

**YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA KALAN
YAPILARDA ÇELİK DONATI ÖZELİK DEĞİŞİMİNE
BETONARME PAS PAYININ ETKİSİ**

BURÇAK YALAMAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Şubat - 2006

**THE CONCRETE COVER EFFECTS OF PROPERTY DIFFERENCE IN
REINFORCED STEEL IN BUILDINGS UNDER THE EFFECT OF ELEVATED
TEMPERATURES**

BURÇAK YALAMAN

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of CIVIL ENGINEERING

February - 2006

**YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA KALAN YAPILARDA ÇELİK
DONATI ÖZELİK DEĞİŞİMİNE BETONARME PAS PAYININ ETKİSİ**

Burçak YALAMAN

**Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır**

Danışman: Doç. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU

Şubat – 2006

Burçak YALAMAN'nın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı “YÜKSEK SICAKLIK ETKİSİ ALTINDA KALAN YAPILARDA ÇELİK DONATI ÖZELİK DEĞİŞİMİNE BETONARME PAS PAYININ ETKİSİ” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

Üye: Doç. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU (**DANIŞMAN**)

Üye: Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU

Üye: Yrd. Doç. Dr. Fatih ESER

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Abdurrahman KARAMANCIOĞLU

Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek sıcaklığın çeliğin mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etki yaptığı bilinmektedir. Betonarme yapılarda pas payı, çeliği yangın etkisinden korumaktadır. Yangından sonra yapıların güçlendirilerek tekrar kullanılması gerekir. Güçlendirme projesinin yapılabilmesi için yangından sonra betonun ve donatı çeliğinin mekanik özelliklerinin bilinmesi gerekir. Kendi başına betonun ve çeliğin yangın davranışları üzerine birçok mevcut çalışma olmasına rağmen, pas payının arkasındaki çeliğin özellikleri iyi bilinmemektedir

Bu çalışmada, betonarme yapıların, yangın etkisi sonucunda, donatılarda oluşabilecek hasarların belirlenebilmesi için yapılarda sıkça kullanılan üç değişik çapta donatı ile deneyler yapılmıştır. PÇ 42.5 çimentosu kullanılan harçlarda, ağırlıkça çimentoya oranla % 0, 10, 20 ve 30 uçucu kül kullanarak hazırlanmıştır. Φ 10, 16 ve 20 çaplarında S 420 özeliğindeki donatılara 25 mm'lik pas payı sağlamak için farklı ölçülerde özel kalıplar hazırlanmıştır. Numunelere 28 gün kür uygulanmış, kür işlemi biten numuneler 3 saat süreyle farklı sıcaklıklarda tutulmuşlardır. Pas payı çıkartılarak çekme deneyi uygulanan betonarme çeliklerinin, yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerinin değişimi incelenmiştir.

Yapılan çalışmalar, pas payının donatının sıcaklığın olumsuz etkilerine karşı korunmasında büyük etkisi olduğunu göstermiştir. Kullanılan uçucu külün yüksek sıcaklıkta donatının mekanik özelliklerinin korunmasında önemli bir fark yaratmadığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda donatıyı koruyan pas payı harcının hasar görmesine karşın, numune içerisindeki donatıyı korumaya devam ettiği görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Betonarme, Pas payı, Yüksek Sıcaklık, Betonarme Çelikleri

SUMMARY

The negative effect of high temperature on steel mechanical properties is a quite known fact. Concrete cover in reinforced concrete buildings prevents reinforcement bars from fire effect. It is necessary to use buildings by reinforcing after fire. In order to make reinforcement project, it is needed to know the mechanical properties of concrete and steel. Despite existing many study on fire behaviors of concrete and steel separately, the steel properties behind the concrete cover isn't known well.

In this study, to determine the possible damage on reinforced concrete bars after the result of reinforced concrete buildings fire exposure, experiments are performed with three common used reinforcement bar with different dimensions. In PC 42.5 cement used mortars, prepared with 0, 10, 20 and 30 % of fly ash additive with respect to the weight of used cement. S 420 reinforcement bars, the diameter of Φ 10, 16 and 20, were placed in the prepared formworks with different dimensions. 28 days cure applied specimens were kept for 3 hours in different temperatures. After removing mortar cover of specimens and applying tensile tests, the mechanical property changes of the reinforcement bar at high temperatures is examined.

These study shows that, the concrete cover has a high affectivity on protecting reinforcement bars against negative effects of temperature. It is found that, using fly ash does not create any serious effect on protecting mechanical properties of reinforcement bars at high temperatures. At high temperatures, despite damaging, mortar cover keep protecting steel reinforcement bars in specimens.

Key Words: Reinforced Concrete, Cover, High Temperature, Reinforcement Bars

TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sırasında bana yol gösteren ve yardımları ile çalışmalarımı yönlendiren danışmanım Sayın Doç. Dr. Eşref ÜNLÜOĞLU'na, teknik konularda yardımcı olan hocam Sayın Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU'ya, Araş. Gör. Abdullah DEMİR ile Araş. Gör. A. Raif BOĞA ile Tekniker Sevgin YILMAZ'a çalışmalarım sırasında beni maddi ve manevi olarak her zaman destekleyen değerli aileme en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Bu deneysel çalışma Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU'nun yürütücülüğünü yaptığı 104M750 proje Nolu "Kiremit Kırıkları Betonlarda Yangın ve Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi" başlıklı 2005 yılı TÜBİTAK Projesi ile alınmış yüksek sıcaklık fırını ile, "Uçucu Küllü Betonlarda Donatı Korozyonunun Hızlandırılmış Yöntemlerde İncelenmesi" başlıklı 200415040 Nolu ESOGÜ projesiyle alınmış çelik çekme deneyi aletinde gerçekleştirilmiştir. Bu katkıları nedeni ile TÜBİTAK ve ESOGÜ'ye teşekkürü bir borç bilirim.

Burçak YALAMAN

Şubat 2006

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	v
SUMMARY.....	vi
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xii
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ.....	xiii
SEMBOLLER DİZİNİ.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. YANGIN ve YANGIN DENEYLERİ.....	4
2.1. Yangının Temel Aşamaları.....	4
2.2. Yangın Deneyleri	5
2.2.1. Standart ISO 834 yangın deneyi ve yangın eğrisi.....	5
2.2.2. Laboratuvar koşullarında kontrollü ASTM E 119 yangını.....	7
2.3. Normal Yangın Sıcaklığı ve Yanma Süresi.....	7
3. ISININ YANGININ ÇEVRELEDİĞİ MALZEMEYE TRANSFERİ.....	8
3.1. İletkenlik	8
3.2. Isıl Konveksiyon	8
3.3. Radyasyon	9
4. YÜKSEK SICAKLIĞIN, ÇELİK MEKANİK ÖZELİKLERİNE ETKİSİ.....	10
4.1. Dayanım	10
4.2. Rijitlik	12
4.3. Çelik Kalitesindeki Farklılığın Yangın Tepkisine Etkisi	14

İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
5. ÇELİK ve BETONUN ISIL ÖZELİKLERİ.....	15
5.1. Çeliğin Isıl Özellikleri.....	15
5.1.1. Isıl genleşme.....	15
5.1.2. Isıl iletkenlik.....	17
5.1.3. Yoğunluk.....	18
5.1.4. Öz ısı (ısııl kütle).....	18
5.2. Betonun Isıl Özellikleri	20
5.2.1. Isıl iletkenlik.....	20
5.2.2. Öz ısı.....	21
5.2.3. Isıl genleşme.....	22
6. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	23
6.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	23
6.2. Kullanılan Malzemeler.....	25
6.2.1. Çimento.....	25
6.2.2. Karma suyu.....	25
6.2.3. Uçucu kül.....	26
6.2.4. Dere kumu.....	27
6.2.5. Karışım oranları.....	28
6.3. Yapılan Deneyler.....	28
6.3.1. Ultrases geçiş süresi deneyi.....	29
6.3.2. Eğilme dayanımı deneyi.....	30
6.3.3. Basınç dayanımı deneyi.....	31
6.3.4. Yüksek sıcaklık deneyi.....	32
6.3.5. Çekme deneyi.....	34
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	36
7.1. Ultrases Geçiş Süresi Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	36
7.2. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	38
7.3. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	39

İÇİNDEKİLER (Devam)

	<u>Sayfa</u>
7.4. Çekme Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	40
8. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ.....	44
8.1. Ultrases Geçiş Süresi Deney Sonuçlarının İrdelenmesi.....	44
8.2. Pas Payı İle Korunan Donatı Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi.	45
9. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	51
KAYNAKLAR.....	53
Ekler.....	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Yangın aşamalarının dağılımı (Buchanan, 2001).....	4
2.2. ISO 834 standart yangın deneyi zaman sıcaklık eğrisi.....	6
4.1. Yüksek sıcaklıkta, yapısal çelikler için geri kalan akma dayanımı faktörü...	12
4.2. Geri kalan elastisite modülü faktörünün sıcaklıkla olan karşılaştırması.....	14
5.1. Çeliğin sıcaklığa bağlı ısı genleşmesi.....	16
5.2. Çeliğin ısı iletkenliği.....	18
5.3. Sıcaklık etkisi altında kalan çeliğin ısı iletkenliğindeki değişim.....	19
5.4. EC2'ye (1993) göre sıcaklığın bir fonksiyonu olarak betonun ısı iletkenliği.	20
5.5. EC2'ye (1993) göre sıcaklığın bir fonksiyonu olarak betonun öz ısısı.....	21
5.6. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak betonun ısı genleşmesi.....	22
6.1. Deney numunelerinin kalıp içerisindeki şematik görünümü.....	23
6.2. Dere kumunun granülometri eğrisi.....	27
6.3. Deney numunelerine eğilme deneyi uygulanması.....	31
7.1. Harç numunelerinde ultrases geçiş hızı süreleri.....	36
7.2. Donatılı numunelerinde ultrases geçiş hızı süreleri.....	37
7.3. Harç numunelerinde sıcaklığa bağlı birim ağırlık değişimi.....	38
7.4. Harç karışımındaki uçucu kül oranına bağlı eğilme dayanımı değişimi.....	39
7.5. Harç numune karışımındaki uçucu kül oranı-basınç dayanımı değişimi.....	40
7.6. Ünlversal çekme aletinden elde edilen σ - ϵ eğrileri.....	41
7.7. Çekme deneyi sonrası elde edilen akma gerilmeleri.....	42
7.8. Çekme deneyi sonrası elde edilen çekme gerilmeleri.....	42
7.9. Çekme deneyi sonrası elde edilen uzama değerleri.....	43
8.1. Isıl işlem görmüş numunelerin ultrases geçiş hızı hesap ve ölçümleri.....	44
8.2. Isıl işlem görmüş numunelerin akma dayanımlarının ilk hallerine oranları...	45
8.3. Isıl işlem görmüş numunelerin çekme dayanımlarının ilk hallerine oranları...	46
8.4. Isıl işlem görmüş numunelerin uzama yüzdelerinin ilk hallerine oranları.....	47
8.5. Isıl işlem görmüş çelik malzemesinin sıcaklıkla rezilyansındaki değişim.....	49

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
6.1. Çimentonun kimyasal özellikleri.....	25
6.2. Çimentonun fiziksel özellikleri.....	25
6.3. Harç karma suyunun kimyasal özellikleri.....	26
6.4. Uçucu külün kimyasal özellikleri.....	26
6.5. Dere kumunun granülometrisi.....	27
6.6. Harç numunelerinin karışım oranları.....	28

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

<u>Fotoğraf</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Dünya Ticaret Merkezi'nde çıkan yangında sıcaklık 816 °C'ye ulaşmıştır.....	3
6.1. Kalıplar ve harç numunelerine donatının yerleştirilmesi.....	24
6.2. Harç numunelerinin hazırlanması.....	24
6.3. Harç numunelerine ultrases geçiş süresi deneyi uygulanması.....	29
6.4. Harç numunelerine eğilme dayanımı deneyi uygulanması.....	30
6.5. Harç numunelerine basınç dayanımı deneyi uygulanması.....	32
6.6. Yüksek sıcaklık deneyinde kullanılan fırın ve etüv.....	33
6.7. Çekme deneyinde kullanılan universal çekme makinesi.....	34
6.8. Çekme deneyi uygulanan donatı.....	35
7.1. Numuneler 950 °C'de ısıtılma işlemi girmeden önce ve sonra.....	40
7.2. Isıtılma işlemi tabii tutulmuş numunenin koruyucu pas payından ayrılması.....	41
7.3. 20 °C de tutulmuş, 300, 500, 800 ve 950 °C'de ısıtılma işlemi görmüş yalıtımsız numunelerdeki renk farklılığı.....	43
8.1. Numuneler 500 °C'de ısıtılma işlemi girmeden önce ve sonra.....	47
8.2. 950 °C'de ısıtılma işlemi gören pas payı donatının yüzeyindeki kabuk atma.....	48
8.3. 950 °C'den çıkmış ve 72 saat beklemiş numuneler.....	50
8.4. 950 °C'den çıkmış ve 240 saat beklemiş harç numuneleri.....	50

SEMBOLLER DİZİNİ

UK	Uçucu Kül
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
ECCS	European Convention for Constructional Steelwork
SFPE	The Society of Fire Protection Engineers
ISO	International Standards Organization
EC3	Eurocode 3
EC2	Eurocode 2
BSI	British Standards Institution
C-S-H	Kalsiyum Silika Hidrat
ASTM	American Society for Testing Materials
MPa	Megapaskal
Ca(OH) ₂	Kalsiyum Hidroksit

1. GİRİŞ

Yangın geçirdikten sonra yeniden kullanılması düşünülen binaların onarım ve güçlendirme hesaplarının yapılabilmesi için beton ve içindeki donatılarının özelliklerinin bilinmesine gerek duyulur. Betonarme binalarda çıkan yangınlardan sonra bu binaların onarım veya güçlendirmeden sonra tekrar kullanılmaları söz konusu olabilmektedir. Bu binaların tekrar kullanılabilmesi ve onarım veya güçlendirilmenin yapılabilmesi için yapının taşıma güvenliğinin bilinmesine gerek duyulur. Bunun için de yapının betonların yangından sonraki dayanımları ile betonarme çeliklerinin mekanik özelliklerinin bilinmesine gerek vardır. Betonarme binalarda çıkan yangınlara veya çevrenin zararlı etkilerine karşı betonarme donatıları pas payı dediğimiz beton tabakası korur. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonarme elemanlarda, betonun basınç dayanımında ve elastisite modülünde, çeliğin de akma dayanımında, sünekliğinde ve çekme dayanımında azalma meydana gelir.

Betonarme yapı elemanlarının yangından etkilenmesini inceleyen pek çok çalışma yapılmıştır. Bunlardan bir kısmı betonun, bir kısmı ise çeliğin özelliklerindeki değişimleri incelemiştir. El-Hawary vd.'ne (1997) göre farklı pas paylarında imal edilen betonarme kirişlerin farklı sürelerde 650 °C sıcaklığında tutulmasından sonra Schmidt çekici ile beton yüzey sertlikleri ölçülerek dayanımları belirlenmeye çalışılmış, farklı pas payı ve farklı sürelerde yüksek sıcaklıkta tutulmanın dayanımları önemli ölçüde etkilediği gösterilmiştir. Freudenberger vd.'de (2003) 20 ile 100 °C arasında değişen sıcaklıklarda tutulan betonarme elemanlarda çubuk çapı ve pas payı değerleri değiştirilmiş ve bu değişime bağlı olarak beton numuneleri test edilmiştir. Chung ve Consolazio'daki (2005) çalışmada ise yangın gibi ani yüksek sıcaklıkların olduğu durumlarda betonarme yapılardaki kütle transferi olayı incelenmiştir. Saafi (2005) ise betonarme kirişin içinde oluşan yüksek sıcaklıklardan kaynaklanan beton ve lifli polimer betonlarında ısıya direnç için en az 64 mm (2.5 in.)'lik bir pas payı bulunması önerilmiştir. Poon vd.'deki (2005) çalışmada ise yangın hasarlı betonun dayanım ve dayanıklılığı üzerine iyileştirme çalışmalarını araştırmıştır. Bratina vd.'de (2005) ise yangında betonarme kolonların davranışının doğrusal olmayan analizini incelemiştir. İlk

aşamada yangın sırasında kesit üzerindeki sıcaklık dağılımı belirlenmiştir. Sonraki aşamada bu dağılımın ısı yükleri olarak kullanıldığı mekanik analiz yapılmıştır. Tan ve Yao'da (2004) ise bir-iki-üç ve dört yüzeyinden yüksek sıcaklık etkisinde kalan kolonların yangın dayanımları incelenmiştir. Shi vd.'de (2004) betonarme kirişlerin yangına karşı dayanımında pas payının etkisi incelenmiştir.

Genel olarak betonarme elemanlarında yüksek ısı etkisi altında betonun (pas payı olarak bulunan) özellikleri araştırılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde kalmış betonarme elemanların içinde bulunan donatı çeliğinin incelenmesi ile ilgili araştırmalar daha az sayıda yapılmıştır. Abdalla'da (2005) sıcak iklimli bölgelerde alışlagelmiş donatı çeliği yerine değişik özelliklerde donatılar kullanılarak donatıların sıcaklıktan etkilenme durumları incelenmiştir. Wong'da (2005) ise farklı sürelerde yüksek sıcaklıkta bırakılmış çelik elemanların özelliklerindeki değişimler araştırılmıştır.

Beton, yüksek sıcaklık etkisinde donatıyı korumakta görevli önemli bir malzemedir. Yüksek sıcaklıklarda donatı çeliğinin akma ve çekme dayanımlarının azaldığı bilinmektedir. Donatıyı çevreleyen pas payı yüksek sıcaklıklarda ısıya karşı direnç görevi yaparak dış sıcaklığın donatıya direkt olarak etkimesine engel olur. Isınma sırasında çimento hamuru ile agrega arasındaki ısı uyumsuzluk, buharlaşan suyun oluşturduğu basınç etkisi, çimento hamuru ve agregadaki kimyasal yapı değişikliği betonun ısı direncini etkileyen önemli faktörlerdendir.

Sıcaklık etkisinde kalan çimento hamurunda, jel yapıyı oluşturan CSH'nin katı ögeleri, emme suyu yardımı ile birbirine bağlanır. Kılcal boşluklardaki serbest su 100 °C, jeldeki yüzey suyu ve CSH ile sülfatlı alüminattan gelen kimyasal bağ suyu 300 °C'den itibaren buharlaşır ve betonda büzülme neden olur (Mehta ve Monteiro, 1997). Bu su kaybının neden olduğu büzülme ve betonda oluşan buhar basıncı donatı üzerindeki pas payının çatlamasına ve kopmasına neden olur. Oluşan çatlaklar sonucunda betonun ısıya karşı direnci azalır ve yangın esnasında sıcak gazla donatı birbirine temas eder. Sıcaklığın 400 °C'nin üzerine çıkması ve boşluk sisteminin tamamen kurumması ile çimento hamurunda bir dizi tepkime oluşur. Bunu hidrasyon ürünlerinin ayrışması ve

CSH jellerinin parçalanması izler (Lin vd., 1996). Teknik literatürlere göre sıcaklığın artması halinde 530 °C civarında $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sönmemiş kirece dönüşür. Beton yüzeyinin beyazlaşması ile fark edilebilen bu olay sonucu, betonda ufalanma görülür.



Fotoğraf 1.1. Dünya Ticaret Merkezi'nde çıkan yangında sıcaklık 816 °C'ye ulaşmıştır.

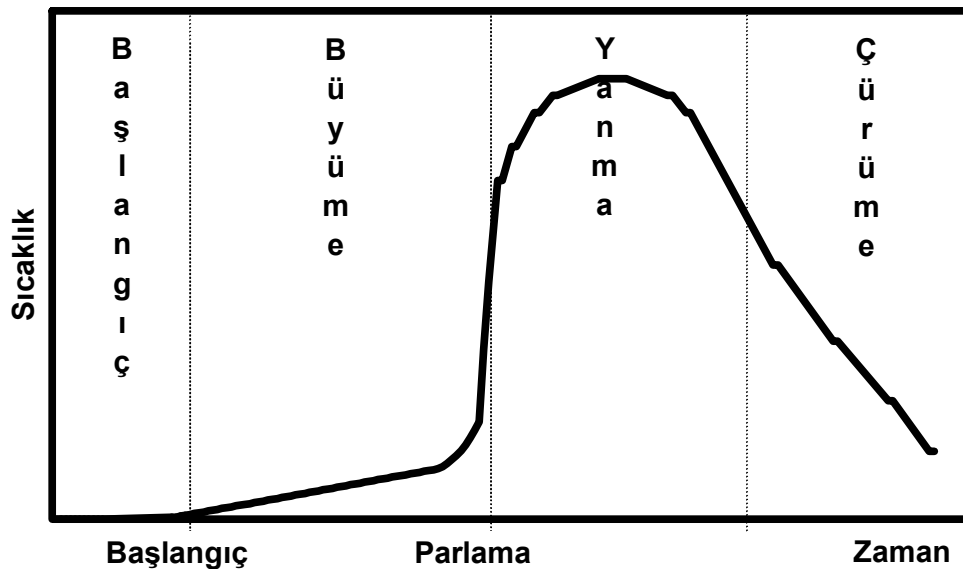
Yaptığımız bu çalışmada, yapıların yangın etkisi altında kalmaları sonucunda, 25 mm kalınlığındaki pas payının donatıları koruma performansı incelenmek istenmiştir. Pas payının 25 mm olduğu bir yapıda, yangın sonucu meydana gelecek sıcaklığın donatıda oluşturacağı mekanik değişimleri elde edebilmek için laboratuvar koşullarında hasarlı ve hasarsız deneyler yapılmıştır. Deneyde betonarme yapılarda etriye olarak kullanılan $\Phi 10$, kolon, kiriş ve prefabrik elemanlarda sıkça kullanılan $\Phi 16$ ve $\Phi 20$ çaplarına sahip S420 nervürlü betonarme inşaat çelikleri kullanılmıştır. Uçucu külün ve PÇ 42.5 çimentosunun değişik oranlardaki karışımlarının kullanıldığı 25 mm'lik pas payının yangının değişik sıcaklıklarında donatıyı koruma performansı araştırılmak istenmiştir.

2. YANGIN ve YANGIN DENEYLERİ

Yangın, yanıcı maddenin ısı ve oksijen ile belirli oranlarda birleşmesi sonucu oluşan kontrol dışı gelişen kimyasal bir olaydır.

2.1. Yangının Temel Aşamaları

Doğal yangınlar 4 aşamalardan oluşur. İlk aşama yanıcı kaynağın ısındığı tutuşma başlangıcıdır. İkinci evre büyüme evresidir ki, tutuşma görülebilir alevli yanmayı da içerir. Yangın 600 °C ye ulaştığında alan içerisine tamamen yayılır ve yanma periyodu olan 3. periyodun başlangıcını işaret eden parlama durumuna gelir. Yangın alanında sıcaklık ve ısı akımı çok yüksek olduğundan temas yüzeyleri yanar. Yangının bu en şiddetli aşaması, yapı elemanlarına en büyük etkiyi yapar. Yangının 4. evresi, yanıcı kaynağın aniden bitip yangının şiddetinin azalmaya başladığı çürüme evresidir. Çürüme evresi, genel olarak yangın bölgesinde bulunmakta olan yanıcı maddelerin % 70'inin yanmasını tamamladıktan sonra ortaya çıkar (Gewain vd., 2003).



Şekil 2.1. Yangın aşamalarının dağılımı (Buchanan, 2001)

Tek başına bir hacimde çıkan yangın, aniden kendini söndürür. Ancak, yangın kendini yatay ve düşey olarak diğer hacimlere yayar ve devamlı göç ederek tutuşma, büyüme, yanma ve çürüme periyotlarını tekrar eder (Gewain vd., 2003).

Şekil 2.1.'den görülmektedir ki, yangın güvenliğini sağlamanın en etkili yolu, bütünüyle tutuşmayı önlemek veya büyüme periyodunun erken evresinde yangını söndürmektir.

2.2. Yangın Deneyleri

2.2.1. Standart ISO 834 yangın deneyi ve yangın eğrisi

Standart yangın, yapıda kullanılan yapı ve tesisat elemanlarının yangın dayanımlarının ölçülebilmesi için oluşturulan bir yangındır. Genel olarak ISO 834 standart yangın eğrisi, birçok yangın standardının kabul ettiği bir eğridir.

ISO 834 standart yangın eğrisi

$$T_t = T_0 + 345 \log(8\tau + 1) \quad (2.1)$$

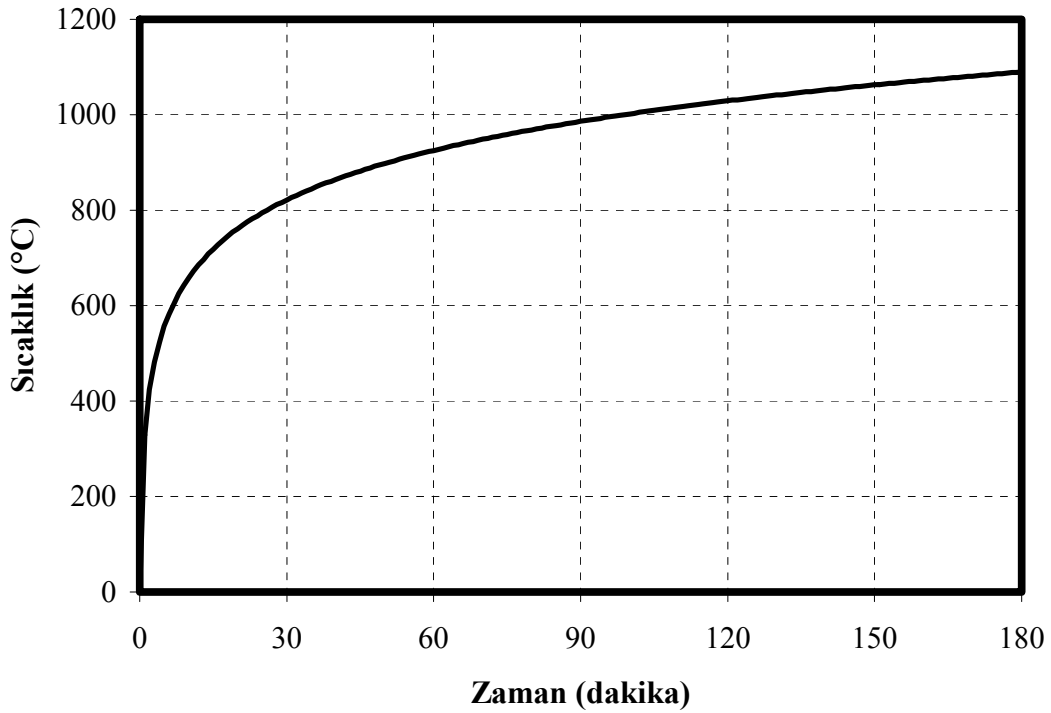
formüllerleriyle ifade edilmiştir. Burada,

T_0 = Deney başlangıcındaki çevre sıcaklığı (°C),

T_t = t anında ısıtıcının sıcaklığı (°C)

τ = zaman (dakika) olarak ifade edilir.

Standart yangın deneyi, yapı elemanlarının deneysel yangın deneyleri için kullanılan, gerçek yangına benzemeyen ve çevre koşulları kontrol edilerek tekrarlanabilen bir deneydir. Yapılarda kullanılan inşaat malzemesi üreticilerinin, mamullerinin yangın dayanım sürelerini standart ISO 834 deneyi ile ölçerek diğer yapı malzemeleriyle karşılaştırma yapabilmesini sağlamaktadır (Lewis K. R., 2000).



Şekil 2.2. ISO 834 standart yangın deneyi zaman sıcaklık eğrisi

Yangın standardı eğrisi, gerçekçi olamayan, zamana bağlı artan bir eğridir. Yangının başlangıcında hızlı bir sıcaklık yükselmesi ve bunun ardından sıcaklık artışında yavaşlama ve sabit bir sıcaklık artışı görülür (Lewis K. R., 2000).

Zamana bağlı olarak sıcaklık artışının görüldüğü ISO 834 yangın deneyinde, oda sıcaklığında başlayan deneyin 8 saat sonunda 1256 °C'ye ulaştığı görülür. Yapıda kullanılacak olan malzemelerin yangın sonucunda bu derecede yüksek sıcaklık etkisinde kalmaları beklenemez. Sıcaklığın zamana bağlı bir şekilde sürekli artmasından dolayı genellikle yangın deneylerinde ISO 834 yangının 180 dakikalık bölümü kullanılır. Malzeme, istenilen sıcaklığa ulaşmaya kadar eğriye uygun şekilde ısıtılır ve belirlenmiş süre kadar sıcaklık sabit tutulur.

2.2.2. Laboratuvar koşullarında kontrollü ASTM E 119 yangını

Başlangıcı hızlı olan ASTM E 119 yangınının, sıcaklığı 5 dakikada 538 °C'ye ulaşmaktadır. Uluslararası ISO 834 standardı da aynı karakteristiğe sahiptir (Gewain, 2003; Lewis K. R., 2000). Kontrolsüz doğal yangında belirgin büyüme, yanma ve fark edilir çürüme evreleri vardır. Aksine ASTM E 119'da standart yangınının çürüme bölümü yoktur. Sürece 8 saat olan yangın deneylerinde, sıcaklık 1260 °C'ye ulaşır, fakat normalde deney yangın süresi 3 yada 4 saati geçmez (Lewis K. R., 2000).

ASTM E 119 standardı, en şiddetli anında sürekli yanıcı madde desteği ile güç kaybetmeyen yangını taklit eder. Doğal bir yangın, yanıcının cinsine ve yangın alanındaki havalandırmaya göre değişik karakter gösterir. Kontrol altına alınmayan, iyi hava sirkülasyonu ile bol oksijen tüketebilme koşullarına sahip yangınlar, hızlı yanışa ve yüksek sıcaklığa çabuk erişebilme özeliğine sahiptir. Bu nedenle yanıcıyı daha çabuk tüketebildikleri için, süre olarak aynı yakıt ile iyi havalandırma koşullarına sahip olmayan yangınlardan daha kısadırlar (Gewain, 2003).

Konut ve ofis yangınlarından daha hızlı başlayıp, yangının daha sıcak olarak seyrettiği petrokimyasal maddeler için ASTM E 1529 standardı kullanılmaktadır. Standarda göre, yangın 5 dakika sonra 1100 °C üzerine çıkar ve sabit kalır (Lewis K. R., 2000).

2.3. Normal Yangın Sıcaklığı ve Yanma Süresi

Bir binada çıkan yangının en yüksek sıcaklığı ve süresi, yanıcı miktarı ve özelliklerine, hava sirkülasyonuna, yangının bulunduğu hacmin kaplama özelliklerine ve hava koşullarını içeren kriterlere bağlıdır. Konutta veya ofiste, tamamen yayılmış bir yangın 815 °C'yi geçmez, zirve sıcaklığı ise 1093 °C'ye ulaşabilir. Yanan hacimdeki en yüksek sıcaklık zirve sırasında 10 ila 20 dakikayı tipik olarak aşmaz (Gewain, 2003).

3. ISININ YANGININ ÇEVRELEDİĞİ MALZEMEYE TRANSFERİ

Sadece yangının sıcaklığı değil, ısı girişi ve buna karşılık gelen sıcaklık artışı yapı elemanının yangın tepkisini etkiler. Genel olarak ısı transferi 3 yolla etkir: iletkenlik, ısıl konveksiyon ve radyasyon (Gewain, 2003).

3.1. İletkenlik

İletkenlik formuyla oluşan ısı transferi, katı bir malzeme yada birçok malzeme arasındaki serbest elektronların karşılıklı reaksiyona girmesidir. Yüzeyle direkt olarak fiziksel teması da içermektedir. İletkenlik cisimde ısıl genişleme dışında herhangi bir uzama yaptırmaz (Tucker A.S., 1999). İletkenlik, katı malzemeye doğru ısı transferidir ve malzeme özelliklerinden yoğunluk, öz ısı ve ısıl iletkenlikle ilgilidir.

3.2. Isıl Konveksiyon

Isıl konveksiyon, gaz yada likit halde olsun, akışkanların ısı transferidir. Isıl konveksiyon, farklı yoğunluklardaki likit yada gaz halde bulunan akışkanların çok farklı sıcaklıklarda birbirine karışmasıyla olur. Sıcaklık yükseldiğinde, yüksek sıcaklıktaki akışkan, düşük sıcaklıktaki bölgelere temas ederek ısı enerjisi bırakılır ve transferin oluşmasına neden olur (Tucker, 1999). Genellikle yangın durumlarında, konveksiyonla ısı transferi, yangından geçerek soğuk durumda olan katı bir malzemeye doğru sıcak gazlar aracılığı ile transfer edilen ısı yada enerjiyi içerir. Malzemenin ısınma hızı, malzeme yüzeyindeki akışkanın ivmesine, akışkanın ve malzemenin ısıl özelliklerine ve malzeme sıcaklığına bağlıdır (Lewis K. R., 2000).

Isıl konveksiyon yoluyla ısı transferi genel olarak

$$q = h_c \Delta T \quad (3.1)$$

h_c , ısı transferi prensipleri, akışkanın özellikleri ve ısınan malzemenin geometrisi kullanılarak hesaplanabilir. Standart yangınlar için h_c , tipik bir değer olan $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak alınır. Eğer bir hidrokarbon yangını söz konusu ise, h_c değerinin $50 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak alınması Eurocode tarafından önerilmektedir (Buchanan, 1999).

3.3. Radyasyon

Radyasyon iki malzeme arasındaki enerji transferinin en güçlü formudur. Enerji elektromanyetik dalgalarını transfer eder ve enerji kaynağını görerek bu dalgaların yolunu kesen malzemeye iletir. Isıl konveksiyon ve iletkenliğin aksine, radyasyonla ısı uzayda iletilebilir. Isının, çıkış kaynağı yüzeyi ile ısıyı alan yüzey arasındaki ısı transferi, genel bir formül olan Formül 3.2 ile ifade edilmektedir.

$$q = \varphi \varepsilon \sigma (T_e^4 - T_r^4) \quad (3.2)$$

Burada T_e (emitting surface) ısı kaynağının yüzey sıcaklığı yani yangının sıcaklığı, T_r (receiving surface) ısıyı alan yüzeyin sıcaklığıdır. ε , yayılım $0 < \varepsilon < 1$ olarak alınır. Sıcaklıklar Kelvin olarak ifade edilir ve genel olarak sonlu elemanlar yöntemini kullanan ısı transferi programlarında Stefan–Boltzmann katsayısı olan, σ değeri $5.67 \times 10^{-8} \text{ KW/m}^2\text{K}^4$ olarak alınmaktadır. Konfigürasyon faktörü $0 \leq \varphi \leq 1$ değerleri arasında bir değer seçilir (Lewis K. R., 2000).

Korunan bir yapı çeliğinde, yangından dolayı sıcaklık yükselmesi, ısının radyasyonla, koruyucu malzemeye iletildikten sonra, malzeme üzerindeki iletimi ve yalıtkan malzemenin kalınlığına bağlıdır. Korunan çelik, bütün yangın aşamalarında yangından daha düşük sıcaklıkta olur. Koruyucu kaplamanın kalınlığının ve yalıtkan özelliklerinin yanında çelik elemanın büyüklüğü ve ağırlığı da çelikteki sıcaklığın düşük olmasını etkileyen faktörlerdir. Korunmayan çıplak çelik elemanların yangın esnasında sıcaklıklarına ısıl konveksiyon ve radyasyon aynı anda etkilidir (Gewain, 2003).

4. YÜKSEK SICAKLIĞIN, ÇELİK MEKANİK ÖZELİKLERİNE ETKİSİ

Yüksek sıcaklıklarda çekme, akma dayanımları, elastisite modüllerinde düşüşler olur. Lie T. T. (1992) ve SFPE'ye (2002) göre genel olarak çelik 593 °C (1000 °F)'lik sıcaklığa sahip çevre koşullarında dayanımının ve rijitliğinin % 50'sini korur. Bu, sıradan bir betonun rijitlik ve dayanım kayıplarıyla aynıdır. 704 °C (1300 °F)'da, çelik dayanım ve rijitliğinin % 20'sine sahiptir. 1204 °C (2200 °F)'de ise çelik, dayanım ve rijitliğinin neredeyse tamamını kaybeder (Gewain, 2003).

Çeliğin yangına olan uzaklığı da önemlidir. Örneğin ASTM E 119 deneyine göre 2 saat süren bir yangında kirişin yangına daha yakın olan alt yüzü, üst taraftan 400 °C daha sıcak olabilmektedir. Kirişin alt kısmında bulunan donatılar dayanımlarının çoğunu kaybetmelerine karşın üst kısım kritik sıcaklığın çok altında olabilmektedir.

Yüksek sıcaklık etkisinde, çeliğin mekanik ve ısıl özellikleri farklılaşır. Belirgin mekanik özellikler akma dayanımı ve elastisite modülüdür. Isıl iletkenlik, ısıl genleşme katsayısı, yoğunluk ve öz ısı da ısıl özellikleriyle ilişkilidir. Yoğunluk dışında bütün bu parametreler sıcaklık tarafından etkilenir. Tipik olarak yapılarda kullanılan inşaat çeliği 650 °C kristalize olmaktadır (Milke J., 1988).

4.1. Dayanım

Lie T. T. (1992) ve Milke J.'e (1988) göre sıcakta haddelenmiş inşaat çelikleri için akma dayanımındaki azalma Formül 4.1'de belirtilmiştir (Gerlich J.T., 1995).

$$F_{yT} = F_{y0}(1 - 0.78\theta - 1.89\theta^4), \quad \theta < 0.63 \quad T < 650 \text{ °C} \quad (4.1)$$

Sıcaklığa göre akma dayanımındaki değişim bütün çelik sınıfları için tek bir formülle Purkiss tarafından Formül 4.2 ve Formül 4.3'da ifade edilmiştir. (Purkiss J.A., 1996)

$$\frac{f_y(T)}{f_y(20)} = 1.0 \quad 0^\circ\text{C} < T \leq 215^\circ\text{C} \quad (4.2)$$

$$\frac{f_y(T)}{f_y(20)} = \frac{905 - T}{690} \quad 215^\circ\text{C} < T \leq 1000^\circ\text{C} \quad (4.3)$$

Avrupa Çelik Yapı Kongresi (ECCS, 1983)'ye göre de sıcaklıkla dayanımdaki değişim verilen Formül 4.4 ve 4.5'de ifade edilmiştir.

$$\frac{f_y(T)}{f_y(20)} = 1.0 + \frac{T}{767 \left(\ln \left[\left(\frac{T}{1750} \right) \right] \right)} \quad 0^\circ\text{C} < T < 600^\circ\text{C} \quad (4.4)$$

$$\frac{f_y(T)}{f_y(20)} = 108 \frac{\left(1 - \frac{T}{1000} \right)}{T - 440} \quad 600^\circ\text{C} < T < 1000^\circ\text{C} \quad (4.5)$$

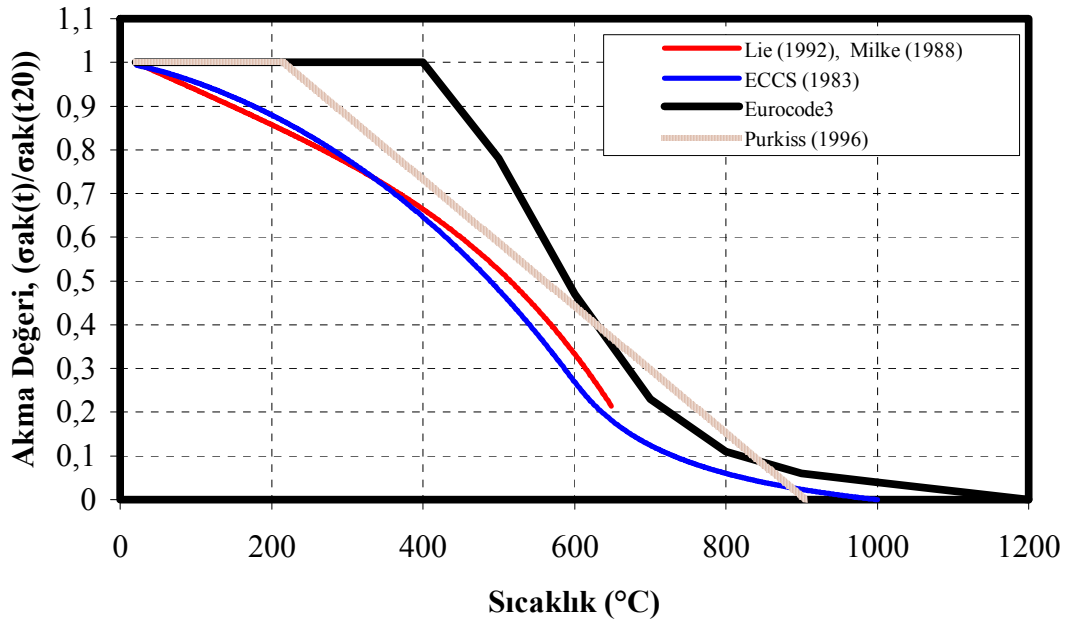
formülleriyle ifade edilmiştir.

$$f_y(20) = \quad 20^\circ\text{C} \text{ oda sıcaklığında akma dayanımı (MPa olarak)}$$

$$f_y(T) = \quad T \text{ sıcaklığındaki akma dayanımı (MPa olarak)}$$

$$\theta = \quad (T-20)/1000$$

$$T = \quad \text{Çeliğin sıcaklığı (}^\circ\text{C)}$$



Şekil 4.1. Yüksek sıcaklıkta, yapısal çelikler için geri kalan akma dayanımı faktörü

Gerlich'in (1995) yapmış olduğu araştırma sonucunda, herhangi bir formül verilmemesine karşın, sıcaklığa karşı, sıcakta haddelenmiş çeliklerin soğuk haddelenmiş çeliklere göre % 10~20 daha yüksek dayanıma sahip olduğu belirtilmiştir.

4.2. Rijitlik

Çeliğin mekanik özelliklerinde sıcaklığın yükselmesiyle genel olarak bir düşüş gözlemlenir. Belirli bir sıcaklık değerinde çeliğin elastisite modülü sıfır'a ulaşır ve çeliğin mekanik özelliklerini kaybetmesi gerekir. Çeliğin akma dayanımıyla elastisite modülünün aynı sıcaklıkta sıfır değerine ulaşması gerekir. Elastisite modülünün değer alması halinde akma dayanımının sıfır değeri aldığı kabul edilemez. Yüksek sıcaklıklarda çeliğin dayanımındaki düşüşe benzer şekilde, sıcakta haddelenmiş çelikler için elastisite modülündeki azalma Formül 4.6'da verilmiştir. (Lie T. T., 1992)

$$\frac{E(T)}{E(20)} = 1.0 + \frac{T}{2000 \ln \left[\frac{T}{1100} \right]} \quad 0 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 600 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.6)$$

Yeni Zelanda ve Avustralya standartları için Fransız Teknik Merkezi (CTICM), 0 ile 1000 °C aralığını kapsayan bir eğri önermiştir. Bu eğri 600 °C'ye kadar öngörölmüş olan Lie'nin denkleminin aynısını kabul eder. Bu sıcaklıktan sonrası için aşağıdaki Formül 4.7 önerilmiştir (Wong ve Petterson, 1996).

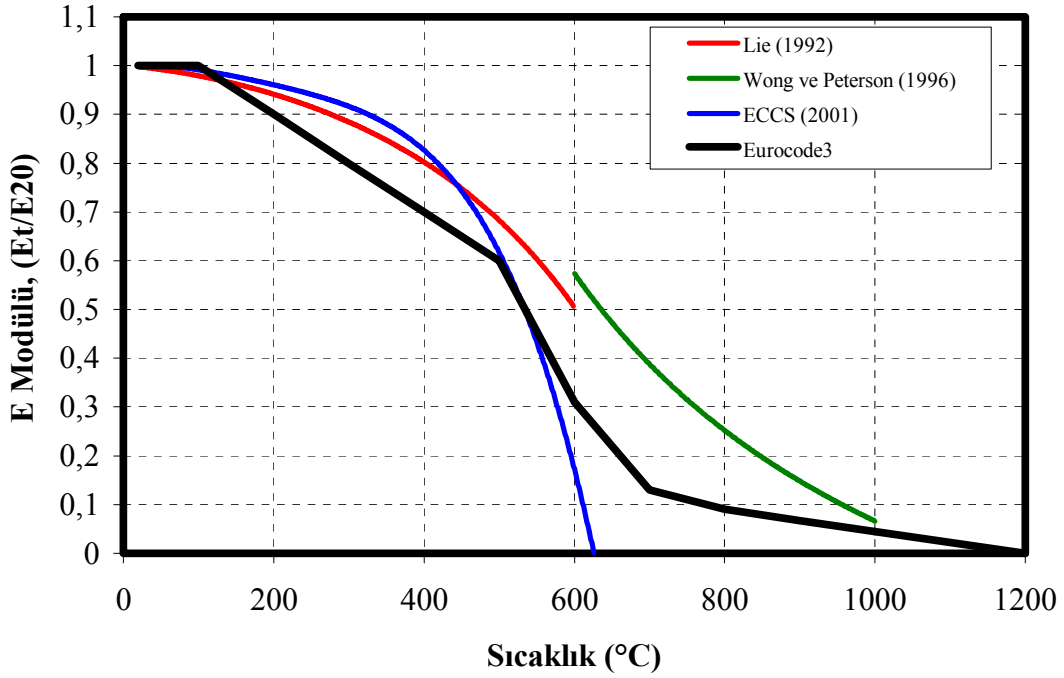
$$\frac{E(T)}{E(20)} = \frac{690 \left(1 - \frac{T}{1100} \right)}{T - 53.5} \quad 600 \text{ } ^\circ\text{C} < T \leq 1000 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4.7)$$

ECCS (2001) aşağıdaki Formül 4.8'i kabul etmektedir. Eurocode'un kabul etmekte olduğu eğri de aynı formülün değişikliğe uğratılmış halidir.

$$\frac{E(T)}{E(20)} = 1 - 17.2 \times 10^{-12} T^4 + 11.8 \times 10^{-9} T^3 - 34.5 \times 10^{-7} T^2 + 15.9 \times 10^{-5} T \quad (4.8)$$

$$\begin{aligned} E(20) &= 20 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ deki elastisite modülü (MPa)} \\ E(T) &= T \text{ sıcaklığındaki elastisite modülü (MPa)} \\ T &= \text{Çeliğin sıcaklığı (} ^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

Lie (1992), soğukta haddelenmiş çeliklerin yüksek sıcaklık altında elastisite modüllerindeki azalma miktarını bir bağıntı ile vermemiş ancak elastisite modülünün sıcakta haddelenmiş çelikten % 20 daha az olduğunu belirtilmiştir.



Şekil 4.2. Geri kalan elastisite modülü faktörünün sıcaklıkla olan karşılaştırması

ECCS'ye (2001) göre, burada formülü verilmiş ve Şekil 4.2.'de gösterilmekte olan eğri uniform olarak ısıtılmış küçük bir deney numunesi olup gerçek bir yangında ortaya çıkan koşullar sonucu meydana gelen etkileri tamamen yansıtamaz.

4.3. Çelik Kalitesindeki Farklılığın Yangın Tepkisine Etkisi

Genel olarak ABD'de kullanılan yapı çelikleri üzerinde yapılan yüksek sıcaklık deneyleri sonuçlarına göre, çeliğin mekanik ve ısı özelliklerinde benzer bozulmalar olduğu saptanmıştır. Elde edilen bu sonuçlara göre, Eurocode eğrilerinin bütün çelik tipleri için uygun olduğu söylenebilir (Gewain, 2003).

5. ÇELİK ve BETONUN ISIL ÖZELİKLERİ

5.1. Çeliğin Isıl Özellikleri

Birçok kaynak araştırmasına göre, sıcaklıkla çeliğin ısıl ve mekanik özelliklerinin değişiklik gösterdiği bilinmektedir. Sıcaklık artışıyla çeliğin dayanımında ve yük taşıma kapasitesinde belirgin düşüşler olduğu bilinmekte olup genel olarak ısıl özelliklerinin basitçe sabit olduğu varsayılır (Lewis K. R., 2000)

5.1.1. Isıl genleşme

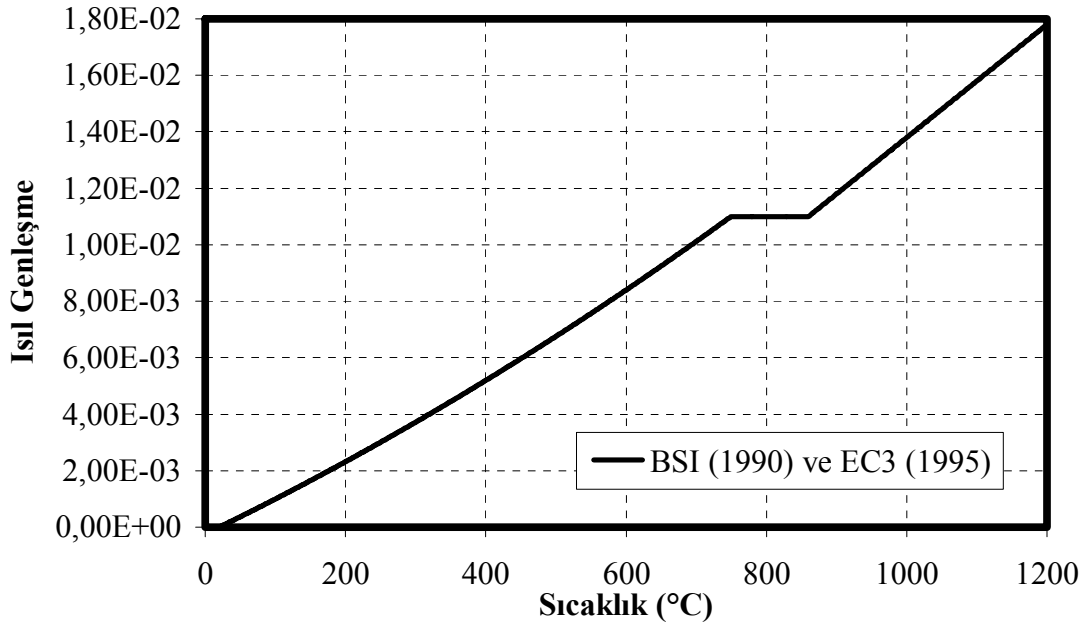
Isıl genleşme elemanın uzunluğundaki uzamanın, elemanın ilk haline oranıdır. BSI (1990) ve EC3'e (1995) göre,

$$\frac{\Delta l}{l} = 1.2 \times 10^{-5} T + 0.4 \times 10^{-8} T^2 - 2.416 \times 10^{-4} \quad 20 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 750 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.1)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 1.1 \times 10^{-2} \quad 750 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 860 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.2)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 2 \times 10^{-5} T - 6.2 \times 10^{-3} \quad 860 \text{ }^\circ\text{C} < T \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.3)$$

Isıl genleşme, üç ayrı formülle ifade edilmektedir. Formül 5.1, 5.2 ve 5.3'den anlaşıldığı üzere 750 °C'ye kadar artan bir genleşmeye sahiptir. Bu sıcaklıktan sonra meydana gelen durağanlık, çelikteki malzeme yapısının değiştiğini işaret etmektedir.



Şekil 5.1. Çeliğin sıcaklığa bağlı ısıl genleşmesi

Çeliğin sıcaklığa bağlı olarak lineer genleşmesi $\Delta L = L \times \alpha \times \Delta T$ olarak bilinmektedir. Genel olarak çeliğin ısıl genleşme katsayısı $11 \times 10^{-6} / ^\circ C$ olarak alınmaktadır. Sıcaklığın ısıl genleşme katsayısına etkisi Lie T. T. (1992) tarafından,

$$\alpha_T = (0,004T + 12) \times 10^{-6} \quad T < 1000 \text{ } ^\circ C \quad (5.4)$$

şeklinde ifade edilmiştir.

L	=	Malzeme boyu
α	=	Lineer ısıl genleşme katsayısı
ΔL	=	Malzemenin boyca uzaması
ΔT	=	Sıcaklık farkı
α_T	=	T sıcaklığında ısıl genleşme katsayısı ($^\circ C^{-1}$)
T	=	Çeliğin sıcaklığı ($^\circ C$)

5.1.2. Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik, malzemeye verilen ısıyı iletme hızıdır. Çelik için ısı iletkenlik sıcaklığın ve çeliğin kompozisyonunun bir fonksiyonudur. Isıl iletkenlik ve malzemenin öz ısısının bir fonksiyonu olan ısı akışı, çelik elemandaki sıcaklık yükselmesinin nedenidir. Isıl iletkenlik oda sıcaklığında kimyasal kompozisyona göre değişkenlik gösterir, ancak yüksek sıcaklıklarda birçok yapı çeliği için ayırt edicidir. (Gerlich J. T., 1995)

Isıl iletkenliğin yaklaşık hesabı Lie T. T. (1992) ye göre,

$$\lambda = -0.022T + 48 \quad 0 \text{ }^{\circ}\text{C} < T < 900 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.5)$$

EC3'e (1995) göre

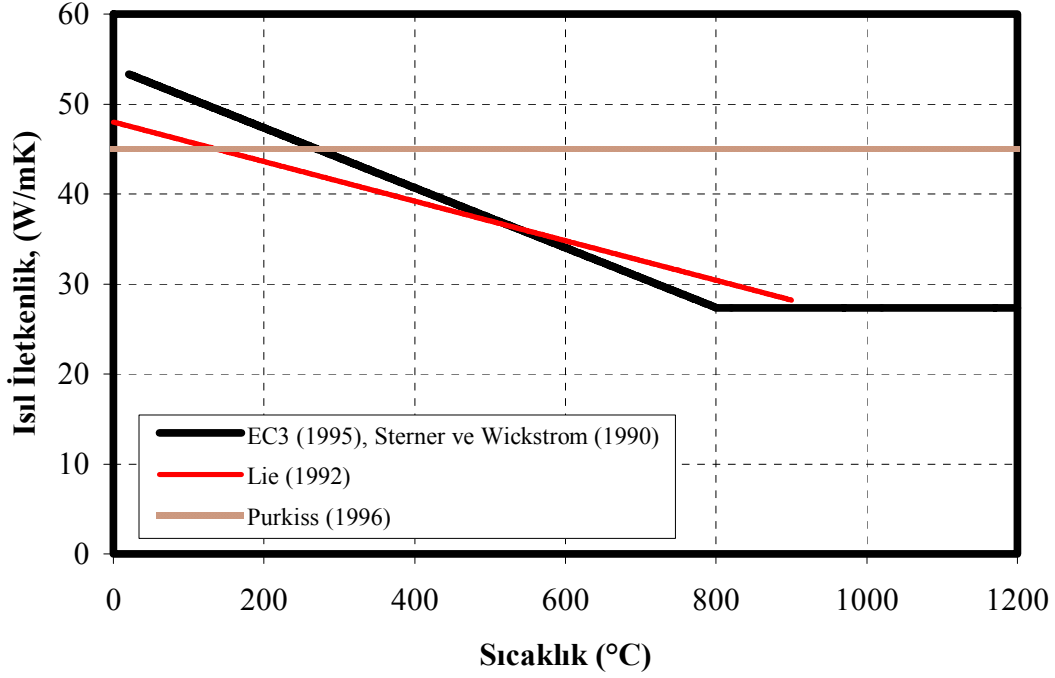
$$\lambda = 54 - (0.0333 \times T)(W / mK) \quad 20 \text{ }^{\circ}\text{C} < T < 800 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.6)$$

$$\lambda = 27.3(W / mK) \quad 800 \text{ }^{\circ}\text{C} < T < 1200 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.7)$$

Yaklaşık hesaplamalar için Eurocode'un da önerdiği gibi ısı iletkenlik 45W/mK olarak da alınabilir (Purkiss J.A., 1996).

λ = Isıl iletkenlik (W/m[°]K)

T = Çeliğin sıcaklığı (°C)



Şekil 5.2. Çeliğin ısı iletkenliği

5.1.3. Yoğunluk

Yangın etkisinde kalan çeliğin yoğunluğunun 7850 kg/m^3 olarak sabit kaldığı deneysel olarak görülmüştür (Purkiss J.A., 1996).

5.1.4. Öz ısı (ısı iletkenliği)

Öz ısı (c) $\text{Btu}/[\text{lb}^\circ\text{F}]$ yada $\text{J}/[\text{kg}^\circ\text{C}]$ olarak malzemenin birim kütesini birim sıcaklık arttırmak için gerekli ısı miktarıdır. Genel olarak çeliğin öz ısı sıcaklıkla doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Benzer şekilde efektif ısı kapasitesi, bazen hacim öz ısı olarak adlandırılır, $\text{Btu}/[\text{ft}^3 \text{ }^\circ\text{F}]$ yada $\text{J}/[\text{m}^3 \text{ }^\circ\text{C}]$ olarak malzemenin birim hacminde bir birim sıcaklık arttırmak için gerekli enerji miktarıdır. Purkiss J.A.'ya (1996) göre aşığıdaki Formül 5.5, $750 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar geçerli olmaktadır,

$$c_p = 475 + 6.010 \times 10^{-4} T^2 + 9.46 \times 10^{-2} T \quad T < 750 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.5)$$

EC3'e (1995) göre

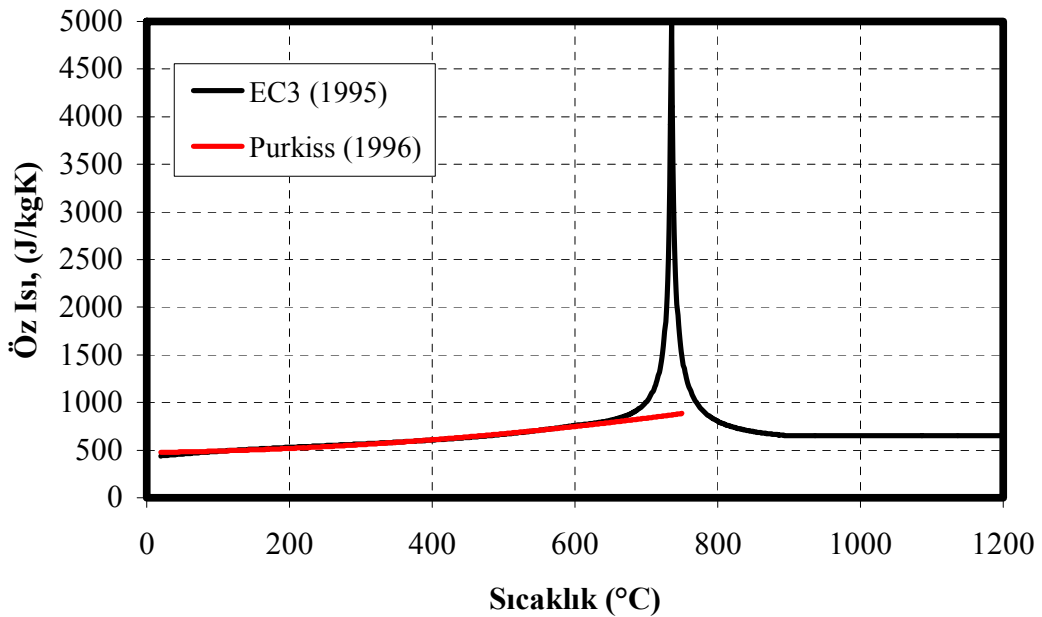
$$c_p = 425 + 0.773T - 1.69 \times 10^{-3} T^2 + 2.22 \times 10^{-6} T^3 \quad 20^\circ\text{C} \leq T < 600^\circ\text{C} \quad (5.6)$$

$$c_p = 666 + \frac{13002}{(738 - T)} \quad 600^\circ\text{C} \leq T < 735^\circ\text{C} \quad (5.7)$$

$$c_p = 545 + \frac{17820}{(T - 731)} \quad 735^\circ\text{C} \leq T < 900^\circ\text{C} \quad (5.8)$$

$$c_p = 650 \text{ J/kgK} \quad 900^\circ\text{C} \leq T < 1200^\circ\text{C} \quad (5.9)$$

Eurocode'a göre 730 °C'de çelikteki metalurjik yapının kristalize olmasıyla pik noktası yapılmış olur. Çeliğin polimorfik yapısı bu sıcaklıkta ferritten ostenite dönüşmüştür. Bu yapı değişikliği nedeni ile de formüllerde 750 °C'den sonra bir süreksizlik vardır. Öz ısı 900 °C'den sonra ise 1200 °C'ye kadar, 650 J/kgK değerini almaktadır.



Şekil 5.3. Sıcaklık etkisi altında kalan çeliğin ısı iletkenliğindeki değişim

5.2. Betonun Isıl Özellikleri

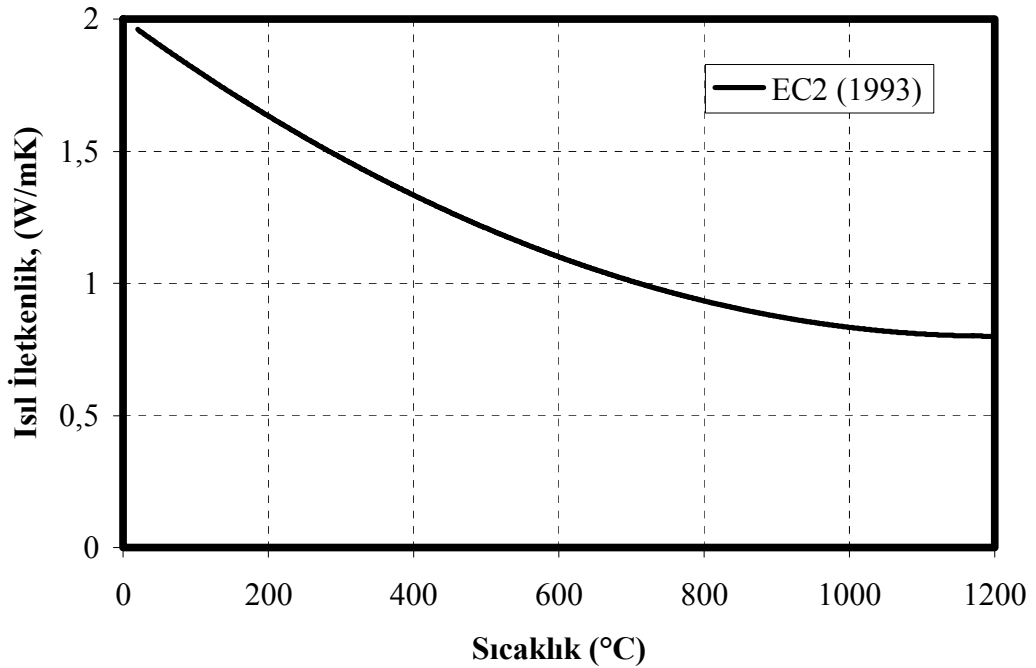
5.2.1. Isıl iletkenlik

Isıl iletkenlik beton için, agrega tipine ve betonun sıcaklığına bağlıdır. EC2'e (1993) göre önerilen ısıl iletkenlik silisli agrega içindir. Beton için ısıl iletkenlik,

$$\lambda_c = 2 - 0.24T/120 + 0.012(T/120)^2 \text{ (W/mK)} \quad 20 \text{ }^\circ\text{C} \leq T < 1200 \text{ }^\circ\text{C} \quad (5.10)$$

formülü ile ifade edilir.

Isıl iletkenlik değeri 2 W/mK değerinden 800 °C'ye kadar yavaşlayan bir şekilde düşmektedir. Bu sıcaklıktan sonra ise ısıl iletkenlik değeri eğrisinin yataya yaklaştığı ve düzleşmekte olduğu görülmektedir. Sıcaklığı 800 °C'yi bulan betonun, ısıl iletkenliğinin yaklaşık olarak yarısını kaybettiği görülür.



Şekil 5.4. EC2'ye (1993) göre sıcaklığın bir fonksiyonu olarak betonun ısıl iletkenliği

5.2.2. Öz ısı

Betonun öz ısısı nem oranıyla değişkenlik gösteren bir özelliktir. 100 °C ile 200 °C arasında dışarı çıkmak isteyen su nedeniyle pik seviyesine ulaşır. Betonun öz ısısı,

$$c_p = 900 + 80T/120 - 4(T/120)^2 \quad 20 \text{ °C} \leq T < 100 \text{ °C} \quad (5.11)$$

ve $200 \text{ °C} < T \leq 1200 \text{ °C}$

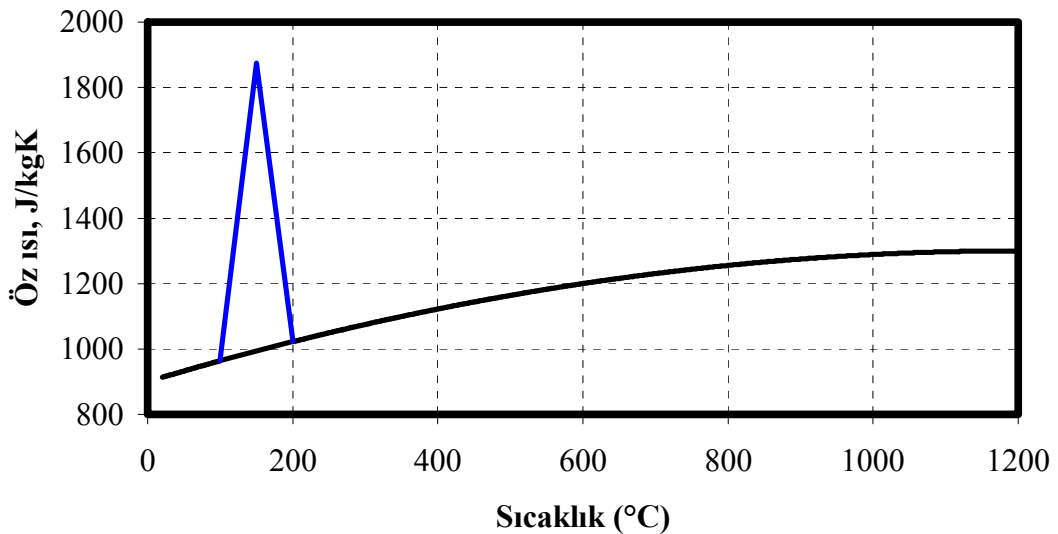
Bununla birlikte 100 ile 200 °C arasında dışarı çıkmaya çalışan su nedeniyle grafik bir zirve noktasına ulaşır. Bu nedenle eğri devamlılığını koruyamamakta ve 100 ile 200 °C bandında yukarıda belirtilen eşitliklerden farklı olarak formüle edilmiştir.

Eğer nem ağırlıkça % 2 oranında ise:

$$c_{P,zirve} = 1875 \text{ (J/kgK)} \quad 20 \text{ °C} \leq T < 100 \text{ °C} \quad (5.12)$$

Eğer nem ağırlıkça % 4 oranında ise:

$$c_{P,zirve} = 2750 \text{ (J/kgK)} \quad 20 \text{ °C} \leq T < 100 \text{ °C} \quad (5.13)$$



Şekil 5.5. EC2'ye (1993) göre sıcaklığın bir fonksiyonu olarak betonun öz ısısı

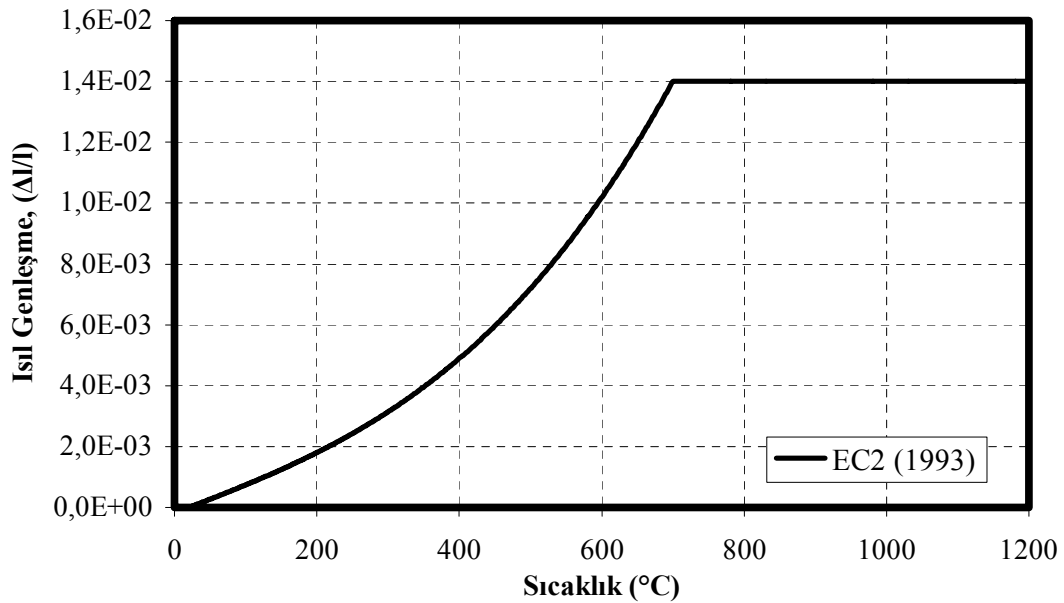
Şekil 5.5'te sıcaklığa bağlı olarak betonun öz ısısının azalan bir oranla artmakta olduğu görülmektedir. Eğim sürekliliğinin sıcaklığın 100 ile 200 °C arasında buharlaşarak dışarı çıkmak isteyen su nedeniyle bozulduğu görülmektedir. Betonun bu sıcaklıklar arasındaki öz ısı değeri, betonun ağırlıkça içerdiği nem oranına bağlıdır. Bu sıcaklıklar arasında betonun öz ısı değeri ağırlıkça içerdiği nem oranıyla doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Öz ısı 1000 °C üzerinde yaklaşık olarak sabit eğimle gitmektedir.

5.2.3. Isıl genleşme

Eurocode2'ye (1993) göre silisli beton için izleyen denklem verilmiştir. Bu ısıl genleşme sıcaklık ilişkisi 700 °C'ye kadar hiperboliktir. Bu dereceden sonra eğri sabit olup Formül 5.14 ve 5.15'te görülen şekilde ifade edilir.

$$\frac{\Delta l}{l} = -1.8 \times 10^{-4} + (9.0 \times 10^{-6})T + (2.3 \times 10^{-11})T^3 \quad 20 \text{ °C} \leq T < 700 \text{ °C} \quad (5.14)$$

$$\frac{\Delta l}{l} = 14 \times 10^{-3} \quad 700 \text{ °C} \leq T < 1200 \text{ °C} \quad (5.15)$$

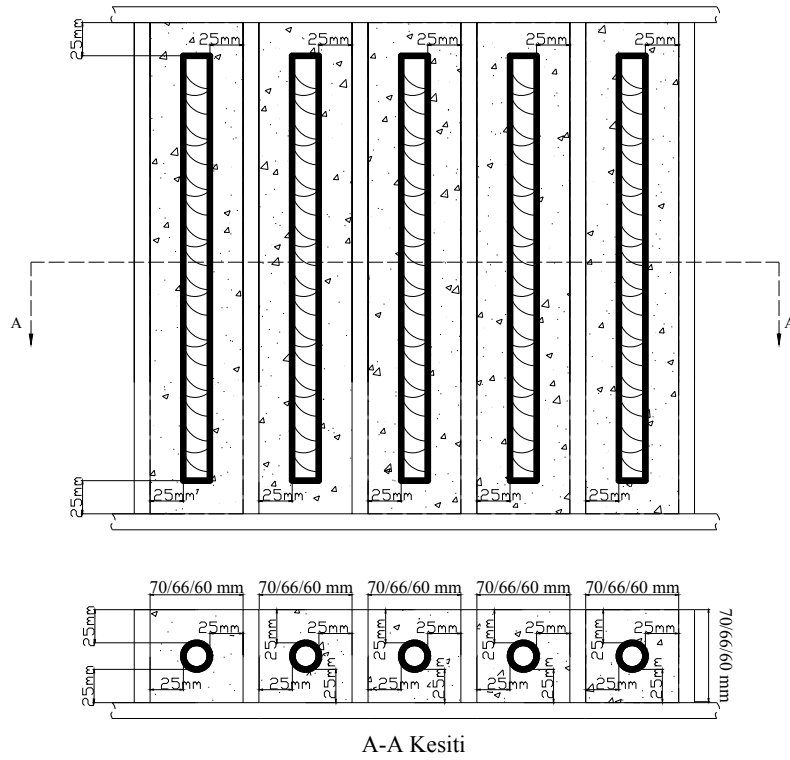


Şekil 5.6. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak betonun ısıl genleşmesi

6. DENEYSEL ÇALIŞMA

6.1. Deney Numunelerinin Hazırlanması

25 mm pas payına sahip donatılı numunelerin hazırlanmasında dört tipte karışım kullanılmıştır. Bu karışımlar, normal ve ağırlıkça yüzde olarak çimentonun dozajının azaltılarak yerine uçucu kül ilavesi ile gerçekleştirilmiştir. Deneyde kullanılacak olan inşaat çeliklerinin boyu, universal çekme aletinin çeneleri arasında çaplarının 10 katı kadar mesafe kalacak ve her iki tutucu çenenin de kavrayabileceği uzunlukta paylara sahip olmalıdır. Donatılar Şekil 6.1. de görüldüğü gibi kalıplara yerleştirilmiştir.



Şekil 6.1. Deney numunelerinin kalıp içerisindeki şematik görünümü

Buna göre Φ 10 ve 16 çapları için 250 mm uzunluğunda, Φ 20 çapı için de 320 mm uzunluğunda inşaat çelikleri kestirilmiştir. 25 mm pas payını sağlayabilmek amacıyla

her donatı için ayrı ayrı kalıp hazırlanmıştır. Φ 10'luk numuneler için 60x60x300 mm, Φ 16'luk numuneler için 66x66x300 mm ve Φ 20'lik numuneler için 70x70x370 mm ölçülerine sahip kalıplar yaptırılmıştır.



Fotoğraf 6.1. Kalıplar ve harç numunelerine donatının yerleştirilmesi

Numunelerde, 25 mm pas payını düzgün olarak sağlayabilmek için, özel kalıpların ilk önce alt bölümü doldurulup vibrasyonlu masada sıkıştırılması sağlandıktan sonra, donatı numuneleri kalıpların merkezine yerleştirilmiştir. Kalıp üst seviyesine kadar doldurulan numuneler sıkıştırılmış ve prizini alması için bekletilmiştir. Kontrol amaçlı olarak her karışımdan üç adet 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik harç numuneleri alınmış ve kalıptan çıkarılan numunelerle beraber aynı koşullarda 23 °C sabit sıcaklıkta kirece doymun suda, 28 gün kür ortamında tutulmuştur.



Fotoğraf 6.2. Harç numunelerinin hazırlanması

6.2. Kullanılan Malzemeler

6.2.1. Çimento

Deneysel çalışmada, Bursa Çimento Fabrikası'nın üretimi PÇ 42.5 portland çimentosu kullanılmış olup. Bu çimentolara ait fabrika verileri Çizelge 6.1. ve 6.2.'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim, %			
SiO ₂	20.96	MgO	1.69
Al ₂ O ₃	5.58	SO ₃	2.84
Fe ₂ O ₃	3.69	Kızdırma Kaybı	1.15
CaO	63.97	Tayin Edilemeyen	0.50

Çizelge 6.2. Çimentonun fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler		Basınç Dayanımı, MPa	
Özgül Ağırlık	3150	2. Gün	21.9
Özgül Yüzey (cm ² /gr)	3315	7. Gün	38.3
		28. Gün	45.1

6.2.2. Karma suyu

Harç karma suyu olarak Eskişehir şebeke suyu kullanılmıştır. Harcın üretiminde kullanılmış olan şebeke suyunun kimyasal analizi Çizelge 6.3.'de gösterilmiştir. Şebeke suyunun yapılan kimyasal analizinde TS 1247'deki beton yapım, döküm ve bakım kurallarına uygun karma suyu standartlarında olduğu görülmüştür.

Çizelge 6.3. Harç karma suyunun kimyasal özellikleri

Parametre	Bulunan Değerler
pH	6.85
Kalsiyum (Ca) ⁺⁺	58 mg/l
Magnezyum (Mg) ⁺⁺	83 mg/l
Klorür (Cl) ⁻	46 mg/l
Sülfat (SO ₄) ⁻	45 mg/l
Buharlaşma bakiyesi	434 mg/l

6.2.3. Uçucu kül

Deneyde Çayırhan Termik Santrali atığı olan uçucu kül kullanılmıştır. Kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Çizelge 6.4.'de verilmiştir.

Çizelge 6.4. Uçucu külün kimyasal özellikleri

Oksit, %	Uçucu Kül	Oksit, %	Uçucu Kül
SiO ₂	50.98	MgO	3.91
Al ₂ O ₃	13.11	SO ₃	3.94
Fe ₂ O ₃	9.74	K ₂ O	1.91
S+A+F	73.83	Na ₂ O	2.71
CaO	11.82	KK	0.86
Serb.CaO	0.56	Cl-	0.014

Deneyde kullanılan uçucu kül, elektrik enerjisi üretmek için termik santralde kullanılan pulvarize kömürün yanmasından elde edilir. Pulvarize kömürün yanmasıyla ortaya çıkan kül tanecikleri, diğer yanma sonrası ortaya çıkan gazlarla beraber bacadan

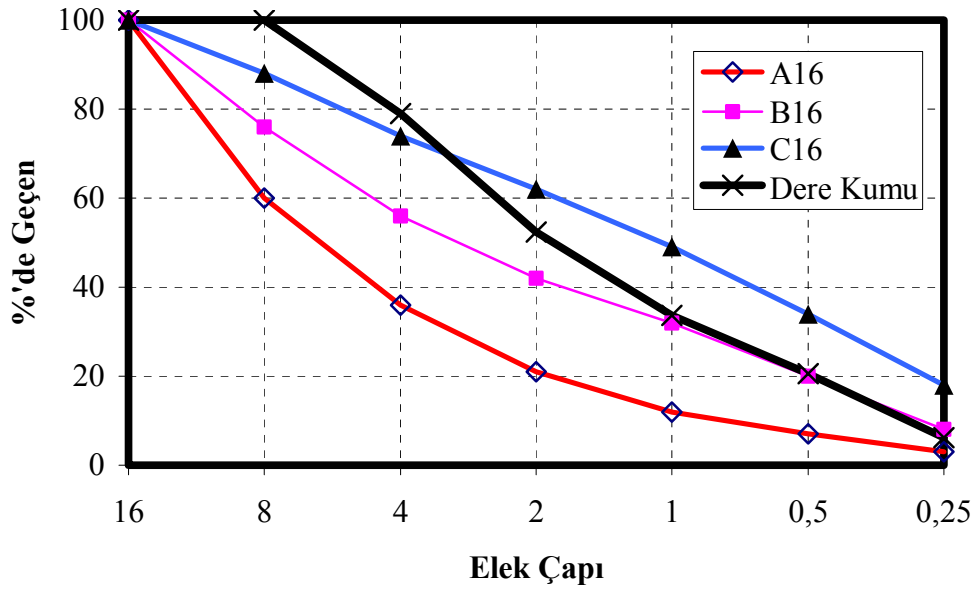
dışarıya çıkarken, elektrostatik yöntemlerle tutulur. Toplanan uçucu kül, santralden dışarı alınır ve atık olarak silolarda depolanır.

6.2.4. Dere kumu

Harç numunelerinin hazırlanmasında birim ağırlığı 1.55 kg/dm^3 özgül ağırlığı 2.56 olan dere kumu kullanılmıştır. Kullanılan kumun granülometrisi Çizelge 6.5.'de verilmiştir.

Çizelge 6.5. Dere kumunun granülometrisi

Elek No	Elek üzerinde kalan	Geçen malzeme (gr)
16	0	1000
8	0	1000
4	210	790
2	266	524
1	188	336
0.5	130	206
0.25	144	62
incelik modülü		3.08



Şekil 6.2. Dere kumunun granülometri eğrisi

6.2.5. Karışım oranları

Yüksek sıcaklık etkisi altında bırakılacak olan 25 mm pas payına sahip numunelerin kaplama harcının hazırlanmasında uçucu kül ile PÇ 42.5 çimentosu kullanılarak 4 tip harç üretilmiştir. Uçucu küllü harç serilerinde normal harç serisindeki çimentonun, ağırlıkça %10, 20 ve 30 oranlarında azaltılıp yerine azaltılan çimento miktarı kadar uçucu kül ilave edilmesiyle hazırlanmıştır. Karışım oranları Çizelge 6.6.'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Harç numunelerinin karışım oranları

Uçucu kül oranları, %	Ağırlıkça (gr)			
	Çimento	Dere Kumu	Su	Uçucu kül
0	450	1350	225	0
10	405	1350	225	45
20	360	1350	225	90
30	315	1350	225	135

6.3. Yapılan Deneyler

Numuneler 28 gün süreyle 23 °C sıcaklıkta kirece doymuş suda tutulmuş ve kür havuzundan çıkartılmıştır. Kurutulan numunelere sadece ultrases geçiş süresi deneyi uygulanmış, prizma harç numunelerinin hem birim ağırlıkları hesaplanmış, hem de 20 °C'deki ultrases geçiş süresi sonuçları elde edilmiştir. Hasarlı deney olarak 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma numunelere eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinde bırakılan deney numuneleri, belirlenmiş olan sıcaklıklarda 3 saat süreyle tutulduktan ve fırından çıkarılarak ultrases geçiş süresi deneyi uygulanmıştır. Donatılı harç numunelerinin içerilerindeki numune donatılar alınmış ve çekme deneyi uygulanmıştır.

6.3.1. Ultrases geçiş süresi deneyi

Bu deney, sesin katı madde içinde yol alma süresinin saptanmasına dayanır. Ultrases dalgaları boşlukta yayılamazlar. Ancak sıvı, gaz yada katı halde bulunan bir cismin içinde yayılabilirler. Bu dalgaların özellikleri, ışık dalgalarının özelliklerine benzerdir. Cismin içinde ilerledikçe malzeme bir kısım enerjiyi soğurabilir, dalgalar yansıma ve kırılma yapabilir. Verici ve alıcının malzemeye tam olarak yapışması şarttır.



Fotoğraf 6.3. Harç numunelerine ultrases geçiş süresi deneyi uygulanması

Ultrases deneyi, titreşim halindeki ultrases dalgalarının numunenin bir ucundan girip diğer ucundan çıkmasına kadar geçen sürenin belirlenmesidir. Numunenin bir ucuna ultrases vericisi, diğer ucuna da malzeme içinden geçen ses dalgalarını alan bir alıcı yerleştirilir. Alıcı tarafından alınan ses dalgaları, bir ossilografa nakledilerek sesin numune içinden geçiş süresi saptanır ve buradan sesin numunedeki yayılma hızı bulunur. Cihazın kalibrasyonu, alıcı ve verici uçları yağlandıktan sonra, ultrasesin plastik kalibrasyon silindiri üzerinden geçiş süresi 51 μ s değeri okununcaya kadar ince ayar yapılır. Ultrases geçiş süreleri mikro saniye cinsindedir. Ultrases dalgalarının numune boyunca geçiş süreleri, ultrases alıcısı ve vericisi arasındaki mesafeye bölünerek, (km/sn) cinsinden ultrases geçiş hızı hesaplanır.

6.3.2. Eğilme dayanımı deneyi

Deneyde numunelerin etrafında pas payı oluşturması için hazırlanan harcın eğilme dayanımları hesaplanmıştır. Farklı seriler için hazırlanmış farklı uçucu kül oranlarına sahip harçlar 28 günlük kür süresi sonunda, deney için sudan çıkarıldıktan sonra TS EN 12390-5'e uygun olarak yüzeylerindeki fazla su silinip deney makinesine yerleştirilir. Deney numunesi, makineye tam merkezlenerek ve numune boyuna eksenine, üst ve alt yükleme silindirlerine dik açı oluşturacak şekilde yerleştirilmelidir.

Eğilme dayanımı, 40x40x160 mm boyutlarındaki harç numuneleri üzerinde yapılmıştır. Fotoğraf 6.4.'de görünen deney aletine numune yerleştirildikten sonra, ağırlık oluşturması için haznede bulunan metal bilyeler, deney başlama kilidinin açılmasıyla kovaya dolmaya başlar. Eğilme aleti düzeneği, kova ağırlığının 49 katını numuneye aktarmak üzere ayarlıdır. Numune, üzerinde oluşan yükten kırılınca, deney sona erer. Kova ve içerisindeki metal bilye ağırlığı ölçülüp 49 ile çarpılarak kırma yükü bulunur.



Fotoğraf 6.4. Harç numunelerine eğilme dayanımı deneyi uygulanması

Eğilme dayanımı şu şekilde hesaplanır.

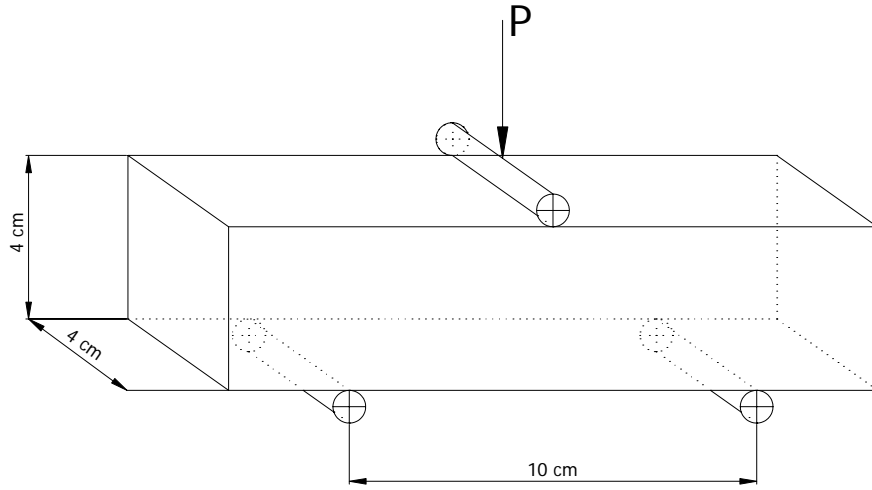
$$\sigma_e = \frac{M}{W} = \frac{P \times l / 4}{a^3 / 6} \quad (6.1)$$

Burada mesnet açıklığı

$l=10$ cm,

Mukavemet momenti hesaplanırken

$a=4$ cm olarak alınır.



Şekil 6.3. Deney numunelerine eğilme deneyi uygulanması

6.3.3. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımını belirlemenin en kesin yolu, eksenel yük altında yapılan ölçümdür. Prizmatik harç numunelerinde yaptığımız basınç deneyi, ısıtılma öncesi ve sonrasında, pas payındaki harçın basınç dayanımındaki değişimini göstermiştir.



Fotoğraf 6.5. Harç numunelerine basınç dayanımı deneyi uygulanması

Pres tablalarına numuneyi yerleştirirken numunenin kalıba değen yan yüzleri alt ve üste gelmelidir. Prizma kalıptan çıkan numunelerin üst yüzeyi dışarıda kaldığından pürüzlüdür ve bu yüzey üzerinden basınç dayanımı deneyi yapılamaz. Aksi taktirde pürüzlerde gerilme yığılması meydana gelir ve deney numunelerinin basınç dayanımlarının olduğundan daha düşük olarak saptanmasına yol açabilir.

6.3.4. Yüksek sıcaklık deneyi

Φ 10, 16 ve 20 çapa sahip S 420 inşaat çeliklerine 25 mm pas payını sağlayacak şekilde hazırlanmış olan deney numunelerimiz 100, 200, 300, 500, 800 ve 950 °C sıcaklıklarda 180 dakika süreyle yüksek sıcaklık fırınında tutulmuşlardır.

Yüksek sıcaklık fırınına, birbirleri ile temas etmeyecek şekilde her donatı ve uçucu kül serisinden üçer adet yerleştirilen numunelerin beraberinde pas paysız 3 adet inşaat çeliği numunesi de koyularak, ısıl işlem sonunda pas payının yüksek sıcaklıkta donatıya olan etkileri yapılacak deneylerle belirlenmek istenmiştir.



Fotoğraf 6.6. Yüksek sıcaklık deneyinde kullanılan fırın ve etüv

Numuneler, içlerindeki nemin yüksek sıcaklıklarda iç basınç yaratıp patlama riskine karşı 24 saat süreyle 105 °C’de bekletilerek, iç nemlerini kaybetmeleri sağlanmıştır. Deney fırınının ısıtma fonksiyonu ISO yangın eğrisine uygun şekilde 500 °C’ye kadar 15 °C/dakika, 500 °C üzerindeki sıcaklıklar için 10.5 °C/dakika hızında ısıtma hızları tercih edilmiş olup, numuneler 180 dakika süre ile sabit olarak hedef sıcaklıkta tutulmuş ve 15 °C/dakika hızla soğuması sağlanmıştır. Isıtma işleminin başlatılmasından 24 saat sonra sıcaklığı oda sıcaklığına düşen numunelere ultrases deneyi uygulanmış ve prizma harçlarının birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Ultrases geçiş hızları belirlenen numunelerin içerisindeki donatılar çıkarıldıktan sonra çekme deneyine geçilmiştir.

6.3.5. Çekme deneyi

Isıl işlem sonrası, donatılardaki mekanik özelliklerin sıcaklığa bağlı değişimini saptayabilmek amacıyla çekme deneyine geçilmiştir. Deney numuneleri kendilerini koruyan harçlarından ayrıldıktan sonra çekme deneyine hazırlanır.



Fotoğraf 6.7. Çekme deneyinde kullanılan üniversal çekme makinesi

TS 708'e göre uygun olarak her "d" donatı çapı için minimum kopma uzaması, çekme numunesinin ilk ölçme uzunluğu $L_0=10d$ olan kısmı vaktinden önce kopmaya yol açmayacak şekilde hafifçe çizilmiş, deneyden sonra ölçülen uzunluk artışının L_0 'a yüzde oranı olarak belirlenebilmesi sağlanmıştır. L_0 'ın tespit edildiği numunelere, çubuk boyunca, 10 mm aralıklarla işaret çizgileri çizilmiştir.

Deney numunesi üniversal çekme aletinin paralel çeneli tutucularına iki çene arasında 10d uzaklık kalması için işaretlenen demir testeresiyle çentiklenip işaretlenen yerinden tutturulur. TS 138 EN 10002-1'e göre akma dayanımını ölçmek için, deney parçasının bükülmesini en aza indirmek amacıyla, deney parçasının üzerine uygulanan kuvvetin olabildiğince aksel yönde olmasını sağlayacak şekilde tutturmak şarttır.

Ölçme yapılan bölge, kırılmanın meydana geldiği bölgeye göre olabildiğince simetrik ve makinenin çenelerinden uzakta olmalıdır. Kopmanın gerçekleştiği yer ile makinenin tutucu çeneleri arasındaki uzaklık 2d den fazla olmalıdır.



Fotoğraf 6.8. Çekme deneyi uygulanan donatı

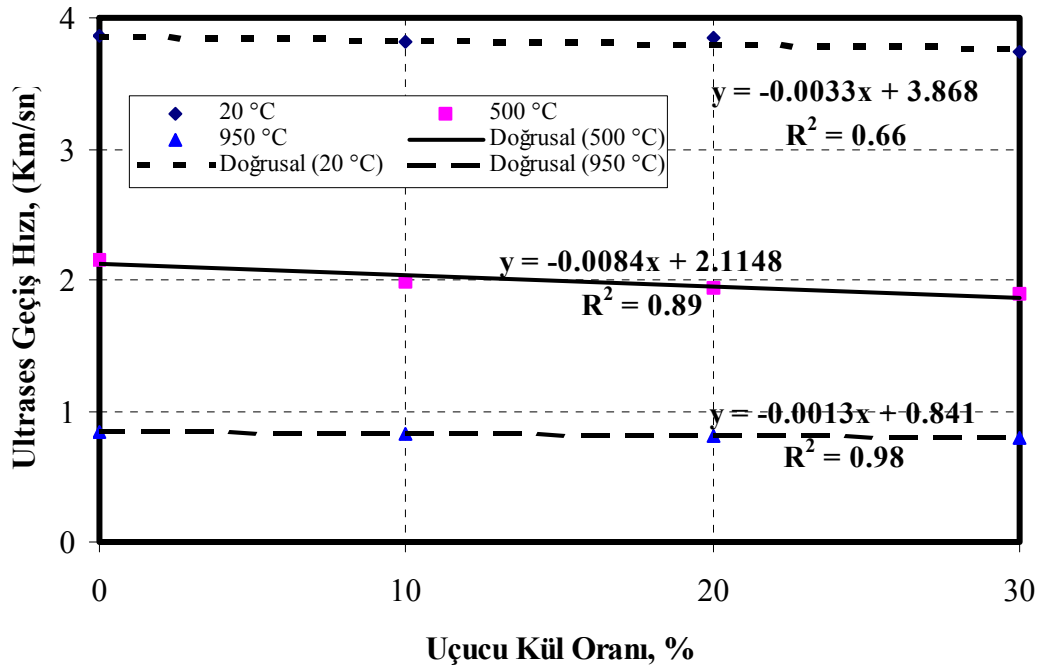
Çekme işlemi sonlanan deney numuneleri üzerine önceden yapılmış olan işaretlemelerden, numunenin boyun verdiği bölgenin yeri saptanır ve kopmanın gerçekleşmiş olduğu bölgenin TS 138 EN 10002-1'e göre uygunluğu kontrol edilir. Yapılan kontrolden sonra, L_u kopma uzaması boyu bulunarak, numunenin % uzaması belirlenmiştir. Gerilme-Şekil değiştirme diyagramları çizilerek donatının akma, kopma dayanımları bulunmuştur. Akma noktası altındaki alan hesap edilerek numunelerin rezilyansları bütün numune serileri için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

7.1. Ultrases Geçiş Süresi Deneysel Sonuçları ve Değerlendirilmesi

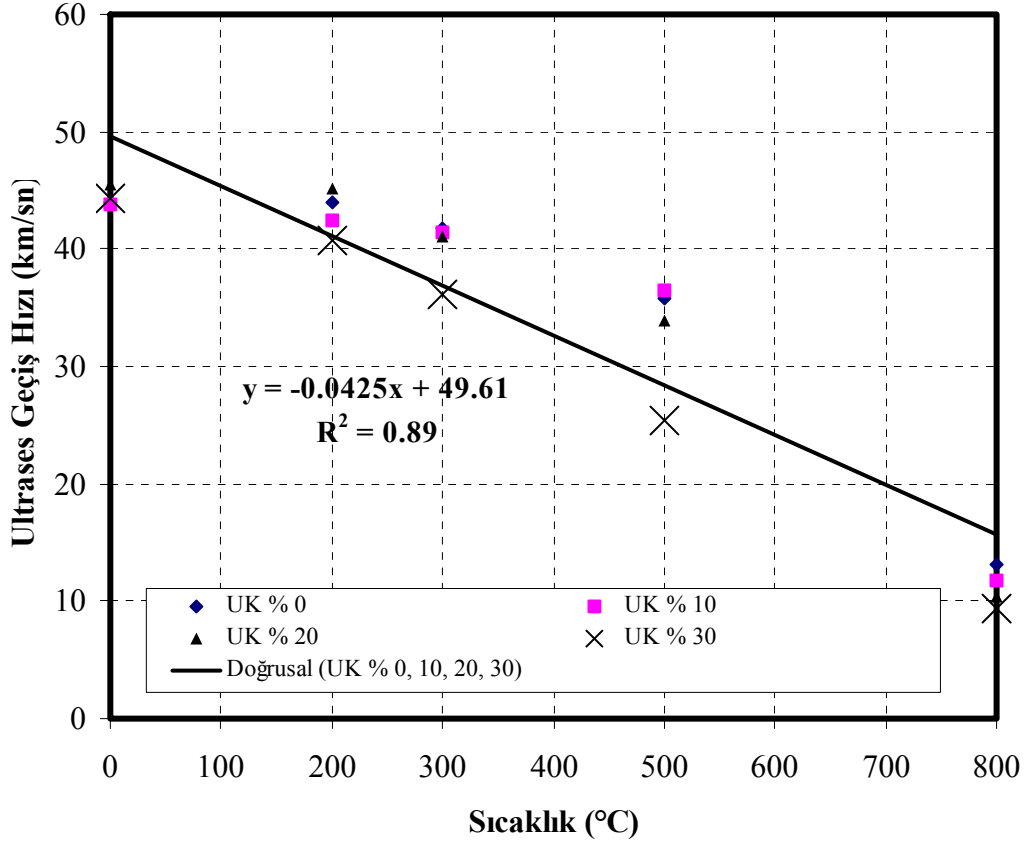
Kür havuzunda 28 gün saklanan deney numuneleri, kür süresinin sonunda havuzdan çıkarılmıştır. Kurutulan harç numunelerinin birim ağırlıkları hesaplanmış ve bunun ardından numunelerin ultrases geçiş hızları yapılan deneyler sonucunda hesaplanmıştır. Değişken uçucu kül miktarlarına sahip donatılı deney numuneleri ve prizmatik harç numuneleri kompas ile ölçüldükten sonra ultrases hızı deney cihazının iki ucu yağlanarak ultrases alıcı ve vericilerinin numune yüzeyi ile tam teması sağlanmıştır.

Deney uygulanan numunelerin ultrases geçiş süreleri mikro saniye cinsinden elde edilmiş, elde edilen süre numune boyuna bölünerek, her numune için (km/sn) cinsinden ultrases geçiş süreleri hesaplanmıştır. Prizmatik numunelerdeki ultrases geçiş hızı- uçucu kül oranı ilişkisi Şekil 7.1.'de verilmiştir. Temsil eden ultrases geçiş hızı değerleri üç numunenin ortalaması olarak belirlenmiştir.



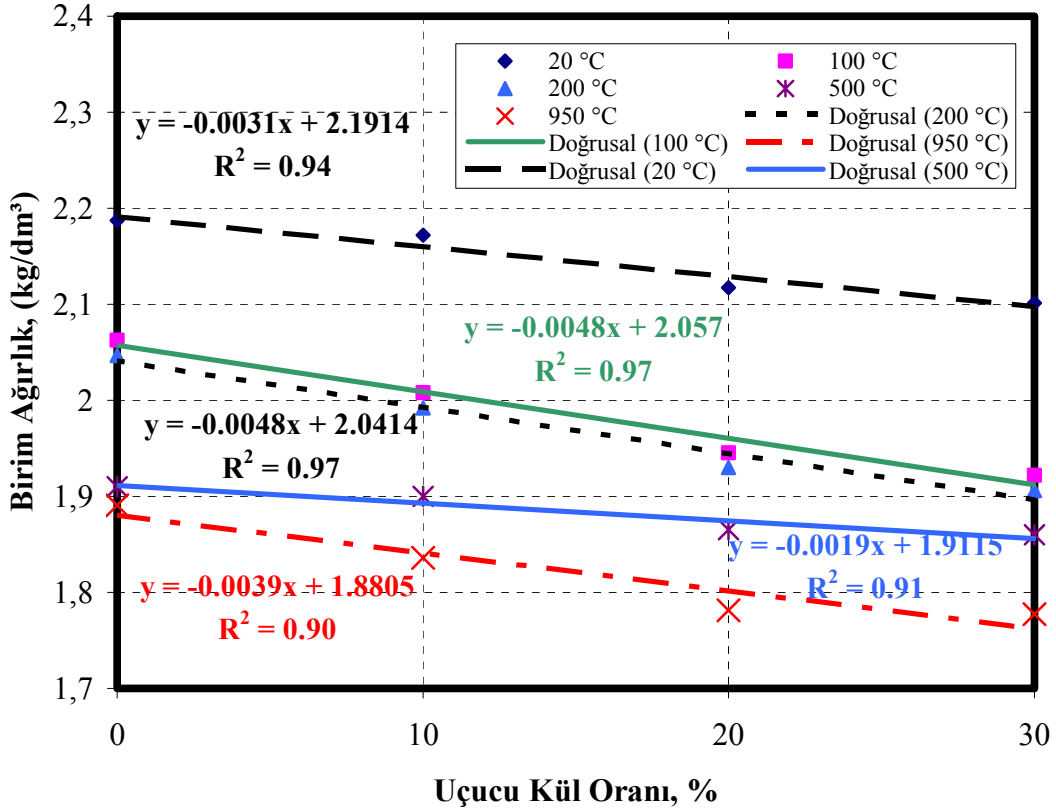
Şekil 7.1. Harç numunelerinde ultrases geçiş hızı süreleri

Kür havuzunda 28 gün tutulmuş prizmatik harç numunelerinin ultrases geçiş hızı ile uçucu kül ilişkisi, Şekil 7.1.'de verilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda, uçucu kül miktarının artmasıyla ultrases geçiş hızının azalmakta olduğu görülmektedir



Şekil 7.2. Donatılı numunelerde ultrases geçiş hızı süreleri

İçerisinde donatı bulunan numunelerde ise, çeliğin varlığından dolayı ultrases dalgaları çelikten çok hızlı geçmektedir. Uçucu külün miktarındaki değişim, deney numunelerimizde ultrases geçiş hızında fark edilebilir bir sapma yaratmadığından, ortalama değerleri alınıp ultrasesin numunelerdeki geçiş hızının sıcaklıkla değişim grafiği Şekil 7.2.'de çizilmiştir.

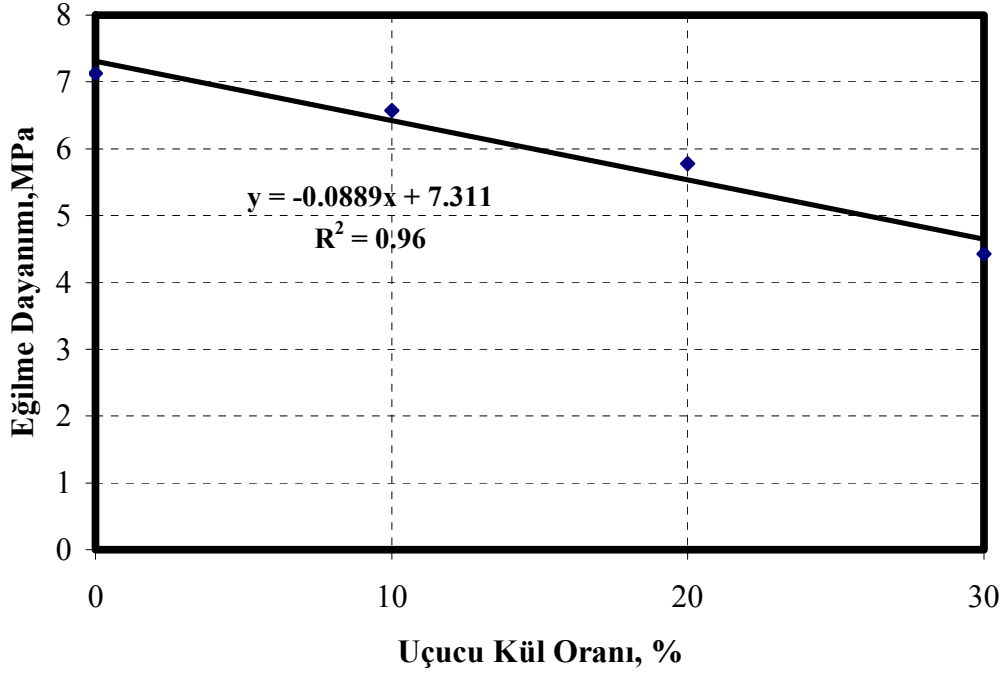


Şekil 7.3. Harç numunelerinde sıcaklığa bağlı birim ağırlık değişimi

Ultras es ölçümlerinden sonra yapılan birim ağırlık saptamasında da sıcaklığa bağlı ultras es geçiş sürelerinde görülen düşüş eğrisinin benzerinin Şekil 7.3.'deki birim ağırlık–uçucu kül grafik eğrilerinde de olduğu gözlemlenmiştir.

7.2. Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Değişik serilerdeki harç numuneleri hakkında ısıl işlem den önce fikir edinmek amacıyla yapılan deneyde, Şekil 7.4.'de görüldüğü üzere, uçucu külün artışıyla eğilme dayanımında düşüşlerin meydana geldiği görülmektedir.

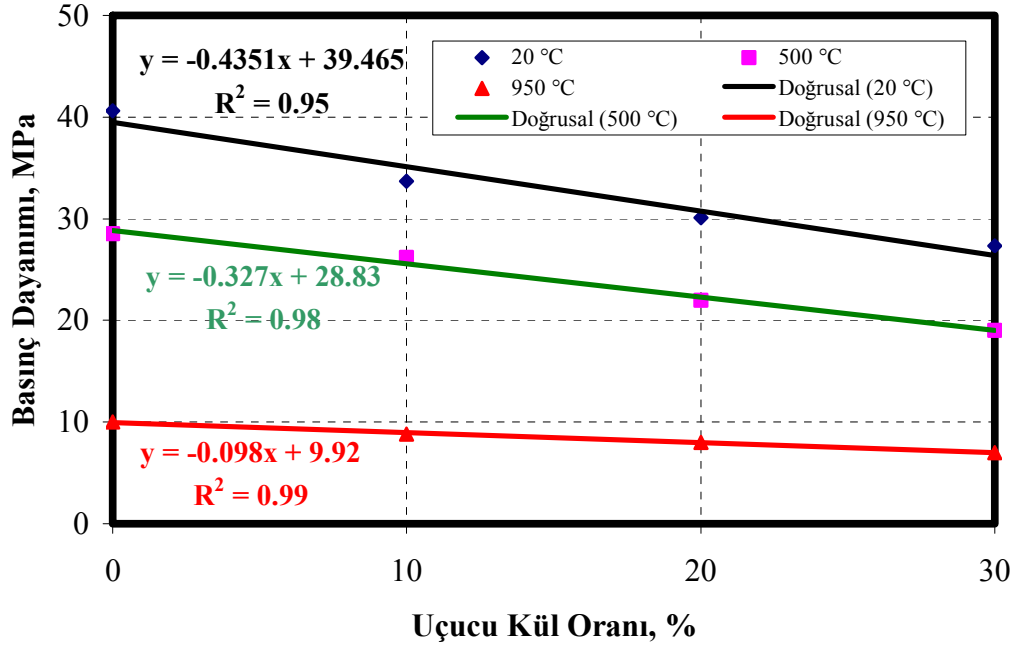


Şekil 7.4. Harç karışımındaki uçucu kül oranına bağlı eğilme dayanımı değişimi

Eğilme dayanımının, karışımdaki uçucu külün oranının artmasıyla düşüşünün nedeni uçucu küllü harcın beklenen dayanımına geç ulaşması ve 28 günlük kür süresinin bu dayanımı elde edebilmek için erken bir süre olmasıdır.

7.3. Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Basma deneyi sonrası Şekil 7.5.'e bakıldığında yüksek sıcaklıklarda pas payını oluşturan harcın basınç dayanımındaki düşüş açıkça görülmektedir. Deney sonrası, 500 °C'de ısıtılmış numunelerin yüzeyinde beyazlaşmalar görülmüştür. Bu renk değişiminden harçtaki Ca(OH)_2 'in sönmemiş kirece dönüştüğü anlaşılmaktadır. Bu değişimden sonra, harcın dayanımında da yüksek düşüşler belirlenmiştir.



Şekil 7.5. Harç numune karışımındaki uçucu kül oranı-basınç dayanımı değişimi



Fotoğraf 7.1. Numuneler 950 °C’de ısıl işleme girmeden önce (sol) ve sonra (sağ)

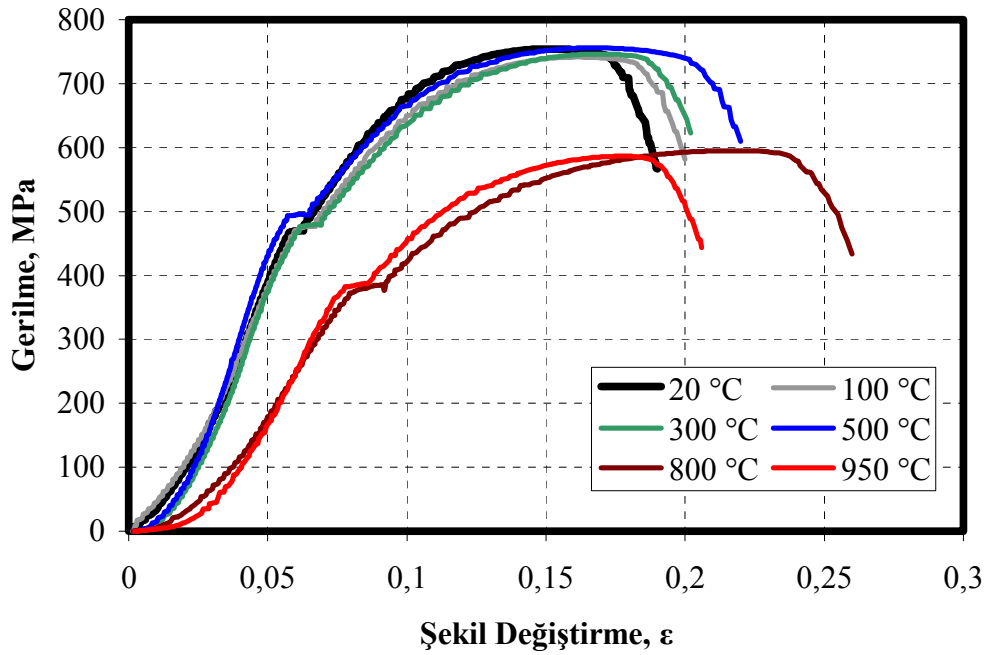
7.4. Çekme Deneyi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Φ 10, 16 ve 20 çaplarına sahip, değişken uçucu kül oranları içeren harçlarla 25 mm pas payı oluşturduğumuz numunelerimiz hedef sıcaklıklarda 180 dakika tuttuktan sonra,

içlerindeki yapı çeliklerine hasar verilmeden çıkarılmıştır. Donatı çapına uygun olarak universal çekme aletinin çeneleri, uygun kavrama çeneleri ile değiştirilmiştir. Çekme deneyi uygulanacak donatılar üzerinde L_0 boyları işaretlenerek universal çekme aletinin kavrama çeneleri arasına yerleştirilmiştir. Deney sonunda, L_u , kopma uzaması boyu ölçülmüştür. Kgf olarak elde edilen akma ve çekme değerleri, donatı kesit alanına bölünerek MPa'a çevrilmiş, ardından da σ - ε eğrileri çizilmiştir.

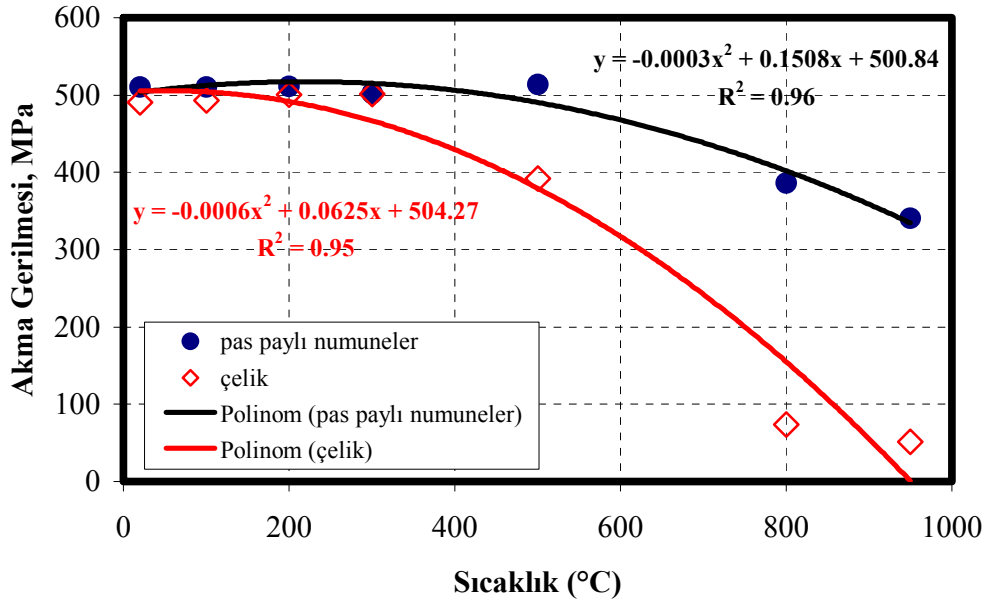


Fotoğraf 7.2. Isıl işleme tabi tutulmuş numunenin koruyucu pas payından ayrılması.

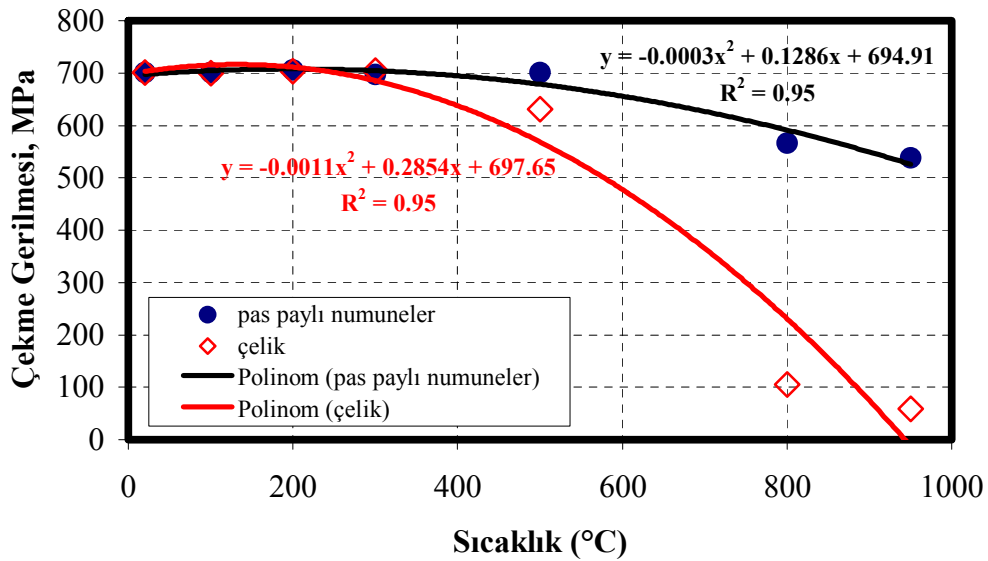


Şekil 7.6. Universal çekme aletinden elde edilen σ - ε eğrileri

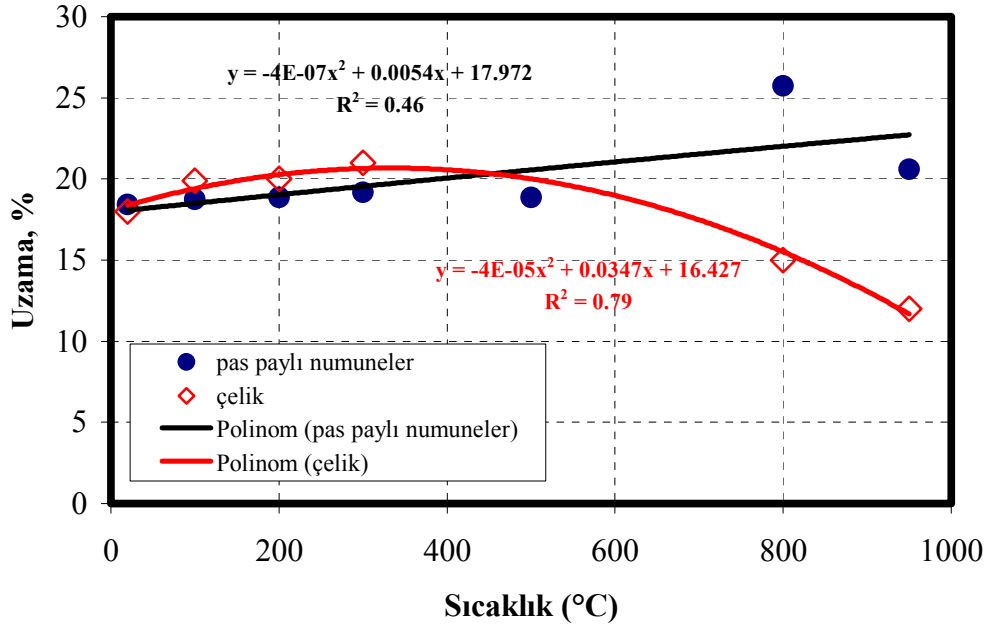
Şekil 7.6.'da σ - ϵ diyagramları, ayrı ayrı sıcaklıklara girmiş 25 mm harç ile korunan donatılar için ortalama değerleri olarak verilmiştir. Her eğri, 36 adet numunenin çekme deneyi sonucu ortalaması kullanılarak çizilmiştir. Yapılan çekme deneyi sonrası, yüksek sıcaklıklarda koruyucu pas payı harç karışımındaki uçucu kül yüzdesi değişiminin, donatının korunması konusunda önemli bir etki yaratmadığı görülmüştür.



Şekil 7.7. Çekme deneyi sonrası elde edilen akma gerilmeleri



Şekil 7.8. Çekme deneyi sonrası elde edilen çekme gerilmeleri



Şekil 7.9. Çekme deneyi sonrası elde edilen uzama değerleri

Akma ve çekme gerilmelerinde ise ısıl işlem görmüş numuneler ile pas payı bulunmayan çelik numunelerdeki gözlemlenen değer farkları Şekil 7.7. ve Şekil 7.8.'de görüldüğü üzere sıcaklık artışıyla belirginleşmektedir. Buradan da anlaşılmaktadır ki, pas payı 400 °C'den sonraki sıcaklıklarda donatının mekanik özelliklerinin korunmasında büyük etki göstermektedir. Çekme deneyi sonucunda numunelerin akma, çekme dayanımları ve uzama yüzde oranları değerleri ekler kısmında verilmektedir.

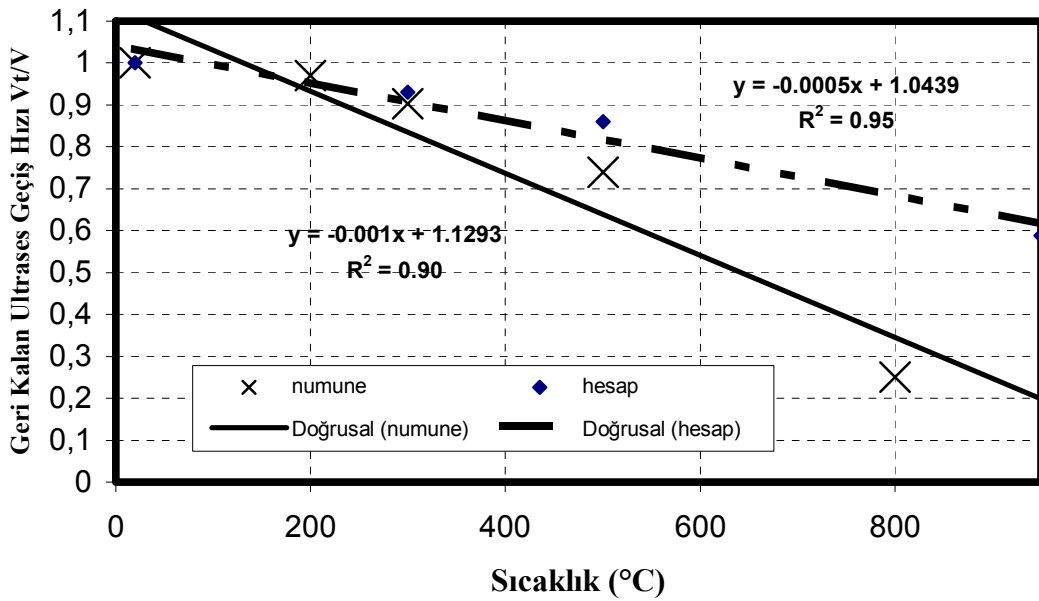


Fotoğraf 7.3. Soldan sağa 20 °C de tutulmuş, 300, 500, 800 ve 950 °C'de ısıl işlem görmüş pas paysız numunelerdeki renk farklılığı.

8. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

8.1. Ultrases Geçiş Süresi Deneysel Sonuçlarının İrdelenmesi

Üretilen harçlar ve donatı harç numunelerindeki ultrases hızının değişimi incelendiğinde, sıcaklığın artmasına bağlı olarak ultrases geçiş hızlarının düştüğü görülmüştür. Ultrases dalgaları, donatılı numunelerin içinden geçerken % 85 donatı çeliği üzerinde, % 15’de harç üzerinde ilerlemektedir. Harç numunelerinden elde edilen ultrases sonuçlarından yola çıkarak, çeliğin ses dalgası iletkenliğinin değişmediği varsayılmış ve donatılı numunelerdeki ultrases geçiş hızları hesaplanmıştır.

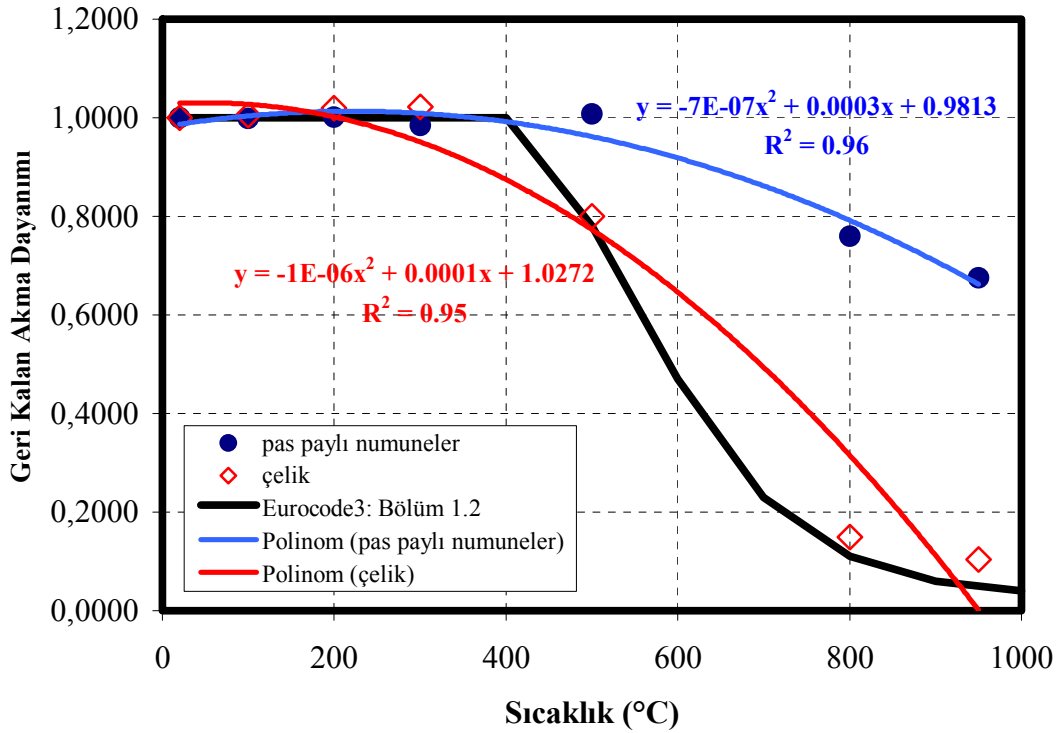


Şekil 8.1. Isıl işlem görmüş numunelerin ultrases geçiş hızı hesap ve ölçümleri

Şekil 8.1.'de donatılı numunelerin ölçülen ve çeliğin ses iletkenliği sabit tutularak hesaplanan ultrases geçiş hızları görülmektedir. Numunelerde yapılan deneysel ölçümlerin, hesaplanan değerler ile belirli bir sıcaklığa kadar yaklaşık olduğu görülmüştür. Sıcaklık 500 °C'nin üzerine çıktığında ultrases dalgalarının, numunelerden hesaplanan geçiş hızlarından daha yavaş geçtiği saptanmıştır. Sıcaklık etkisinde kalan çeliğin ses iletkenliğinin azaldığı anlaşılmaktadır.

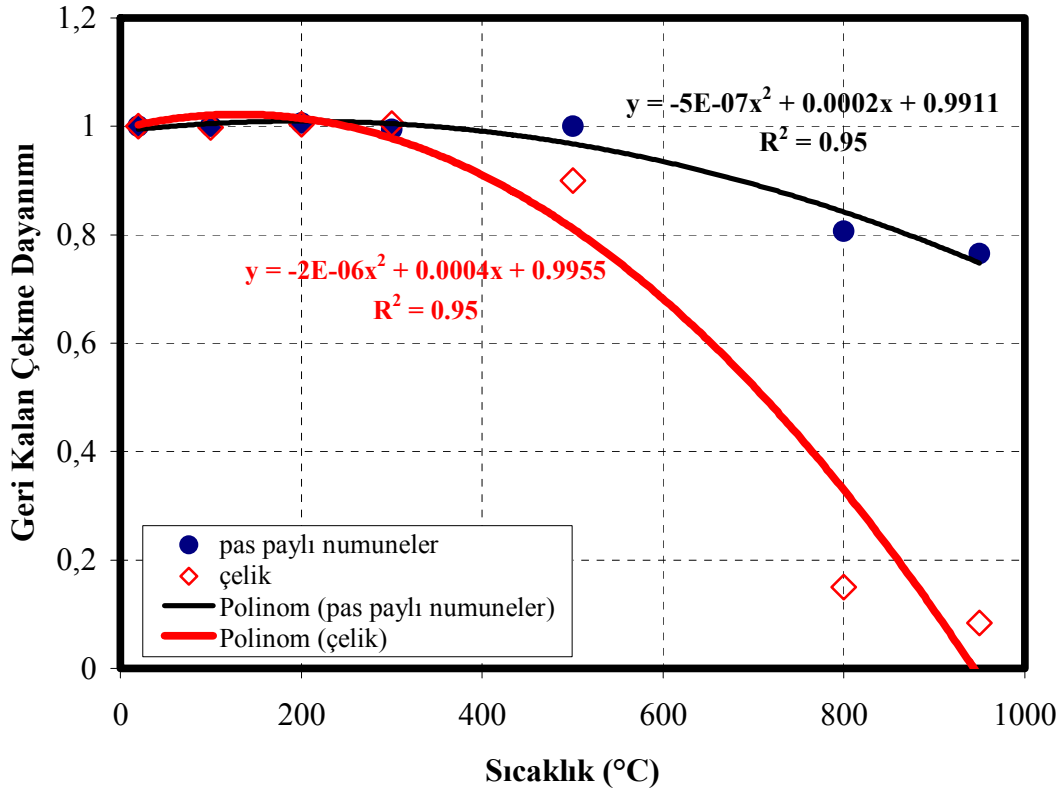
8.2. Pas Payı İle Korunan Donatı Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi

Yangın geçirmiş betonarme yapılarda donatının mekanik özelliklerinin tahmin edilebilmesi için yapılmış olan bu çalışmada, pas paylı numunelerin 400 °C'ye kadar donatı özelliklerinde değişiklik görülmediği ortaya çıkmıştır. Pas payı bulunmayan donatıların ise bu sıcaklığa kadar pekleştiği görülmektedir. Eurocode'a göre 400 °C'ye kadar donatının akma dayanımında azalmanın görülmediği, bu sıcaklık geçildiği zaman, dayanım kayıplarının hızlı bir şekilde gerçekleştiği belirtilmektedir.



Şekil 8.2. Isıl işlem görmüş numunelerin akma dayanımlarının ilk hallerine oranları

Eurocode'un (1993), akma dayanımının sıcaklığa bağlı değişimini gösteren akma dayanım kayıp eğrisi, yüksek sıcaklık deneyinde kullandığımız yalıtımsız donatıların sıcakta işlem görmemiş halleri ile karşılaştırıldığında yakın sonuçların çıktığı Şekil 8.2.'de görülmektedir. Pas payı olarak 25 mm harç ile korunan donatıların akma gerilmelerini 500 °C'ye kadar koruduğu anlaşılmaktadır.

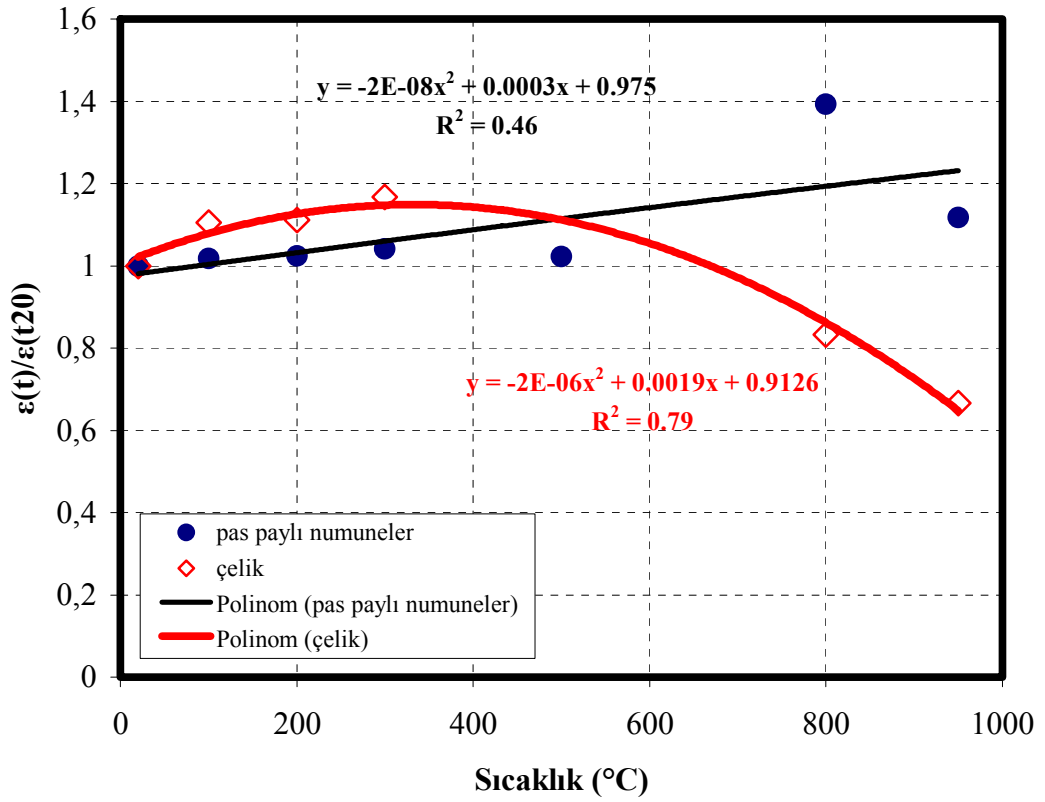


Şekil 8.3. Isıl işlem görmüş numunelerin çekme dayanımlarının ilk hallerine oranları

Yüksek sıcaklığın 400 °C'ye kadar betonun basınç dayanımlarında bir miktar artışlar meydana getirdiği, ancak 500 °C civarında Ca(OH)_2 'nin sönmemiş kirece dönüştüğü bilinmektedir. Bunun sonucunda Fotoğraf 8.1.'de görüldüğü şekilde, harç numunelerinde ufalanma ve yüzeyde beyazlaşma görülmüştür. Sıcaklığın 400 °C'yi geçtikten sonra, mekanik özelliklerinin bozulması beklenen çelik, bu sıcaklığa kadar büzülme çatlama uğramamış pas payı ile korunduğu, bu sıcaklıktan sonra koruyucu harcın da büzülme çatlaklarıyla bozulduğu anlaşılmaktadır. Korumasız çeliğin, deney sonucunda 300 °C'ye kadar pekleşip, pas payı ile korunmakta olan numunelerde böyle bir hareketin gözlenmemesinin nedeni, deneyin ilk evrelerinde numune harçlarının donatıları iyi yalıtması ve donatıların pekleşmek için yeterli sıcaklığa erişememesidir.



Fotoğraf 8.1. Numuneler 500 °C’de ısıl işleme girmeden önce (sol) ve sonra (sağ)



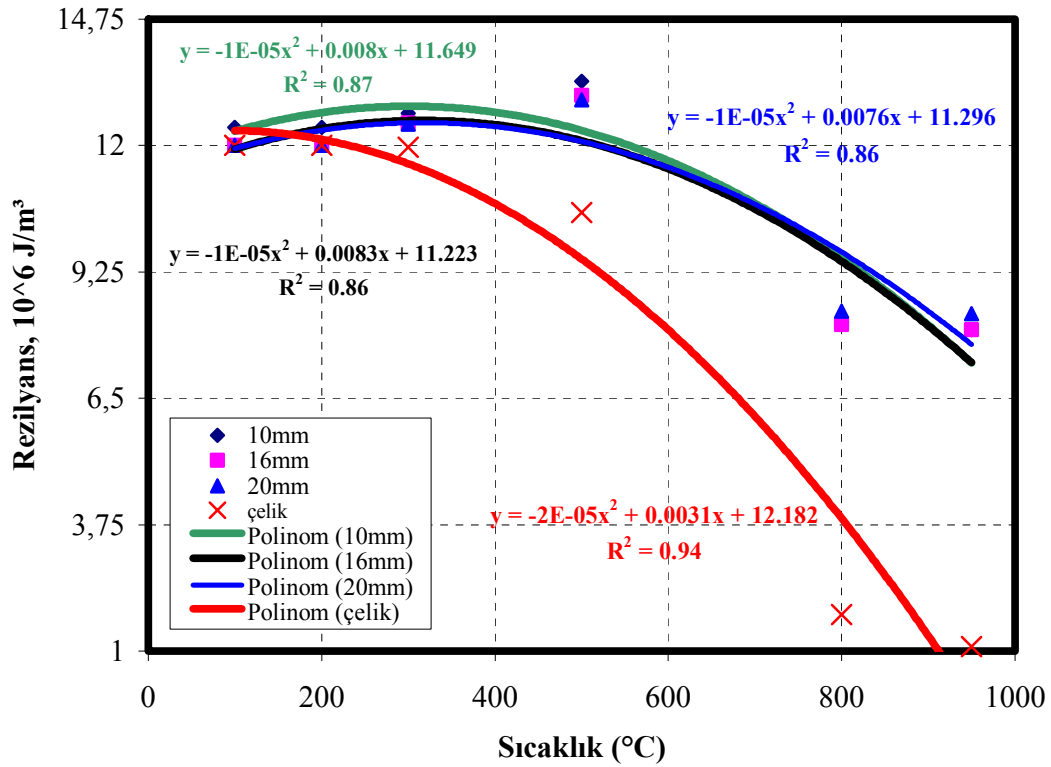
Şekil 8.4. Isıl işlem görmüş numunelerin uzama yüzdelerinin ilk hallerine oranları

Akma, çekme dayanımı ve uzama grafikleri incelendiğinde, 25 mm pas payına sahip numunelerin, yalıtımsız numunelerle benzer davranışları gösterdiği, ancak yalıtımsız numunelerin harç kaplı donatılara göre Şekil 8.4.'deki uzama değerlerinde görüldüğü gibi yaklaşık 250 °C daha önce tepkide bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu davranıştan yola çıkarak 25 mm pas payının, yaklaşık olarak içerisindeki donatıları dış ortamdan 250 °C daha düşük sıcaklıkta koruduğu belirlenmiştir. Benzer olarak Şekil 8.2.'de pas payı ile korunmamış çeliklerin 500 °C deki akma değerleri ile 800 °C deki pas paylı numunelerin akma dayanımlarının çok yakın olduğu görülmüştür. Şekil 8.3.'deki çekme dayanımı değerlerinin de pas paysız çeliklerin, pas paylı numunelere göre dayanımlarını aynı şekilde yaklaşık 250 °C erken kaybetmeye başladığı görülmüştür. Şekil 8.2., 8.3. ve 8.4.'te kullanılan ısıl işlem sonrası mekanik özelliklerin ilk hallerine göre oransal değişim değerleri ekler bölümünde verilmiştir.



Fotoğraf 8.2. 950 °C'de ısıl işlem gören pas paysız donatının yüzeyindeki kabuk atma

Yüksek sıcaklıkta kalan yalıtımsız numunelerde, kesit daralma oranının gözle görülür şekilde düştüğü, numunenin gevrekleştiği, hacim merkezli kübik kafes yapı olan ferritten, yüzey merkezli kübik kafes olan ostenite dönüştüğü anlaşılmaktadır. Çekme deneyi sırasında da 950 °C'den çıkan numunelerin üzerindeki kabuklaşmadan, çelikteki yapı değişim farkı görülmüştür.



Şekil 8.5. Isıl işlem görmüş çelik malzemesinin sıcaklıkla rezilyansındaki değişim

Yaklaşık olarak 300 °C civarına kadar, harç numunelerinin bozulmadan önce, tam koruma yaptığımızı varsayabiliriz. Şekil 8.5.'den de, çelik malzemesinin rezilyans kayıplarının 300 °C den sonra düşüşe geçtiği ve yalıtımsız numunede bu düşüşün çok daha hızlı olduğu görülmektedir.



Fotoğraf 8.3. 950 °C'den çıkmış ve 72 saat beklemiş numuneler

Deney sonrası, 950 °C ısı işlem görmüş olan harç numunelerinin basınç değerleri elde edilmiş. Ancak 72 saat bekletilen numunelerde bu sıcaklıktan çıktıktan sonra Fotoğraf 8.3.'de görüldüğü gibi çatlakların artmaya başladığı numunelerin ufalandığı görülmüştür. Fotoğraf 8.4.'de, 240 saat dışarıda kalmış harç numunelerinin tamamen parçalandığı ve toz haline geldiği görülmüştür. Bu davranıştan yola çıkarak, yangın görmüş betonarme pas payının, yapının tekrar yangın geçirmesi halinde, aynı performansı sergileyemeyeceği anlaşılmaktadır.



Fotoğraf 8.4. 950 °C'den çıkmış ve 240 saat beklemiş harç numuneleri

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yüksek sıcaklık altında, 25 mm'lik pas payına sahip betonarme bir yapının donatı özelliklerindeki değişimi belirlemek amacı ile yapılmış bu çalışmada, hasarlı ve hasarsız deneyler sonunda varılan sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

- Yapılan deneyler sonucunda, yüksek sıcaklıklarda harç ile sağlanan 25 mm pas payının, donatıları koruyarak, akma ve çekme dayanımı kayıplarını azalttığı, pas paysız donatılara göre dayanımların yüksek olduğu görülmektedir.
- Sıcaklık 500 °C'ye kadar çıkarıldığında, ısı işlem görmemiş numunelerle yaklaşık olarak aynı akma ve çekme dayanımlarına sahip olduğu görülen pas paylı numunelerin, bu sıcaklık aşıldığında dayanım kayıplarına uğradığı belirlenmiştir. Bunun nedeni harç numunelerinin renginin beyazlaşması ile de fark edilebilen Ca(OH)_2 'nin sönmemiş kirece dönüşümü ve çatlakların artmasıyla sığa karşı harcın donatıyı koruma özeliğinin azalmasıdır.
- Yapılan rezilyans hesaplarında, 25 mm pas paylı numunelerde 500 °C civarında çok az da olsa bir artış saptanmıştır. Bunun nedeni akma değerlerinde bir yükselme meydana gelmemesine karşın çelik malzemesinin daha sünek bir yapıya kavuşmuş olması ve elastik şekil değiştirebildiği bölge içerisinde daha fazla enerji sönümlene kapasitesine sahip hale gelmesidir.
- Sıcaklık 950 °C'yi bulduğunda, pas payının donatı mekanik özelliklerini korumaya devam ettiği ancak zaman geçtikçe, harcın bütünlüğünü koruyamadığı görülmüştür. Sıcaklığı 950 °C'yi bulan bir yangın geçirmiş yapının, tekrarlanan ikinci bir yangında, aynı performansı gösteremeyeceği anlaşılmıştır. Bu araştırmanın devamı olarak aynı özellikteki iki seri hazırlanarak, yangın geçirmiş bir yapının sonraki yangınlardaki performansları incelenebilir.

- Ultrasesin numune üzerindeki geçiş yolunun % 15'i harç, geri kalanı çelik üzerindedir. Yapılan ultrases geçiş hızı deneyi sonucunda, donatılı numunelerdeki ultrasesin geçiş hızının yüksek sıcaklık etkisi ile düştüğü görülmüştür. Yangın etkisi altındaki donatının iç yapısında değişim meydana gelmiş ve donatının ses iletkenliğinin düştüğü anlaşılmıştır.
- Akma, çekme ve uzama grafikleri incelendiğinde, yalıtımsız numunelerin pas payı olan donatılara göre yaklaşık 250 °C daha önce tepkide bulunduğu anlaşılmaktadır. Bu davranıştan yola çıkarak 25 mm pas payının, yüksek sıcaklık etkisi altında yaklaşık olarak içerisindeki donatıları dış ortam sıcaklığından 250 °C daha düşük sıcaklıkta koruyabildiği belirlenmiştir.

Deneyde kullanılmış olan farklı dozaj ve uçucu kül oranlarındaki harç numunelerinin, sonuçlara etkisi olmamıştır. Bunun nedeni uçucu küllü karışımların 28 günlük kür süreleri sonunda mekanik özelliklerini tam olarak kazanmayışı olabilir. Ancak yapılan araştırma, uçucu külün bu davranışı bilinerek yapılmış, uçucu külün dayanım yönünden olumlu katkısının ortaya çıkmadan pas payı olarak yüksek sıcaklıktaki performansı araştırılmak istenmiştir. Çalışmanın devamı olarak aynı uçucu kül karışım oranları kullanılıp, 56 ve 90 günlük kür uygulanan numunelere yüksek sıcaklık deneyi yapılarak kür süresi ile pas payının ısı performansı araştırılabilir.

Pas payının 25 mm olduğu bu çalışmada, 500 °C üzerinde donatı mekanik özelliklerinin korunamadığı görülmektedir. Yapılan araştırmalarda, normal bir konut yangınının 815 °C civarında olabildiği ve anlık olarak 1093 °C'lik zirve sıcaklığına ulaşabildiği belirtilmiştir. Bu bilgiye göre, pas payı artırılarak bu sıcaklıklarda donatıyı koruyabilecek pas payı kalınlığı bulunabilir.

Bu çalışmaya ek olarak ısı iletkenliği betondan daha düşük olan kiremit kırıkları yada gaz beton kırıkları kullanılıp, pas payı sabit tutularak katkıların yüksek sıcaklıklardaki donatıyı koruma performansı incelenebilir.

KAYNAKLAR

Abdalla Hany, 2005, Concrete cover requirements for FRP reinforced members in hot climates, *Composite Structures*, (article in press).

ASTM E 1529, Standard Test Method for Determining Effects of Large Hydrocarbon Pool Fires on Structural Members and Assemblies, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

ASTM E119, Standard Test Method for Fire Tests of Building Construction and Materials, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

Bratina Sebastjan, Cas Bojan, Saje Miran, Planinc Igor, 2005, Numerical modeling of behavior of reinforced concrete columns in fire and comparison with Eurocode 2, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 42, Issues 21-22, pp. 5715-5733.

British Standards Institution (BSI), 1990, *The Structural Use of Steelwork in Buildings: Code of Practice for the Fire Protection of Structural Steelwork*. BS 5950: Part 8, London.

Buchanan A.H., 1999, *Structural Design for Fire*, University of Canterbury, Chapter 8.

Poon Chi-Sun, Azhar Salman, Anson Mike, Wong Yuk-Lung, 2001, Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing, *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp. 1307-1318.

Chung Jae H., Consolazio Gary R., 2005, Numerical modeling of transport phenomena in reinforced concrete exposed to elevated temperatures, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 597-608.

KAYNAKLAR (DEVAMI)

European Committee for Standardization (CEN), 1993; Eurocode 2: Design of Concrete Structures. ENV 1992-1-2: General Rules–Structural Fire Design. European Committee for Standardization, Brussels.

European Committee for Standardization (CEN), 1993, Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.2 :Structural fire design, Brussels.

European Committee for Standardization (CEN), 1995, Eurocode 3: Design of Steel structures, ENV 1992-1-2: General Rules–Structural Fire Design. European Committee for Standardization, Brussels.

ECCS (European Convention for Constructional Steelwork), 1983, European Recommendations for the Fire Safety of Steel Structures Calculation of the Fire Resistance of Load-bearing Elements and Structural Assemblies exposed to the Standard Fire, Brussels, Belgium.

ECCS (European Convention for Constructional Steelwork), May 2001, Model Code on Fire Engineering, Technical Committee 3, First Edition, No. 111, Brussels, Belgium.

El-Hawary M.M., Ragab A.M., El-Azim Abd A. and S. Elibiari, 1997 Effect of fire on shear behaviour of R.C. Beams, Computers and Structures Vol. 65, pp. 281-287.

Freudenberger J., Gaganov A., Hickman A.L., Jones H., 2003, Mechanical behaviour of high nitrogen stainless steel reinforced conductor for use in pulsed high field magnets at cryogenic temperature, Cryogenics, Vol. 43, pp. 133-136.

Gerlich J. T., 1995, Design of Loadbearing Light Steel Frame Walls for Fire Resistance, School of Engineering University of Canterbury.

KAYNAKLAR (DEVAMI)

- Gewain Richard G., Iwankiw Nestor R., Alfawakhiri F., 2003, "Facts for Steel Buildings, Fire", AISC, Chicago, IL.
- International Standards Organization (ISO) 834, Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, ISO, Switzerland.
- Lewis K. R., 2000, "Fire Design of Steel Members", Fire Engineering Research report, University of Canterbury.
- Lie T. T., 1992, Structural Fire Protection, American Society of Civil Engineers, New York, USA.
- Lin W.M., Lin T.D., Powers-Couche L.J., 1996, Microstructures of Fire-Damaged Concrete, ACI Materials Journal, V. 93, No. 3, May-June, pp. 199-205.
- Mehta, P.K., Monteiro P.J.M, 1997, Concrete-Microstructure, Properties and Materials, Indian Concrete Institute, 548p.
- Milke J., 1988, Analytical Methods for Determining Fire Resistance of Steel Members The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, pages 3/88-3/1 12. Society of Fire Protection Engineers. Quincy, MA, USA.
- Purkiss J.A., 1996, Fire Safety Engineering Design of Structures, Butterworth Heinemann, Oxford, England.
- Saafi Mohamed, 2005, Effect of fire on FRP reinforced concrete members, Composite Structures, Vol. 58, pp. 11-20.

KAYNAKLAR (DEVAMI)

SFPE, 2002, Hand Book of Fire Protection Engineering, The Society of Fire Protection Engineers (SFPE), 3rd edition, Bethesda, MD.

Shi Xudong, Tan Teng-Hooi, Tan Kang-Hai, Gou Zhenhai, August 2004, Influence of Concrete cover on fire resistance of reinforced concrete flexural members, Journal of Structural Engineering, ASCE.

Sterner E., Wickstorm U., 1990, TASEF – Temperature Analysis of Structures Exposed to Fire, Fire Technology SP Report 1990:05, Swedish National Testing Institute, Boras, Sweden.

Tan K.H., Yao Y., November 2004, Fire resistance of reinforced concrete columns subjected to 1-,2-, and 3- face heating, Journal of Structural Engineering, ASCE.

TS EN 12390-3/Nisan 2003 Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.

TS EN 12390-5/Nisan 2002 Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 5: Deney Numunelerinin Eğilme Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.

TS 138 EN 10002-1/Nisan 2004 Metalik malzemeler – Çekme deneyi – Bölüm 1: Ortam sıcaklığında deney metodu, TSE, Ankara.

TS 708/Mart 1996 Beton Çelik Çubukları, TSE, Ankara.

Tucker A.S., 1999, Heat and Mass Transfer with H.V.A.C Applications, Lecture Notes, University of Canterbury.

KAYNAKLAR (DEVAMI)

Wong M.B., 2005, Universal design charts for insulating of steel members in fire, Journal of Constructional Steel Research, Vol. 61, pp. 1447-1456.

Wong, M.B., Patterson, N.,1996, Unit Load Factor Method for Limiting Temperature Analysis of Steel Frames with Elastic Buckling Failure Mode, Fire Safety Journal Vol. 27, pp 113-122.

Ek.1. Çekme Deneyi Sonuçları (Ortalama Akma Gerilmesi)

10 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Akma Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	560.0200				560.0200
	100	579.2805	562.5054	543.4740	555.2460	560.1265
	200	545.4360	549.2619	564.8598	575.7489	558.8267
	300	539.0595	548.1828	532.6830	534.6450	538.6426
	500	556.7175	526.3065	559.7586	552.4011	548.7959
	800	381.609	392.2038	424.8711	406.1340	401.2045
	950	305.1891	272.2275	247.2120	310.5846	283.8033

16 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Akma Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	481.0010				481.0010
	100	469.6047	490.2057	477.3546	487.5570	481.1805
	200	483.6330	486.5760	483.9273	481.3767	483.8783
	300	476.7660	482.0634	491.6772	478.2375	482.1860
	500	493.8354	475.5888	494.3259	488.6361	488.0966
	800	385.4349	388.7703	370.4256	380.7261	381.3392
	950	393.6753	397.9917	377.1945	387.2988	389.0401

Ek.1. Çekme Deneyi Sonuçları (Devamı)(Ortalama Akma Gerilmesi)

20 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Akma Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	490.8924				490.8924
	100	492.4620	484.6140	496.3860	484.6140	489.5190
	200	490.8924	490.8924	490.8924	490.8924	490.8924
	300	483.6330	480.8862	492.3639	488.3418	486.3062
	500	526.0122	495.5031	492.8544	507.9618	505.5829
	800	385.8273	390.8304	388.5741	391.5171	389.1872
	950	349.8246	344.4291	347.6664	353.2581	348.7946

Isıl İşlem Görmüş Kaplamasız Donatılara Ait Çekme Deneyi Sonuçları	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Ortalama Akma Gerilmesi (MPa)
Isıl İşlem Görmemiş Donatı	490.8924
100	493.4430
200	500.3100
300	501.6834
500	392.4000
800	73.5750
950	51.0120

Ek.2. Çekme Deneyi Sonuçları (Ortalama Çekme Gerilmesi)

10 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Çekme Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	656.4000				656.4000
	100	667.0800	660.8997	652.3650	645.4980	656.4607
	200	651.6783	656.9757	664.6275	668.1591	660.3602
	300	645.7923	652.7574	632.1564	627.5457	639.5630
	500	657.7605	636.2766	656.4852	646.8714	649.3484
	800	489.1266	511.7877	531.4077	521.7939	513.5290
	950	437.1336	418.6908	394.9506	443.8044	423.6449

16 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Çekme Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	745.5000				745.5000
	100	734.3766	751.5441	742.5189	753.7023	745.5355
	200	755.7624	752.3289	747.7182	762.1389	754.4871
	300	746.5410	747.0315	752.2308	755.3700	750.2933
	500	757.9206	739.1835	763.0218	747.9144	752.0101
	800	598.4100	595.9575	580.8501	612.6345	596.9630
	950	604.7865	602.5302	587.5209	618.8148	603.4131

Ek.2. Çekme Deneyi Sonuçları (Devamı)(Ortalama Çekme Gerilmesi)

20 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Çekme Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	700.8264				700.8264
	100	700.9245	701.2188	700.6302	701.0226	700.9490
	200	700.1397	700.6302	702.1017	700.4340	700.8264
	300	700.4340	699.4530	703.3770	703.1808	701.6112
	500	707.8896	694.1556	697.7853	709.1649	702.2489
	800	585.8532	595.8594	584.6760	583.3026	587.4228
	950	586.2456	588.5019	585.2646	595.2708	588.8207

Isıl İşlem Görmüş Kaplamasız Donatılara Ait Çekme Deneyi Sonuçları	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Ortalama Çekme Gerilmesi (MPa)
Isıl İşlem Görmemiş Donatı	700.8264
100	699.4530
200	703.3770
300	704.3580
500	630.7830
800	105.1632
950	58.8600

Ek.3. Çekme Deneyi Sonuçları (Ortalama Uzama)

10 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Uzama [%]
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	18.80				18.8000
	100	19.50	19.50	18.50	18.00	18.8750
	200	19.00	19.00	18.00	19.00	18.7500
	300	18.00	19.00	19.00	19.50	18.8750
	500	19.00	18.75	18.00	18.00	18.4375
	800	30.00	28.50	28.40	28.40	28.8250
	950	23.00	23.00	23.10	23.00	23.0250

16 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Uzama [%]
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	19.00				19.0000
	100	20.00	21.50	19.40	18.80	19.9250
	200	20.30	22.50	18.80	19.70	20.3250
	300	20.60	18.80	22.10	17.80	19.8250
	500	22.00	21.90	19.60	18.60	20.5250
	800	26.00	25.90	26.30	26.30	26.1250
	950	20.60	20.00	19.00	19.00	19.6500

Ek.3. Çekme Deneyi Sonuçları (Devamı)(Ortalama Uzama)

20 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Uzama [%]
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	17.50				17.5000
	100	17.40	17.55	17.45	17.60	17.5000
	200	17.50	17.50	17.60	17.70	17.5750
	300	19.00	19.25	19.00	18.25	18.8750
	500	17.75	17.00	18.75	17.00	17.6250
	800	22.50	21.50	22.50	22.50	22.2500
	950	19.25	19.00	18.50	19.75	19.1250

Isıl İşlem Görmüş Kaplamasız Donatılara Ait Akma Deneyi Sonuçları	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Ortalama Uzama [%]
Isıl İşlem Görmemiş Donatı	18.00
100	19.90
200	20.00
300	21.00
500	27.00
800	15.00
950	12.00

Ek.4. Çekme Deneyi Sonuçları (Geri Kalan Akma Gerilmesi)

10 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Akma Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000				1.0000
	100	1.0344	1.0044	0.9705	0.9915	1.0002
	200	0.9740	0.9808	1.0086	1.0281	0.9979
	300	0.9626	0.9789	0.9512	0.9547	0.9618
	500	0.9941	0.9398	0.9995	0.9864	0.9800
	800	0.6814	0.7003	0.7587	0.7252	0.7164
	950	0.5450	0.4861	0.4414	0.5546	0.5068

16 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Akma Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000				1.0000
	100	0.9763	1.0191	0.9924	1.0136	1.0004
	200	1.0055	1.0116	1.0061	1.0008	1.0060
	300	0.9912	1.0022	1.0222	0.9943	1.0025
	500	1.0267	0.9887	1.0277	1.0159	1.0148
	800	0.8013	0.8083	0.7701	0.7915	0.7928
	950	0.8185	0.8274	0.7842	0.8052	0.8088

Ek.4. Çekme Deneyi Sonuçları (Devamı)(Geri Kalan Akma Gerilmesi)

20 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Akma Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000				1.0000
	100	1.0032	0.9872	1.0112	0.9872	0.9972
	200	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	300	0.9852	0.9796	1.0030	0.9948	0.9907
	500	1.0715	1.0094	1.0040	1.0348	1.0299
	800	0.7860	0.7962	0.7916	0.7976	0.7928
	950	0.7126	0.7016	0.7082	0.7196	0.7105

Isıl İşlem Görmüş Kaplamasız Donatılara Ait Akma Deneyi Sonuçları	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Ortalama Akma Gerilmesi (MPa)
Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000
100	1.0052
200	1.0192
300	1.0220
500	0.7994
800	0.1499
950	0.1039

Ek.5. Çekme Deneyi Sonuçları (Geri Kalan Çekme Gerilmesi)

10 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Çekme Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000				1.0000
	100	1.0163	1.0069	0.9939	0.9834	1.0001
	200	0.9928	1.0009	1.0125	1.0179	1.0060
	300	0.9838	0.9945	0.9631	0.9560	0.9743
	500	1.0021	0.9693	1.0001	0.9855	0.9893
	800	0.7452	0.7797	0.8096	0.7949	0.7823
	950	0.6660	0.6379	0.6017	0.6761	0.6454

16 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Çekme Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000				1.0000
	100	0.9851	1.0081	0.9960	1.0110	1.0000
	200	1.0138	1.0092	1.0030	1.0223	1.0121
	300	1.0014	1.0021	1.0090	1.0132	1.0064
	500	1.0167	0.9915	1.0235	1.0032	1.0087
	800	0.8027	0.7994	0.7791	0.8218	0.8008
	950	0.8112	0.8082	0.7881	0.8301	0.8094

Ek.5. Çekme Deneyi Sonuçları (Devamı)(Geri Kalan Çekme Gerilmesi)

20 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Çekme Gerilmesi (MPa)
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000				1.0000
	100	1.0001	1.0006	0.9997	1.0003	1.0002
	200	0.9990	0.9997	1.0018	0.9994	1.0000
	300	0.9994	0.9980	1.0036	1.0034	1.0011
	500	1.0101	0.9905	0.9957	1.0119	1.0020
	800	0.8359	0.8502	0.8343	0.8323	0.8382
	950	0.8365	0.8397	0.8351	0.8494	0.8402

Isıl İşlem Görmüş Kaplamasız Donatılara Ait Çekme Deneyi Sonuçları	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Ortalama Çekme Gerilmesi (MPa)
Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000
100	0.9980
200	1.0036
300	1.0050
500	0.9001
800	0.1501
950	0.0840

Ek.6. Çekme Deneyi Sonuçları(Geri Kalan Ortalama Uzama)

10 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Uzama [%]
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000				1.0000
	100	1.0372	1.0372	0.9840	0.9574	1.0040
	200	1.0106	1.0106	0.9574	1.0106	0.9973
	300	0.9574	1.0106	1.0106	1.0372	1.0040
	500	1.0106	0.9973	0.9574	0.9574	0.9807
	800	1.5957	1.5160	1.5106	1.5106	1.5332
	950	1.2234	1.2234	1.2287	1.2234	1.2247

16 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Uzama [%]
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000				1.0000
	100	1.0526	1.1316	1.0211	0.9895	1.0487
	200	1.0684	1.1842	0.9895	1.0368	1.0697
	300	1.0842	0.9895	1.1632	0.9368	1.0434
	500	1.1579	1.1526	1.0316	0.9789	1.0803
	800	1.3684	1.3632	1.3842	1.3842	1.3750
	950	1.0842	1.0526	1.0000	1.0000	1.0342

Ek.6. Çekme Deneyi Sonuçları (Devamı)(Geri Kalan Ortalama Uzama)

20 mm Çapa Sahip Donatıya Ait Çekme Deneyi Sonuçları						
		Uçucu Kül Serileri [%]				Ortalama Uzama [%]
		0	10	20	30	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000				1.0000
	100	0.9943	1.0029	0.9971	1.0057	1.0000
	200	1.0000	1.0000	1.0057	1.0114	1.0043
	300	1.0857	1.1000	1.0857	1.0429	1.0786
	500	1.0143	0.9714	1.0714	0.9714	1.0071
	800	1.2857	1.2286	1.2857	1.2857	1.2714
	950	1.1000	1.0857	1.0571	1.1286	1.0929

Isıl İşlem Görmüş Kaplamasız Donatılara Ait Akma Deneyi Sonuçları	
Isıl İşlem Sıcaklığı [°C]	Ortalama Uzama [%]
Isıl İşlem Görmemiş Donatı	1.0000
100	1.1056
200	1.1111
300	1.1667
500	1.5000
800	0.8333
950	0.6667