal kaybına ek olarak ciddi yaralanmalara ve ölümlere yol açar. Betonarme, dünyada en yaygın kullanılan inşaat malzemesi olarak kabul edilir. Mukavemet, dayanıklılık, inşaat hızı ve maliyet etkinliği gibi birçok avantaja sahiptir. Beton yanmaz bir malzemedir ve düşük ısı iletkenliğine sahiptir, bu da yangına karşı dirençli olma avantajını sağlar (Denoel 2007). Bir beton elemanın dış çevresi yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, betonun iç kısmı yük taşıma kapasitesini korur. Ayrıca, düşük ısı iletkenliği, çelik donatıları yüksek sıcaklıklardan korur. Bu faydalardan bağımsız olarak, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında mukavemeti bozulduğundan, yangına karşı beton direnci tasarım aşamalarında dikkate alınmalıdır. Bir yangın olayı, birçok ölüme neden olan ve her yıl yüksek değerde maddi zarara yol açan yıkıcı bir güç olabilir (Buchanan 2002). Bu nedenle yangına dayanıklı tasarım ilkesi bir zorunluluk haline gelmiştir. Yangına dayanıklı tasarımlı yapılar, tahliye ve yangın söndürme işlemleri sırasında güvenliği garanti eder ve bir süre yangına maruz kalma süresi boyunca dayanımı koruyarak yeterli kapasiteye sahip olmasını sağlar (Lataille 2003). Yangın tasarım hükümlerini iyileştirmek için, yangına maruz kalan betonarme yapıların davranışlarını araştıran çalışmalar son zamanlarda dikkat çekmektedir (Youssef and Moftah 2007). Bu araştırmalar yangın deneyleri ve ileri analitik yöntemlerle incelenmiştir (Khoury 2007). Yangın deneyleri maliyetli ve çok süre almaktadır. Gelişmiş analitik yöntemler genellikle sonlu elemanlar yöntemi (SEY) kullanımına dayanır (Lie 1992).

Beton yapıların yüksek sıcaklıklara maruz kalması, beton ve çelik donatıların mekanik ve fiziksel özelliklerinde ve aralarındaki aderans üzerine önemli kayıplara yol açar. Yangın esnasındaki aderans özelliğinin bozulması beton yapıların yük kapasitesini önemli ölçüde etkileyebilir. Bu nedenle betonarme yapıların yapısal yangın mühendisliği tasarımı için aderans davranışlarının da dikkate alınması gerekir. Günümüzde, yüksek sıcaklıklarda beton ve donatıların malzeme bozulmaları hakkında bilgi genel olarak mevcuttur. Bununla birlikte, beton ve donatı arasındaki aderansa yüksek sıcaklıkların etkisi üzerindeki araştırmalar hala sınırlıdır.

Yüksek sıcaklıklarda beton ve donatı arasındaki bağ özelliklerinin etkisini dikkate almak için etkili modellerin bulunmadığı dönemlerde, yangında betonarme yapıların

davranışını tahmin etmek için geliştirilen sayısal modellerin çoğunluğu tam bağı etkileşimi varsayımına dayanmaktaydı (Huang 2010).

Yangının yapısal güvenlik ve performans üzerindeki etkisini doğru bir şekilde tahmin etmek ve bu etkiyi azaltmanın yollarını belirlemek için araştırmalar zorunlu hale gelmiştir. Bu nedenle, bu araştırmanın temel amacı, yangın koşullarında beton ile donatı arasındaki aderansın öngörülmesi için sağlam sayısal modeller geliştirmek ve betonarme elemanın ısı-yapısal çözümlemesini gerçekleştirmek için güvenilir bir yaklaşım geliştirmek ve yangın yüklerine maruz kalma esnasında betonarme yapıların performansını bu yaklaşımı etkileyen kritik parametreleri değerlendirmek için kullanmaktır.

Yangın direncini değerlendirmek için yapılan laboratuvar deneyleri pahalı ve zaman alıcı olup farklı parametreleri incelemek için sınırlamalar bulunmaktadır. Bu nedenle, yangın deneylerine bir alternatif olarak, betonarme elemanların yapısal yangın direncini değerlendirmek için sayısal modellerin kullanılması ön plana çıkmaktadır. Sayısal modeller, araştırmacıların çeşitli parametreleri etkili ve uygun maliyetli bir şekilde dikkate almalarını sağlar. Bu tezde, hem yapısal hem de yangın yükleri altında betonarme kirişleri simüle etmek için güvenilir bir algoritmaya ulaşmak hedeflenmiştir.

Bu çalışmada farklı iki temel model geliştirilmiştir:

İlk model, kesme etkisinde göçmesi beklenecek şekilde tasarlanmış olup 20°C-1100°C aralığında ısıtılan 10 adet kiriş modellenmiş ve dayanımları belirlenmiştir.

İkinci model, eğilme etkisinde göçmesi beklenecek şekilde tasarlanmış olup 20°C-1100°C sıcaklık aralıklarında ısıtılmış 10 adet kiriş modellenmiş olup dayanımları belirlenmiştir.

Önerilen modeller, yüksek sıcaklık altındaki betonarme yapıların üç boyutlu çözümlemesi için ANSYS programında modellenmiş olup ısısal ve yapısal çözümlemeleri gerçekleştirilmiştir.

Tez, beş bölümden oluşmaktadır: Bölüm 1, yangın koşulları altında yapısal yangın mühendisliği ve yapısal tasarıma giriş niteliğindedir. Yüksek sıcaklık altında betonarme yapı elemanları için beton ve donatı arasındaki aderans konusunda bir giriş ve arka plan sağlar. Ayrıca, beton ve donatı üzerine yapılmış olan literatürdeki çalışmalar aktarılmıştır. Bu çalışmanın temel amaçları bu bölümde sunulmaktadır. Bölüm 2’de, yangın oluşumu ve yangının beton ve çelik üzerine etkisi yönetmeliklerle incelenmiştir. Bölüm 3’te, sonlu elemanlar yöntemi ile ANSYS programında kirişlerin modelleme adımları ve farklı sıcaklıkta değişen malzeme özellikleri, sonlu elemanlardaki kesit analizleri aktarılmıştır. Bölüm 4’te,



modellenen kirişlerin sonuçları, rijitlik-süneklik katsayıları, yük-yer değiştirme eğrileri, moment-eğrilik ilişkileri ve enerji tüketim kapasiteleri sonuçlarının farklı açılardan birbirleri ile karşılaştırılması verilmektedir. Bölüm 5'te ise, bu tez kapsamındaki araştırmaya dayalı sonuçlar verilmekte ve gelecekteki araştırma çalışmaları için bazı öneriler sunulmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, yangın geçirdikten sonra yeniden kullanılması düşünülen betonarme yapıların kalan dayanımı hakkında fikir ve bilgi edinilmesi amaçlanmıştır.

## **Kaynak Özetleri**

### **Yüksek sıcaklık üzerine yapılan deneysel çalışmalar**

Beton ve çelik yanıcı olmayan malzemeler olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında mukavemeti ve dayanımı azalır. Bu etkiler, yapısal elemanların yük taşıma kapasitesinde bir azalmaya yol açar (Gabriel 2000).

### ***Yüksek sıcaklığın beton ve betonarme yapıların üzerine etkisi***

Lin and Ellingwood (1987), altı adet betonarme kirişin ASTM E119 standart yangına maruz kalması durumunda eğilme etkisini incelemişlerdir. Çelik donatılardaki sıcaklığın, kirişlerin mukavemetini etkileyen en kritik faktör olduğunu bulmuşlardır.

Hertz (1992) yüksek sıcaklıkların beton üzerindeki etkilerini açıklamıştır. Başlangıçta, beton sıcaklığı yükseldiğinde, betonun içindeki serbest su buharlaşır. Bu buharlaşma beton içinde basınç birikmesine neden olur. Sıcaklık yaklaşık 150°C'ye ulaştığında, hidratlı kalsiyum silikatlara kimyasal olarak bağlanan su açığa çıkar. 300°C sıcaklıkta agregalar genişler ve çimento hamuru büzölmeye başlar. Sıcaklık 400°C ile 600°C arasında bir değere ulaştığında, kalsiyum hidroksit  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  kalsiyum oksit  $\text{CaO}$  ve su  $\text{H}_2\text{O}$ 'ya dönüşerek ilave su buharı ve daha fazla basınç oluşturur. Bu basınç çok yüksek olabilir ve betonun çatlamasına ve parçalanmasına neden olabilir.

El-Hawary et al. (1996) yangına maruz kalma süresinin ve beton paspayının betonarme kirişi üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Kirişler kayma bölgesinde yangına maruz kalmış ve su ile soğutulmuştur. 1800 x 200 x 120 mm boyutlarında sekiz adet betonarme kiriş incelenmiştir. Kirişler iki gruba ayrılmış olup; Grup (1) kapak kalınlığı 20 mm olan dört kiriş ve grup (2) kapak kalınlığı 40 mm olan dört kirişten oluşmaktadır. Her grup, farklı süreler boyunca, yani 0, 30, 60, 120 dakika boyunca 650°C'lik bir sıcaklığa tabi tutulmuştur. Kirişlerin basınç dayanımı, yangına maruz kaldıktan sonraki gün bir Schmidt çekici kullanılarak belirlenmiştir. Kirişler, aşamalı olarak iki enine yük uygulanarak test edilmiştir. Gerilmeler ve deformasyonlar her bir yük artışında ölçölüp, her kiriş için çatlama yükleri,

çatlak ilerlemesi ve nihai yükler kaydedilmiştir. Kesme bölgesinde yangına maruz kalan kirişlerin davranışının yangına maruz kalma süresinden ve kaplama kalınlığındaki değişiklikten büyük ölçüde etkilendiği bulunmuştur.

Desai (1998), kesme kapasitelerini değerlendirmek için ateşe maruz kalan beş betonarme kirişini incelemiştir. Tüm kirişlerin ölçüleri toplam 1600 mm, 1400 mm destekli açıklıkta ve enine kesitte 200 x 300 mm uzunluğunda yapılmıştır. Kirişler üç taraftan ateşe maruz bırakılmış ve göçene kadar yüklenmiştir. Çalışma, yangın sırasındaki kesme kapasitesinin, betonun mukavemet özelliklerinin ve kesme takviyesinin azalmasından etkilendiğini bulmuştur.

Chan et al. (1999), normal mukavemetin ve yüksek mukavemetli betonun yangına dayanımı, sırasıyla 39, 76 ve 94 MPa basınç dayanımları ile bir araştırma yürüttüler. 1200°C'ye kadar sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra, sıkıştırma mukavemeti ve çekme kopma mukavemeti belirlenmiştir. HSC ve NSC'deki gözenek yapısı da araştırılmaya dahil edilmiştir. Sonuçlar HSC'nin mekanik mukavemetini NSC'ye benzer bir şekilde kaybettiğini göstermiştir. 400 ila 800°C arasındaki aralık, güç kaybı için kritik bir sıcaklık olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklıklar hem HSC hem de NSC'nin mikro yapısı üzerinde etkisinin olumsuz olduğu saptanmıştır. HSC ve NSC neredeyse aynı derecede hasar görmüş olsa bile, HSC'nin dayanıklılığı daha fazla olumsuz etkilenmiştir.

Kumar and Kumar (2003), uzun süre daha yüksek sıcaklığa maruz kalan betonarme beton kirişlerin dayanım mukavemetini bulmak için bir araştırma yaptılar. Altı adet betonarme kiriş aynı etriye, uzunluk, beton dayanımı ve paspayı ile tasarlanmıştır. Dört adet kiriş 1 saat, 1.5 saat, 2 saat ve 2.5 saat süreyle ateşe maruz bırakılmış olup, oda sıcaklığında test edilmiştir. Yangına maruz kalma süresindeki artışla birlikte dayanımlarında azalma görülmüştür. Betonarme kirişleri üzerinde yapılan deneylerden, 25 mm paspayına sahip betonarme kirişi yaklaşık 2,5 saat yangına maruz kalmaya dayanmadığını, betonda birçok dağılma gözlemlendiğini ve zamanla daha da arttığı sonucunu çıkarmışlardır. Kiriş için 2 saatlik yangın süresinin bile kritik olduğu bulunmuştur. 1 saat süreli yangına maruz kalan betonarme kirişin davranışı tatmin edici bulmuşlar. Çünkü mukavemeti diğer kirişlere oranla yaklaşık % 83 daha fazla olmuştur.

Chang et al. (2006), 100-800°C sıcaklıklara ısıtıldıktan sonra beton için basınç gerilme-gerinim ilişkisi elde etmek amacıyla bir araştırma gerçekleştirmiştir. Bütün beton numuneleri 150 mm çapında ve 300 mm yüksekliğinde silisli agrega ile yapılmış standart silindirlerdir. Isıtılan numuneler oda sıcaklığına soğutulduktan 1 ay sonra deneye tabii tutulmuştur. Kıyaslama yapabilmek için iki adet ısıtılmamış numunenin mukavemetinden

yola çıkılarak yüksek sıcaklık altında betonun gerilme-şekil değiştirme eğrisinden denklem geliştirilmiştir. Regresyon çözümlemesi yoluyla, mekanik özelliklerin sıcaklık ile olan ilişkilerinin, basınç dayanımı ve elastik modülü dahil olmak üzere deney sonuçlarıyla örtüşmüştür. Önerilen denklem farklı sıcaklıklarda ısıtılmamış ve ısıtılmış beton numuneleri için geçerlidir. Ayrıca 54 numunenin ayrıık silindir testleri de bulunmuş ve yarıılma gerilme mukavemeti ile sıcaklık arasında bir ilişki kurulmuştur.

Kumar et al. (2009), ısıtılmış betonarme kirişlerinin eğilme mukavemeti ve bunların çeşitli onarım teknikleri kullanılarak güçlendirilmesi hakkında deneysel veriler üretmek amacıyla bir araştırma gerçekleştirmiştir. Toplam 25 betonarme kiriş, benzer kesit detayları, betonun uzunluğu, dayanımı ve paspayı ile tasarlanmıştır. Yangına maruz kaldıktan sonra yirmi betonarme kirişi test edilmiş olup ve geri kalan beş betonarme kiriş ise kıyaslamak için kullanıldı. Kirişler iki aşamada ısıtıldı. İlk aşamada, 100°C'lik artışlarla 100°C ile 1000°C arasında her sıcaklıkta iki betonarme kiriş 3 saat boyunca tutuldu. 100°C ile 500°C arasındaki sıcaklığa maruz kalan kirişler boya uygulanarak onarıldı. 600°C ile 1000°C arasındaki sıcaklığa maruz kalan kirişler, parçalanma üzerine onarıldı. İkinci aşamada, onarılan tüm kirişler tekrar ısıtılmıştır. Bu kirişler, oda sıcaklığına getirildikten sonra eğilme mukavemeti açısından tekrar deneye tabi tutulmuştur. Onarılmış betonarme kirişlerin eğilme dayanımının sıcaklık artışı ile değişimi incelenmiş ve onarım öncesi ve sonrası kirişlerin eğilme dayanımı karşılaştırılmıştır.

Chen et al. (2014) yangına maruz kalma süresinin, betonarme kolonların yangın sonrası davranışına etkisi üzerine deneysel bir araştırma yapmışlardır. Dokuz adet (45 mm x 30 mm x 300 mm) boyutlarına sahip betonarme kolon, sabit bir ön yük ile 2 ve 4 saat boyunca ateşe maruz bırakılmıştır. Soğutulduktan bir ay sonra, numuneler tek eksenli veya çift eksenli eğilme deneyi ile eksenel yük altında test edilmiştir. Deney sonuçları artan yük taşıma kapasitesinin, yangına maruz kalma süresinin artmasıyla azaldığını göstermiştir. Yangına maruz kalma süresinin artmasıyla ortaya çıkan bu mukavemet bozulması, soğutulduktan sonra sıcak haddelenmiş betonarme donatıların mukavemet kazanımı ile yavaşlatılabilir olduğu görülmüştür.

Yağan (2019) yapmış olduğu çalışmada yüksek sıcaklıkların betonarme kirişlerin yapısal davranışları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Deneyler kapsamında çelik donatı, küp beton numuneleri, betonarme kirişler, ve çekip çıkarma deneyleri için hazırlanan örnekler aynı koşullar kapsamında imal edilmiş ve seramik fırında aşamalı bir şekilde 800°C sıcaklığa kadar maruz bırakılmıştır. Bu aşamalardan sonra yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan numuneler standartlara uygun bir şekilde deneylere tabii tutulmuştur. Deney sonuçları aynı

numune gurupları için birbirleriyle kıyaslanarak gerekli incelemeler yapılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde ise çelik numunelerinin akma dayanımlarının 600°C'ye kadar büyük oranda kendisini koruduğu, bunun aksi bir şekilde beton basınç dayanımlarında ise takribi %45 dolaylarında bir azalma görülmüştür. 800°C sıcaklığa maruz kalan beton basınç dayanımında %82 civarındaki azalma olmasına karşılık aynı sıcaklık değerinde ki çelik akma dayanımında ise %30 civarında bir azalma görülmüştür. Bütün bu bulgular neticesinde yazar üretilen kiriş elemanlarındaki taşıma gücü azalmasının ana sebebinin betonda meydana gelen hasar ve bu hasardan kaynaklı beton donatı kenetlenmesinin azalması olduğu söylemiştir.

### ***Yüksek sıcaklığın çelik donatı üzerine etkisi***

Yüksek sıcaklıkların çelik donatılar üzerindeki etkileri çelik türüne ve üretim yöntemine bağlıdır (Dougill 1983). Bu etkiler temel olarak dayanım ve rijitlik kaybı ile karakterizedir.

Çelik donatı yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, karbon esaslı çeliklerin kristal yapısında bir dönüşüm meydana gelir ve bu da çelik malzemenin mukavemetinde ve rijitliğinde bir azalmaya yol açar. 600°C sıcaklıkta, çeliğin akma gerilimi ve elastisite modülü yaklaşık % 60 azalır (Fletcher 2006).

Ünlüoğlu et al. (2007) yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra çelik donatıların mekanik özellikleri araştırılmıştır. 10mm, 16mm ve 20 mm olarak üç farklı donatı çapları kullanılarak paspayı üzerinde inceleme yapılmıştır. Her biri 3 saat boyunca 20°C, 100°C, 200°C, 300°C, 500°C, 800°C ve 950°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. 25 mm paspayının 400 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara karşı koruma sağladığı görülmektedir. Sıcaklık 500°C'ye kadar çıkarıldığında mukavemet kayıplarına uğradığı, donatı mekanik özelliklerinin korunamadığı bulunmuştur.

Mamillapalli (2007) çelik donatıları 100°C, 300°C, 600°C, 900°C'ye ısıtarak yüksek sıcaklıkların betonarme çelik donatılar üzerindeki etkisini araştırdı. Isıtılan numuneler su içinde söndürme ve normalde hava soğutma ile hızla soğutuldu. Mekanik özelliklerde meydana gelen değişiklikler evrensel test makinesi (UTM) kullanılarak incelenmiştir. 900°C'nin üzerindeki yüksek sıcaklığın donatılar üzerindeki etkisi gözlenmiştir. Söndürme ile hızlı bir şekilde soğutulduğunda süneklikte önemli bir azalma olduğu görülmüştür.. Aynı durumda, normal atmosfer koşullarında soğutulduğunda, sıcaklığın süneklik üzerindeki etkisi yüksek olmadığı görülmüştür.

Topçu ve Işıkdag (2008) yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra çelik donatıların mekanik özelliklerini araştırmışlar. Beton harcı CEM I 42.5N çimento ve kil ile

hazırlanmıştır. S 420 16 mm nervürlü çelik donatılar kullanılarak; 56 x 56 x 290 mm, 76 x 76 x 310 mm, 96 x 96 x 330 mm ve 116 x 116 x 350 mm boyutlarında numuneler hazırlanmış olup, 20, 30, 40 ve 50 mm paspaylarına sahiptir. Betonarme çelik donatılar daha sonra numuneler 3 saat boyunca ayrı ayrı 20, 100, 200, 300, 500 ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Soğutma işleminden sonra, numuneler 28 gün boyunca kürlenmiştir. Mekanik testler soğutulmuş numuneler üzerinde gerçekleştirilmiş ve deneylerin sonunda mukavemet numunelerinin yüksek sıcaklıklarda nihai gerilme mukavemeti, akma mukavemeti ve uzaması da belirlenmiştir. 20, 30, 40 ve 50 mm paspayına sahip yüksek sıcaklıklara maruz kalan donatılar için bir koruma sağladığı görülmektedir. Paspayı, donatılardaki verim kayıpları ve gerilme mukavemetlerini azaltır ve paspayısız donatılar ile karşılaştırıldığında %15 daha yüksek mukavemet sağlar. 300°C'ye kadar olan sıcaklıklar için, paspayılı donatılar, yüksek sıcaklıklara maruz kalmadan paspayısız donatı ile aynı verim ve gerilme mukavemetlerine sahiptir. Bununla birlikte, sıcaklık 800°C'ye kadar yükseldiğinde, paspayısız donatılar, paspayılı donatılara oranla mukavemet kapasitelerinin ortalama% 80'ini kaybeder. 20, 30, 40 ve 50 mm paspayına sahip olanlar, 500°C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalması halinde donatıların mekanik özelliklerini korumak için yeterli olmadığı gözlenmiştir.

Özetle, bir yangın sırasında, genellikle betonarme çelik donatıların 250-300°C üzerindeki sıcaklıklara maruz kalmaya karşı korunması gerekmektedir. Beton ve çelik 400°C'ye kadar sıcaklıklarda benzer ısıl genişleme sergiler; bununla birlikte, daha yüksek sıcaklıklar çeliğin betona göre önemli ölçüde genişmesine neden olur ve 700°C derecesine ulaşırsa, betonarme çelik donatının yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %20'sine düşecektir. (Fletcher 2007)

### ***Yüksek sıcaklığın betonarme aderansı üzerine etkisi***

Binaların yangın dayanımı ve yangından sonraki dayanımını için yüksek sıcaklıkların beton-donatı arasındaki bağ kuvvetine etkisinin bilinmesi önemlidir. Betonda çelik kullanmaya yönelik ilk girişimler 19. yüzyılda, betondaki gerilmeleri desteklemek için nervürsüz donatıların kullanılması ile başlamıştır. Nervürsüz donatılar ve beton arasındaki kötü aderans nedeniyle, uç kancaların ankraj kapasitesinin artırılması önerilmiştir. 20. Yüzyıla doğru beton ve donatı arasındaki bağ kapasitesini artırmak için nervürlü donatılar tanıtılmıştır (CEB-FIP-Bulletin10 2000).

20. yüzyılın başlarından beri nervürlü donatıların bağı hakkında birçok çalışma yapılmıştır. Sonuçlar, küçük açıklıklı nervürlü donatılar ve yüksek açıklıklı nervürlü donatıların kullanılmasının kayma direncini geliştirebileceğini ve nihai bağlanma mukavemetini arttırabildiğini göstermiştir (Lutz 1970; Goto 1971).

Donatıdaki nervürün arttırılması, bağlanma mukavemetini arttırır, ancak donatıyı çevreleyen betonun ayrılma direnci, bağlanma kapasitesini sınırlar. Dolayısıyla, nervürün fazla olmasında sınırlama yapılmadıkça betona bir fayda sağlaması yönünden anlamı yoktur. (CEB-FIP-Bulletin10 2000).

Beton ve çelik çubuk arasındaki bağı incelemenin olağan yolu çekme testleridir. Çekme testi, donatıyı prizmatik bir beton numunesinin içine gömerek ve test sırasında donatıyı betondan dışarı çekerek yapılabilir. (Watstein 1947).

Diederichs and Schneider (1981) Yüksek sıcaklıkların aderans üzerindeki etkisini incelemiştir. Bu çalışmada nervürsüz donatılar ve nervürlü donatılar üzerine 20-800°C sıcaklık aralığında inceleme yapmışlardır. Çalışmadan çıkan sonuca göre, nervürlü ve nervürsüz donatıların betonla yaptığı bağ kuvvetlerinde çok büyük farklılıklar olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca çalışma, yüksek sıcaklıklarda bağlanma gücünün bozulmasının, beton basınç dayanımının bozulmasından daha fazla olduğunu göstermiştir.

Morley and Royles (1983), yüksek sıcaklıkta aderans üzerine çalışmıştır. Bu çalışmada 20-750°C sıcaklık aralığında nervürlü donatılar kullanılmıştır. Sonuçlar, bağlanma performansının beton gücüne bağlı olduğunu ve ısıtma sırasında test edilen numunelerin, soğuduktan sonra test edilen numunelere göre daha düşük bağlanma gücü verdiğini göstermiştir.

El-Hawary et al. (1997), yangın süresi ve beton paspayının aderans üzerindeki etkisini incelemek için 200 x 120 mm kesit büyüklüğünde sekiz adet betonarme kirişi üzerinde deneysel araştırma yapmıştır. Paspayı 20 mm olan kirişler ve paspayı 40 mm olan kirişler olarak iki gruba ayrılmıştır. Kirişler farklı yangın sürelerine maruz bırakılmıştır, sonra su ile soğutulmuştur. Daha sonra, kirişler göçene kadar yük uygulanmıştır. Yangına maruz kalma süresi arttıkça betonun basınç dayanımının azaldığı bulunmuştur. Ayrıca, beton paspayının arttırılmasının, kirişlerin kesme kapasitesindeki yangın hasarının azaltılmasına yardımcı olduğu bulunmuştur.

Khan et al. (2013) Betonarme kirişlerdeki donatı ve betonun aderans mukavemeti, çevrimsel ısı yüküne maruz kaldıklarında deneysel olarak araştırılmıştır. 100 x 150 x 1200 mm ebatlarındaki 111 adet betonarme kiriş, dört nokta yükleme altında bağlanma davranışı açısından bükülme altında test edilmiştir. Kirişler gerilme bölgesinde 8, 10 ve 12 mm çapında çelik donatılar sadece bir Termomekanik olarak işlenmiş (TMT) çelik güçlendirilmiştir. Kirişler, sıcaklığı 100°C, 200°C ve 300°C olarak alınan ısı çözümülemeye tabi tutulmuştur. Isıl çözümlemede çatlama modeli, kırılma mekanizması, ilk çatlama yükü ve bağlanma mukavemeti üzerindeki etkileri tartışılmıştır. Aderans mukavemeti kaybının, 12 mm çapa

sahip olan çelik donatısının yanal genişleme nedeniyle paspayının bölünmesinden dolayı daha fazla olduğu bulunmuştur. 8 ve 10 mm çaplı donatı çeliğin güçlendirilmesiyle oluşan kirişlerde ise nispeten daha az zarar verici etki göstermiştir. Kirişlerin 100°C ve 200°C gibi daha düşük sıcaklıklarda aderans mukavemeti, eşit sayılabilir olduğu belirtilmiştir. Ancak ısı yükünün şiddetine bağlı olarak daha yüksek sıcaklıkta (300°C) aderans, % 44'e kadar azalmıştır. Çalışmanın sonuçları, ısı yüklemeye koşulları ile nispeten yüksek sıcaklık ortamında kullanılan betonarme kirişlerin yapısal elemanlarının tasarımı için uygunluk durumunun geliştirilmesinin ihtiyacını vurgulamıştır.

Ahmad et al. (2017) Beton ve çeliğin betonarme bir yapıdaki kompozit etkisini, aralarındaki aderansa bağlılığını belirtmiştir. Aralarındaki aderansı ise, beton ve çeliğin mekanik özelliklerine bağlı olduğunu söylemiştir. Yangın durumunda mekanik özelliklerin bozulduğunu ve dolayısıyla aderans davranışının değiştiğini kaydetmiştir. Sıcaklığın, pull-out deneylerine dayanan aderans üzerindeki etkisini incelemek için bazı araştırmalar yapmıştır. Numuneler 650°C'ye kadar yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış olup aderansları üzerinde incelemeler yapmıştır. Çalışma, sıcaklık artışı ile bağ kaymasının artarken aderansın azaldığını göstermektedir. Ayrıca, 650°C sıcaklığa maruz kalan beton ve çelik arasındaki bağlanma kuvvetini tahmin edebilen bir denklem önermiştir.

Özkal et al. (2018) Bu çalışmada, cam elyafı ile güçlendirilmiş polimerin (GFRP) ve yüksek sıcaklık etkilerine maruz kalan çelik donatı demirlerinin mekanik ve bağlanma özellikleri incelenmiştir. Ardından aksel çekme testleri ve bu malzemelerin çekme testleri yapılmıştır. 23–800°C aralığında yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılan çıplak çelik çubukların gerilme özellikleri üzerinde 600°C sonra ciddi etkiler gözlenmiştir. Kritik sınır ise çıplak GFRP çubuklar için 300°C'dir. Test sonuçları, bağ kuvveti bozulmasının her iki inşaat demiri türü için neredeyse doğrusal olduğunu göstermektedir. 600°C betondaki ciddi bozulma ile ilgili kritik sıcaklıktır. Ek olarak, donatıların yüksek sıcaklıklarda bağ kuvveti bozulmalarına dair deneysel bir modelleme yaklaşımı önerilmiş ve karşılaştırma sonuçlarının modelleme sürecine dayanan oldukça ümit verici bir tutarlılığa sahip olduğu bulunmuştur.

Sharma et al. (2019) Bu çalışmada, betonarme yapının yüksek sıcaklıklar altında kalan bağlanma dayanımı kare prizmatik beton numuneleri kullanılarak deneysel olarak araştırılmıştır. Deneyler, yüksek sıcaklığın bağ kaybını ve bağ davranışı üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı beton dayanımlarıyla yapılmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra, beton dayanımlarının aderans üzerindeki etkisinin fazla olduğunu belirtmiştir. Aderansın yüksek sıcaklıktan dolayı bozunmasının, betonun basınç veya çekme dayanımındaki bozunmaya benzer olduğu bulunmuştur. Beton dayanımı artan sıcaklıkla

azalırken, çatlaklarının genişliği artan sıcaklıkla artmıştır. Aderans, sıcaklık artışı ile kademeli olarak azalmıştır. Deneysel araştırmaların detayları ve sonuçları bu makalede bildirilmiştir.

Özetle, günümüzde, çevre sıcaklığında beton ve donatı arasındaki bağ hakkında genellikle bilgi mevcuttur. Bununla birlikte, yüksek sıcaklıklarda beton ve takviye çelik çubuk arasındaki bağ özelliği hakkında araştırma hala sınırlıdır.

### **Yüksek sıcaklık üzerine yapılan nümerik çözümleme çalışmaları**

Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), gelişmiş yangına dayanıklı çözümlemesi yapmak için en yaygın araç olarak kabul edilmiştir (Rigberth 2002). Gelişmiş hesaplama yöntemleri, malzemelerin ısı ve mekanik özelliklerinin sürekli değişimini, sınır koşullarını ve elementler içindeki sıcaklıkların homojen olmayan dağılımını açıklamıştır. Gelişmiş hesaplama yöntemleri çok gerçekçi bir modelleme sağlamasına rağmen, kapsamlı bir arka plan bilgisi ve gelişmiş bilgisayar programlarının kullanılmasını gerektirmiştir.

### ***Yüksek sıcaklık altında betonarme yapıların nümerik çözümlemesi***

Lie (1992), yapısal elemanların kesitleri içindeki sıcaklık dağılımını belirlemek için sayısal programların kullanılmasını tarif etmiş ve bu sayısal programların yangına dayanıklılığı hesaplamak için nasıl kullanıldığını açıklamıştır. Beton ve çeliğin detaylı ısı ve mekanik özellikleri de detaylandırılmıştır.

Terro (1998), yangındaki üç boyutlu betonarme yapıların davranışlarını tahmin etmek için sonlu elemanlar bilgisayar programları geliştirmiştir. Programlar, deneysel sonuçları ile karşılaştırılarak örtüştüğü görülmüştür.

Shi et al. (2004), farklı beton paspayı kalınlığına sahip altı adet betonarme kirişi üzerinde deneysel bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışma, beton paspayının artırılmasının, çelik donatıları yangın sıcaklığından koruduğu için yangına direncini arttırdığı sonucuna varmıştır. Betonun gerilme bölgesinde çatlama beton paspayı etkisinin özelliğini azalttığını göstermiştir.

Hsu et al. (2008) yangına maruz kalma sırasında betonarme kirişlerin kesme kapasitesini değerlendirmek için ısı ve yapısal çözümleri içeren analitik bir model geliştirmiştir. Bu model, kiriş kesiti içindeki sıcaklık dağılımını modellemek için sonlu farklar yöntemini kullanmıştır. Kesme kapasitesi, yüksek sıcaklıkların çelik ve betonun özellikleri üzerindeki etkisi düşünüldüğünde Amerikan Beton Enstitüsü (ACI) bina kodu kullanılarak değerlendirilmiştir. Yangına maruz kalma sırasında kayma mukavemetini incelemek için modeli varsayılan bir kirişe uygulamışlardır. Kiriş 300 x 500 mm kesit boyutuna sahip olup,



altta  $4\phi 25$  mm ve üstte  $2\phi 25$  mm boyuna donatılar, enine donatı olarak ise 100 mm aralıklı çapı  $\phi 10$  mm olan donatı kullanılmıştır. Betonun basınç dayanımı 20 MPa ve çelik çubukların akma dayanımı 400 MPa idir. Önerilen yöntem kirişe uygulanmıştır. Önerilen yöntemin tahmini ile Hsu'nun analitik modelinden elde edilen sonuçlar arasında iyi bir eşleşme görülmüştür.

Kodur and Dwaikat (2009) yangın sırasında betonarme kirişin yapısal elemanlarının performansını izlemek için makroskopik bir sonlu eleman modeli sunmuşlardır. Modelleri, tam ölçekli deneysel sonuçlarla karşılaştırarak doğrulanmıştır. Çalışma, bir yangın senaryosunun yapısal elemanların yangın dayanımı üzerinde belirgin bir etkiye sahip olduğunu düşündürmüştür. Kodur and Wang (2004) benzer bir çalışma, yüksek mukavemetli beton kolonların yangına dayanıklılığını tahmin etmek için yapmışlardır. Bu çalışmanın tahminleri, tam ölçekli deneysel sonuçları ile iyi bir uyum göstermiştir.

El-Fitiany and Youssef (2009) yangın koşullarına maruz kalan betonarme kirişlerin eğilme ve aksel davranışlarını tahmin etmek için kesitsel bir çözümleme yöntemi geliştirmişlerdir. Yöntem, literatürde bulunan deney sonuçları kullanılarak modellenmiştir. Daha sonra kesitsel çözümleme yöntemi yangına maruz kaldıklarında sürekli betonarme kirişlerin davranışını değerlendirmek için geliştirilmiştir (El-Fitiany and Youssef, 2014).

Erdem (2010) Bu çalışmada kesit yüzeylerine etki eden sıcaklık ISO834'te verilen denklem ile hesaplanmıştır. Bölüm içindeki sıcaklık dağılımı Laplace sıcaklık iletim denklemi kullanılarak tanımlanmış ve malzemelerin mukavemetindeki kayıplar Eurocode2'de verilen formülasyonlar kullanılarak belirlenmiştir. Isı iletim denklemi, sonlu farklar yöntemi ile çözülmüş ve kesit içinde küçük parçalar halinde sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Enine kesit içindeki küçük parçalar halinde malzemelerin dayanımları kullanılarak çekme ve basınç kuvvetleri hesaplanmıştır. Daha sonra moment taşıma kapasitesi denge denklemleri kullanılarak hesaplanmıştır. İlaveten, T kesitli betonarme kirişlerindeki sıcaklık dağılımını belirlemek için pratik bir yöntem önerilmiştir. Önerilen pratik yöntemin etkinliği ve yüksek sıcaklığın kirişlerin moment kapasitesi üzerindeki olumsuz etkileri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, önerilen pratik yöntemin T kesitlerinde sıcaklık dağılımını belirlemede oldukça etkili olduğu ve kesitin taşıma kapasitesinin yangına maruz kalma süresinin artmasıyla önemli ölçüde azaldığı görülmektedir.

Ozbolt et al. (2013) Yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonarme kirişlerin davranışlarını incelemiştir. Araştırmada kullanılan model, üç boyutlu (3B) sonlu elemanlar (FE) yöntemiyle uygulanan zamana bağlı çözümleme yapılmış termo-mekanik modeldir. İncelenen RC ışınlının deneysel ayrıntıları literatürden alınmış ve aynı yükleme senaryoları

sayısal olarak simüle edilmiştir. Betonarme kirişler, ISO 834 yangın yüküne ve ardından dört noktalı eğilme yüküne maruz bırakılmış olup, 1, 1.5, 2 ve ısıtılmamış dört adet numuneden oluşmaktadır. Yük taşıma kapasitesi ve kirişlerin başlangıçtaki dayanımı, yangına maruz kalma süresinin artmasıyla azalmıştır. Deneysel olarak sadece elde edilen bilgi sınırlı olmasına karşın, sayısal çözümlerden çok daha fazla bilgi çıkarılabildiğini öngörmüştür. Sonuçlardan elde edilen çatlaklar ve hasarlar literatürde yapılan deneysel çalışmalarla uyduğunu belirtmiştir. 1.5 saatlik yangına kaldıktan sonra meydana gelen hasarın çok fazla olduğu aşıkardır. Kirişlerin genel tepkisini öngörmenin yanı sıra, model deneysel olarak gözlemlenmesi zor olan birkaç olguyu da sayısal olarak araştırmak için etkili bir araç olacağını belirtmiştir.

Kodur and Agraval (2016) Bu makale yangına maruz kalan betonarme kirişlerin kapasitesini değerlendirmek için bir yaklaşım sunmuştur. Yaklaşım betonarme kirişlerin ortam koşullarında yapısal tepkisi, yangına maruz kalma sırasında termo-mekanik tepkisi ve kirişlerin yangın sonrasında soğumasından sonraki tepkisi olmak üzere üç aşamada uygulanmıştır. Donatı çeliğinin ve betonun farklı malzeme özellikleri yangına maruz kaldığı safhasında, soğutma safhasında ve soğuma sonrası çözümlene safhasında dikkate alınmıştır. Ayrıca yangına maruz kalan betonarme kirişlerin dayanımı değerlendirilirken, ilgili yük seviyesi, spesifik yangın senaryoları, sınır koşulları ve bir kirişte gelişen plastik deformasyonlarda yer almıştır. Önerilen yaklaşım, ABAQUS sonlu elemanlar bilgisayar programında geliştirilen ayrıntılı bir sayısal model kullanılarak uygulanmıştır. Sayısal modelden yapılan tahminler yangına maruz kalan betonarme kirişlerin dayanımını değerlendirmek için deneylerde ölçülen parametreler ile iyi bir korelasyon göstermiştir. Ayrıca sonlu eleman çözümlerinden elde edilen dayanım, maksimum donatı çeliği sıcaklıkları dikkate alınarak basitleştirilmiş kesitsel çözümlerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmaktadır. Bu karşılaştırma, sonlu elemanlar çözümlerinin, basitleştirilmiş kesitsel çözümlerden tahmin edilenden daha gerçekçi dayanım sonuçları verdiğini göstermiştir. Yangına maruz kalan betonarme kirişlerinin dayanımının değerlendirilmesinde önerilen yaklaşımın uygulanabilirliği bir örnek ile desteklenmiştir.

Kada et al. (2016) Bu çalışma, ANSYS yazılımı ile sonlu elemanlar yöntemi kullanarak yangın nedeniyle yüksek sıcaklıklarda yüksek açıklıklarda çelik kirişlerin davranışını çözümlene etmeyi amaçlamışlardır. Çelik kirişlerin, malzemedeki sıcaklık etkisini doğrusal olmayan yapısal bir yangın çözümlerisi ile karşılaştırmalı bir çalışma içermiştir. Göçme süresini, kirişin orta açıklık eğilmesini ve göçme esnasındaki sıcaklığını tahmin eden sonlu elemanlar modelleri farklı yük seviyeleri altında sunulmuştur. Çalışma,

yakın aralıklı açıklıklara sahip herhangi bir kiriş için yangında başarısızlığın çoğu durumda kirişin gövdesinden kaynaklanacağını göstermiştir.

Musmar et al. (2017) Yangına maruz kalan betonarme kirişlerin performansını incelemek için ayrıntılı bir üç boyutlu zamana bağlı geçici ısı sonlu eleman çözümlemesi yapılmıştır. Betonarme kirişi temsil eden literatürden alınmış deneysel bir çalışmayı destekleyen bir sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Kiriş, üst yüzeyde sabit yükü korurken, zamana bağlı geçici sıcaklık yükü altında alt ve yan yüzeylerde ASTM E119 standart yangına maruz bırakılmıştır. Yangında karşılaşılan malzeme özelliklerindeki değişiklikler nedeniyle malzeme özellikleri bu doğrultuda alınmıştır. Yangın koşullarında ısı çözümlemesinde, betonun çatlaması veya ezilmesi ve donatının durumu gibi yapısal davranışın daha karmaşık yönleri modellenmiştir. Sonlu elemanlar modelinin uygulanabilirliğinin doğrulanması, aynı koşullar altında benzer betonarme kirişleri için gerçekleştirilen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmasıyla gösterilmiştir.

Ryu et al. (2018) farklı yük ve kesitlere sahip on iki betonarme kiriş, ISO 834 standart yangın eğrisi ile yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmışlardır. Yangın çözümlemesinden sonra, yangından zarar görmüş kirişlere dört noktalı yükleme yapılmıştır. Önce deneysel olarak yapılan bu işlemler ardından program yardımıyla nümerik çözümleme yapılmıştır. Yangından zarar görmüş kirişlerin yapısal çözümlemelerini yapmak için ABAQUS programı kullanılmıştır. Yangına maruz kalan kirişlerin kesit boyutlarına göre ısı özellikleri ve yapısal davranışları araştırılmıştır. Deneylerde, ısı ölçerlerden elde edilen sıcaklıklar, kirişin kesiti içindeki konuma bağlı olarak 100 ila 600°C arasında değişmiştir. Sonuçlar, yük seviyesi arttıkça sıcaklık dağılımlarının arttığını, bu da yüklemeye kaynaklanan çatlak yayılımlarıyla açıklanabileceğini göstermiştir. Kirişlerdeki göçme, yangın sıcaklığı arttıkça artmıştır. Betonarme kirişin yüksek sıcaklık altındaki etkileri için kesit boyutu, yük seviyesi ve yangına maruz kalma süresi gibi farklı faktörler arasındaki ağırlıklı değerleri araştırmak için daha fazla çalışmaya ihtiyaç olduğunu belirtmiştir.

Trong et al. (2018) Yaptığı çalışmada son on yılda, yangınların özellikle yüksek katlı binalarda, fabrikalarda, ofislerde vb. inşaat mühendisliğinde ciddi hasara neden olduğunu belirtmiştir. Genellikle yapılar beton gibi yanmaz malzemelerle inşa edildiğini ve betonun karmaşık bir malzeme olduğunu, bu yüzden yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında özellikleri önemli ölçüde değişebilir olduğunu belirtmiştir. Bu problem mühendislerin yangının yapıdaki etkisini incelemelerini ve değerlendirmelerini gerektirdiğini vurgulamıştır. Bu makale, sonlu elemanlar yöntemi ile Ansys yazılımı kullanılarak yangının beton yapıdaki sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Araştırma, yapısal bir modeldeki yangın

etkinliğini hesaplamak için gerçekçi bir yaklaşım sunmuştur. Yangının etkisine karşı koymak için yapısal modelin hesaplanmasında önemli rol oynamıştır. Süre 30 dakikadan 120 dakikaya çıktığında, yangının sıcaklığı 842°C'den 1049°C'ye yükselmiştir. Bunun sonucunda beton kirişin ve beton zeminin en yüksek sıcaklığı sırasıyla 96.56°C'den 114.69°C'ye ve 183.13°C'den 223.19°C'ye yükselmiştir. Sıcaklık dağılımı yasaasına dayanarak, elastik modülü, mukavemeti, gerinimi, vb. gibi malzemelerin mekanik özelliklerinin varyasyonunu belirlemenin mümkün olduğunu belirtmiştir.

Kada and Lamri (2018) Yüksek sıcaklık altında çelik kirişi incelemiştir. Çelik yapıların yapısal olarak dayanıklı ve esnek olmaları nedeniyle giderek daha fazla kullanıldığını belirtmiştir. Bununla birlikte, yangın durumunda yüksek sıcaklıkların etkisi altında akma gerilimi ve elastikiyet modülünün büyük ölçüde azalttığını belirtmiştir. Yanal burulma altında sınırsız katı çelik kirişlerin ekonomik bir yangın güvenliği tasarımı için uygun yangın yükü altında değerlendirilmesi gerektiğini söylemiştir. Bu çalışmanın amacı, standart ISO 834 yangın eğrisi ile simüle edilen ateşe maruz kaldığında katı sınırsız çelik I profil kirişlerin, sıcaklık artışı altında mekanik davranışını incelemek olmuştur. Sayısal sonuçlar, muntazam dağıtılmış mekanik yük ve muntazam sıcaklık artışı altında yanal ve ortası dikey yer değiştirmeleri (deplasmanları) içermiştir. Çözümleme ayrıca çelik kiriş kesitlerindeki kritik yükü ve kritik sıcaklıkları da tahmin etmiştir. Çelik bölümlerde kritik sıcaklıklar ve eğilmeler Eurocode 3 bölüm 1-2 ve tasarım kılavuzlarındaki analitik sonuçlar ile karşılaştırılması yapılmıştır.

Elshorbagy and Abdel-Mooty (2020) Bu makalede ve daha önceki bir çalışmaya dayanarak, hem ısı tepki hemde yapısal tepki olsun, betonarme kirişlerin çözümlemesini etkileyen önemli parametreleri yakalamak için bir parametrik çalışma yürütülmüştür. Önceki çalışmalardan kullanılan yaklaşımın arkasındaki amaç, hem mekanik hem de yangın yükleri altında herhangi bir betonarme elemanı simüle etme yeteneğine sahip güvenilir bir algoritmaya ulaşmak olmuştur. Bu algoritma, ısıl çözümleme ile yapısal çözümlemesinin birlikte kullanılması tekniğine dayanır. Bu teknik, iletkenlik, özgül ısı ve yoğunluk gibi ısı malzeme özellikleri için doğrusal olmayan ve ayrıca beton için gerilme-şekilde değiştirme ilişkisi ısıl genleşme katsayısı, basınç dayanımı ve çeliğin akma dayanımı gibi mekanik özellikleri dikkate almıştır. Bu algoritma, ANSYS programı kullanılarak detaylı sayısal sonlu eleman modelleri ile elde edilmiştir. Bu makalede incelenen ana parametreler, beton basınç dayanımının artırılması, beton paspayanın artırılması ve kirişin yanal rijitliğinin artırılması üzerinde olmuştur.

### ***Yüksek sıcaklık altında betonarme aderansının nümerik çözümlemesi***

Son yıllarda, ortam sıcaklığında bağ stresini hesaplamak için çok sayıda model geliştirilmiştir. Bu modellerin çoğu deneyseldir ve istatistiksel bir metodolojiye dayanmaktadır. Bu nedenle, bu modeller büyük ölçüde farklı durumlarda geçerliliklerini sınırlayabilecek test verilerine bağlıdır (Huanzi 2009).

Şu anda, yüksek sıcaklıklarda aderansı modellemek için sınırlı sayıda sayısal model bulunmaktadır. Huang (2010), ortam sıcaklığında CEB-FIP aderans modelini benimsemiştir (CEB-FIP Model kodu 1991) ve (Bazant and Kaplan 1996) tarafından oluşturulan deneysel sonuçları kullanarak yüksek sıcaklıklarda aderans kuvvetinin bozulmasını dikkate almıştır. Huang'ın modeli yangındaki bağ özelliklerini inceleme üzerine büyük bir adım olmuştur.

Bolmsvik and Lundgren (2006), sadece beton ve üç nervürlü donatı arasındaki aderansı simüle etmek için sonlu eleman yazılımı DIANA'yı kullandı. Bu çalışmada yapışma, sürtünme ve mekanik kilitleme gibi farklı parametreler dikkate alınmıştır.

Bentz and Collins (2006) Betonarme eğilme davranışını kapsamlı bir şekilde araştırılmış ve birçok iyi tanımlanmış tasarım aracı geliştirmiştir. Ancak, kayma davranışı ile ilgili üzerinde mutabık kalınan teori eksikliği var olduğunu belirtmiştir. Kayma direncini tahmin etmek için deneysel denklemler hala birçok uygulama kodunun temelini oluşturmaktadır.

Benitez and Galvez (2011) tarafından aderansı simüle etmek için bir model önerilmiştir. Bu model kalın duvarlı silindir teorisine dayanılarak geliştirilmiştir ve donatıların dönme etkisini dikkate almadan nervürlü donatı olarak kabul edilmiştir.

Pothisiri and Panedpojaman (2013), kalın duvarlı silindir teorisine ve gerilmelerle oluşan betondaki yayılı çatlaklara dayanan yüksek sıcaklıklarda mekanik bir bağ kayma modeli önermişlerdir. Ancak bu model, önceki çalışmalardan elde edilen deneysel kaymalardaki korelasyona dayanarak aderansı hesaplamak için oluşturulmuştur.

Gao et al. (2013) Betonarme yapıların performansa dayalı yangın güvenliği tasarımının pratik olarak uygulanması, yangına maruz kalan yapıların davranışları için doğru sayısal simülasyon araçlarının kullanılabilirliğine bağlı olduğunu belirtmiştir. Bu makale, yangına maruz kalan betonarme kirişlerin hem ısı hem de mekanik davranışlarının doğru tahmini için üç boyutlu (3B) sonlu eleman modeli sunmuştur. Bu sonlu eleman modelinde, daha önceki sayısal çalışmalarda nadiren dikkate alınan bir özellik olan, donatı ile beton arasındaki aderans davranışının modellenmesine özellikle dikkat edilmiştir. Bu sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar, modelin doğruluğunu incelemek için mevcut deney verileri

ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma, donatı-beton aderans davranışının dahil edilmesinin yangına maruz kalan betonarme kirişlerin davranışını daha doğru şekilde sonuçlar verdiğini göstermiştir. Bu sonlu eleman modelinden yapılan çalışmalar sonucunda, donatı ve betondaki gerilemelerin incelenmesine izin vererek yangına maruz kalan betonarme kirişlerin tepkilerini daha iyi anlaşılır kılmıştır. Makalede sunulan sonlu elemanlar modeli, doğrudan betonarme kirişlerin performansa dayalı yangın güvenliği tasarımında kullanılabilir olduğunu; basit tasarım kuralları geliştirmeyi amaçlayan parametrik çalışmalarda da kullanılabileceğini belirtmişlerdir.

Liao (2015) Bu çalışmada, betonarme kirişlerin yüksek sıcaklıklarda modellenmesi için sonlu eleman yöntemi ile incelenmiştir. Bu modelde, bir betonarme kiriş, 4 düğümlü dörtgen beton, 3 düğümlü çelik donatı ve 2 düğümlü bağ bağlantı (bond-link) elemanlarla modellenmiştir. Isıl genleşme, çelik donatı arasındaki bağ karakteristiği, yüksek sıcaklıklarda beton ve malzeme özelliklerinin sıcaklıkla değişmesi gibi yangın koşullarında yapısal davranışın durumunu etkilemiştir. Yangın koşulları altında mevcut modelle betonarme kirişlerin çatlaklarını göstermek için basitçe desteklenen (ISO834 yangına maruz kalan) deneysel bir çalışma çözümlenmiştir. Önerilen sonlu elemanlar yöntemi ile doğrusal olmayan, betonarme kirişlerin davranışını doğru şekilde tahmin edebileceği gösterilmiştir. Kirişler içinde çatlakların oluşumu ve yayılımı da modellenmiş olup bu sayede çözümlenme sırasında çatlak açıklıklarını göstermiştir. Bu makalede geliştirilen model, yangında betonarme elemanların hem yapısal dayanımını hem de bütünlüğünü değerlendirmek için bir sayısal yaklaşım sunmuştur. Burada önerilen model, betonarme döşemelerin yüksek sıcaklık altındaki davranışını değerlendirmek için oluşan çatlaklarla beraber üç boyutlu modellenerek daha da genişletileceği söylenmiştir.

Kodur and Agrawal (2017) Sıcaklığa bağlı bağ bozulmasının yangına maruz kalan betonarme kirişlerin tepkisi üzerindeki etkisini incelemiştir. ABAQUS'ta yangına maruz kalan betonarme kirişlerin tepkisini izlemek için sonlu eleman tabanlı bir sayısal model geliştirmiştir. Beton ve donatı arasındaki sıcaklığa bağlı aderansın bozulmasını modellemek için bağ-bağlantı (bond-link) elemanı yaklaşımı kullanılarak dikkate alınmıştır. Sıcaklığa bağlı aderansın hem normal mukavemetli hem de yüksek mukavemetli betonarme kirişlerin yangına dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır. Yangın testlerinde ölçülen parametreler ile sayısal model sonuçlarının karşılaştırılırsa, donatı ve beton arasındaki aderansın azalması, yangında kirişlerde mukavemet bozulmasına yol açtığı açıkça görülmüştür. Bu nedenle, betonarme yapıların yangına dayanıklılık çözümlenmesinde donatı ve beton arasında mükemmel bir bağ olduğunu varsaymanın mevcut yaklaşımı, özellikle nervürlü donatıya

sahip betonarme kirişleri ve donatı sıcaklığı 400°C'yi aştığında belirli senaryolarda dayanımını tamamen kaybedebildiğini öngörmüştür.



## KURAMSAL TEMELLER

Betonarme, en yaygın biçimde tercih edilen, yapı elemanı üretim yöntemlerinden birisidir. Mukavemet, dayanıklılık, yapım hızı, maliyet, düzensiz ve karmaşık yapılar oluşturmak için esneklik gibi birçok avantaja sahiptir. Beton ayrıca yangına dayanıklılık açısından da üstün özelliklere sahiptir. Genel yapı itibariyle ateşi yaymayan veya zehirli gazlar üretmeyen yanmaz bir malzemedir (Denoel 2007). Ayrıca, düşük ısı iletkenliği nedeniyle yüksek sıcaklıklara nispeten uzun bir süre dayanabilir. Bir beton elemanın yüzeyi yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, beton yük taşıma kapasitesini ve çelik donatıyı korur. Söz konusu faydalardan bağımsız olarak, betonun yangına dayanıklılığı yönünden kusurları gözardı edilmemelidir. Beton, yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, mukavemet özelliklerinin düşmesine neden olan karmaşık reaksiyonlara ve değişikliklere maruz kalır. Bu nedenle, yangına maruz kalma sırasında yapı bütünlüğünü ele alan yeterli yangın direncine sahip olacak nitelikte betonarme yapılar tasarlamak gerekmektedir. Bu bölüm, betonarme yapıların yangına dayanıklılığı hakkında gerekli ön bilgileri sunmaktadır. Bölüm dâhilinde, yangın ve yangın güvenliği gereksinimlerinin gelişim aşamaları açıklanmakta ve yangının betonarme elemanlar üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. Bu bölüm de aynı zamanda farklı yangına dayanıklılık değerlendirme yöntemleri göstermekte ve ortam sıcaklığında kesme ve eğilme etkisini tartışılmaktadır. Son olarak, yüksek sıcaklıklarda kesme ve eğilme etkisinin modellenmesi hakkında bilgiler sunulmaktadır.

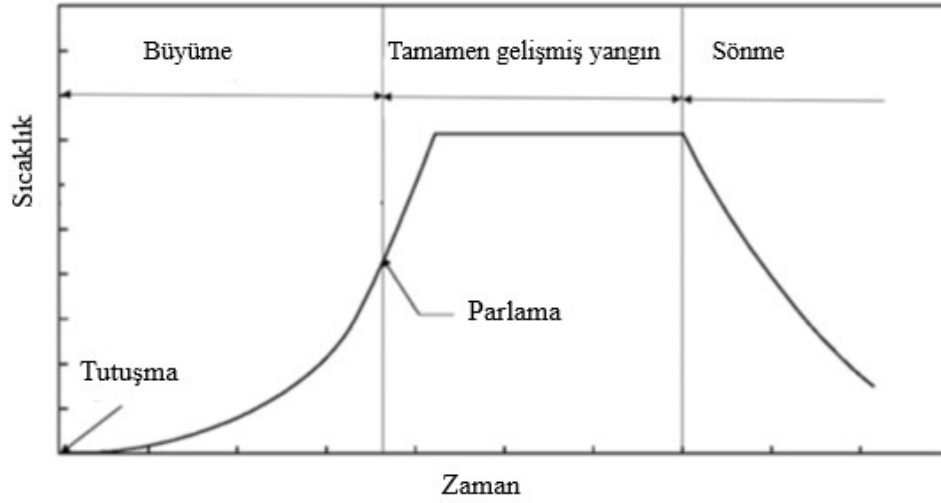
### Yangının Gelişimi

Bir yangının başlaması için üç durum mevcut olmalıdır. Bu durumlar: oksijen, yanıcı madde ve bir ısı kaynağı olup (Denoel 2007). Şekil 1'de gösterilen yangın üçgeni ile temsil edilebilir. Yangın gelişimi; tutuşma ve büyüme, parlama, tamamen gelişmiş yangın ve sönme olarak dört aşamadan oluşmaktadır (Purkiss 2007). Bu dört aşama Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Yangın üçgeni (Denoel, 2007)





Şekil 2. Yangın gelişimi (Khoury, 2008)

### **Tutuşma ve büyüme**

Yanıcı madde, oksijen ve ısının birlikte bulunmasıyla meydana gelen tutuşma yanma işlemi başlatır. Yanma, ısı enerjisini serbest bırakan ve yanma sürecini kendi kendine devam ettiren bir ekzotermik kimyasal reaksiyon zinciridir. Tutuşma meydana geldikten sonra, yangın büyür ve alevler herhangi bir dış ısı kaynağından destek almadan yanmayı sürdürmek için yeterince büyük hale gelir. Sıcaklık artar ve duman oluşmaya başlar. Bu aşamada, ısı, duman ve yangın alarmı yangın güvenliği için önemli bir rol oynar. Bir yağmurlama sistemi varsa, bu aşamada etkinleştirilir ve yangın söndürülebilir.

### **Parlama**

Büyüme döneminde, yeterli yanıcı madde ve yeterli miktarda oksijen varsa parlama oluşur, böylece yangının sıcaklığı yaklaşık 600°C'ye ulaşır (Drysdale 1998). Bu aşamada, indüklenen radyant ısı miktarı, yanıcı maddelerin neredeyse tüm yüzeylerinin ısıtılmasına ve sıcaklığının yanıcı gazlar ve buharlar üretecekleri dereceye kadar yükseltilmesine neden olur. Bu, sıcaklıklarda hızlı bir artışa ve yangının çok hızlı ilerlemesine yol açar.

### **Tamamen gelişmiş yangın**

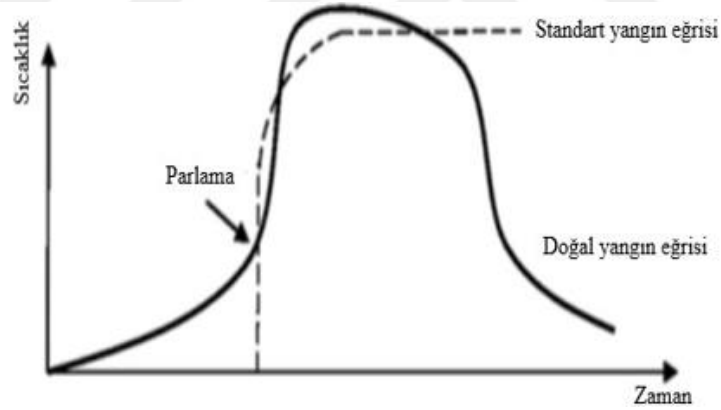
Parlama oluştuktan sonra, yangına parlama sonrası yangın veya tamamen gelişmiş yangın denir. Bu aşama, çok yüksek sıcaklıklara maruz kalan tüm yanıcı yüzeylerin yanmasını sağlayan ve çok miktarda yanıcı gaz üreten geniş miktarda ısı akışı ile ayırt edilir. Yeterli oksijen varsa, bu gazlar sırayla yanar ve ateşe ısı enerjisi eklenir. Yapısal elemanların tasarımında ve performanslarının incelenmesinde kullanılan en önemli bilgiler bu aşamadan elde edilir.

## Sönme

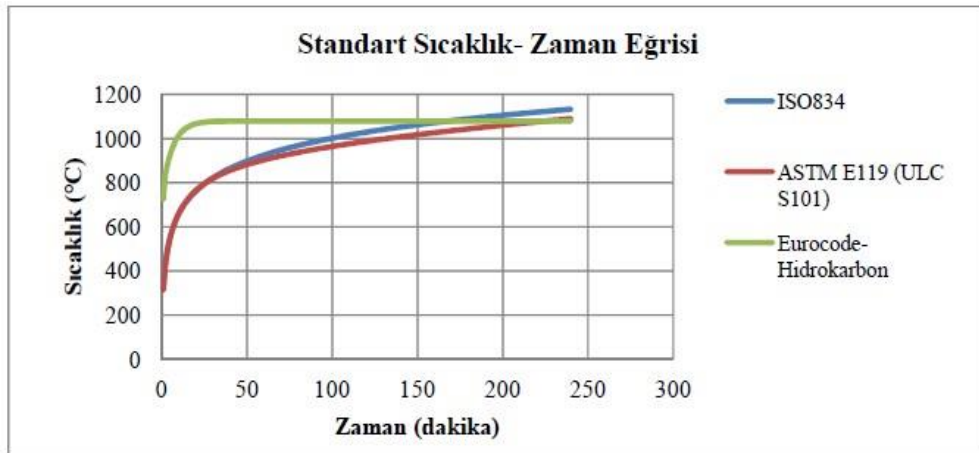
Son olarak, yangın söner ve böylece yangının üç elementinden biri (yanıcı malzeme, oksijen ve ısı) kaybolur. Sonuç olarak, yanma işlemi durur ve buna bağlı olarak sıcaklıklar yavaş yavaş ortam sıcaklığına düşer.

## Standart Sıcaklık-Zaman Eğrisi

Yangına dayanıklılık testlerinin çoğunda, yangın yükü etkisini simüle etmesi gereken bir sıcaklık-zaman eğrisi kullanılır. Çeşitli yangın deneylerinin sonuçları arasında karşılaştırma yapabilmek ve yangın derecesi kriterlerini geliştirebilmek için yangını simüle eden standart bir sıcaklık-zaman eğrisine ihtiyaç vardır. Bu yangınlar ülkeden ülkeye farklılık gösterir ve standart yangınlar olarak adlandırılır. Parlama, tamamen gelişmiş yangın aşamaları ve standart yangın eğrisi Şekil 3'te gösterildiği gibidir. En yaygın standart sıcaklık-zaman eğrileri ASTM-E119 ve ISO-834'tür (Lie 1992). Şekil 4, iki standart yangın eğrisinin neredeyse aynı olduğunu göstermektedir. Hem Amerika Birleşik Devletleri hem de Kanada ASTM E119'u kullanırken; Avustralya, Yeni Zelanda ve İngiltere ise ISO 834'ü tercih etmektedir (Buchanan 2001).



Şekil 3. Doğal yangına kıyasla standart yangın eğrisi (Wit, 2011)



Şekil 4. Standart yangın eğrileri (Hacıemiroğlu, 2014)

ASTM E119'da sıcaklık-zaman eğrileri için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplama yapılabilir (Lie 1992):

$$T = T_o + 750 \left[ 1 - e^{-3.79553\sqrt{t_h}} \right] + 170.41\sqrt{t_h} \quad (1)$$

Burada,

$T_o$  = başlangıç sıcaklık için oda sıcaklığı

$t_h$  = saat cinsinden zaman

ISO 834'ün sıcaklık-zaman eğrileri için aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır (Malhotra, 1982):

$$T - T_o = 345 \log (8t + 1) \quad (2)$$

Burada,

$T_o$  = başlangıç sıcaklık için oda sıcaklığı

$t_h$  = dakika cinsinden zaman

Eurocode hidrokarbon eğrisi olarak anılan,

$$T = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + T_o \quad (3)$$

şeklindeki sıcaklık-zaman eğrisini standart yangın olarak tanımlamıştır.

### **Yangın Yükünün Betona Etkisi**

Beton düşük bir iletkenliğe sahip olduğundan ısı yalıtım malzemesi gibi davranmasını sağlayan düşük bir ısı transfer oranı vardır. Böylece beton, yangının şiddetine, ulaşılan maksimum sıcaklığına bağlı olarak birden fazla hasar seviyesine dayanabilir ve ilerleyen bölümlerde ayrıntılarla açıklanmıştır. Yangının beton üzerindeki etkisi, bu sekiz ana maddeye ayrılabilir:

- 1- Beton basınç dayanımında azalma.
- 2- Elastisite modülünde azalma.
- 3- Beton çekme dayanımında azalma.
- 4- Agrega ve çimento hamuru arasındaki bağ kaybı.
- 5- Beton ve donatı çeliği arasındaki bağ kaybı.
- 6- Mikro çatlaklar düşük sıcaklıklarda oluşmaya başlar.
- 7- Sıcaklık ile çatlak genişliği artar.

## 8- Renk değişimi.

(Andrews-Phaedonos 2011) beton tepe sıcaklığındaki değişimle birlikte beton özelliklerindeki değişikliklerin aşağıdaki gibi olduğunu belirtmiştir:

1- 120°C'ye kadar sıcaklıklarda; serbest nem kaybı, renk değişimi, mukavemet veya bağ kaybında önemli bir azalma ve betonun porozitesinde önemli değişiklik yoktur.

2- 120°C ile 250°C arası sıcaklıklarda; lokal çatlaklar, imento hamurunun dehidrasyonu, serbest nemde kayıplar, dayanım dūřmeye başlar.

3- 250°C ile 600°C arası sıcaklıklarda; genleřme nedeniyle hem imento hamuru hem de agregada çatlaklar belirgin řekilde geliřmeye bařlar. Betonun rengi pembeye dnūřür. Dayanım azalmaya devam eder.

4- 400°C'deki sıcaklıkta; kalsiyum hidroksit ayrışmaya başlar.

5- 600°C'den 900°C'ye arası sıcaklıklarda; imento hamurunun büzülerek çatlaması ile tamamen dehidrasyon olmaya başlar. Beton kırılğan olmaya başlar. Betonun porozitesi önemli lde artar. Betonun rengi tekrar griye döner. nemli bir gc kaybı başlar.

6- 900°C ile 1200°C arası sıcaklıklarda; beton rengi tekrar parlamaya başlar. Beton tüm gücünü kaybeder.

7- 1200°C'den 1400°C'ye kadar sıcaklıklarda; betonun farklı bileşenleri kaybolmaya başlar.

8- 1400°C'den yüksek sıcaklıklarda; beton tamamen yok olur.

## **Mekanik zellikler**

### ***Gerilme-şekil değiştirme eğrisi***

Yangın yükü ve gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında test edilen herhangi bir beton için:

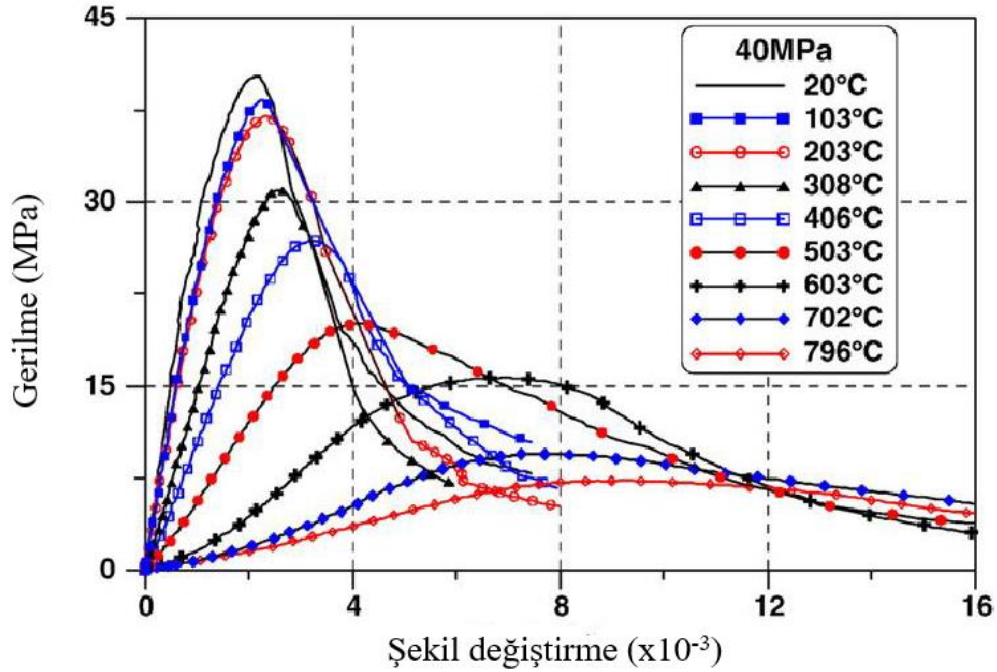
1- Beton dayanımı arttıķa, gerilme şekil değiştirme eğrisi daha dik ve doğrusal hale gelir.

2- Aynı beton kalitesi için, sıcaklık artışı ile nihai dayanım azalır.

3- Aynı beton kalitesi için, sıcaklık artışı ile nihai şekil değiştirme artar.

Chang et al. (2006) 15 cm çapında ve 30 cm yüksekliğinde 108 silindir beton numunenin 800°C'ye kadar sıcaklık altında deneysel bir çalışma gerçekleştirmiş ve betonun her sıcaklıktaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi için bir denklem geliştirmiştir. Sonuçlarda

kalan dayanım özellikleri ile uyumu göz önünde bulundurarak, herhangi bir sıcaklıktaki beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkisini, kalan basınç dayanımı, maksimum gerilme ve elastisite modülü değerleriyle hesaplayarak çizmiştir. Deneysel çalışmada bulunan gerilme şekil değiştirme eğrisi Şekil 5'te gösterilmektedir.



**Şekil 5.** Farklı sıcaklıklarda betonun deneysel gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Chang et al. 2007)

Önerilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin deneysel sonuçlarla karşılaştırılması Şekil 6'da gösterilmektedir. Gerilme-şekil değiştirme eğrisi için önerilen denklem aşağıdaki gibi geliştirilmiştir:

$$f_c = \frac{M \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{or}} \right)}{1 + \left( M - \frac{n}{n-1} \right) \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{or}} \right) + \left( \frac{n}{n-1} \right) \left( \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{or}} \right)^n} f'_{cr} \quad (4)$$

Burada,

$f'_{cr}$  = ısıtmadan sonra kalan mukavemet

$\varepsilon_{or}$  = ısıtma sonrası maksimum gerilme

$E_{pr}$  = ısıtma sonrası maksimum gerilmedeki sekant elastik modülü,

$E_{or}$  = başlangıç tanjant elastik modülü

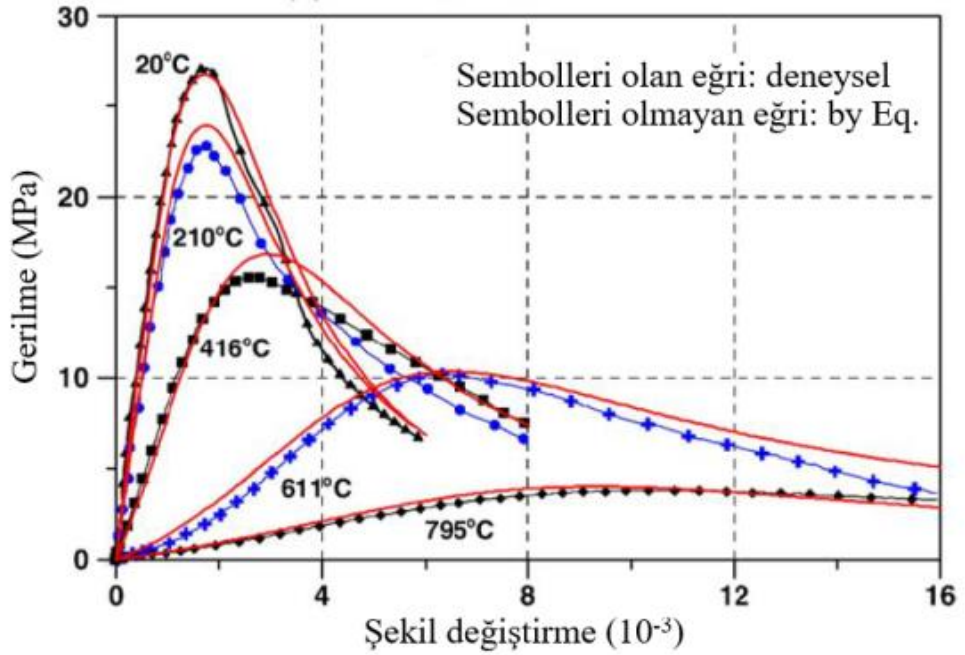
$$M = E_{or} / E_{pr}$$

$$n = n_o (M / M_o)^{1.014 - 0.0007T}$$

$$n_o = (f_c(\text{MPa}) / 12) + 0.77 > 1.0$$

$$M_o = E_o / E_p$$

$$E_o = 5000\sqrt{f_c'} (\text{MPa})$$

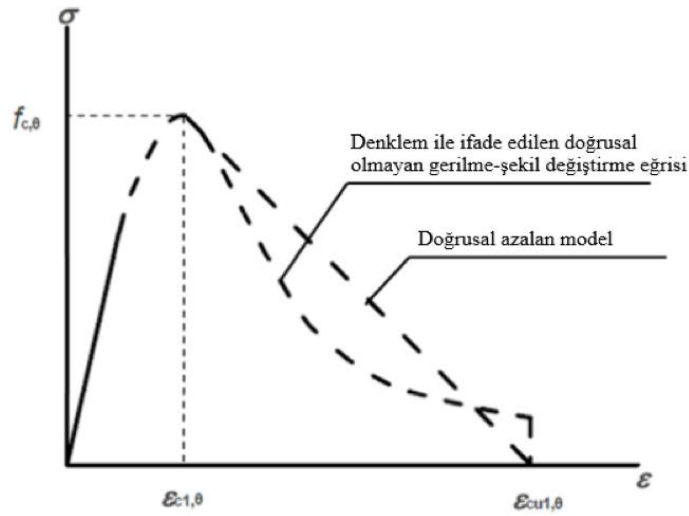


**Şekil 6.** 20, 210, 416, 611 ve 795 °C'lik gerilme-gerinim eğrilerinin  $f_c = 27$  MPa için deney sonuçları ile karşılaştırılması (Chang et al. 2006)

Eurocode-2 ve TS EN 1992-1-2'de tek eksenli yük altında yüksek sıcaklıklardaki beton numuneleri için iki parametreye dayanarak gerilme-şekilme değiştirme eğrisi için bir ilişki geliştirmiştir. Basınç dayanımı  $f_{c,\theta}$  ve  $f_{c,k}$ 'ye karşılık gelen gerilme  $\epsilon_{c1,\theta}$  ve nihai gerilme  $\epsilon_{cu1,\theta}$ 'dir. Silisli agregalara sahip normal mukavemetli beton için gerilme-şekil değiştirme değerleri Tablo 1'de listelenmiştir ve matematiksel model ayrıca Şekil 7 ve Tablo 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Silis Agregaya Sahip Betonun Sıcaklığa Bağlı Gerilme-Şekil Değişirme İlişkisi (TS EN 1992-1-2)

Beton Sıcaklığı, $\theta$		Silisli Agregalar	
[°C]	$f_{c\theta} / f_{ck}$	$\epsilon_{c1,\theta}$	$\epsilon_{cu1,\theta}$
20	1.00	0.0025	0.0200
100	1.00	0.0040	0.0225
200	0.95	0.0055	0.0250
300	0.85	0.0070	0.0275
400	0.75	0.0100	0.0300
500	0.60	0.0150	0.0325
600	0.45	0.0025	0.0350
700	0.30	0.0250	0.0375
800	0.15	0.0250	0.0400
900	0.08	0.0250	0.0425
1000	0.04	0.0250	0.0450
1100	0.01	0.0250	0.0475
1200	0.00	0.0000	0.0000

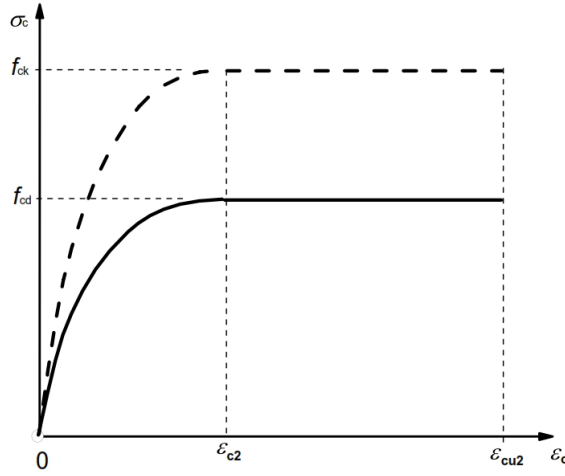


**Şekil 7.** Yüksek sıcaklıklarda beton için gerilme-şekil değiştirme ilişkisi eğrisi (Eurocode-2, 2004)

**Tablo 2.** Yüksek Sıcaklıkta Tek Eksenli Beton İçin Gerilme-Şekil Değişirme Eğrisinin Matematiksel Modeli (EC 1992-1-2, 2004)

Aralık	Gerilme $\sigma(\theta)$
$\varepsilon_c \leq \varepsilon_{c1,\theta}$	$\frac{3\varepsilon f_{c\theta}}{\varepsilon_{c1,\theta} \left( 2 + \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{cu1,\theta}} \right)^3 \right)}$
$\varepsilon_{c1(\theta)} < \varepsilon \leq \varepsilon_{cu1,\theta}$	Sayısal modelleme amacıyla eğrinin azalan kısmı uyarlanmalıdır. Doğrusal veya doğrusal olmayan modeller kullanılabilir

Yangından dolayı hasara uğramış betonarme numunelerin sıcaklığın değişmediği (20°C) iç kısımlarında beton ve donatı çeliğinin mekanik özellikleri TS EN 1992-1-1’de oda sıcaklığındaki tasarımı için verilen değerler gibi kullanılmıştır. Aşağıdaki şekilde gerilme-birim şekil değişirme bağlantısı gösterilmiştir.



**Şekil 8.** Oda sıcaklığındaki (20°C) beton için gerilme-şekil değişirme ilişkisi eğrisi (EN 1992-1-1)

$$0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2} \quad \sigma_c = f_{cd} \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \quad (5)$$

$$\varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2} \quad \sigma_c = f_{cd} \quad (6)$$



Beton İçin Dayanım Sınıfları										Açıklama
$f_{ck}$ (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	
$f_{cm}$ (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
$f_{ctm}$ (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	$f_{ctm} = 0,30 \times f_{cm}^{(2/3)}$ $\leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \ln(1 + (f_{cm}/10))$ $> C50/60$
$E_{cm}$ (GPa)	27	29	30	31	33	34	35	36	37	$E_{cm} = 22[(f_{cm}/10)^{0,2}]$ ( $f_{cm}$ in MPa)
$\epsilon_{c2}$ (‰)					2,0					for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{c2}(f_{ck}) = 2,0 + 0,085(f_{ck} - 50)^{0,23}$
$\epsilon_{cu2}$ (‰)					3,5					for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $\epsilon_{cu2}(f_{ck}) = 2,6 + 35[(90 - f_{ck})/100]^4$
$n$					2,0					for $f_{ck} \geq 50$ Mpa $n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4$

**Şekil 9.** Oda sıcaklığındaki (20°C) C25 sınıfı betonun gerilme-şekil değiştirme değerleri (Eurocode 1992-1-1)

ASCECode78'de, tek eksenli yük beton numuneleri için yükseltilmiş sıcaklıklarda aşağıdaki dört parametreye dayanarak gerilim gerilme eğrisi için bir ilişki geliştirmiştir:

- 1- Ortam oda sıcaklığında basınç dayanımı  $f'_{c0}$
- 2- Yüksek sıcaklıktaki basınç dayanımı  $f'_c$
- 3-  $f'_c$ 'ye karşılık gelen gerilme  $\epsilon_c$
- 4- Nihai gerilme  $\epsilon_{max}$

ASCECode78 tarafından geliştirilen matematiksel model aşağıdaki denklemlerle yönetilir:

$$\epsilon_c \leq \epsilon_{max} \quad f'_c \left[ 1 - \left( \frac{\epsilon_{max} - \epsilon_c}{\epsilon_{max}} \right)^2 \right] \quad (7)$$

$$\epsilon_c < \epsilon_{max} \quad f'_c \left[ 1 - \left( \frac{\epsilon_c - \epsilon_{max}}{3 \epsilon_{max}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

Burada,

$T \leq 450^\circ\text{C}$  ise

$$f'_c = f'_{c0} \quad (9)$$

$T \geq 450^\circ\text{C}$  ise

$$f'_c = f'_{c0} \left[ 2.011 - 2.353 \frac{T-20}{1000} \right] \quad (10)$$

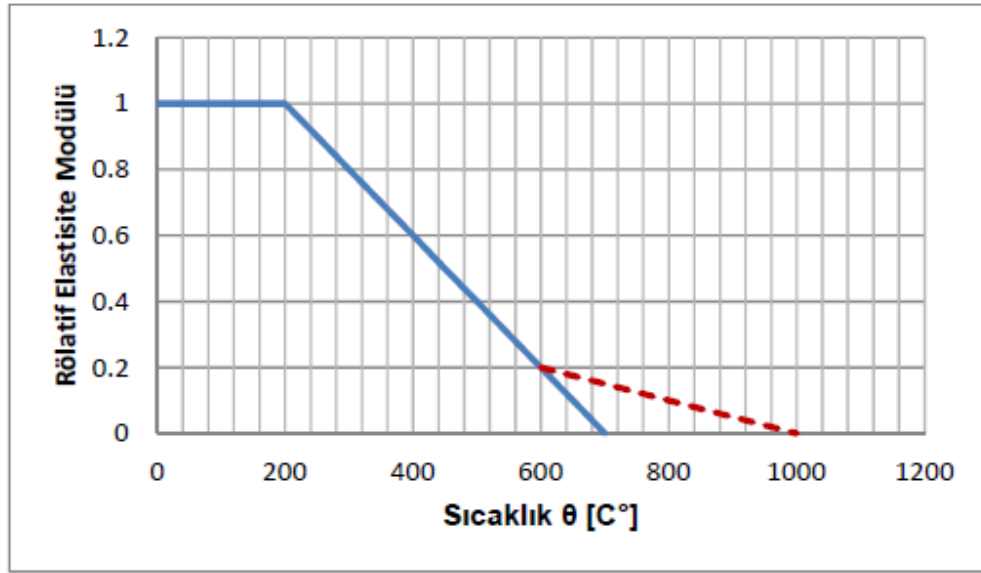
$$\varepsilon_{max} = 0.0025 + (6.0 T + 0.04 T^2) \times 10^{-6} \quad (11)$$

### ***Elastisite modülü***

Betonun sıcaklık altındaki elastisite modülü, basınç dayanımına benzer bir etki göstermektedir. Betonların sıcaklık altındaki elastisite modülünün sıcaklıkla değişimine ilişkin TS EN 1992-1-2'de ki matematiksel denklemler aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C} \quad E_c(T) = 1,0 \times E_c(20^\circ\text{C}) \quad (12)$$

$$\theta > 200^\circ\text{C} \quad E_c(T) = \frac{700 - \theta}{500 \times E_c(20^\circ\text{C})} \quad (13)$$



**Şekil 10.** Betonun sıcaklık altındaki elastisite modülü değişimi (Hacıemiroğlu, 2014)

### ***Basınç dayanımı***

Basınç dayanımı betonun en önemli mekanik özelliklerinden biridir. Aynı zamanda yangına maruz kalan betonarme yapılarının yangın davranışı için kritik faktörlerden biridir. Yüksek sıcaklıklar altında betonun basınç dayanımı sıcaklık, yükleme geçmişi, agrega tipi vb. gibi parametrelere bağlıdır. Bununla birlikte, belirli bir beton tipi için, mukavemetin neredeyse sadece sıcaklığa bağlı olduğu ve yükleme geçmişinin ihmal edilebileceği açıkça görülmektedir (Anderberg, et al. 1982).

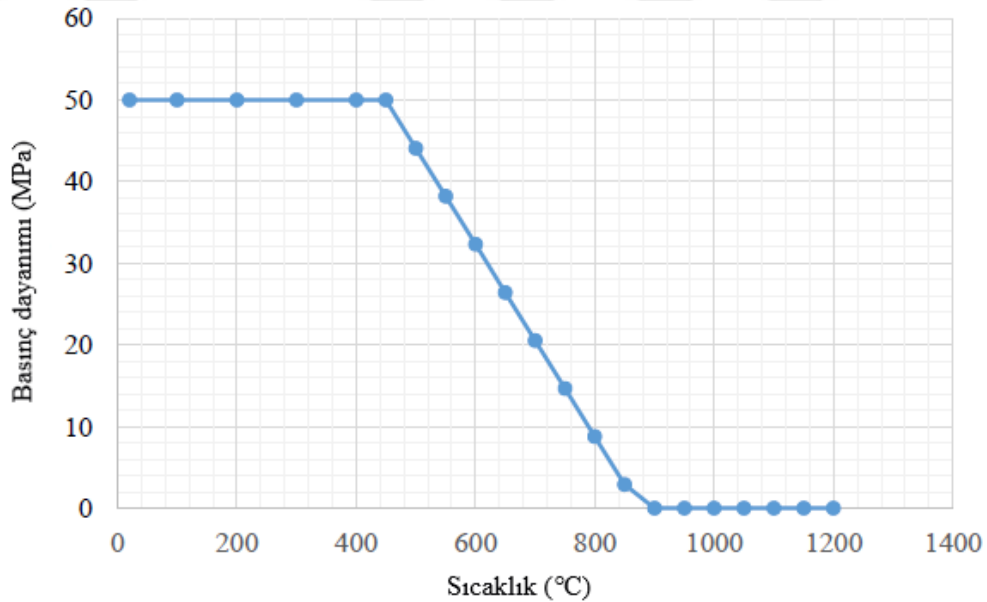
Lu et al. (1996; 1993), Denklem 12'de gösterilen, normal betonun kübik örnekleri üzerindeki sıkıştırma deneylerine dayanarak, yüksek sıcaklıklarda betonun basınç dayanımı için Denklem 14'deki gibi bir bağıntı vermişlerdir.

$$\frac{f'_c(\theta)}{f'_c(20^\circ\text{C})} = \begin{cases} 1.0 & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 400^\circ\text{C} \\ 1.75 - 1.9 \times 10^{-3} \theta & 400^\circ\text{C} \leq \theta \leq 800^\circ\text{C} \end{cases} \quad (14)$$

Burada,  $f'_c(\theta)$   $\theta^\circ$  sıcaklıktaki betonun basınç dayanımı  
 $f'_c(20^\circ\text{C})$   $20^\circ\text{C}$  sıcaklıktaki betonun basınç dayanımı

Eurocode-2 ve TS EN 1992-1-2'de yüksek sıcaklıklarda betonun basınç dayanımı, daha önce Tablo 1'de bahsedildiği gibidir. Silisli veya kalkerli agregalara sahip normal ağırlıkta beton için kullanılabilirler. Burada yüksek sıcaklık altında betonun basınç dayanımı  $f'_c, \theta$ , oda sıcaklığındaki betonun basınç dayanımı  $f_{ck}$  değeridir.

ASCECode78'de denklem 4 ve 5'de açıklandığı gibi önerilmiştir. Bir örnek olarak  $f'_{co} = 50$  MPa olan bir beton için Şekil 11'de gösterilmiştir.



**Şekil 11.**  $f'_{co} = 50$  MPa olan beton için yüksek sıcaklıklarda basınç dayanımı değişimi (ASCE-ACI 426, 1973 )

### **Çekme dayanımı**

Eurocode-2 ve TS EN 1992-1-2'de normal şartlarda, betonun çözümlenmesi sırasında beton çekme dayanımının göz ardı edildiğini, ancak beton çekme dayanımının uygulanması zorunlu hale gelirse, aşağıdaki denklemin kullanılabileceğini belirtmiştir. Denklem ayrıca Şekil 12'de bir eğri olarak çizilmiştir.

$$f_{ck,t}(\theta) = K_{c,t}(\theta) f_{ck,t} \quad (15)$$

Burada,

$f_{ck,t}(\theta)$  = yüksek sıcaklıkta çekme dayanımı

$f_{ck,t}$  = ısınmadan önceki çekme dayanımı

$$K_{c,t}(\theta) = 1.0$$

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C}$$

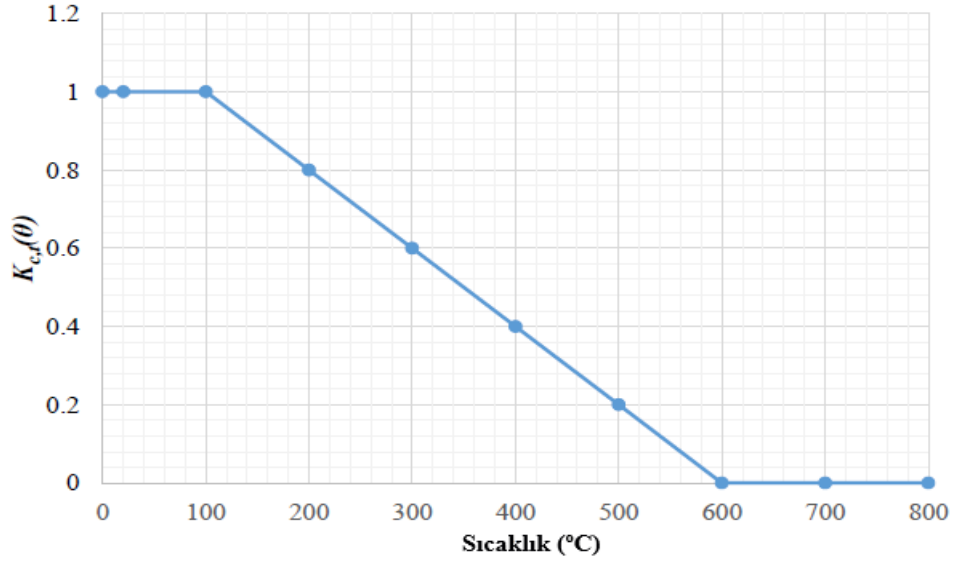
$$K_{c,t}(\theta) = 1.0$$

$$(16)$$

$$100^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 600^{\circ}\text{C}$$

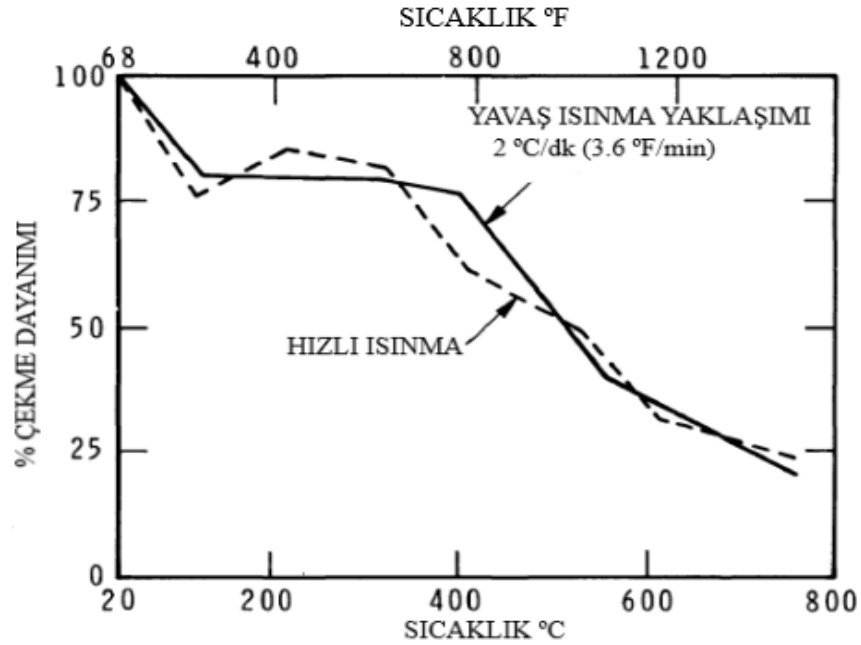
$$K_{c,t}(\theta) = 1.0 - 1.0(\theta - 100)/500$$

$$(17)$$



**Şekil 12.** Beton çekme dayanımının ( $f_{ck,t}$ ) yüksek sıcaklıklardaki azalmasını hesaplama için kullanılan  $k_{c,t}(\theta)$  (TS-EN 1992-1-2)

ASCECode78, Eurocode-2'ye benzer şekilde azaltma yüzdesi önermiş, ancak yavaş ısıtılmış ve hızlı ısıtılmış beton için Şekil 13'te gösterildiği gibi farklı değerlerle kodlanmıştır.



**Şekil 13.** Hem yavaş ısıtılmalı hem de hızlı ısıtılmalı betonun çekme mukavemeti için azalma yüzdesinin değişimi (ASCECode78, 1973)

## Isıl özellikler

### Isıl genleşme (uzama)

Eurocode-2 ve TS EN 1992-1-2'de yüksek sıcaklıklardaki beton için birim şekil değişikliği  $\varepsilon_c(\theta)$  olan, biri silisli agregaları olan beton için, diğeri kalkerli agregaları olan beton için aşağıdaki gibi iki farklı denklem önermektedir.

Silisli agregalar için;

$$20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} , \varepsilon_c(\theta) = -1,8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta + 2,3 \times 10^{-11} \theta^3 \quad (18)$$

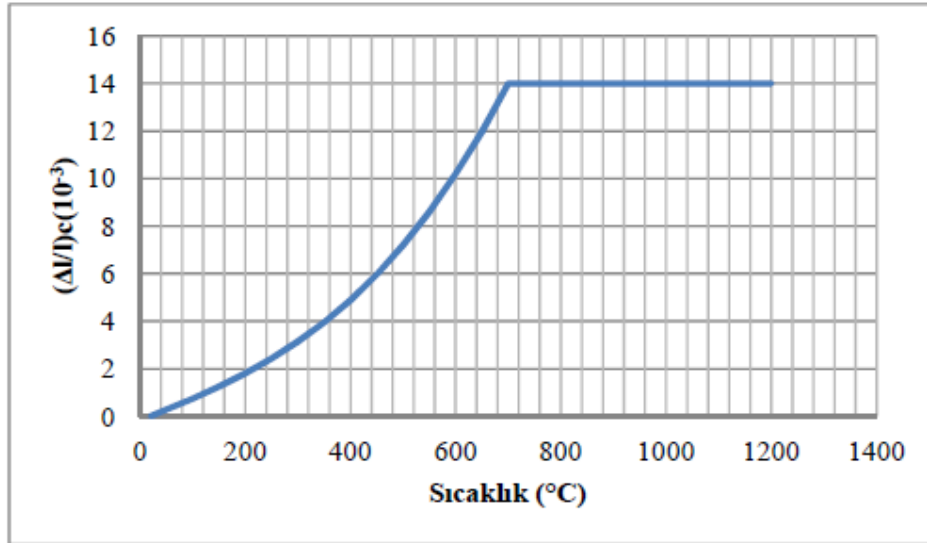
$$700^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} , \varepsilon_c(\theta) = 14 \times 10^{-3} \quad (19)$$

Kireçli agregalar için;

$$20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 805^\circ\text{C} \quad \varepsilon_c(\theta) = -1,2 \times 10^{-4} + 6 \times 10^{-6} \theta + 1,4 \times 10^{-11} \theta^3 \quad (20)$$

$$805^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} , \varepsilon_c(\theta) = 14 \times 10^{-3} \quad (21)$$

Yüksek sıcaklıklarda silis agregalı beton için ısıl genleşme değerleri hesaplanmış ve Şekil 14'te gösterilmiştir.



Şekil 14. Silis agregalı beton için ısıl genleşme değerleri (Hacıemiroğlu, 2014)

ASCECode78, silis ve kalker agregalı beton ve killi beton için, ısıl genleşme katsayısının hesaplanması için aşağıdaki gibi iki farklı denklem önermiştir.

$$\text{Silis ve kalker agregalı beton: } \alpha = (0,008T + 6) \times 10^{-6} \quad (22)$$

$$\text{Killi beton: } \alpha = 7,5 \times 10^{-6} \quad (23)$$

### ***Isıl iletkenlik katsayısının değişimi***

Eurocode-2 ve TS EN 1992-1-2’de belirtildiği gibi yüksek sıcaklıklar altındaki betonun ısı iletkenlik katsayısı değişimleri değeri hesaplanmıştır. Üst sınır ve alt sınır olmak üzere iki eşitlik arasında belirlenebileceğini belirtilmektedir. Aşağıdaki denklemlerde üst ve alt limitleri verilmektedir.

Üst limit:

$$\lambda_c = 2 - 0.2451(\theta/100) + 0.0107 (\theta/100)^2 \text{ W/m K } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (24)$$

Alt limit:

$$\lambda_c = 1.36 - 0.136(\theta/100) + 0.0057 (\theta/100)^2 \text{ W/m K } 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (25)$$

ASCECode78, kullanılan agrega tipine bağlı olarak betonun ısı iletkenlik katsayısı için aşağıdaki gibi bir dizi denklem önermiştir:

$$\text{Silis agregalı beton : } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad K_c = -0.000625T + 1.5 \text{ W}_m^{-1}\text{ }^\circ\text{C} \quad (26)$$

$$T > 800^\circ\text{C} \quad K_c = 1.0 \text{ W}_m^{-1}\text{ }^\circ\text{C} \quad (27)$$

Kalker agregalı beton:

$$0^\circ\text{C} \leq T \leq 293^\circ\text{C} \quad K_c = 1.355 \text{ W}_m^{-1}\text{ }^\circ\text{C} \quad (28)$$

$$T > 293^\circ\text{C} \quad K_c = -0.001241T + 1.7162 \text{ W}_m^{-1}\text{ }^\circ\text{C} \quad (29)$$

Kil agregalı beton:

$$0^\circ\text{C} \leq T \leq 600^\circ\text{C} \quad K_c = -0.00039583T + 0.0925 \text{ W}_m^{-1}\text{ }^\circ\text{C} \quad (30)$$

$$T > 600^\circ\text{C} \quad K_c = 0.6875 \text{ W}_m^{-1}\text{ }^\circ\text{C} \quad (31)$$

Saf kuvars agregalı beton:

$$0^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad K_c = -0.00085T + 1.9 \text{ W}_m^{-1}\text{ }^\circ\text{C} \quad (32)$$

$$T > 800^\circ\text{C} \quad K_c = 1.22 \text{ W}_m^{-1}\text{ }^\circ\text{C} \quad (33)$$

### ***Özgöl ısı***

Eurocode-2 ve TS EN 1992-1-2’de, silisli ve kalkerli agregalar için betonun yüksek sıcaklıklardaki özgöl ısısını hesaplamak için bağıntılar vermektedir. (Nem içeriği  $u = \% 0$ ), betonun özgöl ısısı için ayarlanan denklemler ( $u = \% 0$ ) aşağıdaki gibidir:

$$20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100^\circ\text{C} \quad C_p(\theta) = 900 \text{ (J/kg K)} \quad (34)$$

$$100^\circ\text{C} \leq \theta \leq 200^\circ\text{C} \quad C_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \text{ (J/kg K)} \quad (35)$$

$$200^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \quad C_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2 \quad (\text{J/kg K}) \quad (36)$$

$$400^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad C_p(\theta) = 1100 \quad (\text{J/kg K}) \quad (37)$$

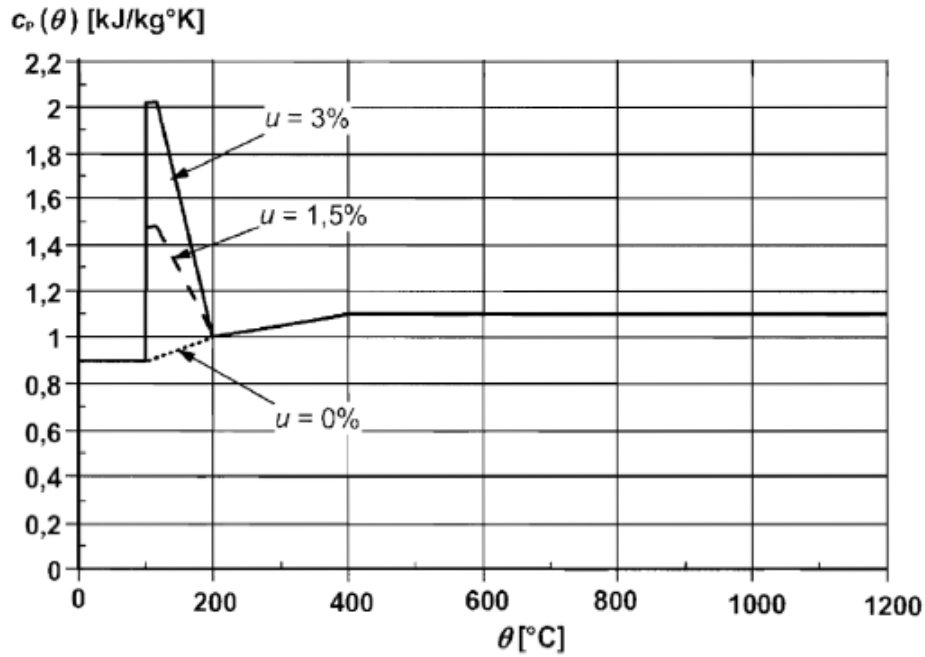
Nem içeriğini modellemek için, denklemlerde  $100^{\circ}\text{C}$ 'de özgül ısı değeri  $C_p$ ,  $115^{\circ}\text{C}$  sıcaklığa kadar sabit tutulmaktadır. Tepe değerine eşit olan bir bağlantı önermektedir. Bu değer daha sonra sıcaklığı doğrusal azalan bir eğri ile modellenir.  $100^{\circ}\text{C}$ 'den önce ve  $200^{\circ}\text{C}$ 'den sonra  $u \neq 0$  olsa bile geleneksel denklemler ( $u = 0$ ) kullanılır. Çeşitli nem değerleri için  $C_p$ , tepe değerleri aşağıda listelenmiştir.

$$C_{p, \text{tepe}} = 900 \text{ J / kg K} \quad (\text{beton ağırlığına oranla } \% 0 \text{ nem içeriği varsa})$$

$$C_{p, \text{tepe}} = 1470 \text{ J / kg K} \quad (\text{beton ağırlığına oranla } \% 1,5 \text{ nem içeriği varsa})$$

$$C_{p, \text{tepe}} = 2020 \text{ J / kg K} \quad (\text{beton ağırlığına oranla } \% 3,0 \text{ nem içeriği varsa})$$

Yüksek sıcaklıklardaki beton için farklı nem içerikli özgül ısı değerleri arasındaki karşılaştırma Şekil 15'te gösterilmektedir.



**Şekil 15.** Çeşitli nem içerikli yüksek sıcaklıklarda beton için özgül ısı değerlerinin karşılaştırması (TS-EN 1992-1-2)

### Yoğunluk

Eurocode-2 ve TS EN 1992-1-2'de, su kaybına bağlı sıcaklıktan etkilenen beton yoğunluğunu aşağıda verilen denklemlerle ifade edilmektedir. Artan sıcaklıkla beraber kesitteki serbest su moleküllerinin buharlaşmasıyla betonun yoğunluğu değişmektedir.

$$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C} \quad \rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \quad (38)$$

$$115^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 200^{\circ}\text{C} \quad \rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C})(1 - 0.02(\theta - 115)/85) \quad (39)$$

$$200^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 400^{\circ}\text{C} \quad \rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C})(0.98 - 0.03(\theta - 200)/200) \quad (40)$$

$$400^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C} \quad \rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C})(0.95 - 0.07(\theta - 400)/800) \quad (41)$$

Burada,  $\rho(\theta)$  = Yüksek sıcaklıktaki yoğunluk

$\rho(20^{\circ}\text{C})$  = 20°C'deki yoğunluk

### **Yangın Yükünün Çelik Donatıya Etkisi**

Yangın yükleri altında betonarme kullanımı hakkındaki ana fikir, çeliğin yüksek iletkenliğe sahip olması yangın koşulları sonunda küçük bir sürede çökmeye yol açan büyük deformasyondan muzdarip olmasıdır.

#### **Mekanik özellikler**

##### ***Gerilme-şekil değiştirme eğrisi***

Eurocode-2 ve TS EN 1992-1-2'de yüksek sıcaklıklar altında betonarme çelik donatısının dayanım ve şekil değişime özellikleri için gerilme-birim şekil değiştirme ilişkisi olarak verilmiştir. Bu ilişkiler Şekil 16, Şekil 17 ve Tablo 3'te gösterilmektedir. Gerilme-şekil değiştirme ilişkisini tanımlamak için aşağıdaki üç parametre gereklidir:

$E_{s,\theta}$  = doğrusal elastik aralığın eğimi

$f_{sp,\theta}$  = orantılılık sınırı,  $\epsilon_{sp\theta}$  ise karşılık gelen birim şekil değiştirme

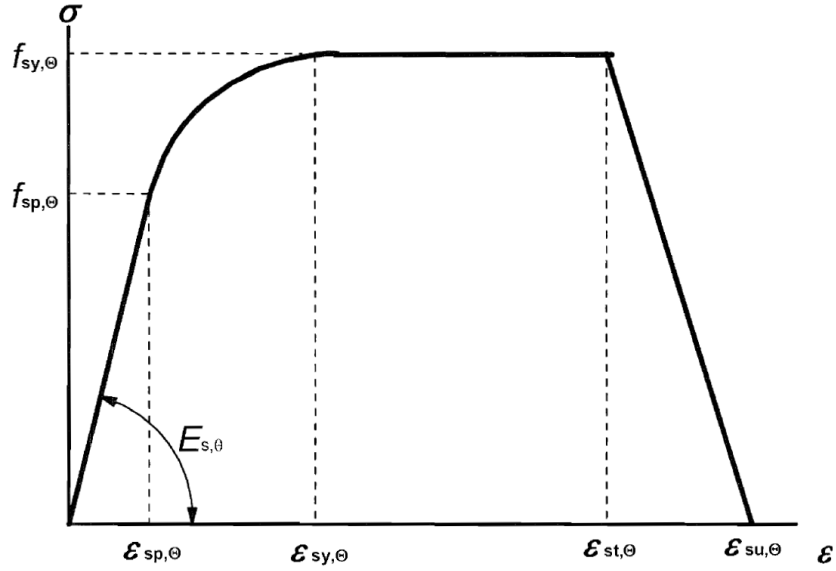
$f_{sy,\theta}$  = maksimum gerilme seviyesi,  $\epsilon_{sy\theta}$  ise karşılık gelen birim şekil değiştirme olarak ifade edilir.

TS EN 1992-1-2'de sıcak haddelenmiş ve soğuk işlenmiş çelik donatısı için yüksek sıcaklık altındaki yukarıdaki parametrelere ait değerler verilmiştir. Türkiye'de soğuk işlenmiş (S420) donatı çeliği yaygın olarak kullanıldığından bu çalışma içinde soğuk işlenmiş çeliğin parametreleri kullanılmıştır.



**Tablo 3.** TS EN 1992-1-2’de Verilen Soğuk İşlenmiş Donatının Gerilme – Birim Şekil Değiştirme İlişkinine Ait Yüksek Sıcaklıklardaki Elastisite Modülü ve Gerilmelerdeki Kayıplar

Çelik Sıcaklığı, $\theta$		Soğuk İşlenmiş	
[°C]	$f_{sy,\theta} / f_{yk}$	$f_{sp,\theta} / f_{yk}$	$E_{s,\theta} / E_s$
20	1.00	1.00	1.00
100	1.00	0.96	1.00
200	1.00	0.92	0.87
300	1.00	0.81	0.72
400	0.94	0.63	0.56
500	0.67	0.44	0.40
600	0.40	0.26	0.24
700	0.12	0.08	0.08
800	0.11	0.06	0.06
900	0.08	0.05	0.05
1000	0.05	0.03	0.03
1100	0.03	0.02	0.02
1200	0.00	0.00	0.00



**Şekil 16.** Yüksek sıcaklık altında donatı çeliğinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi (TS-EN 1992-1-2)

Aralık	Gerilme $\sigma(\theta)$	Tanjant modülü
$\varepsilon_{sp,\theta}$	$\varepsilon E_{s,\theta}$	$E_{s,\theta}$
$\varepsilon_{sp,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{sy,\theta}$	$f_{sp,\theta} - c + (b/a)[a^2 - (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)^2]^{0,5}$	$\frac{b(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon)}{a[a^2 - (\varepsilon - \varepsilon_{sy,\theta})^2]^{0,5}}$
$\varepsilon_{sy,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{st,\theta}$	$f_{sy,\theta}$	0
$\varepsilon_{st,\theta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{su,\theta}$	$f_{sy,\theta} [1 - (\varepsilon - \varepsilon_{st,\theta}) / (\varepsilon_{su,\theta} - \varepsilon_{st,\theta})]$	-
$\varepsilon = \varepsilon_{su,\theta}$	0,00	-
Parametre <sup>1)</sup>	$\varepsilon_{sp,\theta} = f_{sp,\theta} / E_{s,\theta}$ $\varepsilon_{sy,\theta} = 0,02$ $\varepsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$ Sınıf A donatı: $\varepsilon_{st,\theta} = 0,15$ $\varepsilon_{su,\theta} = 0,20$	
Fonksiyonlar	$a^2 = (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta} + c / E_{s,\theta})$ $b^2 = c (\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} + c^2$ $c = \frac{(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})^2}{(\varepsilon_{sy,\theta} - \varepsilon_{sp,\theta}) E_{s,\theta} - 2(f_{sy,\theta} - f_{sp,\theta})}$	

**Şekil 17.** Yüksek sıcaklık altında donatı çeliğinin TS EN 1991-1-2'deki gerilme-şekil değiştirme parametreleri

ASCECode78'de, yüksek sıcaklık altındaki çelik donatı için tavsiye edilen gerilme-şekil değiştirme eğrilerini oluşturmada kullanılacak denklemler aşağıdaki gibidir.

$\varepsilon_s \leq \varepsilon_p$  için,

$$f_y = \frac{f(T, 0.001)}{0.001} \varepsilon_s \quad (42)$$

Burada,

$\varepsilon_s$  = çelik gerilmesini

$\varepsilon_p$  = çelik gerilme orantılılık sınırını (yaklaşık olarak  $4 \times 10^{-6} \times f_{y0}$ )

$f_{y0}$  = ısıtma öncesi çelik akma dayanımını ifade etmektedir.

$\varepsilon_s \geq \varepsilon_p$  için,

$$f(T, 0.001) = (50 - 0.04T) \times \{1 \exp[(30 + 0.03T)\sqrt{(0.001)}]\} \times 6.9 \quad (43)$$

Burada,

$$f_y = \frac{f(T, 0.001)}{0.001} \varepsilon_p + f[T, (\varepsilon_s - \varepsilon_p + 0.001)] - f(T, 0.001) \quad (44)$$

### **Elastisite modülü**

Eurocode-2 ve TS EN 1991-1-2'ye göre genellikle betonarme kiriş yapı tasarımında çeliğin elastik modülü için değerler Tablo 3'te verilmiştir.

Lu et al. (1993), deneysel sonuçlara dayanarak çeliğin elastik modülü için üç aşamalı bir fonksiyon vermiştir.

$$\frac{E_s(\theta)}{E_s(20^\circ\text{C})} = \begin{cases} 1.0 - 4.86 \times 10^{-4}\theta & 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 370^\circ\text{C} \\ 1.515 - 1.978 \times 10^{-3}\theta & 370^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C} \\ 0.13 & \theta \leq 700^\circ\text{C} \end{cases} \quad (45)$$

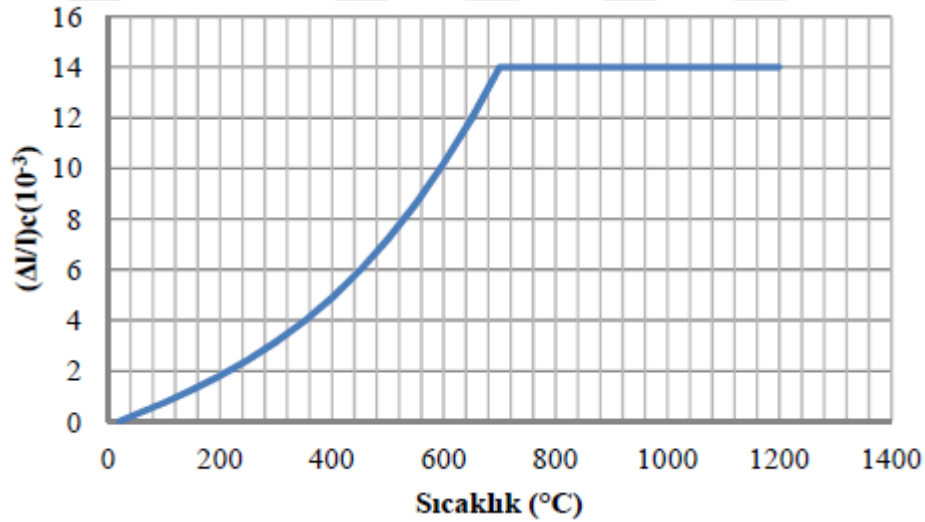
### Isıl özellikler

#### Isıl genleşme

Eurocode 2 ve TS EN 1991-1-2 'da ısıl genleşmeyi hesaplamak için sıcaklık aralıklarına göre aşağıdaki gibi matematiksel denklemler verilmiştir. Bu denklemlere göre hesaplanan ısıl genleşme değerleri şekil 18'de verilmiştir. Böylece sıcaklık arttıkça ısıl genleşme arttığı görülmektedir.

$$\varepsilon_c(\theta) = -1.8 \times 10^{-4} + 9 \times 10^{-6} \theta + 2.3 \times 10^{-11} \theta^3 \quad 20^\circ\text{C} \leq \theta \leq 700^\circ\text{C} \quad (46)$$

$$\varepsilon_s(\theta) = 14 \times 10^{-3} \quad 700^\circ\text{C} \leq \theta \leq 1200^\circ\text{C} \quad (47)$$



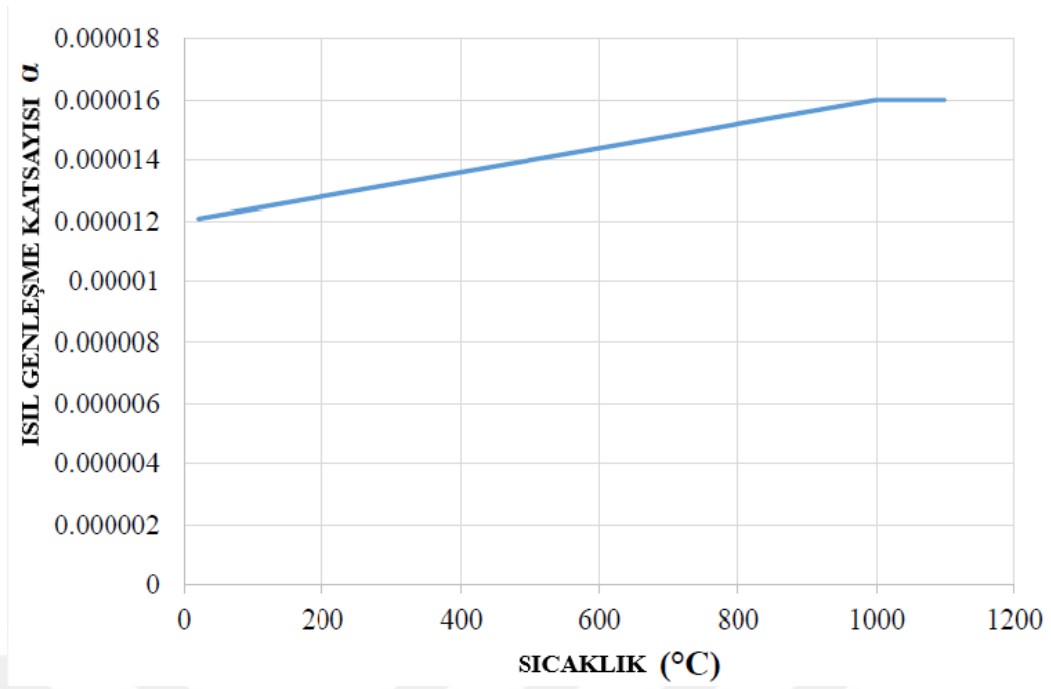
**Şekil 18.** Çelik için sıcaklıkla değişen ısıl genleşme değerleri (Hacıemiroğlu, 2014)

ASCECode78'e göre, yüksek sıcaklıklarda çeliğin ısıl genleşme katsayısının hesaplanması için matematiksel denklemler aşağıdaki gibidir:

$$\alpha_s = (0.004T + 12) \times 10^{-6} \text{ C}^{-1} \quad T < 1000^\circ\text{C} \quad (48)$$

$$\alpha_s = 16 \times 10^{-6} \text{ C}^{-1} \quad T \geq 1000^\circ\text{C} \quad (49)$$

Yüksek sıcaklıklarda ASCECode78'e göre çelik için ısıl genleşme katsayısının değişimi Şekil 19'da gösterilmiştir.



**Şekil 19.** Yüksek sıcaklıklarda çelik için ısıl genleşme katsayısının değişimi (ASCECode78, 1973)

#### *Isıl iletkenlik katsayısı*

Eurocode-2 ve TS EN 1991-1-2 'da yüksek sıcaklıklarda çeliğin ısıl iletkenlik katsayı değerini hesaplamak için alt ve üst sınır olmak üzere iki adet aşağıdaki gibi matematiksel denklemler verilmiştir. Silis agregalı betonlarda, silis agreg miktarı artınca ısıl iletkenlik sayısı üst sınıra yaklaştığından üst denkleme dikkate alınmalıdır. Isı iletim katsayısının sıcaklıkla ters orantılı olduğu görülmektedir.

Üst sınır:

$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$  olduğunda,

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 (\theta / 100) + 0,0107 (\theta / 100)^2 \text{ W/m K} \quad (50)$$

Alt sınır:

$20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$  olduğunda,

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 (\theta / 100) + 0,0057 (\theta / 100)^2 \text{ W/m K} \quad (51)$$

Burada,  $\theta_a$  = çeliğin sıcaklık değeridir.

ASCECode78'e göre ise çeliğin ısıl iletkenlik katsayısı için aşağıdaki gibi matematiksel denklemler verilmiştir:

$$K_s = -0.022T + 48 \text{ Wm}^{-10}\text{C} \quad 0^{\circ}\text{C} \leq T \leq 900^{\circ}\text{C} \quad (52)$$

$$K_s = 28.2 \text{ Wm}^{-10}\text{C} \quad T > 900^{\circ}\text{C} \quad (53)$$

## Özgül ısı

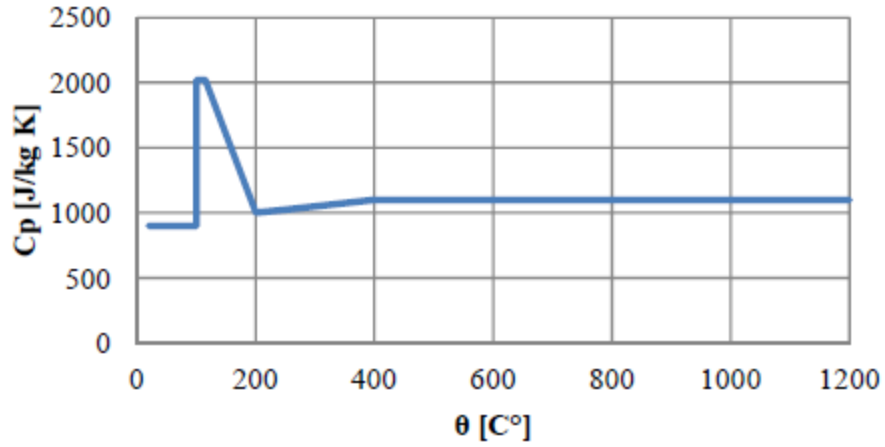
Eurocode-2 ve TS EN 1991-1-2 'da yüksek sıcaklıklarda çeliğin özgül ısı değerini hesaplamak için sıcaklık aralıklarına göre aşağıdaki gibi matematiksel denklemler verilmiştir. Şekil 20'de hesaplanan değerlerin eğrisi verilmiştir.

$$C_p(\theta) = 900 \left( \frac{J}{kg K} \right) \quad 20^\circ C \leq \theta \leq 100^\circ C \quad (54)$$

$$C_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \left( \frac{J}{kg K} \right) \quad 100^\circ C \leq \theta \leq 200^\circ C \quad (55)$$

$$C_p(\theta) = 1000 + \frac{\theta - 200}{2} \left( \frac{J}{kg K} \right) \quad 200^\circ C \leq \theta \leq 400^\circ C \quad (56)$$

$$C_p(\theta) = 1100 \left( \frac{J}{kg K} \right) \quad 400^\circ C \leq \theta \leq 1200^\circ C \quad (57)$$



Şekil 20. Yüksek sıcaklıklar altındaki çeliğin özgül ısı değerleri (Hacıemiroğlu, 2014)

## Yoğunluk

TS EN 1992-1-2'de çelik donatı yoğunluğunun yüksek sıcaklık altında değişme olmadığı varsayılmakta olup,  $\rho_s = 7850$  alınmalıdır.

ASCECode78, ise yüksek sıcaklık altında donatı çeliğinin yüksek sıcaklık altında değişim olduğunu varsaymaktadır. Farklı sıcaklık aralıkları için çelik yoğunluğunu hesaplamada aşağıdaki gibi matematiksel denklemlerle ifade etmiştir:

$$\rho_{scs} = (0.004T + 3.3) \times 10^6 \text{ Jm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad 0^\circ\text{C} \leq T \leq 650^\circ\text{C} \quad (58)$$

$$\rho_{scs} = (0.068T + 38.3) \times 10^6 \text{ Jm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad 650^\circ\text{C} \leq T \leq 725^\circ\text{C} \quad (59)$$

$$\rho_{scs} = (-0.086T + 73.35) \times 10^6 \text{ Jm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad 725^\circ\text{C} \leq T \leq 800^\circ\text{C} \quad (60)$$

$$\rho_{scs} = 4.55 \times 10^6 \text{ Jm}^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} \quad T > 800^\circ\text{C} \quad (61)$$

Burada,  $\rho_{scs}$  =Yüksek sıcaklıklarda ısıl kapasite

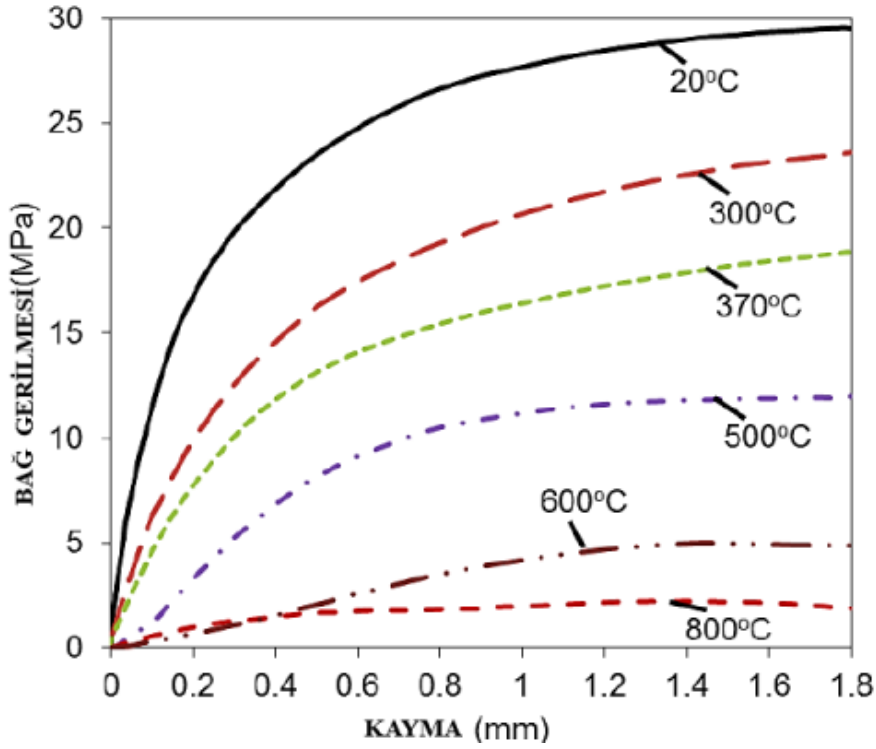
$\rho_s$  = Yüksek sıcaklıklarda yoğunluk

$c_s$  = Yüksek sıcaklıklarda özgül ısı

### Yangın Yükünün Aderansa Etkisi

Çelik donatı ve beton arasındaki bağ davranışı, iki malzeme arasında kuvvet transferine izin veren temel bir özelliktir. Bağ kuvveti, betonarme yapılarının çatlama, deformasyon ve taşıma kapasitesini doğrudan etkileyebilir (Sebastjan et al. 2007; Chiang et al. 2003). Literatür incelemesine göre, yüksek sıcaklık altında beton ve çelik çubuklar arasındaki bağ mukavemeti kaybı, betonun çatlaması ve betonun azalan gerilme mukavemetinden etkilenmektedir (EI-Hawary et al. 1996; Duederichs et al. 1981)

Literatürde, beton ve çelik çubuklar arasındaki bağ dayanımının artan sıcaklıkla azalacağı (Şekil 21) ve bu eğilimin betonun gerilme dayanımına benzer olduğu sonucuna varılmıştır (Diederichs & Schneider 1981; Abbasi, A. Vd., 2005; Haddad, RH vd., 2004).



Şekil 21. Çeliğin yüksek sıcaklıklarda gerilme kayma ilişkisi (Diederichs and Schneider, 1981)

Sonuç olarak bu özellikleri özetlersek, literatürde verilen birçok mevcut malzeme modelinin incelenmesine ve karşılaştırılmasına dayanarak, bu bölüm, yüksek sıcaklıklarda beton ve çelik donatıların malzeme özelliklerinin gözden geçirilmesini ve çözümlemesini vermektedir. Sıcaklığa bağlı bu fiziksel ve mekanik özellikler, betonarme elemanlar ve yapılar üzerinde yangın davranışı araştırması için temel parametreleridir.

Artan sıcaklıkla, betonun ısı iletkenliği ve yoğunluğu azalacaktır, ancak değişiklik önemli değildir ve yoğunluk normal olarak sabit olarak alınır. Betonun özgül ısısı ilk önce artar ve sonra sıcaklık 600°C'ye ulaştığında sabit kalır.

Betonun basınç ve çekme mukavemeti, yüksek sıcaklıklara maruz kalırken düşme eğilimindedir. Sıcaklığın çekme mukavemeti üzerindeki etkisi basınç dayanımından çok daha fazladır, bu nedenle betonun çekme mukavemeti, betonarme yapılarının yangın sırasında yapısal davranışlarına çok az katkıda bulunur. Betonun elastisite modülü de sıcaklıkla azalacaktır.

Artan sıcaklıkla çeliğin ısı iletkenliği doğrusal olarak azalacak ve özgül ısı az miktarda artacaktır. Çeliğin yoğunluğu değişiklik göstermediğinden, yangın hesaplamaları sırasında sabit olarak alınır.

Her türlü çelik donatıların mukavemeti artan sıcaklıkla birlikte düşme eğilimindedir ve daha yüksek mukavemetli çelik donatıların mukavemeti daha hızlı azalacaktır. Çelik donatıların elastisite modülü sıcaklıkla düşme eğilimindedir. Çelik donatılar ve beton arasındaki bağ kuvveti, yüksek sıcaklıklar altında azalacaktır.

### **Betonarme Kirişlerde Kesme Etkisi**

Betonarme yapı elemanlarını dikkate aldığımız zaman kesme kırılması incelenmesi ve aynı zamanda dikkate alınması gereken en önemli sorunlardandır. Betonarme yapı elemanlarını düşündüğümüz zaman kesme kuvvetinin aktarılma biçimi birbirlerine çok benzer şekilde olmaktadır. Fakat buna karşılık betonarme elemanlarda oluşan çatlak, göçme davranışları ve şekilleri farklıdır. Bir kiriş yapı elemanından örnek vermek gerekirse, tekil yüke maruz kaldığı durumda kesme açıklığı ve kiriş etkili yükseklik oranının ( $a/d$ ) kesme bakımından kırılma davranışına sebep olan ve göz ardı edilmemesi gereken en önemli değişkendir. Bahsettiğimiz bu  $a/d$  oranı aynı zamanda  $M/(Vd)$  terimleri kullanılarak gösterilebilmektedir. Fakat  $M/(Vd)$  ifadesi çoğunlukla tasarımda ve yüklemenin daha geniş olacağı durumlarda kullanılmaktadır.  $M/(Vd)$  oranının değişmesi ile beraber kayma gerilmesi, basınç gerilmesi ve eğilme gerilmesi de değişmektedir (ASCEACI 426 1973).

Kirişler: Yapılarda kullanılan kiriş elemanlarında  $M/(Vd)$  ve ya  $a/d = 2\sim 6$  olması halinde yükten dolayı oluşacak olan eğilme ve kesme etkilerine tabi olarak eğik çatlaklar meydana gelmektedir. Meydana gelen eğik çatlakların yatay ile arasında yaptığı açı 30°-60° arasında olmalıdır. Kiriş elemanlarında birçok kesme kırılması durumu oluşur. Ancak meydana gelen bu durumlardan bir tanesi ile daha çok karşılaşılır. En çok karşılaştığımız bu kesme kırılmasında eğik çatlakların hemen üzerindeki basınç kenarlarının kayması ve ya

ezilmesi nedeniyle çekme donatılarında ortaya çıkan yarılmalardan ötürü meydana gelen göçme biçimidir (ASCE-ACI 426 1973).

Kesme kırılmasının yüksek kiriş elemanlarında meydana gelmesi ise normal kiriş elemanlarına göre bir hayli farklı olmaktadır. Normal kirişlere göre yüksek kirişlerde ortaya çıkan çatlaklar yapısı gereği daha dik (yaklaşık  $60^\circ$ ) oluşmaktadır. Kesme kuvvetinin güvenli bir şekilde aktarılma yeteneği çatlakların daha dik oluşmasından ötürü çok daha önemlidir (ASCE-ACI 426, 1973).

Perdeler: Yüksekliğin genişliğe oranı fazla olmasından ötürü moment değerleri bir hayli yüksek ancak normal kuvvet değerleri ise bir o kadar düşüktür. Bu aktarım yükleri, perdeler kat döşemeleri düzeyinde etki eder (ASCE-ACI 426 1973).

Kolonlar: Özellikle deprem meydana geldiği zaman kesme kuvveti etkisi kolonda daha büyük hasarlara sebep olabilir. Meydana gelen bu kesme kuvveti kolonda iki farklı şekilde kırık oluşturur. Bunlar:

- a) Sanki aksel kuvvet tesirindeki kirişte meydana geldiği gibi eğik çatlaklar oluşturarak;
- b) Kolonun elemanının çekirdek kısmında ortaya çıkan çatlaklardan ötürü bütünüyle göçmesi durumu.

Kolon-Kiriş Birleşimleri: Kolon ve kiriş elemanlarının birleşim bölgelerinde taşınamayan bazı yüklerden ötürü (sismik yük ve ağırlık) eğik çatlaklar meydana gelebilir (ASCE-ACI 426 1973).

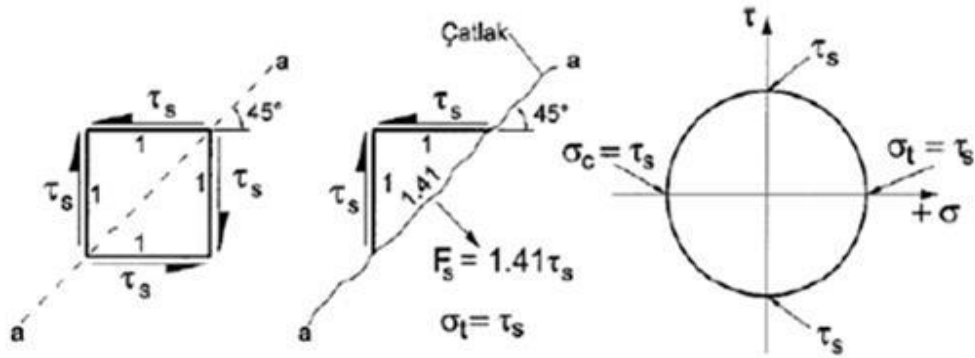
Döşemeler ve Temeller: Kesme kuvveti etkisine maruz kalan bir diğer yapı elemanları ise temeller ve döşemelerdir. Bu yapı elemanlarında kesme kuvvetinin daha çok zımbalama etkisi görülmektedir. Moment büyüklüğü kolondan döşemeye aktarıldıkça hem kesitin hem de elemanın kesme yeteneği azalır. Anlattığımız bu sebeplerden dolayı temeller ve döşemelerde kırılma şekilleri dış kolon birleşimlerdekilere, ya yükleme biçimlerinden ya da kolona bitişik haldeki boşluklardan ötürü moment aktarımının meydana geldiği birleşimlerdeki kırılma tarzına benzemektedir (ASCE-ACI 426 1973).

### **Kesme tehlikesi ve kesme kırılması**

Bir yapı elemanını düşündüğümüz zaman hem eğilme momenti hem de kesme kuvveti etkisi altında iki eksenli gerilme hali meydana gelmektedir. Yapı elemanları içerisinde kiriş elemanını ele aldığımız da ise yeteri kadar enine donatı yani kesme donatısı bulunmadığı takdirde, kiriş elemanına uygulanan yükün kademeli olarak arttırılması ile beraber çatlaklar ve

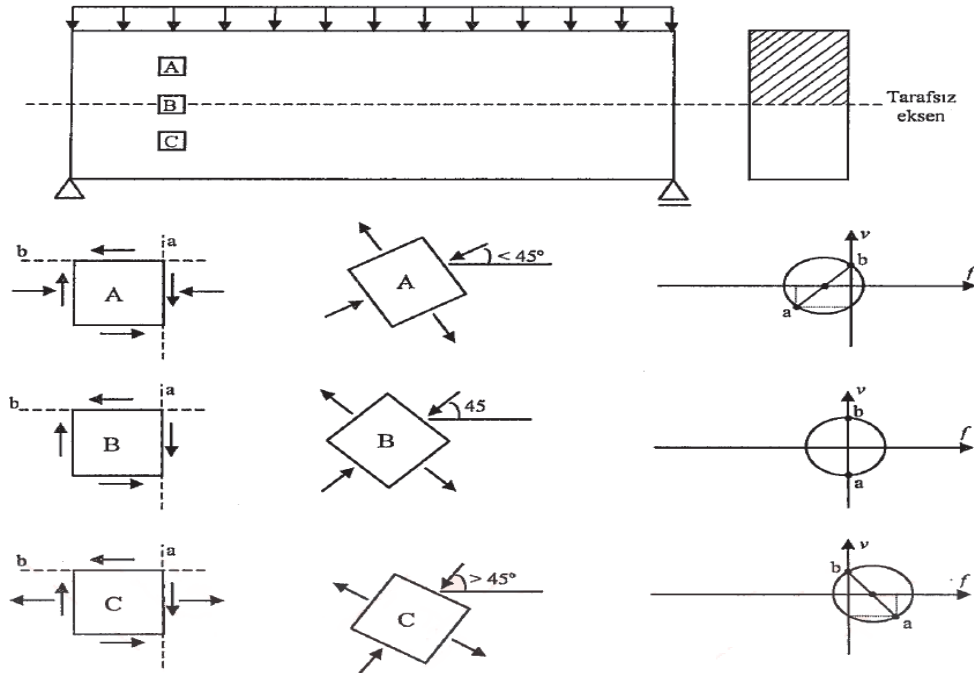


asal gerilmeler oluşmaktadır. Henüz eğilme mukavemetine varmadan oluşan bu çatlaklar ve asal gerilmeler kırılma halinin meydana gelmesine sebep olur (Şekil 22). Bahsedilen bu eğik çatlakların oluşma sebebi ise eğik çekme gerilmeleridir (Ersoy ve Özcebe 2001)



**Şekil 22.** Basit Kesme Altında Asal Gerilmeler ve Çatlaklar (Ersoy ve Özcebe, 2001)

Şekil 22’de düşey bir yüke tabi tutulan betonarme kiriş elemanının ve aynı zamanda mesnete yakın bir bölgeden ve düşey olarak alınan bir kesitin görünümü verilmiştir. Alınan bu kesit parçalarının ise rastgele seçilen üç noktadaki gerilme durumları yine Şekil 23’de sonsuz küçük elemanlar üzerinde gösterilmiştir. Bu üç nokta içerisinde ki A noktasında kesit alınan eksene dik olacak biçimde kayma ve basınç gerilmesi, B noktasında kesit alınan eksene dik olacak biçimde sadece kayma gerilmesi ve C noktasında ise yine kesit alınan eksene dik olacak biçimde hem kayma hem de çekme gerilmesi oluşur.



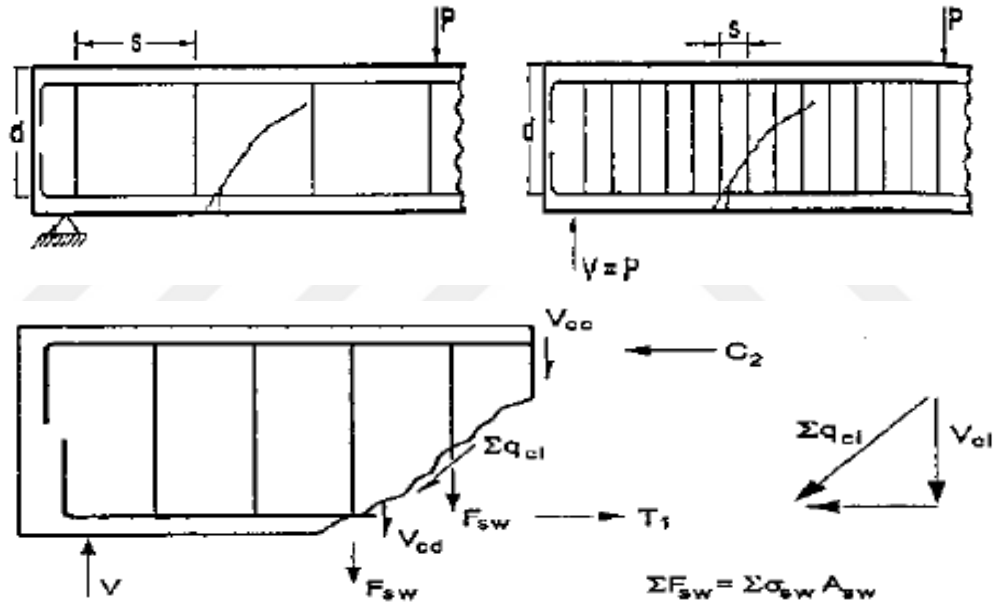
**Şekil 23.** Homojen malzemeli kiriş eksenine dik kesit üzerinde asal gerilme doğrultularının değişimi (Arslan, 2005)

Çekme gerilmelerine karşı betonun hassas ve dayanıksız olduğu bilinen bir gerçektir. Bu hassasiyet ve dayanıksızlıktan dolayı betonarme elemanlarda şekil 23’de görüldüğü gibi çekme gerilmesi düzlemlerinde bir kırılmanın meydana gelmemesi için betonarme elemanı oluşturan boyuna donatı kafesinde enine donatı yani kesme donatısı (etriye) olarak isimlendirilen parçalar bulundurulur (Arslan 2005).

Şekil 24’te gösterilen betonarme kiriş elemanı ve aynı zamanda kiriş elemanı üzerinde rastgele alınan bir kesitin serbest cisim diyagramında gösterilmiştir. Kirişte meydana gelecek kesme dayanımı Denklem 62 ile elde edilmektedir. Kesme donatısının yani enine donatının karşılamış olduğu yük,  $v_w$ , Denklem 63 ile elde edilmektedir.

$$V = v_{cc} + v_{cd} + v_{ci} + v_w \quad (62)$$

$$v_w = \frac{\sum F_s W x(jd)}{s} = \frac{\sum F_s W x(d)}{s} \quad (63)$$



Şekil 24. Çekme gerilmesi düzlemlerinde beton ve donatıda etki diyagramı (Ersoy ve Özcebe, 2001)

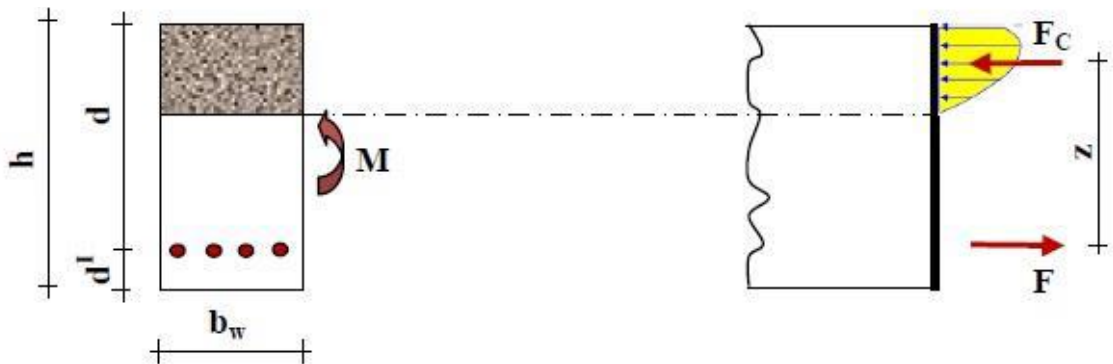
### Betonarme Kirişlerde Eğilme Etkisi

İnşa edilen betonarme binalar içerisinde çok önemli bir konumu olan ve yatay eleman olarak planlanan kiriş elemanları uygulanan düşey yükün neticesinde hem yatay hem de düşey düzlemde eğilmeye çaba harcarlar. Bu taşıyıcı kiriş numunelerinin kesitlerinde yalnızca eğilme kuvveti meydana gelmez. Eğilme kuvvetinin yanı sıra kesme kuvvetleride meydana gelmektedir. Elemana uygulanan yükleme şekline ve numunelerin tasarlanma biçimine bağlı olarak aksenal kuvvet ve/veya burulma momenti de meydana gelebilir. Büyük boyutlarda oluşan eğilme momentine kıyasla kuvvet cinsinden daha küçük boyutlarda kalan aksenal

kuvvet ve/veya burulma momenti gibi ilave iç kuvvet tesirleri de oluşmaktadır. Fakat bu ilave yükler yalnızca basit eğilme olayı olarak dikkate alınır. TS 500-2000'e göre aksenal kuvvetin ölçütü  $Nd = 0,1.Ac.fck$  olarak hesaplanmaktadır. Ek olarak farklı gerilme durumu meydana getiren kesme kuvveti tesirleri ise dizayn esnasında eğilme durumundan ayrı olarak değerlendirilir (TS 500-2000).

Betonun çok düşük boyutlarda çekme dayanımına sahip olduğunu bilinen bir durumdur. Bu şartlar altında eğilme etkisine maruz kalan kirişlerde çelik donatılar basınç bölgesine değil çekme bölgesine monte edilir. Böylece basınç bölgesindeki betonun donatısız bir şekilde tam verimli çalışmasına zemin hazırlanır. Çekme kuvvetinden dolayı oluşacak gerilmeleri karşılayan çelik donatılar ise çekme bölgesindeki en dış life monte edilir. Bu sebeple donatının çekme kuvveti karşısında daha etkili çalışmasına sebep olan moment kolu mesafesi arttırılır. Bu bölgeye monte edilen donatı çubuğu ile betonun dış lifi arasında beton örtü tabakası (paspayı) vardır. Bu beton örtü tabakası (paspayı), kenetlenmeyi (aderans) sağlar. Aynı zamanda çelik donatıyı direk yangın, pas ve sülfat etkisi gibi dış etkenlerden korumak için gereklidir (Ersoy ve Özcebe 2001; Özhan 2012).

Kiriş elemanı eğilme etkisine karşı koymaya çalıştığı esnada çok düşük miktarda zorlamaya maruz kalırsa çekme kısmında var beton bozulmaya maruz kalabilir. Bu gibi durumlar da meydana gelen çekme kuvvetinin tamamı beton ve donatı tarafından ortaklaşa karşılanır. Kiriş elemanlarda çatlaklar eğilme etkisi ile beraber meydana gelmektedir. Çatlakların meydana geldiği bölgelerde beton az bir miktarda da olsa çekme kuvvetine karşı katkıda bulunabilir. Fakat betonun verdiği bu ilave katkı çok düşük miktarlarda kaldığı için çekme kuvvetine donatıların karşıladığı ve engellediği kabul edilir. İşte bu sebeplerden ötürü eğilme etkisi ile oluşacak çatlakların olduğu kesitteki donatıların görevi çekme gerilmelerini karşılama ve dolayısıyla meydana gelebilecek çatlakların genişliklerini minimum yapabilmektir (Ersoy ve Özcebe 2001; Özhan 2012).



Şekil 25. Betonarme kirişte şekil değiştirme ve iç kuvvet dağılımı.(Özhan, 2012)

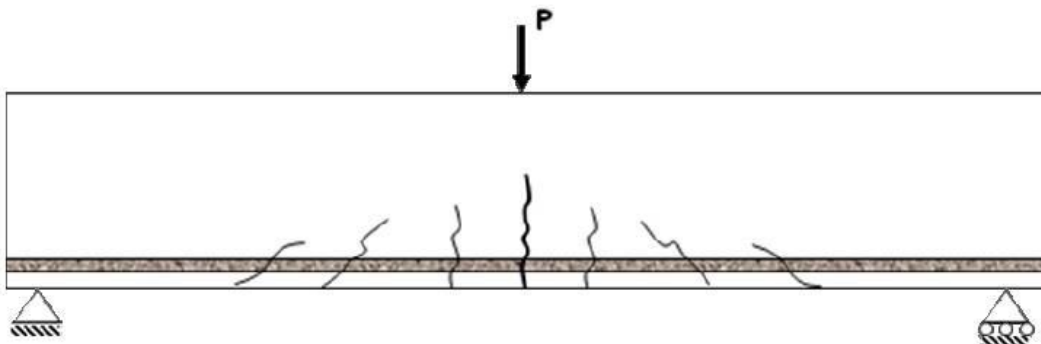
Betonarme kirişlerde ilk çatlakların meydana gelmesi dış kuvvetlerin etkisiyle ortaya çıkmaktadır. Meydana gelen bu ilk çatlaklar çekme bölgesinin en dış kısmında ortaya çıkan birim uzamanın, betonda ortaya çıkacak olan birim deformasyon sınırının aynı olması ile meydana gelir. Oluşan bozulmanın sonucunda çatlakların meydana ortaya çıkması, betonun en uzak kısmındaki liflerin eğilmede çekme dayanımına ulaşması olarak açıklanmaktadır. Bu sınır aynı zamanda donatıya sahip olmayan kirişin kırılma momenti ile çatlama momentinin aynı olması durumudur (Ersoy ve Özcebe 2001; Özhan 2012).

$$M_{cr} = \frac{f_{ct} I}{y} \quad (64)$$

Kesitin dikdörtgen olduğu durumlarda ise  $I/y$  için en yüksek değer  $W=bh^2/6$  olur. Bu durum mukavemet momenti olarak isimlendirilir. Betonun aksel çekme dayanımı ( $f_{ctk}$ ) eğilmede çekme dayanımının ( $f_{ctf}$ ) yarısı olacak şekilde değer verilir. Böylece denklem 65 ifadesi ile aşağıdaki son haline ulaşır.

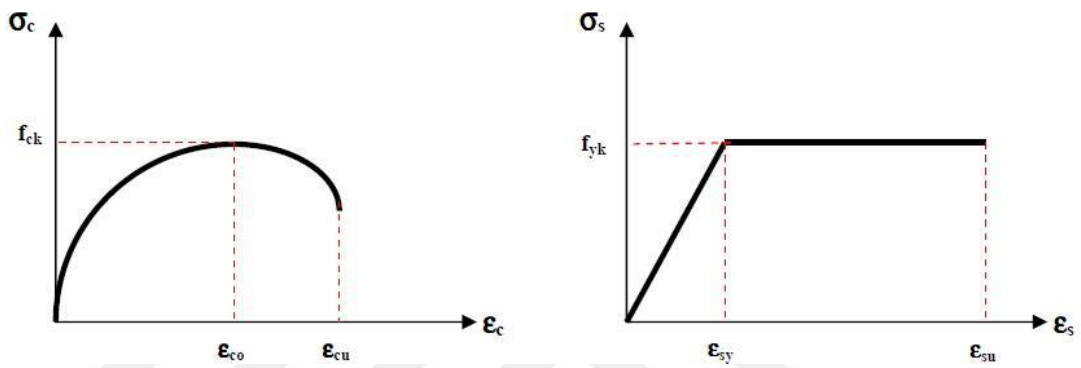
$$M_{cr} = f_{ctf} \frac{b_w \times h^2}{6} = \frac{2 \times f_{ctk} \times b_w \times h^2}{6} \quad (65)$$

Haliyle bir kiriş elemanında ilk çatlaklar momentin en yüksek olduğu yerde meydana gelmektedir. Fakat henüz kılcal seviyede ortaya çıktıkları için göz ile görülmeleri çok güçtür. Uygulanan yükün şiddetinin artması ile beraber ilk oluşan çatlakların genişliği ve uzunluğu artar. Yine uygulanan yükün miktarının artması ile beraber ilave çatlaklar da ortaya çıkmaktadır. Kiriş elemanının basınç bölgesinde başka bir ifadeyle kirişin kesme etkisinin olmadığı bölgede ortaya çıkan çatlaklar kiriş eksenine dik yöndedir. Bu durumun meydana gelmesinin sebebi ise, asal çekme gerilmeleri ve betonda oluşan çatlakların birbirlerini dik olarak kesmesidir. Uygulanan yükün şiddeti arttıkça çatlama momentine erişir ve mesnet ile yük arasındaki kısımlarda yeni ilave çatlaklar meydana gelir. Yükün uygulandığı nokta ile mesnetin bulunduğu nokta arasındaki kısımda kayma gerilmeleri ortaya çıkmaktadır ve asal çekme gerilmeleri kiriş eksenine paralel değildir. Bu sebeple ekil 26'da görüldüğü gibi ortaya çıkan ilave çatlaklar, kiriş eksenine belirli bir açıyla meydana gelir (Özhan 2012).



Şekil 26. Betonarme kirişte eğilme etkisi altında çatlak oluşumu.(Özhan, 2012)

Eğilme etkisine tabi tutulan betonarme kirişte meydana gelen ilk çatlakların oluşumundan sonra gerilme dağılımı çok önemlidir. Bunun için çelik ve beton malzemelerine ait bilinen sekil değiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) bağıntıları kullanılması zorunludur (Şekil 27). Kiriş elemanında ortaya çıkan ilk çatlaktan sonra çekme bölgesinin hemen en alt bölgesinde olan liflerde betonun çekme dayanımının azami değeri aşılmıştır. Ayrıca çekme donatısı akma sınırına ( $\epsilon_s < \epsilon_{sy}$ ) henüz ulaşmamıştır. Bu durumda, eksenel yük altındaki gerilme-şekil değiştirme ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) eğrisi ile basınç bölgesinde betonun gerilme dağılımı birbirine benzemektedir. Basınç bölgesinde tepe kısımda bulunan liflerdeki birim kısalma değeri ise maksimum gerilme değerine karşılık gelen deformasyon ( $\epsilon_{cu}$ ) değerine henüz ulaşmamıştır.



Şekil 27. Beton ve çeliğe ait gerilme-şekil değiştirme eğrisi.(Özhan, 2012)

Betonarme yapı elemanlarında olduğu gibi kirişe de uygulanan yük değeri arttıkça zaman öncelikle eğilme momenti değeri büyür. Daha sonra ise uygulanan yük seviyesi belirli bir noktaya geldiğinde çekme donatısı, akma birim uzama değerine erişir. Kiriş elemanlarında basınç bölgesinin en uzak bölümünde bulunan liflerde şekil değiştirmeler  $\epsilon_{cu}$  değerine erişemediğinden dolayı bahsedilen bu liflerdeki betonun basınç gerilmeleri  $f_{ck}$  değerinden azdır. Çelik donatıya gelen yükten dolayı akar. Dolayısıyla çelik donatıda ki çekme kuvveti  $F_t = A_s \times f_{yk}$  olur. Uygulanan yük seviyesinin artmasıyla çelik donatılara gelen yük seviyeleri ve deformasyonlar da artar. Sonuç olarak donatılar akma sınırına erişirler. Bu seviye de gerilme değerlerinde çok büyük artışlar olmamasına karşın uzama değerlerinde artışlar ciddi seviyededir. Betonda meydana gelen birim deformasyon artışına göre çeliklerde meydana gelen birim deformasyon artışları çok daha fazla oluşmaktadır. Bernouilli-Navier hipotezi kabulüne göre betonarme kiriş kesitinde şekil değiştirme dağılımı doğrusal meydana gelecektir. Fakat donatı ve betonda meydana gelen farklı artışlar; bu doğrusallığı bozacaktır. Doğrusallığın bozulmasının nedeni ise tarafsız eksenin de kendi konumundan yukarı doğru hareket etmesi ile açıklanmaktadır. Çelik donatıların elasto-plastik tutumu sebebiyle akma sonrası gerilmeler aynı değerde kaldığından ötürü çelik donatılarda meydana gelen çekme kuvvetleri de aynı kalacaktır. Bu gelişmeler neticesinde betonarme kiriş kesitinde denge

koşulları sebebiyle beton basınç bileşkesinin sabit kalması manasına gelir (Ersoy ve Özcebe 2001; Özhan 2012).

$$F_r = A_s x f_{yk} = F_c \quad (66)$$

Yapı elemanları içerisinde kirişe elemanına uygulanan yük şiddetleri arttıkça tarafsız eksen yukarıya doğru kayar. Bu gelişmelerden sonra kirişin basınç bölgesinin en dış bölgesinde bulunan lifteki beton birim kısalması  $\varepsilon_{cu}$  değerine erişir. Kiriş elemanında meydana gelene bu gelişmeler neticesinde basınç bölgesinin en dış bölgesinde bulunan lifteki beton basınç gerilmeleri  $f_{ck}$  değerine ulaşır. Yükün uygulandığı bölge civarlarında ezilmelerin başlamasıyla beraber deformasyon artar. Kiriş elemanının göçmesi esnasında, kiriş elemanının basınç kısmının en dış bölgesinde bulunan lifteki beton birim azalması  $\varepsilon_c$ , betonun nihai birim azalması  $\varepsilon_{cu}$  değerine erişir. Bu süreçlerin sonunda basınç bölgesinde bulunan beton ezilip dağılır. Aynı zamanda donatı da akma sınırını aştığı için akar ve kirişte göçüp kırılma gerçekleşir. Kiriş kesitinin moment taşıma gücü betonarme kirişin basınç kısmında toplam basınç kuvveti ile kirişin çekme kısmındaki toplam donatı çekme kuvvetleri arasındaki uzaklık olan moment kolu (z) yardımıyla hesaplanabilmektedir. Kırılma ve akma esnasında tarafsız eksen değiştiği için moment kolu da değişebilir. Bu değişim değeri çok ufak kaldığı için momentin akmadan sonra sabit kaldığı varsayımının getireceği hata oranı çok düşük olur (Ersoy ve Özcebe 2001; Özhan 2012).

Betonarme kirişlerin taşıma gücüne ulaşmasına kadar ortaya koyacağı tutumlarda çekme donatısı çok büyük rol oynar. Bir kiriş elemanına uygulanan yükün artması ile beraber eğilme momentinin değeri de artar. Bu eğilme etkisi altındaki kirişin, basınç bölgesinde bulunan en dış lifindeki betonun birim kısalması ezilme birim kısalmasına erişir ( $\varepsilon_{cu}=0.003-0.0035$ ). Sonuç olarak kiriş taşıma gücünü yitirerek kırılır. Bütün bu olaylar neticesinde betonarme kirişlerde çekme kısmında bulunan donatı miktarının kirişin tutumunu etkilediğini ve belirlediğini söylemek mümkündür (Eren 2003; Özhan 2012).

## MATERYAL ve YÖNTEM

### Sonlu Elemanlar Yöntemi

Yapısal çözümlenme, ısı transferi, sıvı akışı, kütle taşıma ve elektromanyetik çözümlenme gibi temel mühendislik problemini çözmek için birçok çözümlenme türü vardır: Problemlerin herhangi bir türünü çözmek için analitik çözümlenme (kapalı form çözümlenme) ve sayısal çözümlenme olmak üzere iki tür çözümlenme vardır. Gerçek hayat senaryosu problemleri için karmaşık olmayan doğrusal malzeme özellikleri, geometri, yükleme ve sınır koşulları söz konusudur ve bu nedenle analitik çözümlenme elde etmek neredeyse mümkün değildir. Mühendislik problemlerini ve matematiksel fiziği çözebilecek en yaygın sayısal yöntemlerden biri sonlu elemanlar yöntemidir.

Sonlu elemanlar yöntemi yapısal problemlerin çözümlenmesi için güçlü bir sayısal tekniktir. Yapısal düzenekler, sonlu elemanlar olarak bilinen daha küçük ve daha basit parçalara bölünmesine dayanır. Bu elemanların tipleri, çizgi elemanları (1B), kabuk veya düzlem elemanları (2B, üçgen veya dörtgen elemanlar) için katı elemanlar (3B, kafes veya kiriş elemanları) veya tuğla elemanları olabilir. Bu elemanlar, ortak düğümler ve bazen ortak kenarlar ve ortak düzlemler olarak adlandırılan elemanların sınırına yerleştirilen düğümlerle bağlanır. Bu ortak düğümler, gerçekleştirilecek çözümlenme türü ne olursa olsun tüm çözümlenme denklemlerini oluşturmak ve görüntülemek için kullanılır. Bu nedenle sonlu eleman düğüm yöntemi olarak adlandırılır. Düğümlerdeki sonuçlar daha sonra düğümler arasındaki enterpolasyon fonksiyonunu kullanarak elemanlar içindeki çıktıyı hesaplamak için kullanılır. Sonlu eleman, modeldeki her bir düğümdeki bilinmeyenlerin yaklaşık bir değerini verir ve bu yaklaşık değerlerin doğruluğu, modelin ayrıklaştırma kalitesine bağlıdır.

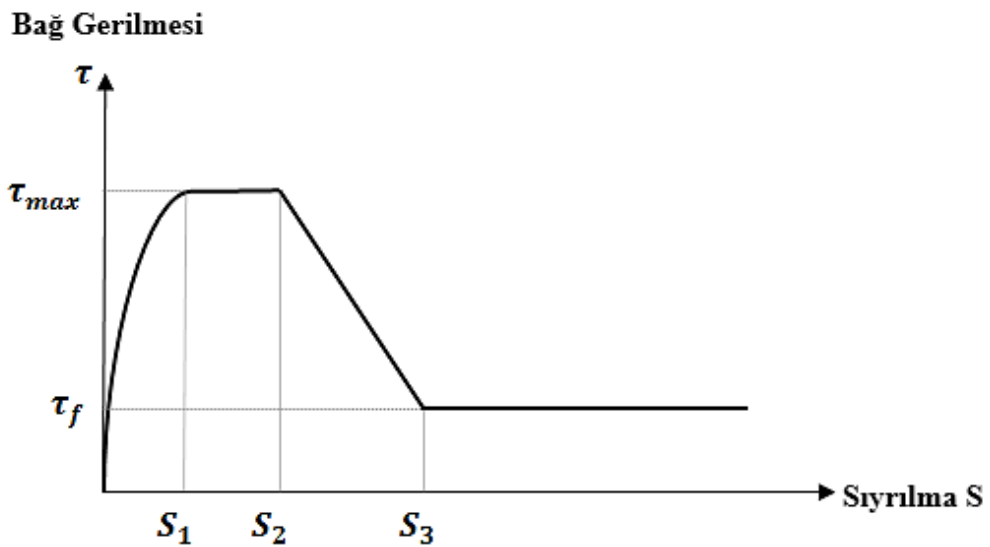
Sonlu elemanlar yöntemi, karmaşıklık nedeniyle sadece akademisyenler ve matematikçiler tarafından 1950'lerden önce kullanıldı, ancak daha sonra bilgisayarlar 2000'lerde kullanılabilir hale geldiğinde, tasarımın yanı sıra yapısal çözümlenmesi gerçekleştirmek için yazılım geliştirildi (The Concrete Center 2006).

### Yapısal Çözümlenme

Yangın testleri ile yapısal yangın direncini değerlendirmek için kullanılan geleneksel yaklaşım pahalı ve zaman alıcıdır. Yangın testlerine bir alternatif, betonarme yapıların yangına dayanıklılığını değerlendirmek için sayısal modellemenin kullanılmasıdır. Sayısal çözümlenmeler, çeşitli parametrelerin verimli ve uygun maliyetli bir şekilde dahil edilmesini sağlar. Bu nedenle, bu modelleri doğrulamak için deney verileri ile yapılabilir. Şu anda, VULCAN, SAFIR, FEAST, ADAPTIC, FIREFRAME, ANSYS ve ABAQUS gibi yapısal

yangın direncini simüle etmek için birçok program geliştirilmiştir. Tüm bu programlar, yangın koşullarında yapısal davranışı modellemek için sonlu eleman yöntemlerini benimser (Lin 2014).

Yangın koşullarında betonarme yapıların davranışını temsil etmek için çok sayıda model geliştirilmiştir, ancak bu modellerin hiçbiri beton ile donatı arasındaki bağın etkileşimini dikkate almamıştır (Huang 2010). Beton ve donatı arasındaki bağı simüle etmek için bağ-bağlantı (bond-link) ve bağ-sürtünme yaklaşımları olarak iki yaygın yöntem kullanılır. Bağ sürtünme yaklaşımında, beton ile donatı çeliği arasındaki temas eden yüzeyinin özellikleri, bağ bölgesinin özelliklerini dikkate alan malzeme özellikleri ile tanımlanırken, beton ve donatı çelik arasındaki bağlantının temas yüzeyi içinde sürekli olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, beton ve donatı arasındaki bağın modellenmesi için bu yaklaşımı kullanmak, makul bir doğruluk elde etmek için bağ bölgesi alanı içinde daha fazla meshleme uygulanmalı ve birçok uğraşlar gerektirmektedir. Bağlantı elemanı (bond-link) yaklaşımında, beton ve çelik donatının çakışan düğümleri ile birleştirilerek modellenebilir. Bu bağ-bağlantı elemanının, çözümlemesinin başlangıcında iki düğümün aynı koordinatlara sahip olduğu fiziksel boyutları yoktur (Huang 2010). Bağ-bağlantı elemanının davranışı, bağ gerilmesi ve kayma arasındaki ilişkiye dayanarak tanımlanır. CEB-FIP model kodu 1990'daki ilişki, şekil 28'de gösterildiği gibi istatistiksel bir metodolojiye dayanan bağ gerilmesinin ortalama değeri olarak ampirik olarak alınmıştır. Bu bağ-kayma ilişkisi, ortam sıcaklığında kullanılır ve deney verileri ile örtüşmektedir. Bu nedenle, betonarme elemanların yüksek sıcaklıklarda bağlanma davranışını tahmin etmek için betonun yapısal denklemlerine, çelik donatının geometrik özelliklerine ve paspayına dayalı modellerin geliştirilmesi önemlidir.



**Şekil 28.** Ortalama bağ gerilmesi-sıyrılma eğrisi (CEP-FIB model kodu, 1990)



Kısacası, belirli bir yükü sürdürecekt herhangi bir yapı tasarlayabilmek için önce iç kuvvetler ve gerilmeler değerlendirilmelidir. Bir sonlu eleman modelinin kullanılması bize her bir düğümdeki rotasyonlar ve yer değiştirme değerlerini sağlar ve bu deformasyon değerlerinden her elemandaki iç kuvveti ve gerilmeleri değerlendirebiliriz. Aşağıdaki denklemler, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak herhangi bir yapı problemini çözmek için temel matris formülasyonunu göstermektedir.

$$\{\psi\} = [x] \{a\} \quad (67)$$

Burada,  $\psi$ : Deplasman fonksiyonu  
 $x$ : Geometri matrisi  
 $a$ : Yer değiştirme fonksiyonlarının bilinmeyen sabitleri

$$\{\psi\} = [N] \{d\} \quad (68)$$

Burada,  $N$ : Şekil fonksiyon matrisi  
 $d$ : Yer değiştirme vektörü

$$\{\varepsilon\} = [B] \{d\} \quad (69)$$

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon\} \quad (70)$$

Burada,  $\varepsilon$ : Birim şekil değiştirme vektörü  
 $\sigma$ : Gerilme vektörü  
 $D$ : Birim şekil değiştirme-gerilme matrisi

$$[K] = \iiint [B] [D] [B] \cdot Dv \quad (71)$$

Burada,  $K$ : rijitlik matrisi

Yapısal yüklere maruz kalan herhangi bir yapıyı aşağıdaki gibi bir formda denklem ile ifade edebiliriz:

$$\{P\} = [K]\{d\} \quad (72)$$

Dinamik yüklere maruz kalan yapısal bir sorunu çözmeye çalışırsak, genel form aşağıdaki gibi değiştirilecektir:

$$\{F\} = [M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} \quad (73)$$

Burada,  $M$ : Kütle matrisi

$C$ : Sönüm matrisi

$\ddot{u}$ : İvme matrisi

$\dot{u}$ : Hız matrisi

## Isısal Çözümleme

Herhangi bir ısıal veya ısı transfer probleminin ana amacı, yapının sıcaklık dağılımının (izoterm) değerlendirilmesidir, daha sonra yapıya giren ve çıkan ısı miktarını hesaplayabiliriz. Üç boyutlu ısı transferi probleminde, her bir düğümde sadece bir sıcaklık serbestlik derecesi vardır. Isıl formülasyona bakılınca, ısıal ve yapısal formülasyon arasında büyük benzerlik olduğu söylenebilir. Aşağıdaki denklemler, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak ısı transferi problemini çözmek için temel matris formülasyonunu göstermektedir.

$$\theta(x, y, z, t) = \sum_{i=1}^n N_i(x, y, z)\theta_i(t) = N(x, y, z)\theta_e(t) \quad (74)$$

Burada,  $N_i(x, y, z)$  : i düğüm noktasına atanan enterpolasyon fonksiyonu

$\theta_i$  : i düğüm noktasındaki sıcaklık değeri

$N(x, y, z)$  : enterpolasyon matrisi

$\theta_e(t)$  : düğüm sıcaklıkları vektörü

$$C \frac{\partial \theta(t)}{\partial t} + K_c \theta(t) = R_q + R_Q \quad (75)$$

Ve ayrıca aşağıdaki biçimde yazılabilir:

$$[C^t]\{\dot{T}\} + [K^t]\{T\} = \{Q\} \quad (76)$$

Burada,

$$C = \sum_{e=1}^M C_e = \text{kapasitans matrisi}$$

$$C = \sum_{e=1}^M K_{ce} = \text{iletkenlik matrisi}$$

$$C = \sum_{e=1}^M R_{qe} = \text{ısı akışının nodal vektörü}$$

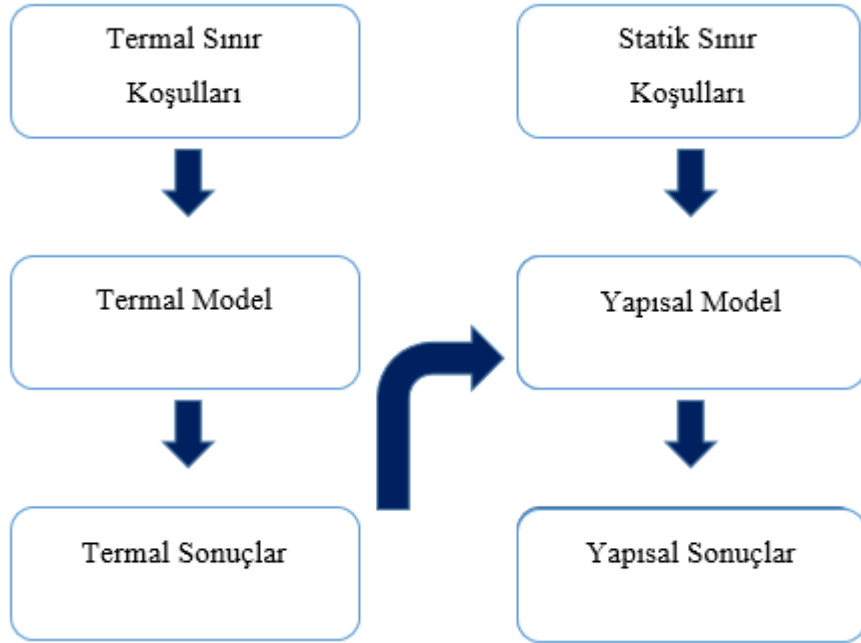
$$C = \sum_{e=1}^M R_{Qe} = \text{iç ısı kaynağının düğüm vektörü}$$

## ANSYS'te Birleştirme Teknikleri ve Uygun Çözümleme Tipinin Seçimi

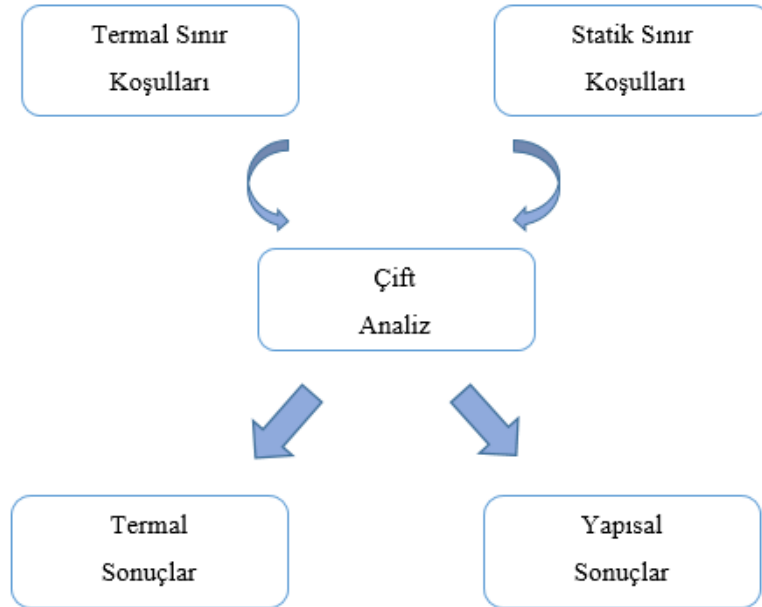
ANSYS gibi sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan programlarda belirtilen problemin çözümü için ilk olarak uygun bir çözümleme türü seçilmelidir. Fakat bu çözümleme türünü belirlemeden önce serbestlik derecesi belirtilmelidir.

Mekanik ve ısıal yüklere maruz kalan kirişi modellemek için, iki tip çözümlemeye ihtiyaç vardır. Herhangi bir zaman adımında kiriş boyunca sıcaklıkların hesaplanması için ısıal çözümleme gereklidir. Bu çözümlemede, yapı çözümlemesinde sıradan mekanik yüklerin yanında yangın yükünü sıcaklık yükü şeklinde uygulanacaktır. İki farklı çözümlemesi beraber yapmak için ANSYS (18.2)'de iki seçenek mevcuttur. Birinci seçenek, her bir

çözümleme tipinin ayrı ayrı gerçekleştirildiği, çözümlerden birinin sonucu diğer çözümleme için başlangıç sınır koşulu olarak uygulanmasıdır. İkinci seçenek ise her iki çözümleme aynı anda gerçekleştirecek şekilde tanımlanabilmesidir. Her iki çözümleme hem ısı hem de yapı serbestlik derecesini ifade eder. Aşağıdaki iki şekil, iki bağlantı tekniği arasındaki farkı göstermektedir.



Şekil 29. Sıralı iki çözümleme adımları



Şekil 30. Doğrudan iki çözümleme adımları

Yukarıda, iki farklı çözümleme yapmak için verilen seçenekleri açıkladık fakat hangi tekniğin çözümlerini doğru yapmamız için daha uygun olduğuna karar vermemiz gereklidir. Çözümlerimiz için doğru sonucu verecek tekniğin ardışık çözümleme

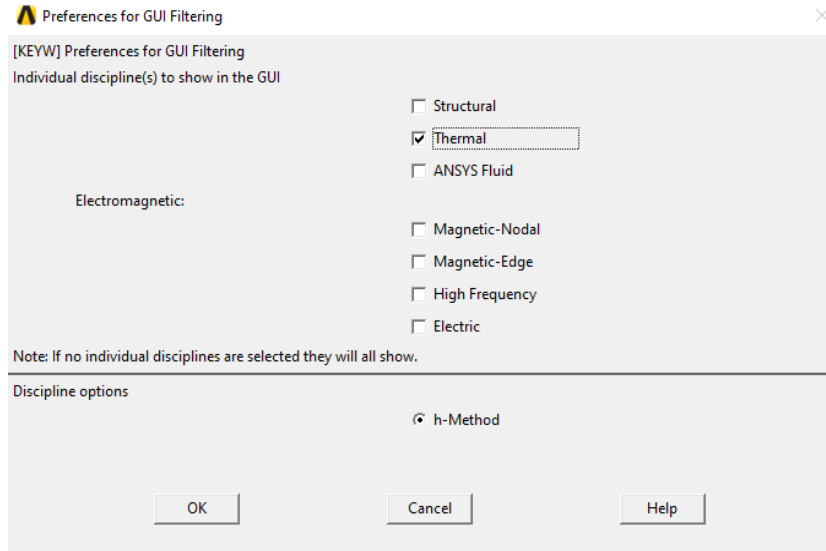
seçeneği olduğunu, kullanılan elemanların ısı karşılığı olmadığından ve ısı elemanlarında yapısal olarak kullanılmaması durumundan dolayı aynı anda hem ısı hem de yapısal çözümü yapmanın mümkün olmadığını göstermiştir. Bu çalışmada kullanacağımız ısı betonarme elemanın (SOLID70) çatlama özelliği yoktur, buda betondaki çatlakları görmemizi engelleyecektir. Ayrıca yapısal çözümlemede kullanacağımız çelik donatının (LINK180) ısı karşılığı olmadığından doğrudan her iki çözümü aynı anda yapmak mümkün değildir. Tüm bu sebeplerden dolayı ardışık iki çözümleme kullanılmıştır. Tablo 4'te direk çift çözümleme yapılabilen elementler verilmiştir.

**Tablo 4.** Doğrudan Yapısal-Isıl Çözümlerinde Kullanılan Elemanlar (ANSYS 18.2)

Elementler	Etkileri	Çözümleme Tipi
SOLID 5 - Çift çözümleme altı yüzlü, 3B	Termoelastik (Isıl gerilme)	Yapısal
PLANE 13 - Çift çözümleme dört kenarlı, 2B	Termoelastik (Isıl gerilme)	Zamana bağlı
SOLID 98 - Çift çözümleme dört yüzlü, 3B	Termoelastik (Isıl gerilme)	Zamana bağlı
PLANE 222 - 4 düğüm noktalı çift çözümleme dört kenarlı, 2B	Termoelastik (Isıl gerilme)	Yapısal
PLANE 223 - 8 düğüm noktalı çift çözümleme dört kenarlı, 2B	Termoplastik (Isıl gerilme)	Zaman bağlı
SOLID 226 - Çift çözümleme altı yüzlü, 3B	Termoelastik (Isıl gerilme)	Harmonik
SOLID 227 - Çift çözümleme dört yüzlü, 3B	Termoelastik (Isıl gerilme)	Harmonik

#### ANSYS Betonarme Kirişlerin Modellenmesi

Bu bölümde açıklandığı gibi, ANSYS programı kullanarak betonarme yapılarda yapısal-ısı sıralı iki çözümleme ile çözüm yapılacaktır. Bu nedenle önce Şekil 31'de gösterildiği gibi grafiksel kullanıcı arayüzünden (GUI) ısı çözümleme seçilir. Isıl çözümleme bittikten sonra, yapısal tepkiyi değerlendirmek için çözümleme tipi, yapısal çözümlmeye geçirilecektir.



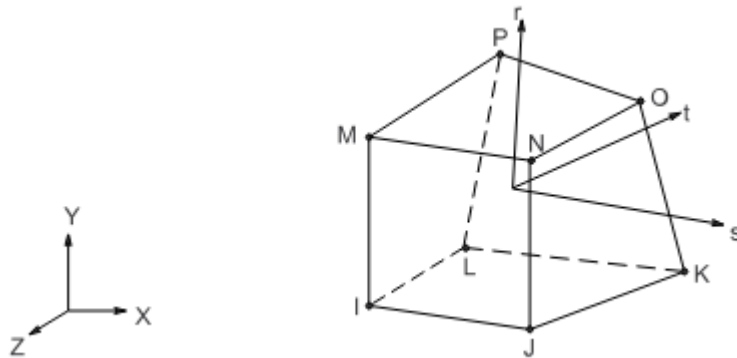
**Şekil 31.** Çözümleme seçimi (ANSYS 18.2)

### Isıl çözümleme

#### *Eleman seçimi*

ANSYS kütüphanesinden eleman türü seçimi, ısıl veya yapısal çözümlemede yapılacak çözümlemesinin türüne, elemanın şekline ve simüle etmek için istenilen özelliklere göre birçok parametreye bağlıdır. Programın versiyonlarına göre farklı eleman türlerinin geliştirilmesi göz önüne alındığında, bu tezde güncelle çok yakın olan ANSYS 18.2 versiyonu kullanılmıştır.

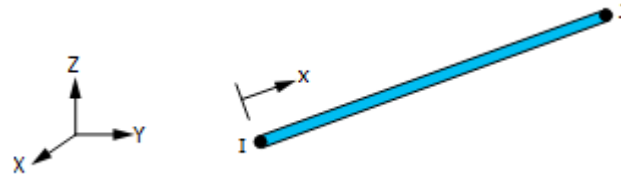
SOLID70, ısı iletim özelliği bulunduğu için ısı transfer probleminde betonun davranışını modellemek için kullanılır. Düğüm sıcaklığı olan, her düğümde bir serbestlik derecesine sahip sekiz düğüm noktasına sahiptir. 3 boyutlu zaman bağı olmayan veya 3 boyutlu zamana bağlı ısıl çözümlemede kullanılabilir. Elemanın geometrisi, 8 düğüm noktalarının koordinat sistemi görünümü Şekil 32'de gösterilmektedir.



**Şekil 32.** SOLID70 (ANSYS 18.2)

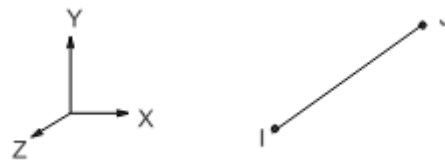
LINK33, ısıyı iki nokta arasında iletme kabiliyetine sahip olduğu için boyuna ve enine donatılarının modellenmesinde kullanılacaktır. LINK33, her bir düğümde tek serbestlik

derecesine sahip tek eksenli bir elementtir. Eleman, 3 boyutlu zaman bağılı olmayan veya 3 boyutlu zaman bağılı ısı çözümlerinde kullanılabilir. Eleman geometrisi, 8 düğüm noktalarının koordinat sistemi görünümü Şekil 33'de gösterilmektedir.



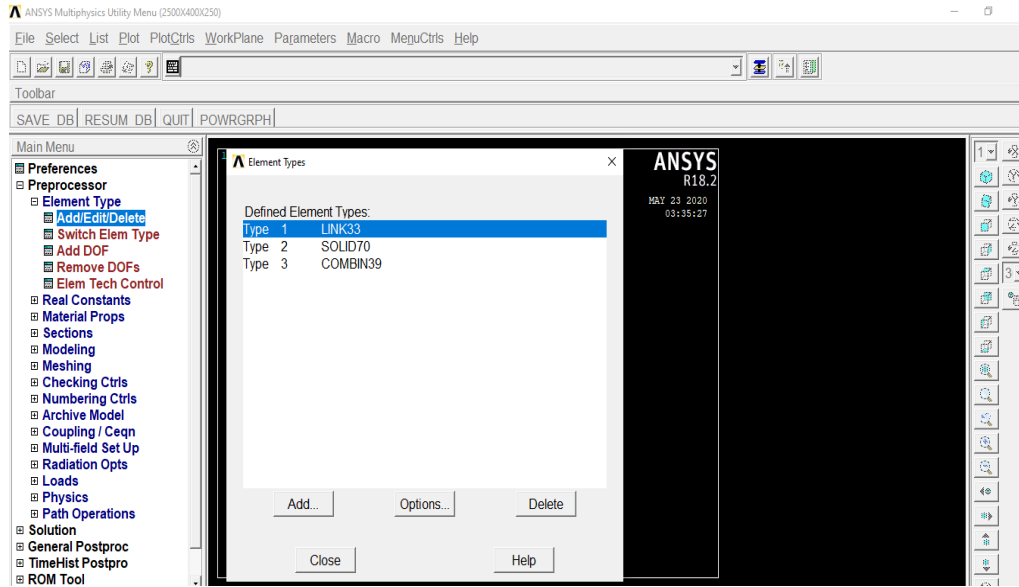
**Şekil 33.** LINK33 (ANSYS 18.2)

ANSYS beton ve donatı arasındaki aderansı %100 kabul eder. Fakat günlük hayatta aderansın %100 olması işçilik hatası, beton dökümü esnasındaki hatalar, hava şartları vs. gibi durumlardan ötürü mümkün olmadığından programda günlük hayata modelleyebilmek adına aderansı azaltmak amacıyla literatürde de kullanılmış olan COMBIN39 doğrusal olmayan yay elemanını beton ve donatının çakışan düğüm noktalarına yerleştirilmiştir. ANSYS' de doğrusal olmayan kuvvet-deformasyon ilişkilerinin tanımlanabildiği, aynı zaman da bütün çözümlerinde de kullanabilen tek yönlü bir yay elemanıdır. COMBIN39 yay elemanı doğrusal olmayan kuvvet-yer değiştirme eğrisi ve iki düğüm noktası ile tanımlanır. Aynı zamanda yay elemanına çekmede ve basınçta farklı özellikler atanabildiği gibi aynı özellikler de tanımlanabilir. Söz konusu yay elemanı 1, 2 ve 3 boyutlu örneklerde hem burulma hem de boyuna uzama ile çalışabilmektedir. Yay elemanında boyuna uzama seçeneği için tek eksenli çekme-basınç örneği bütün düğüm noktalarında üç serbestlik derecesine sahiptir. Aynı zamanda bu düğüm noktaları x, y ve z eksenlerinde serbestçe uzayabilmektedir. (Özdemir ve Kazaz, 2015) Eleman geometrisi, 2 düğüm noktalarının koordinat sistemi görünümü Şekil 34'te gösterilmektedir. Yine boyuna uzama seçeneğinde hem burulma hem de burkulmanın yay elemanında olduğu kabul edilmektedir. Burkulma veya aksel yüklemenin dikkate alınmadığı diğer bir seçenek olan burulma seçeneğinde ise düğüm noktaları her üç eksen etrafında dönebilmektedir.



**Şekil 34.** COMBIN39 (ANSYS, 18.2)

Kirişin modellenmesinde kullanılan elemanlarının tanımlanması grafiksel kullanıcı arayüzünden (GUI) Şekil 35'te gösterilmiştir.



**Şekil 35.** Elemanların tanımlanması

### **Gerçek sabitler**

Gerçek sabitler (real constants), en kesit alanı, atalet momenti, kesit yüksekliği vb. gibi bir elemana bağlı özelliklerin tanımlandığı kısımdır. Bazı elemanlarda farklı çözümlerlerde gerçek sabit tanımlanmayabilir. Donatılar gibi aynı eleman birden fazla kullanılacaksa donatı alanları girilerek, kullanılacak adet kadar gerçek sabit tanımlanır.

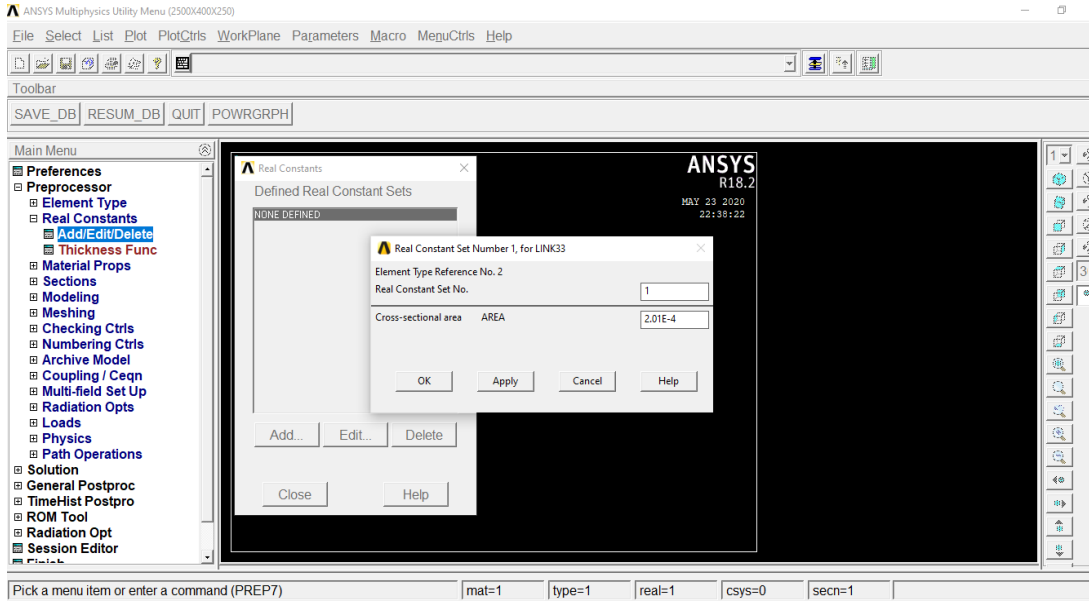
Beton gerçek sabitlerine bakacak olursak, ısıl çözümlemedeki beton elemanının, kütle taşıma etkisini ihmal etmek için seçilen SOLID70’te gerçek sabitlere ihtiyaç duymayacaktır.

Donatı gerçek sabitlerine bakacak olursak, ısıl çözümlemedeki donatı elemanının gerçek sabitleri donatı çaplarına göre tanımlanmıştır. Gerçek sabitlerin ve kesit alanının değerlerini girmek için bir örnek Tablo 5’te gösterilmiştir.

**Tablo 5.** LINK33 Elemanı İçin Örnek Gerçek Sabit

Gerçek Değer	Element tipi	Sabitler
2	Link 33	Kesit alanı (m <sup>2</sup> ) 2.01E4

Kirişin modellenmesinde kullanılan elemanlarının gerçek sabitlerinin tanımlanması grafiksel kullanıcı arayüzünden (GUI) Şekil 36’da gösterilmiştir.



**Şekil 36.** Elemanlara sabit değer (real constant) tanımlanması (ANSYS 18.2)

COMBIN39 gerçek sabitlerine bakacak olursak, ısıl çözümlerdeki COMBIN39 elemanının gerçek sabitleri kuvvet-yer değiştirme değerlerine göre tanımlanmıştır. Bölüm sonunda ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

### ***Malzeme özellikleri***

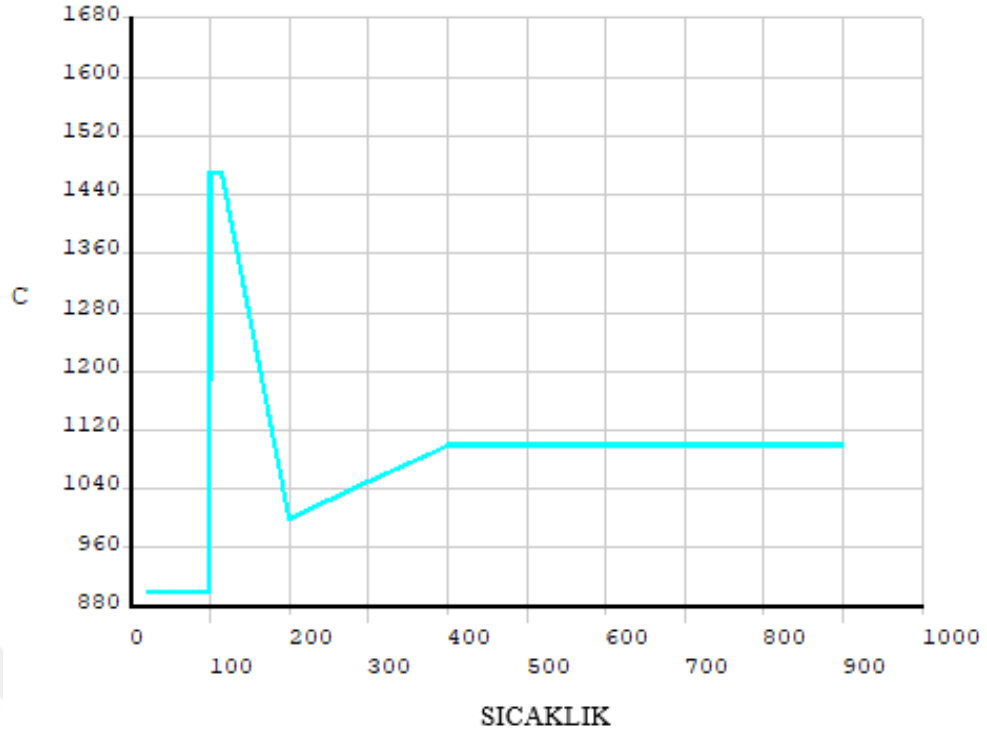
Betonun ısıl modeli için SOLID70 kullanılarak modellenmiş olup, üç temel ısıl özellik (yoğunluk, özgül ısı ve ısıl iletkenlik) ile tanımlanmıştır ANSYS tarafından sınıflandırıldığı şekilde birim sistemine göre SI ve Pa birimlerinde ifade edilmiştir.

Farklı sıcaklıklarda değişen betona özgül ısı değerlerini girmek için bir örnek Tablo 6'da gösterilmektedir. Özgül ısı değerleri, kuramsal temeller bölümünde verilen TS EN 1992-1-2'deki formüllerle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilmiş olup Şekil 37'de gösterilmiştir.

**Tablo 6.** Betonun Farklı Sıcaklıklarda Özgül Isı Değerleri

	<b>S1</b>	<b>S2</b>	<b>S3</b>
<b>Sıcaklık (°C)</b>	20	300	600
<b>C (j/kg °C)</b>	900	1050	1100





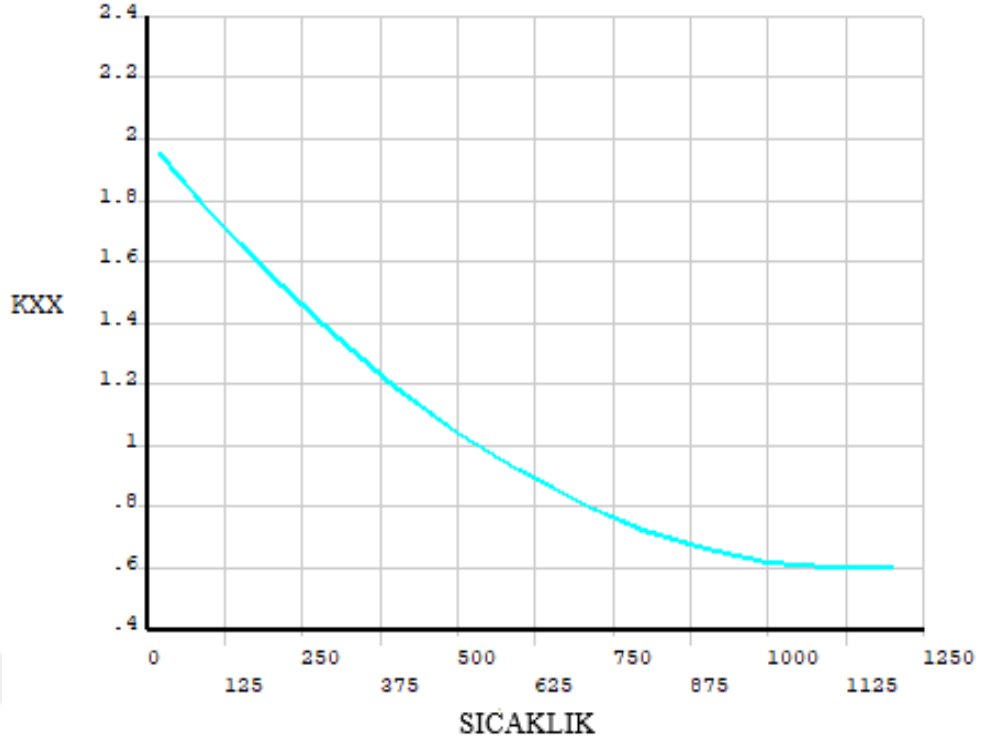
**Şekil 37.** Betonun farklı sıcaklıklarda özgül ısı eğrisi (ANSYS 18.2)

Farklı sıcaklıklarda değişen betonun ısı iletkenlik katsayısı değerinin girilmesine yönelik bir örnek, Tablo 7'de gösterilmektedir. Isıl iletkenlik katsayısı değerleri, kuramsal temeller bölümünde verilen TS EN 1992-1-2'deki formüllerle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilmiş olup Şekil 38'de gösterilmiştir.

**Tablo 7.** Betonun Farklı Sıcaklıklarda Isıl İletkenlik Katsayısı Değerleri

	S1	S2	S3
Sıcaklık (°C)	20	300	600
KXX (W/m °C)	1,951408	1,361	1,042

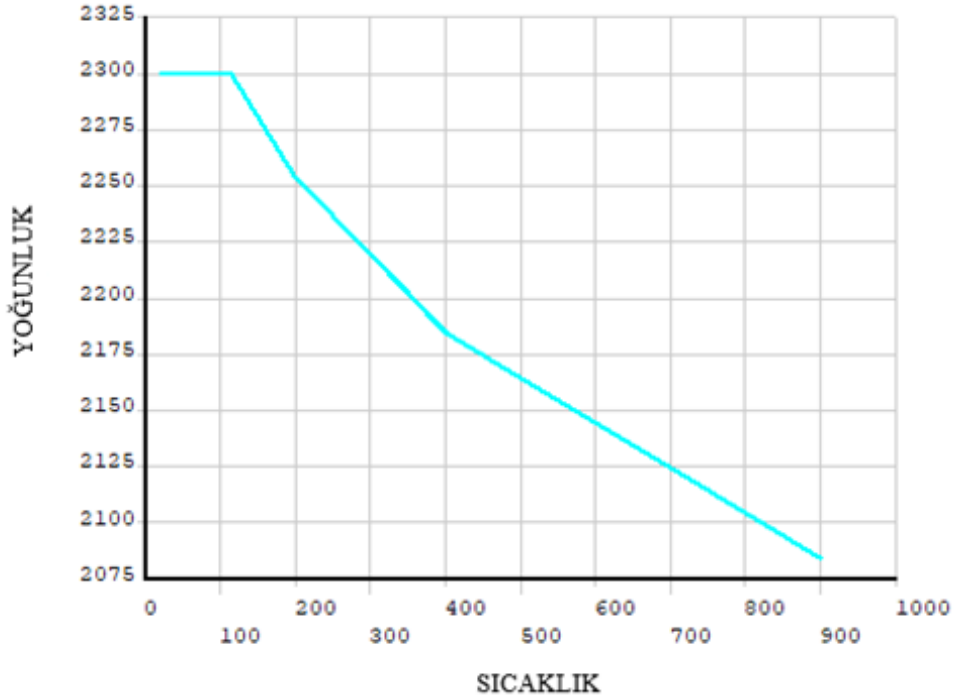
Farklı sıcaklıklarda değişen beton yoğunluğunun değerini girmek için bir örnek tablo 8'de gösterilmektedir. Isıl iletkenlik katsayısı değerleri, kuramsal temeller bölümünde verilen TS EN 1992-1-2'deki formüllerle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilmiş olup Şekil 39'da gösterilmiştir.



Şekil 38. Betonun farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayısı eğrisi (ANSYS 18.2)

Tablo 8. Betonun Farklı Sıcaklıklarda Yoğunluk Değerleri

	S1	S2	S3
Sıcaklık (°C)	20	300	600
Yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )	2300	2219,5	2144,75



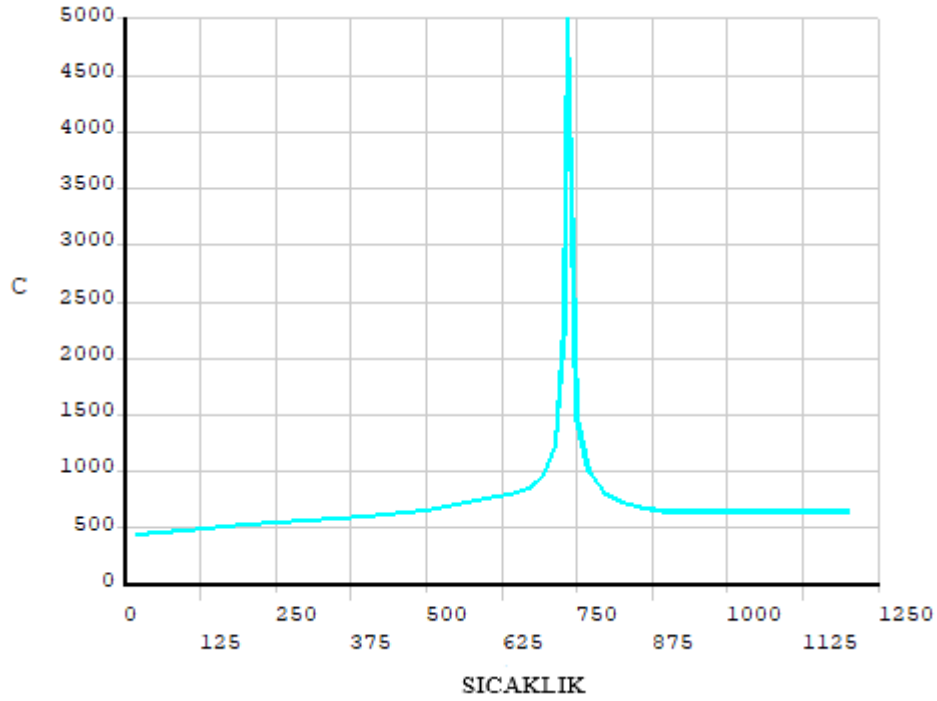
Şekil 39. Betonun farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayısı eğrisi (ANSYS 18.2)

Betonarme donatılarının ısıl modeli için LINK33 elemanı kullanılarak modellenmiştir ve bu eleman üç temel ısıl özellik (yoğunluk, özgül ısı ve ısıl iletkenlik) ile tanımlanmalıdır.

Farklı sıcaklıklarda değişen donatı çeliğinin özgül ısının değerini girmek için bir örnek Tablo 9'da gösterilmektedir. Özgül ısı değerleri, kuramsal temeller bölümünde verilen TS EN 1992-1-2'deki formüllerle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilmiş olup Şekil 40'da gösterilmiştir.

**Tablo 9.** Çelik Donatının Farklı Sıcaklıklarda Özgül Isı Değerleri

	S1	S2	S3
Sıcaklık (°C)	20	300	600
C (j/kg °C)	439,8018	564,74	760,2174

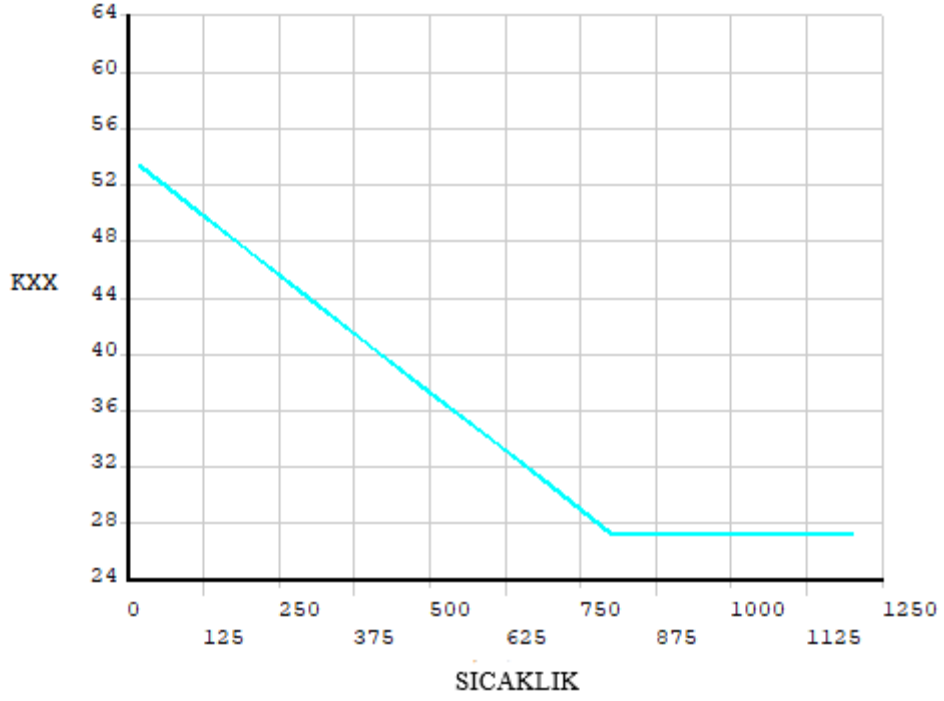


**Şekil 40.** Çeliğin farklı sıcaklıklarda özgül ısı eğrisi (ANSYS 18.2)

Farklı sıcaklıklarda değişen çelik donatının ısıl iletkenlik katsayısı değerinin girilmesine yönelik bir örnek Tablo 10'da gösterilmektedir. Isıl iletkenlik katsayısı değerleri, kuramsal temeller bölümünde verilen TS EN 1992-1-2'deki formüllerle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilmiş olup Şekil 41'de gösterilmiştir.

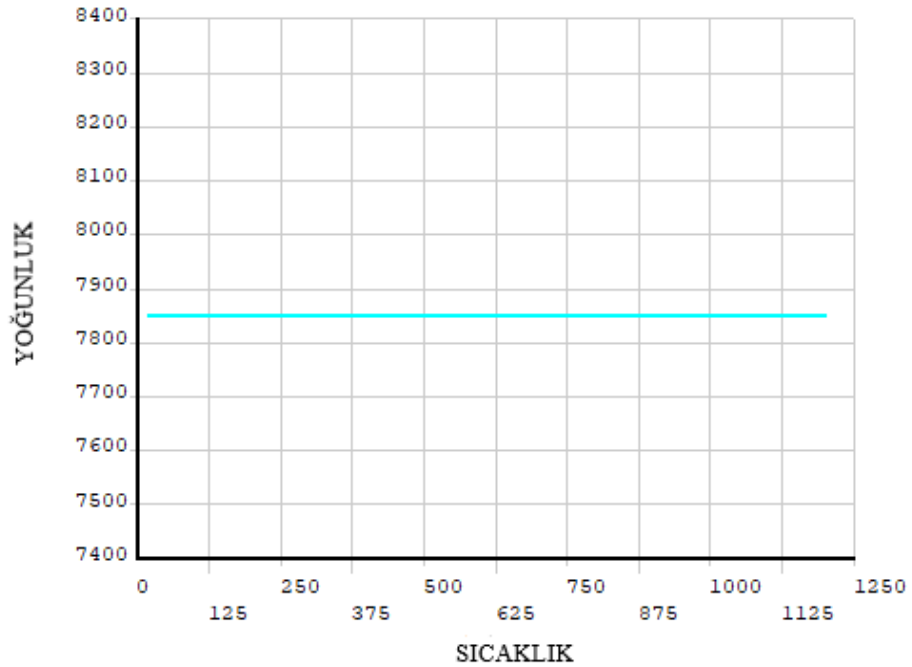
**Tablo 10.** Çelik Donatının Farklı Sıcaklıklarda Isıl İletkenlik Katsayısı Değerleri

	S1	S2	S3
Sıcaklık (°C)	20	300	600
KXX (W/m °C)	53,334	44,01	34,02



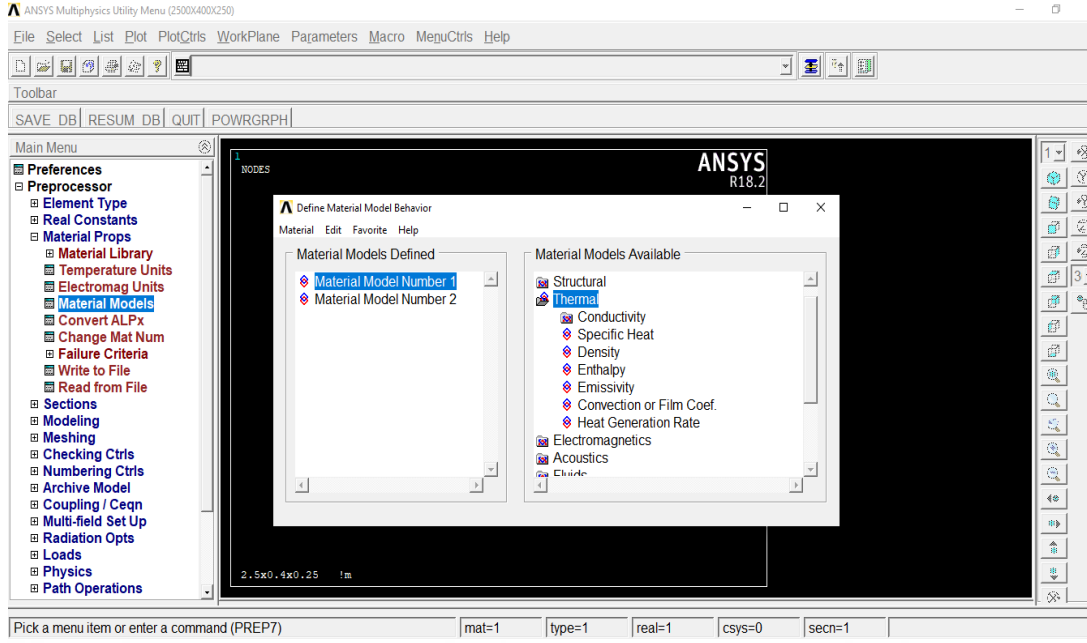
**Şekil 41.** Çeliğin farklı sıcaklıklarda ısı iletkenlik katsayısı eğrisi (ANSYS 18.2)

Farklı sıcaklıklarda çelik donatının yoğunluğu TS EN 1992-1-2’de değişmediğinden tüm sıcaklık aralıkları için  $\rho_s = 7850$  alınmıştır. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilmiş olup Şekil 42’de gösterilmiştir.



**Şekil 42.** Çeliğin farklı sıcaklıklarda yoğunluk değişimi eğrisi (ANSYS 18.2)

Kirişin modellenmesinde kullanılan elemanlara ısıl malzeme özellikleri tanımlanması grafiksel kullanıcı arayüzünden (GUI) Şekil 43’de gösterilmiştir.

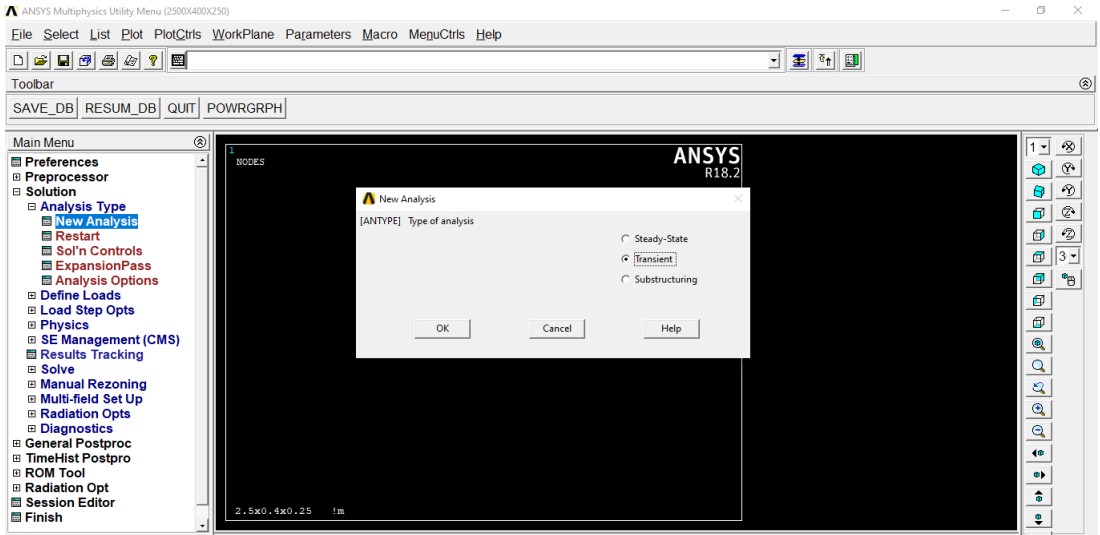


Şekil 43. Elemanlara malzeme özelliklerinin tanımlanması (ANSYS 18.2)

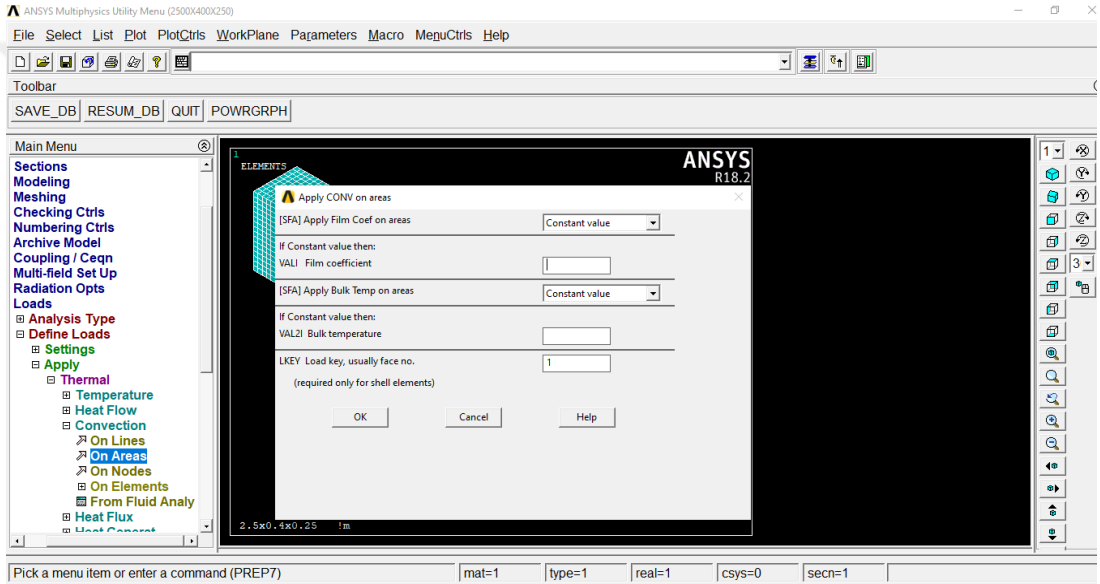
### *Isıl yük seçimi*

Isıl çözümlemesimiz birkaç adımda yürütülecektir. Isıl çözümleme için elemanlar tanılandıktan sonra malzeme özellikleri tanımlanır. Malzeme özellikleri tanılandıktan sonraki ilk adım, Şekil 44'de gösterildiği gibi zamana bağlı çözümleme (transient analysis) türü (ANTYPE) seçmektir. İkinci adım, Şekil 45'de gösterildiği gibi konveksiyon ısı katsayısı (film coefficient) değeri ve başlangıç sıcaklık değeri, konveksiyon komutu (CONV) kullanarak yangına tabi tutulan ve tutulmayan yüzeylere, radyasyon komutu (RAD) kullanarak ise yangına tabi tutulan yüzeylere yangın yükünü uygulamaktır. Üçüncü adım ise, Şekil 46'da gösterildiği gibi kirişin iç sıcaklığı (IC) tanımlanarak gerçekleştirilecektir. Isıl çözümlemedeki son adım ise, solve komutunu kullanarak modeli çözmektir. Ve böyle modelin ısıl çözümlemesi bu şekilde çözümlenir.

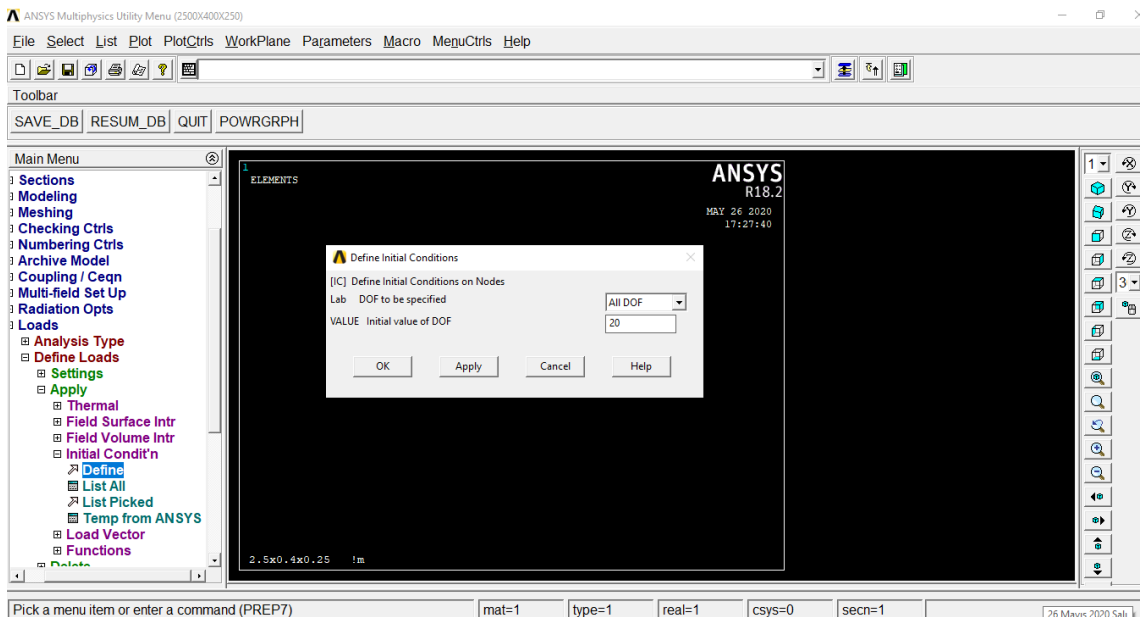
Termodinamiğin 2. Yasasından anladığımızı göre, şayet iki ortam arasında sıcaklık farkı var ise, sıcaklık yüksek olan ortamdaki düşük olan ortama hareket eder. Isının bu hareketi ne kadar ortam sıcaklıklarındaki farka bağlı olsa da aynı zamanda ortam ve yüzeylerinin özellikleri ile de ilgilidir. ANSYS kullanılarak üç ana ısı transferi olan, iletim (kondüksiyon), konveksiyon ve radyasyon kullanarak modellenebilir. Bu çalışmada konveksiyon + radyasyon kullanılacaktır.



Şekil 44. Isıl çözümü türünün seçilmesi (ANSYS 18.2)



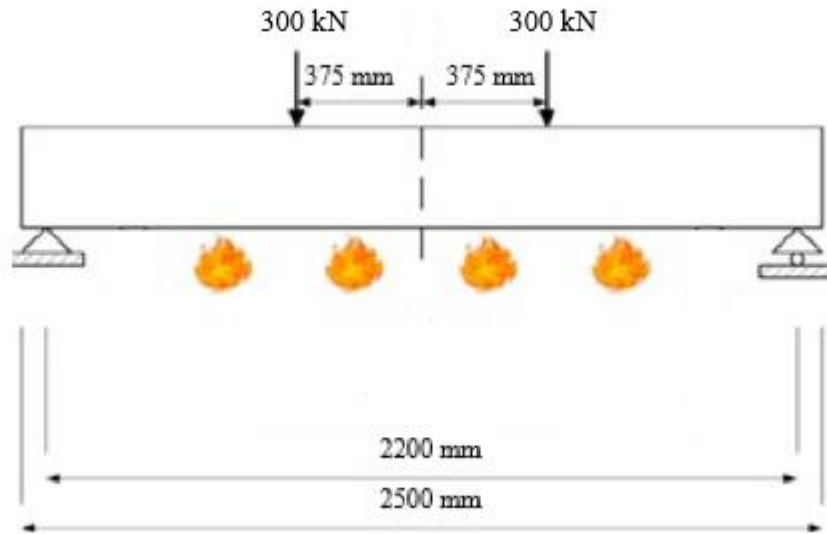
Şekil 45. Konveksiyon yükünün uygulaması (ANSYS 18.2)



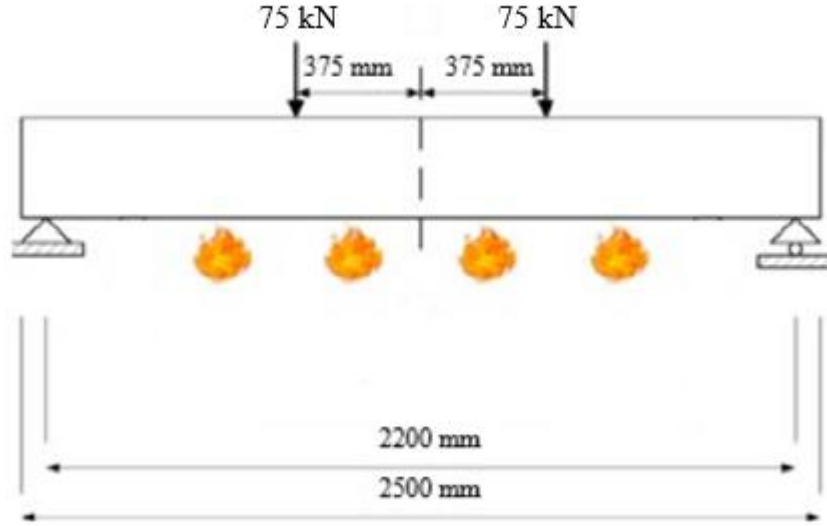
Şekil 46. İç sıcaklık tanımlaması (ANSYS 18.2)

TS EN-1991-1-2, bir taraftan ateşe maruz kalan betonarme kirişler ve tüm taraflardan standart ISO yangın eğrisine maruz kalan kirişler ve kolonlar gibi beton elemanlar için ısı çözümlene sonuçlarının doğrulanması için yönergeler sağlar. Geliştirilmiş ANSYS sonlu eleman modeli, tek serbestlik derecesi, sıcaklık, elemanların beton kısmını temsil eden 8 düğümlü 3B SOLID70 elemanlar ve ısı yüklerini konveksiyon açısından uygulamak için kullanılan yüzey elemanlardaki konveksiyon katsayıları yangına maruz kalan yüzeyler için TS EN 1991-1-2'de  $\alpha_c = 25 \text{ Wm}^2\text{C}^{-1}$  ve yangına maruz kalmayan yüzeyler için  $\alpha_c = 9 \text{ Wm}^2\text{C}^{-1}$  kabul edilirken, beton yüzey ile ilgili radyasyon emisyon değeri  $\epsilon_m = 0,7$  olarak kabul edilmiştir.

Açıklandığı gibi zamana bağlı çözümlene tipi seçildikten sonra, yangın yükü kirişin üç yüzeyine uygulanır (Şekil 49) ve bu amaçla konveksiyon yükü, TS EN 1991-1-2'de verilen ve literatürde de kabul gören bu değer gibi farklı film katsayılarına sahip olmalıdır. Isıya maruz bırakılmış film katsayısı (ısı transfer katsayısı)  $25 \text{ Wm}^2\text{C}^{-1}$  olan alt, sol ve sağ yüzeylere ve ısıya maruz bırakılmamış üst yüzeye de  $9 \text{ Wm}^2\text{C}^{-1}$  uygulanır. Kesme kirişi ve eğilme kirişi için ayrıntılı olarak Tablo 11'de, şekil 47, şekil 48 ve Şekil 49'da gösterilmiştir.



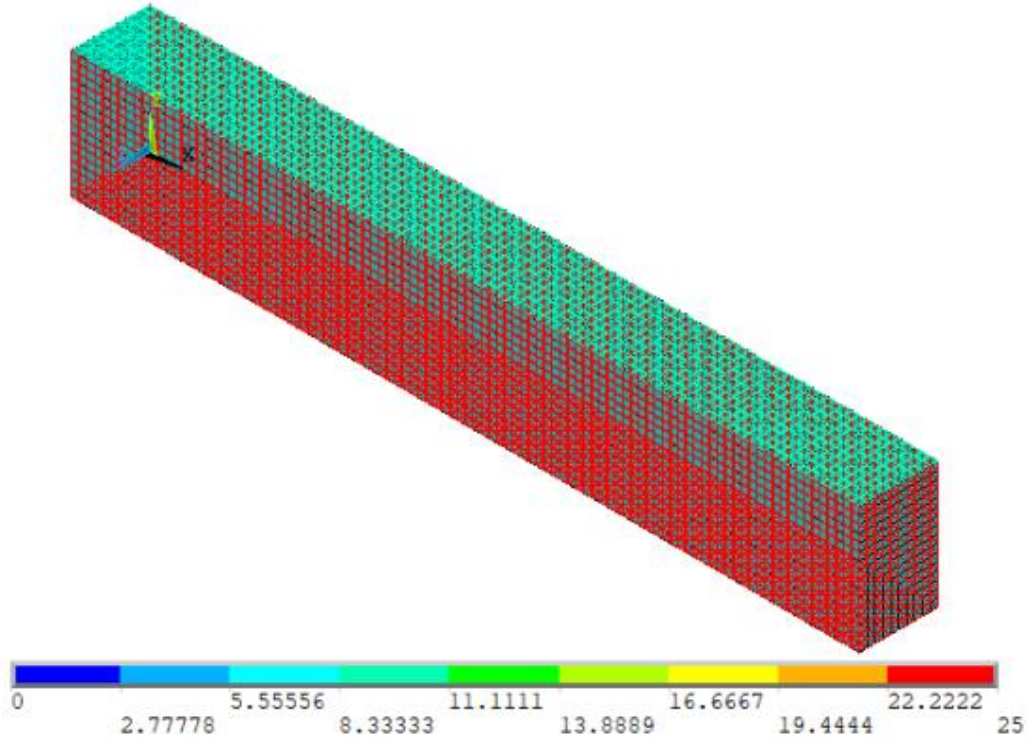
Şekil 47. Kesme kirişi yangını temsili



Şekil 48. Eğilme kirişi yangını temsili

Tablo 11. Konveksiyon Yükü Detayları

Yüzey numarası	Yüzey yönü	Yük tipi	Film katsayısı ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
1	Sağ alan	Konveksiyon	25
2	Alt alan	Konveksiyon	25
4	Üst alan	Konveksiyon	9
6	Sol alan	Konveksiyon	25



Şekil 49. Konveksiyon yükünün yeri ve farklı film katsayısı değerleri (ANSYS 18.2)

Sıcaklık-zaman eğrisini kirişte yangın safhasına simüle edebilmek için fonksiyon şeklinde atanmalı ve ısıtma zamanına göre zaman ayarlanmalıdır. Kullanılan sıcaklık-zaman



eğrisi (ISO 834) Şekil 50'de gösterilmiştir ve bu eğriyi çizmek için kullanılan değerlerin fonksiyonu aşağıdaki denkleme göre TS EN 1991-1-2'de elde edilmiştir.

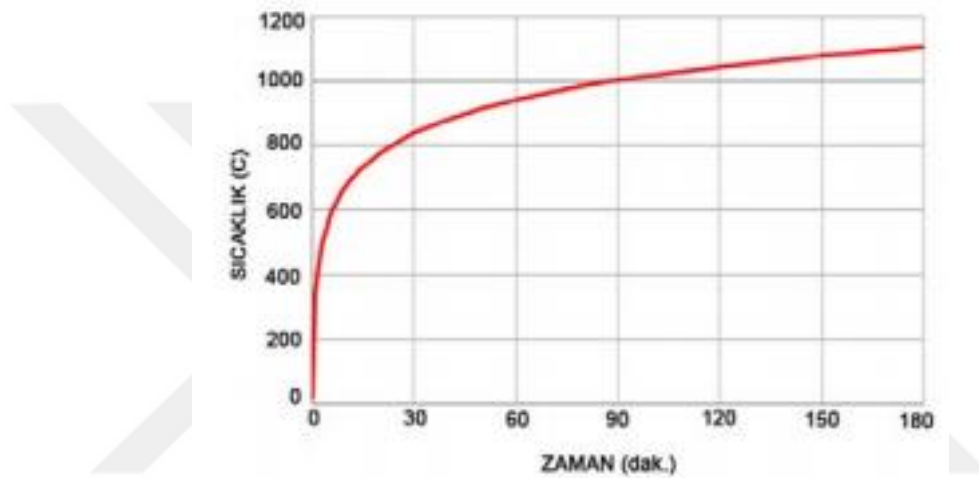
$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (77)$$

Burada,

$\theta_g$ : yangın bölmesindeki (°C) gaz sıcaklığı

$t$ : dakika cinsinden zamandır

20: Başlangıç sıcaklığına ( $T_o$ ) karşılık gelir ve  $T_o \neq 20$  (°C) ise başka bir değerle değiştirilebilir.



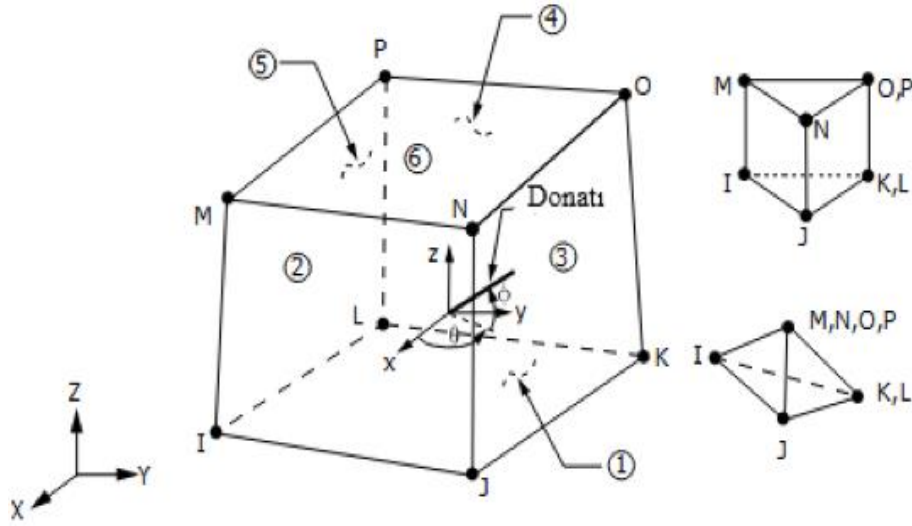
Şekil 50. ISO 834 yangın eğrisi

### Yapısal çözümleme

Isıl çözümleme gerçekleştirildikten sonra yapısal çözümlmeye geçiş yapmak için ilk adım, çözümleme türünü ısıldan yapısal dönüştürmektir. İkinci adım, eleman tipini ısıldan yapısal elemana geçirmektir. Eleman boyutları ve model ağırları olduğu gibi tutulacaktır.

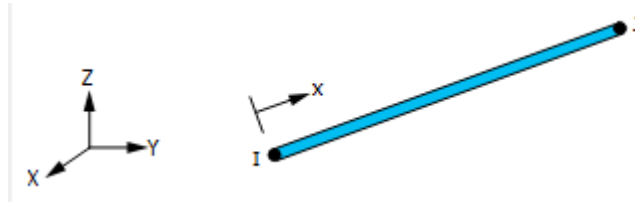
### Eleman değişimi

SOLID65, beton veya betonarme betonun modellenmesinde kullanılır çünkü plastik şekil değiştirme, üç yönde çekme ve ezilme kapasitelerine sahiptir. Elemanın sekiz düğüm noktası ve her bir düğümün üç ötelenme serbestlik derecesi vardır (x, y ve z doğrultusunda). Eleman, donatı çubuğunu üç dik yönde modelleme yeteneğine sahiptir. Bu elementteki en güçlü özellikler doğrusal olmayan malzeme özelliklerinin işlenmesidir. Eleman geometrisi, 8 düğüm noktasının konumu, donatı yönlendirmeleri ve koordinat sistemi Şekil 51'de gösterilmektedir.



Şekil 51. SOLID65 (ANSYS 18.2)

LINK180, tek eksenli çekme ve basınca çalışabilen üç boyutlu bir çubuk elemandır. Eleman plastik şekil değiştirme kapasitesine, her bir düğümde üç ötelenme serbestlik derecesine (x, y ve z doğrultusu) ve iki düğüm noktasına sahiptir. Plastisite, gerilme, dönme ve sönme kapasitelerine sahiptir. Eleman ayrıca Hill anizotropik plastisitesi, Chaboche doğrusal olmayan pekleşme plastisitesi, izotropik pekleşme plastisitesi, elastisite, kinematik pekleşme plastisitesi, ve sünme özellikleri tanımlanabilmektedir. Betonarme için sonlu eleman modellerinde donatı ayrı modelenmiştir. Eleman geometrisi, 2 düğüm konumu ve koordinat sistemi Şekil 52'de gösterilmektedir.



Şekil 52. LINK180 (ANSYS 18.2)

COMBIN39 yay elemanı ısı çözümüyle yapısal çözüme geçiş durumunda eleman değişikliği yapmaya ihtiyaç yoktur. Çünkü tüm çözümlerde kullanılabilir özelliği vardır. Bölüm sonunda özellikleri aktarılmıştır.

### **Gerçek sabit**

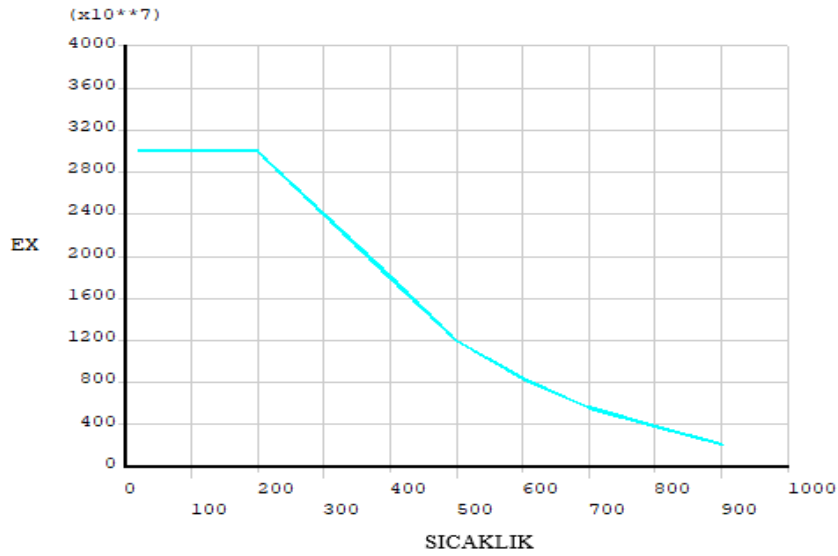
Hem beton (SOLID65) hem de donatı (LINK180) için gerçek sabit değerlerini ısı çözümü kısmında tanımlamış olduk. Bu yüzden yapısal çözümleme kısmında beton ve donatı için tekrar gerçek sabit tanımlamadık. COMBIN39 için gerçek sabitleri sıcaklık değerlerine göre değişen kuvvet-yer değiştirme değerlerini tanımladık. Bölüm sonunda ayrıntılı olarak anlatılmaktadır.

### Malzeme özellikleri

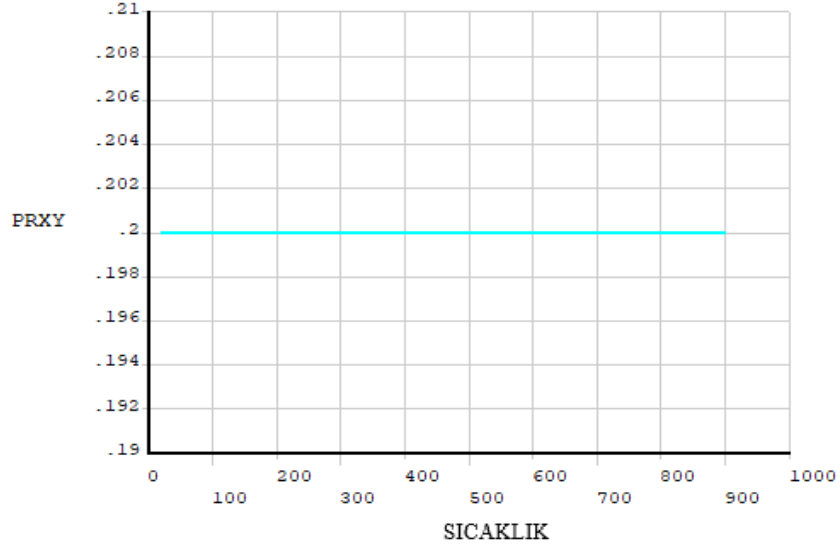
Betonda, gerilme şekil değiştirme ilişkisi iki kısımda tanımlanacaktır. İlk kısım, daha önceki bölümde bahsettiğimiz TS EN 1992-1-2’de açıklandığı gibi sıcaklıkla değişen (MPa) cinsinden elastisite modülünün (EX), lineer izotropik değerlerini tanımlayarak eğrinin elastik bölgesini verir. Tablo 12’de gösterildiği gibi poisson oranı (PRXY) da bu kısımda girilir. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilmiş olup Şekil 53 ve 54’te gösterilmiştir. İkinci kısım, eğrinin geri kalanını tanımlamak için girilen gerilme ve şekil değiştirme için çok değişkenli kinematik pekleştirme değerlerini tanımlayarak eğrinin plastik bölgesini verir. Bu işlem, betonun çeşitli sıcaklıklarda farklı davranışın göstermesinden dolayı her bir sıcaklık aralığı için tekrarlanır. Çok değişkenli kinematik pekleştirme değerleri Tablo 13’de örnekle gösterilmiş olup, hesaplanan değerler programda grafik ile çizilerek Şekil 55’de gösterilmiştir.

**Tablo 12.** Betonun Farklı Sıcaklıklardaki Elastisite Modülü ve Poisson Oranı

Sıcaklık (°C)	EX (N/m <sup>2</sup> )	PREX
20	3E10	0.2
300	2.4E10	0.2
600	8437.5E6	0.2



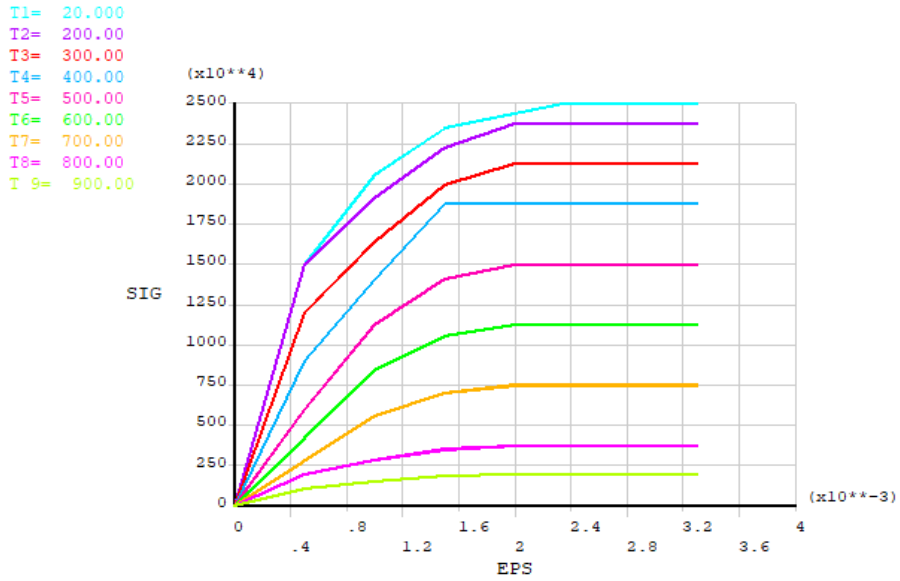
**Şekil 53.** Betonun farklı sıcaklıklarda elastisite modülü eğrileri (ANSYS 18.2)



Şekil 54. Betonun farklı sıcaklıklarda Poisson oranı eğrileri (ANSYS 18.2)

Tablo 13. Farklı Sıcaklıklardaki Betonun Gerilme-Şekil Değişirme Değerleri

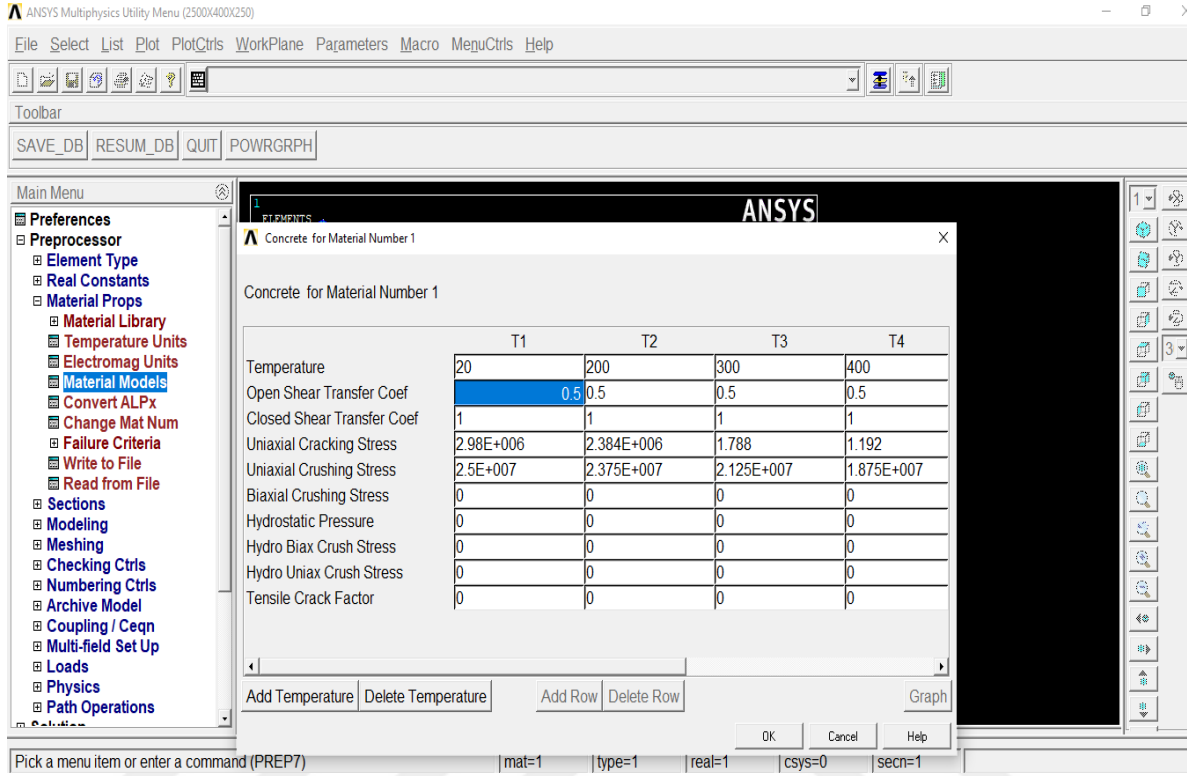
Sıcaklık 20 (°C)		Sıcaklık 300 (°C)		Sıcaklık 600 (°C)	
Gerilme	Şekil Değişirme	Gerilme	Şekil Değişirme	Gerilme	Şekil Değişirme
0.0005	15E6	0.0005	12E6	0.001	8.4375E6
0.001	20.546E6	0.001	16.375E6	0.0015	10.547E6
0.0015	23.4375	0.0015	19.922E6	0.002	11.25E6
0.002347	25E6	0.002	21.25E6	0.002347	11.25E6
0.003	25E6	0.002347	21.25E6	0.002347	11.25E6



Şekil 55. 20°C ile 900°C arasındaki sıcaklıklarda betonun gerilme-şekil değişirme ilişkileri

Gerilme-şekil değişirme eğrisine ek olarak, farklı sıcaklıklardaki betonun çatlama davranışını simüle etmek için Şekil 56'da gösterildiği gibi tanımlanan değerler sırayla;

ShrCf-Op = sabit betonun açık çatlak kesme transfer katsayısını, ShrCf-CI = kapalı çatlak kesme transfer katsayısını, UnTensSt = tek eksenli maksimum çekme mukavemetini ( $f_t$ ), UnCompSt = tek eksenli maksimum basınç mukavemetini ( $f_c$ ), BiCompSt = Çift eksenli maksimum basınç mukavemetini temsil etmektedir.

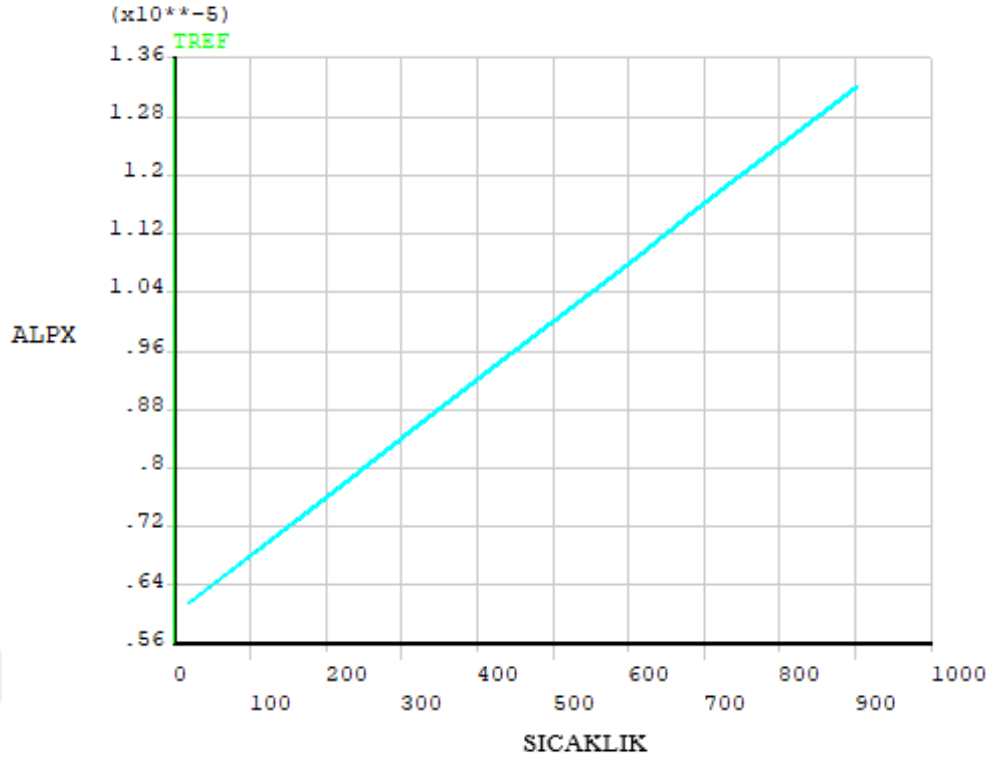


Şekil 56. Farklı sıcaklıklardaki betonun malzeme özellikleri (ANSYS 18.2)

Sıcaklığa maruz kalan betonun tepkisini simüle edebilmek için ısıl genleşme katsayısı tanımlanmalıdır. Beton için ısıl katsayısına bir örnek, Tablo 14'de gösterilmektedir. Isıl genleşme katsayısı değerleri, kuramsal temeller bölümünde TS EN 1992-1-2'deki formüllerle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilerek Şekil 57'de gösterilmiştir.

Tablo 14. Farklı Sıcaklıklardaki Beton İçin Isıl Genleşme Katsayısı Değerleri

Sıcaklık (°C)	ALPX
20	9,2E-09
300	1,05E-05
600	1,7E-05



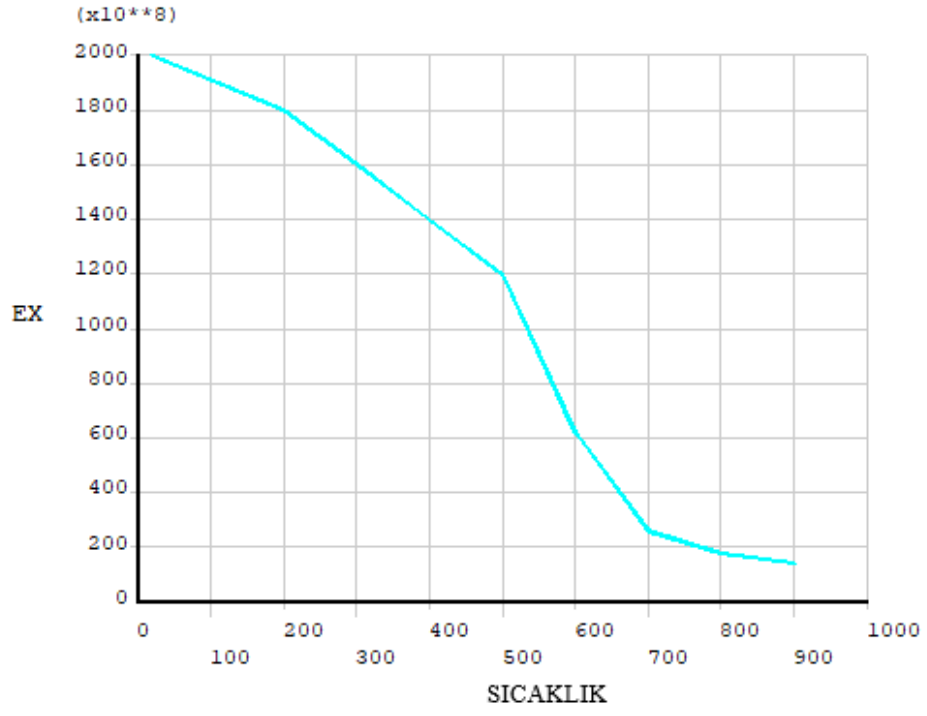
**Şekil 57.** Betonun farklı sıcaklıklarda ısıl genişleme katsayısı eğrileri (ANSYS 18.2)

Donatının gerilme şekil değiştirme ilişkisi de iki kısımda tanımlanacaktır. İlk kısım daha önce kuramsal temeller bölümünde bahsettiğimiz TS EN 1992-1-2’de açıklandığı gibi sıcaklıkla değişen (Pa) cinsinden elastisite modülünün (EX), lineer izotropik değerlerini tanımlayarak eğrinin elastik bölgesini verir. Tablo 15’de gösterildiği gibi poisson oranı (PRXY) da bu kısımda girilir. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilerek Şekil 58 ve 59’da gösterilmiştir.

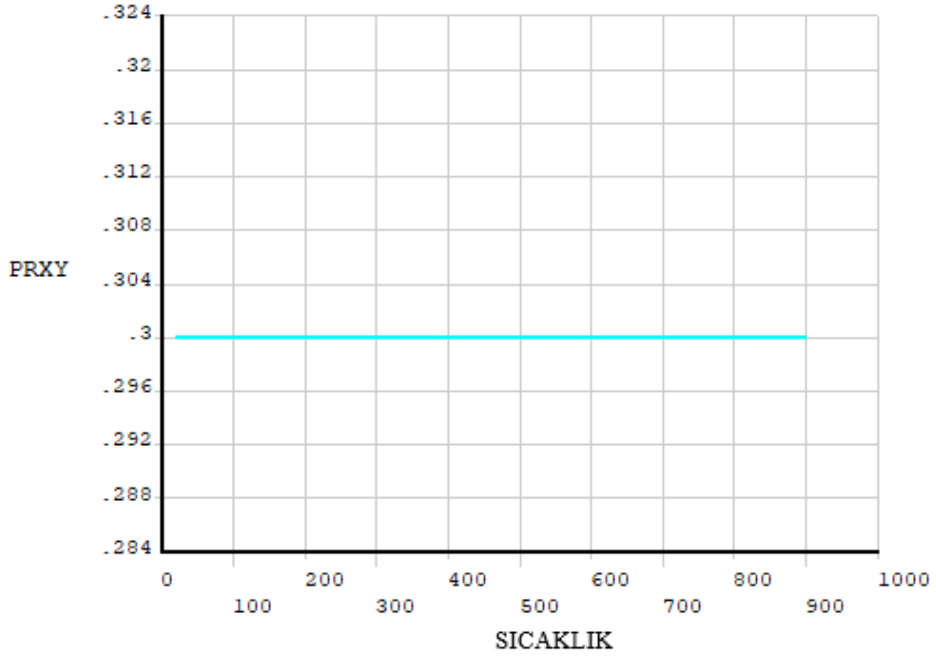
İkinci kısım, eğrinin geri kalanını tanımlamak için girilen gerilme ve şekil değiştirme için multilineer kinematik pekleştirme değerlerini tanımlayarak eğrinin plastik bölgesini verir. Bu işlem, çeliğin çeşitli sıcaklıklarda farklı davranışın göstermesinden dolayı her bir sıcaklık aralığı için tekrarlanır. Multilineer kinematik pekleştirme değerleri Tablo 16’da örnekle gösterilmiştir. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilerek Şekil 60’da gösterilmiştir.

**Tablo 15.** Çeliğin Farklı Sıcaklıklardaki Elastisite Modülü ve Poisson Oranı

Sıcaklık (°C)	EX (N/mm <sup>2</sup> )	PREX
20	3E10	0.3
300	2.4E10	0.3
600	8437.5E6	0.3



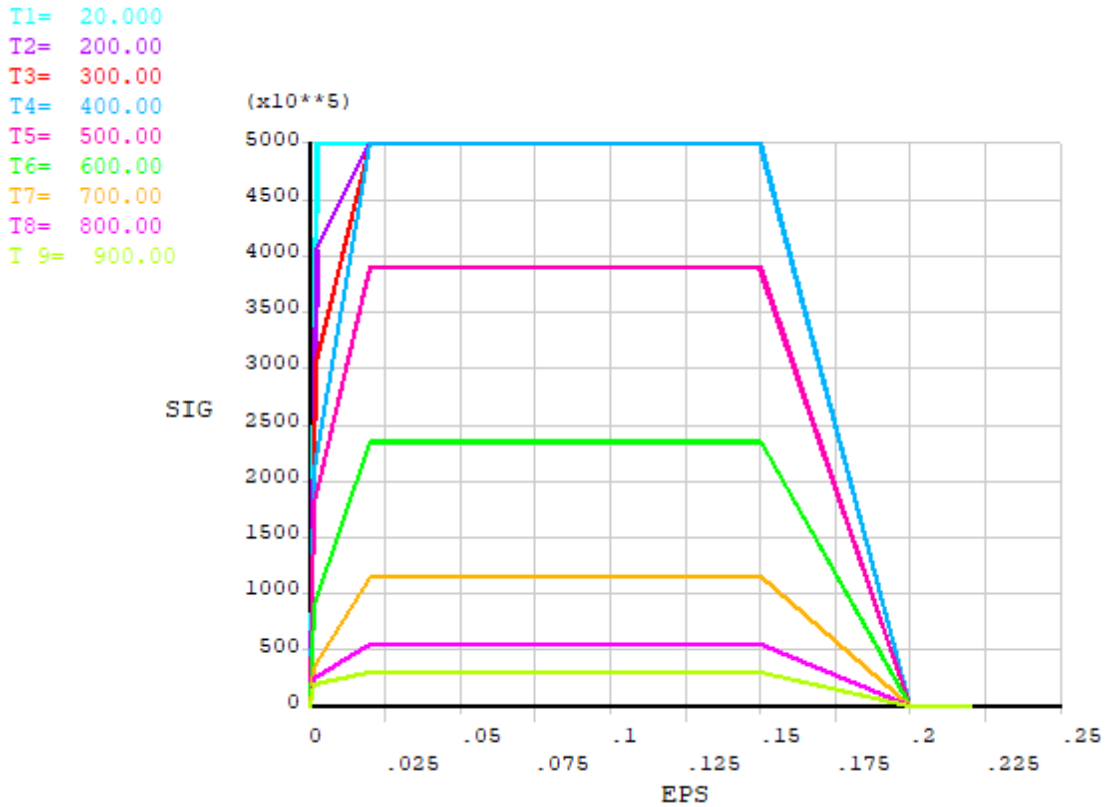
Şekil 58. Çelik donatının farklı sıcaklıklarda elastisite modülü eğrileri (ANSYS 18.2)



Şekil 59. Çelik donatının farklı sıcaklıklarda Poisson oranı eğrileri (ANSYS 18.2)

**Tablo 16.** Farklı Sıcaklıklardaki Çeliğin Gerilme-Şekil Değiştirme Değerleri

Sıcaklık 20 (°C)		Sıcaklık 300 (°C)		Sıcaklık 600 (°C)	
Gerilme	Şekil Değiştirme	Gerilme	Şekil Değiştirme	Gerilme	Şekil Değiştirme
0.0025	500E6	0.00190625	305E6	0.001451613	90E6
0.02	500E6	0.02	500E6	0.02	235E6
0.15	500E6	0.15	500E6	0.15	235E6
0.0025	500E6	0.00190625	305E6	0.001451613	90E6
0.02	500E6	0.02	500E6	0.02	235E6

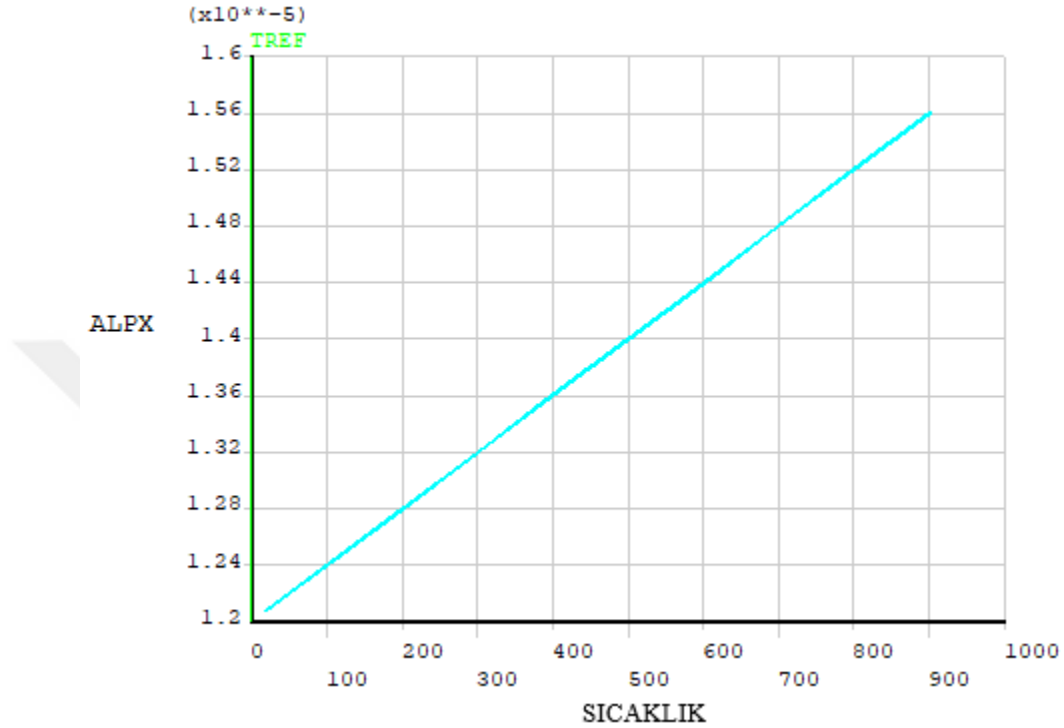
**Şekil 60.** 20°C ile 900°C arasındaki sıcaklıklarda çelik donatının gerilme-şekil değiştirme ilişkileri

Sıcaklığa maruz kalan çelik donatının tepkisini simüle edebilmek için ısıl genleşme katsayısı tanımlanmalıdır. Çelik donatı için ısıl katsayısına bir örnek, Tablo 17'de gösterilmektedir. Isıl genleşme katsayısı değerleri, kuramsal temeller bölümünde verilen TS EN 1992-1-2'deki formüllerle hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler programda grafik ile çizilerek Şekil 61'de gösterilmiştir.



**Tablo 17.** Farklı Sıcaklıklardaki Çelik İçin Isıl Genleşme Katsayısı Değerleri

Sıcaklık (°C)	ALPX
20	7.73.E-22
300	1,24E-05
600	1,4E-05

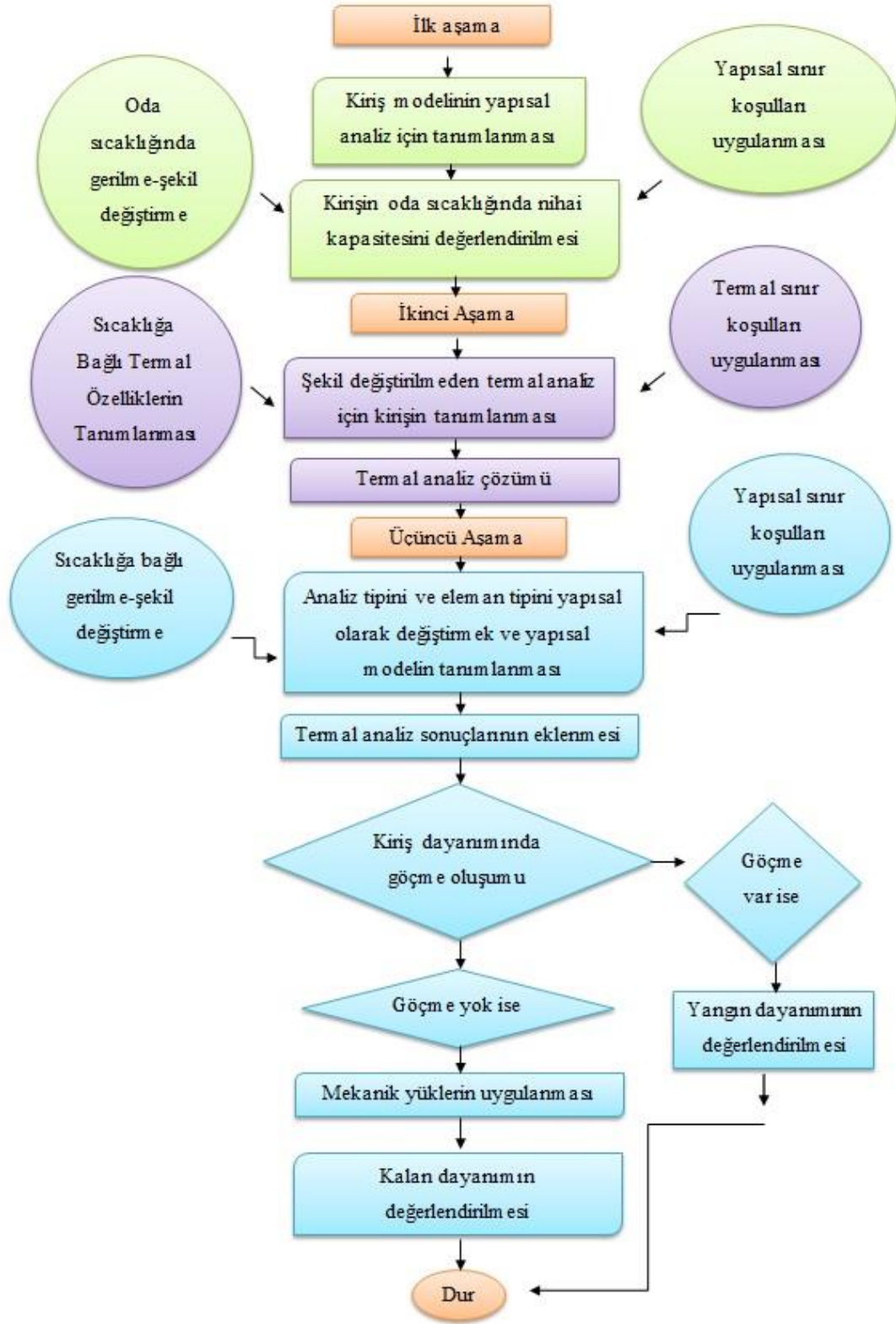


**Şekil 61.** Çelik donatının farklı sıcaklıklarda ısıl genleşme katsayısı eğrileri (ANSYS 18.2)

### ANSYS'te Kiriş Modelleri

Doğru bir parametrik çalışma yapmak için, deneysel çalışmalara ve literatüre dayanarak validasyon çalışması yapılmalıdır. Herhangi bir sonlu eleman modeli, deney programı, teknikler, araçlar ve deneysel sonuçları içeren iyi tanımlanmış bir deneysel çalışma kullanılarak kalibre edilmelidir. Daha sonra yapılan model için gerekli parametrelerle çalışmamızı destekleyecektir. Hem ısıl hem de yapısal çözümlemesi gerçekleştirmek için seçilen program, sonlu elemanlar modelleme yöntemi kullanılacağından ANSYS olmuştur. Isıl ve yapısal için yapılan çözümleme türlerinde modelimizi oluştururken ilk olarak validasyon çalışmasını Dwaikat and Kodur (2016) tarafından deneysel olarak gerçekleştirilen hem yangın yüklerine hem de mekanik yüklere maruz kalan iki kirişin modellemesi yapılmış olup benzer sonuçlar ve ısı profilleri elde edilmiştir. Bu nedenden dolayı modelin doğruluğu literatürdeki çalışmalarla onayladıktan sonra kendi çalışmalarımızda farklı parametrelerle kirişler tasarlanıp çözümlemeleri gerçekleştirilmiştir.

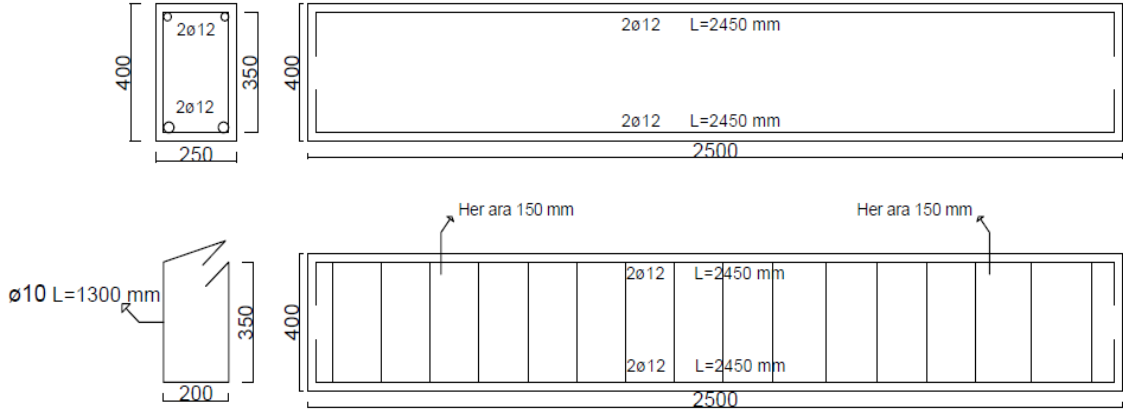
Bu tezde iki farklı parametreye bağlı kiriş modelleri olacaktır. Tasarlanan kirişlerin ilki kesme kirişi, ikinci ise eğilme kirişi olacak şekilde tasarlanmıştır. Aşağıdaki akış şemasında (Şekil 62) ANSYS programı içindeki çözümlene adımları gösterilmiştir.



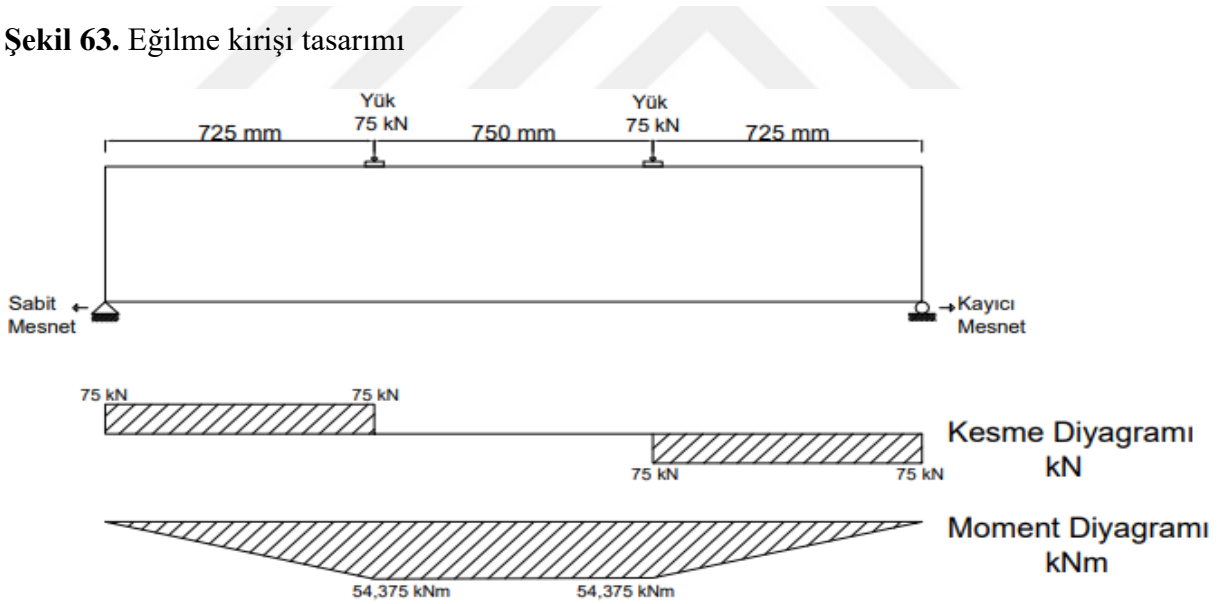
Şekil 62. ANSYS ısısal-yapısal çözümlene adımları

### Eğilme çatlakları oluşarak göçmesi beklenen kiriş

Kirişler normal mukavemetli beton ile tasarlanmıştır. Kiriş boyutları 2.5 m uzunluğunda, 0.250 m genişliğinde ve toplam derinliği 0.400 m'ye eşittir. Kirişte  $\phi 12$ 'lık 2 adet çekme donatısı ve iki adet  $\phi 12$ 'lik basınç donatısı vardır. Etriye aralığı 0.150 m aralıkla 16 adet  $\phi 8$  olmuştur. Çeliğin akma mukavemeti 500 MPa alınmıştır. Kirişe toplam verilen yük 150 kN'dur. Kiriş geometrisi, donatı aralığı ve kesit detayları, Şekil 63'te gösterilmektedir. Kirişe ait kesme-moment diyagramları ise Şekil 64'te gösterilmektedir.



Şekil 63. Eğilme kirişi tasarımı



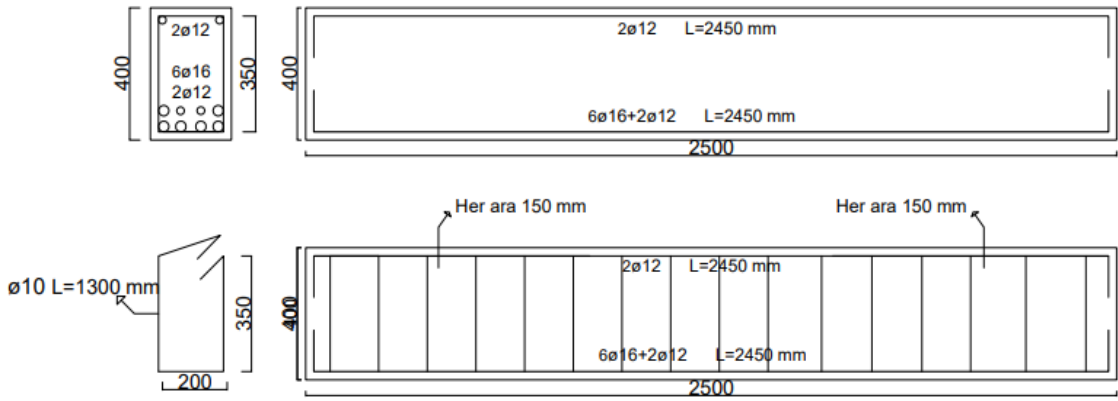
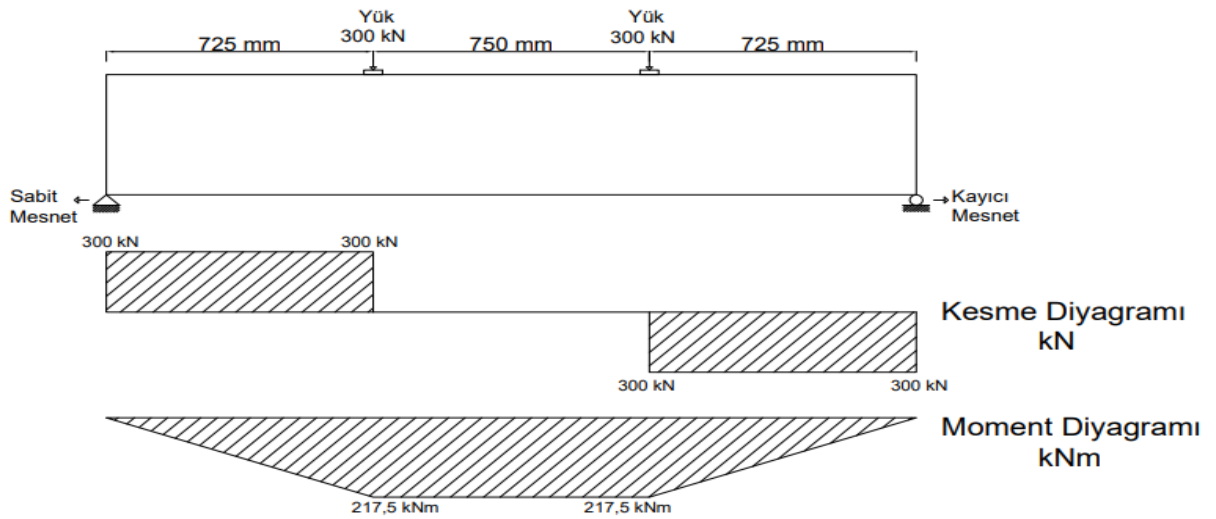
Şekil 64. Eğilme kirişi için kesme-moment diyagramı

**Tablo 18.** Eğilme Kirişinin Tasarım Tablosu

Çekme Donatısı	Basınç Donatısı	Kesme Donatısı	Kesmeye Karşı	Eğilmeye Karşı
			Taşıma Kapasitesi	Taşıma Kapasitesi
			$F_u^V$ (kN)	$F_u^M$ (kN)
2 $\phi$ 12	2 $\phi$ 12	16 $\phi$ 10	50	10

**Kesme çatlakları oluşarak göçmesi beklenen kiriş**

Kirişler normal mukavemetli betondan yapılmıştır. Kiriş boyutları 2.5 m uzunluğunda, 0.250 m genişliğinde ve toplam derinliği 0.400 m'ye eşittir. Kirişte  $\phi$  16'lık 6 adet çekme donatısı ve iki adet  $\phi$  12'lik basınç donatısı vardır. Etriye aralığı 0.150 m aralıkla 16 adet  $\phi$  8 olmuştur. Çeliğin akma mukavemeti 500 MPa alınmıştır. Kirişe toplam verilen yük 600 kN'dur. Kiriş geometrisi, donatı aralığı ve kesit detayları, Şekil 65'te gösterilmektedir. Kirişe ait kesme-moment diyagramları ise Şekil 66'da gösterilmektedir.

**Şekil 65.** Kesme kirişi tasarımı**Şekil 66.** Kesme kirişleri için kesme-moment diyagramı

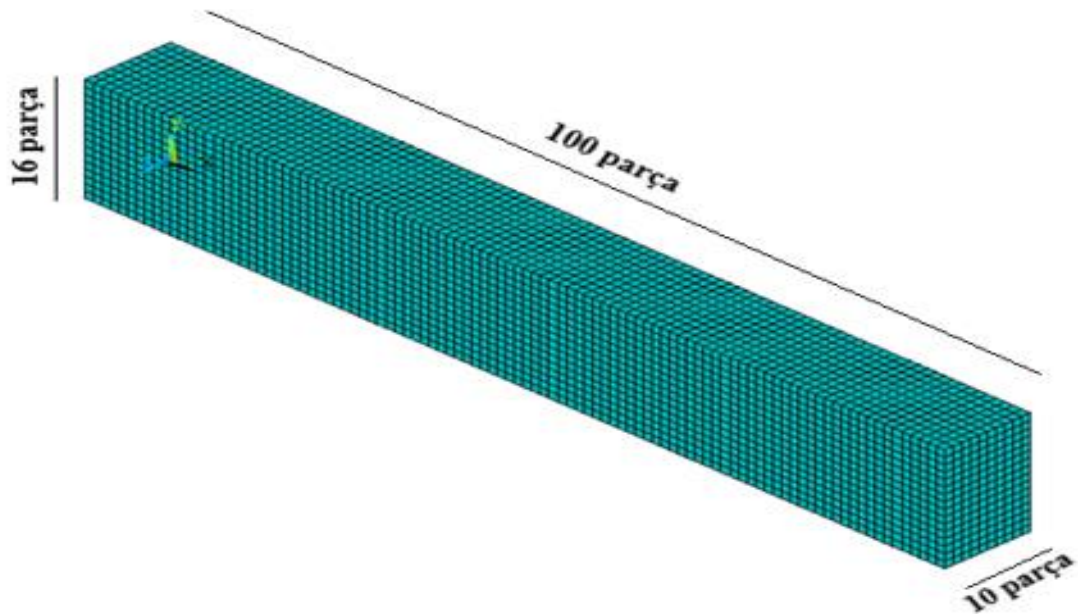
**Tablo 19.** Kesme Kirişlerinin Tasarım Tablosu

Çekme Donatısı	Basınç Donatısı	Kesme Donatısı	Kesmeye Karşı Taşıma Kapasitesi	Eğilmeye Karşı Taşıma Kapasitesi
			$F_u^V$ (kN)	$F_u^M$ (kN)
6 $\phi$ 16 + 2 $\phi$ 12	2 $\phi$ 12	16 $\phi$ 10	40	55

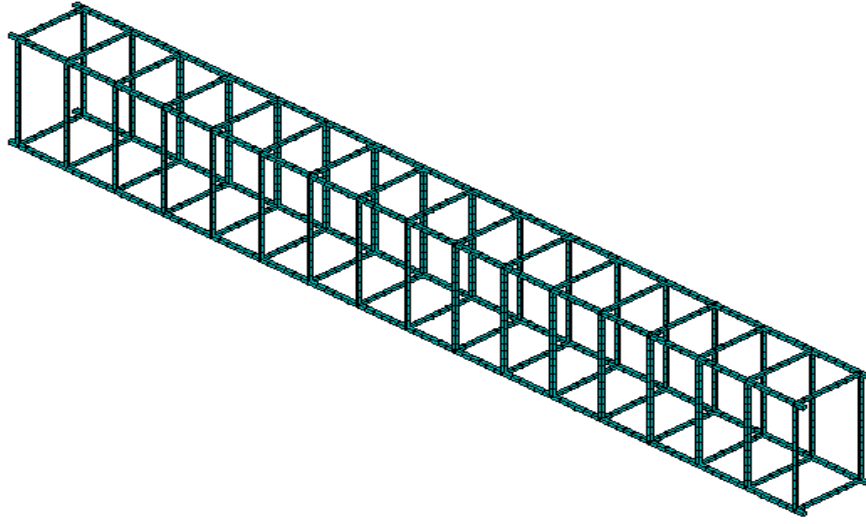
### Kiriş'in sonlu elemanlara bölünmesi ve bağ modellenmesi

Kirişler, Şekil 63 ve Şekil 65'te gösterildiği gibi dört noktalı yük uygulanarak çözümlenmiştir. Her bir yük, kiriş ucundan 0.725 m uzaklıktadır. Her iki kiriş, ISO 834 sıcaklık-zaman eğrisine tabi tutulmuş olup, daha sonra her iki kirişin ısı ve yapısal tepkileri değerlendirilmiştir.

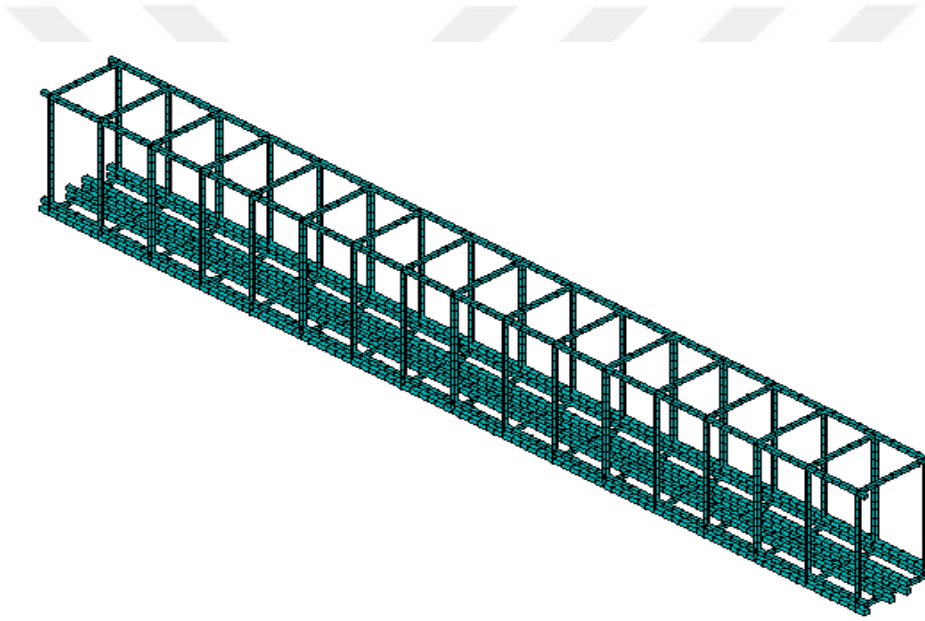
Kiriş, toplam kiriş boyutlarını temsil eden bir hacim yaratılarak modellenmiştir. Bu hacim, beton elemanlara bölünerek mesh işlemi yapılmıştır. Her bir beton eleman, yaklaşık 0.025 m'lik sonlu eleman boyutuna sahiptir. Beton modelleme bittikten sonra, çelik elemanlar ile hem boyuna hemde enine donatılar 0.025 m paspayı bırakılarak yerleştirilmiştir. Beton hacmi mesh görünümü Şekil 67'de, donatı mesh görüntüleri Şekil 68 ve Şekil 69'da gösterilmektedir.



**Şekil 67.** Kirişler için beton hacmi mesh görünümü (ANSYS 18.2)

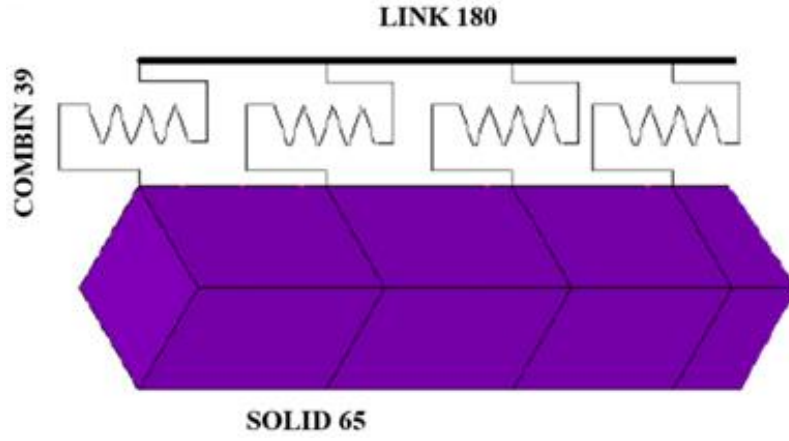


**Şekil 68.** Eğilme kirişi için donatı hacmi mesh görünümü (ANSYS 18.2)



**Şekil 69.** Kesme kirişi için donatı hacmi mesh görünümü (ANSYS 18.2)

Bağ modellenmesi için önceden aktarıldığı gibi ANSYS beton (SOLID65) ve donatı (LINK39) arasındaki aderansı % 100 varsaymaktadır. Oysa bu durum günlük hayatta mümkün olmadığından literatürde de kullanılmış olan COMBIN39 yay elemanını bağ modellemesi için kullandık. Beton ve donatı elemanlarının düğüm noktaları çakışık olarak birbirinden ayrı modellenmiş olup, çakışık düğüm noktalarına Şekil 70’de gösterildiği gibi boyutu olmayan bu elemanı yerleştirdik. Düğüm noktaları COMBIN39 ile birleştirildikten sonra CP (Couple) komutuyla Y ve Z doğrultusunda serbestlik dereceleri eşleştirilmiştir. Eşit ötelenmeleri bu doğrultularda yanal yükler altında yapmaya zorlanmıştır. X doğrultusunda ise COMBIN39’da verilen bağ gerilmesi-donatı sıyrılması eğrisine göre öteleme yapması çalışılmış olup düğüm noktaları birbirinden bağımsız şekilde modellenmiştir.



**Şekil 70.** COMBIN39 elemanının SOLID65 ve LINK180 elemanlarının düğüm noktalarıyla birleştirilmesi (Özdemir, 2019)

COMBIN39 yay elemanı için literatürde çalışılmış olan gerilme-sıyrılma modelleri araştırılmıştır. Lowes bağ gerilmesi-sıyrılma modeli (Lowes 2002), Eligehausen bağ gerilmesi-sıyrılma modeli (Eligehausen et al. 1983), Juan-Stavridis bağ gerilmesi-sıyrılma modeli (Murcia et al. 2011) en temel ve en yaygın kullanılan çalışmalardır.

Eligehausen et al. (1983), yaptıkları çalışmalarında sargılı beton özelliklerine sahip betonun içine gömülü halde bulunan nervürlü donatıların tekrarsız ve tekrarlı yükler altında bağ gerilmesi sıyrılma ilişkisini belirlemişlerdir. Söz konusu çalışmada yazarlar deneyler sonucunda elde ettikleri veriler ışığında beton ile nervürlü donatı arasında bağ davranışını analitik modelle çözümlenmişlerdir. Eligehausen et al. (1983), tarafından deneyler neticesinde bulunup önerilen bağ gerilmesi ve sıyrılma ilişkisi denklem 77’de detaylı olarak gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
 \tau(s) &= \tau_1 \left( \frac{s}{s_1} \right)^a & 0 \leq s \leq s_1 \\
 \tau(s) &= \tau_1 & s_1 \leq s \leq s_2 \\
 \tau(s) &= \tau_1 - (\tau_1 - \tau_f) \frac{s-s_2}{s_3-s_2} & s_2 \leq s \leq s_3 \\
 \tau(s) &= \tau_f & s \leq s_3
 \end{aligned} \tag{78}$$

Denklem 78’e göre;

$\tau_1$  = azami bağ gerilmesi,

$\tau_f$  = sürtünme bağ gerilmesi,

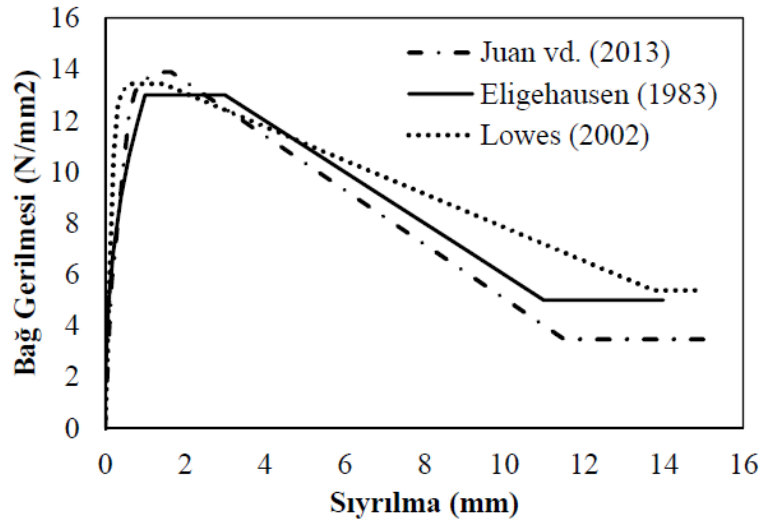
$s_1$  = azami bağ gerilmesine karşılık gelen sıyrılma,

$s_2$  = bağ gerilmesinin düşmeye başladığı andaki sıyrılma,

$s_3$  = bağ gerilmesinin dağıldığı andaki sıyrılma olarak tanımlanmıştır.

Eligehausen et al. (1983), uyguladıkları deneysel veriler sonucunda  $s_1 = 1.0 \text{ mm}$ ,  $s_1 = 3.0 \text{ mm}$ ,  $s_1 = 3.0 \text{ mm}$ ,  $t_1 = 13.5 \text{ N/mm}^2$ ,  $t_f = 5.0 \text{ N/mm}^2$  ve  $a = 0.4$  olarak kullanıldığı zaman, bu veriler neticesinde elde edilen bağ gerilmesi-sıyrılma bağlantıları arasında çok iyi bir uyum bağlantısı olduğunu bulmuşlardır (Özdemir 2019).

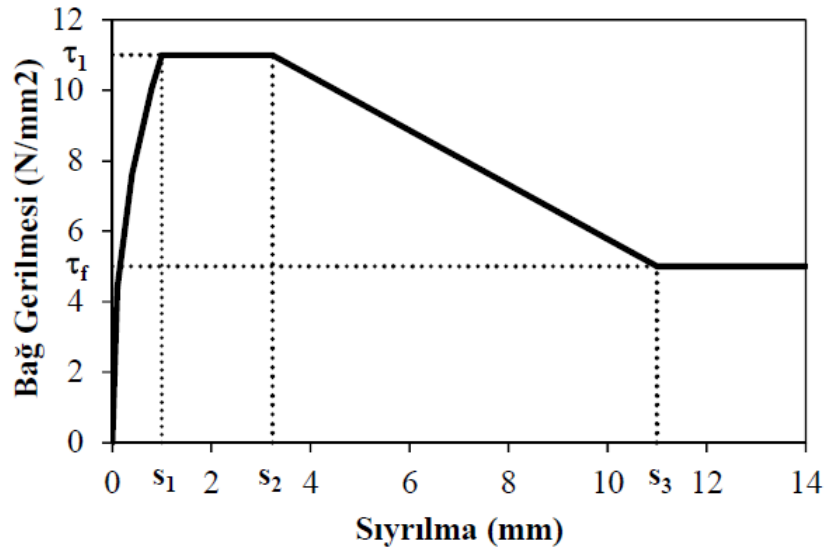
Eligehausen et al. (1983), ayrıca tekrarlı yüklemeler sonucunda azami bağ direncinin yaklaşık olarak %80 oranında azaldığını belirtmişlerdir. Lettow et al. (2002), betonarme yapı elemanlarının üç boyutlu sonlu eleman çözümlemesini uygulayabilmek adına Eligehausen'in önerdiği bağ gerilmesi-sıyrılma modelini kullanmışlardır. Lettow et al. (2002), yaklaşık %80 oranında olan bu azalma miktarını  $\Omega_{cyc}$  faktörü olarak programa aktarmışlardır. Üç boyutlu sonlu elemanlar çözümlemesine aktardıkları bu faktör ile bağ çözülmesi etkisini detaylı olarak göstermişlerdir. Hem beton mukavemeti hem de donatı çapı aynı olan, aynı zamanda benzer özelliklere sahip iyi sargılanmış bir beton içine gömülen donatının tekrarsız yükleme koşullarında Lettow et al. (2002) tarafından tavsiye edilen bağ gerilmesi-sıyrılma modellerinin karşılaştırması Şekil 71'de görülmektedir (Özdemir 2019).



**Şekil 71.** Bağ gerilmesi-donatı sıyrılması modelleri (Özdemir, 2019)

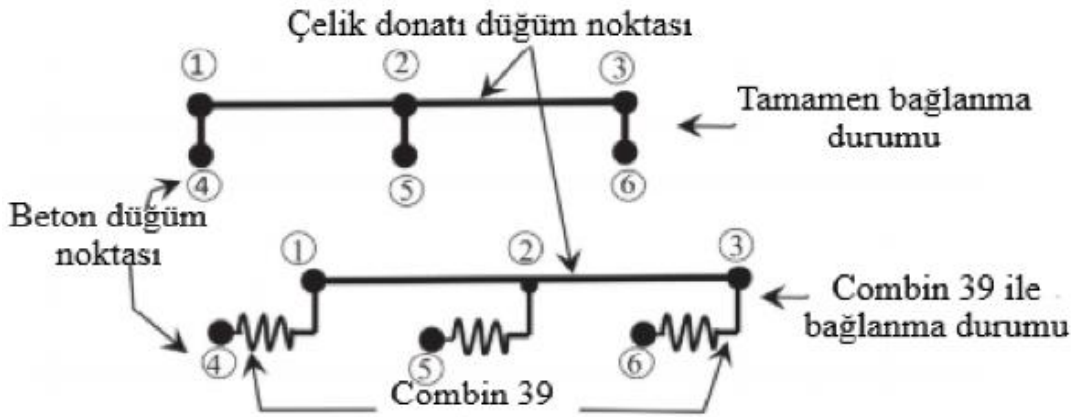
Lowes (2002) yaptığı çalışmanın neticesinde önerdiği model Şekil 71'de gösterilmektedir. Lettow (2002) yaptığı çalışmada ise kullanılan donatı çaplarına göre geometrik parametreleri Lowes (2002)'in yaptığı çalışmanın modeline göre kullanmıştır (Özdemir 2019).





**Şekil 72.** COMBIN39 için oda sıcaklığında kullanılan bağ gerilmesi-donatı sıyırılması modeli (Eligehausen et al. 1983)

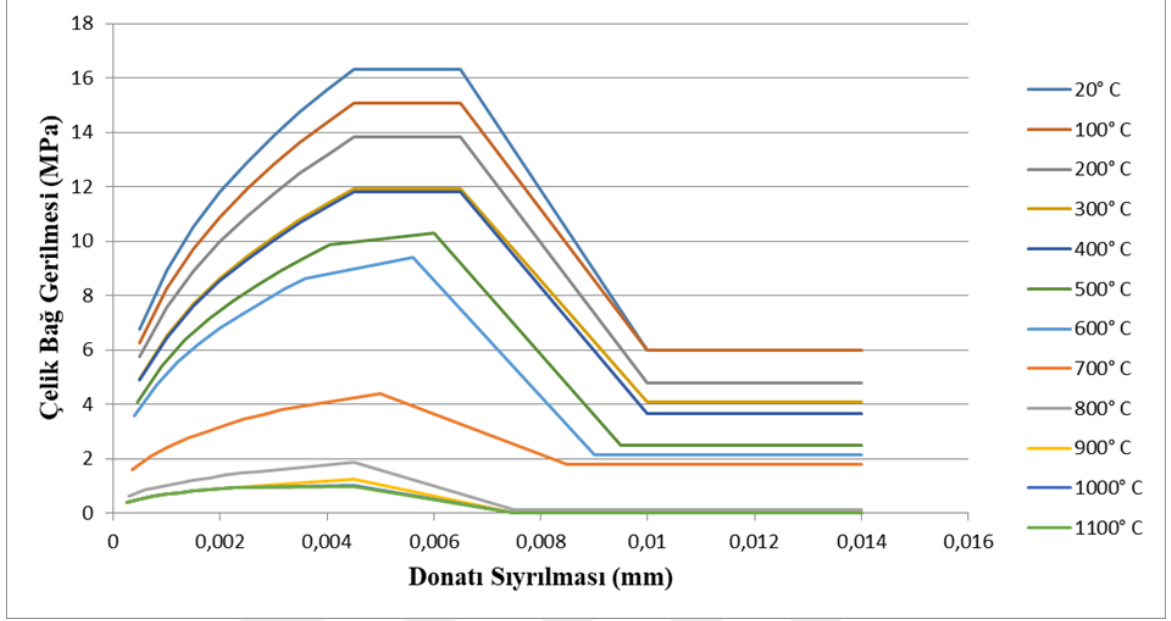
Eligehausen et al. (1983) tarafından ortaya atılan bağ gerilmesi-sıyırılma modeli için bağ gerilmesi değeri, COMBIN39 elemanının malzeme özellikleri belirlenirken kullanılmıştır (Şekil 72). Kullanılan bu modele göre bulunan gerilme değerleri ise donatının yüzey alanları ile çarpılarak kuvvet-yer değiştirme eğrisine çevrilmiştir. Daha sonra sonlu eleman çözümlerinde kullanılmak üzere yay elemanına bu değerler tanımlanmıştır. Örnek olarak bağlanması ise ayrıntılı olarak Şekil 73’de gösterilmiştir.



**Şekil 73.** 2 boyutlu Combin 39 beton ve donatı arasındaki bağlanma durumu (Khalaf et al. 2016)

Isısal çözümler için farklı sıcaklıklardaki bağ gerilmesi-donatı sıyırılması modellerine ihtiyaç bulunmaktadır. Bu sebepten dolayı farklı sıcaklıklar için literatürde araştırılan gerilme-sıyırılma modelleri, Diederichs and Schneider (1981), Raouffard and Nishiyama (2015, 2017, 2018), Morley and Royles (1983), Matsudo and Nishida (2007), Wang (2008), Huang (2010), Hertz (1982), Haddad and Shannis (2016), Haddad et al. (2008), Pothisiri and Panedpojaman (2013), Khalaf et al. (2016), Tariq and Bhargava (2020)

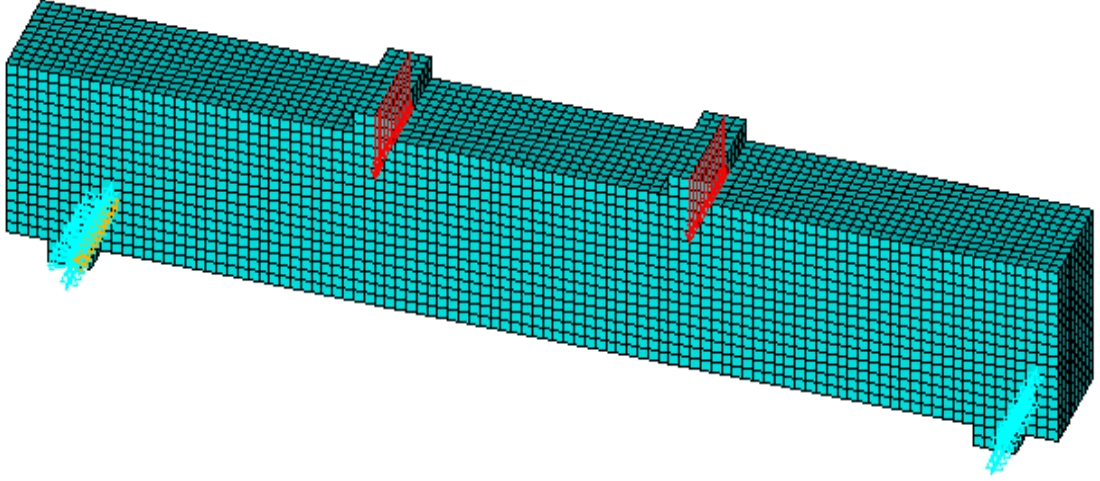
ve Özkal et al. (2018) tarafından gerçekleştirilen çalışmalara göre validasyon çalışması için kullanılan farklı sıcaklık değerleri için yukarıdaki çalışmalardan çekme-çıkartma deneyleri sonucunda elde edilen ortalama bağ gerilmesi-donatı sıyrılması değerleri alınarak model oluşturulmuş olup Şekil 74'te gösterilmiştir.



**Şekil 74.** Farklı sıcaklık değerleri için ortalama bağ gerilmesi-donatı sıyrılması modeli

Yukarıda belirtildiği gibi, yüksek sıcaklıklarda beton ve çelik çubuklar arasındaki bağ karakteristiklerine ilişkin test verileri sınırlıdır. Bu nedenle, önerilen model yüksek sıcaklıklarda çekip-çıkarma deneylerinde mevcut deneysel sonuçları kullanılarak valide edilmiştir. Testlerdeki örneklerin tüm malzeme özellikleri ve geometrileri modelin tahminleri için girdi verileri olarak kullanılmıştır.

Aynı zamanda kirişlerin yapısal çözümlemede sonuçlarını daha net verilebilmesi için yüklerin ve mesnetlerin bulunduğu yerlere çelik plaka yerleştirilmiştir. Meshlemesi yapılan, özellikleri tanımlanan ve bağ modelinin yapılması sonrasında kirişin mekanik yükleme durumu ve mesnet koşulları Şekil 75'te gösterilmiştir.



Şekil 75. Kirişlerin mekanik yükleme ve mesnet koşulları



## ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölümde farklı sıcaklıklardaki numunelerden elde edilen çözümlene sonuçları ve dayanımları verilecektir.

### Eğilme Kirişleri

Bilindiği üzere ortamdaki yangın sıcaklığına maruz kalan betonarme bir yapının, ortam ısı ile kendi ısısının aynı olması mümkün değildir. Beton ortamdaki ısıyı az iletmesi nedeniyle yavaş yavaş almaktadır. Eğilme grubu kirişlerin farklı sıcaklıklardaki ISO yangın eğrisine göre verilen ortam sıcaklıkları ve kirişin ulaştığı maksimum sıcaklık değerleri Tablo 20’de görülmektedir. Sonuçlar kirişin her yüzey sıcaklığının aynı olmaması ve ortam sıcaklığına karşı yüzeyinin ulaştığı maksimum sıcaklık değerleri göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

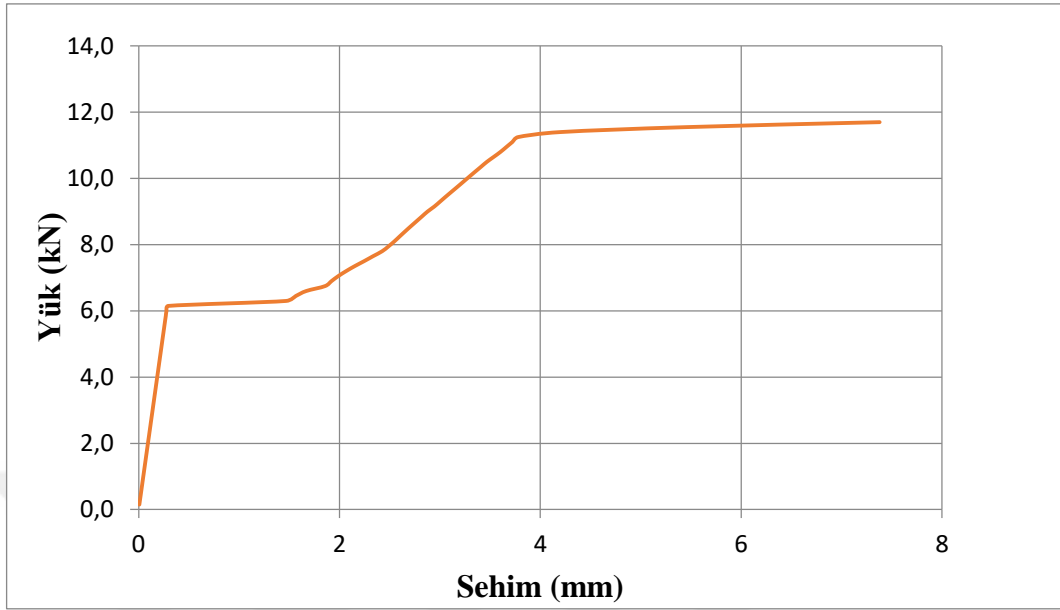
**Tablo 20.** Eğilme Kirişlerinin Sıcaklıklara Göre Maksimum Isı Değerleri

ISO834 Yangını Ortam Sıcaklığı	ISO834 Yangını Ortam Sıcaklığına Denk Gelen Zaman	Kirişin Ulaştığı Maksimum Sıcaklık
20°C	0,1 sn	20°C
100°C	6 sn	20,9973°C
200°C	18 sn	25,9547°C
300°C	42 sn	37,0501°C
400°C	88 sn	62,9707°C
500°C	178 sn	115,433°C
600°C	354 sn	206,781°C
700°C	695 sn	333,472°C
800°C	1365 sn	489,925°C
900°C	2660 sn	658,690°C
1000°C	5190 sn	836,227°C
1100°C	10800 sn	1012,72°C

### Eğilme kirişinin yük-sehim grafikleri

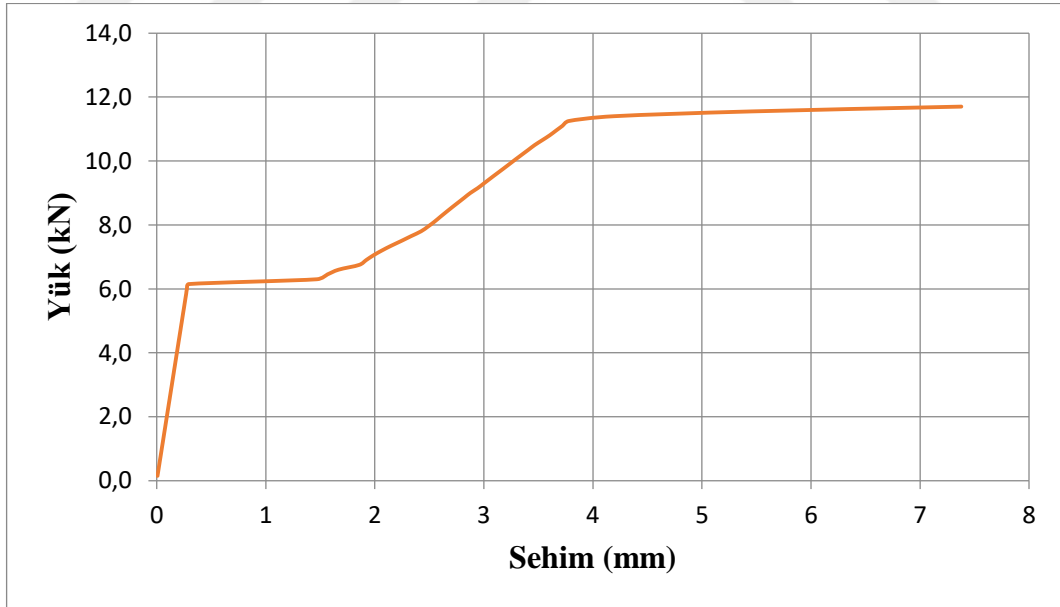
Farklı sıcaklıklar altındaki eğilme kirişinin ısısal-yapısal çözümlenmesi sonucunda yük-sehim grafikleri aşağıda verilmiştir. Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla

20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 76'da grafik olarak verilmiştir. Bu tez kapsamında numuneleri kıyaslamak için kullanılan değerler Şekil 89'da verilmiştir.



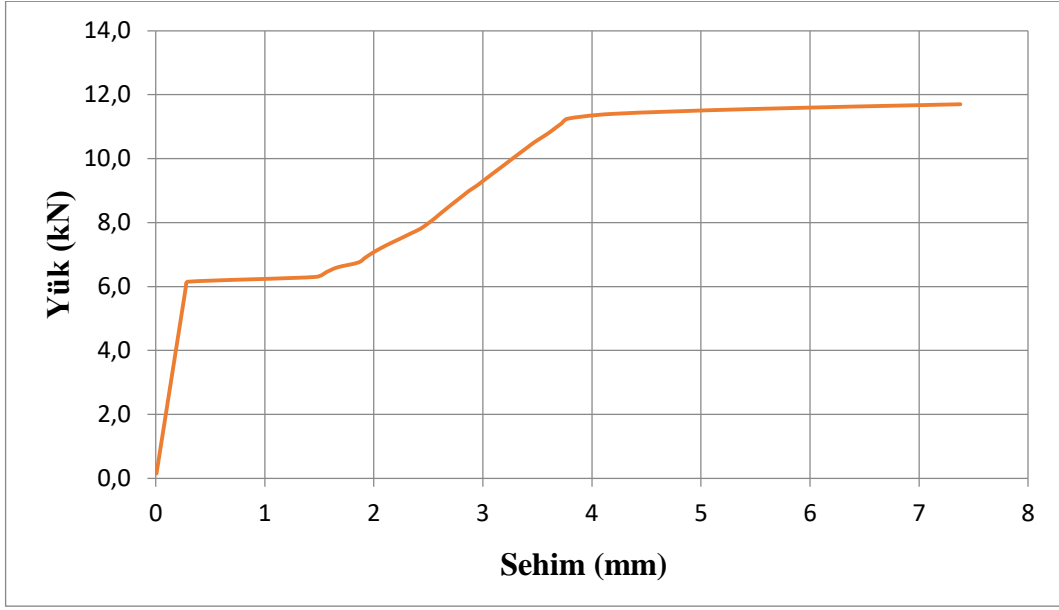
Şekil 76. 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 77'de grafik olarak verilmiştir.



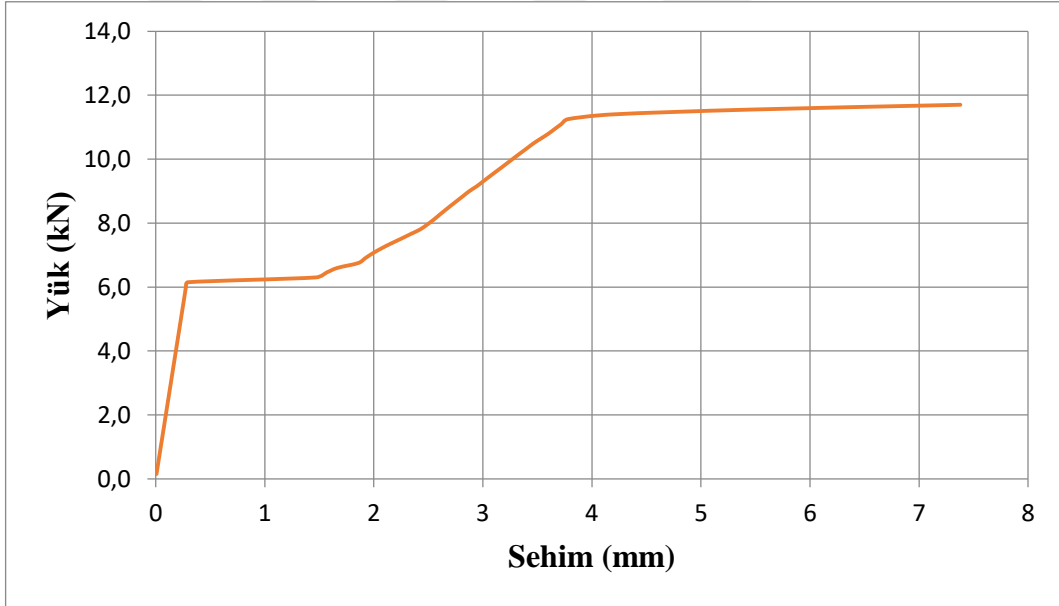
Şekil 77. 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 78'de grafik olarak verilmiştir.



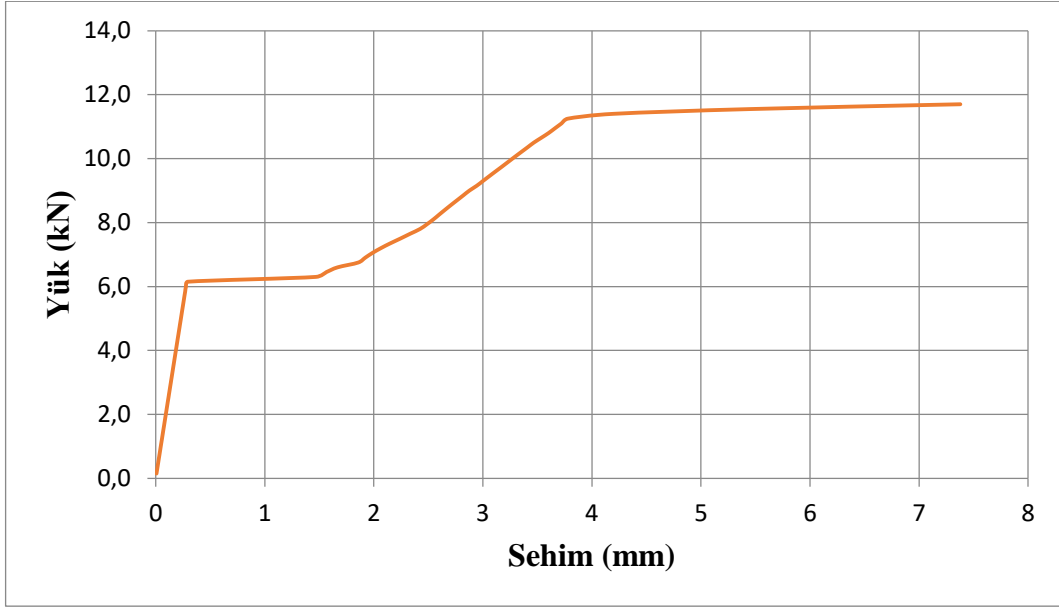
Şekil 78. 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 79’de grafik olarak verilmiştir.



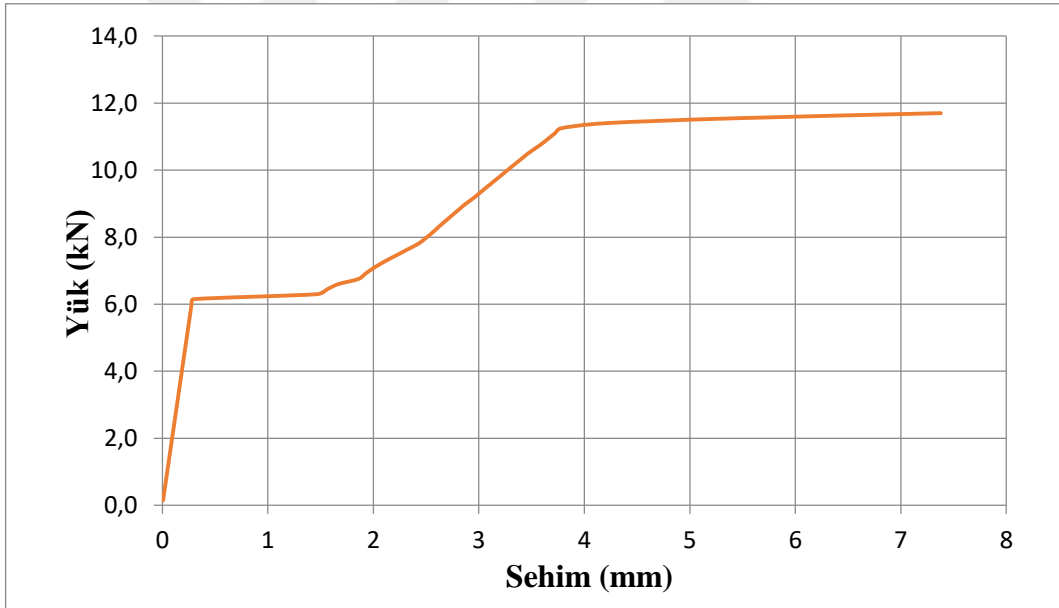
Şekil 79. 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 80’de grafik olarak verilmiştir.



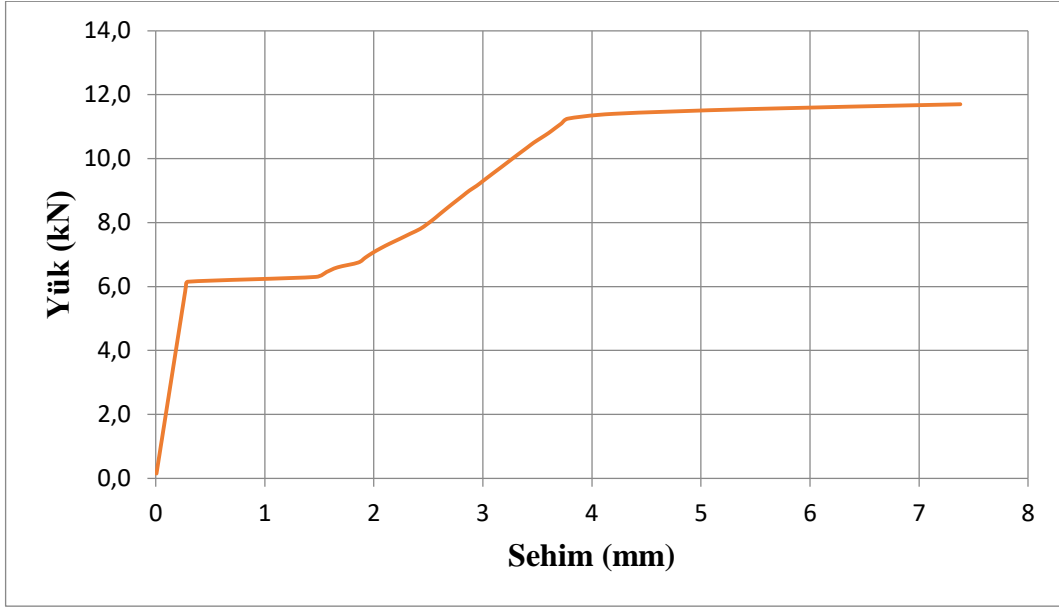
**Şekil 80.** 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 81’de grafik olarak verilmiştir.



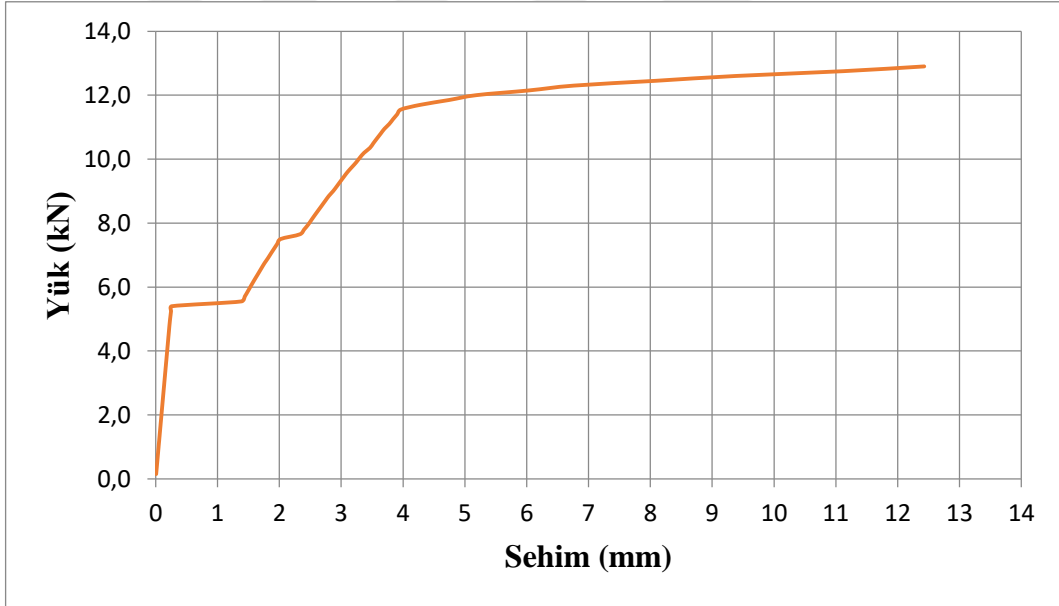
**Şekil 81.** 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 82’de grafik olarak verilmiştir.



**Şekil 82.** 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

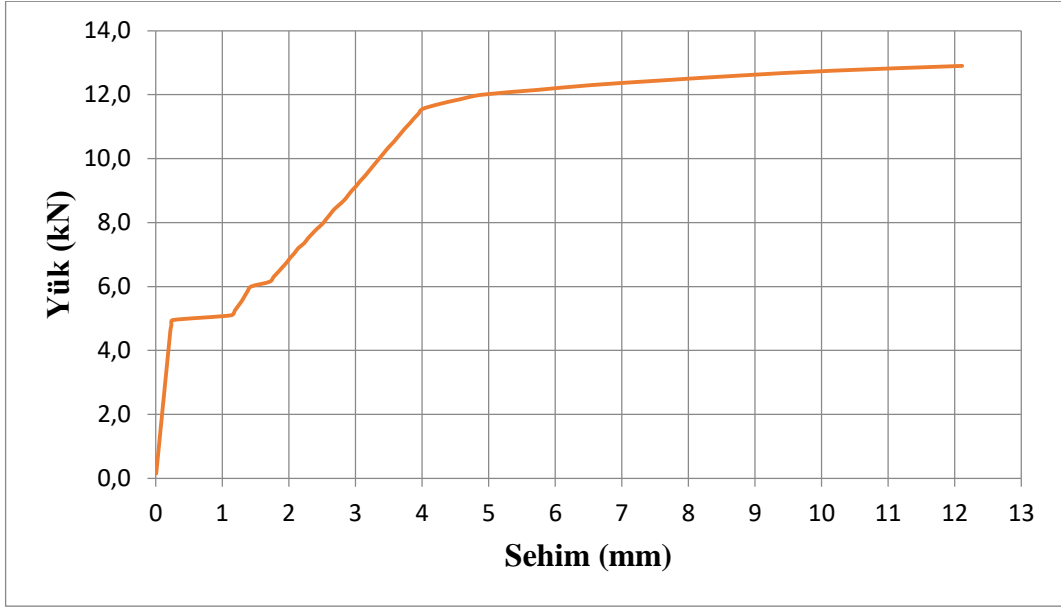
Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 83’de grafik olarak verilmiştir.



**Şekil 83.** 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

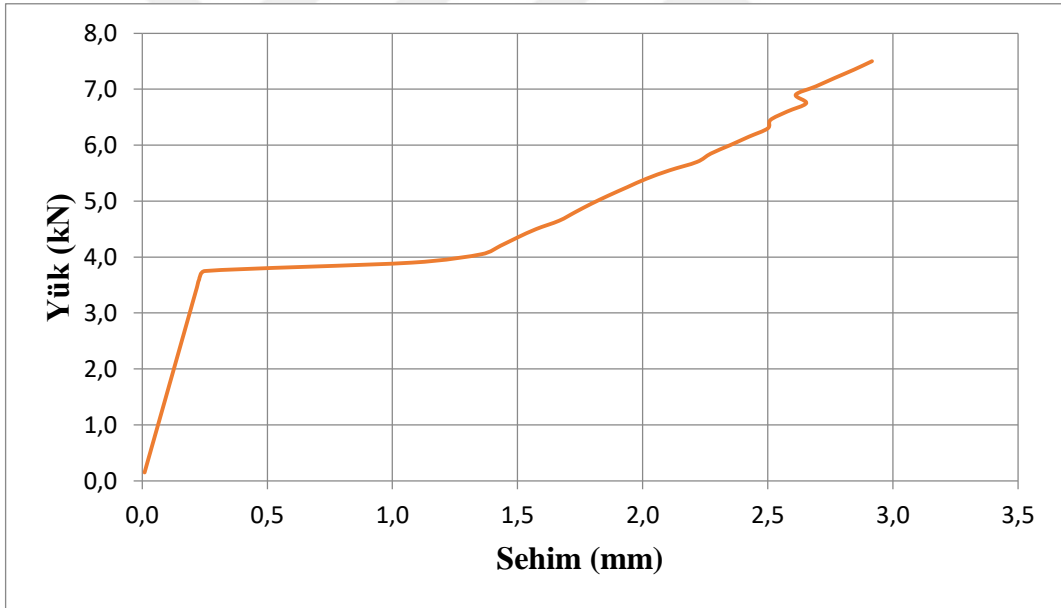
Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 84’de grafik olarak verilmiştir.





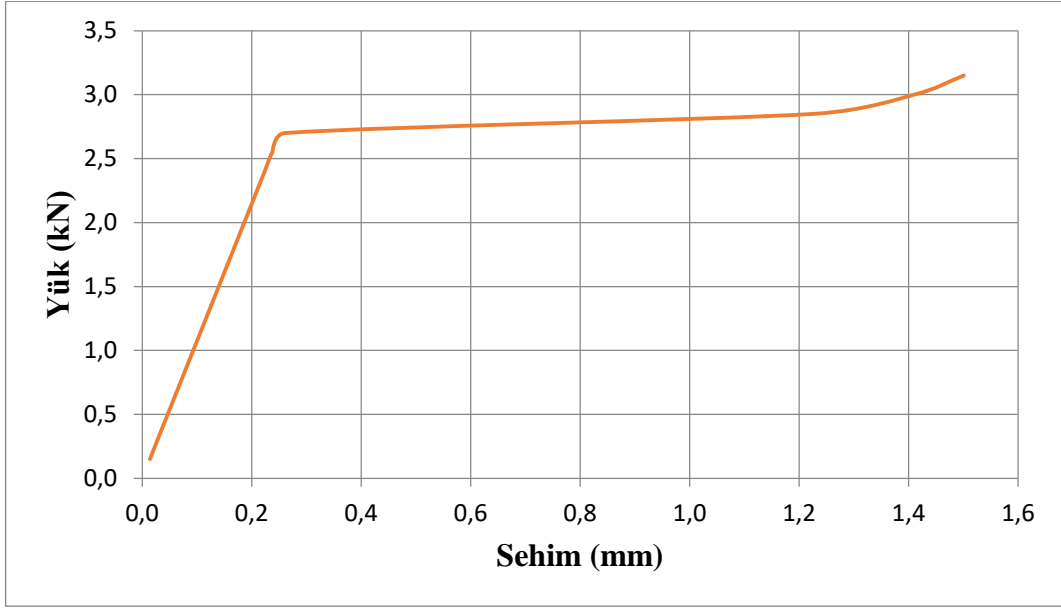
**Şekil 84.** 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 85’de grafik olarak verilmiştir.



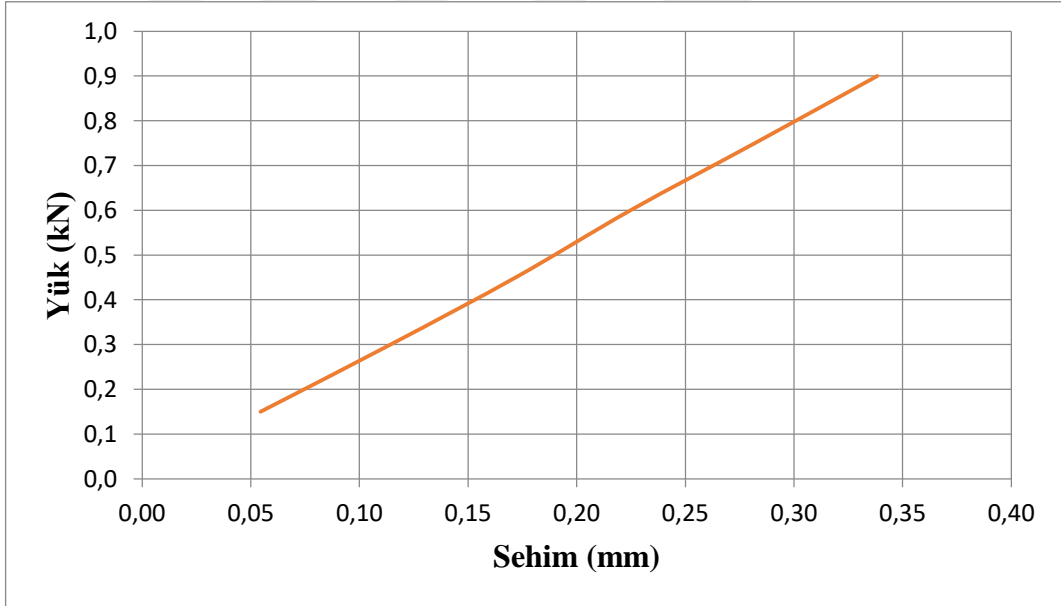
**Şekil 85.** 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 86’da grafik olarak verilmiştir.

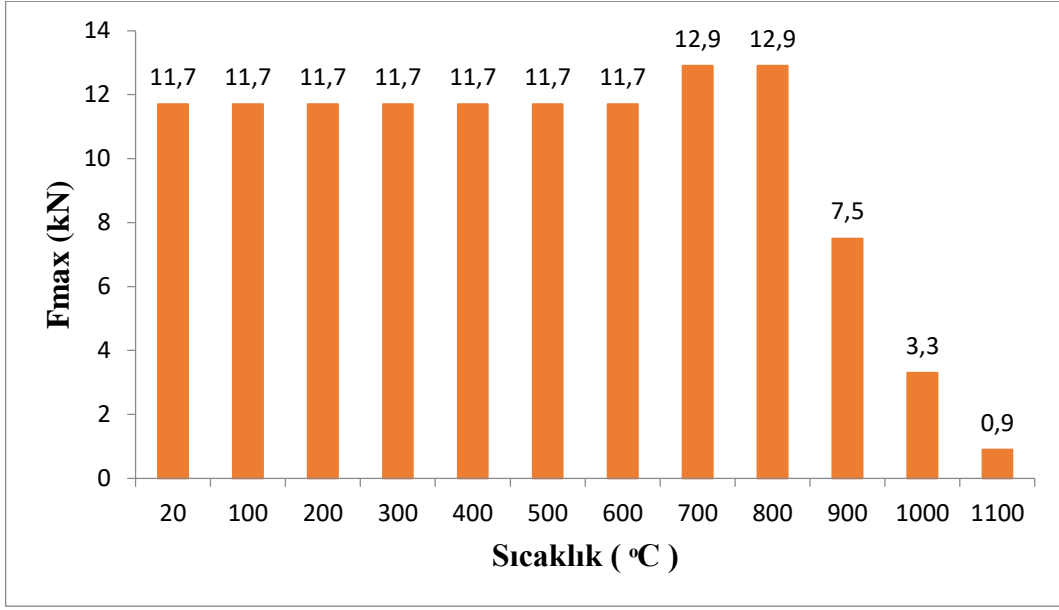


**Şekil 86.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 87’de grafik olarak verilmiştir.

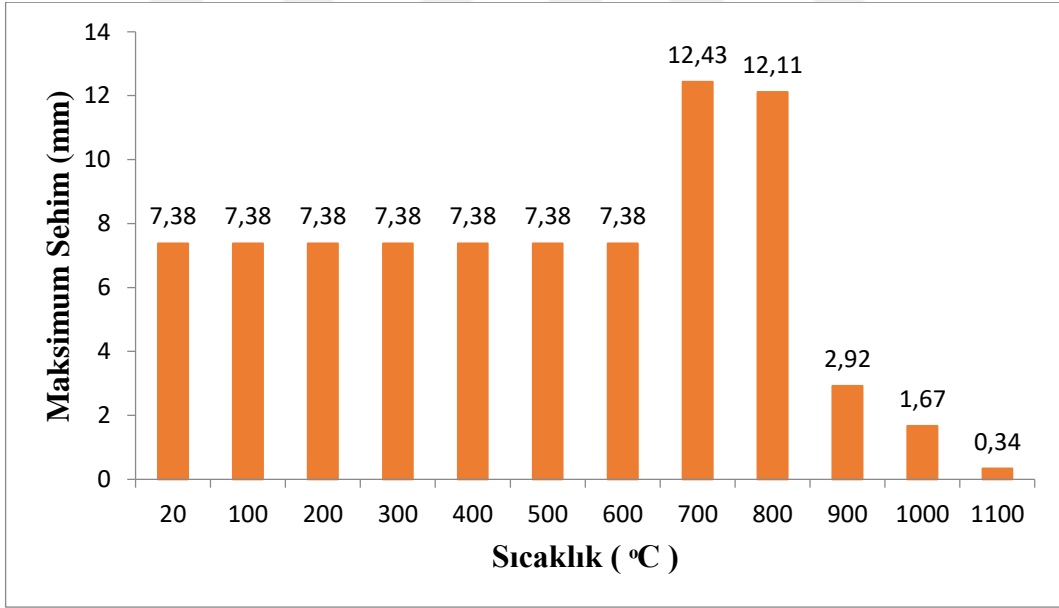


**Şekil 87.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin yük-sehim grafiği



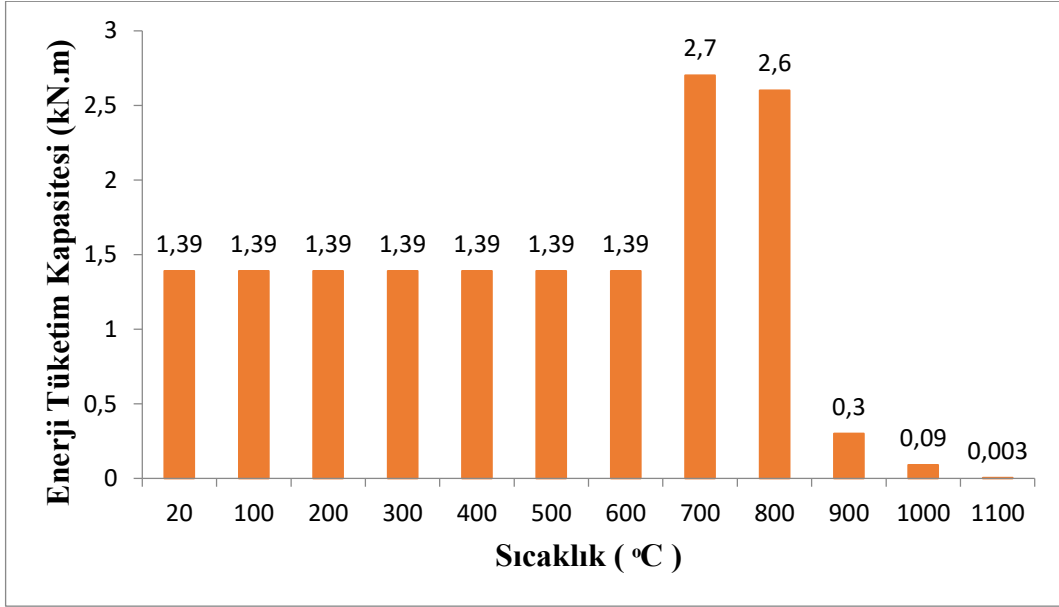
**Şekil 88.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinin taşıdığı maksimum yük değerleri

Kiriş numuneleri arasında maksimum yük ISO yangın eğrisine göre ortam sıcaklığının 700-800°C sıcaklığa maruz kalan kiriş tarafından taşınmıştır. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan kiriş, taşıma kapasitesine ulaştığı anda meydana gelen sehim miktarı aşağıda verilmiştir.



**Şekil 89.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinde meydana gelen maksimum sehım değerleri

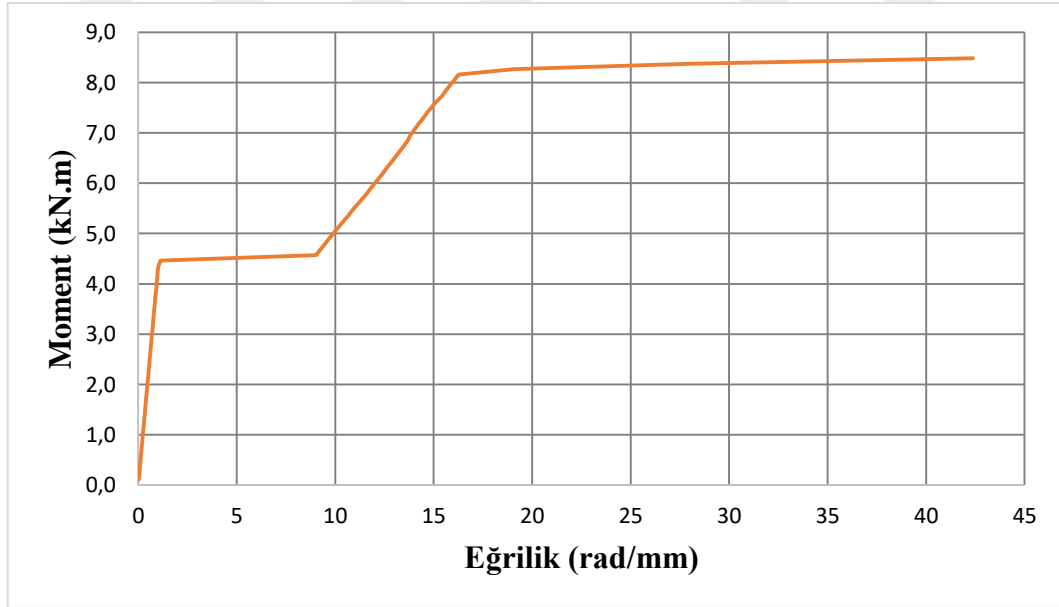
Bu eğrilerin altındaki alan ile enerji tüketim kapasitesi hesaplanabilmektedir. Şekil 90'da farklı sıcaklıklara maruz kalan kirişlere ait enerji tüketim kapasiteleri (ETK) belirtilmiştir.



**Şekil 90.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinin enerji tüketim kapasiteleri

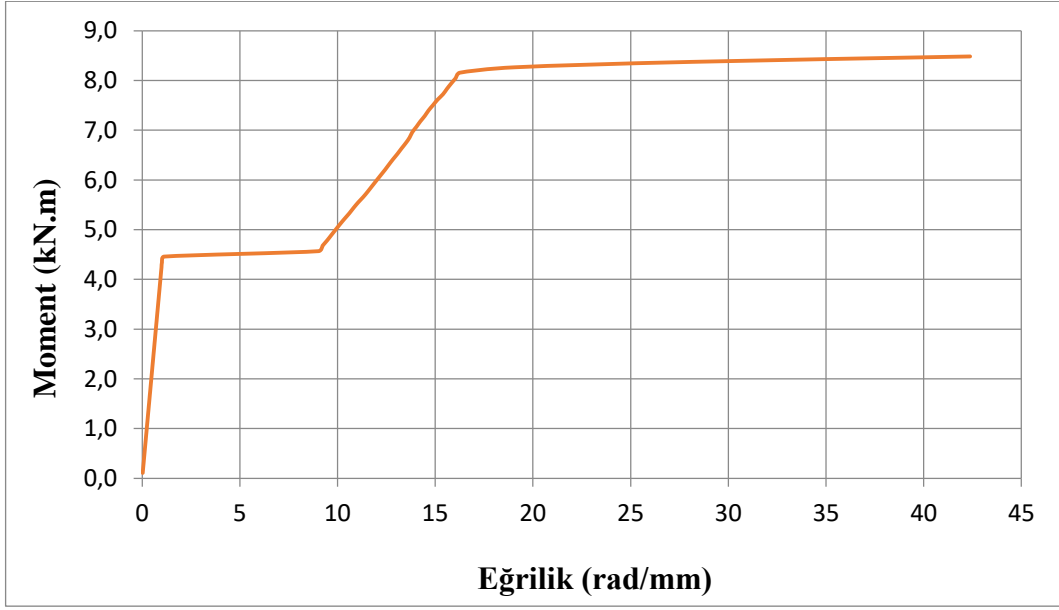
### Eğilme kirişinin moment-eğrilik grafikleri

Farklı sıcaklıklardaki eğilme kirişinin moment-eğrilik grafikleri aşağıda verilmiştir. Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerindeki veriler yardımıyla 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 91’de verilmiştir.



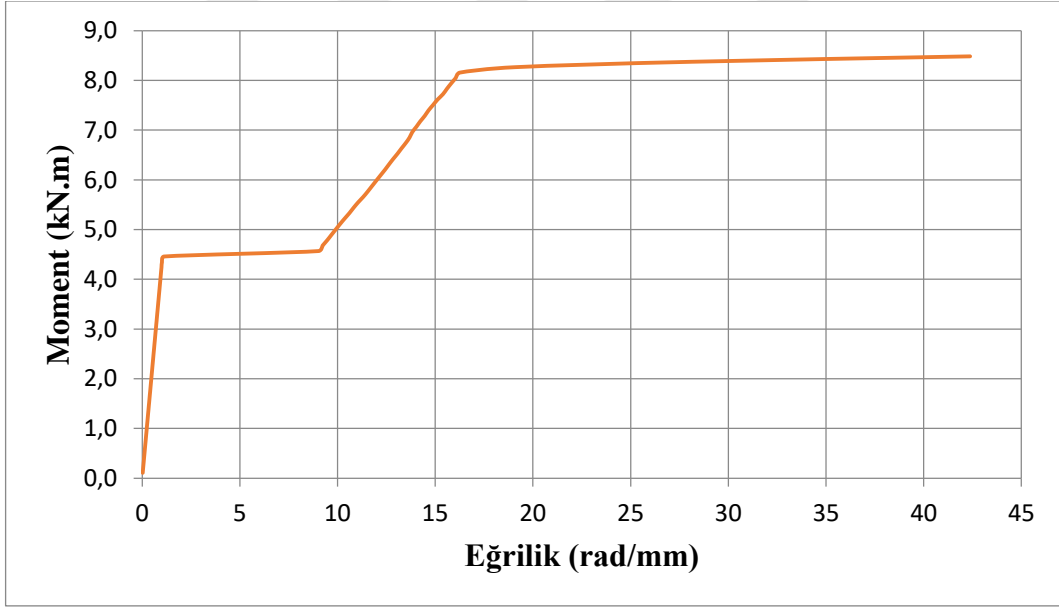
**Şekil 91.** 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 92’de verilmiştir.



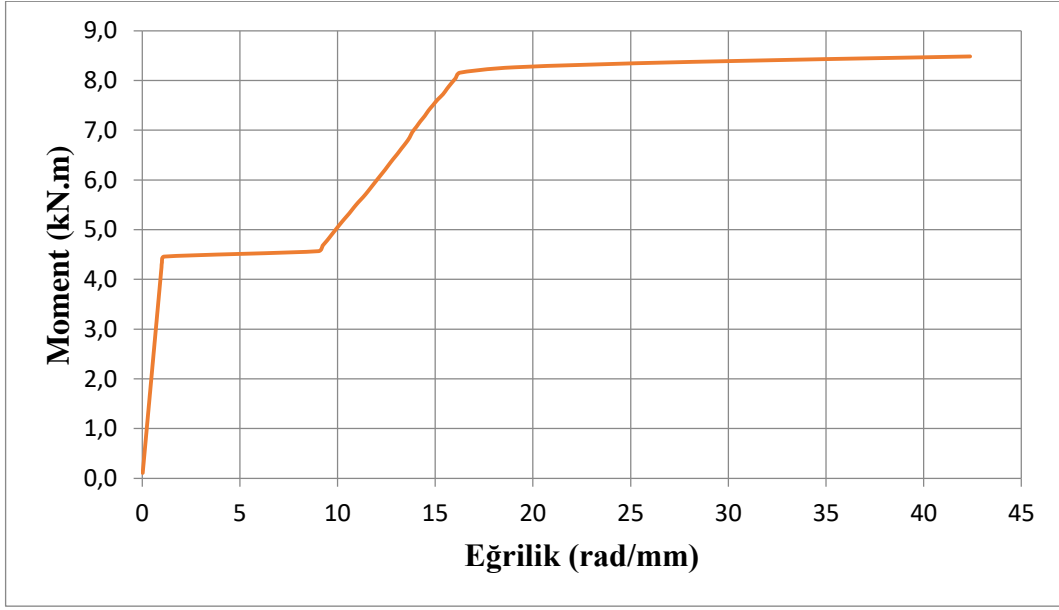
**Şekil 92.** 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 93’de verilmiştir.



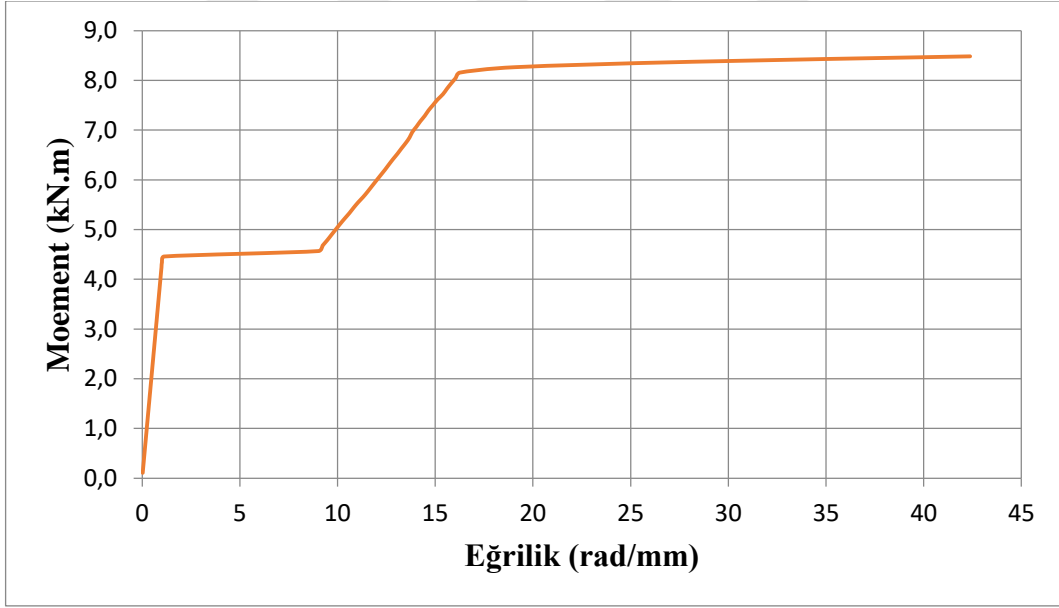
**Şekil 93.** 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 94’de verilmiştir.



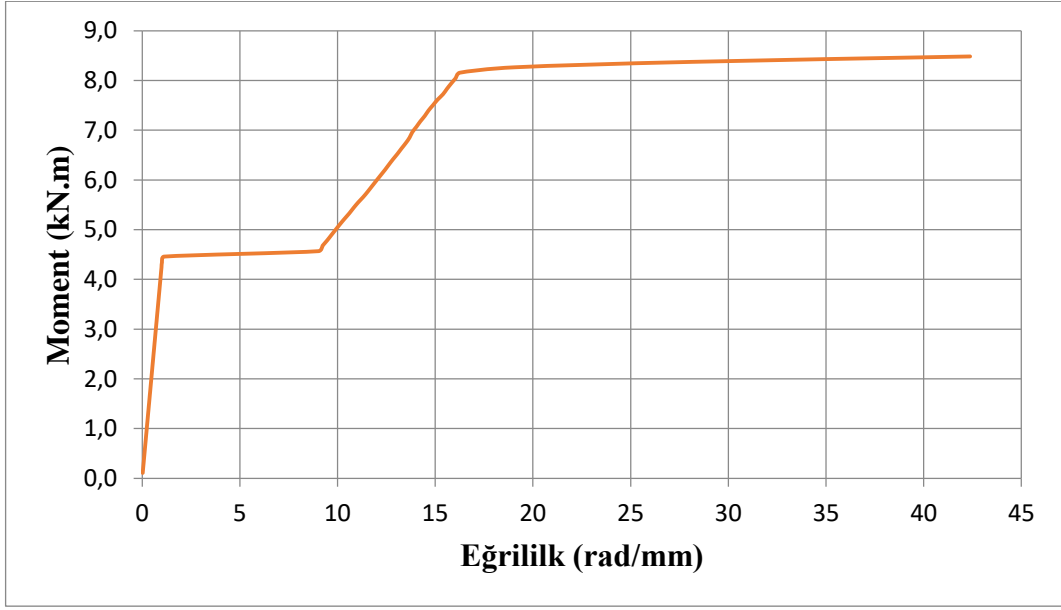
**Şekil 94.** 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 95’de verilmiştir.



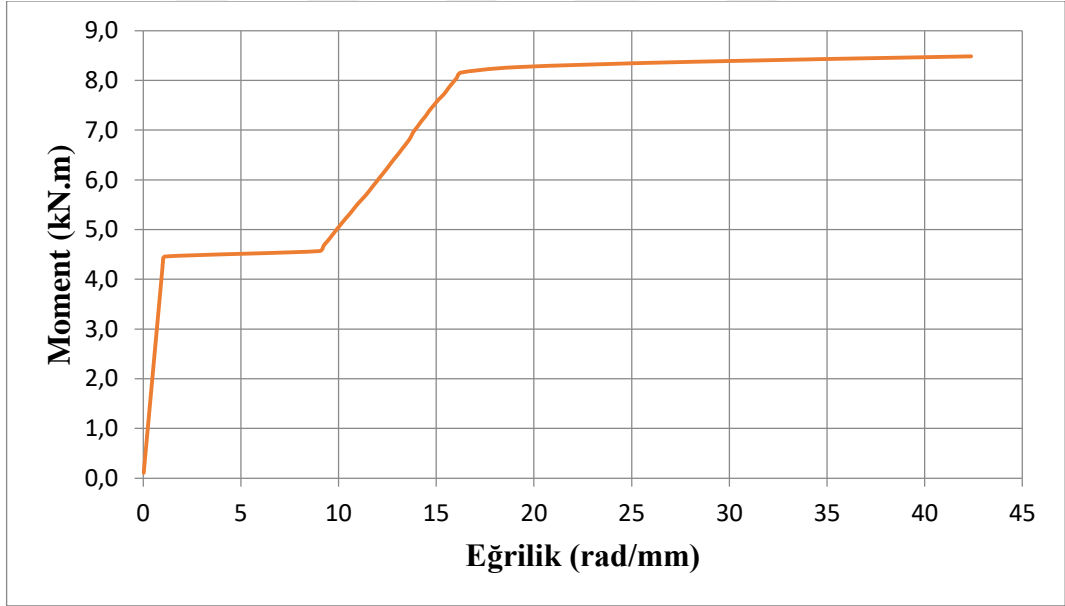
**Şekil 95.** 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 96’da verilmiştir.



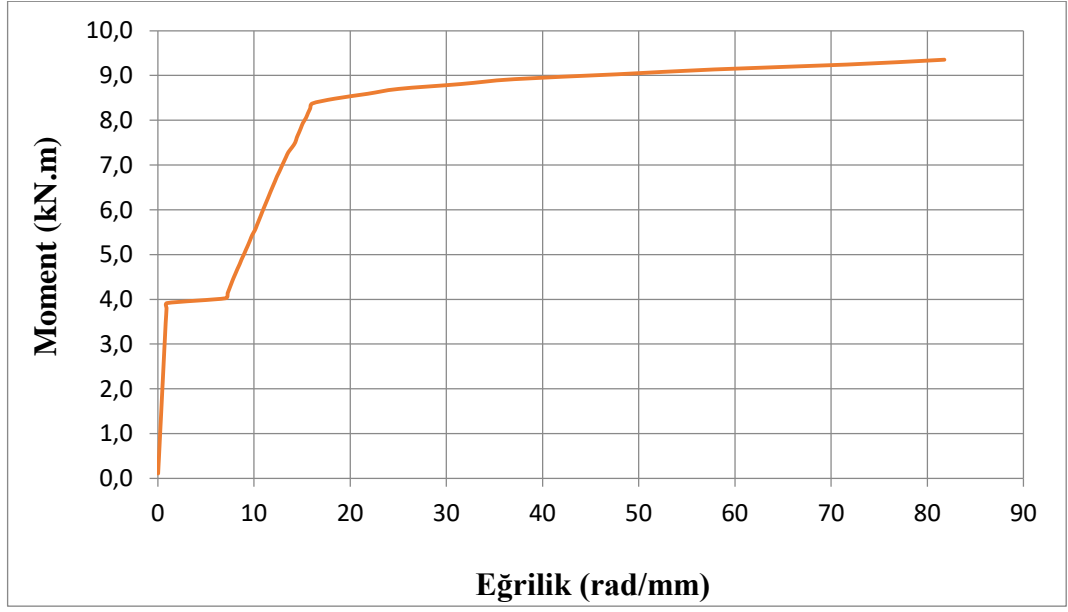
**Şekil 96.** 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 97’de verilmiştir.



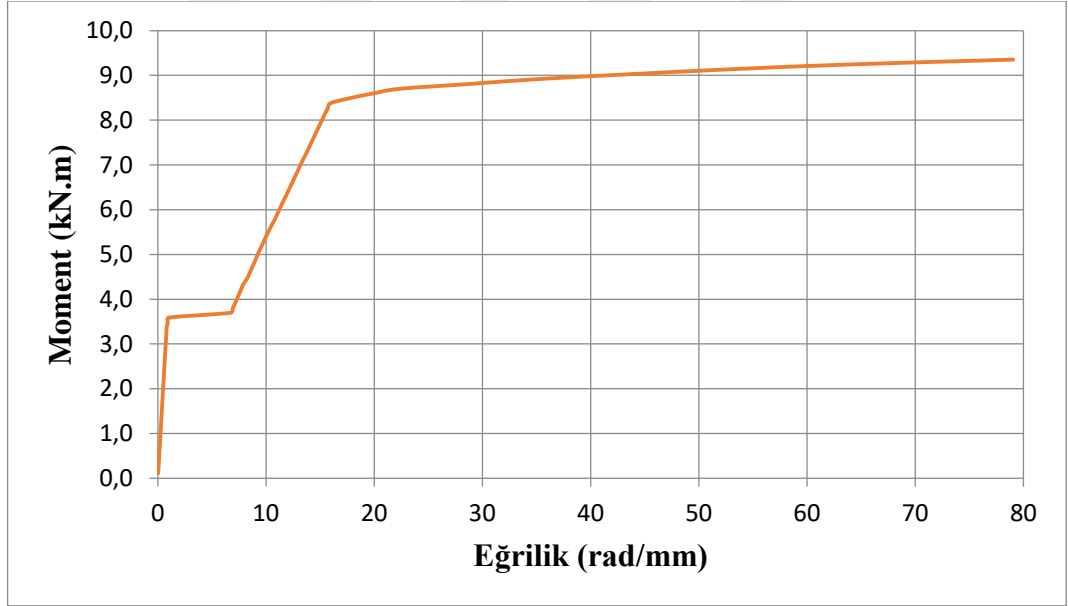
**Şekil 97.** 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 98’de verilmiştir.



**Şekil 98.** 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

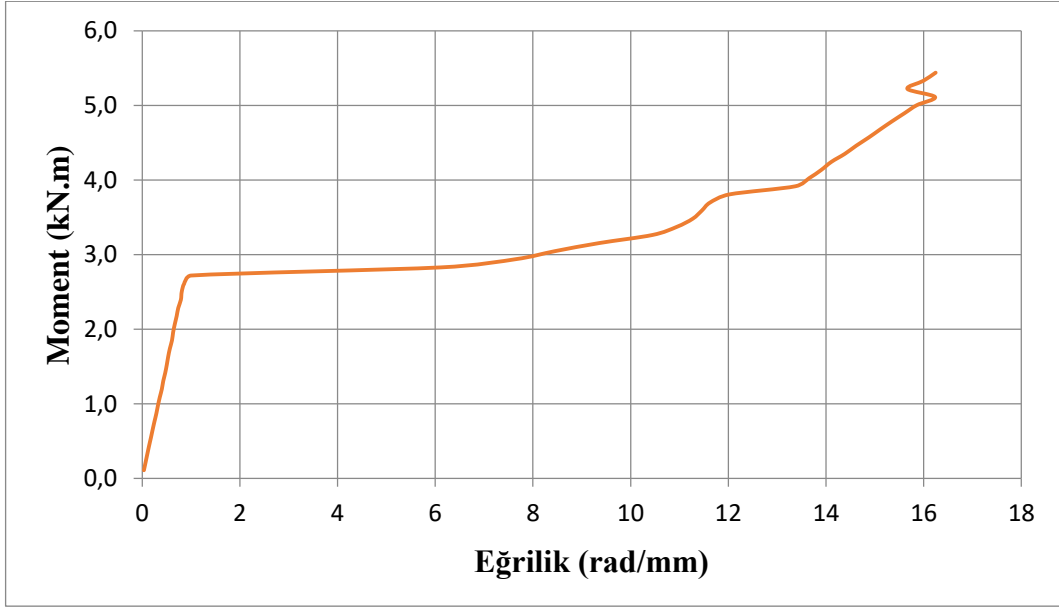
Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 99’da verilmiştir.



**Şekil 99.** 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 100’de verilmiştir.





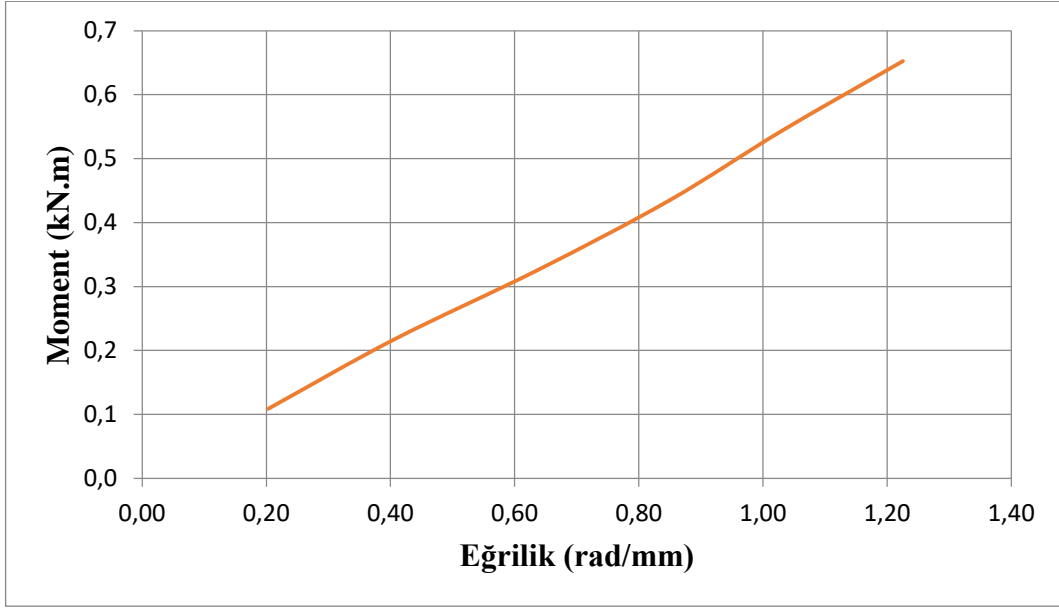
**Şekil 100.** 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 101’de verilmiştir.



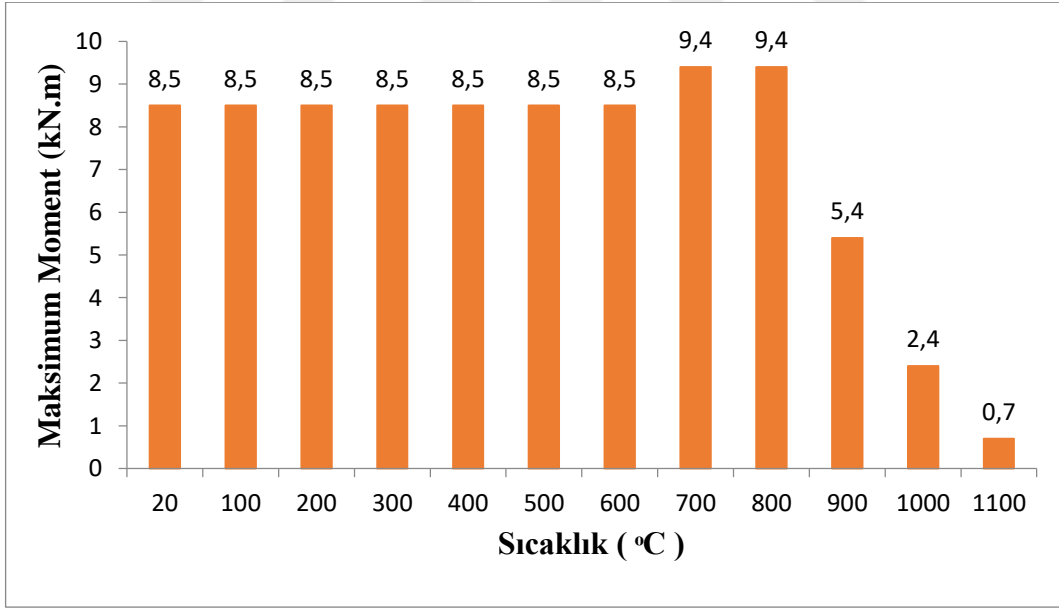
**Şekil 101.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 102’de verilmiştir.



**Şekil 102.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin moment-eğrilik grafiği

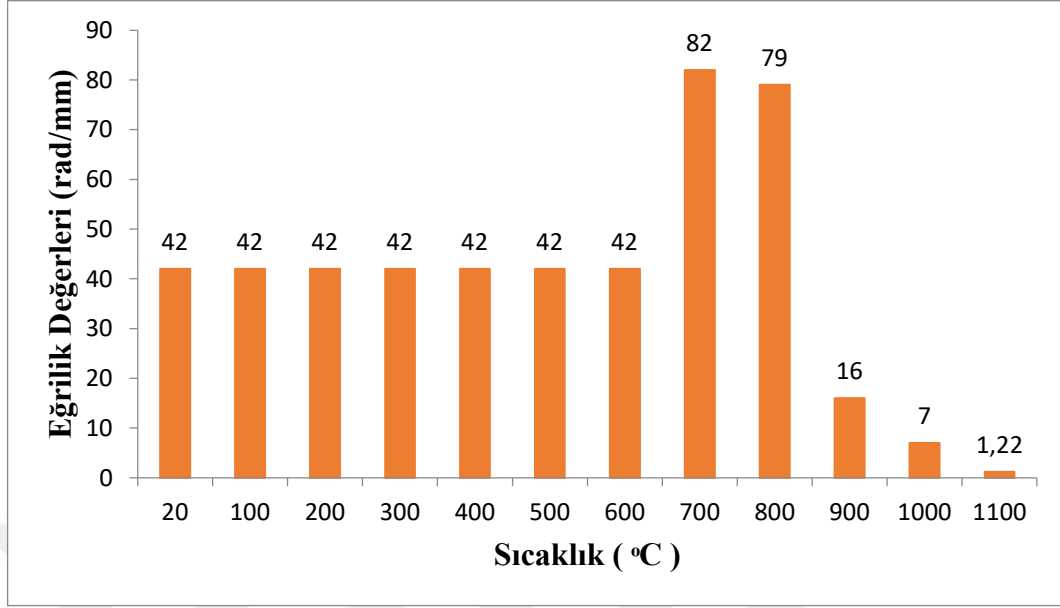
Kirişlerin hepsi farklı sıcaklıklara maruz kaldıklarından farklı değerlerde yatay duruma geçmiştir. Yatay duruma gelen momentlerin bu değeri eğilmeye bağlı çatlakların belirginleşmeye başladığı ana denk gelmiştir. Tüm eğilme grubu kirişlerin alt donatı sayıları ve türü aynı olduğundan, tüm kirişler eğilmeye karşı benzer etki göstermiştir.



**Şekil 103.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinde meydana gelen maksimum moment değerleri

Şekil 103'te görüldüğü üzere, numuneler arasında 700°C ve 800°C sıcaklığa maruz kalan kirişler maksimum moment değerine ulaşılmıştır. Kirişlerin iç sıcaklığı 150°C'ye ulaşana kadar maksimum moment değerleri sabit kalmış olup, 150°C-250°C'ye ulaştıkları zaman bir süre dayanım arttırdıkları için maksimum moment değerlerinde artış

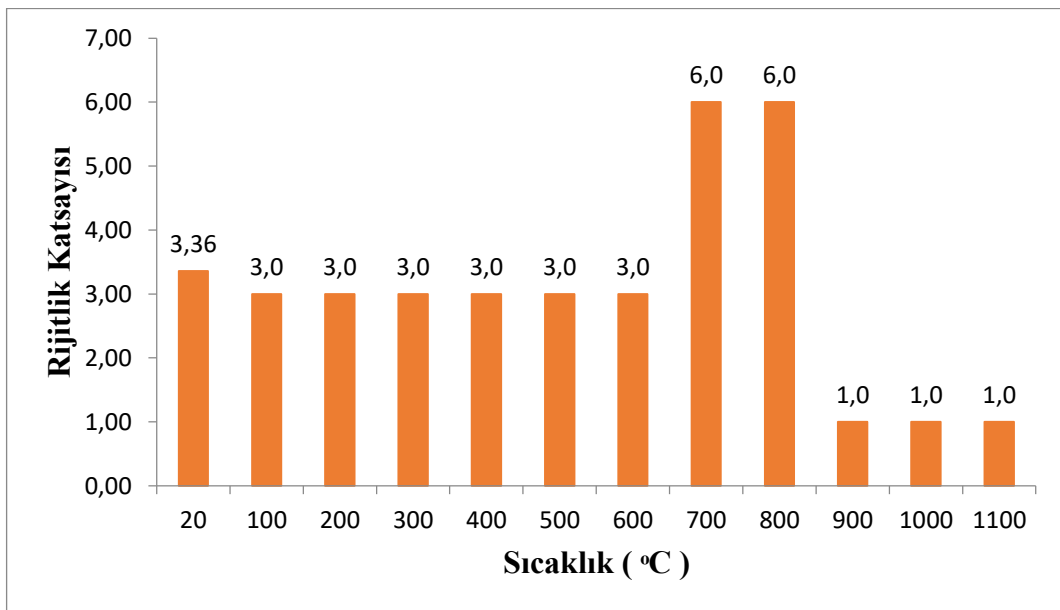
gerçekleştirmişler. İç sıcaklıkları 300°C'nin üzerine çıktığı zaman ise maksimum moment değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.



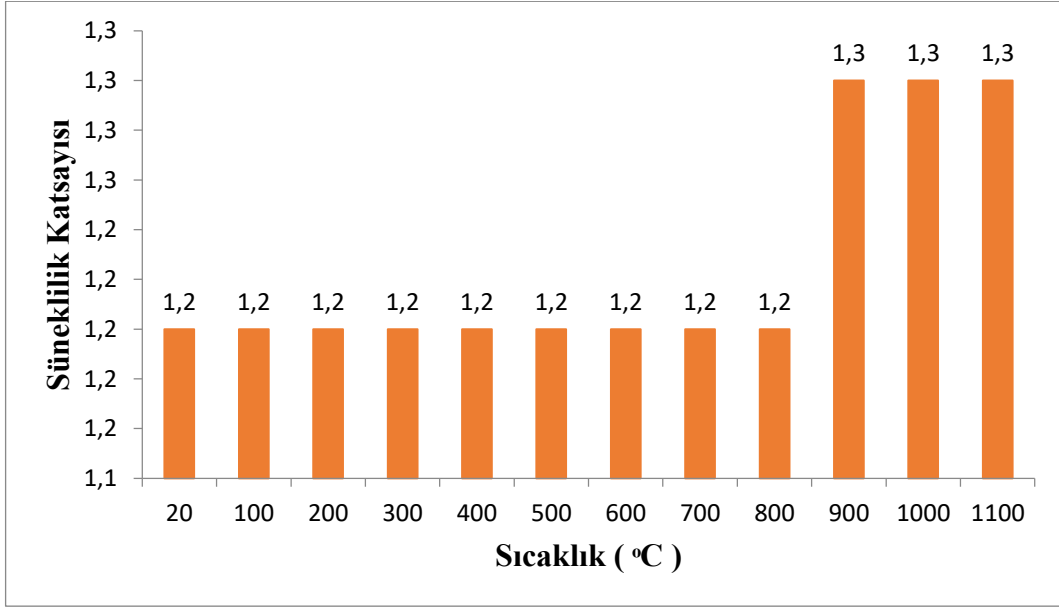
**Şekil 104.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerinde meydana gelen maksimum moment anındaki eğrilik değerleri

#### Eğilme kirişinin rijitlik-süneklik katsayıları

Literatürde verilenlere göre, akma noktası için maksimum yük değerinin %75'indeki, göçme noktası için ise maksimum yük değerinin %85'indeki eğrilik ve yer değiştirme hesaplarında kullanılmıştır. Süneklik, göçme noktasındaki yer değiştirmenin akma noktasındaki yer değiştirmeye oranıyla hesaplanır. Rijitlik ise yükleme geçmişinde elde edilen en büyük eğrilik değerinin, akma noktasındaki eğrilik değerine bölünmesiyle hesaplanır. (Özkal, 2012)



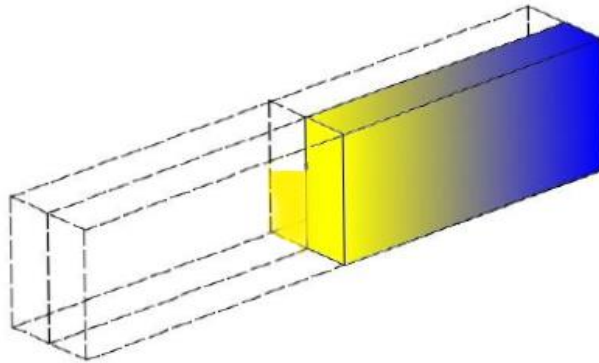
**Şekil 105.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerindeki rijitlik katsayıları



**Şekil 106.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan eğilme kirişlerindeki süneklik katsayıları

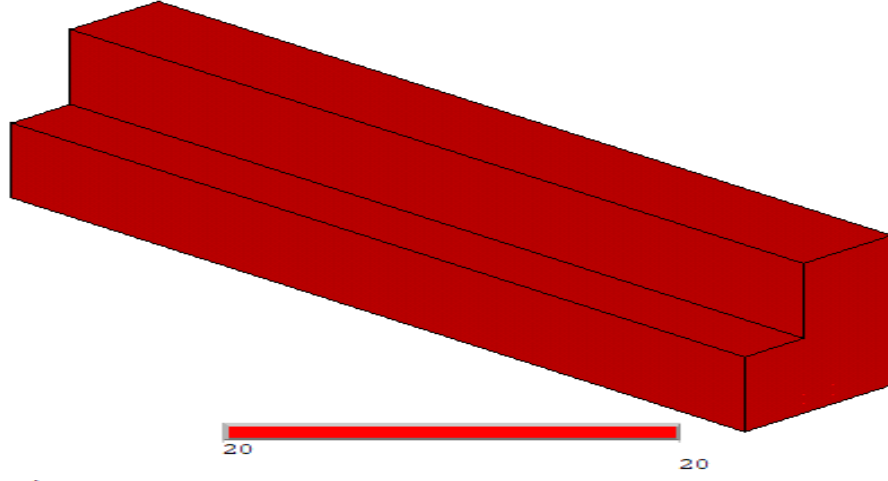
### Eğilme kirişi betonunun ısı profilleri

Ortamdaki yangın sıcaklığına maruz kalan betonarme bir yapının, ortam ısısı ile kendi ısısının aynı olması mümkün değildir. Beton ortamdaki ısıyı az iletmesi nedeniyle yavaş yavaş almaktadır. Eğilme grubu kirişlerin farklı sıcaklıklardaki ISO yangın eğrisine göre verilen ortam sıcaklıkları ve kirişin ulaştığı maksimum sıcaklık değerlerinin aynı olmadığı bilindiğinden her ortam sıcaklığı için iç yüzey sıcaklığının ısı profili Şekil 107'deki gibi betonun iç yüzeyinden kesit alınarak aşağıda verilmiştir. Sonuçların kirişin her yüzey sıcaklığının aynı olmaması ve ortam sıcaklığına karşı yüzeyinin ulaştığı maksimum sıcaklık değerleri göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.



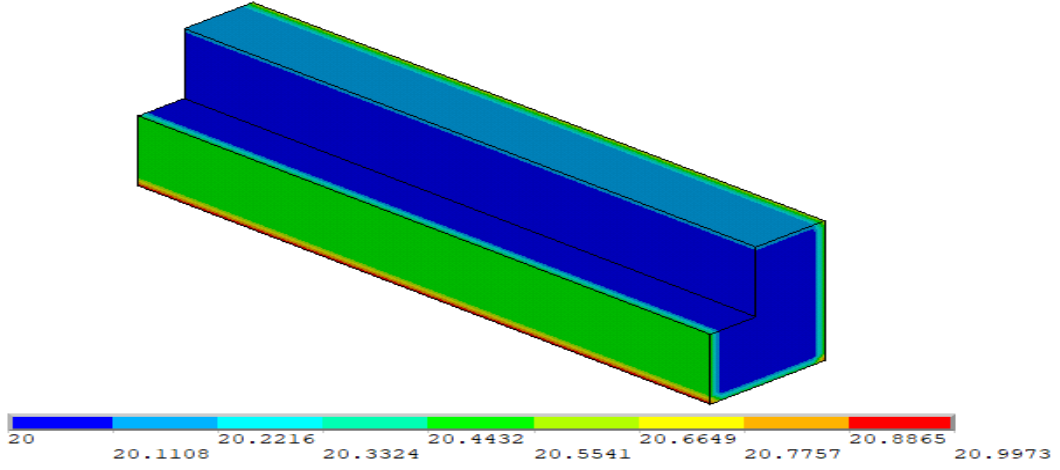
**Şekil 107.** Betonun ısı profili için kesit alma şekli temsili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 108'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 20°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin tüm yüzeyindeki sıcaklık değeri 20°C olmuştur.



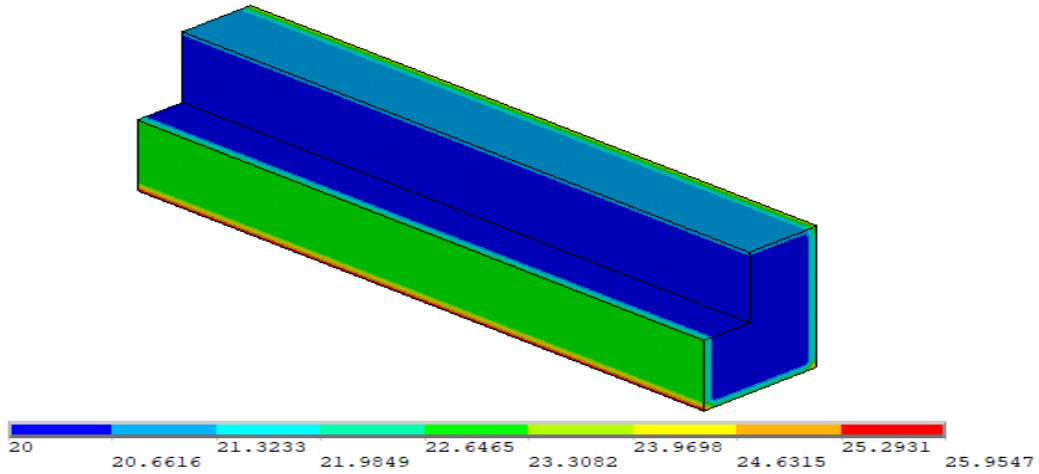
**Şekil 108.** 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 109'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 100°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 20,9973°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 20,3324°C'de seyretmektedir.



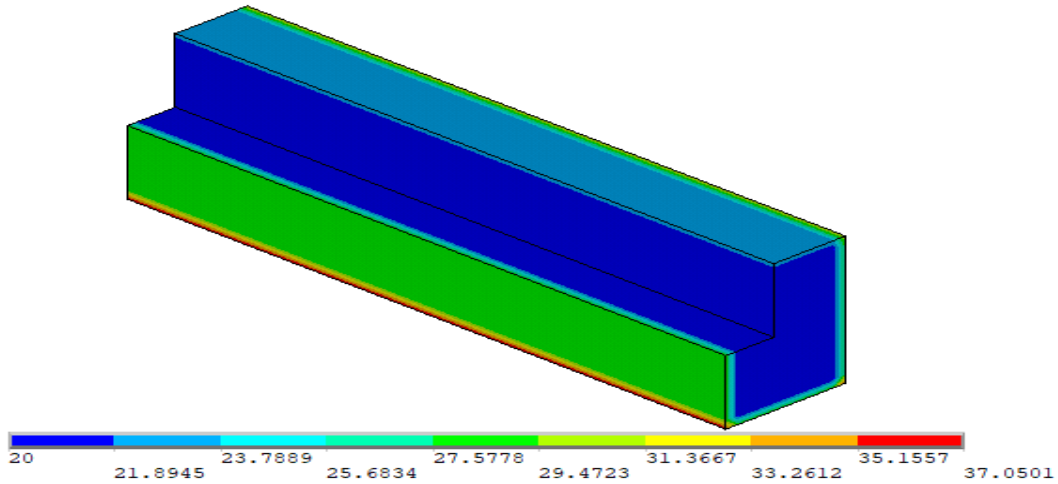
**Şekil 109.** 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 110'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 200°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 25,9547°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 21,9849°C'de seyretmektedir.



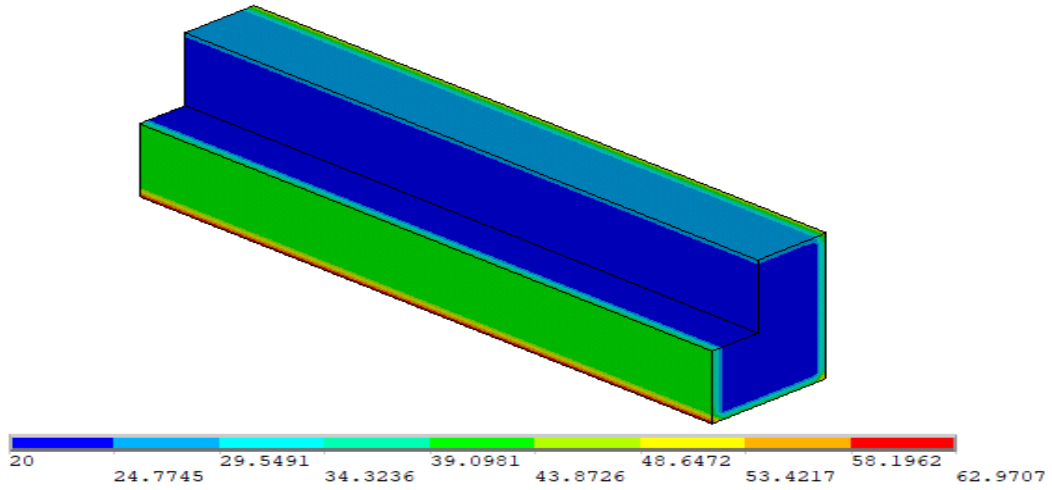
**Şekil 110.** 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 111'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 300°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 37,0501°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 25,6834°C'de seyretmektedir.



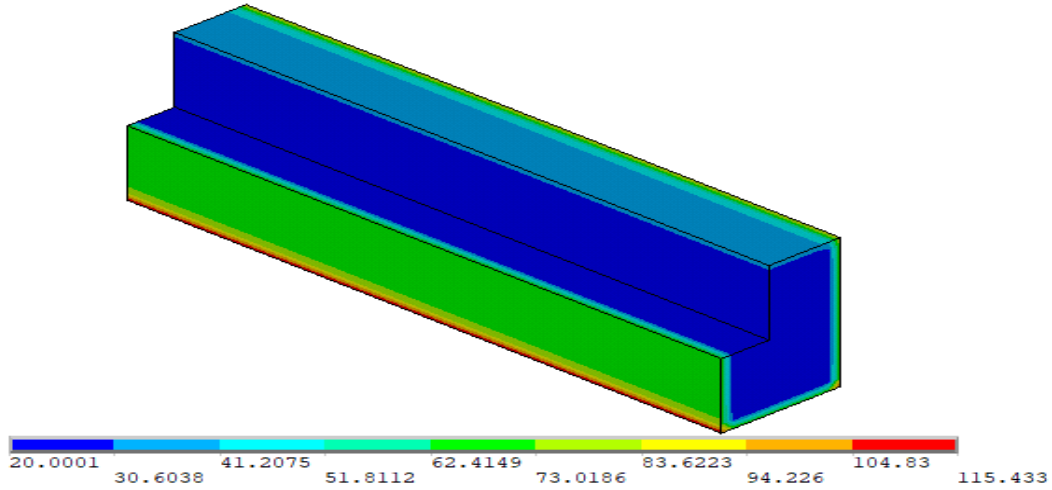
**Şekil 111.** 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 112'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 400°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 62,9707°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 34,3236°C'de seyretmektedir.



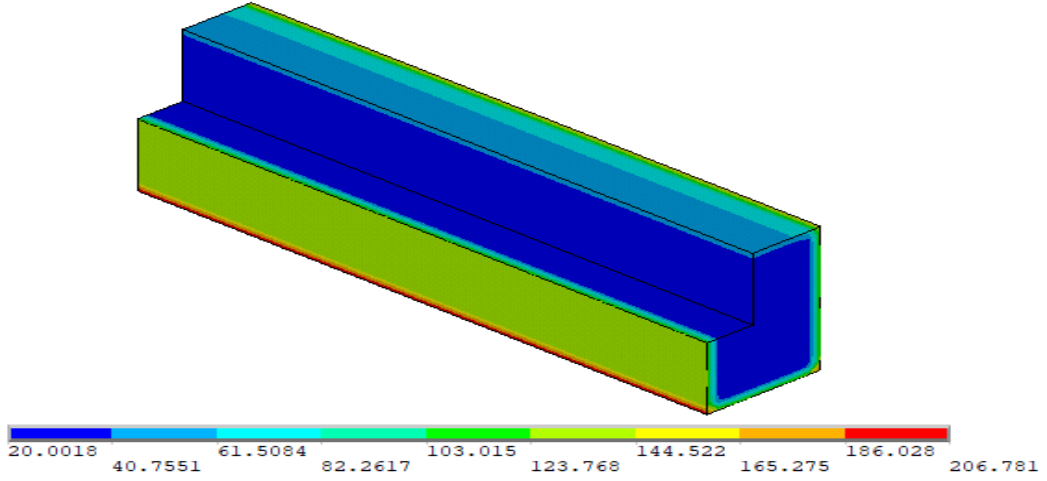
**Şekil 112.** 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 113'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 500°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 115,433°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 51,8112°C'de seyretmektedir.



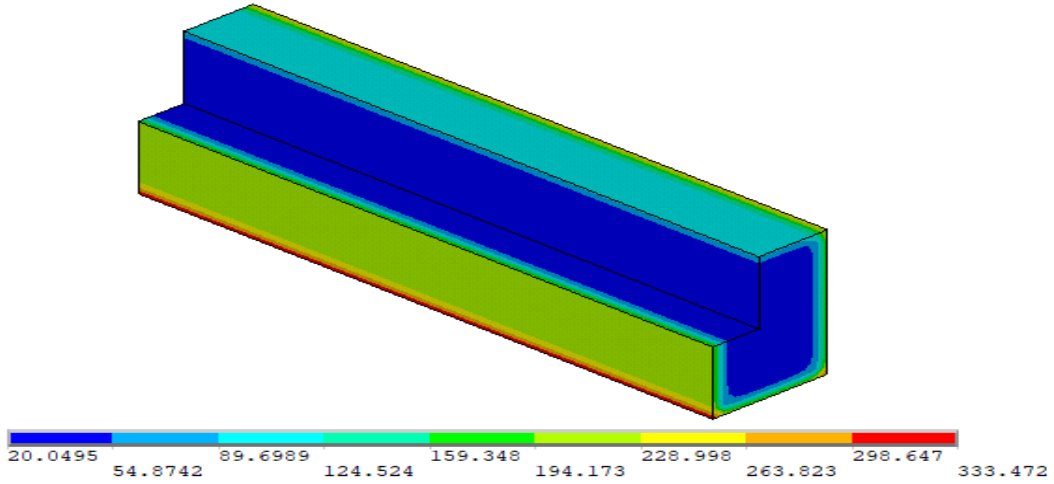
**Şekil 113.** 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 114'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 600°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 206,781°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 82,2617°C'de seyretmektedir.



**Şekil 114.** 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 115'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 700°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 333,472°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 124,524°C'de seyretmektedir.

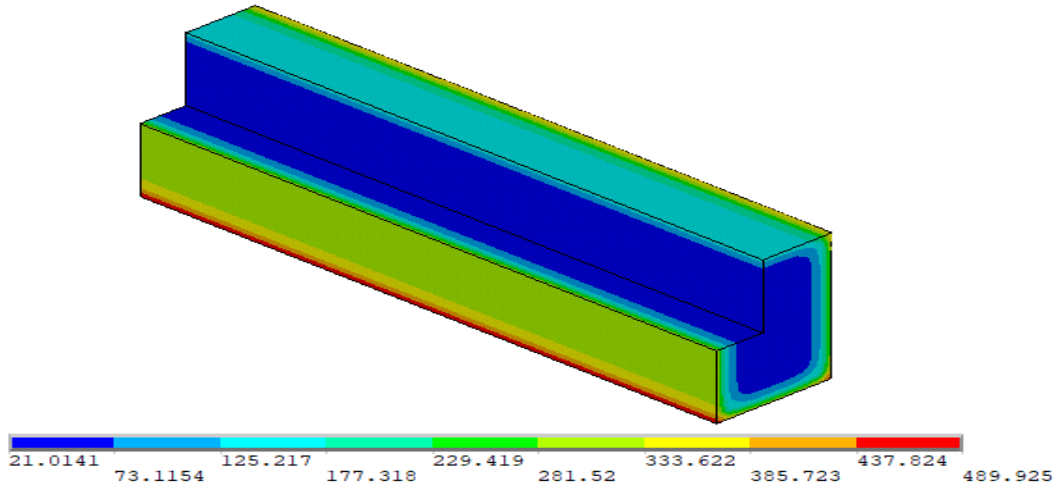


**Şekil 115.** 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 116'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 800°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami

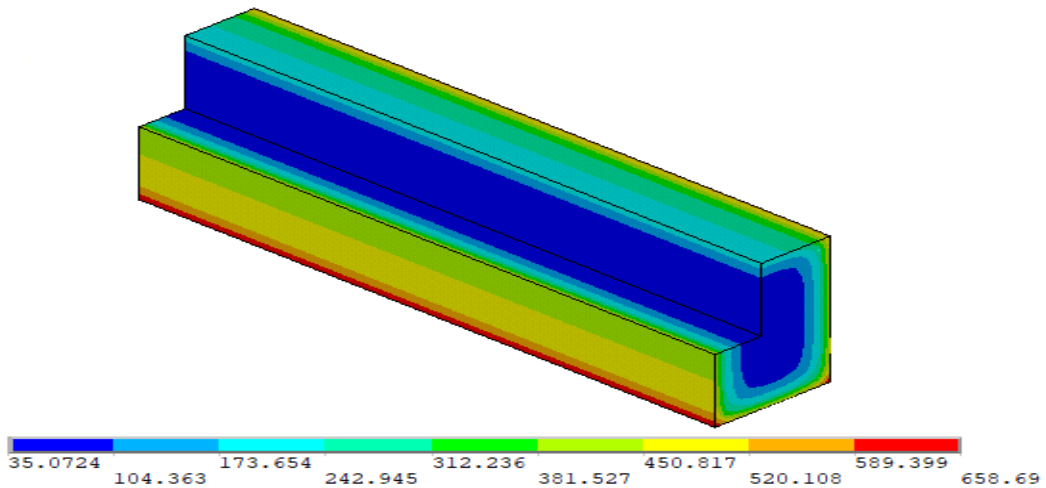


sıcaklık değeri 489,925°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 177,318°C'de seyretmektedir.



**Şekil 116.** 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

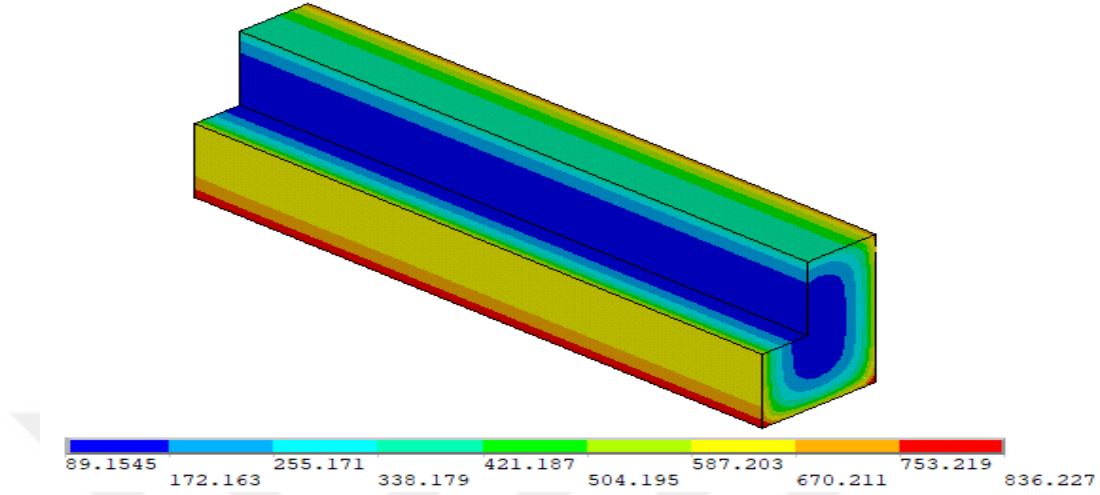
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 117'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 900°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 658,69°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 242,945°C'de seyretmektedir.



**Şekil 117.** 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

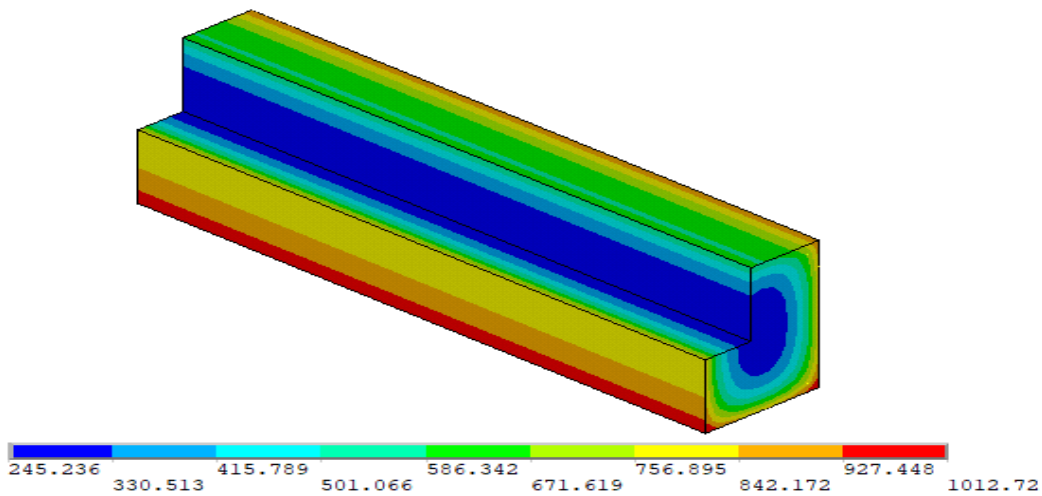
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın

eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 118’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 1000°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 836,227°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 338,179°C’de seyretmektedir.



**Şekil 118.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 10800 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 119’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 1100°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 1012,72°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 501,066°C’de seyretmektedir.



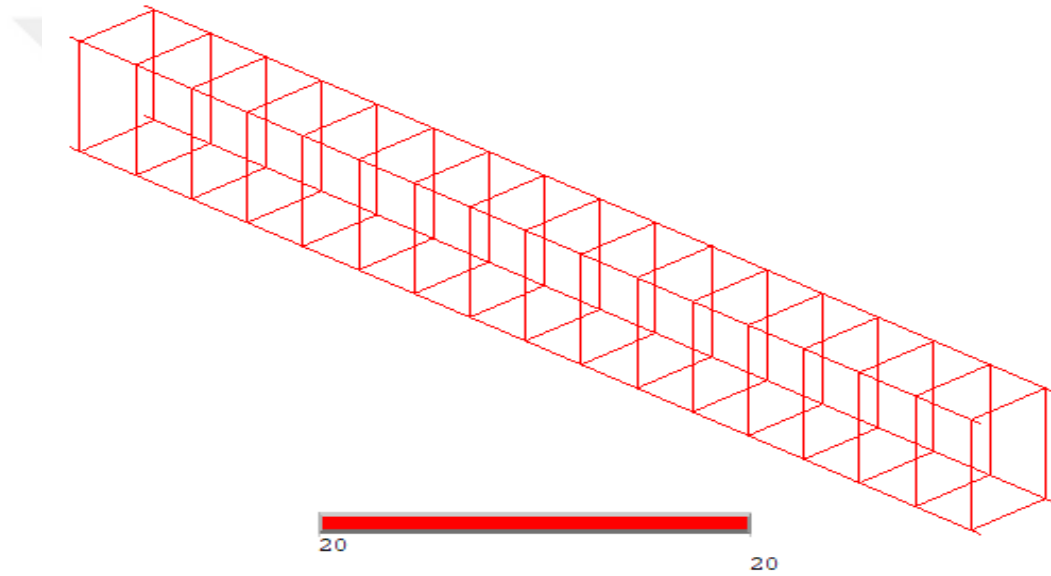
**Şekil 119.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

Görüldüğü üzere her sıcaklık değeri için farklı ısı profilleri oluşmaktadır. Sıcaklık artışı oldukça eğilme kirişinin iç yüzeyinde de sıcaklık artışı olmuştur. Maksimum sıcaklık

değerinin köşe kısımlarında olduğu görülmüştür. Kirişin tepe kısımlarının ısıya direk maruz kalmaması sebebiyle, diğer kısımlara göre daha az sıcaklık artışı olmuştur.

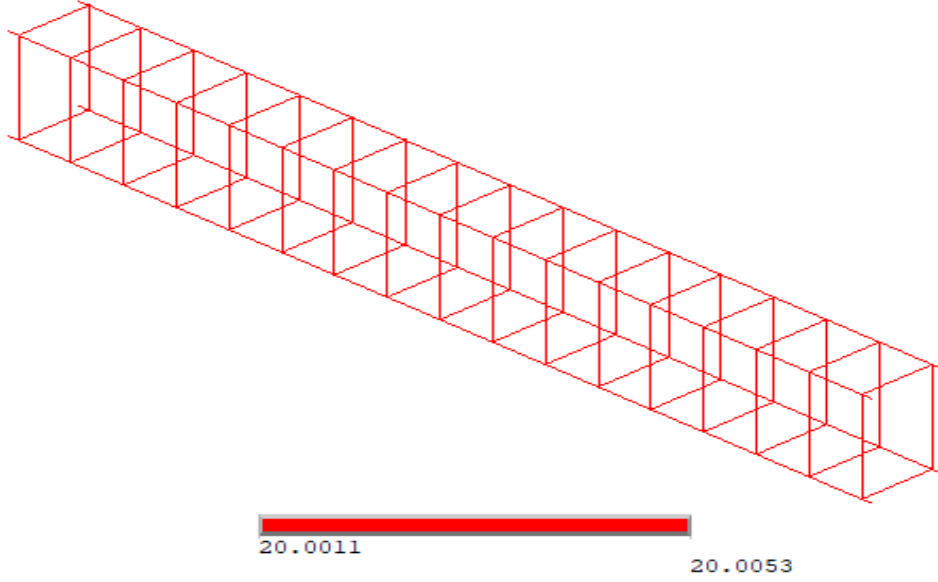
### Eğilme kirişi donatılarının ısı profilleri

Farklı sıcaklıklardaki kirişlerin donatı ısı profili dağılımları aşağıda verilmiştir. Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 120'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 20°C iken kiriş donatılarının tüm yüzeyindeki sıcaklık değeri 20°C olmuştur.



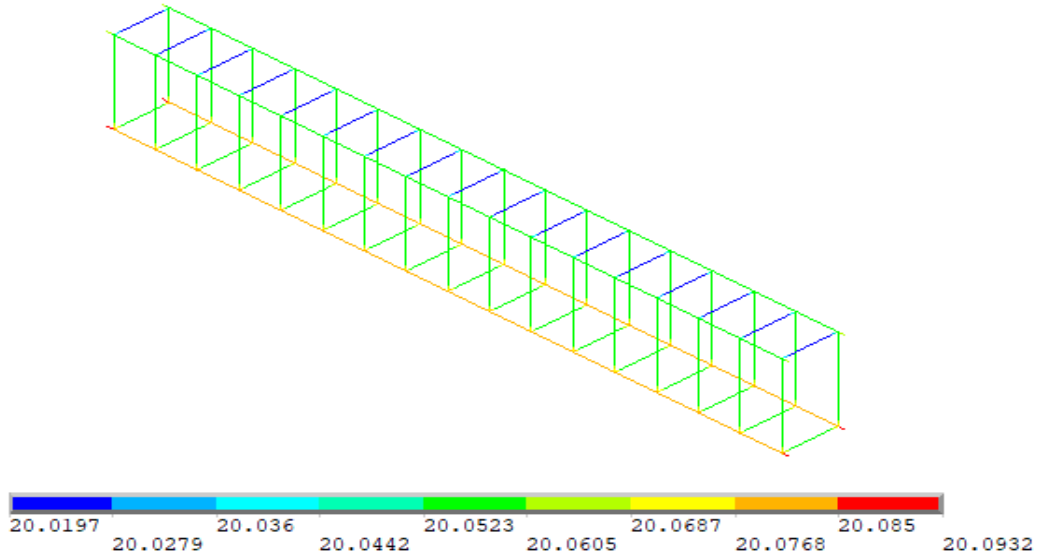
**Şekil 120.** 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 121'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 100°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 20,0053°C olmuştur.



**Şekil 121.** 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

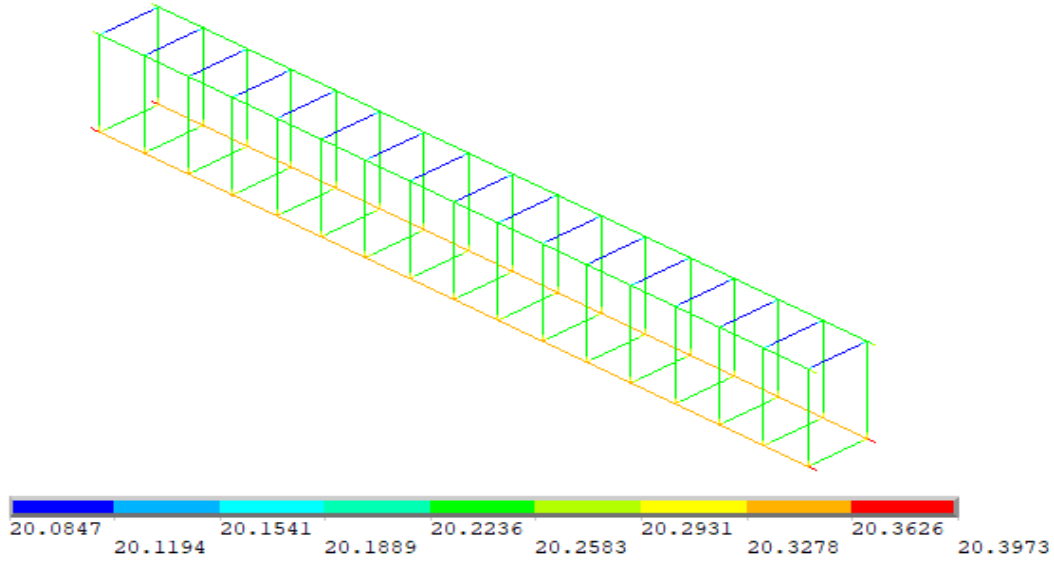
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 122'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 200°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 20,0932°C olmuştur.



**Şekil 122.** 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

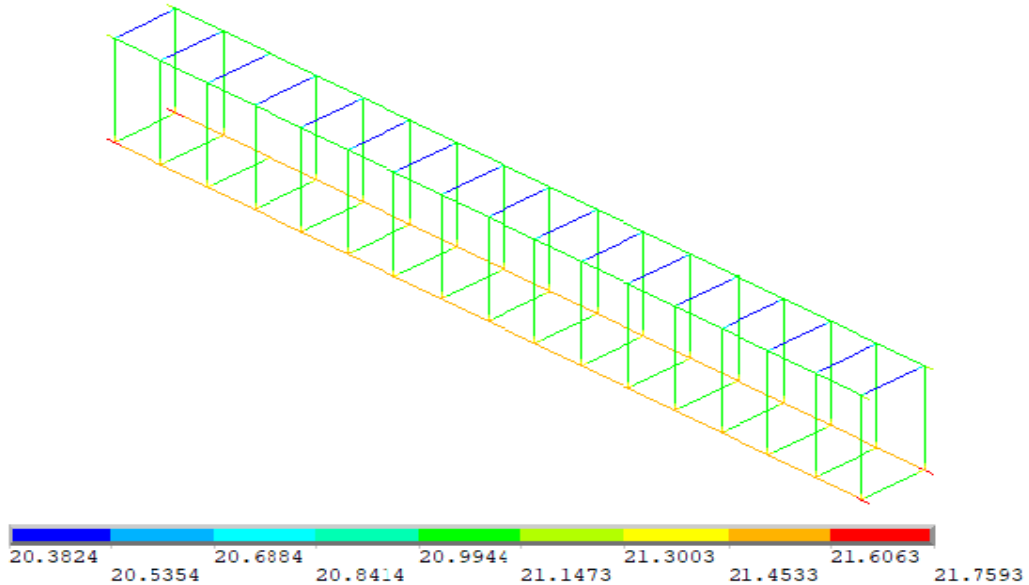
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin

donatılardaki ısı profili Şekil 123'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 300°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 20,3973°C olmuştur.



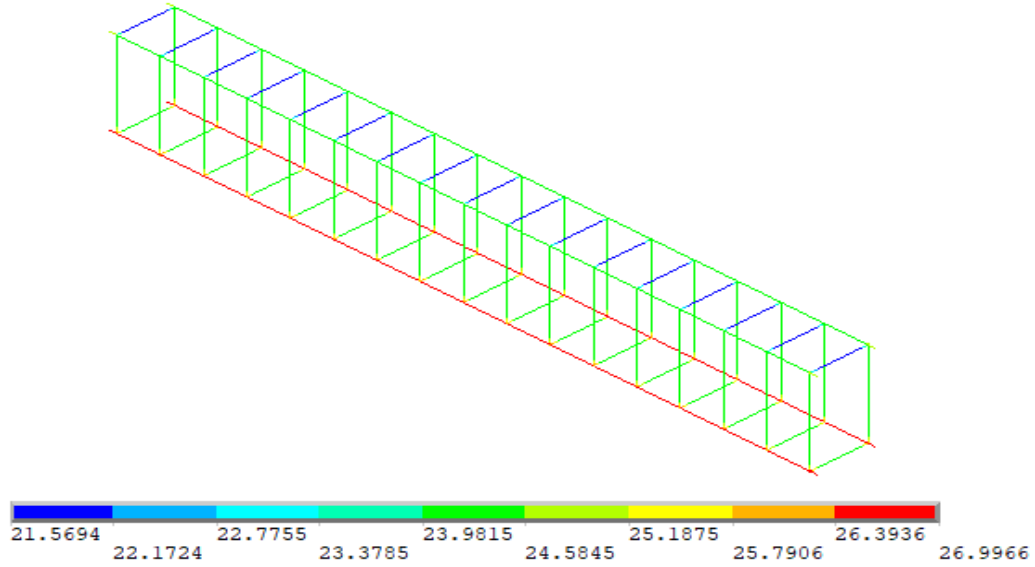
**Şekil 123.** 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 124'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 400°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 21,7593°C olmuştur.



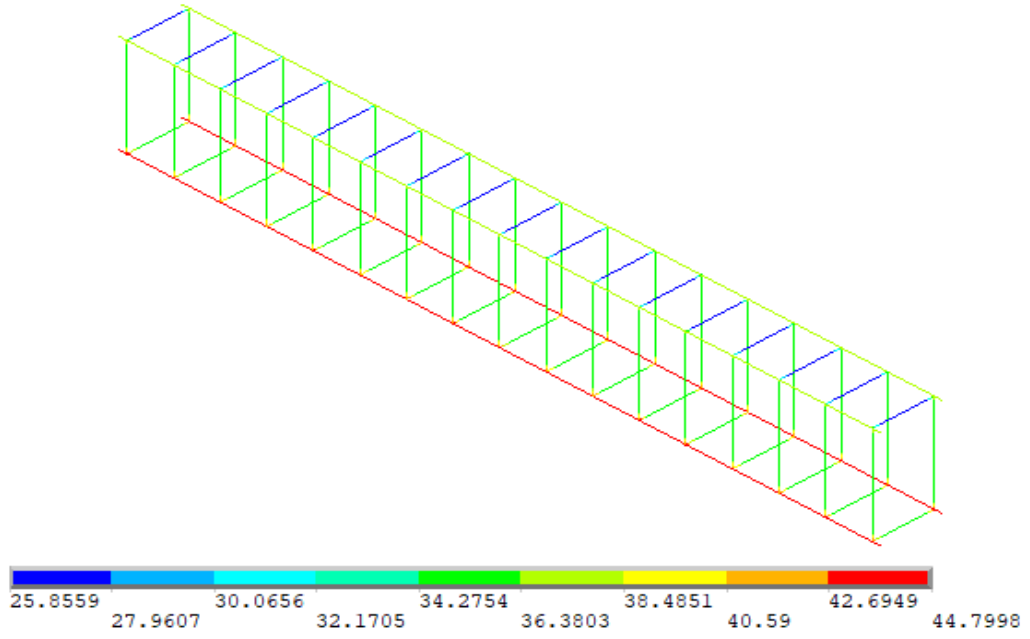
**Şekil 124.** 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 125'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 500°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 26,9966°C olmuştur.



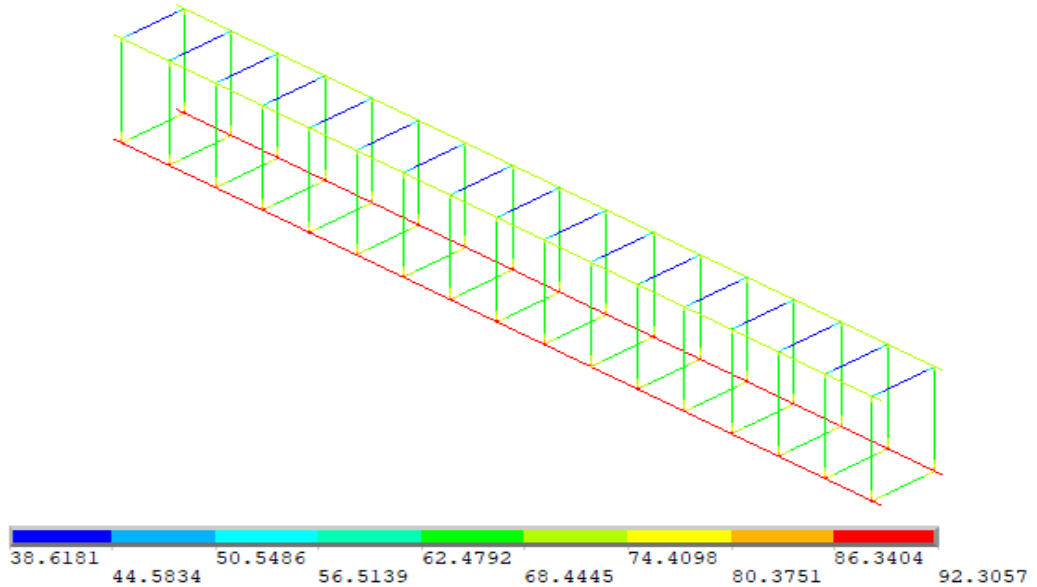
**Şekil 125.** 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 126'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 600°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 44,7998°C olmuştur.



**Şekil 126.** 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

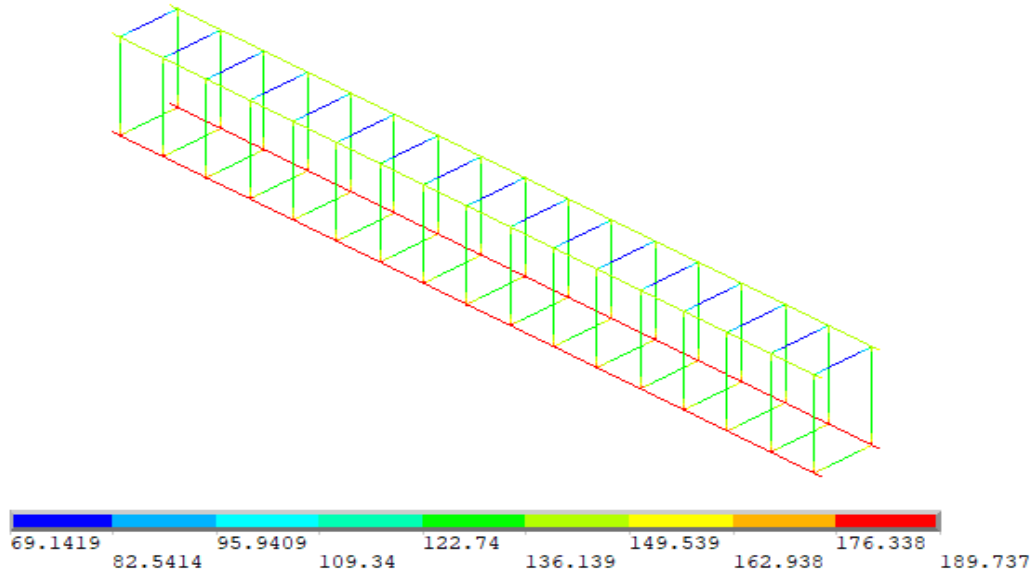
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 127'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 700°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 92,3057°C olmuştur.



**Şekil 127.** 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

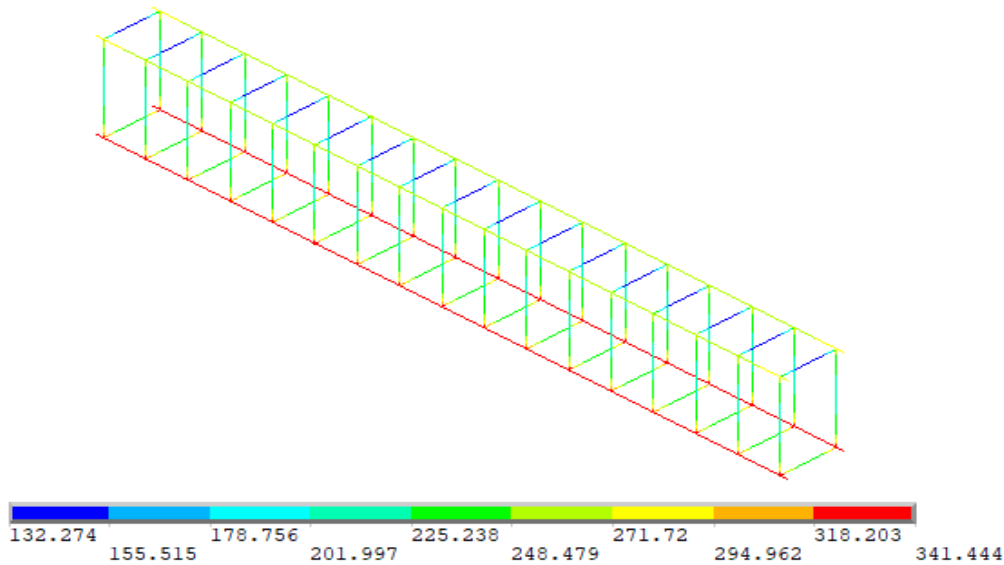
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe

kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 128’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 800°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 189,737°C olmuştur.



**Şekil 128.** 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

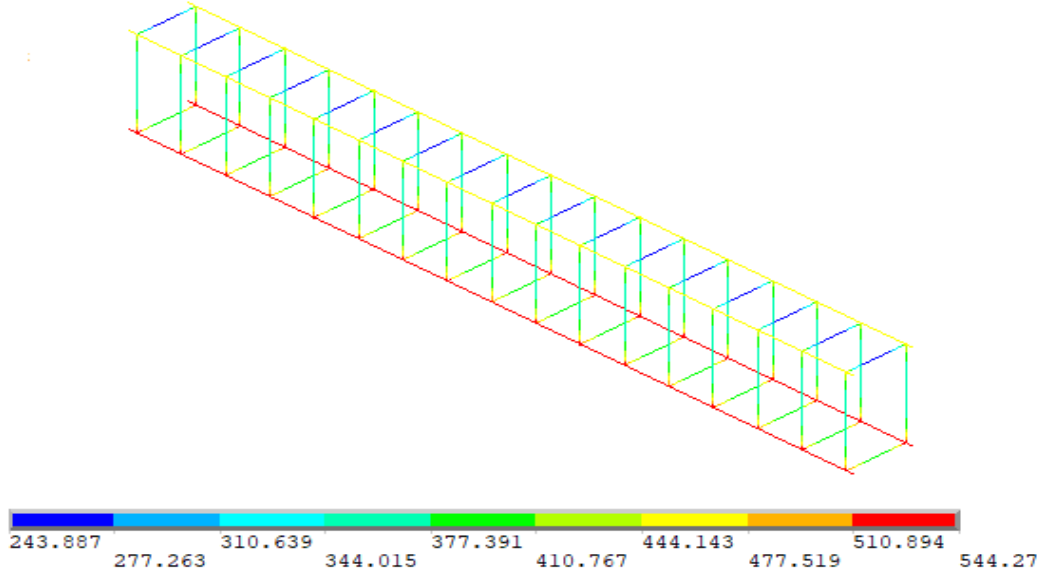
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 129’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 900°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 341,444°C olmuştur.



**Şekil 129.** 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

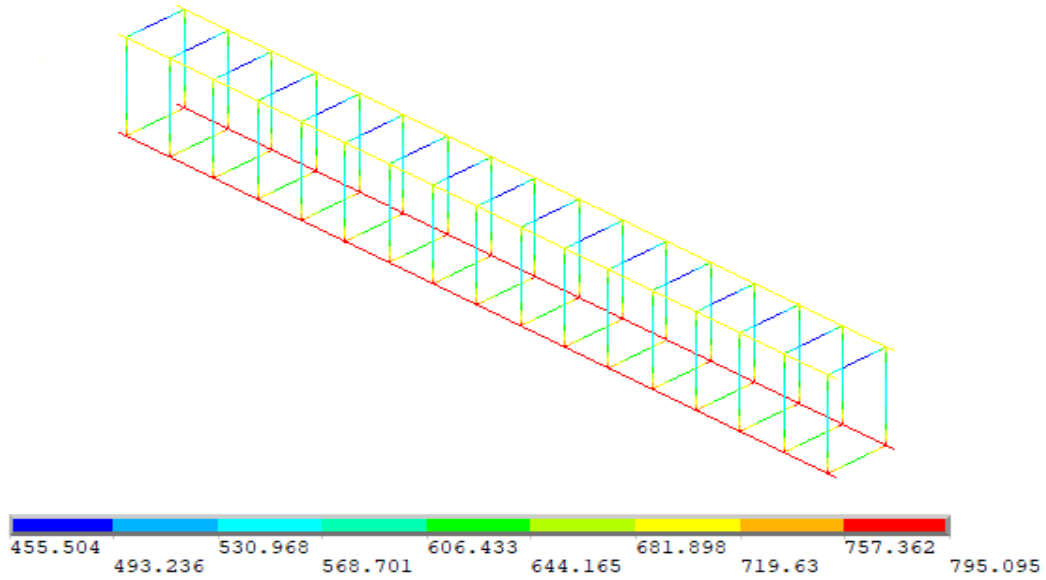


Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 130'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 1000°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 544,27°C olmuştur.



**Şekil 130.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 10800 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 131'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 1100°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 795,095°C olmuştur.

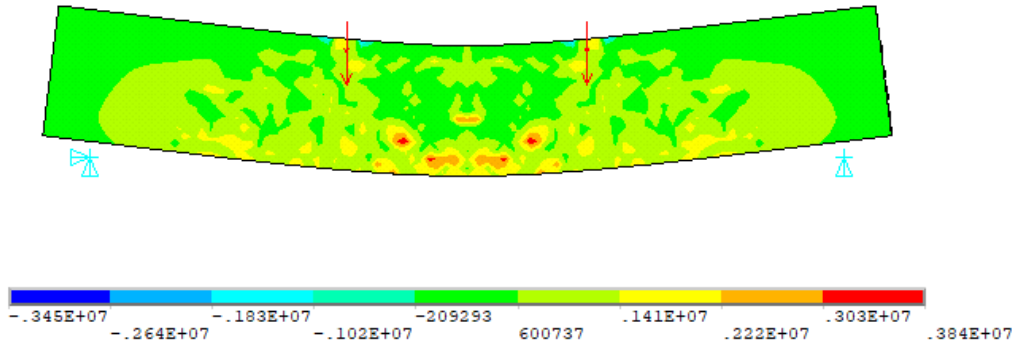


**Şekil 131.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı ısı profili

Görüldüğü üzere her sıcaklık değeri için farklı donatı ısı profilleri oluşmaktadır. Böylece ortam sıcaklığında artışı oldukça eğilme kirişinin donatılarında da sıcaklık artışı olmuştur. Fakat bu sıcaklık artışı betondaki gibi fazla olmamıştır. Donatılardaki maksimum sıcaklık dağılımları tıpkı betondaki gibi köşelerde olmuştur.

#### **Eğilme kirişi betonunun asal çekme gerilmeleri**

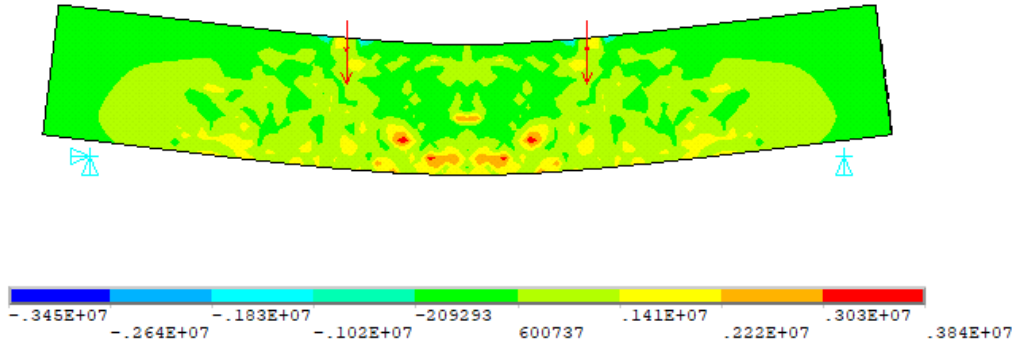
Farklı sıcaklıklardaki kirişlerin asal çekme gerilmeleri aşağıda verilmiştir. ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 132'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 132.** 20°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

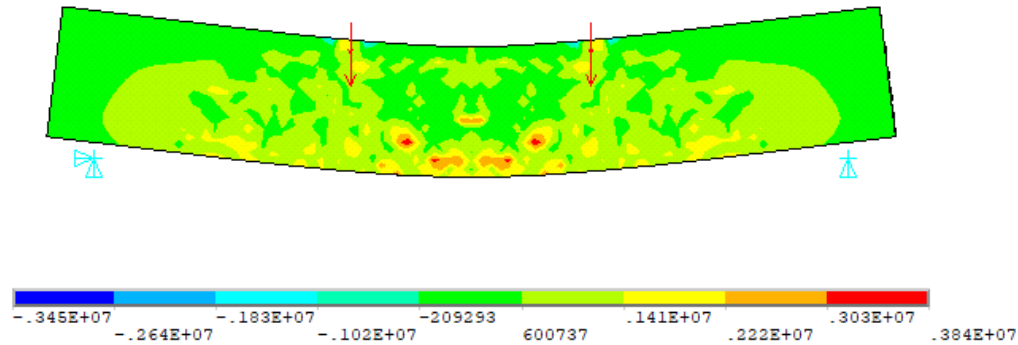
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri

eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 133'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



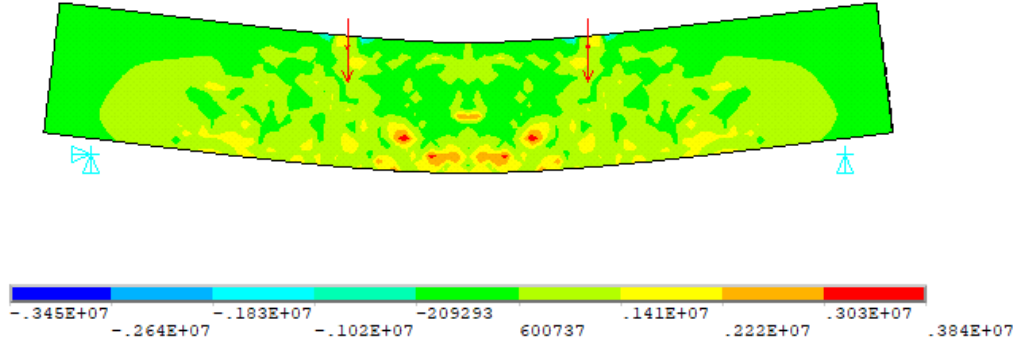
**Şekil 133.** 100°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 134'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



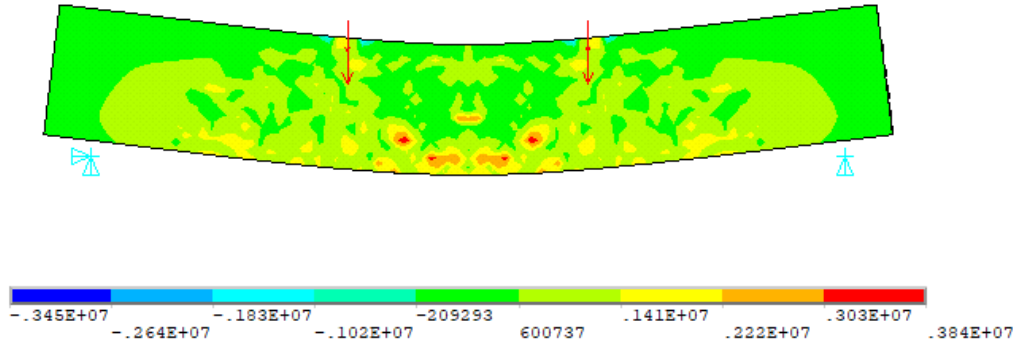
**Şekil 134.** 200°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 135'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



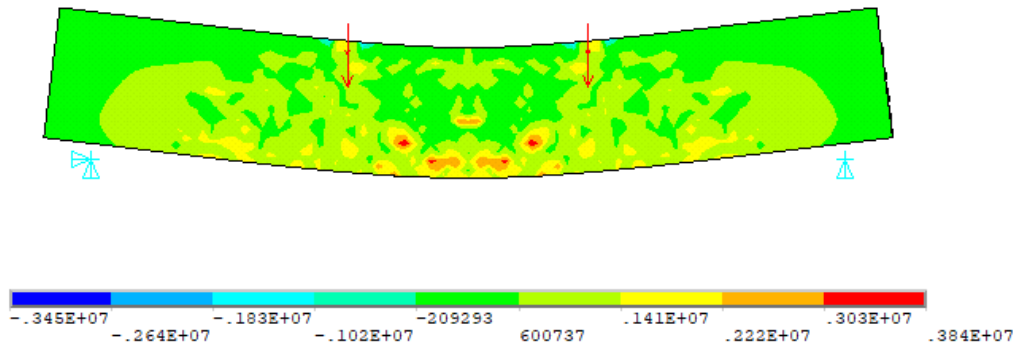
**Şekil 135.** 300°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 136'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



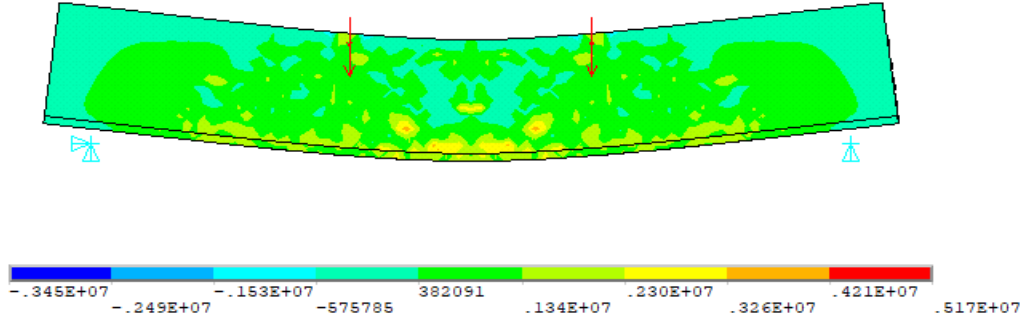
**Şekil 136.** 400°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 137'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



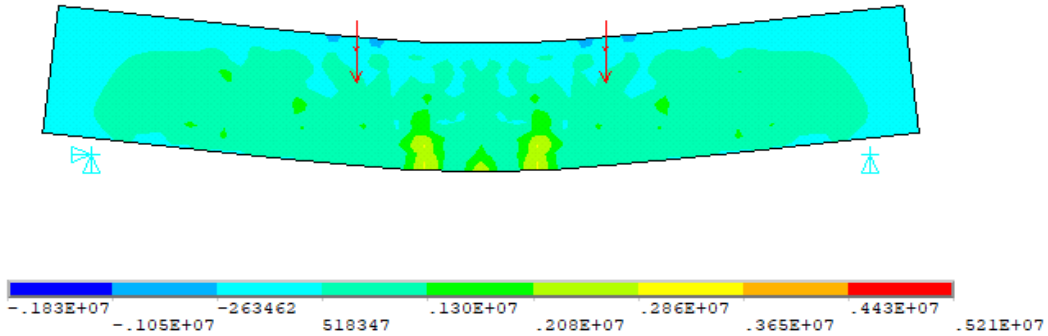
**Şekil 137.** 500°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 138'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



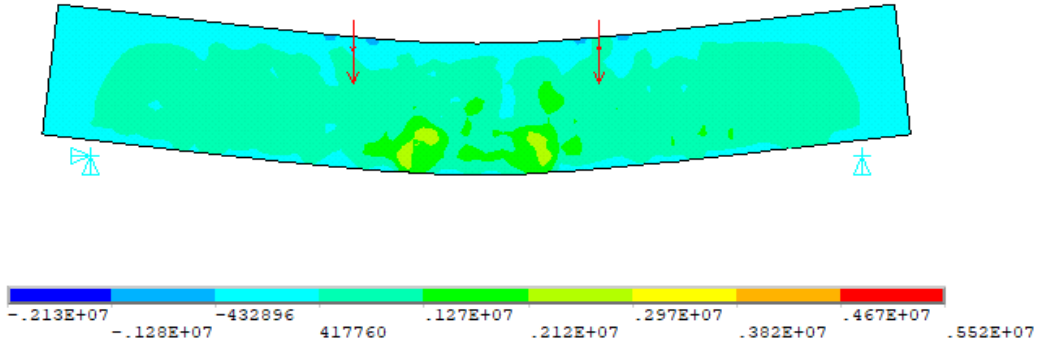
Şekil 138. 600°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 139'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



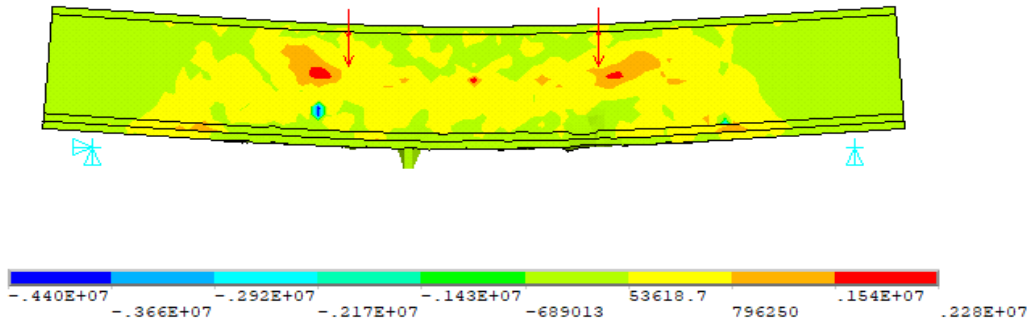
Şekil 139. 700°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 140'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



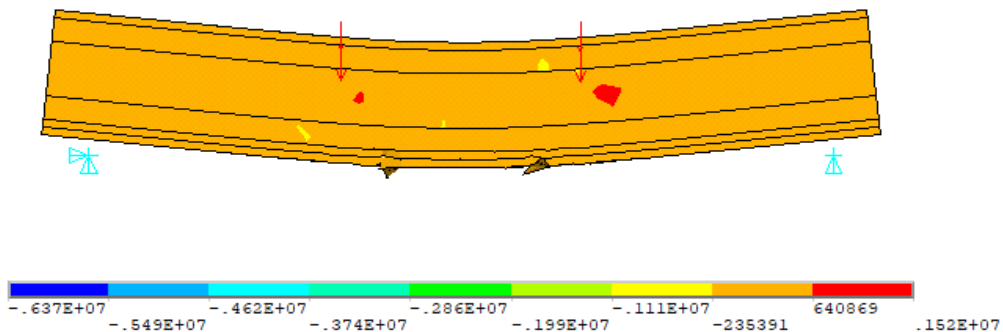
**Şekil 140.** 800°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 141'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



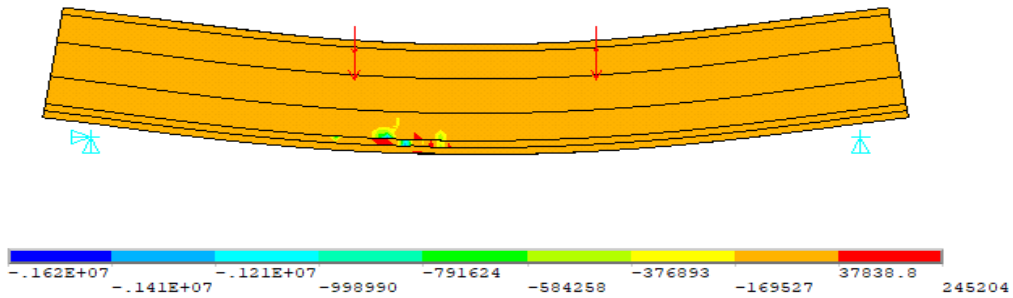
**Şekil 141.** 900°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 142'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 142.** 1000°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 10800 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri eğilme kirişlerinin alt kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 143'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.

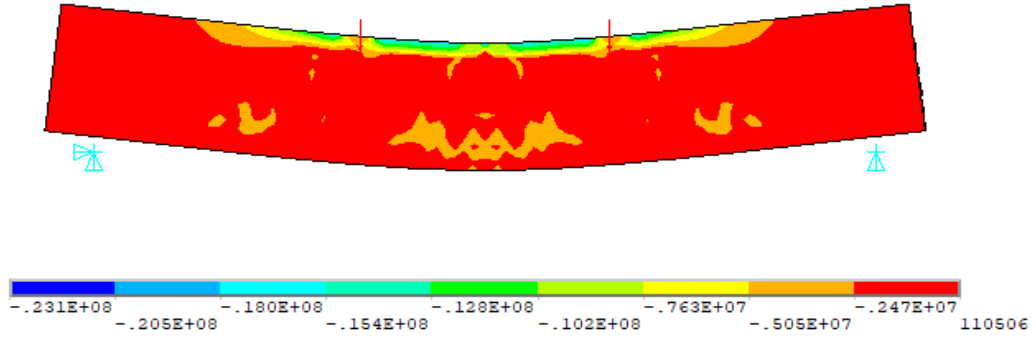


**Şekil 143.** 1100°C'deki betonun asal çekme gerilmesi

Farklı sıcaklıklardaki kirişlerin asal çekme gerilmelerine bakılacak olursa, ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığının 700°C ve 800°C olduğu zaman betonun iç sıcaklığı 150°C ve 250°C arasında olduğundan betonun dayanımının arttığı görülmüştü. Bu yüzden asal çekme gerilmelerinin dayanım ile orantılı olduğu görülmüştür. Eğilme kirişlerinde dayanım arttıkça asal çekme gerilmelerinde artış görülmüştür. En yüksek dayanım, betonun iç sıcaklığının 150°C ve 250°C sıcaklıkta olduğundan, maksimum asal çekme gerilmeleri bu sıcaklık aralıklarında görülmüştür. En düşük dayanım, betonun iç sıcaklığının 500°C sıcaklığının üzerine çıktığında minimum asal çekme gerilmeleri bu sıcaklık aralıklarında görülmüştür.

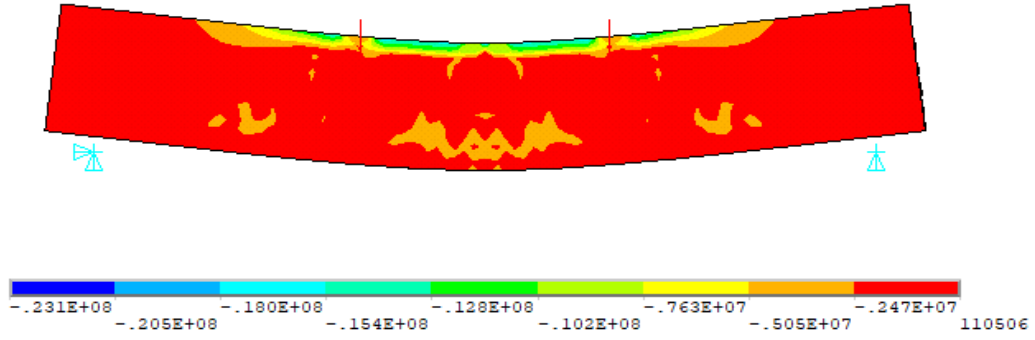
### **Eğilme kirişinin asal basınç gerilmeleri**

Kiriş üzerine yük uygulanmaya başlandığında taşıma gücüne ulaşmadan çok önce çekme kısmında çatlakların ortaya çıkması, betonarme kirişlerin davranışı için genel kabuldür. Ancak beton ve çelik donatı arasında uyumlu bir davranış görülmesi için birim şekil değiştirmelerin %0,1'den az olması şartıyla çatlaklar kılcal ve önemsiz nitelikte olmaktadır. (Özkal, 2017). Kirişin göçme durumundaki gerilmeleri gösteren şekiller aşağıda verilmiş olup, asal birim şekil değiştirmenin maksimum olduğu bölgeler kırmızı ile, asal birim şekil değiştirmelerin %0,11'den az olduğu bölgeler yeşil ile gösterilmiştir. ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 144'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



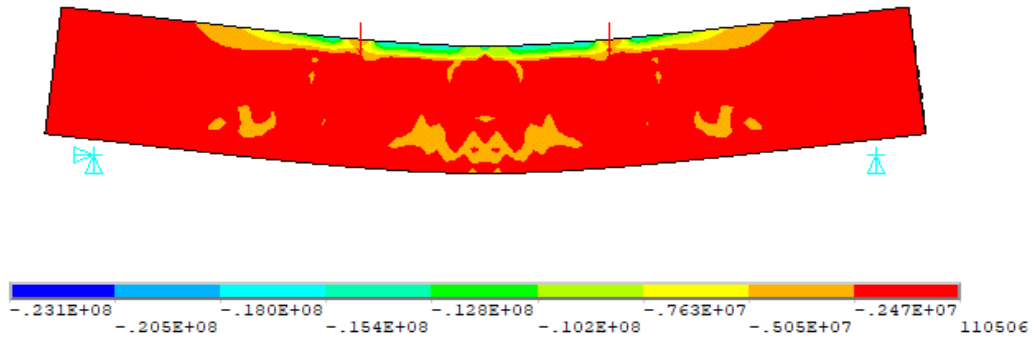
**Şekil 144.** 20°C’deki betonun asal basınç gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 145’te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 145.** 100°C’deki betonun asal basınç gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 146’da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.

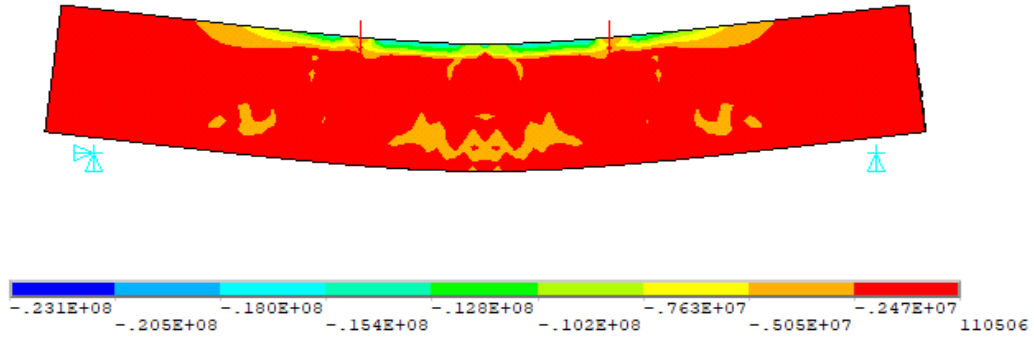


**Şekil 146.** 200°C’deki betonun asal basınç gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 300°C ISO

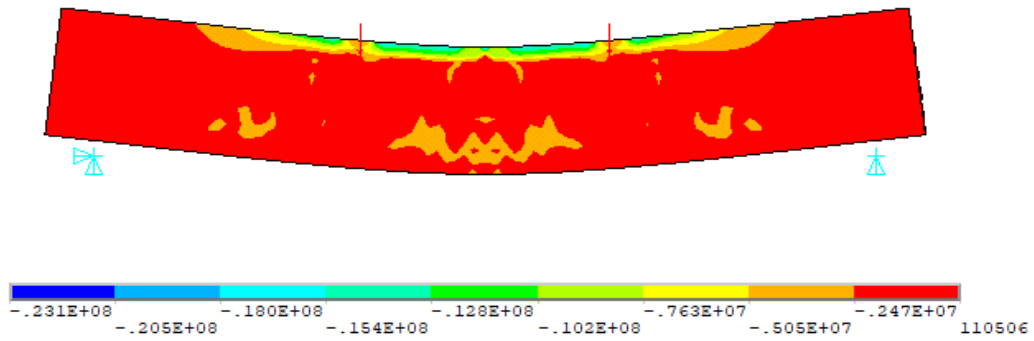


yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 147’de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



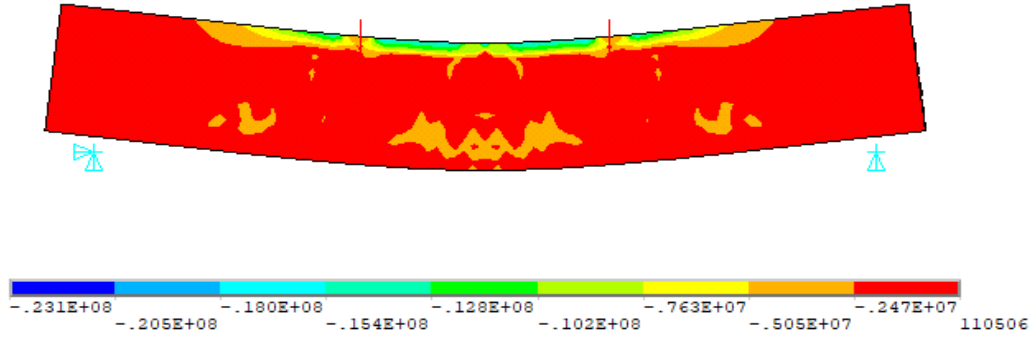
**Şekil 147.** 300°C’deki betonun asal basınç gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 148’de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



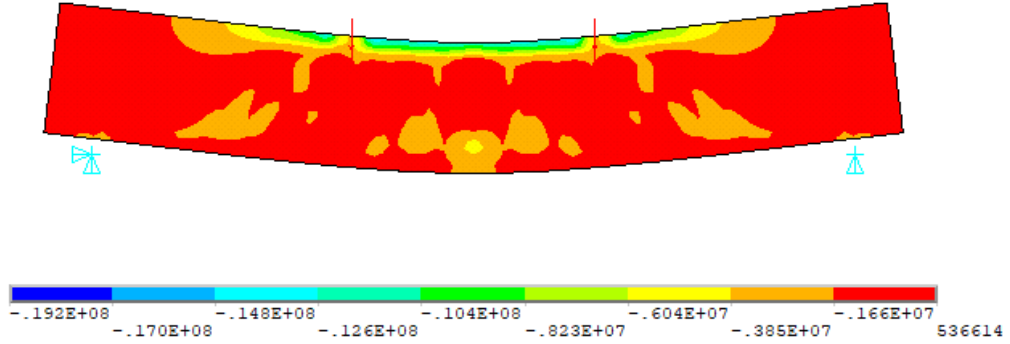
**Şekil 148.** 400°C’deki betonun asal basınç gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 149’da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



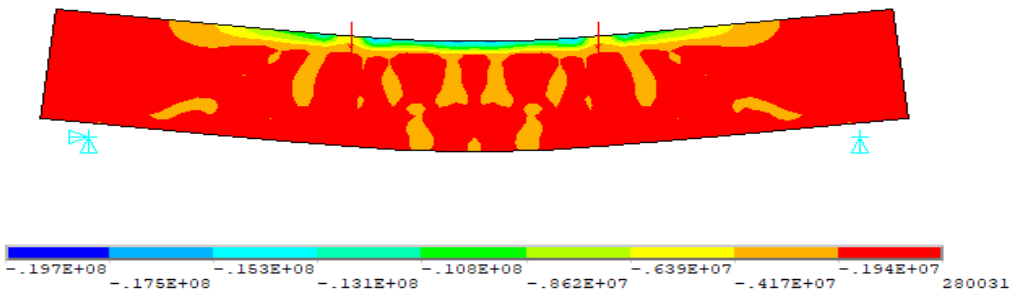
**Şekil 149.** 500°C'deki betonun asal basınç gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 150'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 150.** 600°C'deki betonun asal basınç gerilmesi

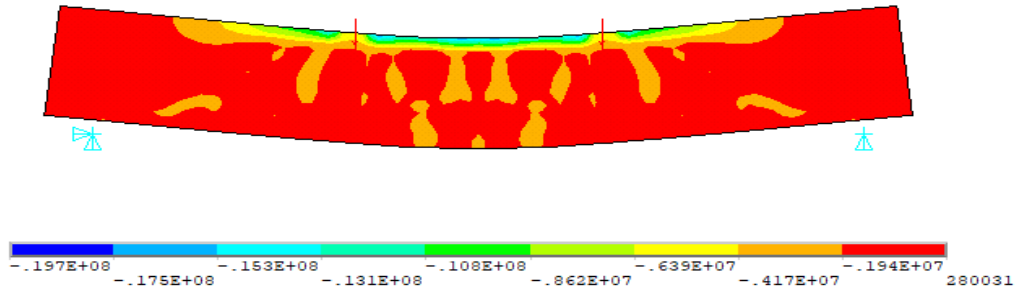
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 151'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 151.** 700°C'deki betonun asal basınç gerilmesi

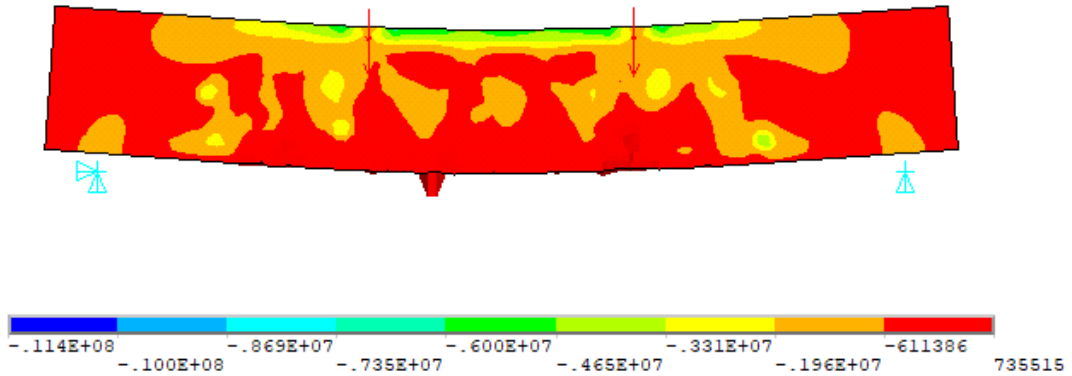
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 800°C ISO

yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 152’de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



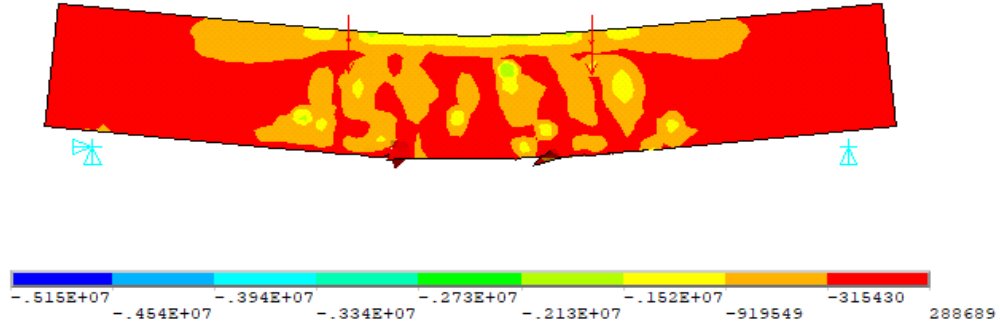
**Şekil 152.** 800°C’deki betonun asal basınç gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 153’te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



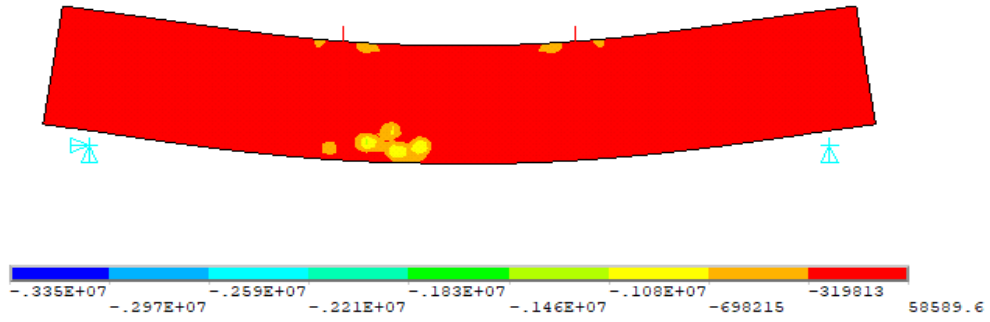
**Şekil 153.** 900°C’deki betonun asal basınç gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 154’te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 154.** 1000°C’deki betonun asal basınç gerilmesi

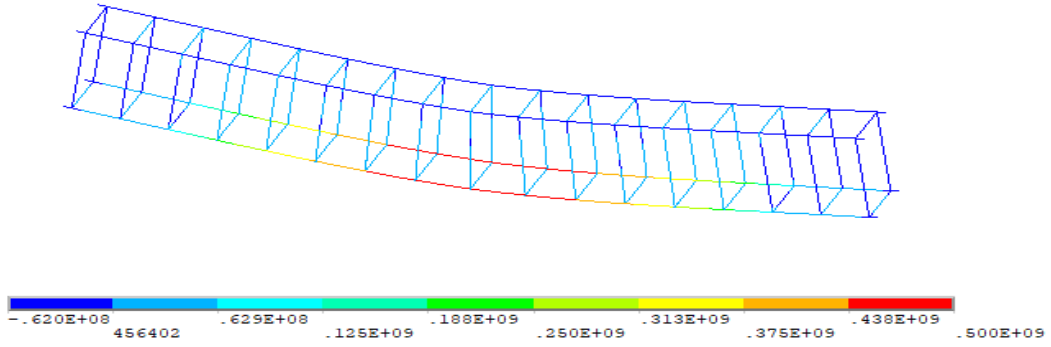
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 10800 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 155’te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 155.** 1100°C’deki betonun asal basınç gerilmesi

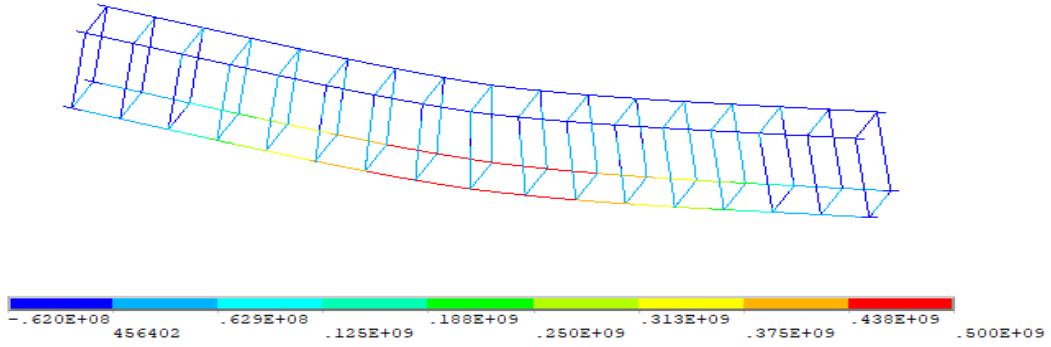
### **Eğilme kirişinin donatı gerilmeleri**

Farklı sıcaklıklardaki eğilme kiriş donatılarının gerilmeleri aşağıda verilmiştir. ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 156’da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



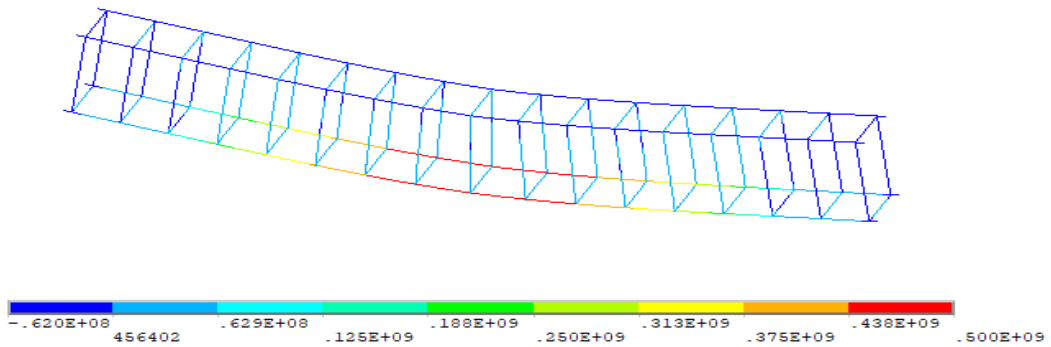
**Şekil 156.** 20°C'deki donatıların gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 157'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



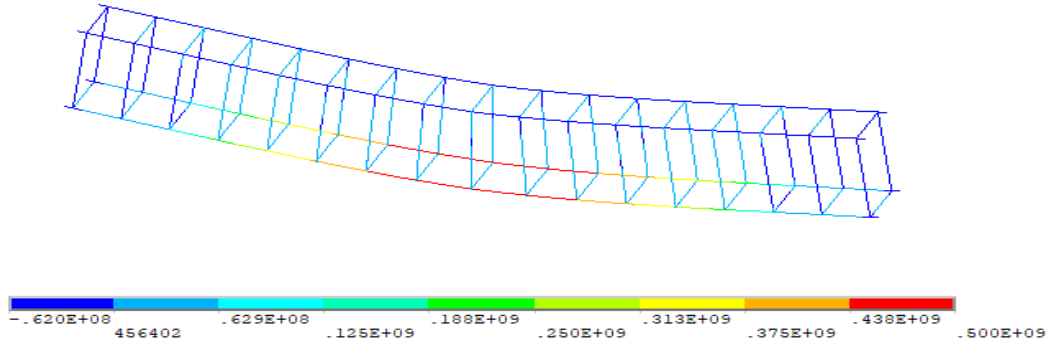
**Şekil 157.** 100°C'deki donatıların gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 158'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



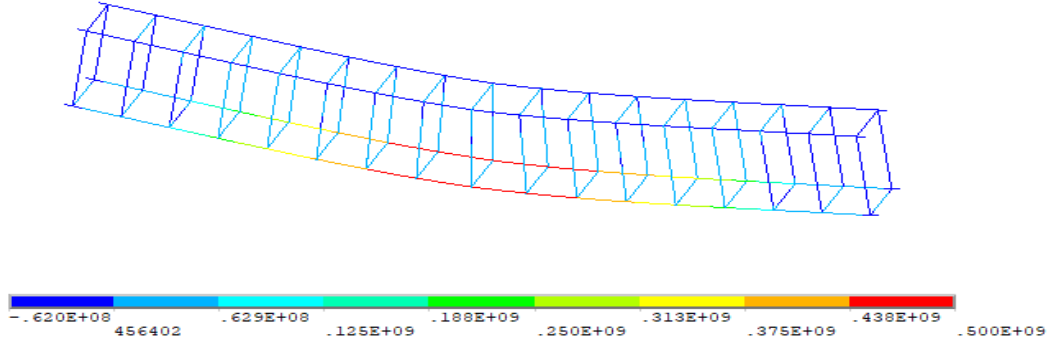
**Şekil 158.** 200°C'deki donatıların gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 159'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



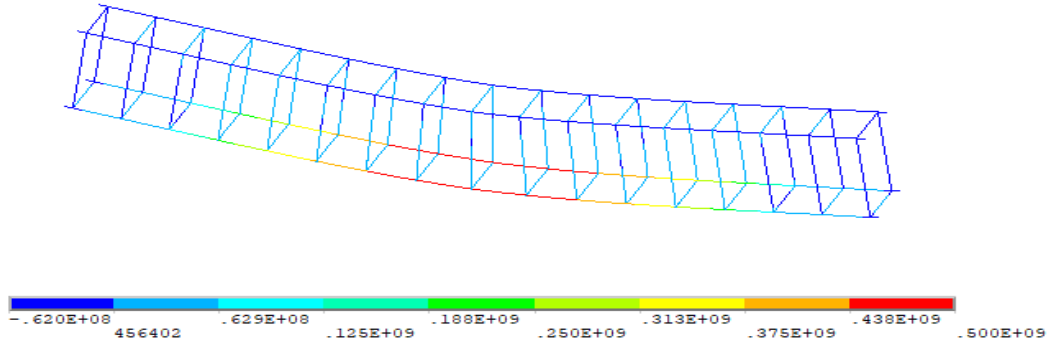
**Şekil 159.** 300°C'deki donatıların gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 160'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



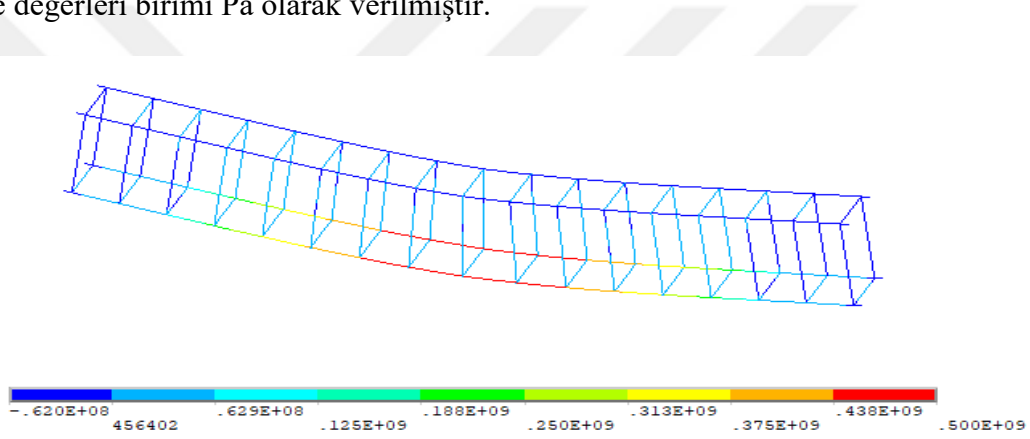
**Şekil 160.** 400°C'deki donatıların gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 161'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



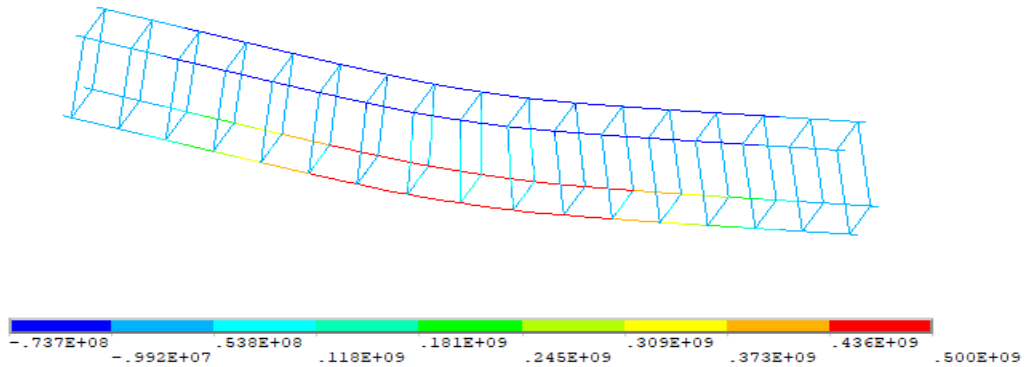
**Şekil 161.** 500°C'deki donatıların gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 162'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



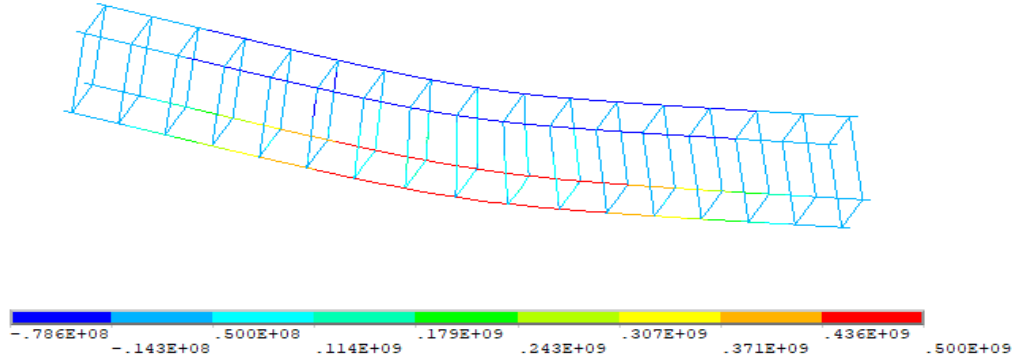
**Şekil 162.** 600°C'deki donatıların gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 163'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



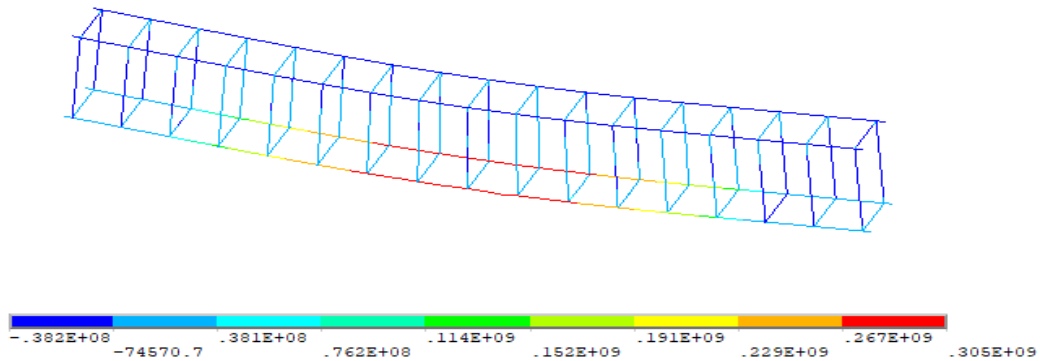
**Şekil 163.** 700°C'deki donatıların gerilmesi

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 164'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 164.** 800°C'deki donatıların gerilmesi

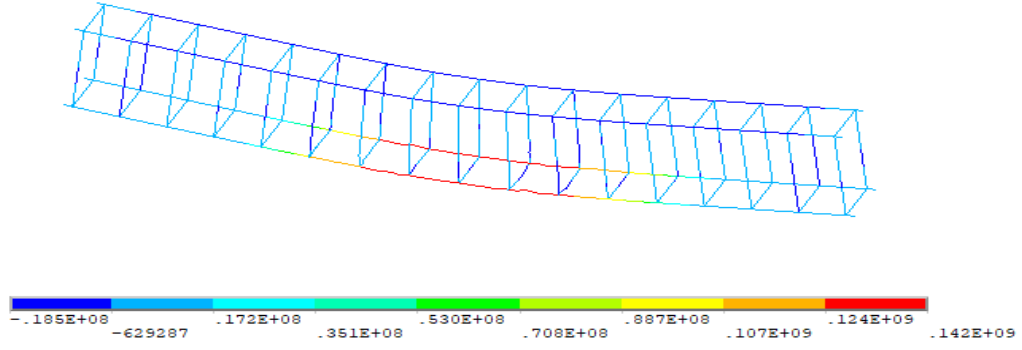
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 165'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 165.** 900°C'deki donatıların gerilmesi

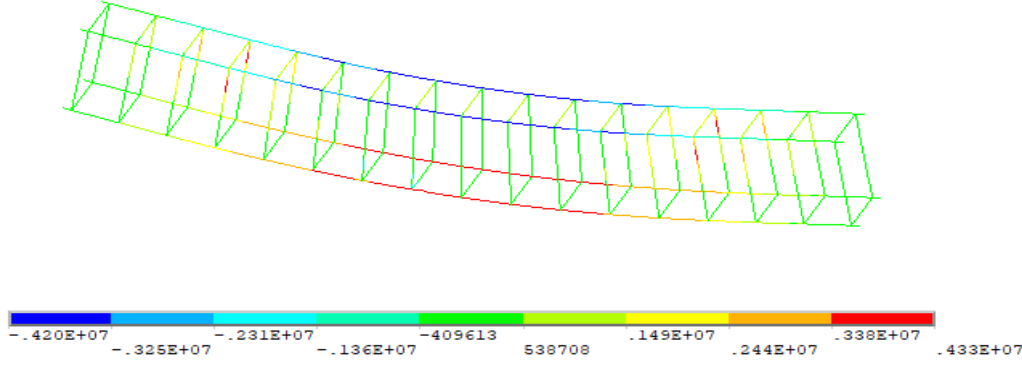
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 166'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.





**Şekil 166.** 1000°C’deki donatıların gerilmesi

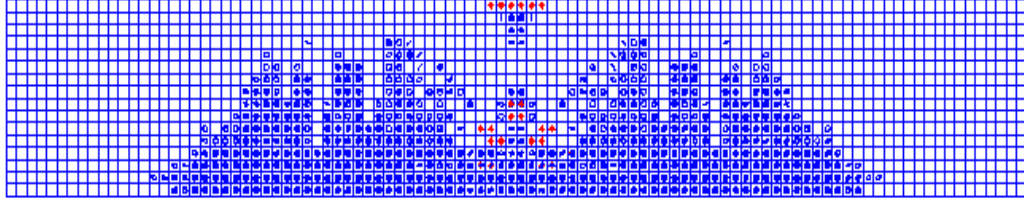
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 10800 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 167’de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 167.** 1100°C’deki donatıların gerilmesi

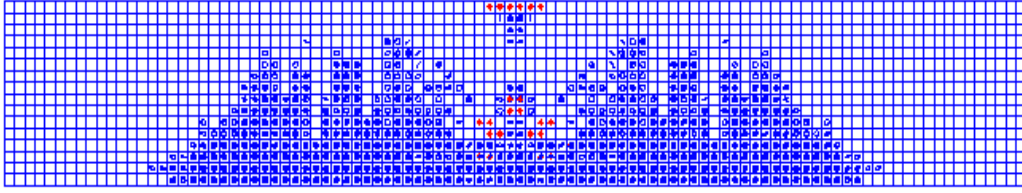
### **Eğilme kirişinin beton üçüncü çatlak dağılımları**

Farklı sıcaklıklardaki kirişlerde meydana gelen çatlak dağılımları aşağıda verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere sıcaklık artışı oldukça daha fazla sayıda çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çatlak genişliği sıcaklık arttıkça büyüdüğü görülmüştür. Kırmızı çatlaklar ezilme çatlakları olarak tanımlanır. Eğilme çatlakları kiriş eksenine dik şekilde gerçekleşir ve yükün artmasıyla beraber tarafsız eksene doğru uzadığı görülmüştür. Eğilme çatlakları, tarafsız eksene uzarken asal çekme gerilmelerine dik yönde eğikleştiği belirgindir. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 168’de verilmiştir. 20°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



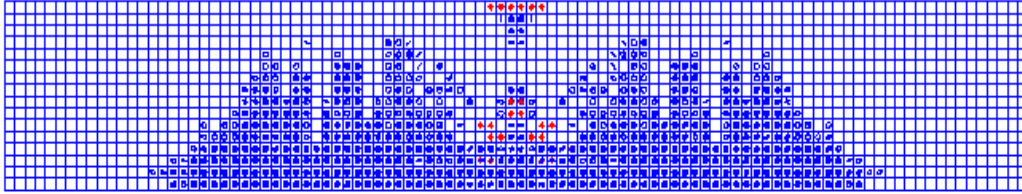
**Şekil 168.** 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 169’da verilmiştir. 100°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



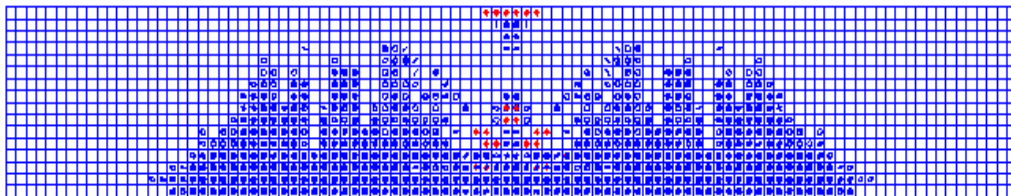
**Şekil 169.** 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 170’de verilmiştir. 200°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



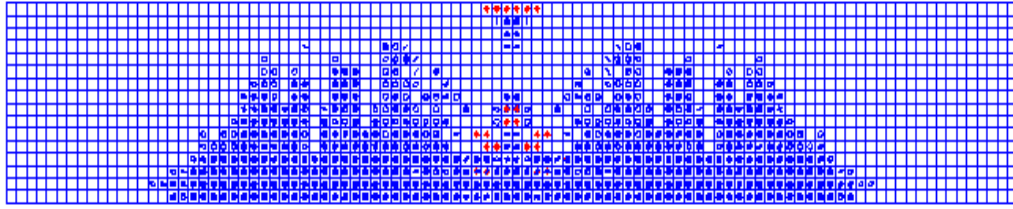
**Şekil 170.** 200°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 171’de verilmiştir. 300°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



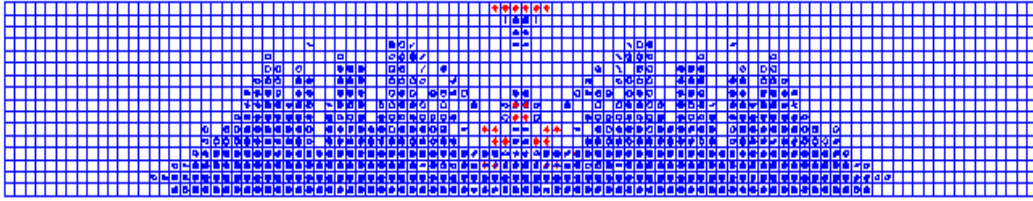
**Şekil 171.** 300°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 172’de verilmiştir. 400°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



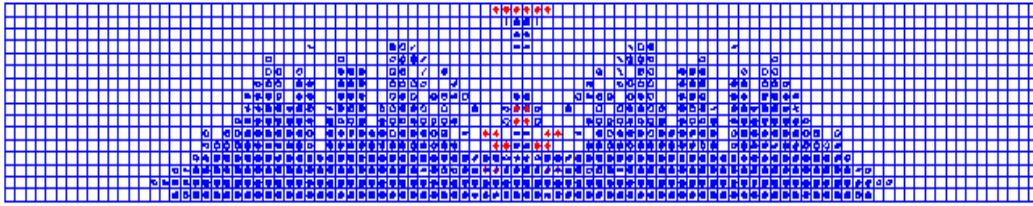
**Şekil 172.** 400°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 173’te verilmiştir. 500°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



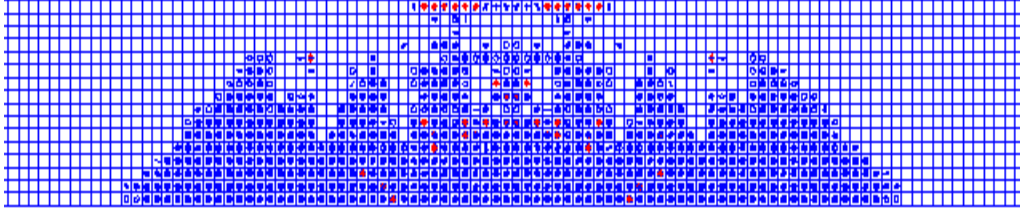
**Şekil 173.** 500°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 174’te verilmiştir. 600°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



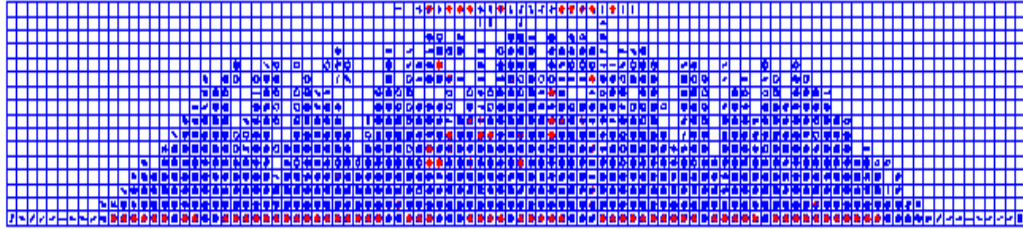
**Şekil 174.** 600°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 175’te verilmiştir. 700°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



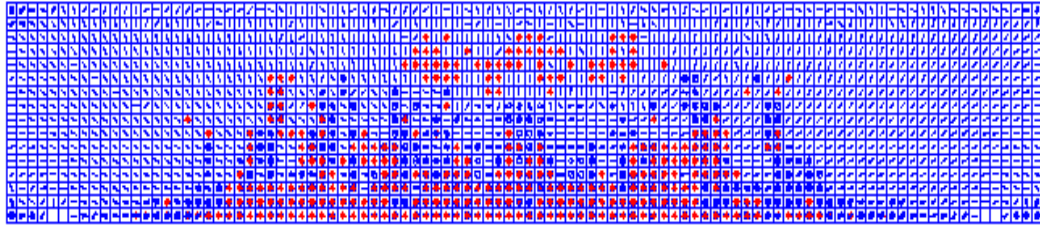
**Şekil 175.** 700°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 176’da verilmiştir. 800°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun olmuştur.



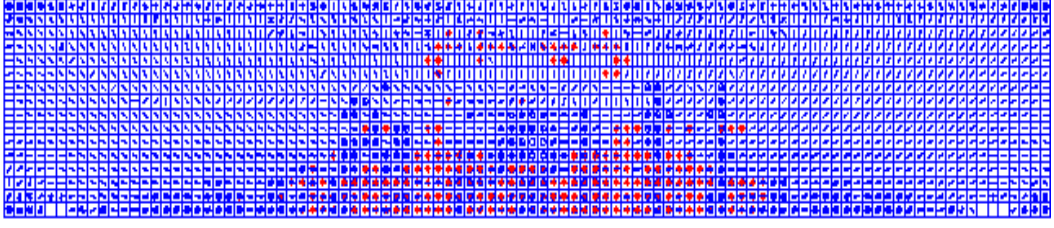
**Şekil 176.** 800°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 177’de verilmiştir. 900°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun olmuştur.



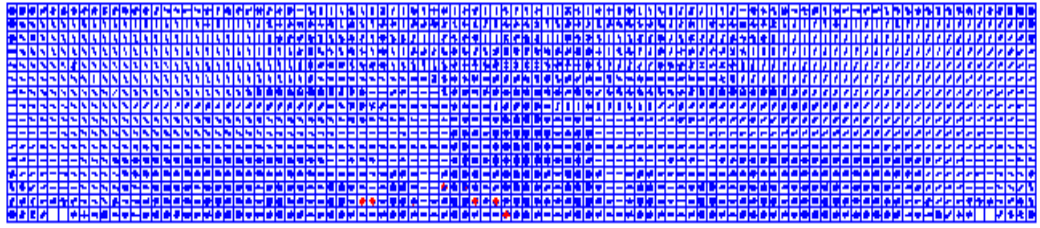
**Şekil 177.** 900°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 178’de verilmiştir. 1000°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun olmuştur.



**Şekil 178.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 179’da verilmiştir. 1100°C ortam sıcaklığındaki eğilme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun olmuştur.



**Şekil 179.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

### **Kesme Kirişleri**

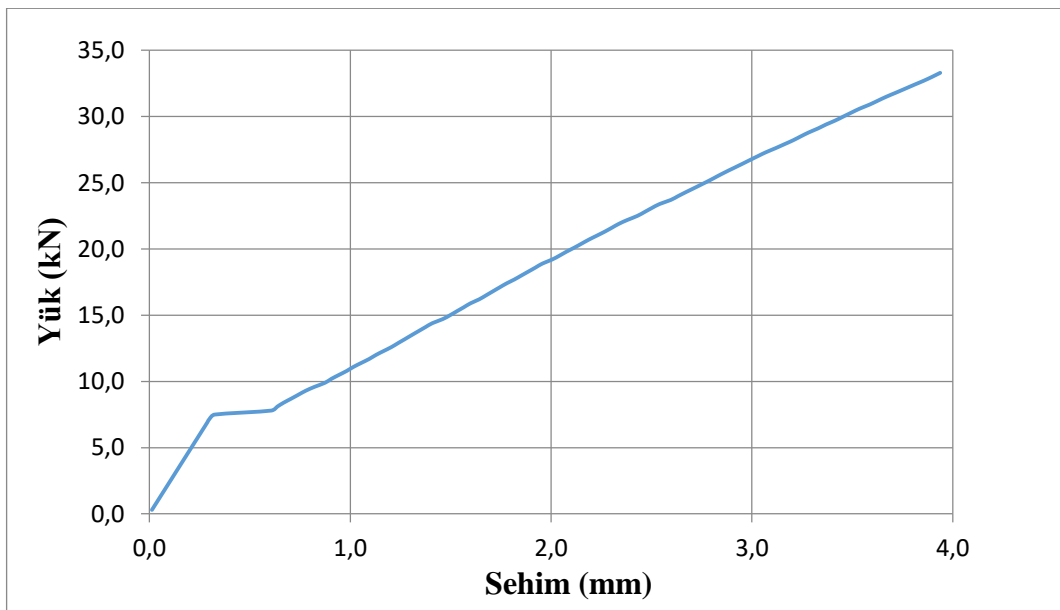
Yukarıda bahsettiğimiz gibi ortamdaki yangın sıcaklığına maruz kalan betonarme bir yapının ortam ısısı ile kendi ısısının aynı olması mümkün olmadığından, kesme grubu kirişlerin farklı sıcaklıklardaki ISO yangın eğrisine göre verilen ortam sıcaklıkları ve kirişin ulaştığı maksimum sıcaklık değerleri Tablo 21’de görülmektedir. Aynı şekilde eğilme kirişlerinde olduğu gibi kesme kirişleri içinde sonuçlar, kirişin her yüzey sıcaklığının aynı olmaması ve ortam sıcaklığına karşı yüzeyinin ulaştığı maksimum sıcaklık değerleri göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.

**Tablo 21.** Kesme Kirişlerinin Sıcaklıklara Göre Maksimum Isı Değerleri

ISO834 Yangını Ortam Sıcaklığı	ISO834 Yangını Ortam Sıcaklığına Denk Gelen Zaman	Kirişin Ulaştığı Maksimum Sıcaklık
20°C	0,1 sn	20°C
100°C	6 sn	20,9973°C
200°C	18 sn	25,9546°C
300°C	42 sn	37,0495°C
400°C	88 sn	62,9661°C
500°C	178 sn	115,403°C
600°C	354 sn	206,615°C
700°C	695 sn	332,734°C
800°C	1365 sn	480,937°C
900°C	2660 sn	654,195°C
1000°C	5190 sn	830,339°C
1100°C	10800 sn	1006,83°C

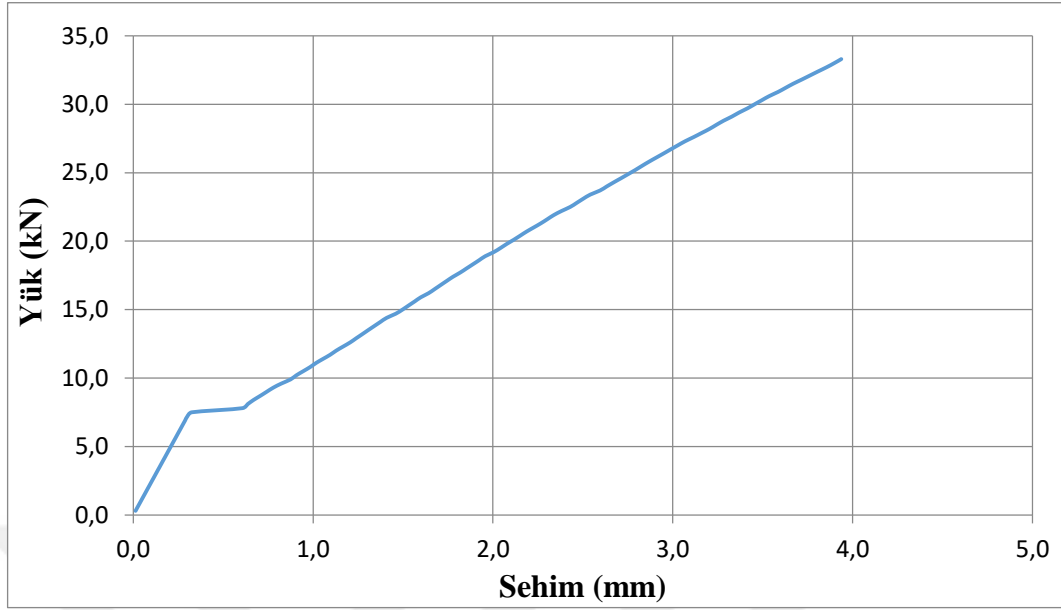
#### Kesme kirişinin yük-sehim grafikleri

Farklı sıcaklıklar altındaki kesme kirişinin termal-yapısal çözümlemesi sonucunda yük-sehim grafikleri aşağıda verilmiştir. Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 180’de grafik olarak verilmiştir. Tez çalışmamızda numuneleri kıyaslamak için değerler Şekil 192’de verilmiştir.



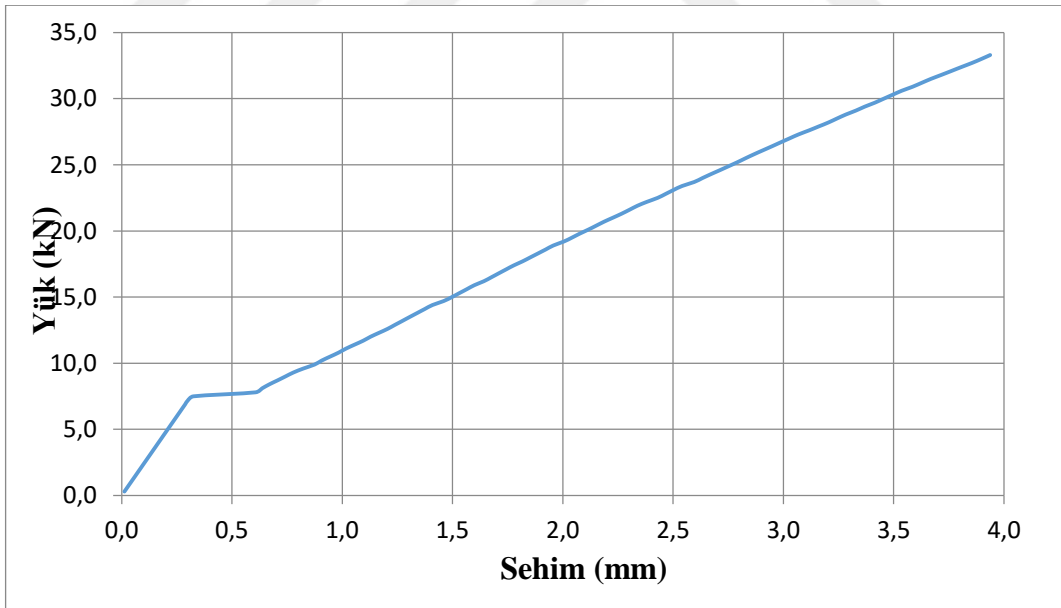
**Şekil 180.** 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 181’de grafik olarak verilmiştir.



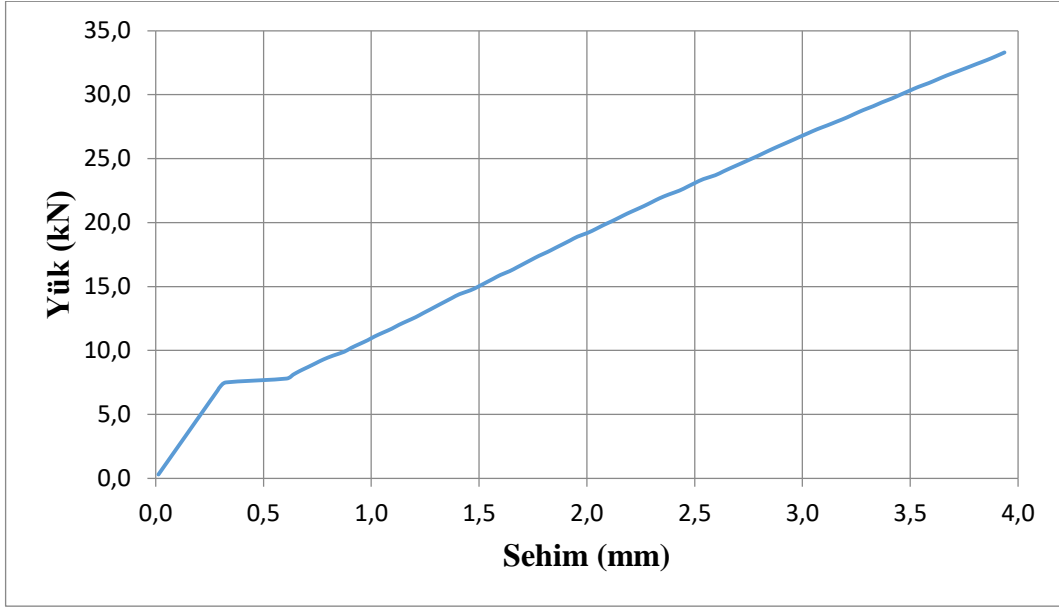
Şekil 181. 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 182’de grafik olarak verilmiştir.



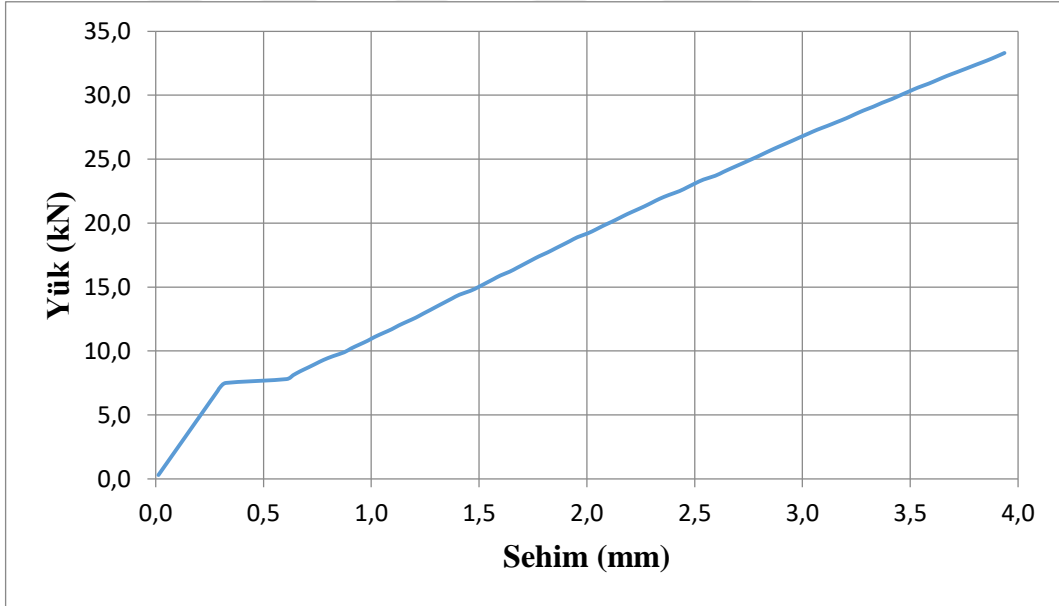
Şekil 182. 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 183’te grafik olarak verilmiştir.



**Şekil 183.** 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

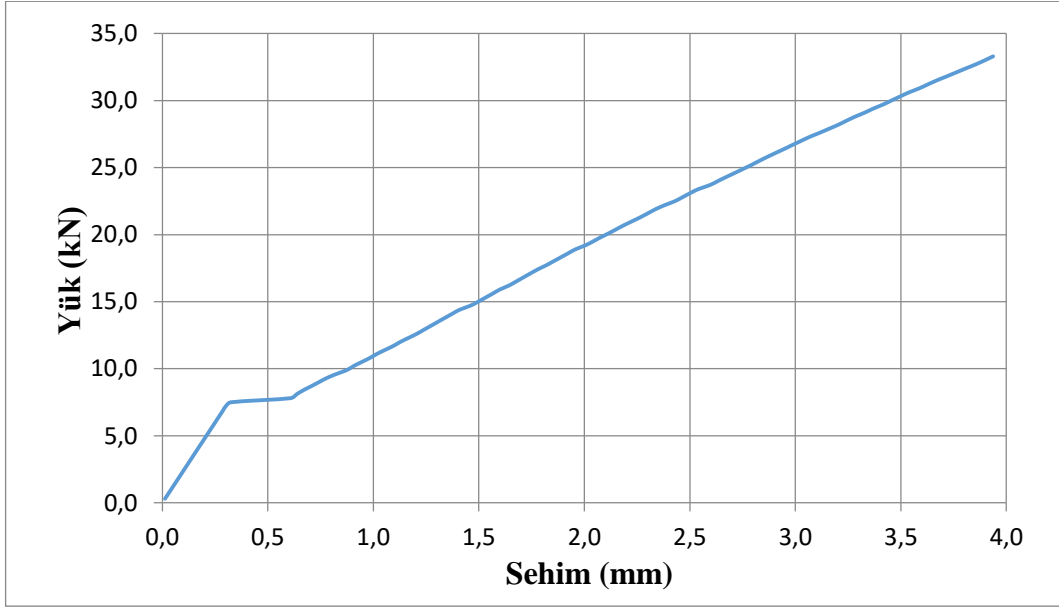
Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 184'te grafik olarak verilmiştir.



**Şekil 184.** 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

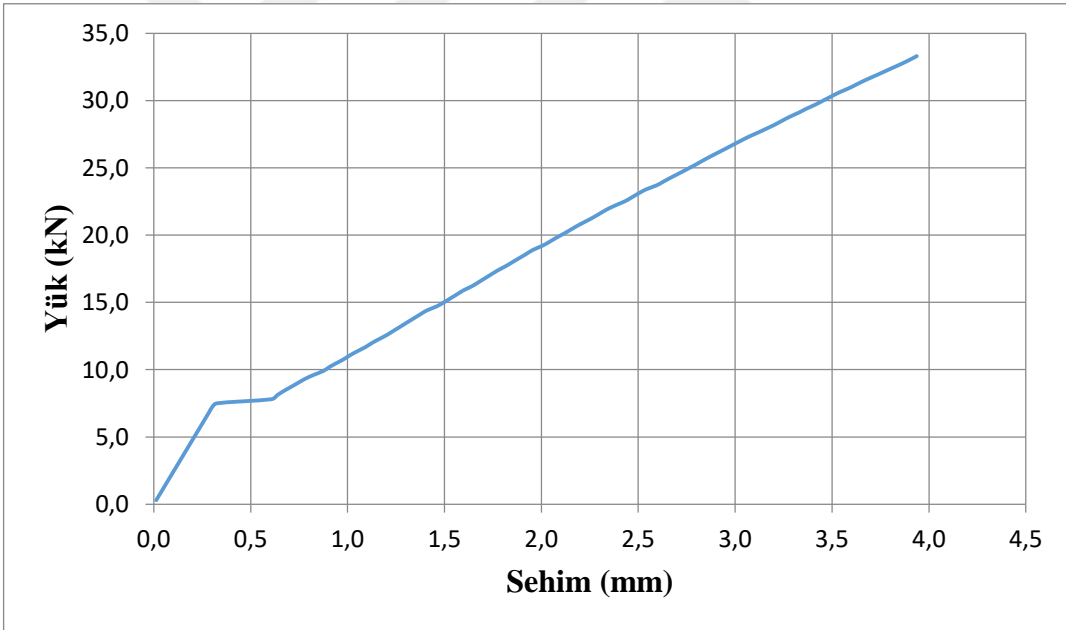
Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 185'te grafik olarak verilmiştir.





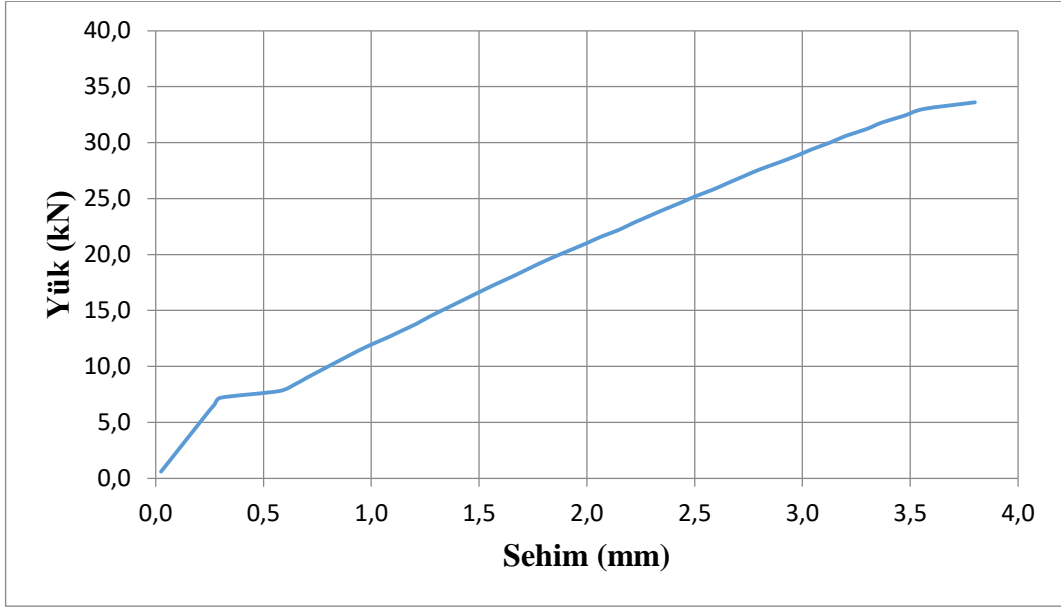
**Şekil 185.** 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 186’da grafik olarak verilmiştir.



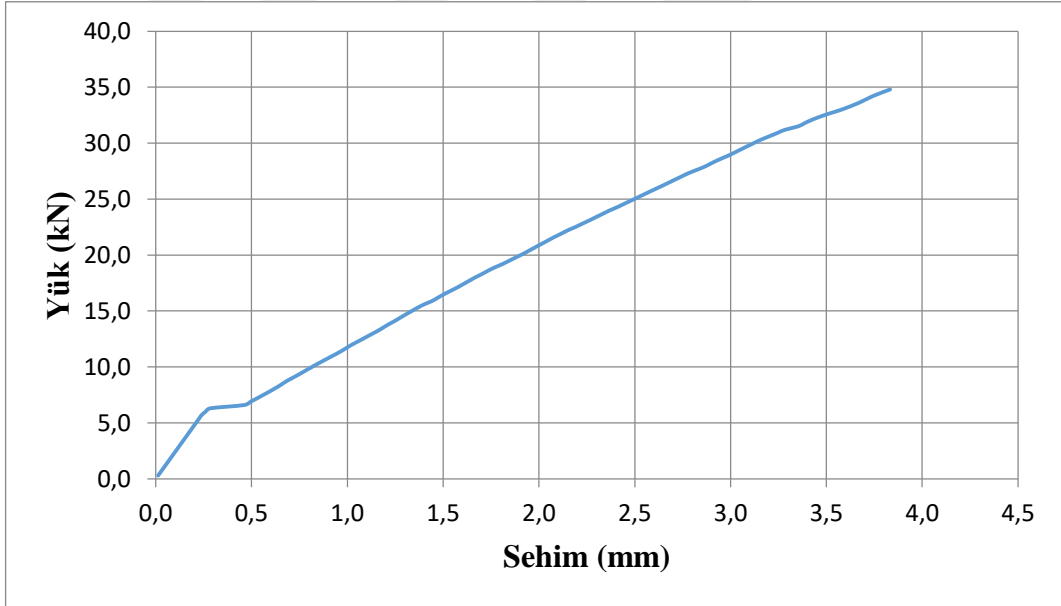
**Şekil 186.** 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 187’de grafik olarak verilmiştir.



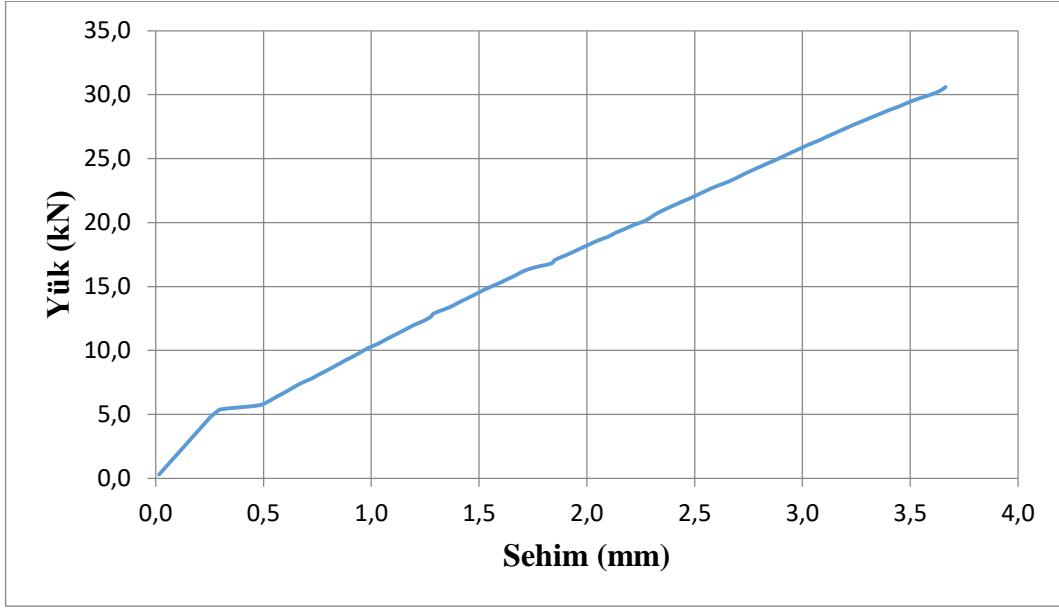
**Şekil 187.** 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 188’de grafik olarak verilmiştir.



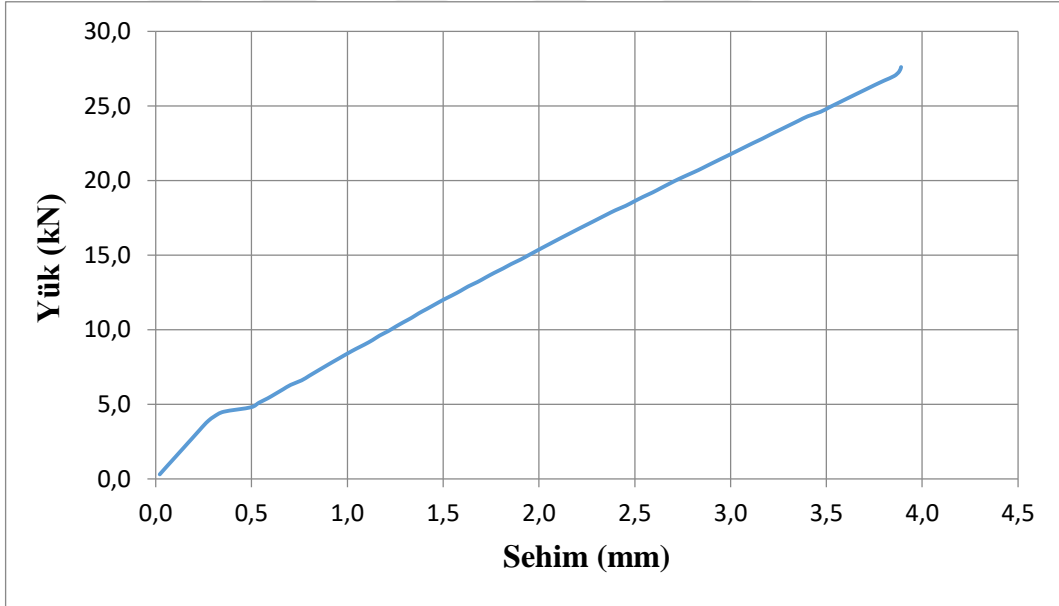
**Şekil 188.** 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 189’da grafik olarak verilmiştir.



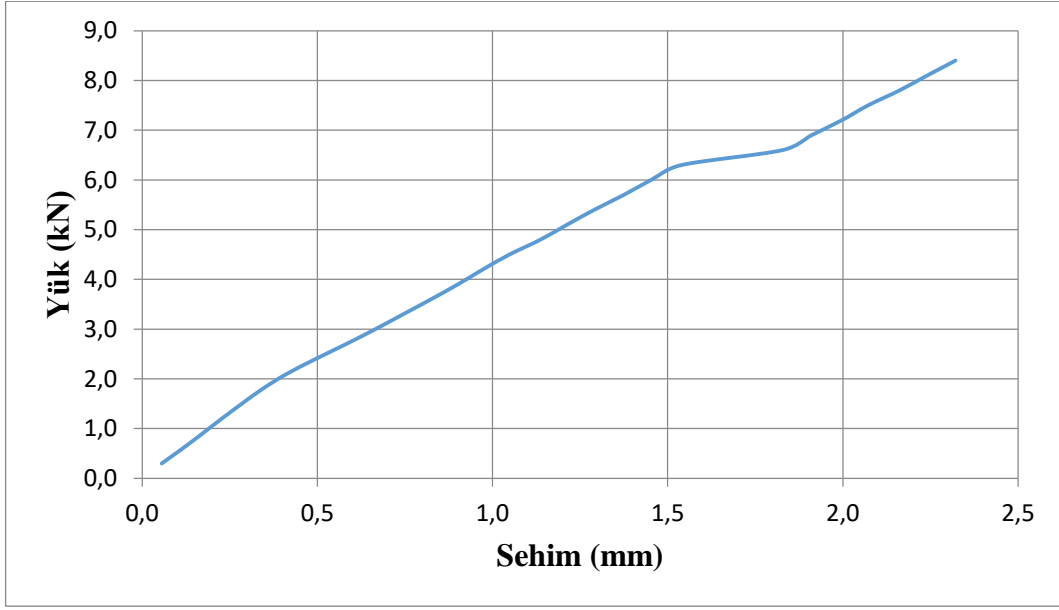
**Şekil 189.** 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 190'da grafik olarak verilmiştir.

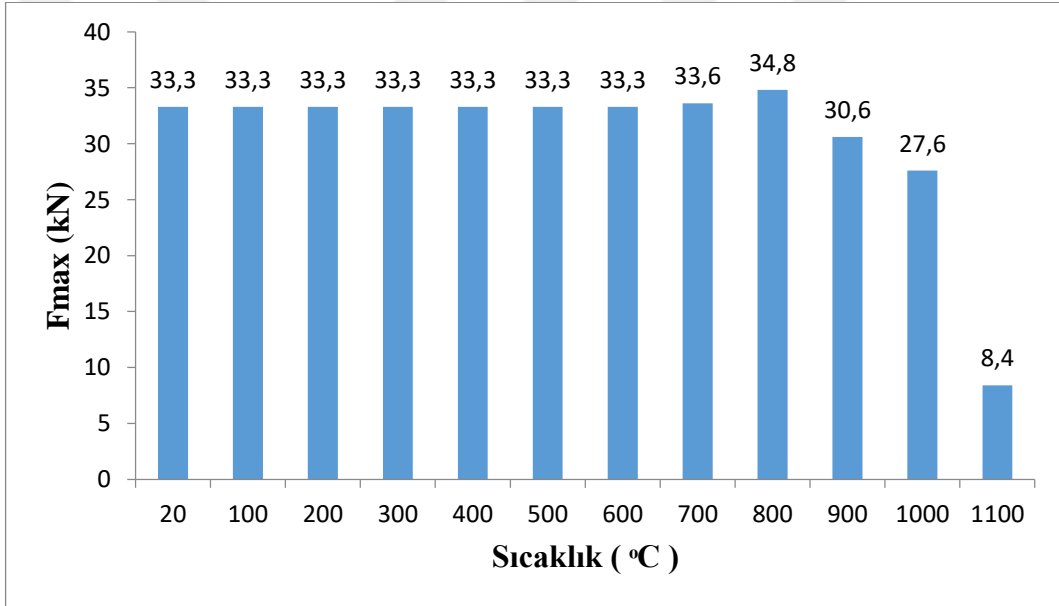


**Şekil 190.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği

Yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim değerleri hesaplanmış ve Şekil 191'de grafik olarak verilmiştir.

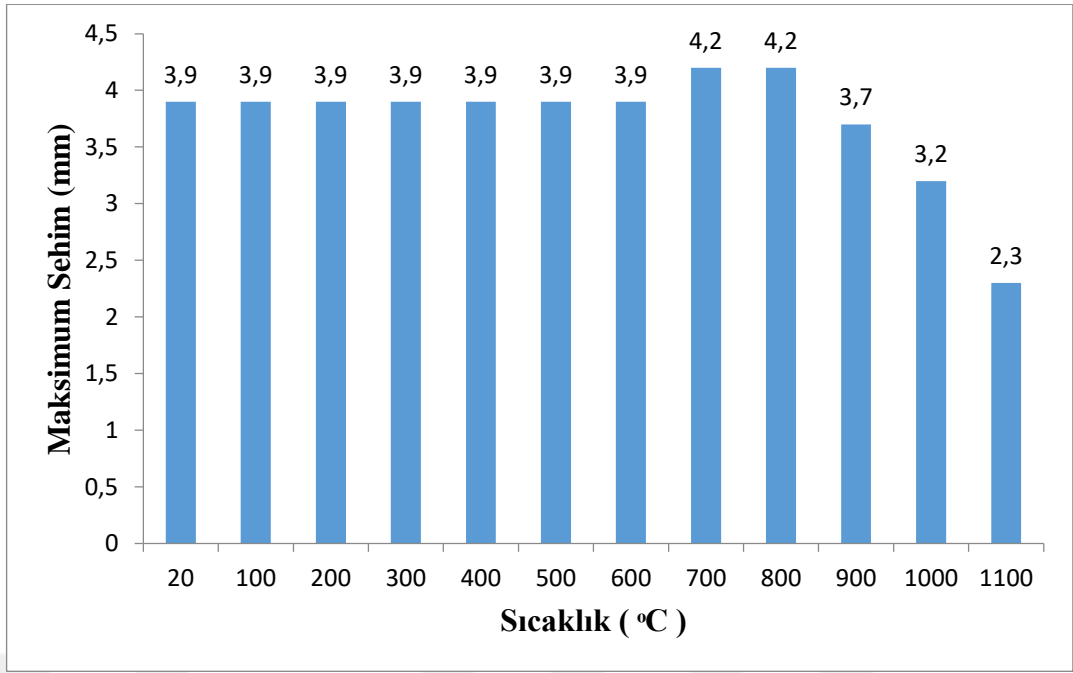


**Şekil 191.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin yük-sehim grafiği



**Şekil 192.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerinin taşıdıkları maksimum taşıdıkları yük değerleri

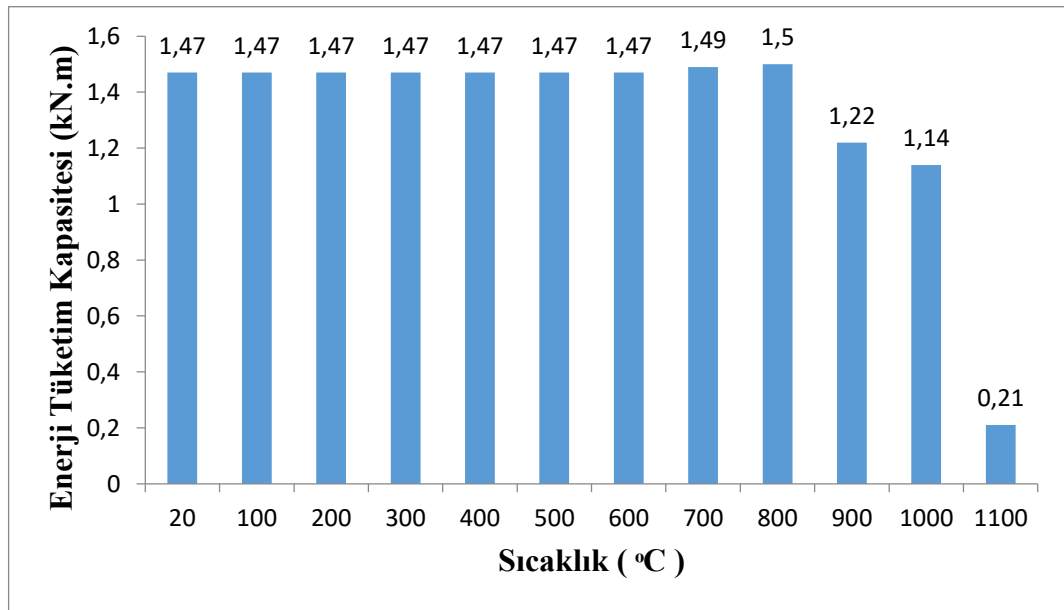
Kiriş numuneleri arasında maksimum yük ISO yangın eğrisine göre ortam sıcaklığının 700-800°C sıcaklığa maruz kalan kiriş tarafından taşınmıştır. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan kiriş, taşıma kapasitesine ulaştığı anda meydana gelen sehim miktarı aşağıda verilmiştir.



**Şekil 193.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerinde meydana gelen maksimum sehim değerleri

İlk çatlak oluşumu gözlemlendikten sonra yük-sehim eğrisi yataylaşmaya başlamıştır. Sünek kirişler yönetmeliklere uygun olarak tasarlandığında, taşıma kapasitesine yaklaştığı zamana yataylaşmaya başlar. Fakat çalışmamızda kirişimizi kesme kuvvetinden göçecek şekilde tasarım yaptığımız için yataylaşmaya erken başlamıştır.

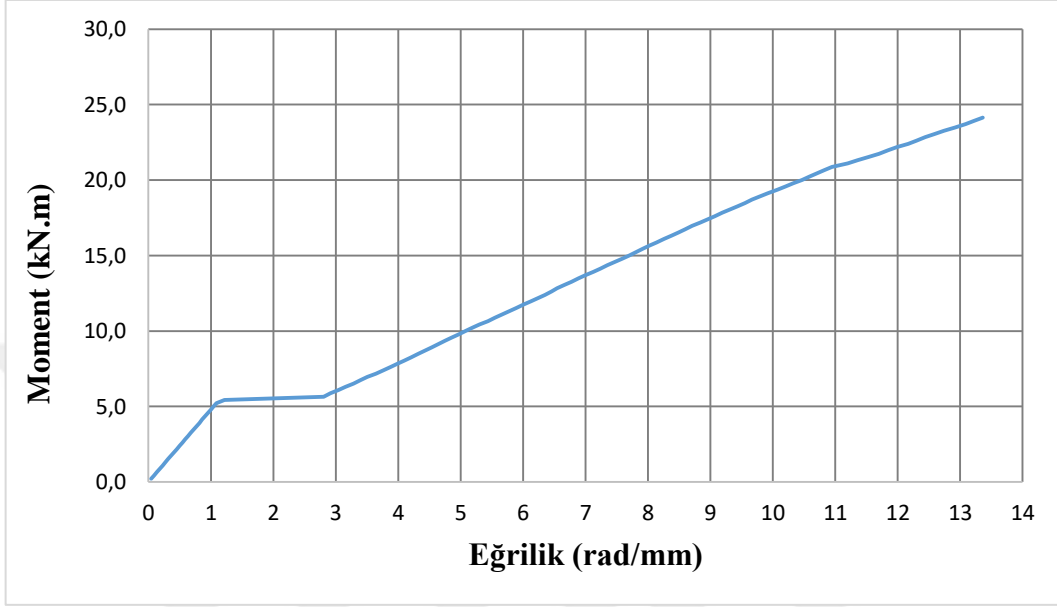
Bu eğrilerin altındaki alan ile enerji tüketim kapasitesi hesaplanabilmektedir. Şekil 194'te farklı sıcaklıklara maruz kalan kirişlere ait enerji tüketim kapasiteleri (ETK) belirtilmiştir.



**Şekil 194.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerinin enerji tüketim kapasiteleri

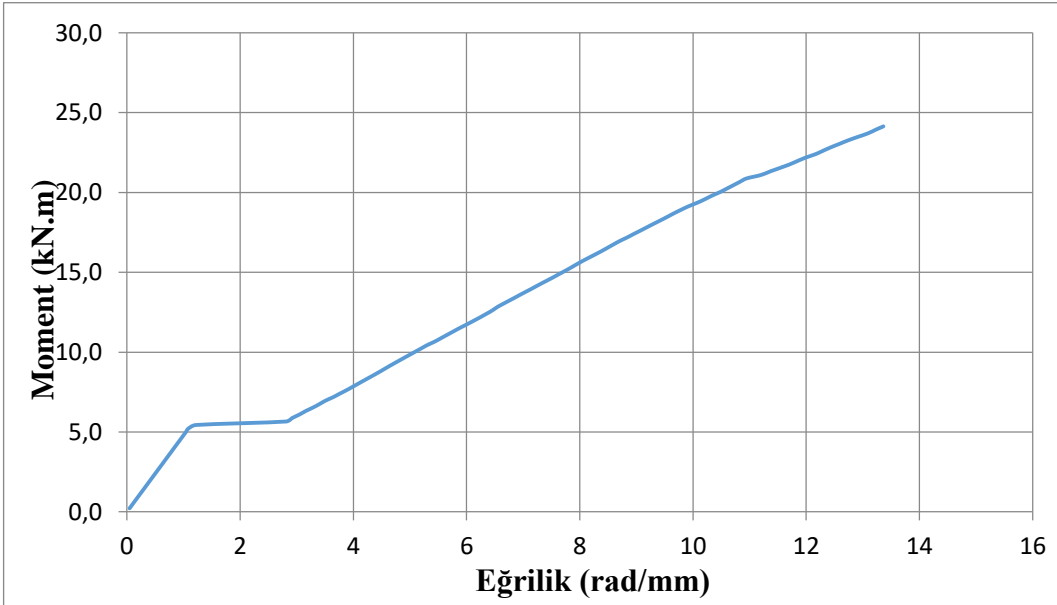
### Kesme kirişinin moment-eğrilik grafikleri

Farklı sıcaklıklardaki kesme kirişinin moment-eğrilik grafikleri aşağıda verilmiştir. Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerindeki veriler yardımıyla 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 195'te verilmiştir.



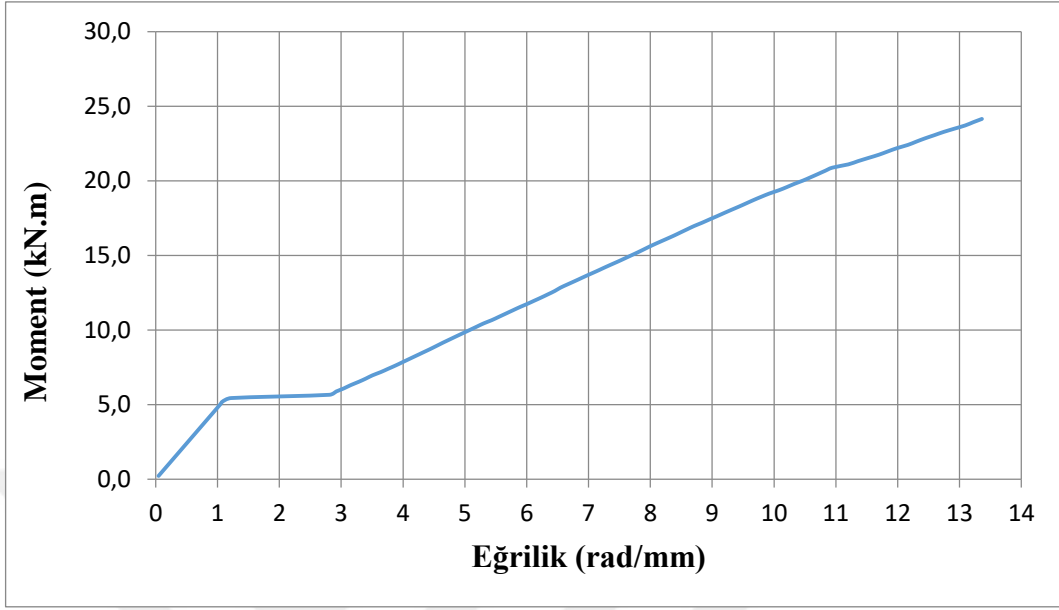
Şekil 195. 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 196'da verilmiştir.



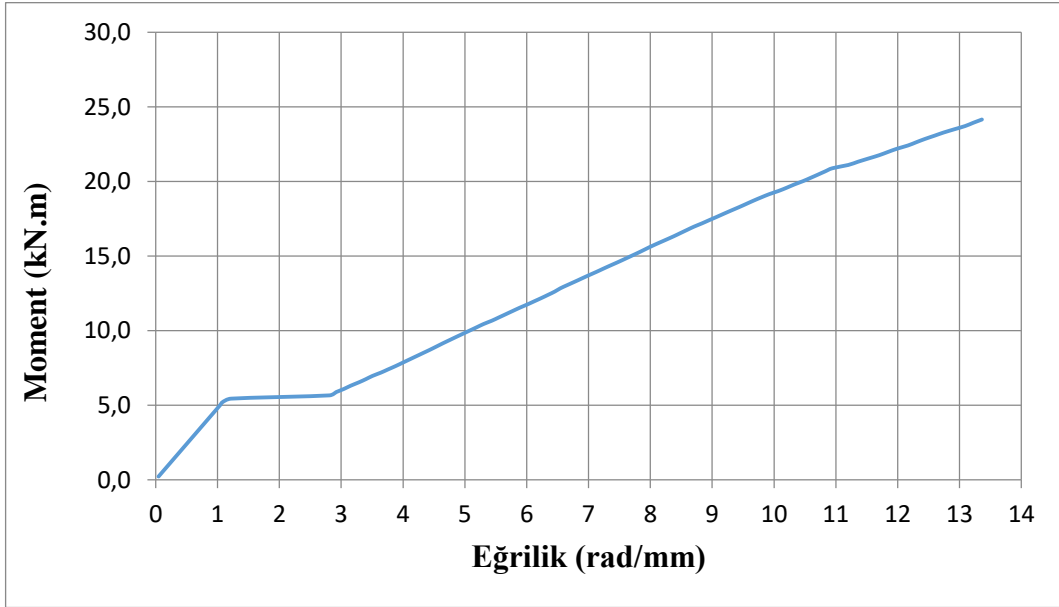
Şekil 196. 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 197’de verilmiştir.



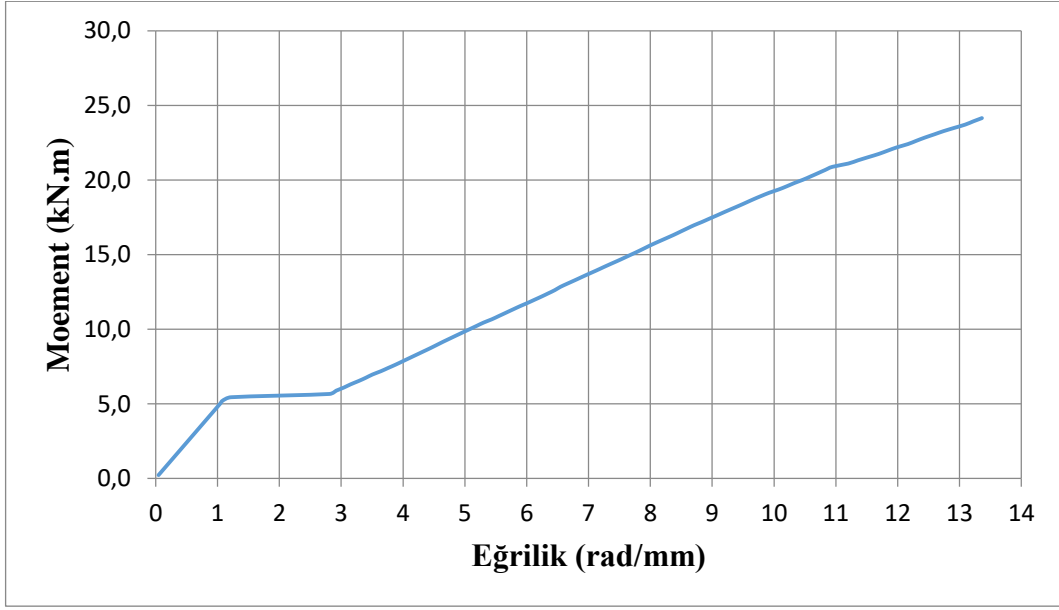
Şekil 197. 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 198’de verilmiştir.



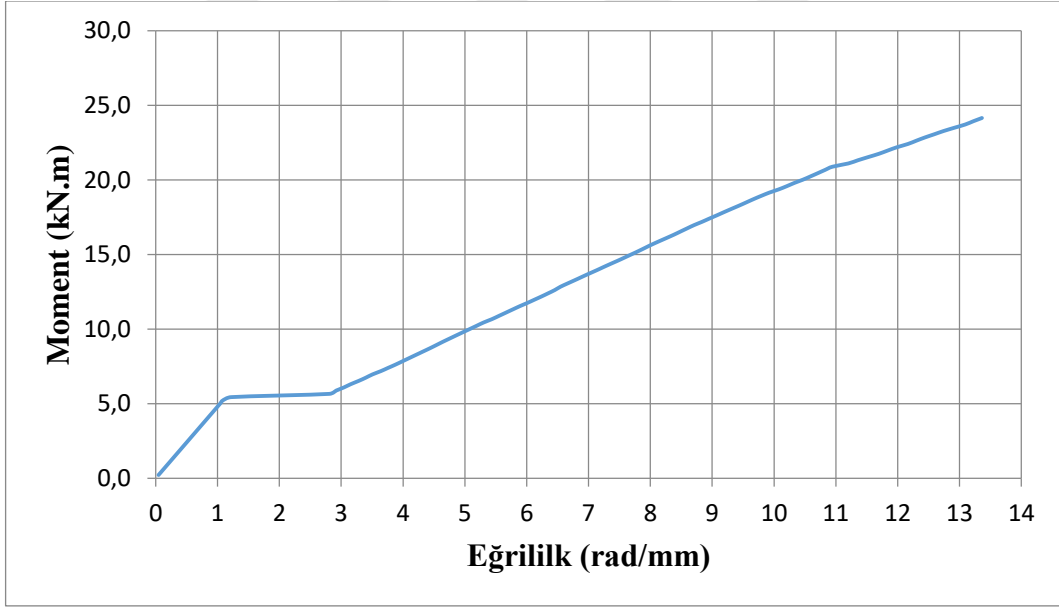
Şekil 198. 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 199’da verilmiştir.



**Şekil 199.** 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

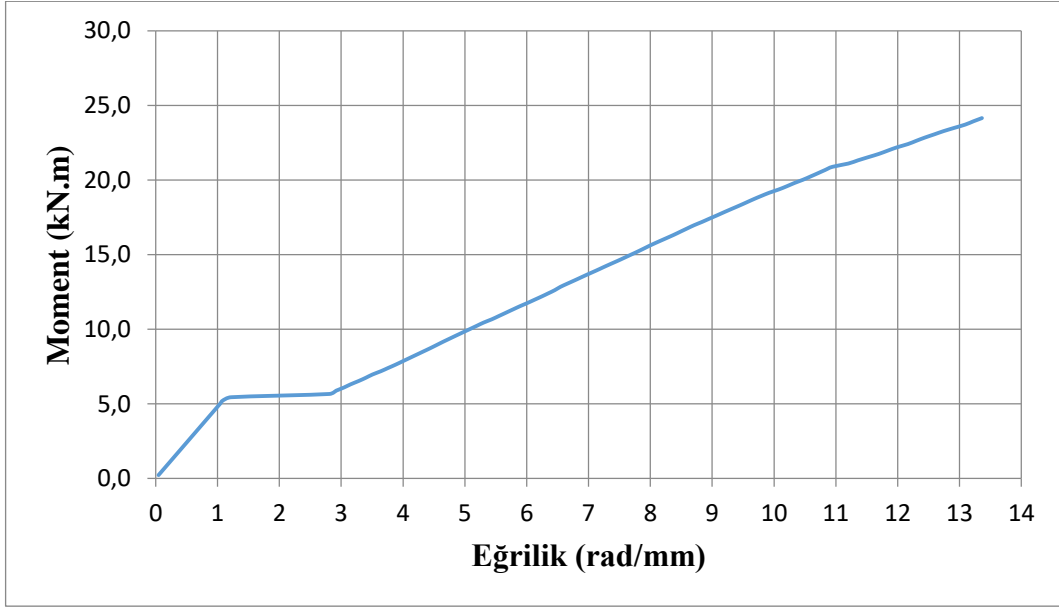
Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 200'de verilmiştir.



**Şekil 200.** 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

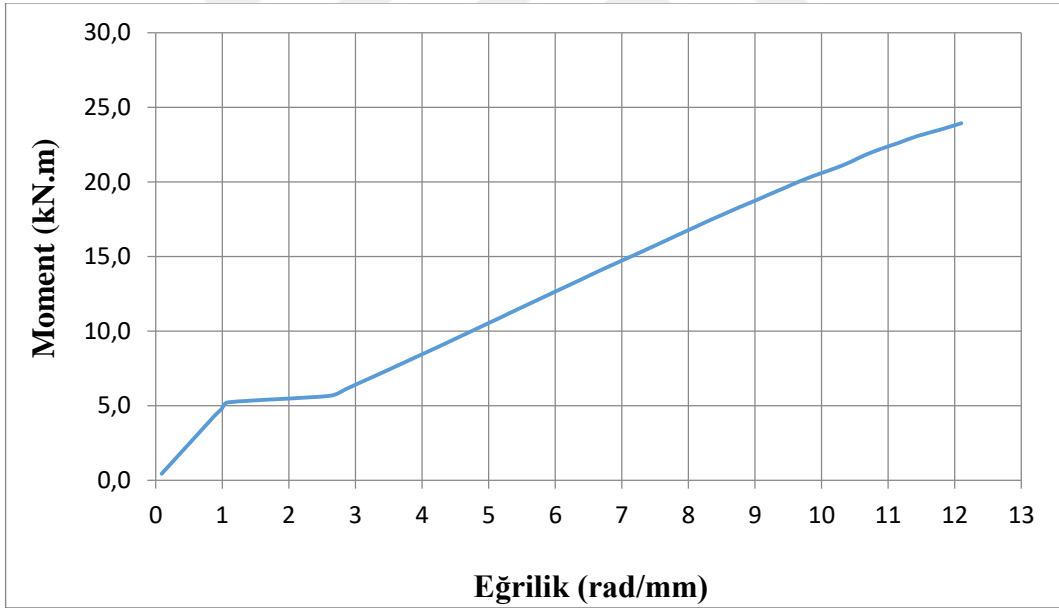
Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 201'de verilmiştir.





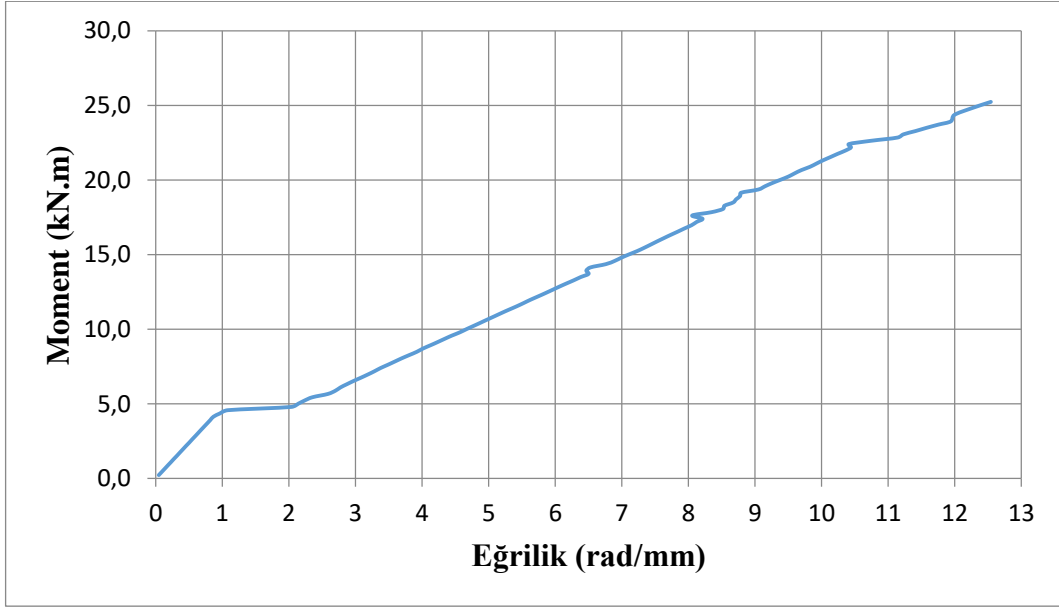
**Şekil 201.** 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 202’de verilmiştir.



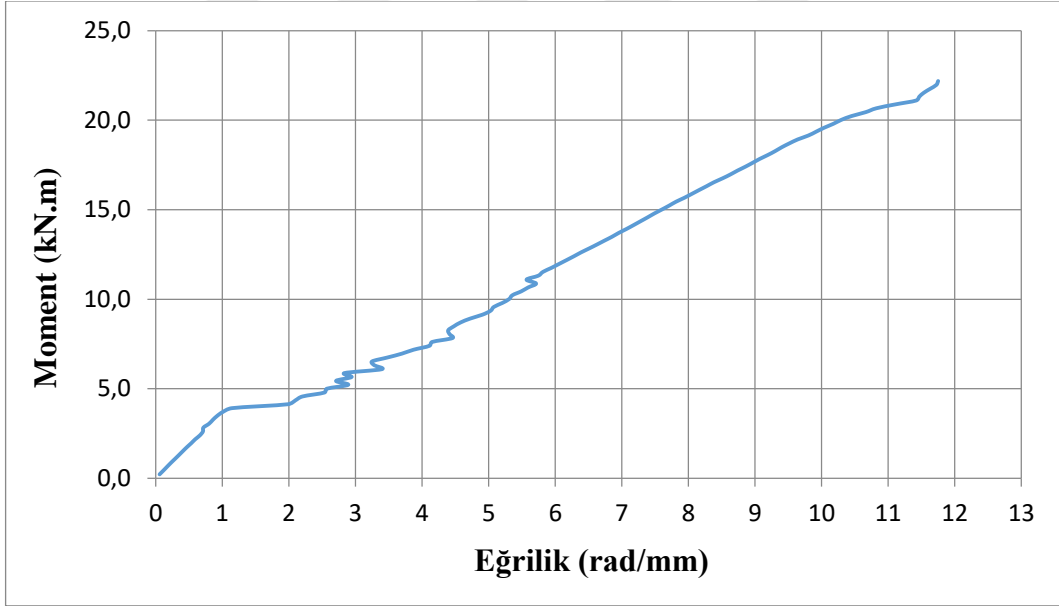
**Şekil 202.** 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 203’de verilmiştir.



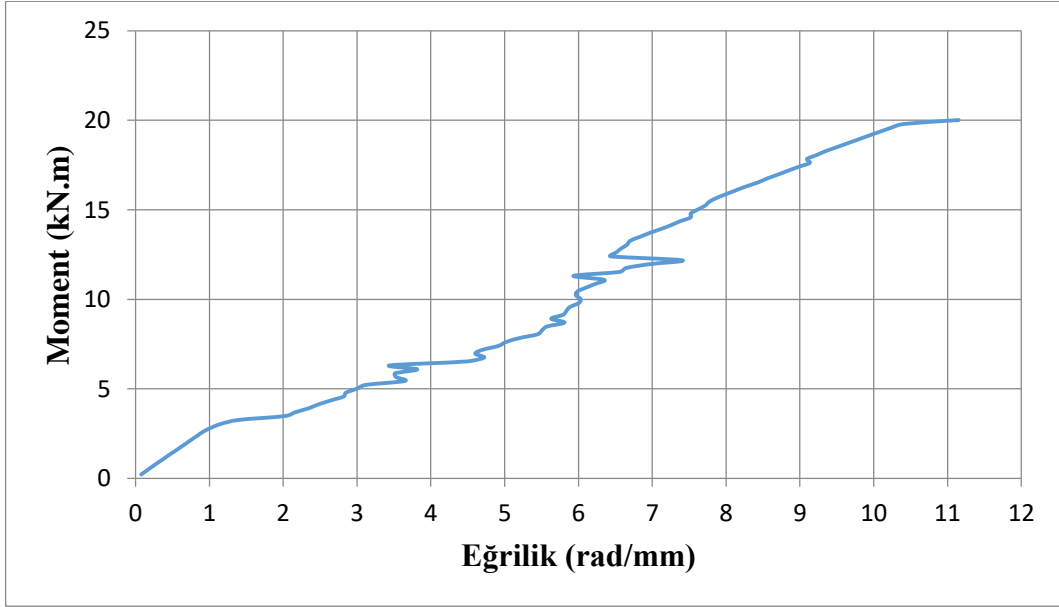
**Şekil 203.** 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 204'te verilmiştir.



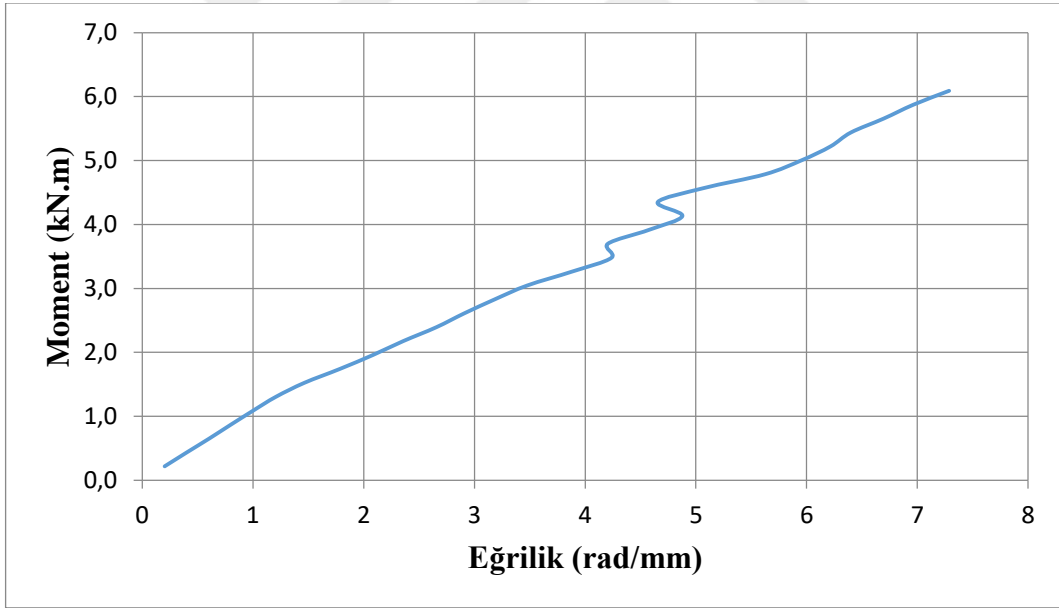
**Şekil 204.** 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 205'te verilmiştir.



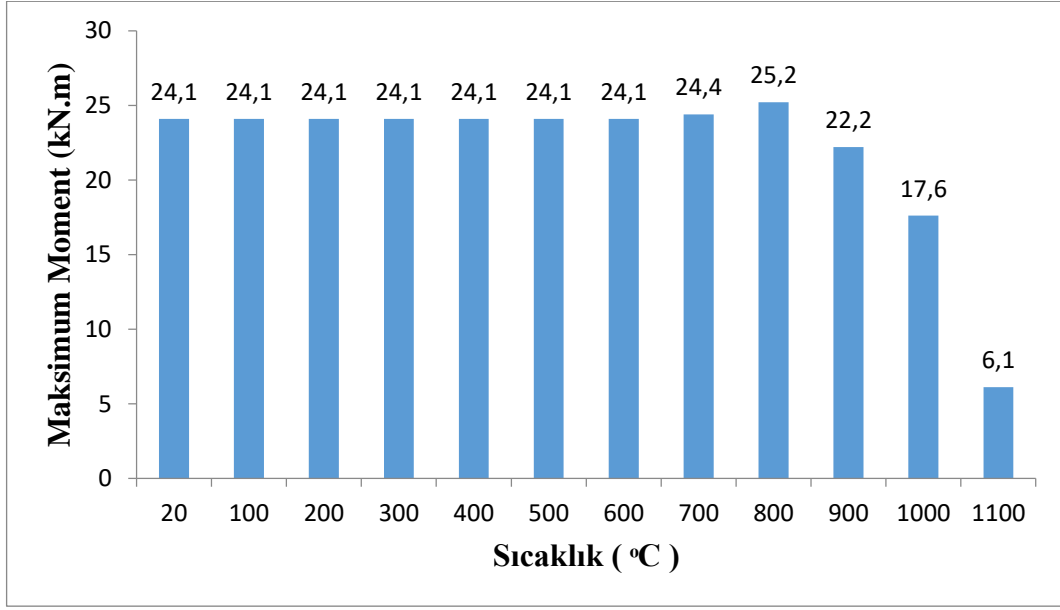
**Şekil 205.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Dört noktadan alınan yer değiştirme değerlerinden alınan veriler yardımıyla 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin hesaplanan eğrilik değerleri ile oluşturulan moment-eğrilik grafiği Şekil 206'da verilmiştir.



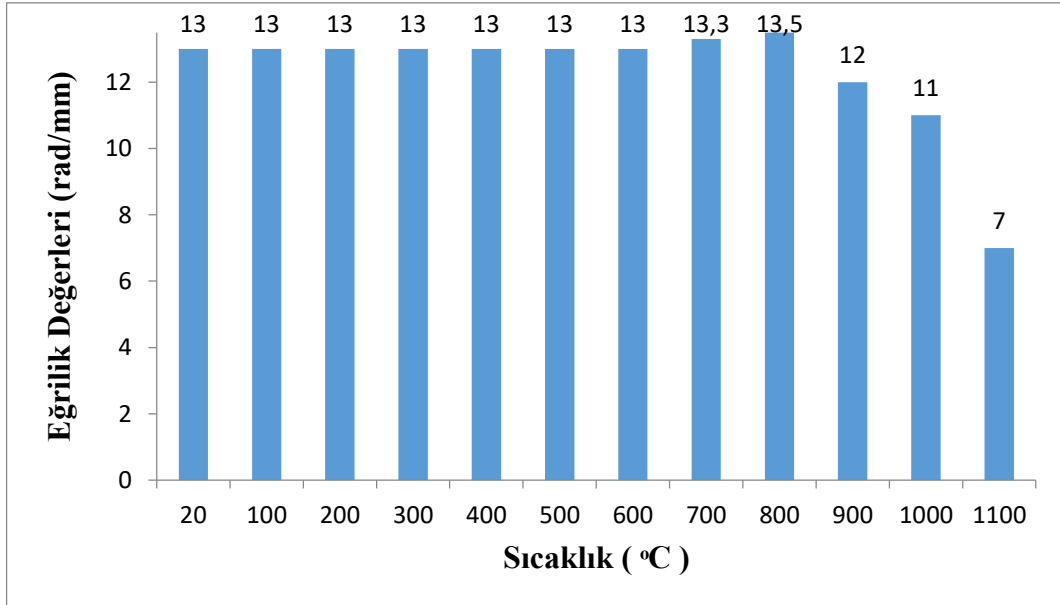
**Şekil 206.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin moment-eğrilik grafiği

Kirişlerin hepsi farklı sıcaklıklara maruz kaldıklarından farklı değerlerde yatay duruma geçmiştir. Yatay duruma gelen momentlerin bu değeri eğilmeye bağlı çatlakların belirginleşmeye başladığı ana denk gelmiştir. Tüm kesme kirişlerin alt donatı sayıları ve türü aynı olduğundan, tüm kirişler eğilmeye karşı benzer etki göstermiştir.



**Şekil 207.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerinde meydana gelen maksimum moment değerleri

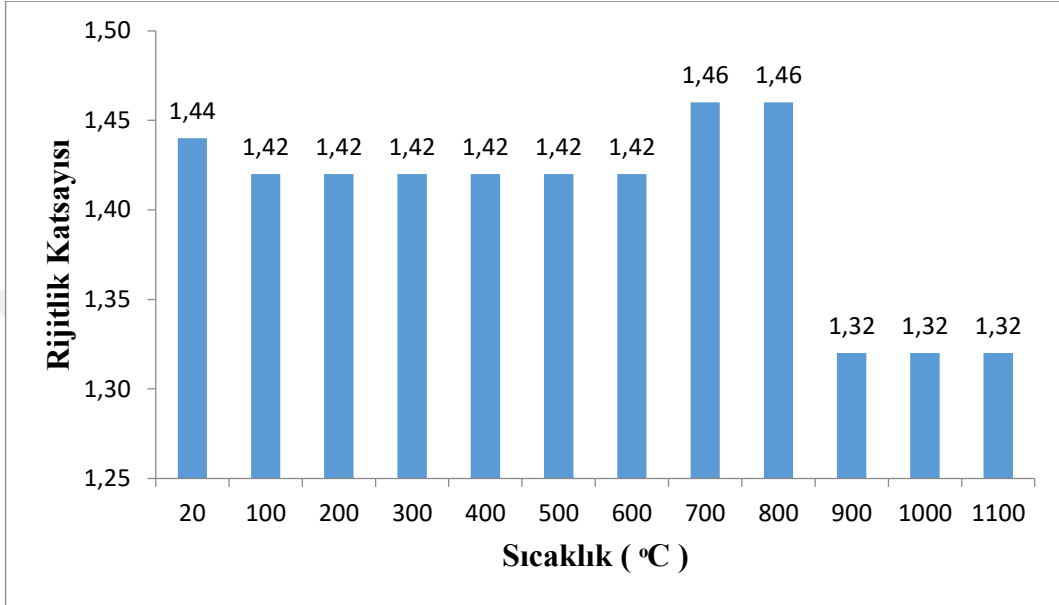
Şekil 207’de görüldüğü üzere, numuneler arasında 700°C ve 800°C sıcaklığa maruz kalan kirişler maksimum moment değerine ulaşmıştır. Kirişlerin iç sıcaklığı 150°C’ye ulaşana kadar maksimum moment değerleri sabit kalmış olup, 150°C-250°C’ye ulaştıkları zaman bir süre dayanım arttırdıkları için maksimum moment değerlerinde artış gerçekleştirmişlerdir. İç sıcaklıkları 300°C’nin üzerine çıktığı zaman ise maksimum moment değerlerinde düşüş gözlemlenmiştir.



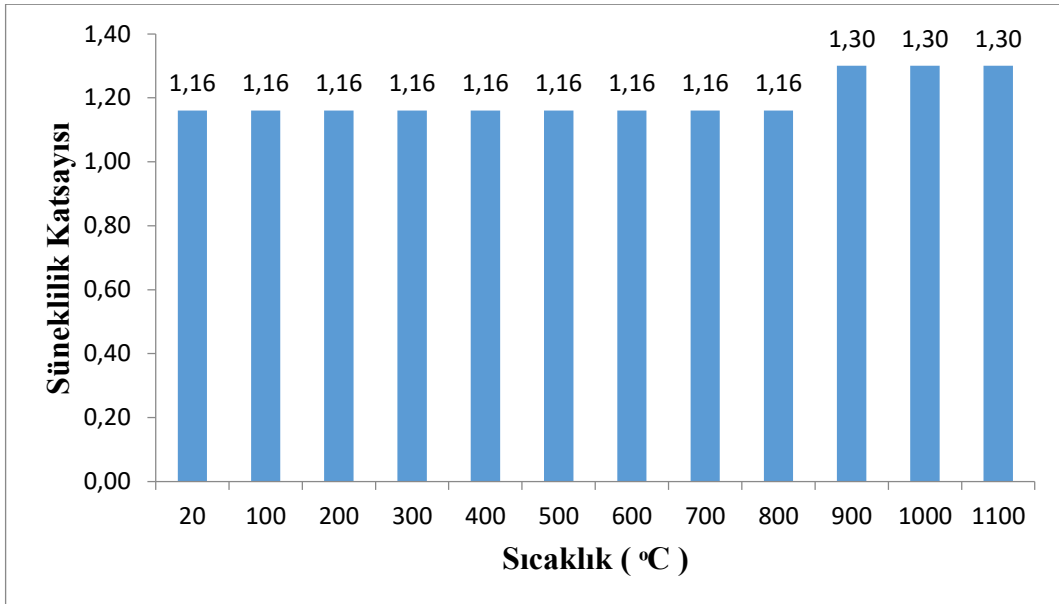
**Şekil 208.** Farklı sıcaklıklara maruz kalan kirişlerinde meydana gelen maksimum moment anındaki eğrilik değerleri

### Kesme kirişinin rijitlik-süneklik katsayıları

Literatürde verilenlere göre, akma noktası için maksimum yük değerinin %75'indeki, göçme noktası için ise maksimum yük değerinin %85'indeki eğrilik ve yer değiştirme hesaplarda kullanılmıştır. Süneklik, göçme noktasındaki yer değiştirmenin akma noktasındaki yer değiştirmeye oranıyla hesaplanır. Rijitlik ise yükleme geçmişinde elde edilen en büyük eğrilik değerinin, akma noktasındaki eğrilik değerine bölünmesiyle hesaplanır. (Özkal, 2012)



Şekil 209. Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerindeki rijitlik katsayıları

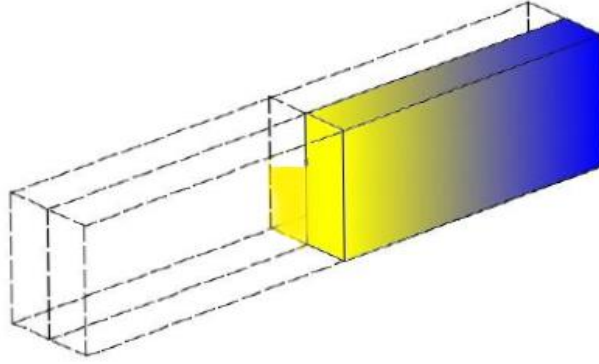


Şekil 210. Farklı sıcaklıklara maruz kalan kesme kirişlerindeki süneklik katsayıları

### Kesme kirişi betonunun ısı profilleri

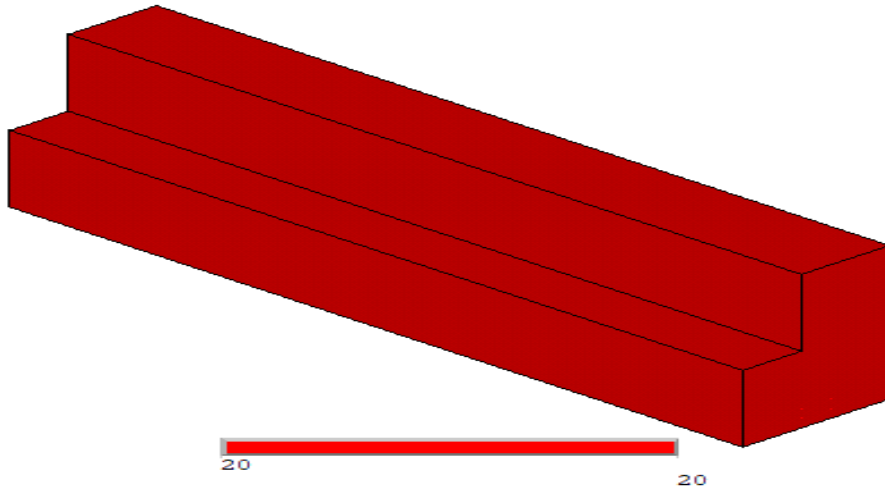
Ortamdaki yangın sıcaklığına maruz kalan betonarme bir yapının, ortam ısısı ile kendi ısısının aynı olması mümkün değildir. Beton ortamdaki ısıyı az iletmesi nedeniyle yavaş

yavaş almaktadır. Kesme grubu kirişlerin farklı sıcaklıklardaki ISO yangın eğrisine göre verilen ortam sıcaklıkları ve kirişin ulaştığı maksimum sıcaklık değerlerinin aynı olmadığı bilindiğinden her ortam sıcaklığı için iç yüzey sıcaklığının ısı profili Şekil 211'deki gibi betonun iç yüzeyinden kesit alınarak aşağıda verilmiştir. Sonuçların kirişin her yüzey sıcaklığının aynı olmaması ve ortam sıcaklığına karşı yüzeyinin ulaştığı maksimum sıcaklık değerleri göz önüne alınarak değerlendirilmesi gerekmektedir.



**Şekil 211.** Betonun ısı profili için kesit alma şekli temsili

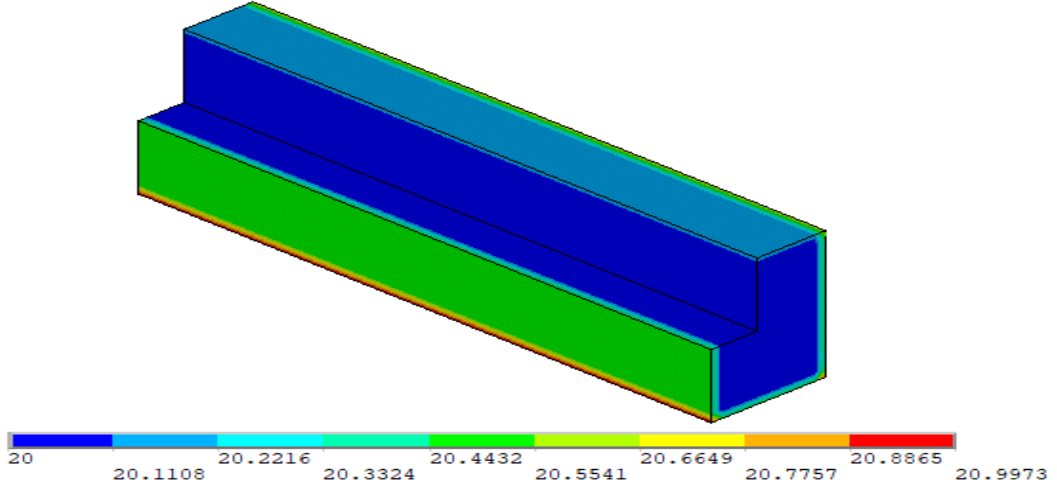
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 212'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 20°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin tüm yüzeyindeki sıcaklık değeri 20°C olmuştur.



**Şekil 212.** 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişlerinin beton iç kesit profili

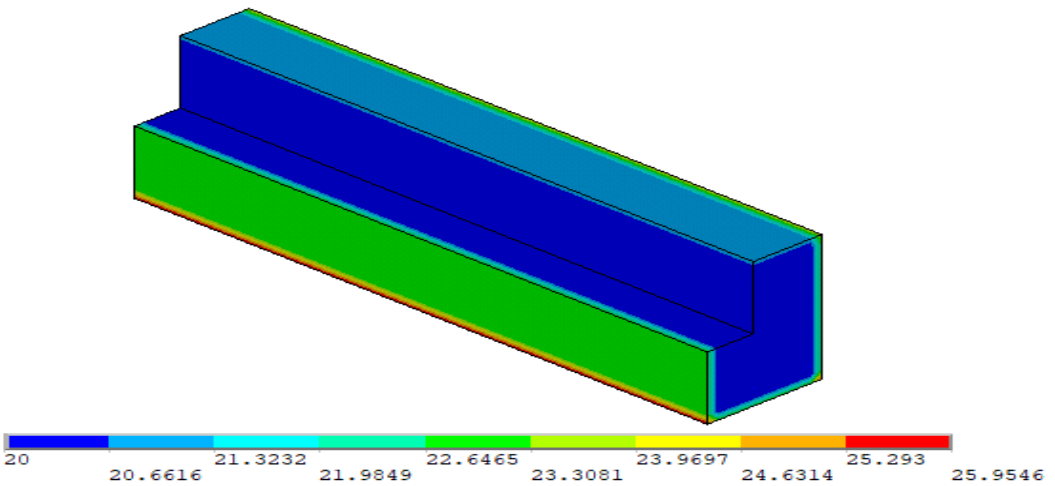
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 213'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü

üzere ortam sıcaklığı 100°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 20,9973°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 20,3324°C’de seyretmektedir.



**Şekil 213.** 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

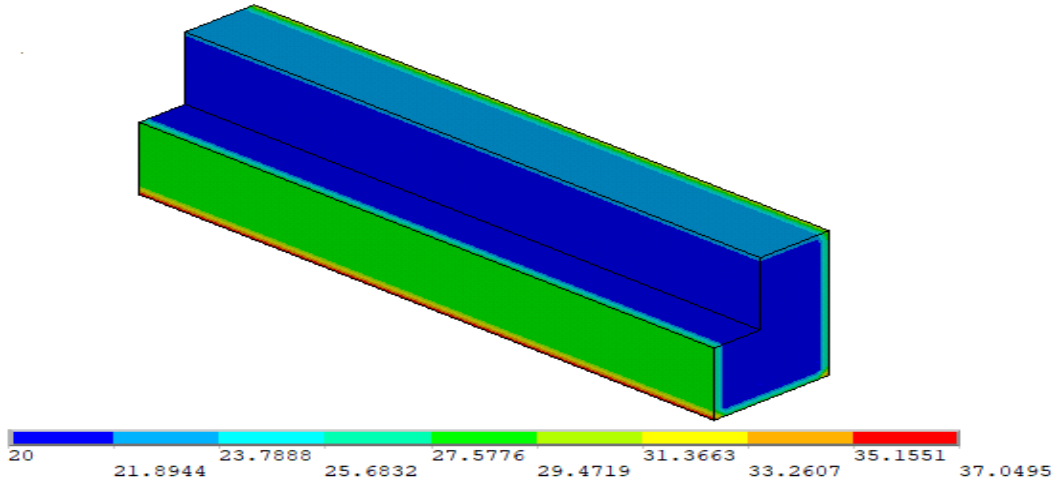
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 214’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 200°C iken eğilme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 25,9546°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 21,9849°C’de seyretmektedir.



**Şekil 214.** 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

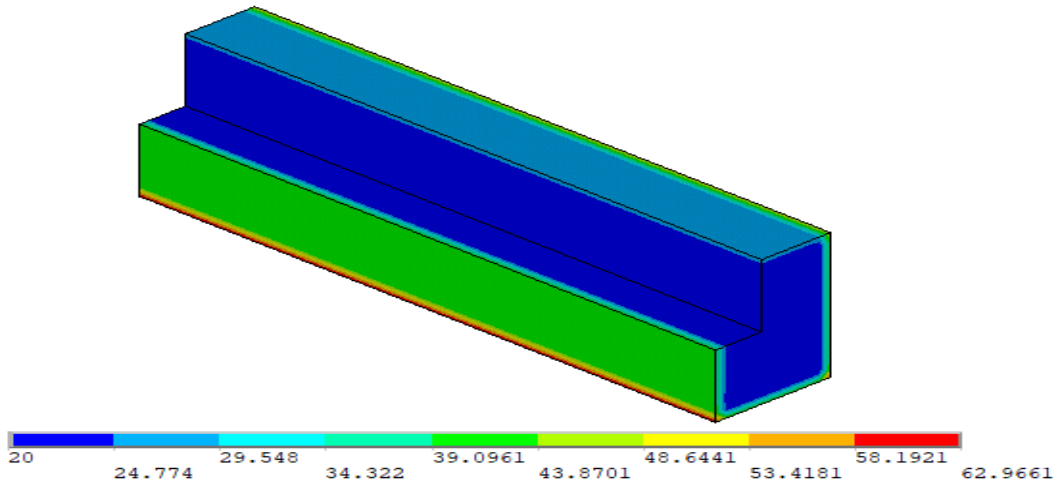
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 215’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü

üzere ortam sıcaklığı 300°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 37,0495°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 25,6832°C’de seyretmektedir.



**Şekil 215.** 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 216’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 400°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 62,9661°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 34,322°C’de seyretmektedir.

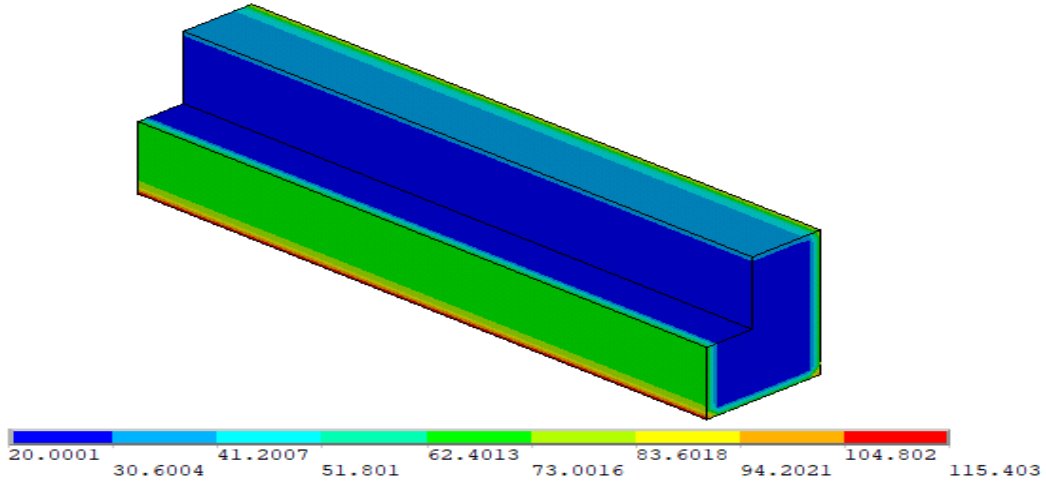


**Şekil 216.** 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 217’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü

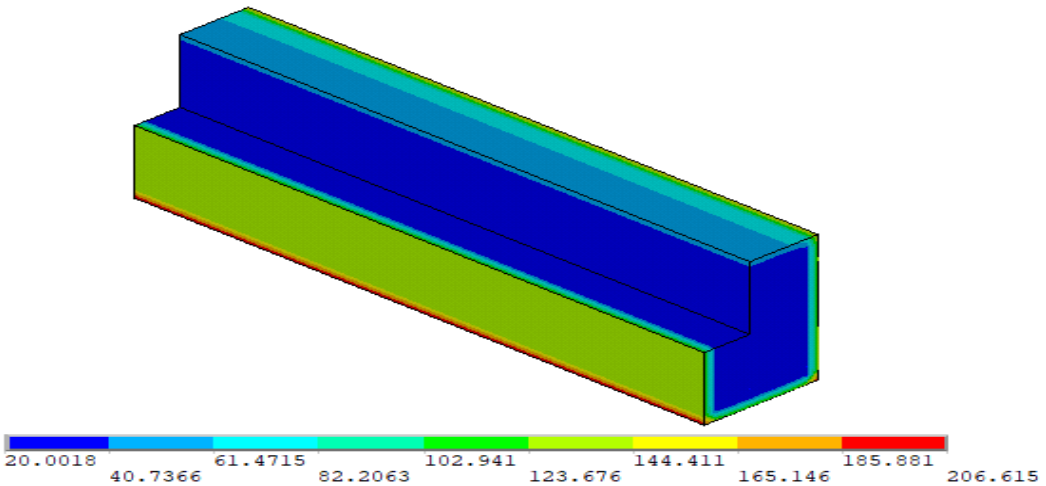


üzere ortam sıcaklığı 500°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 115,403°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 51,801°C’de seyretmektedir.



**Şekil 217.** 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

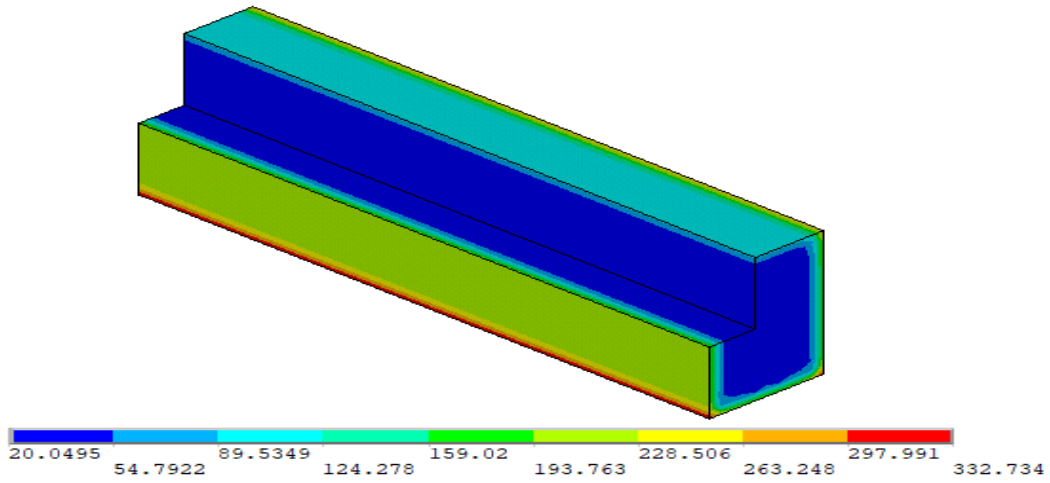
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 218’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 600°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 206,615°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 82,2063°C’de seyretmektedir.



**Şekil 218.** 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

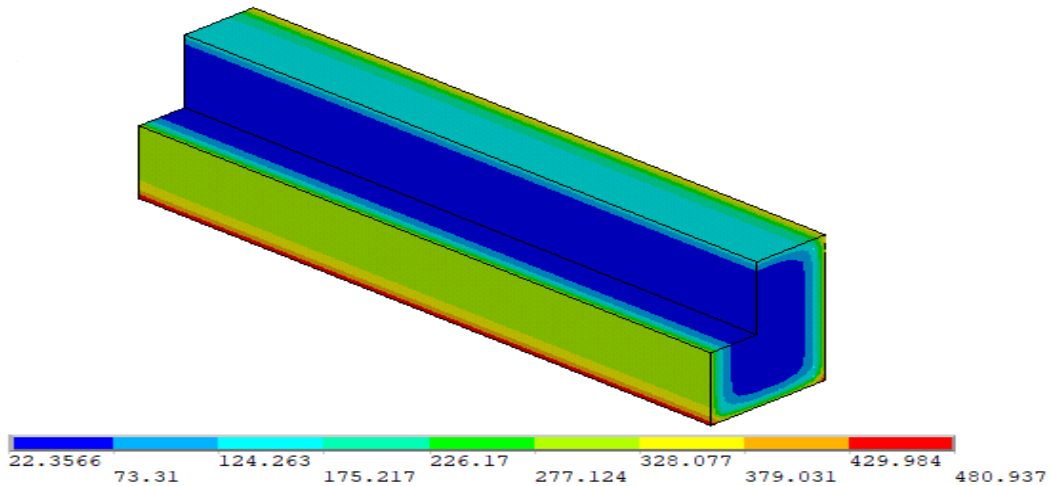
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 219’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü

üzere ortam sıcaklığı 700°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 332,734°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 124,278°C’de seyretmektedir.



**Şekil 219.** 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

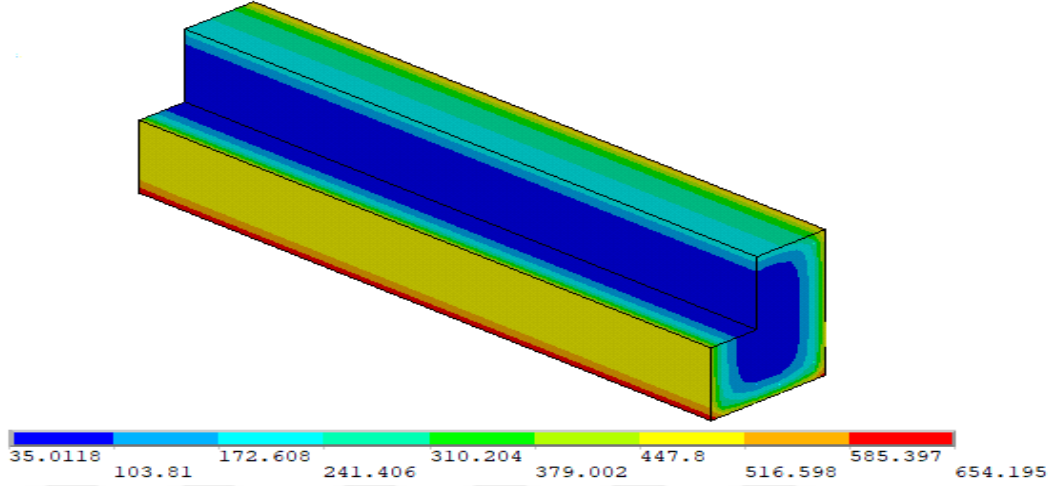
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 220’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 800°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 480,937°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 175,217°C’de seyretmektedir.



**Şekil 220.** 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

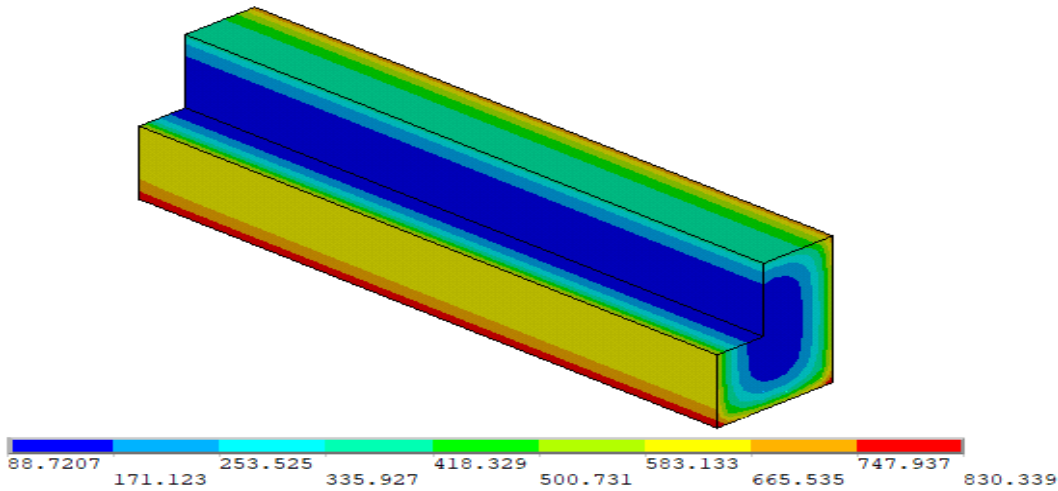
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın

eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 221’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 900°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 654,195°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 241,406°C’de seyretmektedir.



**Şekil 221.** 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

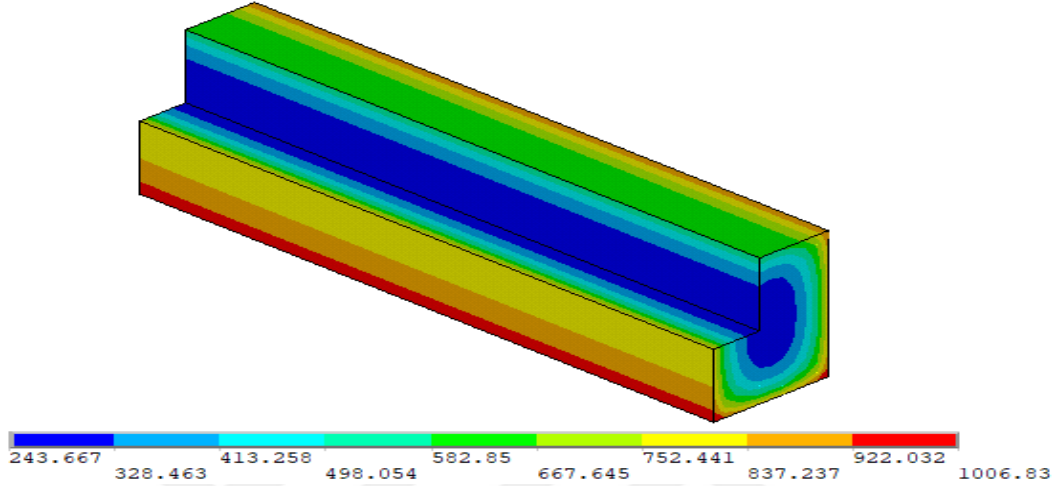
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 222’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 1000°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 830,339°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 335,927°C’de seyretmektedir.



**Şekil 222.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi

10800 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişlerinin dış yüzeylerinde olduğu gibi iç kesit alınan yüzeylerde de köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin iç kesiti ısı profili Şekil 223'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 1100°C iken kesme kirişinin beton iç kesitinin ulaştığı azami sıcaklık değeri 1006,83°C olmuştur. Fakat kirişin iç kısımları henüz 498,054°C'de seyretmektedir.

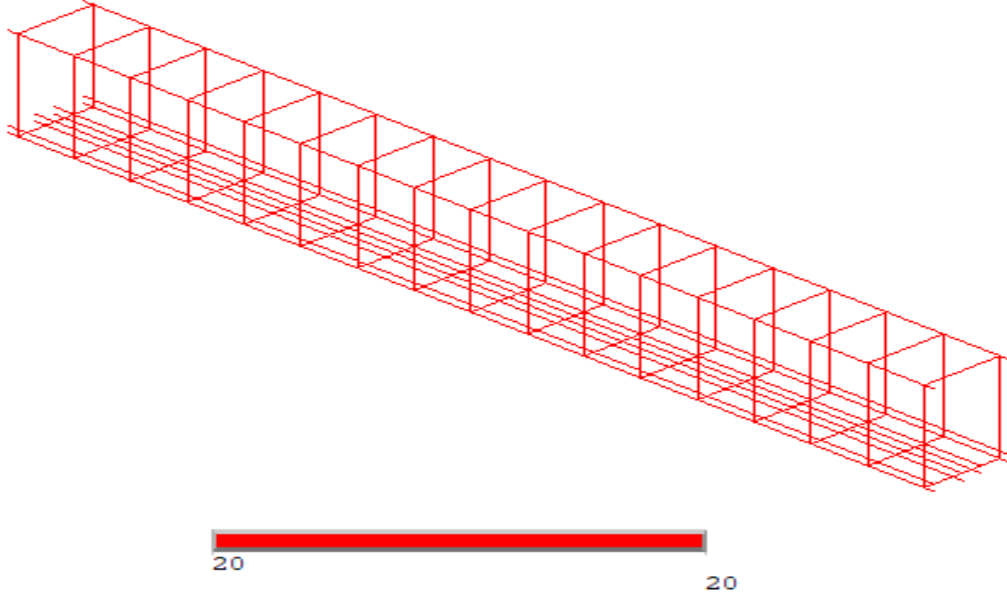


**Şekil 223.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişlerinin beton iç kesit profili

Görüldüğü üzere her sıcaklık değeri için farklı ısı profilleri oluşmaktadır. Sıcaklık artışı oldukça kesme kirişinin iç yüzeyinde de sıcaklık artışı olmuştur. Maksimum sıcaklık değerinin köşe kısımlarında olduğu görülmüştür. Kirişin tepe kısımlarının ısıya direk maruz kalmaması sebebiyle, diğer kısımlara göre daha az sıcaklık artışı olmuştur.

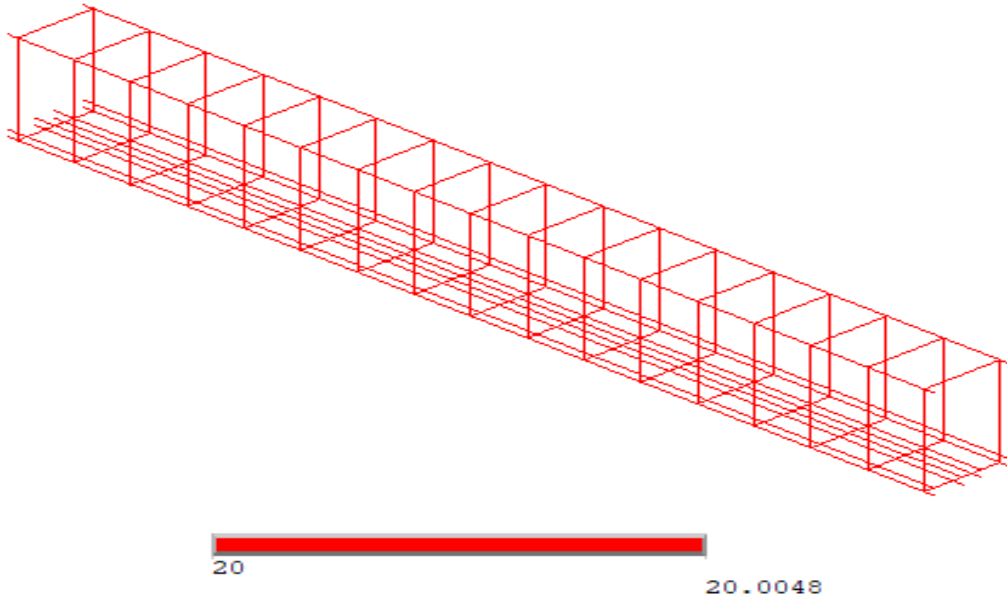
### **Kesme kirişi donatısının ısı profilleri**

Farklı sıcaklıklardaki kirişlerin donatı ısı profili dağılımları aşağıda verilmiştir. Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 224'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 20°C iken kiriş donatılarının tüm yüzeyindeki sıcaklık değeri 20°C olmuştur.



**Şekil 224.** 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

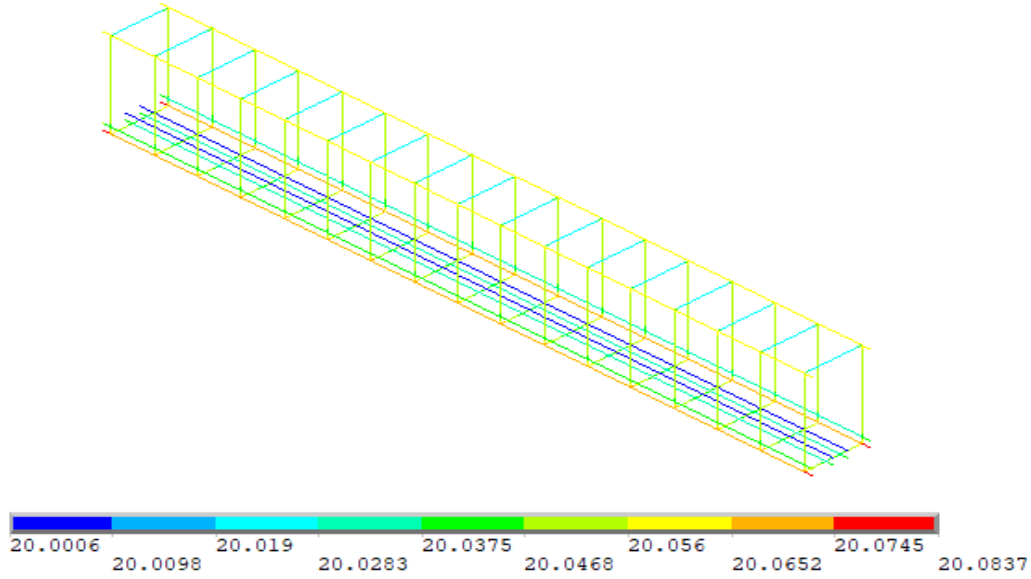
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 225'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 100°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 20,0048°C olmuştur.



**Şekil 225.** 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

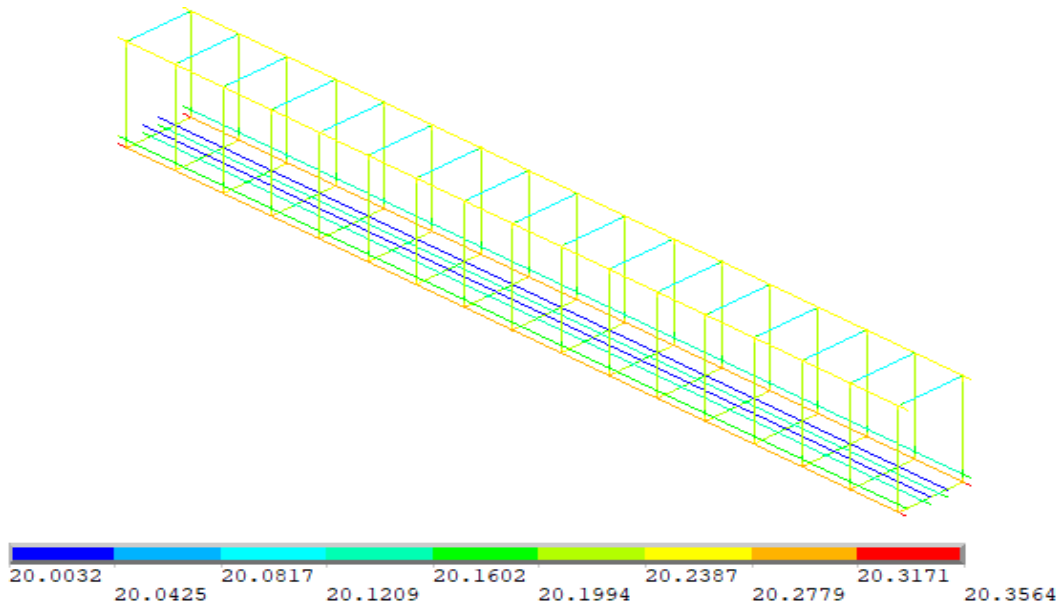
Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin

donatılardaki ısı profili Şekil 226’da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 200°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 20,0837°C olmuştur.



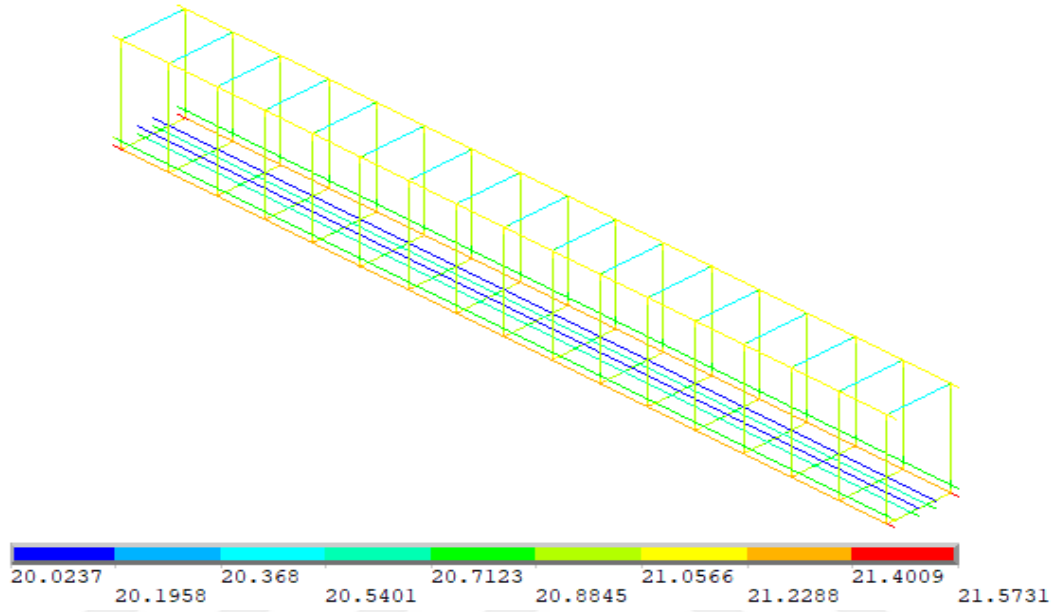
**Şekil 226.** 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 227’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 300°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 20,3564°C olmuştur.



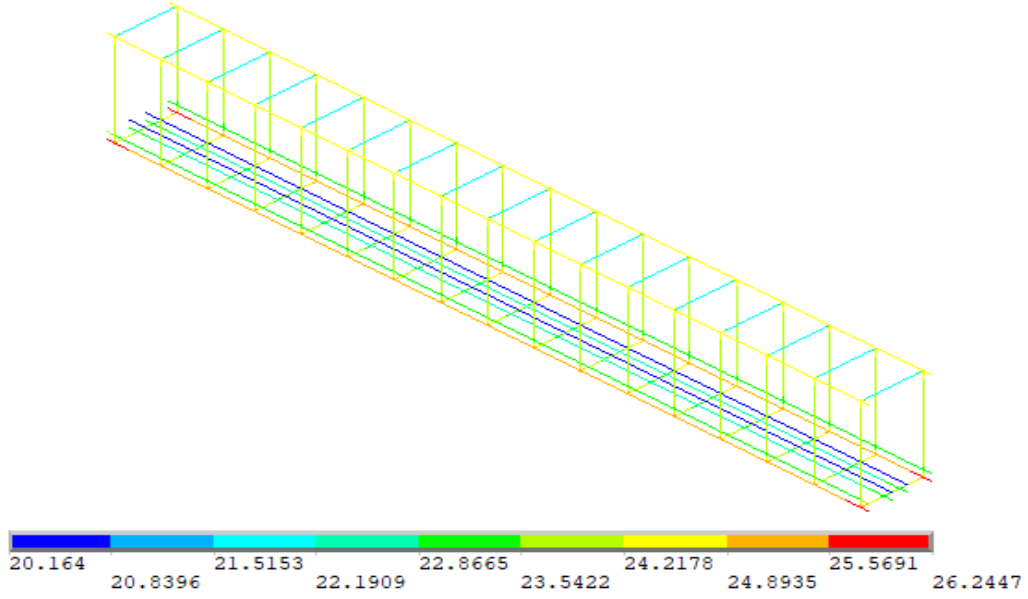
**Şekil 227.** 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 228'de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 400°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 21,5731°C olmuştur



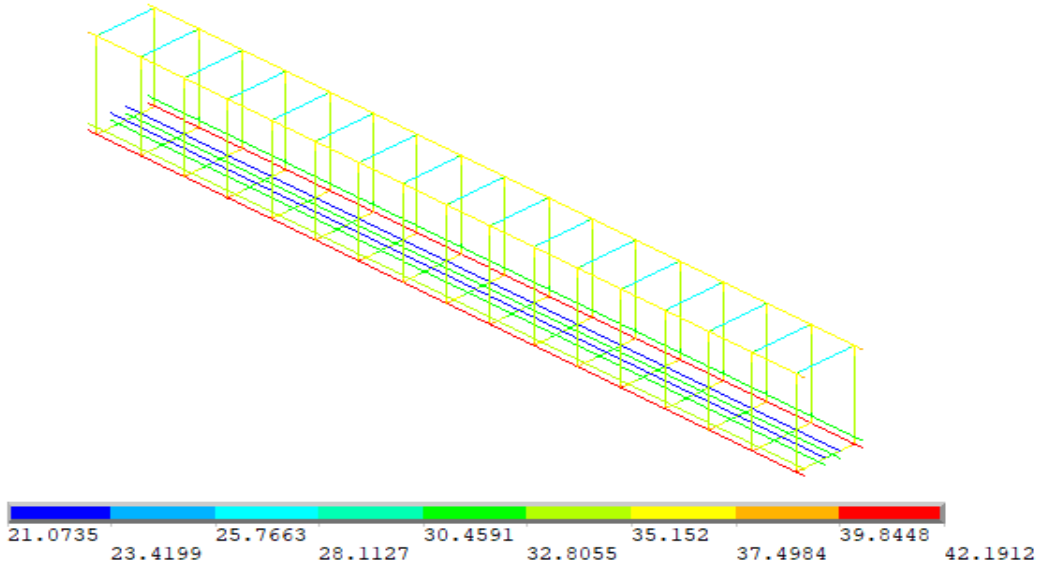
**Şekil 228.** 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 229'da verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 500°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 26,2447°C olmuştur.



**Şekil 229.** 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 230’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 600°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 42,1912°C olmuştur.

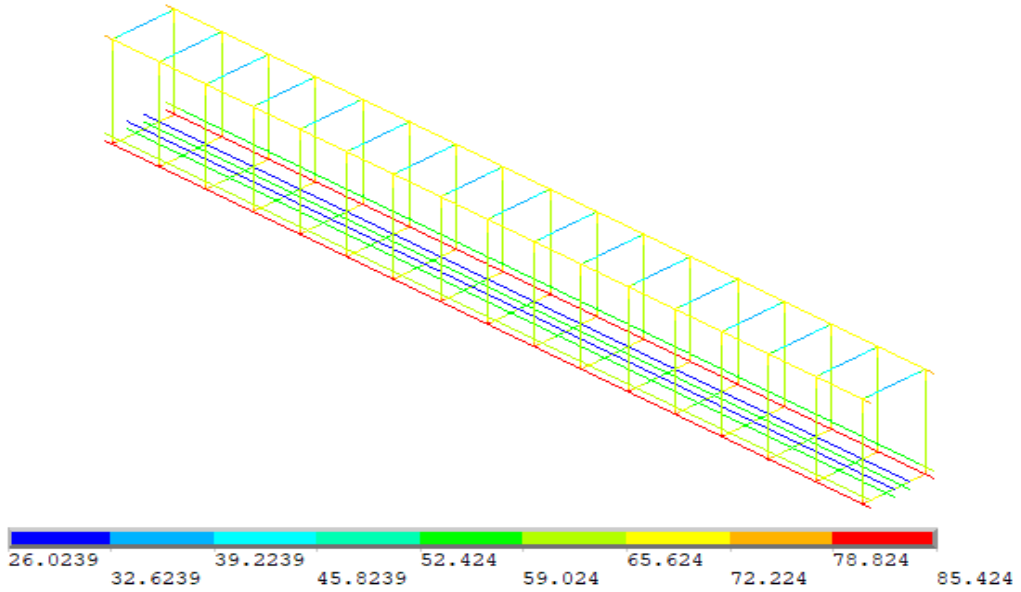


**Şekil 230.** 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin

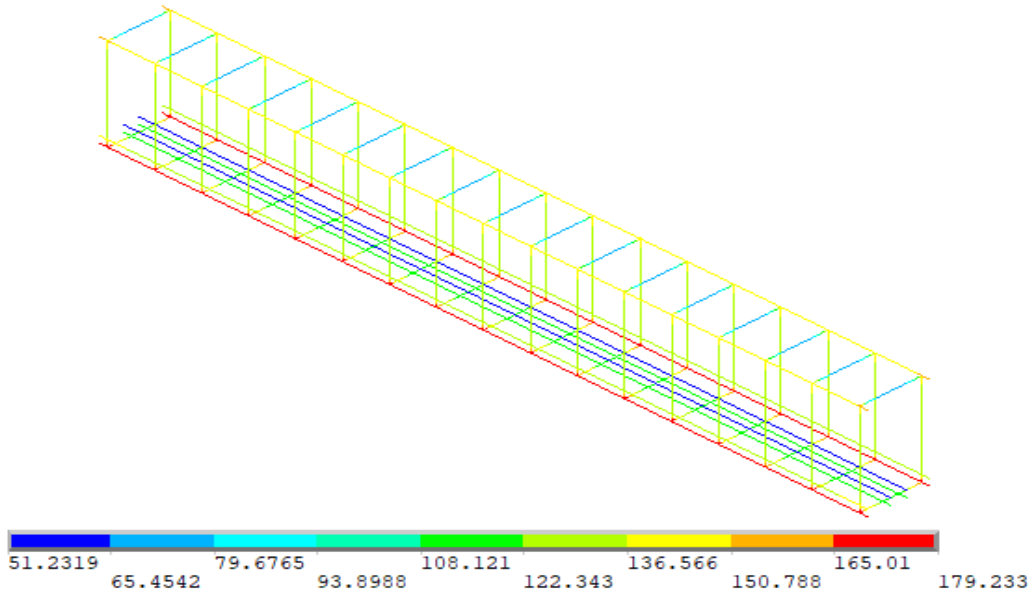


donatılardaki ısı profili Şekil 231’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 700°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 85,424°C olmuştur.



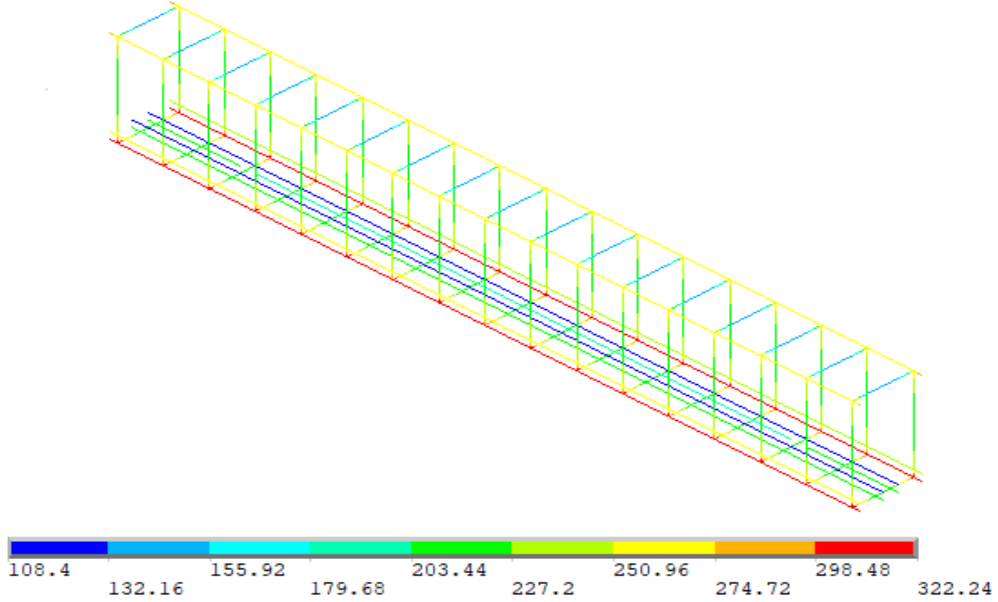
**Şekil 231.** 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık eğilme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan eğilme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 232’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 800°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 189,737°C olmuştur.



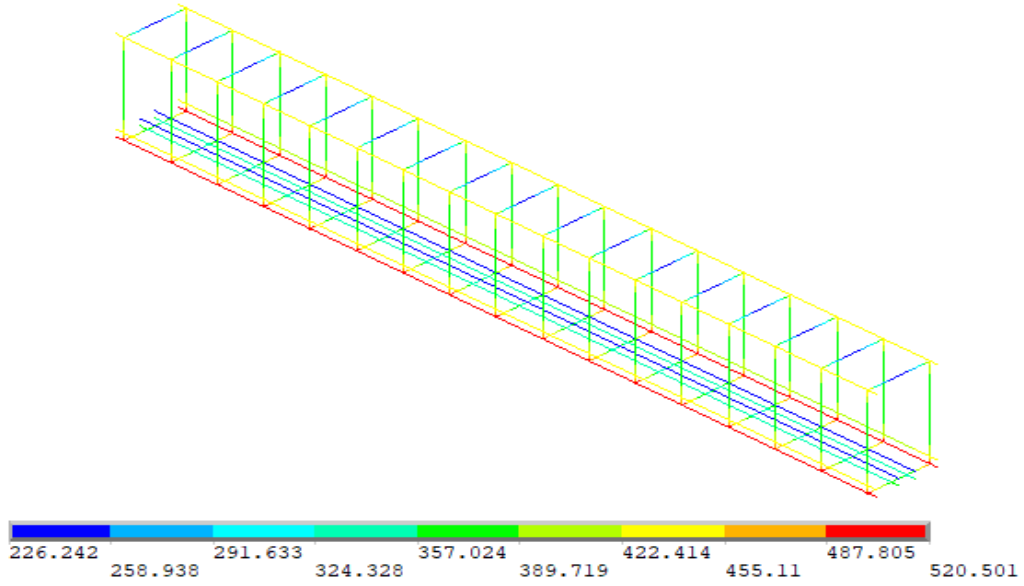
**Şekil 232.** 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 233'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 900°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 322,24°C olmuştur.



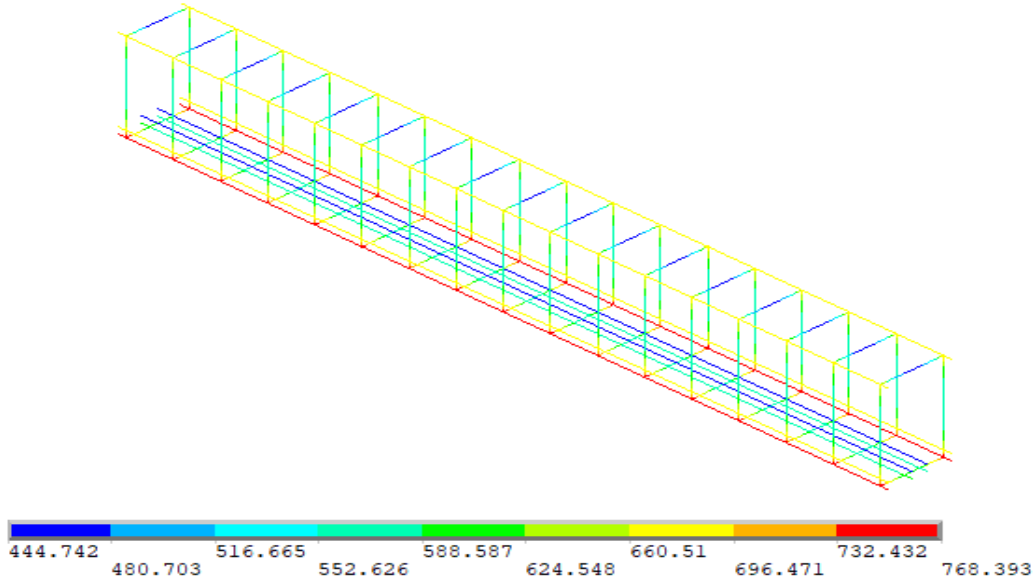
**Şekil 233.** 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn'de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 234'te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 1000°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 520,501°C olmuştur.



**Şekil 234.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Literatürde kullanılan ve gerçeğe en yakın eğri olan ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 10800 sn’de ulaşmaktadır. Azami sıcaklık kesme kirişi donatılarının tıpkı kirişlerdeki gibi köşe kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin donatılardaki ısı profili Şekil 235’te verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere ortam sıcaklığı 1100°C iken kiriş donatılarının ulaştığı azami sıcaklık değeri 768,393°C olmuştur.

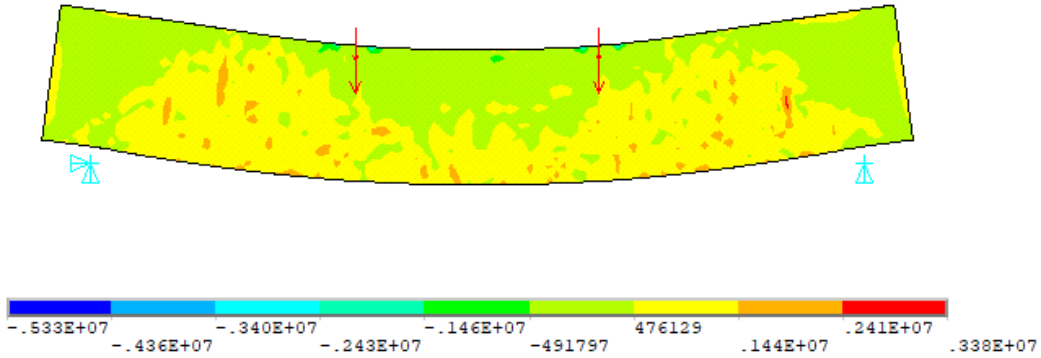


**Şekil 235.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı ısı profili

Görüldüğü üzere her sıcaklık değeri için farklı donatı ısı profilleri oluşmaktadır. Böylece ortam sıcaklığında artışı oldukça kesme kirişinin donatılarında da sıcaklık artışı olmuştur. Fakat bu sıcaklık artışı betondaki gibi fazla olmamıştır. Donatılardaki maksimum sıcaklık dağılımları tıpkı betondaki gibi köşelerde olmuştur.

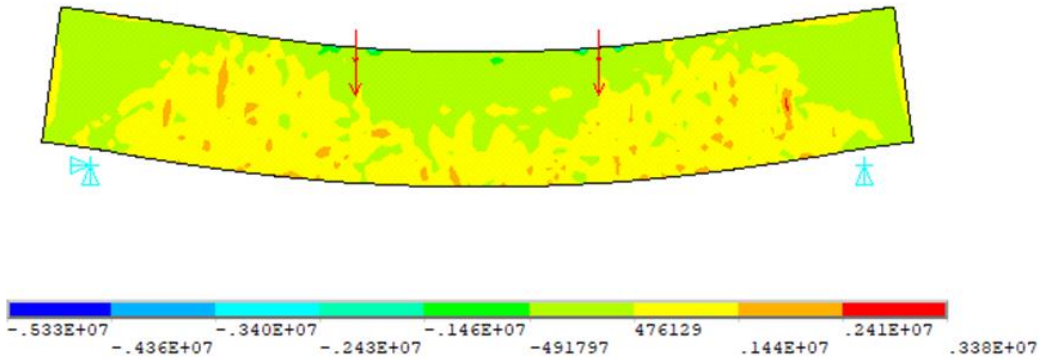
### Kesme kirişi betonunun asal çekme gerilmeleri

Farklı sıcaklıklardaki kirişlerin asal çekme gerilmeleri aşağıda verilmiştir. ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük arasındaki kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 236'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



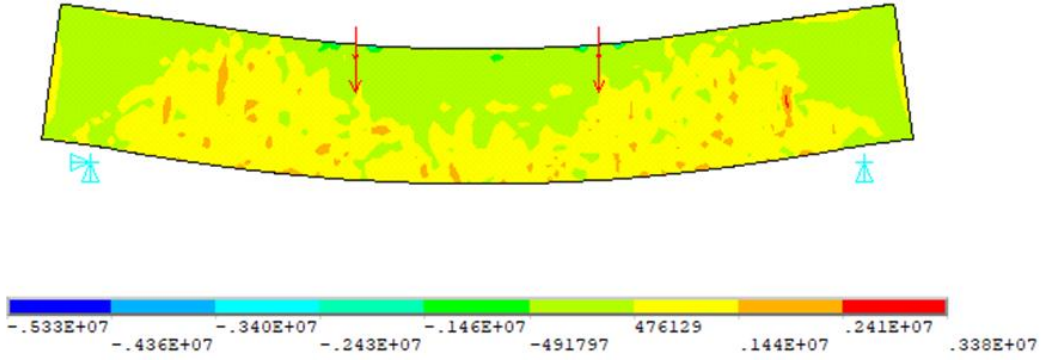
Şekil 236. 20°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük arasındaki kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 237'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



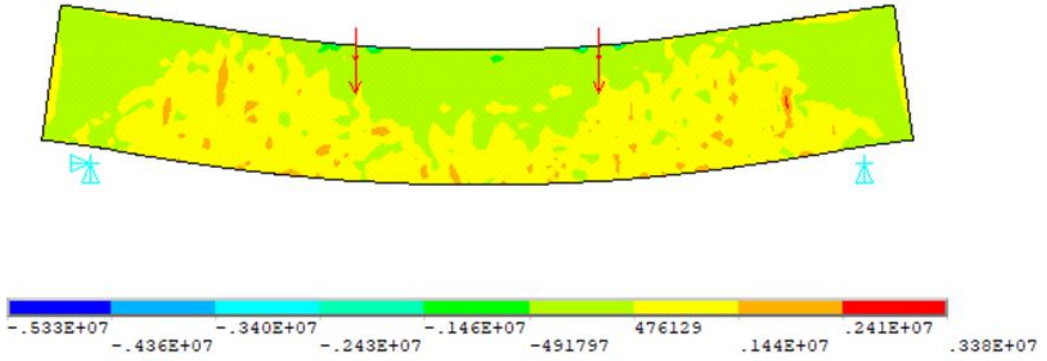
Şekil 237. 100°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük arasındaki kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 238'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



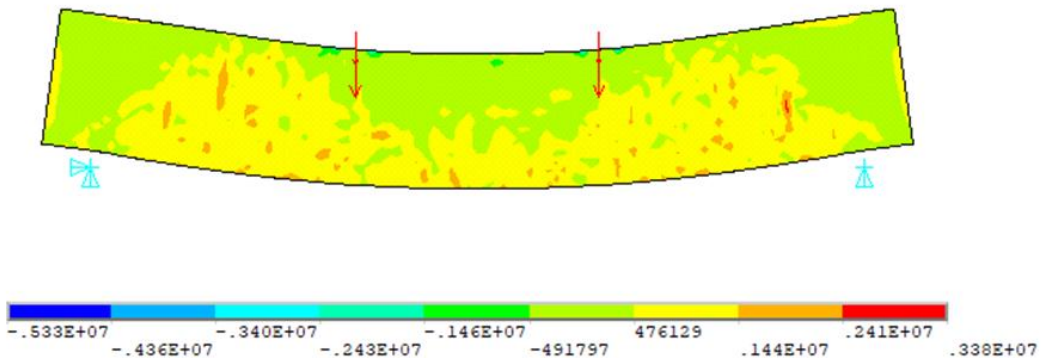
**Şekil 238.** 200°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük arasındaki kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 239'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



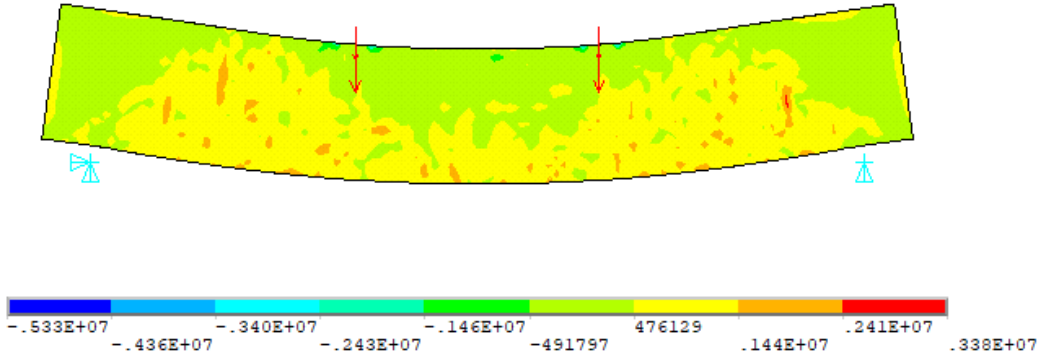
**Şekil 239.** 300°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük arasındaki kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 240'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



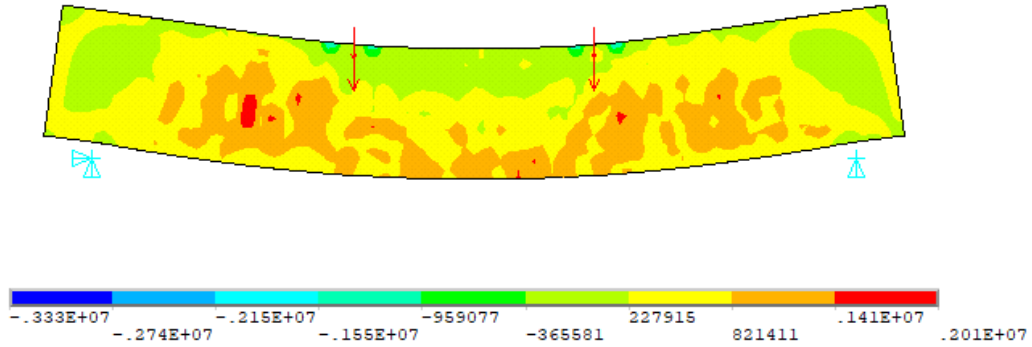
**Şekil 240.** 400°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük arasındaki kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 241'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



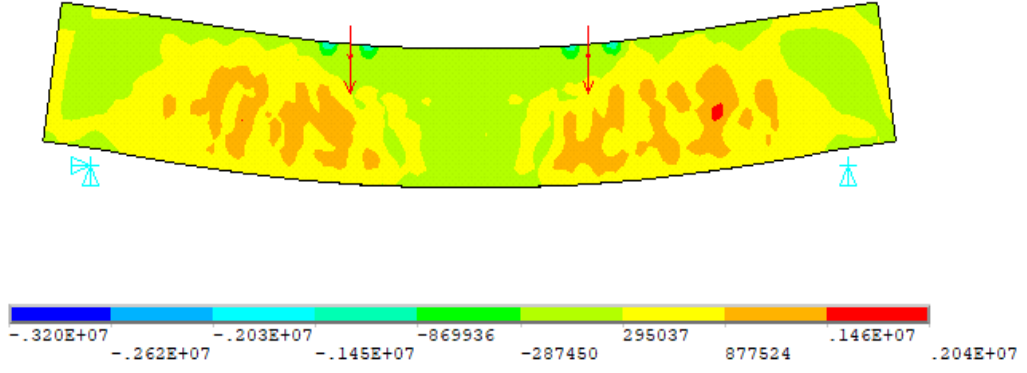
Şekil 241. 500°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük arasındaki kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 242'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



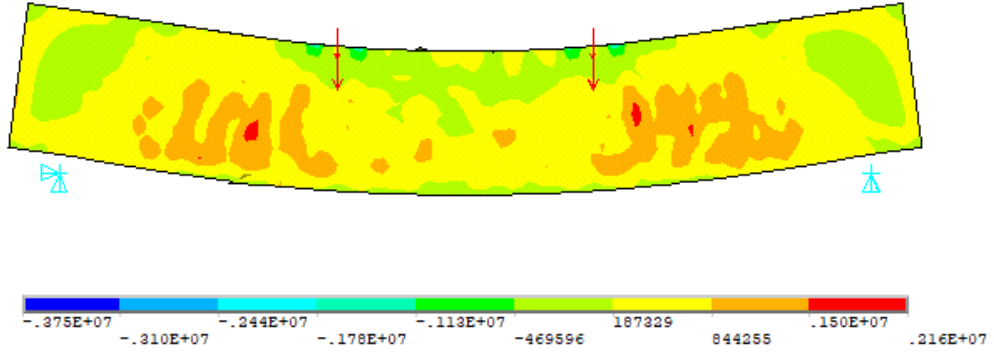
Şekil 242. 600°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük arasındaki kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 243'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



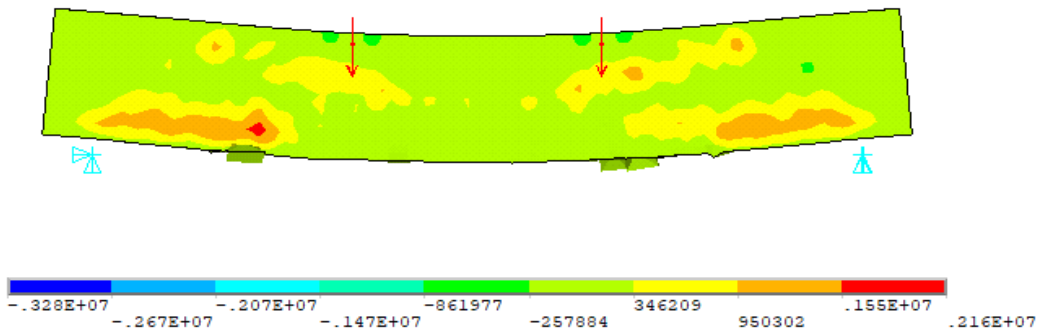
**Şekil 243.** 700°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük arasındaki kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 244'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



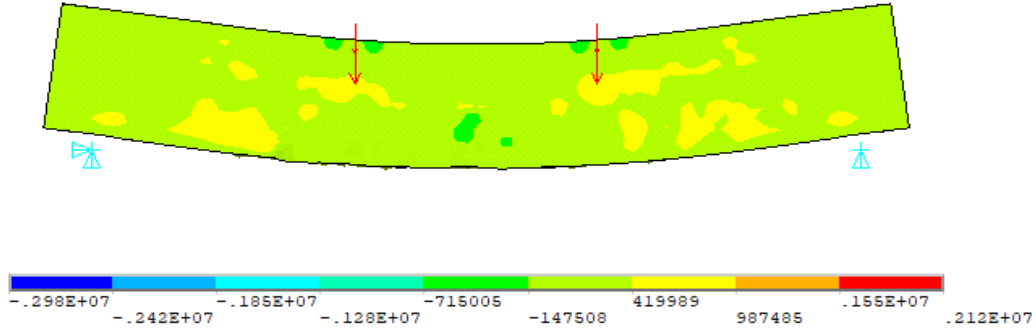
**Şekil 244.** 800°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 245'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



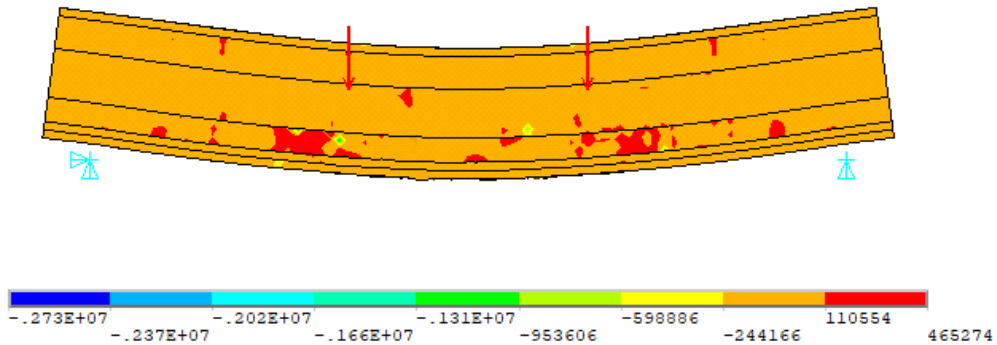
**Şekil 245.** 900°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 246'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



Şekil 246. 1000°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 10800 sn'de ulaşmaktadır. Azami asal çekme gerilmeleri kesme kirişlerinin mesnet ve yük kısımlarında olmuştur. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 247'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



Şekil 247. 1100°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal çekme gerilmeleri

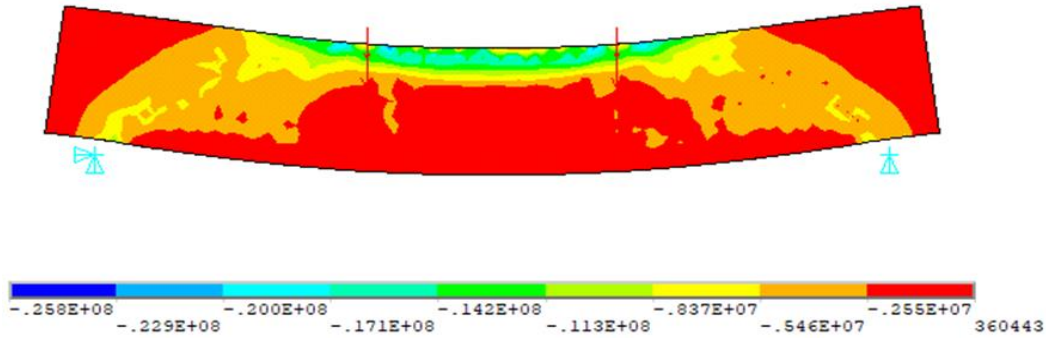
Farklı sıcaklıklardaki kirişlerin asal çekme gerilmelerine bakılacak olursa, ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığının 700°C ve 800°C olduğu zaman betonun iç sıcaklığı 150°C ve 250°C arasında olduğundan betonun dayanımının arttığı görülmüştü. Bu yüzden asal çekme gerilmelerinin dayanım ile orantılı olduğu görülmüştür. Kesme kirişlerinde dayanım arttıkça asal çekme gerilmelerinde artış görülmüştür. En yüksek dayanım, betonun iç sıcaklığının 150°C ve 250°C sıcaklıkta olduğundan, maksimum asal çekme gerilmeleri bu sıcaklık aralıklarında görülmüştür. En düşük dayanım, betonun iç sıcaklığının 500°C



sıcaklığının üzerine çıktığında minimum asal çekme gerilmeleri bu sıcaklık aralıklarında görülmüştür.

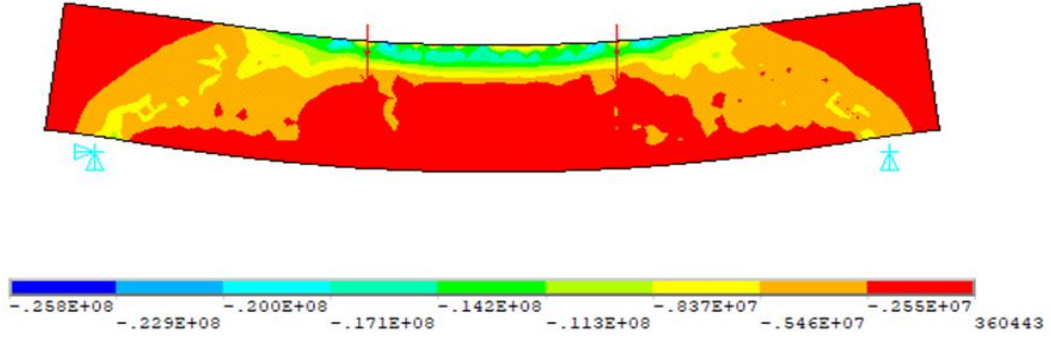
### Kesme kirişinin asal basınç gerilmeleri

Kiriş üzerine yük uygulanmaya başlandığında taşıma gücüne ulaşmadan çok önce çekme kısmında çatlakların ortaya çıkması, betonarme kirişlerin davranışı için genel kabuldür. Ancak beton ve çelik donatı arasında uyumlu bir davranış görülmesi için birim şekil değiştirmelerin %0,1'den az olması şartıyla çatlaklar kılcal ve önemsiz nitelikte olmaktadır. (Özkal, 2017). Kirişin göçme durumundaki gerilmeleri gösteren şekiller aşağıda verilmiş olup, asal birim şekil değiştirmenin maksimum olduğu bölgeler kırmızı ile, asal birim şekil değiştirmelerin %0,11'den az olduğu bölgeler yeşil ile gösterilmiştir. ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 248'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



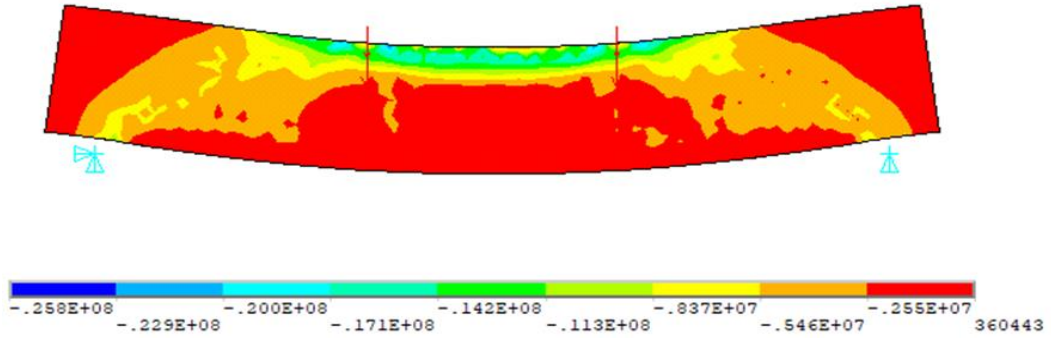
Şekil 248. 20°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 249'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



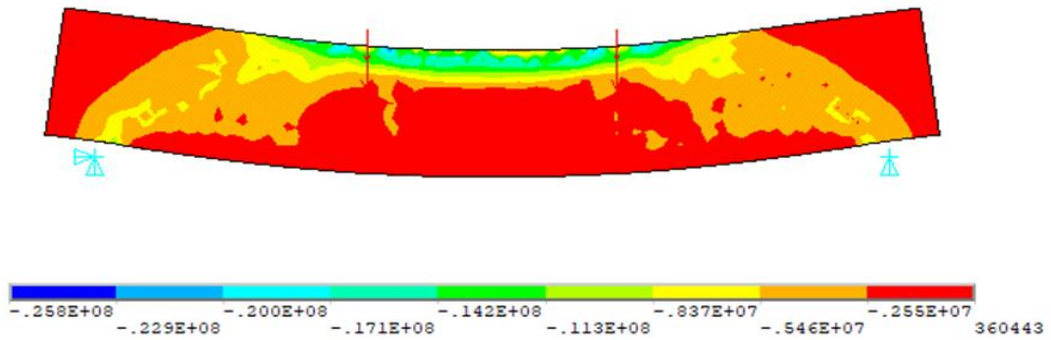
**Şekil 249.** 100°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 250'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 250.** 200°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

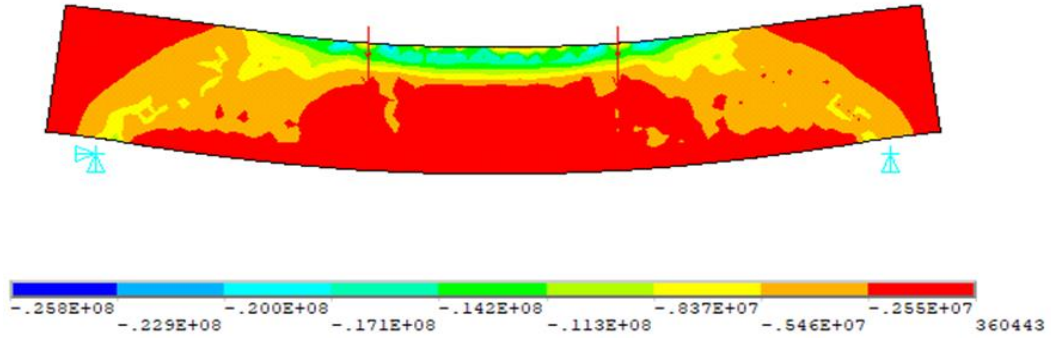
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 251'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 251.** 300°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

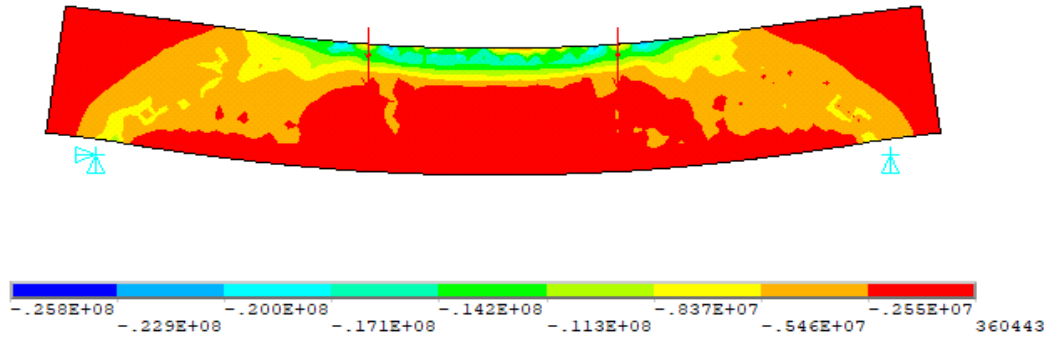
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 400°C ISO

yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 252’de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



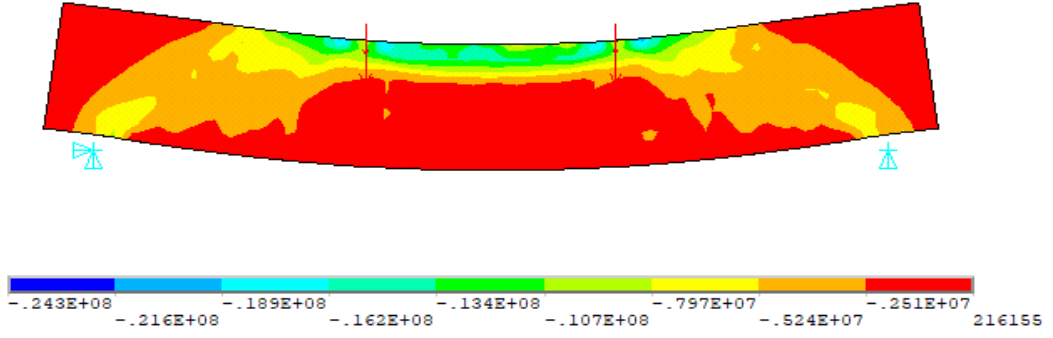
**Şekil 252.** 400°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 253’te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



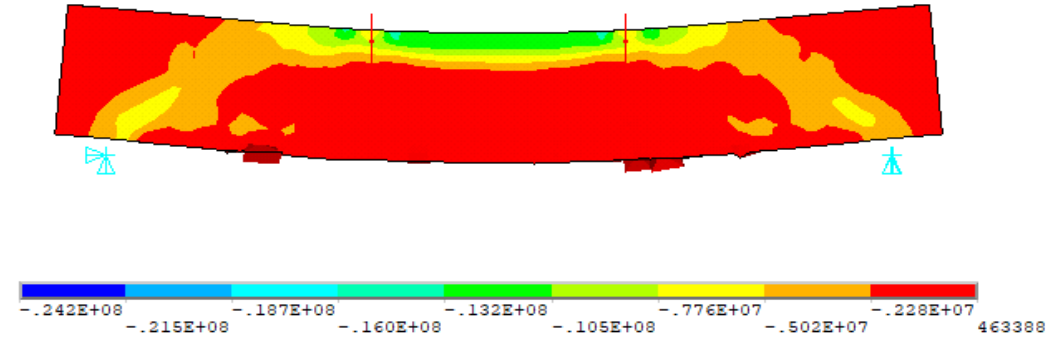
**Şekil 253.** 500°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 254’te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



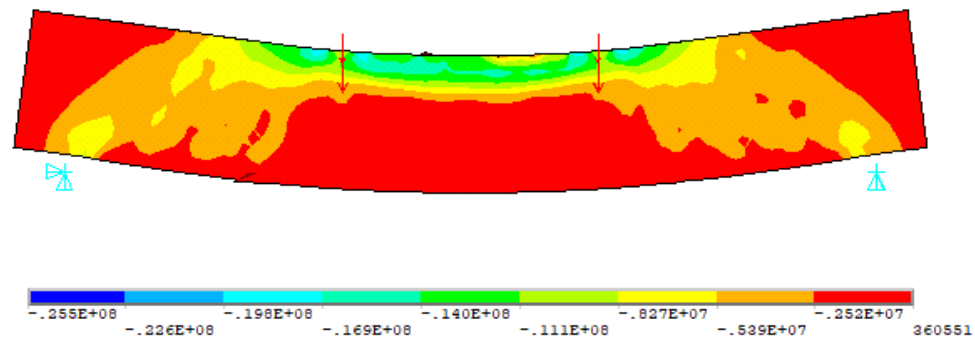
**Şekil 254.** 600°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 255'ta verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 255.** 700°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

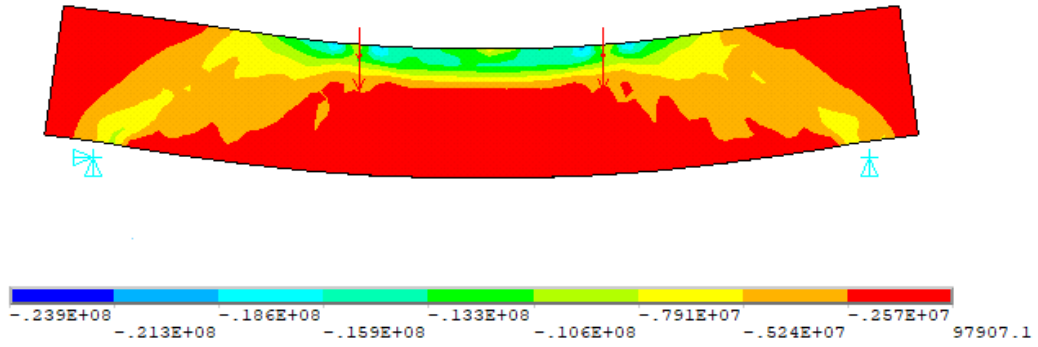
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 256'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 256.** 800°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

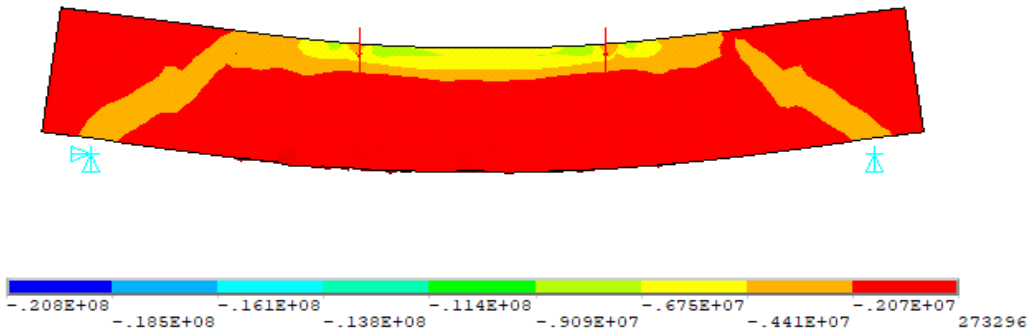
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 900°C ISO

yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 257’de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



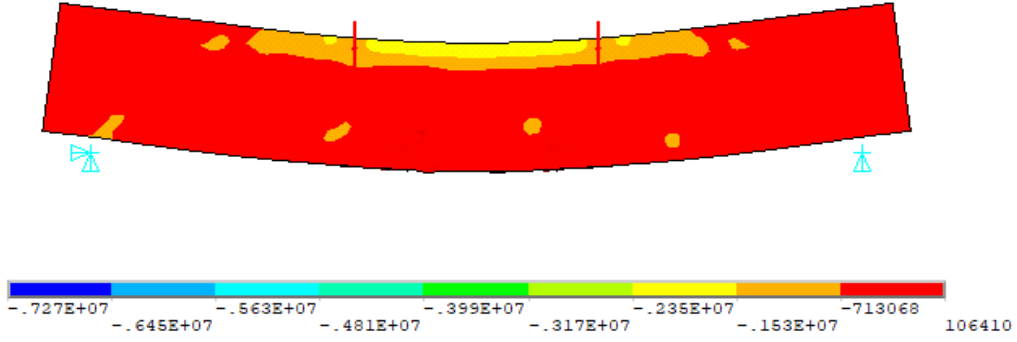
**Şekil 257.** 900°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 258’te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 258.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

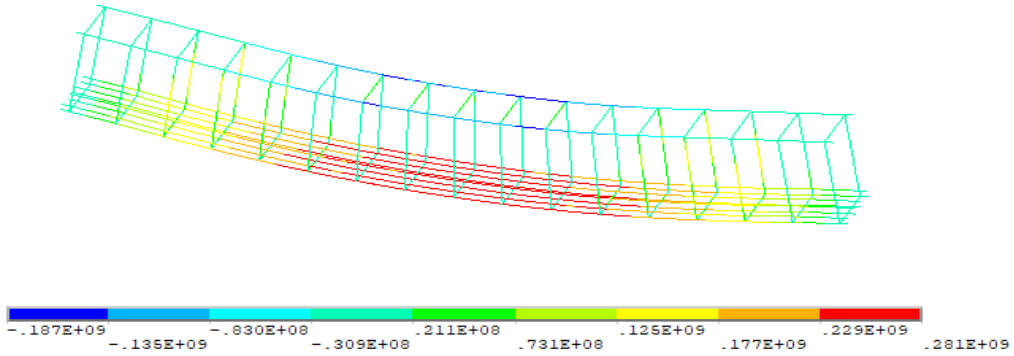
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 10800 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin asal çekme gerilmesi Şekil 259’da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 259.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan kirişin asal basınç gerilmeleri

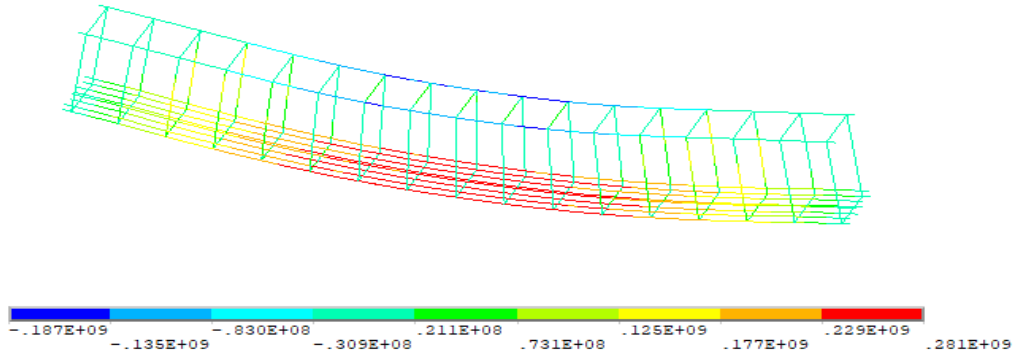
### **Kesme kirişinin donatı gerilmeleri**

Farklı sıcaklıklardaki kesme kiriş donatılarının gerilmeleri aşağıda verilmiştir. ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 20°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 0,1 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 260'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



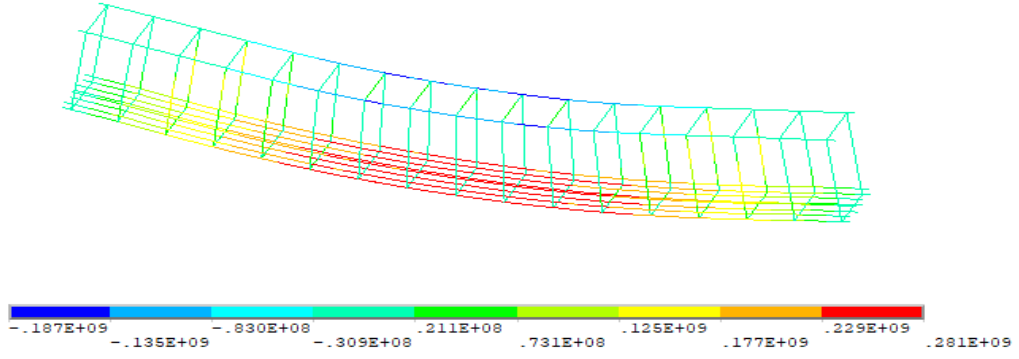
**Şekil 260.** 20°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 6 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 261'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



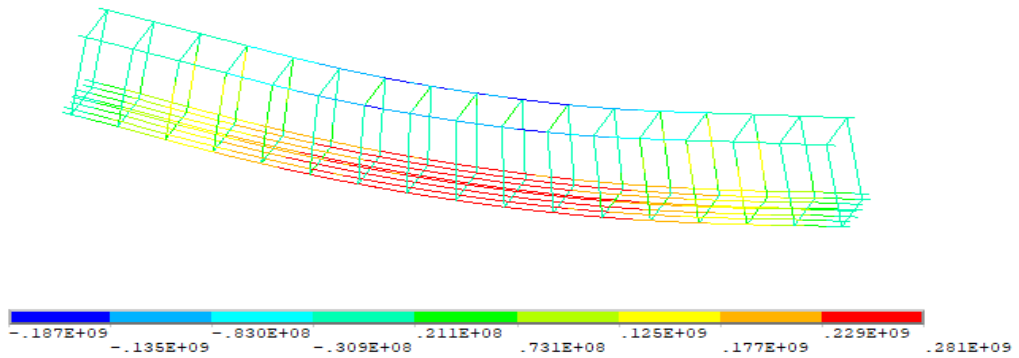
**Şekil 261.** 100°C sıcaklığa maruz kalan eğilme kirişinin donatı gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 200°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 18 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 262’de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 262.** 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

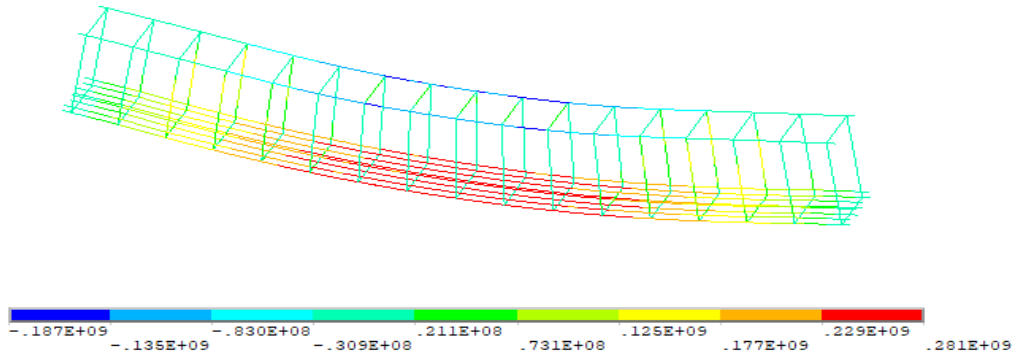
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 300°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 42 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 263’te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 263.** 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

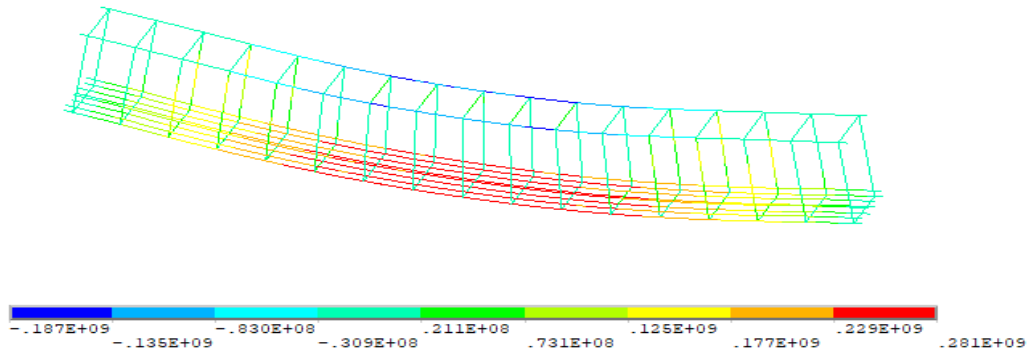
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 400°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 88 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 400°C ISO

yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 264'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 264.** 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

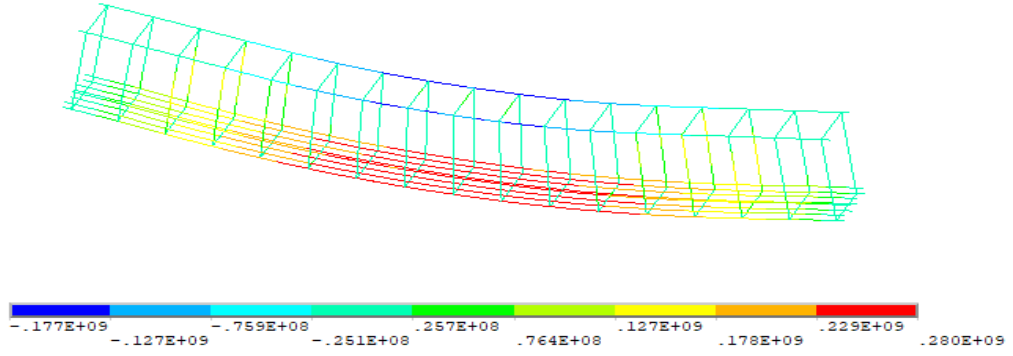
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 500°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 178 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 265'te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 265.** 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

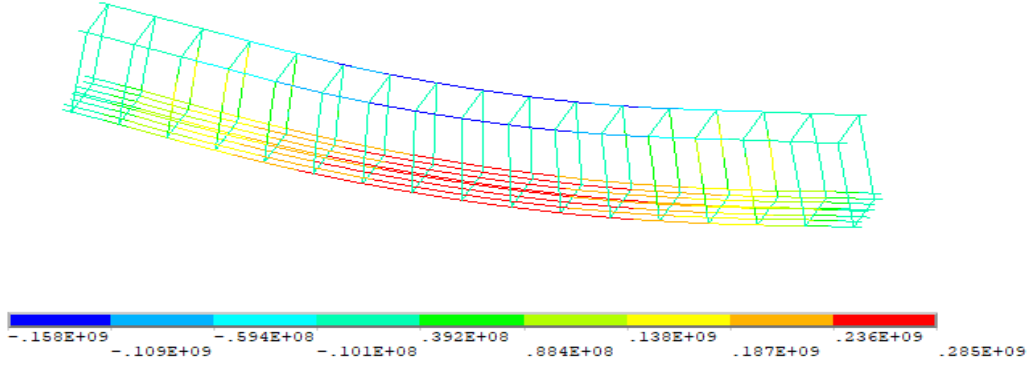
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 600°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 354 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 266'da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.





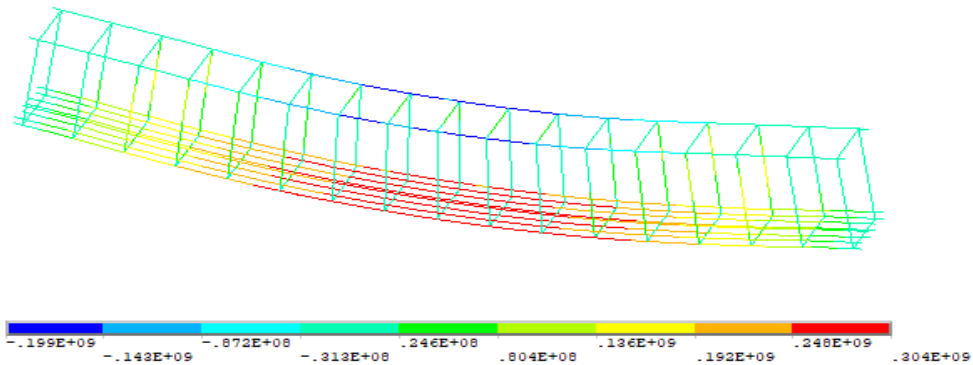
**Şekil 266.** 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 700°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 695 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 267'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 267.** 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

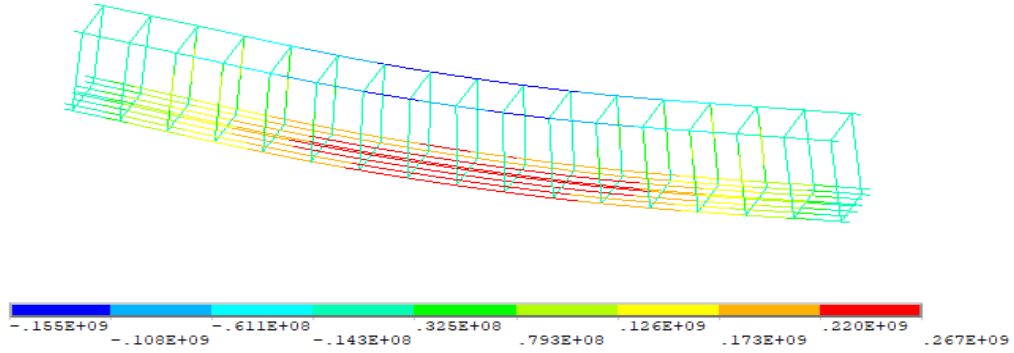
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 800°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 1365 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 268'de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 268.** 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

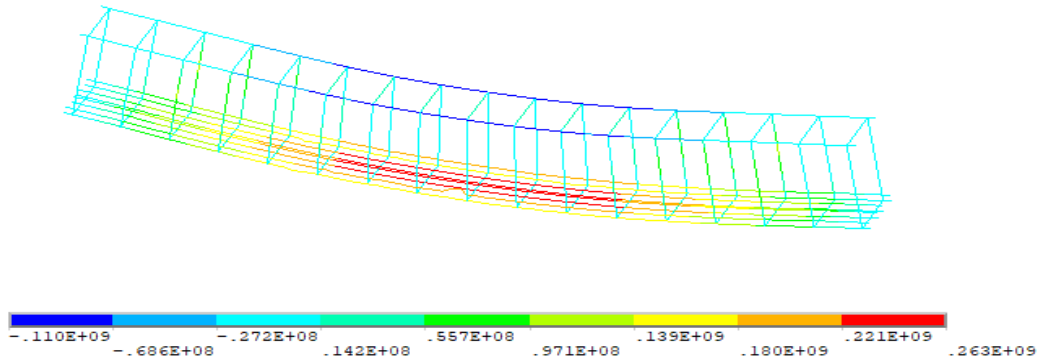
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 900°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 2660 sn'de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 900°C ISO

yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 269’da verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



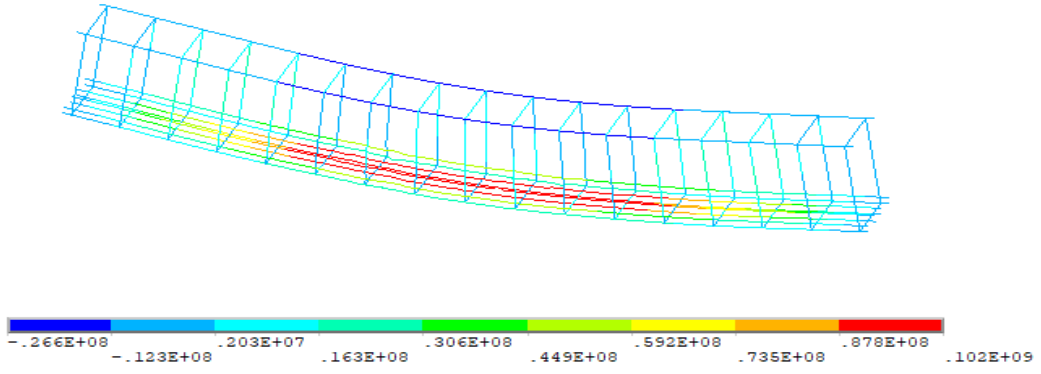
**Şekil 269.** 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1000°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 5190 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 270’te verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 270.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

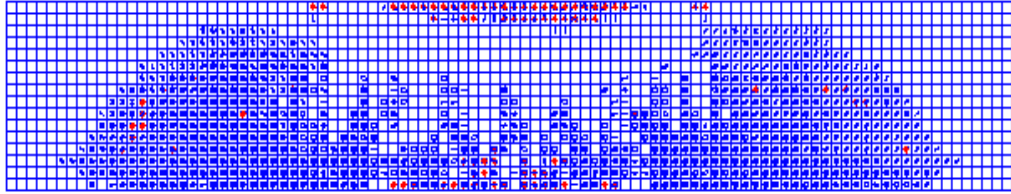
ISO834 yangın eğrisinde ortam sıcaklığı 1100°C olarak ayarlanmıştır. Hedeflenen ortam sıcaklığına ISO834 yangın eğrisi 10800 sn’de ulaşmaktadır. Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişi donatılarının gerilmeleri Şekil 271’de verilmiştir. Gerilme değerleri birimi Pa olarak verilmiştir.



**Şekil 271.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinin donatı gerilmeleri

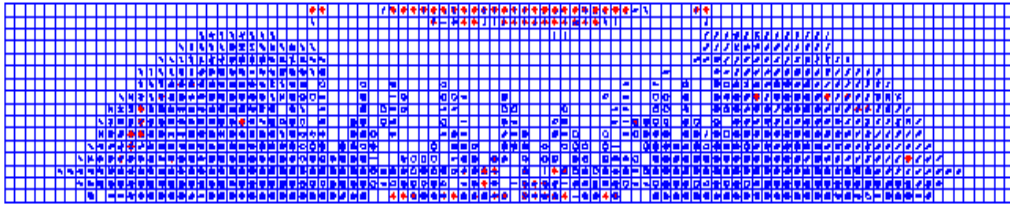
### **Kesme kirişinin beton üçüncü çatlak dağılımları**

Farklı sıcaklıklardaki kirişlerde meydana gelen çatlak dağılımları aşağıda verilmiştir. Şekillerde de görüldüğü üzere sıcaklık artışı oldukça daha fazla sayıda çatlakların oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca çatlak genişliği sıcaklık arttıkça büyüdüğü görülmüştür. Kırmızı çatlaklar ezilme çatlakları olarak tanımlanır. Kesme çatlakları yük noktasından mesnetlere doğru gerçekleşir ve yükün artmasıyla beraber gevrek bir şekilde ani kırılma gerçekleşir. Kirişte oluşan kesme çatlakları 45° açılı şekilde oluşmaktadır. Ortam sıcaklığı 20°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 272’de verilmiştir. 20°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



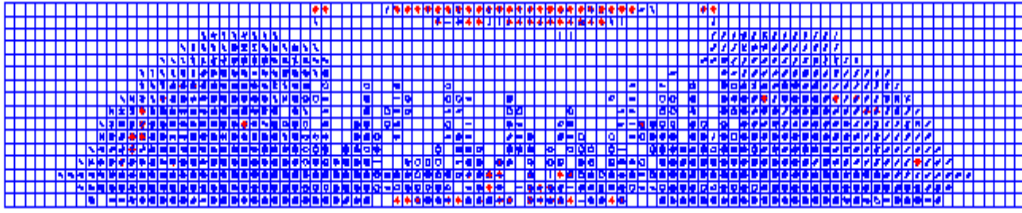
**Şekil 272.** 20°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 273’te verilmiştir. 100°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



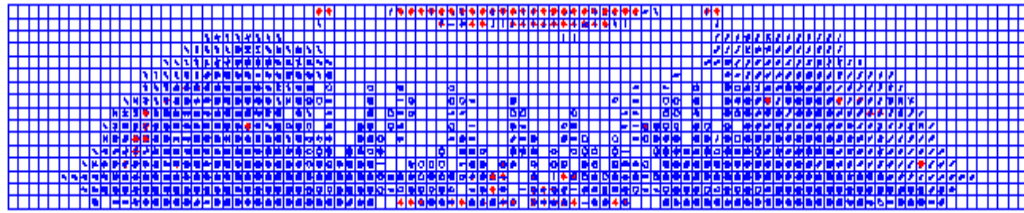
**Şekil 273.** 100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 200°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 274’te verilmiştir. 200°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



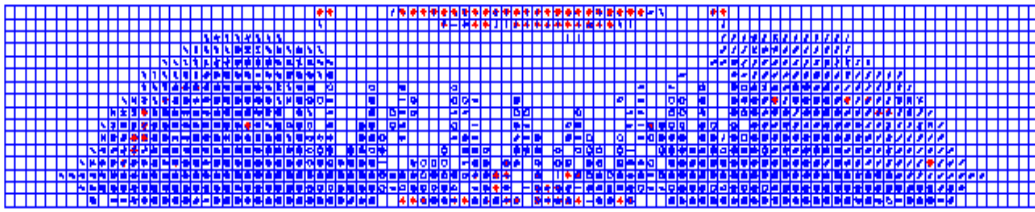
**Şekil 274.** 200°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 300°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 275’de verilmiştir. 300°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



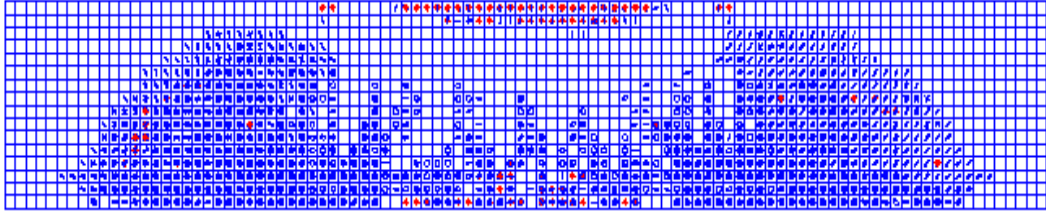
**Şekil 275.** 300°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 400°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 276’da verilmiştir. 400°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



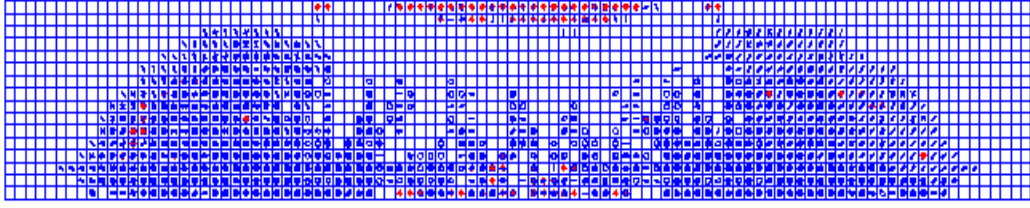
**Şekil 276.** 400°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 500°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 277’de verilmiştir. 500°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



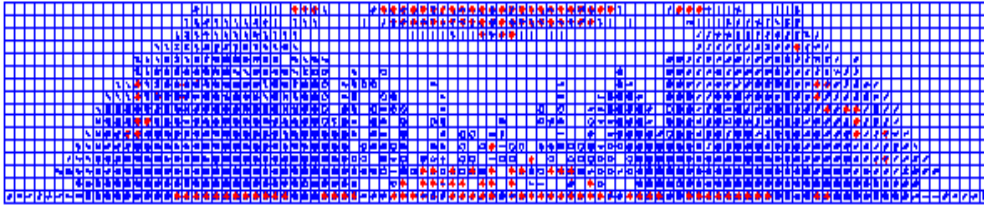
**Şekil 277.** 500°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 600°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 278’de verilmiştir. 600°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



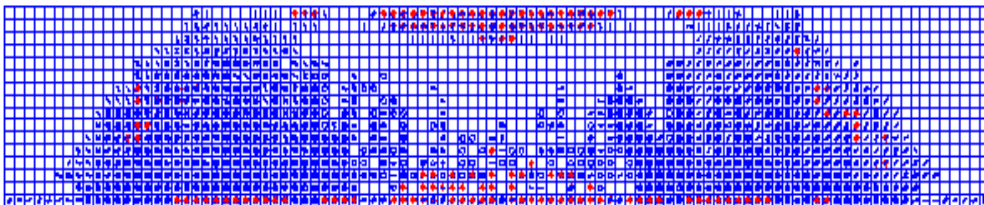
**Şekil 278.** 600°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 700°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 279’da verilmiştir. 700°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



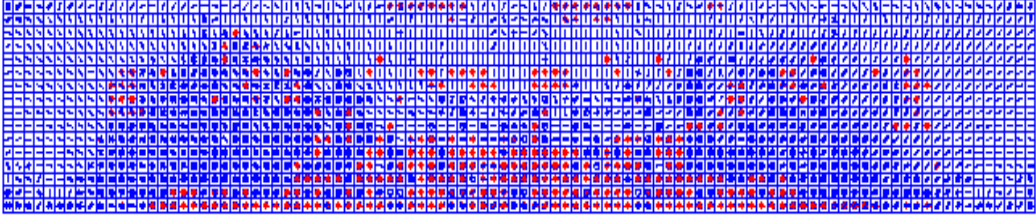
**Şekil 279.** 700°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 800°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 280’de verilmiştir. 800°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



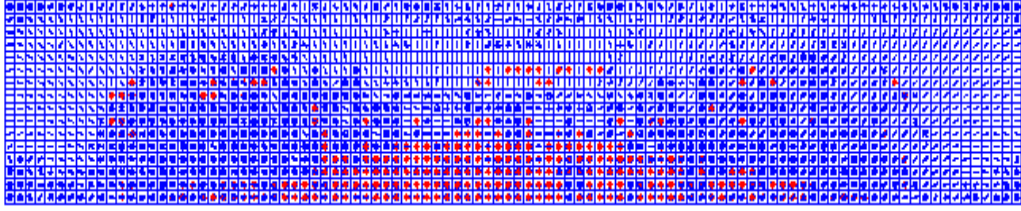
**Şekil 280.** 800°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 900°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 281’de verilmiştir. 900°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



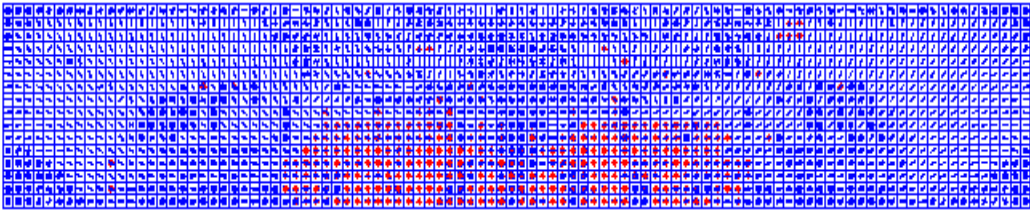
**Şekil 281.** 900°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 1000°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 282’de verilmiştir. 1000°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



**Şekil 282.** 1000°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

Ortam sıcaklığı 1100°C ISO yangın eğrisine tabi tutulan kesme kirişinin üçüncü çatlak dağılımları Şekil 283’te verilmiştir. 1100°C ortam sıcaklığındaki kesme kirişinin çatlak dağılımları literatüre ve tasarıma uygun oluşmuştur.



**Şekil 283.** 1100°C sıcaklığa maruz kalan kesme kirişinde meydana gelen çatlak dağılımları

## SONUÇ

Bu tez çalışması kapsamında betonarme yapısındaki farklı yangın süresi gözetilerek kesme ve eğilme çatlakları oluşarak göçecek şekilde iki farklı kiriş tasarlanmıştır. Yangına maruz kalmış malzeme dayanımı TS EN 1992-1-2’de verilen bağıntılarla belirlenmiştir. Doğrusal olmayan sonlu elemanlar çözümlemesi ile iki çözümlemeyi birleştirerek bir algoritma geliştirilmiştir. Geliştirilen algoritmada kirişler üç taraftan ısıtılarak farklı sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Böylece algoritma, farklı sıcaklıklara maruz kalan betonarme kirişlerin hem ısısal hem de yapısal tepkisini incelemeyi amaçlamıştır. Yangın etkiye süresine bağlı olarak ortaya çıkan yüksek sıcaklığın eleman kesitlerinin taşıma gücünü belirli bir sıcaklığa kadar arttırdığı, sıcaklık yükseldikçe hızla azalttığı gözlenmiş ve sonuçlar grafikler üzerinde gösterilmiştir.

Hem kesme hemde eğilme kirişleri ISO834 yangın eğrisine tabi tutulmuştur. Betonun ısı profili dış yüzey ve iç yüzeyden kesit alarak iki şekilde incelenmiştir. Betonun dış yüzey profili ısıya direk maruz kalan kısımlarında hızla ısı artışı gözlenmiştir. Fakat içyüzey profilindeki ısı dağılımı, ortam sıcaklığı 900°C olana kadar 250°C’nin üzerine çıkmamıştır. Bunun ilk etkisi ISO834 yangın eğrisinde çok kısa sürede ani sıcaklık artışının görülmesidir. Ortamın çok kısa sürede yüksek sıcaklıklara ulaşması, betonun ısıyı yavaş iletmesinden kaynaklı olarak taşıma gücünü bir süre kaybetmemesine sebep olmuştur. Literatürde Morley and Royles (1982) tarafından yapılan çalışma sonucunda 250°C’ye kadar beton basınç dayanımında bir miktar artış olduğu ancak sıcaklıklar arttığında bu durumun tersine döndüğü tespit edilmiştir. Böylece betonun 150°C ve 250°C sıcaklıkları arasında taşıma gücünü arttırdığı kabul edilmiştir. Çalışmamızda kesme ve eğilme kirişlerinde betonun ortam sıcaklığı 700°C - 800°C olduğunda, kesit alınan iç yüzey sıcaklığı 150°C - 250°C olduğu görülmüştür. Bu yüzden ISO834 yangın eğrisine göre ortam sıcaklığının kısa sürede 700°C - 800°C’ye çıkmasıyla betonun bir süre dayanım kazandığı, ortam sıcaklığı 900°C’nin üzerine çıkmasıyla iç yüzey sıcaklığının da 250°C’nin üzerine çıktığı görüldüğünden literatürde de desteklenen ani bir dayanım kaybı yaşanmıştır.

Hem kesme hem de eğilme kirişlerinde maksimum yük taşıyan ve en büyük enerji tüketim kapasitesine sahip olan, betonun iç yüzey sıcaklığı 150°C ile 250°C arasındaki kirişler olmuştur. İç yüzey sıcaklığı 250°C’nin üzerine çıktıkça her iki kiriş içinde yük taşıma ve enerji tüketim kapasiteleri betonun dayanım kaybı yaşamasından dolayı azalmıştır.

Yapının yangına maruz süresi arttıkça yapı rijitliğini kaybetmiş ve buna bağlı olarakta rijitlik katsayıları betonun dayanımı ile orantılı olarak azalmıştır. Betonun iç yüzey sıcaklığı

150°C - 250°C arasında iken beton dayanımı arttığı için rijitlik katsayısı bir süre artmış olup, betonun iç yüzey sıcaklığı 250°C'nin üzerine çıktığında beton dayanımı azaldığı için rijitlik katsayısı azalmıştır. Kesme kirişlerinin eğilme kirişlerine göre ani, gevrek kırılma yaparak geçmesinden dolayı rijitlik katsayılarında ani düşüş gözlemlenmiştir.

Doğrusal olmayan davranışın düzeyini gösteren temel parametre olan süneklik katsayısı da dayanım ile ters orantılıdır. Dayanım azaldıkça doğrusal olmayan davranış düzeyinde artış olacağından, dayanım azaldıkça süneklik katsayısında her iki kiriş türünde de artış meydana gelmiştir. Eğilme kirişlerinde sünek bir kırılma olduğundan eğilme kirişleri kesme kirişlerine oranla süneklik katsayılarında dayanım azaldıkça daha az artış görülmüştür. Kesme kirişlerindeki gevrek kırılmadan ötürü dayanım azaldıkça eğilme kirişlerine nazaran çok daha fazla süneklik katsayısında artış görülmüştür.

Betonarme yapı elemanlarının kesitlerindeki sıcaklık dağılımında donatı oranına bağlı olarak da donatının etkisinin fazla önemli olmadığı düşünülebilir. Donatı sıcaklığı, donatının bulunduğu derinlikteki beton sıcaklığına eşit kabul edilebilir.

Mekanik yüklerin arttırılmasıyla kirişteki dayanımın azaldığı görülmüştür. Elde edilen bu çalışma sonuçları ile ısı profili olarak bir karşılaştırma yapılacak olursa, literatürde Elshorbagy and Abdel-Mooty (2020) tarafından yapılan çalışma ile benzer ısı profilleri elde edilmiştir. Her sıcaklık için bir dayanım kıyaslaması bu çalışmada verilmediğinden yapılamamıştır. Fakat ısısal çözümlenin doğruluğunu teyit edebilmek adına bu çalışmalarla desteklenmiştir. Önerilen prosedürler ve geliştirilen sayısal modelde elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1- Hem ısısal çözümler hem de yapısal çözümler, geliştirilen sayısal modelin herhangi bir yangın altında betonarme kirişlerin davranışını simüle edebilmiş olup literatürdeki sonuçlarla uyumludur.

2-Betonarme kirişlerin davranışının sayısal simülasyonda gösterildiği gibi taşıma kapasitesi için ortamın sıcaklığından ziyade kirişin ulaştığı iç yüzey sıcaklığın daha belirleyici olduğu açıktır. Aynı zaman da betonun iç sıcaklığı 150°C ile 250°C arasında iken dayanımının arttığı, 300°C'nin üzerine çıkınca ise dayanımını kaybettiği görülmüştür.

3- Kesme kirişlerinin betonun kesme davranışında daha etkili olmasından dolayı eğilme kirişlerine nazaran daha kolay dayanım kaybettiği görülmüştür.

4- ANSYS araştırmacılar için farklı kirişler üzerinde çalışabilmek için iyi ve deneysel çalışmalarla aynı sonuçları vererek daha kısa sürede ve ekonomik olarak araştırmayı kolaylaştıran bir program olduğu görülmüştür.



## KAYNAKLAR

- Abbasi, A. and Hogg, P.J., 2005. Temperature and environmental effects on glass fiber rebar: modulus, strength and interfacial bond strength with concrete, *Composites: Part B*, 36: 394-404.
- Ahmad, M. S., Bhargava P. and Sharma U.K., 2017. Study on bond behaviour exposed to fire using beam specimen IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 140-012149.
- Andrews, Phaedonos, F., 2011. Fire Damaged Reinforced Concrete Investigation, Assessment And Repair, VicRoads.
- Anderberg, Y. and Forsen, N.E., 1982. Fire Resistance of Concrete Structures. Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Lund Institute of Technology: Lund, Sweden.
- ANSYS 18.2 Bilgisayar Yazılımı, Canonsburg, PA, Ansys.
- Arslan, G., 2005. Tersinir Yükler Altında Betonarme Çubukların Kesme mukavemeti, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ASCE-ACI 426, 1973. The Shear Strength of Reinforced Concrete Members, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, 99(ST6); 1091-1187.
- ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 78 Structural Fire Protection, American Society of Civil Engineers.
- Bazant, Z. and Kaplan, M., 1996. Concrete at high temperatures, s.l, Longman Group.
- Benitez, J. and Galvez, J., 2011. Bond modelling of prestressed concrete during the prestressing force release. *Materials and Structures*, Volume 44, pp. 263-278.
- Bolmsvik, R. and Lundgren, K., 2006. Modelling of bond between three-wire strands and concrete. *Magazine of Concrete Research*, 58(3), pp. 123-133.
- Buchanan, A., 2002, "Structural design for fire safety," John Wiley and Sons, New York, USA, p. 8.
- CEB-FIP Model code 90, 1991. s.l.:Final draft ,Committe euro-international du beton, Bulletin d'information No.203-205.
- CEB-FIP-Bulletin10, 2000. Bond of Reinforcement in Concrete. s.l.
- Chan Y. N., Peng, G. F and Anson M., 1999. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Composites*, pp 23-27.
- Chang Y.F., Chen Y.H., Sheu. M.S. and Yao. G.C., 2006. Residual stress–strain relationship for concrete after exposure to high temperatures, *Cement and Concrete Research*, May, pp 1999–2005.

- Chang, Y., Chen, Y., Sheu, M. and Yao, G., 2006. Residual stress–strain relationship for concrete after. Science Direct, 36.
- Chiang, C.H. and Tsai, C.L., 2003. Time-temperature analysis of bond strength of a rebar after fire exposure, Cement and Concrete Research, 33:1651-1654.
- Denoel, J., 2007. Fire safety and concrete structures, Federation of Belgian Cement Industry, FEBELCEM, Brussels, Belgium, p. 16.
- Diederichs, U. and Schneider, U., 1981. Bond strength at high temperatures. Magazine of concrete research, 33(115), pp. 75-84.
- Doğangün A., 2014. Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı, Birsen Yayınevi, 11. Baskı, İstanbul.
- Dougill, J.W., 1983. Materials dominated aspects of design for structural fire endurance of concrete structures, Fire Safety of Concrete Structures, SP 80-4, pp. 151-175.
- Drysdale, D., 1998. An Introduction to Fire Dynamics. Second Edition, John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Drysdale, M.B. and Kodur, V., 1998. A numerical approach for modelling the fire induced restraint effects in reinforced concrete beams, Fire Safety Journal, vol. 43, no. 3, pp. 291-307.
- Duederichs. V. and Schneider. V., 1981. Bond Strength at High Temperature. Magazine of Concrete Research, 33(115): 75-84.
- El-Hawary, M.M. and Hamoush, S.A., 1996. Bond Shear Modulus of Reinforced Concrete at High Temperatures. Engineering Fracture Mechanics. 55(6):991-999.
- El-Hawary, M. M., Ragab, A.M., Abd El-Azim, A., and El-Ibiari. S., 1997. Effect of fire on shear behavior of RC Beams,” Computer & Structures, vol. 65, no. 2, p. 281-287.
- Eligehausen, R., Popov, E. P., and Bertero, V. V., 1983. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations. Rep. No. 134 UCB/EERC 83-23, Earthquake Engineering Research Center, Univ. Of California, Berkeley, CA.
- Elshorbagy M. and Abdel-Mooty M., 2020. The coupled thermal-structural response of RC beams during fire events based on nonlinear numerical simulation, Engineering Failure Analysis 109, 104297.
- Erdem H., 2010. Yüksek Sıcaklığa Maruz T-Kesitli Betonarme Kirişlerin Eğilme Taşıma Gücü İMO Teknik Dergi, 5023-5036, Yazı 328
- Ersoy, U. ve Özcebe G., 2001. Betonarme: Temel İlkeler, TS-500-2000 ve Türk Deprem Yönetmeliğine (1998) Göre Hesap”, 6. baskı, Evrim Yayınevi, İstanbul, ISBN:978-975-503-233-7, 90-91, 31-37, 58-73, 459-477.
- Eurocode 1, 2004. Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]

- Eurocode 2, 2004. Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 18/EC]
- Fletcher I.A., Welch S., Torero J.L., Carvel R.O. and Usmani A., 2007. Behavior of concrete structures in fire, *Thermal Science*: Vol. 11 No. 2, 37-52.
- Fletcher, I., Borg, A., Hitchen, N., and Welch, S. 2006. Performance of concrete in fire: a review of the state of the art, with a case study of the Windsor tower fire,” in *Proceedings of the fourth international workshop Structures in Fire*, Aveiro, Portugal, May, pp. 779-790.
- Gao W.Y., Dai J.G., J.G. Teng J.G. and Chen G.M., 2013. Finite element modeling of reinforced concrete beams exposed to fire, *Engineering Structures* 52, 488–501.
- Goto, Y., 1971. Cracks formed in concrete around deformed tension bars. *ACI-Journal*, pp. 244-251.
- Haddad, R. H.; Al-Saleh, R. J.; and Al-Akhras, N. M., 2008. Effect of Elevated Temperature on Bond between Steel Reinforcement and Fiber Reinforced Concrete, *Fire Safety Journal*, V. 43, No. 5, pp. 334-343.
- Haddad, R.H. and Shannis, L.G., 2004. Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel, *Construction and Building Materials*, 18 (4): 425- 435.
- Hacıemiroğlu M., 2014. Yangın Geçirmiş Betonarme Bir Yapının Deprem Performansının Değerlendirilmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi.
- Hertz, K., 1982. The Anchorage Capacity of Reinforcing Bars at Normal and High Temperatures, *Magazine of Concrete Research*, V. 34, No. 121, pp. 213-220. doi: 10.1680/mac.1982.34.121.213
- Hertz, K., 1992. Analyses of concrete structures exposed to fire,” PhD Thesis, Technical University of Denmark, DK-2800, Lyngby, Denmark.
- Hsu, J. and Lin, C., 2008. Effect of fire on the residual mechanical properties and structural performance of reinforced concrete beams,” *Journal of Fire Protection Engineering*, vol. 18, no. 4, pp. 245-274.
- Huang, Z., 2010. Modelling the bond between concrete and reinforcing steel in fire, *Engineering Structures*, Volume 32, pp. 3660-3669.
- Huanzi, W., 2009. An analytical study of bond strength associated with splitting of concrete cover. *Engineering Structures*, Volume 31, pp. 968-975.
- ISO834-1, 1999. Fire-Resistance Tests—Elements of Building Constructions—Part 1: General Requirements, V. 25, International Organization Standard, Geneva, Switzerland, 25 pp.
- Kada A., Lamri B., Mesquita L.M.R. and Bouchair A., 2016. Finite Element Analysis Of

Steel Beams With Web Apertures Under Fire Condition, Asian Journal Of Civil Engineering (Bhrc) Vol. 17, No. 8 Pages 1035-1054.

- Kada A. and Lamri B., 2018. Numerical analysis of non-restrained long-span steel beams at high temperatures due to fire, Asian Journal of Civil Engineering, Springer Nature Switzerland AG.
- Kent, D.C. and Park, R., 1971. Flexural members with confined concrete. ASCE Journal of Structural Engineering, 97 (7), 1969-1990.
- Khalaf, J., Huang, Z. and Fan, M., 2016. "Analysis of Bond-Slip between Concrete and Steel Bar in Fire, Computers & Structures, V. 162, pp. 1-15.  
doi:10.1016/j.compstruc.2015.09.011
- Khalaf J., 2017. Development Of Non-Linear Bond Stress-Slip Models For Reinforced Concrete Structures In Fire, College of Engineering, Design and Physical Sciences Brunel University London, Doctor of Philosophy Thesis.
- Khan M.S., Prasad J. and Abbas H., 2013. Bond strength of RC beams subjected to cyclic thermal loading, Construction and Building Materials 38, 644–657.
- Khoury, G., 2007. Fire and concrete: from materials behavior to application," FIB workshop on "Fire Design of Concrete Structures-from Materials Modelling to Structural Performance," Coimbra, Portugal, pp. 3-24, November.
- Khoury, G., 2008. Passive fire protection of concrete structures, Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Structures & Buildings, vol. 161, issue 3, pp. 135-145.
- Kodur V.K.R. and Agrawal A., 2017. Effect of temperature induced bond degradation on fire response of reinforced concrete beams, Engineering Structures 142, 98–109.
- Kodur, V.K.R. and Agrawal, A., 2016. An approach for evaluating the residual capacity of reinforced concrete beams exposed to fire" Journal of Engineering Structures, Vol. 110, pp. 293-306.
- Kodur, V. and Dwaikat, M., 2009. Macroscopic FE model for tracing the fire response of reinforced concrete structures," Engineering Structures, vol. 31, pp. 2368-3279.
- Kodur, V. and Wang, T., 2004. Predicting the fire resistance behavior of high strength concrete columns, Cement & Concrete Composites, vol. 26, no. 2, pp 141-153.
- Kumar, A. and Kumar, V. 2003. Behaviour of RCC beams after exposure to elevated temperatures, IE(I) Journal – CV, 84, November, pp 165-170.
- Lataille, J., 2003. Fire protection engineering in building design, Butterworth Heinemann, Elsevier Science, Burlington, MA, USA, p. 25.
- Liao, F. and Huang, Z., 2015. An extended finite element model for modelling localised fracture of reinforced concrete beams in fire, Computers and Structures 152, 11-26.
- Lie, T.T., 1992. Structural fire protection, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, technical report no. 78, New York, NY, USA.

- Lin, T., Gustaferoo, A. and Abrams, M., 1981. Fire endurance of continuous reinforced concrete beams, R&D Bulletin, RD072.01B, Portland Cement Association, IL, USA.
- Lowes N.L., Moehle J.P. and Govindjee, S., 2002. A concrete-steel bond model for use in finite element modeling of reinforced concrete structures. To be published in the ACI Special Publication.
- Lutz, L., 1970. Information on the bond of deformed bars from special pull-out test, ACI-Journal, pp. 885-887.
- Lu Z.D., Zhu B.L. and Zhou Y.H., 1993. Experimental study on fire response of simple supported reinforced concrete beams. China Civil Engineering Journal, 26(3) pp: 47-54.
- Mamillapalli R., 2007. Impact of fire on steel reinforcement of R.C.C structures, a master of technology thesis, Department of Civil Engineering, National Institute of Technology, Roll No-207 CE 210 Rourkela.
- Matsudo, M. and Nishida, H. K. A., 2007. Tensile Strength and Bond Strength of Ultra-High-Strength Concrete after Heating,” *JCI Proceedings*, V. 29, pp. 549-554.
- Morley, P. D. and Royles, R., 1983. Response of the Bond in Reinforced Concrete to High Temperatures, *Magazine of Concrete Research*, V. 35, No. 123, pp. 67-74. doi: 10.1680/mac.1983.35.123.67
- Murcia-Delso, J., Stavridis, A., ve Shing, B., 2011. Modeling the Bond-Slip Behavior of Confined Large-Diameter Reinforcing Bars. III ECCOMAS Thematic Conference on Computation Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, 1-14 Mayıs, Corfu, Greece.
- Musmar M., Shatnawi A. and Shatarat N., 2017. Finite Element Analysis of The Behavior of RC Beams During Fires, *Arpn Journal Of Engineering And Applied Sciences*, Vol. 12, No. 23, December.
- Ozbolt, J., Bosnjak, J., Periskic, G. and Sharma, A., 2013. 3D Numerical Analysis Of Reinforced Concrete Beams Exposed To Elevated Temperature, *Engineering Structures*, January, 58.
- Özdemir M. A., 2019. Betonarme Kolonların Şekil Değişirme Kapasitelerinin Değerlendirmesi, Doktora Tezi, ETÜ Fen bilimler Enstitüsü.
- Özdemir M. A. ve Kazaz İ., 2015. Dikdörtgen Kesitli Betonarme Kolonların Deneysel ve Hesap Deformasyon Kapasitelerinin Karşılaştırılması, Sekizinci Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, 11 Mayıs-15 Mayıs, İstanbul.
- Özdemir M. A., Kazaz İ. and Ozkaya G. S., 2017. Evaluation and comparison of ultimate deformation limits for RC columns. *Engineering Structures*; 153, 569-581.
- Özhan, V. K., 2012. Farklı Beton Sınıfına Bağlı Betonarme Kirişlerin Eğilme Kapasitelerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 43s.

- Özkal, F.M., 2012. Topoloji Eniyilemesi Ve Çubuk Benzeşimi Yöntemleri Kullanılarak Betonarme Yapı Elemanlarında En Uygun Donatı Düzeninin Belirlenmesi Ve Deneysel Gerçekleşmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Özkal, F. M., 2017. Kesme Açıklığı Küçük Olan Betonarme Kirişlerin Etriye Düzeni ve Kenetlenme Yönünden İncelenmesi, 20. Ulusal Mekanik Kongresi, Bursa, 551-561.
- Özkal, F.M., Polat, M., Yağan, M. and Öztürk, M.O., 2018. Mechanical Properties And Bond Strength Degradation Of Gfrp And Steel Rebars At Elevated Temperatures, Construction And Building Materials 184, pp 45–57.
- P. M. V. Udaya, Kumar., Potha, Raju, M. and Srinivasa, Rao, K., 2009. Performance of repaired fire affected RC beams”, Current science, 96(3), 10 February, pp 398-402.
- Pothisiri, T., and Panedpojaman, P., 2013. Modeling of Mechanical Bond-Slip for Steel-Reinforced Concrete under Thermal Loads, Engineering Structures, V. 48, pp. 497-507. doi: 10.1016/j.engstruct.2012.10.015
- Purkiss, J., 2007. Fire safety engineering - design of structures, Second ed, Butterworth-Heinemann, Elsevier Science, Burlington, MA, USA, p. 35.
- Raouffard, M. M. and Nishiyama, M., 2018. Idealization of Bond Stress-Slip Relationship at Elevated Temperatures Based on Pullout Tests,” ACI Structural Journal/March Title No. 115-S31
- Rigberth, J., 2002. Simplified design of fire exposed concrete beams and columns an evaluation of Eurocode and Swedish building code against advanced computer models, Department of Fire Safety Engineering, Report no. 5063, Lund, Sweden.
- Ryu, E., Syin H. and Kim H., 2018. Effect of Loading and Beam Size on the Structural Behaviors of Reinforced Concrete Beams Under and After Fire, Int J Concr Struct Mater.
- Sharma A., Bošnjak J. and Bessert S., 2019. Experimental investigations on residual bond performance in concrete subjected to elevated temperature, Engineering Structures 187, 384–395.
- Shi, X., Tan, T. and Guo, Z., 2004. Influence of concrete cover on fire resistance of reinforced concrete flexural members, Journal of Structural Engineering, ASCE, August, pp. 1225-1231.
- Tariq F. and Bhargava P., 2020. Bond characteristics of corroded pullout specimens exposed to elevated temperatures, Structures 25, 311–322.
- Terro, M., 1998. Numerical modelling of the behavior of concrete structures in fire,” ACI Structural Journal, March-April, pp. 183-193.
- The Concrete Centre, 2006. How to design reinforced concrete flat slabs using finite element analysis, Surrey: The Concrete Centre, ISBN 1-904818-37-4.
- TS 500, 2000. Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları (ICS 91.080.40), Türk

Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, TS.

TS EN 1991-1-1, 2004. Yapılar Üzerindeki Etkiler - Bölüm 1-2: Genel Etkiler-Yangına Maruz Kalan Yapılar Üzerindeki Etkiler (Eurocode 1), Nisan

TS EN 1992-1-2, 2006. Beton Yapıların Tasarımı - Bölüm 1-2: Genel Kurallar-Yapısal Yangın Tasarımı (Eurocode 2), Kasım

Topçu İ. B., 2008. The effect of cover thickness on re bars exposed to elevated temperatures, Construction and Building Materials 22, 2053-2058.

Trong, C. N., Viet, C. M. and Xuan, B. L., 2018. Temperature Distribution In Concrete Structure Under The Action Of Fire Using Ansys Software, E3S Web of Conferences 91, Tpacee.

Ünlüoğlu, E., Topçu, İ.B. and Yalaman, B., 2007. Concrete cover effect on reinforced concrete bars exposed to high temperatures”, Construction and Building Materials 21, 1155-1600.

Wang, H., 2009. An Analytical Study of Bond Strength Associated with Splitting of Concrete Cover, Engineering Structures, V. 31, No. 4, pp. 968-975.  
doi:10.1016/j.engstruct.2008.12.008

Watstein, D., 1947. Distribution of bond stress in concrete pull-out specimens. ACI-Journal, pp. 1041-1052.

Wit, A., 2011. Behavior and structural design of concrete structures exposed to fire, Master of Science thesis, KTH Architecture and the Built environment, Sweden.

Yağan M., 2019. Çelik Donatılı Betonarme Kirişlerin Yüksek Sıcaklık Etkileri Altında Yüksek Lisans Tezi, Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi.

Youssef, M. A. and Moftah, M., 2007. General stress-strain relationship for concrete at elevated temperatures, Engineering Structures, vol. 29, no. 10, pp. 2618-2634.

## ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
<b>Adı Soyadı:</b>	Betül ALIŞ
<b>Doğum tarihi:</b>	01 Mayıs 1995
<b>Doğum Yeri:</b>	Erciş / Van
<b>Uyruğu:</b>	T.C.
<b>Adres:</b>	Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
<b>E-mail:</b>	betulalis84@gmail.com
Eğitim	
<b>Lise:</b>	Sevim Kürüm Anadolu Lisesi
<b>Lisans:</b>	Erzincan Üniversitesi
<b>Yüksek lisans:</b>	Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
<b>İngilizce:</b>	İyi