



**ATIK KIRMIZI ÇAMUR VE NANO
AL₂O₃ KATKILI BETONLARIN
YÜKSEK SICAKLIK SONRASI FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

İbrahim ALAMERİ

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı
Yrd. Doç. Dr. Meral OLTULU**

2017

Her hakkı saklıdır

ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ATIK KIRMIZI ÇAMUR VE NANO Al_2O_3 KATKILI
BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIK SONRASI FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İbrahim ALAMERİ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
Yapı Malzemeleri Bilim Dalı

ERZURUM
2017

Her Hakkı Saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

**ATIK KIRMIZI ÇAMUR VE NANO Al_2O_3 KATKILI BETONLARIN YÜKSEK
SICAKLIK SONRASI FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Yrd. Doç. Dr. Meral OLTULU danışmanlığında, İbrahim ALAMERİ tarafından hazırlanan bu çalışma, 13/06/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı – Yapı malzemeleri Bilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak **oybirliği / oy çokluğu (.../...)** ile kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Remzi ŞAHİN

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Meral OLTULU

İmza :

Üye : Yrd. Doç. Dr. Türkay KOTAN

İmza :

Yukarıdaki sonuç;

Enstitü Yönetim Kurulu 22./06./2017 tarih ve 25./.../... nolu kararı ile onaylanmıştır.

Prof. Dr. Cavit KAZAZ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ATIK KIRMIZI ÇAMUR VE NANO Al_2O_3 KATKILI BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIK SONRASI FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

İbrahim ALAMERİ

Atatürk Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yapı Malzemesi Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Bilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Meral OLTULU

Yüksek sıcaklık direnci, betonun performansını ve ömrünü etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Yüksek sıcaklığın etkisinde betonun mekanik özellikleri üzerinde atık bir malzeme olan kırmızı çamurun ve nano toz katkısının etkisi incelenerek performansı daha iyi olan bir beton üretmek amacıyla yapılan bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada; optimum kırmızı çamur oranını belirlemek için çimentonun %10, %15 ve %20'si oranlarında kırmızı çamur kullanılarak üretilen beton numunelerinin 200°C, 300°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklardaki performanslarından hareketle optimum kırmızı çamur oranı, %10 olarak belirlenmiştir. İkinci aşamada ise; bulunan optimum kırmızı çamur oranı esas alınarak bu betonların yüksek sıcaklığa dayanımının Nano- Al_2O_3 tozu ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Nano Al_2O_3 tozu, yine çimentonun %0.5, %1 ve %1.25'i oranlarında, belirlenen optimum kırmızı çamur oranı ile birlikte kullanılarak üretilen beton numunelerinin 200°C, 400°C, 600°C sıcaklıklar altında yüksek sıcaklık sonrası artık dayanımları incelenmiştir. Sonuçlardan hareketle, yüksek sıcaklık etkisi altında hem kırmızı çamurun hem de nano- Al_2O_3 ve kırmızı çamurun birleşik etkisinin beton üzerinde olumlu sonuçlar doğurduğu ve optimum oranların %10 kırmızı çamur ve %0.5 nano- Al_2O_3 katkısı olduğu söylenebilir. Sıcaklık artışıyla mekanik özelliklerde belirgin azalmalar oluştuğu ve atık bir malzeme olan kırmızı çamurun kullanımı ile hem atık malzemenin değerlendirilebileceği, hem de nanotoz katkısı ile yüksek sıcaklık etkisi altında performansı daha iyi olan betonların üretilebileceği sonucuna varılmıştır.

2017, 87 sayfa

Anahtar kelimeler: Kırmızı çamur, Nano- Al_2O_3 , Basınç dayanımı, Yarmada çekme dayanımı, Ağırlık kaybı, Yüksek sıcaklık, Geçirimlilik

ABSTRACT

MS Thesis

INVESTIGATE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF WASTE RED MUD AND NANO- Al_2O_3 ADDITIVE TO CONCRETE MIXED AFTER HIGH TEMPERATURES

Ibrahim ALAMERI

Atatürk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Meral OLTULU

High-temperature resistance is one of the most important parameters which affect the durability and service life of concrete. This study was carried out in order to produce a concrete with better performance by examining the effect of red mud, which is a waste material, and Nano powder added on the mechanical properties of concrete under the influence of high temperature. In first stage, in order to determine the optimum red mud ratio, concrete samples were prepared using red mud at the ratio of 0%, 10%, 15%, and 20%. Then the behavior of samples after heating to 200°C, 300°C, 400°C, 600°C and 800°C were investigated. In the second stage, it is aimed that improve the resistance of concrete to high temperature with Nano- Al_2O_3 powder based on the optimum ratio of red mud found. Nano Al_2O_3 powder was also used at the ratio of 0,5%, 1% and 1,25% of the cement and after applying 200, 400 and 600°C temperature the residual strengths were investigated.

As result, it can be said that the combined red mud and nano- Al_2O_3 under high temperature has positive effects on concrete and optimum ratios are 10% red mud and 0.5% nano- Al_2O_3 contribution. The significant reductions in mechanical properties of concrete occurred with increasing temperature. With the use of red mud which is a waste material in concrete, both waste material can be utilised and with the nano powder additive, the concretes with better performance under high temperature effect can be produced.

2017, 87 pages

Keywords: Red-mud, Nano Al_2O_3 , Compressive strength, Splitting tensile strength, Weight losses, Elevated temperatures, Permeability

TEŞEKKÜR

Araştırmanın gerçekleşmesinde büyük bir anlayış ve sabırla bana yardımcı olan, çalışmalarımı izleyen ve yönlendiren, kendi yazdığı yazılımları bulgularımı işlemede kullanmamda izin veren hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Meral OLTULU'a, en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Beni yetiştirdikleri ve bu seviyeme gelmemde verdikleri emek için sevgili Babama, Anneme şükranlarımı sunarım.

Ibrahim ALAMERİ

June, 2017

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı	2
2. KAYNAK ÖZETLERİ	4
2.1. Yüksek sıcaklık kaynakları ve Yangın	4
2.1.a. Endüstri fırın bacaları	4
2.1.b. Nükleer Reaktörler	4
2.1.c. Hava alanı pistleri.....	5
2.1.d. Yangın	6
2.1.1. Yangında sıcaklığın gelişimi	6
2.1.2. Malzemelerin termik özellikleri ve yüksek sıcaklıktaki değişimleri.....	9
2.1.3. Beton fazları üzerinde yüksek sıcaklığın etkileri	10
2.1.3.a. Agregada üzerinde yüksek sıcaklık etkileri.....	11
2.1.3.b. Çimento üzerinde yüksek sıcaklık etkileri	12
2.1.3.c. Arafaz üzerinde yüksek sıcaklık etkileri	15
2.1.4. Betonun fiziksel ve termik özellikleri	16
2.1.5. Betonun mekanik özellikleri üzerine yüksek sıcaklığın etkileri	20
2.1.6. Donatı özellikleri üzerinde yüksek sıcaklığın etkileri	24
2.1.7. Yüksek sıcaklığın olumsuz etkilerine karşı yapılarda alınması gereken önlemler	27
2.2. Atık Malzemeler ve Kırmızı Çamur.....	29
2.2.1. Kırmızı çamur.....	30
2.2.2. Kırmızı çamur özellikleri ve bileşenleri	32
2.2.3. Kırmızı çamurun çevreye etkisi ve bertaraf yöntemleri	33

2.2.4. Kırmızı çamur atığının dünya genelinde kullanım alanları	35
2.2.5. Kırmızı Çamurun Yüksek Sıcaklık Altında Davranışı	36
2.3. Nanoteknoloji ve Nano Tozlar	38
2.3.1. Nano teknolojide toz üretimi	40
2.3.2. Beton ve nanoteknoloji.....	42
2.4. Yapılan Çalışmalar	43
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	48
3.1. Materyal.....	48
3.1.1. Agregat	48
3.1.2. Çimento	48
3.1.3. Kırmızı çamur.....	48
3.1.4. Nano tozu	49
3.1.5. Karma suyu.....	49
3.1.6. Akışkanlaştırıcı.....	50
3.1.7. Deneylerde kullanılan aletler.....	50
3.2. Yöntem	55
3.2.1. Agregat deneylerinde uygulanan yöntemler.....	55
3.2.2. Karışım agregalarının oranları ve granülometreleri	55
3.2.3. Numunelerin kodlanmasında kullanılan yöntem.....	56
3.2.4. Beton karışım oranları	57
3.2.5. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler	61
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	63
4.1. Kırmızı Çamur Optimum Oranına Karar Verebilmek İçin Yapılan Çalışmalar	
(1. Aşama)	63
4.1.1. Ağırlık kaybı.....	63
4.1.2. Basınç ve yarmada çekme dayanımları	65
4.1.3. Basınç altında su işleme derinliği deneyi	70
4.1.4. Kılcal su emme deneyi	72
4.2. Kırmızı Çamur ve Nano- Al_2O_3 Eklenecek Yapılan Çalışmalar (2. Aşama)	73
4.2.1. Ağırlık kaybı.....	73
4.2.2. Basınç ve yarmada çekme dayanımları	74
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	80

KAYNAKLAR	85
ÖZGEÇMİŞ	88



SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Al_2O_3	Aumina
$\text{Al}(\text{OH})_3$	Alüminyum hidroksit
Al_2SiO_3	Siliminat
C	Özgöl ısı
Ç	Çimento
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Kalsiyum hidroksit
CaCO_3	Kalsiyum karbonat
CaO	Kireç
CSH	Kalsiyum silikat hidrat
Fe_2O_3	Demir oksit
FeCr_2O_4	Kromit
H_2S	Hidrojen sülfür
ITZ	Çimento hamuru-agrega ara yüzeyi
K	Isı iletkenlik katsayısı
KÇ	Kırmızı çamur
MgO	Magnezyum oksit
NA	Nano alumina
Na_2O	Sodyum oksit
Q	Isı geçişi
SiO_2	Silika
T	Sıcaklık
t	Zaman
TiO_2	Titanyum dioksit
α	Isıl yayılım katsayısı
$\rho.c$	Isısal sığa

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Endüstri fırın bacaları	4
Şekil 2.2. Nükleer reaktörler	5
Şekil 2.3. Hava alanı pistleri	5
Şekil 2.4. Standart sıcaklık-zaman eğrisi	7
Şekil 2.5. Yangın	8
Şekil 2.6. Yüksüz olarak ısıtılan ve sıcak olarak test edilen çimento harcının basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi	14
Şekil 2.7. Çeşitli betonlar için ısı yayılım katsayısı	18
Şekil 2.8. Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi	19
Şekil 2.9. Isıtılmış betonun renk değişimi	20
Şekil 2.10. Normal betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi	22
Şekil 2.11. Normal betonda çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi	23
Şekil 2.12. Normal betonda elastisite modülü-sıcaklık ilişkisi	24
Şekil 2.13. Beton ve çelik için gerilme-sıcaklık ilişkisi	25
Şekil 2.14. Yüksek sıcaklıkta çeliğin ısısal özellikleri	26
Şekil 2.15. Çeliğin farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri	26
Şekil 2.16. Atıkların değerlendirilmesi	30
Şekil 2.17. Alüminyum üretiminin şeması	31
Şekil 2.18. Bayer teknolojisi	31
Şekil 2.19. Kırmızı çamur	32
Şekil 2.20. Kırmızı çamur oluşum prosesi	33
Şekil 2.21. Kırmızı çamur bertaraf yöntemleri	34
Şekil 2.22. (a) Atık yönetim seçenekleri, (b) Kırmızı çamur yönetim seçenekleri	35
Şekil 2.23. 28°C ila 500°C sıcaklık aralığında KÇ'nin ağırlık kaybını gösteren TGA-DTA diyagramı	37
Şekil 2.24. Nanoteknoloji yaklaşımları	42
Şekil 2.25. Beton bileşenlerinin boyutları	42
Şekil 2.26. Beton bileşenlerinin tane boyutu ve özgül yüzey alanı	43
Şekil 3.1. Elekler	50

Şekil 3.2. Beton numunelerini üretmek için betoniyer	51
Şekil 3.3. Beton numunelerini üretmek için küp ve silindir kalıplar	52
Şekil 3.4. Yüksek Sıcaklık fırını	53
Şekil 3.5. Standart sıcaklık-zaman eğrisi	53
Şekil 3.6. Basınç dayanımı test Presi	54
Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan basınçlı su geçirimsizlik cihazı.....	54
Şekil 3.8. Agregada en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan beton için belirlenen agregada tane büyüklüğü dağılımı eğrisine ait sınırlar	56
Şekil 3.9. Beton basınç dayanımlarına göre yaklaşık s/ç oranları	57
Şekil 3.10. Üretilen beton numuneleri	59
Şekil 3.11 Isıtma-soğutma rejimi	60
Şekil 3.12. Betonda kılcal emilim deney düzeneği	62
Şekil 4.1. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının ağırlık kaybı	64
Şekil 4.2. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları	67
Şekil 4.3. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları kaybı	67
Şekil 4.4. 600°C’de 10KÇ numunesinde görülen renk değişimi	68
Şekil 4.5. 800°C de 15KÇ numunesinde kırık yüzeyi görüntüsü	68
Şekil 4.6. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları	69
Şekil 4.7. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları kaybı	70
Şekil 4.8. Beton numunelerine nüfuz eden su derinliği	71
Şekil 4.9. Basınç dayanımı ile nüfuz derinliği arasındaki ilişki	71
Şekil 4.10. Betonun su emmesi	73
Şekil 4.11. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının ağırlık kayıpları ...	74
Şekil 4.12. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları	77
Şekil 4.13. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları kaybı	77

Şekil 4.14. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları.....	78
Şekil 4.15. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının çekme dayanımları kaybı.....	79



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Beton üzerinde sıcaklığın etkisi.....	13
Çizelge 2.2. Kırmızı çamur üzerinde sıcaklığın etkisi.....	37
Çizelge 2.3. Malzeme boyutu-bilim alanı.....	40
Çizelge 2.4. Toz çeşitleri	40
Çizelge 3.1. Kırmızı çamur ve çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	48
Çizelge 3.2. Agregaların tane yoğunlukları, su emme, ve yüzey nemi oranları.....	55
Çizelge 3.3. Beton çevre etki sınıfları.....	57
Çizelge 3.4. Beton karışım oranları	58
Çizelge 4.1. Beton ağırlık kaybı	64
Çizelge 4.2. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları	66
Çizelge 4.3. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları.....	69
Çizelge 4.4. Kılcal su emme değerleri	72
Çizelge 4.5. Beton ağırlık kaybı	74
Çizelge 4.6. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları	76
Çizelge 4.7. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları.....	78

1. GİRİŞ

Beton yapıların, çelik yapılara kıyasla yanmaz özellikleri ve düşük ısı iletkenliğinden (ısı aktarmasındaki hızın yavaş olması) dolayı yüksek derecede yangın ve ısıl dirence sahip olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte, yapı yangınlarında, tünel yangınlarında ve bazı nükleer enerji tesislerindeki kaza koşulları neticesinde yüksek sıcaklığa maruz kalındığında, betonun mekanik özelliklerinde ve dayanıklılığında (bozulma, eleman yer değiştirmesi, çatlama ve yüzey bozulması gibi) belirgin bir kayıp oluşur. Geçmişte hem can hem de mal kayıplarına sebep olan bir çok yangın beton yapılara zarar vermiştir.

Beton, çimento hamuru matrisi ve matris içinde dağılı yerleştirilen agregalardan oluşan heterojen bir malzemedir. Beton bileşenlerinin heterojenliği neticesinde yüksek sıcaklığa maruz kalan betonda çimento hamuru-agrega ara yüzeyi (ITZ) gibi özellikleri diğer fazlardan farklı olan bölgelerde çok daha büyük termal hasar oluşabilmektedir. Bunun yanında, çimento hamurundaki hidrasyon ürünlerinin ayrışması ve dehidrasyonunun, mikro ve nanokütlelerde başlayan betonun termal bozunumunun başlıca kaynakları olduğu düşünülmektedir. Çimento esaslı kompozit malzemelerinin termal bozunumlarındaki karmaşık mekanizmaları anlamak için birçok girişimler yapılmış ancak, süreci yönlendiren ve nihayetinde dayanım kayıplarına neden olan mikro ve nanoyapısal değişiklikler henüz tam olarak anlaşılamamıştır. Bunun sonucunda, literatür çalışmaları; yangın etkisinde çimento esaslı kompozit malzemelerin, mikro ve nanoyapıdaki değişimleri ve bunların yerel ve makro mekanik özelliklerle nasıl ilişkili olduğu konusunda kapsamlı bilgi edinmeye yönelik araştırmaları kapsamaktadır.

Bununla birlikte, günümüzde teknolojiye ilerlemelerle, çeşitli nano malzeme ve minerallerin bulunmasıyla birlikte artık yüksek mukavemetli beton üretilebilmektedir. Nano ölçekli parçacıkların kullanılmasıyla gelişmiş özelliklere sahip olan nano teknolojik ürünler büyük önem taşımaktadır. En az bir boyutunun büyüklüğü 1'den 100 nanometreye kadar olan maddenin kontrolünü sağlayan bu teknolojinin betonda kullanılması ile boşluklar doldurularak yoğun ve kompaktitesi yüksek mikroyapı

oluşmakta, hidrasyon reaksiyonu hızlanmakta, yüksek yüzey alanına sahip oldukları için çimento hamuru ve agregalar arasında daha iyi bağ oluşmaktadır. Çimento harcı veya betonun özelliklerini iyileştirmek için nano-tozlar (nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-Fe₂O₃,.....vb.) nano kil ve karbon nano tüplerin eklenmesine yönelik birçok araştırma yapılmaktadır. Hatta yüksek sıcaklığa karşı dayanım konusunda da nanoteknoloji ürünlerinin kullanımı gerekmektedir.

Ayrıca betondaki doğal hammaddelerin endüstriyel atıklarla değiştirilmesi, günümüzün atık yönetimi problemlerini azaltmak için bir fırsat sunmaktadır. Betonda, alternatif hammaddeler olan endüstriyel atıkların kullanımı teknik ve ekonomik açıdan avantajlıdır. Beton endüstrisinde çeşitli uygulamalar için ekonomik ve çevresel açıdan uygun alternatifler bulmak daha çevreci ve sürdürülebilir malzeme niteliği taşıması açısından önemlidir. Özellikle yüksek sıcaklığa karşı dayanım düşünüldüğünde sıcaklığa karşı dayanımı yüksek olan Al₂O₃ içeren atık popüler olmaktadır. Bu yönü ile boksit alumina üretimi için Bayer işlemi sırasında oluşan yüksek hacimli katı atık olan kırmızı çamurun herhangi bir endüstriyel kullanım alanı bulunmamaktadır. İçeriğindeki Al₂O₃ den dolayı yüksek sıcaklıklardaki etkisi incelenmeye değer olan kırmızı çamurun kullanımı ile hem ekonomik hem çevresel açıdan daha iyi bir beton üretilebilecektir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmadan yukarıda verilen tüm düşüncelerin ışığında kırmızı çamurun yüksek sıcaklık etkisi altında kalan betonun özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Ayrıca kırmızı çamurlu betonun yüksek sıcaklık etkisi altında özelliklerini daha da iyileştirebilmek adına nano Al₂O₃ tozunun optimum bir oranda eklenmesi ile daha iyi özellikte beton numuneler üretilmesi amaçlanmıştır.

Yüksek sıcaklığın etkisinde betonun mekanik özellikleri üzerinde atık malzeme olan kırmızı çamurun ve nano toz katkısının etkisi incelenerek performansı daha iyi olan bir beton üretmek amacıyla yapılan bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır:

İlk aşamada optimum kırmızı çamur oranını belirlemek için çimentonun %10, %15 ve %20'si oranlarında kırmızı çamur kullanılarak üretilen beton numunelerinin 200°C, 300°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklardaki performanslarına bakılmıştır. Numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı deneyleri, fiziksel özellikleri için ağırlık kaybı ölçümleri, basınçlı su geçirimsizliği ve kılcal geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır.

İkinci aşamada, bulunan optimum kırmızı çamur oranı esas alınarak bu betonların yüksek sıcaklığa dayanıklılığının nano- Al_2O_3 tozu ile iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Nano- Al_2O_3 tozu yine çimentonun %0.5, %1 ve %1.25'i oranlarında belirlenen optimum kırmızı çamur oranı ile birlikte kullanılarak üretilen beton numunelerinin 200°C, 400°C, 600°C sıcaklıklar altında yüksek sıcaklık sonrası artık dayanımları incelenmiştir. Yine numunelerin mekanik özelliklerini belirlemek için basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı deneyleri, fiziksel özellikleri için ağırlık kaybı ölçümleri yapılmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

2.1. Yüksek sıcaklık kaynakları ve Yangın

Yapı ve malzemede hasara yol açan yüksek sıcaklık kaynakları; yangın, özel üretimlerden dolayı endüstri fırın bacalarında görülen sıcaklık ve hava alanı pistlerinde sürtünme dolayısıyla oluşan ısınma ve nükleer reaktörler olarak gösterilebilir (Aköz vd 1994). Bu etkiler aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

2.1.a. Endüstri fırın bacaları

Endüstri fırın bacalarında sıcaklık $1250-1300^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşır. Günümüzde bacalardaki artık ısı enerjisinin geri kazanımı için; ısı eşanjörleri, ısı reküperatörleri, döner tip ısıtıcılar, ısı boruları ve ısı pompaları gibi araçlar kullanılarak sıcaklık yaklaşık 200°C 'ye kadar düşürülmektedir (Avcı 1984).



Şekil 2.1. Endüstri fırın bacaları

2.1.b. Nükleer Reaktörler

Nükleer reaktörlerde, sistemin sıcak parçalarından transfer olan ısı, nötron ve gama

ışınlarının baskısıyla oluşan sıcaklık sonucu reaktörü koruyan beton yüksek sıcaklığa maruz kalır. Radyasyon, koruyucu betona önemli sayılabilecek bir zarar vermez fakat beton sıcaklıkla daha zayıf hale gelir ve nötron baskısına karşı etkisiz kalır (Aköz vd 1994).



Şekil 2.2. Nükleer reaktörler

2.1.c. Hava alanı pistleri

Uçakların kalkış ve iniş esnasında ki sürtünmeler ve jet motorlarından saatte 260 km hızla çıkan 196°C 'deki egzoz gazları, hava alanı pistlerinde sıcaklık artışına neden olurlar. İniş ve kalkışlarda ki tekrarlı ısınma-soğuma etkisi ile pistlerde aşınma ve tozlanma görülmektedir. Pistler bu durumda yük alma kapasitelerini muhavaza etseler de hava alanının işlevleri kısıtlanır (Ramakrishman *et al.* 1991).



Şekil 2.3. Hava alanı pistleri

2.1.d. Yangın

Yangın, yanıcı maddenin ısı ve oksijenle belirli oranlarda birleşmesiyle oluşan kontrol dışı gelişen kimyasal bir olaydır (Karanfil 2007). Yanma, yanıcı maddenin oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek, yanıcı madde içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkar. Yanma, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyon hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır (Ashre 1997).

2.1.1. Yangında sıcaklığın gelişimi

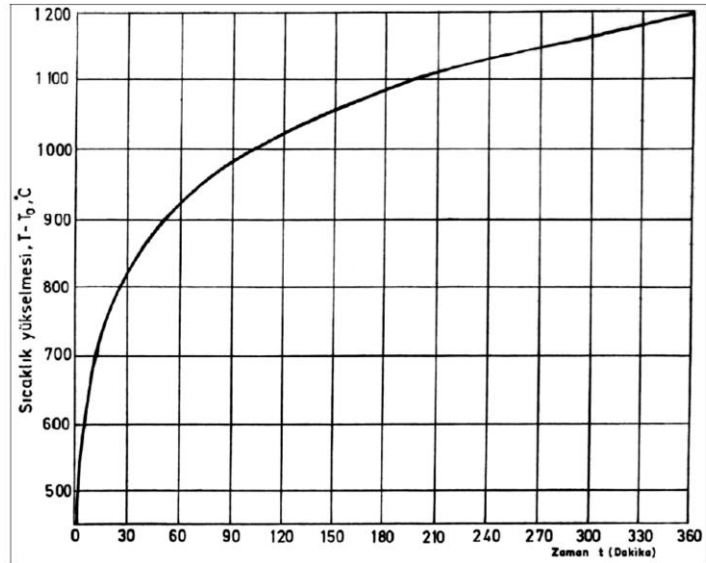
Bir yangının çıkması ve gelişmesi için üç elemanın birlikte bulunması gerekir; yanıcı madde, oksijen ve ısı kaynağı. Tutuşma sıcaklığı, yanıcı malzemenin türüne, yüzeyine, şekline ve porozitesine bağlıdır. Yanmanın hızı ise yanma yerinde oksijenin yenilenme olanaklarıyla orantılıdır.

Bir yangında θ sıcaklığının t zamanına bağlı değişim diyagramının incelenmesi, yangın olayını üç aşamaya ayırır. Bunlar çıkış-gelişme, etkin yangın ve sönme safhalarıdır. Çıkış ve gelişme aşamasından etkin yangına geçiş genelde kısa bir zaman aralığında gerçekleşir ve genel tutuşma olarak adlandırılır. Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkileri araştırılırken etkin yangın durumu göz önüne alınmalıdır. Süresi 5 ila 30 dakika arasında değişen birinci çıkış ve gelişme aşamasında, sıcaklık görsel olarak düşük kalır. Bu aşamada, yapı taşıyıcı elemanları ısısal olarak etkilenmezler. İkinci etkin yangın döneminde; ısı üretimi ile sıcaklık artar ve yapı taşıyıcı elemanları bundan etkilenirler. Bu aşama yangın sonrası mukavemet hesaplarında göz önüne alınmalıdır. Üçüncü sönme safhasında, sıcaklık azalır. Ancak sıcaklık sürdüğünden, yapı elemanları üzerinde hasar verici etkisi devam etmektedir (Harmathy 1986).

Şekil 2.4’de verilen standart sıcaklık-zaman eğrisinde, sıcaklığın 10 dakika gibi kısa bir zamanda yaklaşık 600°C’ye hızla yükseldiği ve yangın süresince de 1200°C’ye ulaşabildiği görülmektedir. ISO-834 yangın eğrisi olarak tanımlanan bu eğri Şekil 2.4 ve bağıntısı ise (2.1) ile ifade edilmektedir (TS 1263, 1983).

$$T - T_0 = 345 \log(8t + 1) \quad (2.1)$$

Denklemden, t yangın süresini (dakika), T_0 başlangıç sıcaklığını (20°C), T yangın esnasında erişilen ortalama yangın gazı sıcaklığını (°C) göstermektedir (Haksever 1991). Deneysel çalışmalarda kullanılacak fırının ısınma hızının bu bağıntıya uygunluğu şartı aranmaktadır (TS 1263, 1983).



Şekil 2.4. Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS 1263, 1983)

Danimarka’da bulunan Great Belt Tünelinde ve Channel Tünelinde, 1994 ve 1996 yıllarında çıkan yangınlarda, yüksek sıcaklık etkisiyle betonda patlama ve parça atmalar meydana gelmiş ve bunun bir sonucu olarak beton kesitindeki azalmalar ağır hasarlara yol açmıştır. Özellikle yangın gibi yüksek sıcaklığın oluşturduğu hasarlar ülkemizde de çok sık görülmektedir (Yüzer vd 2008).



Şekil 2.5. Yangın

Yangının betona ve betonarme yapılara etkisi 1922'den beri araştırılmaktadır. 10 yıl öncesine kadarki çalışmalarda yüksek sıcaklığın normal dayanımlı betona etkileri üzerinde durulmuştur. Son dönemlerde ise çalışmalar özel betonlar üzerinde olmuştur (Yüzer vd 2008).

Yangından korunma amacıyla bazı zorunluluklar getirilmiş ve bu zorunluluklar, binaların tasarımında mimar ve mühendisler için belirleyici kriterler olmuştur. Günümüzde, tüm dünyada fonksiyona ve performansa dayalı düzenlemeler, yönetmeliklerin oluşturulması yönünde bir eğilim oluşturmıştır. Bazı ülkeler bu yaklaşımı yıllar önce kabul etmiş, bazı ülkeler ise değerlendirmeye yeni yeni almaktadırlar. Avrupa Birliği, üye ülkeler arasındaki bu farklı yaklaşımları ortadan kaldırmak için Yapı Malzemeleri Direktifinde (Construction Product Directive- CPD) altı temel prensipten birisini yangın durumunda emniyet olarak yayımlamıştır (Demirel vd 2006).

Yapı malzemeleri direktifinin altı temel gereği aşağıdaki gibidir (Demirel vd 2006):

- 1) Mekanik dayanım ve kararlılık (stabilite),
- 2) Yangın durumunda emniyet,
- 3) Hijyen, sağlık ve çevre,
- 4) Kullanım emniyeti,
- 5) Gürültüye karşı korunma,

6) Enerjiden tasarruf ve ısı korunumu.

Yangın durumunda emniyetin sağlanması için malzemelerin termik özelliklerinin ve yüksek sıcaklıkta olabilecek değişimlerinin bilinmesi gerekmektedir.

2.1.2. Malzemelerin termik özellikleri ve yüksek sıcaklıktaki değişimleri

Bir taşıyıcı sistem ya da elemanın yangın süresindeki mukavemeti ve şekil değiştirmeleri malzemenin ısısal ve mekanik özelliklerine bağlıdır. Genellikle bu özellikler sıcaklığa bağlı olarak değişirler. Yangında ısı, yanmakta olan bölgeden konveksiyon ve ışıma ile iletilir. Bu ısının bir bölümü malzeme tarafından yansıtılırken bir bölümü ise emilir. Emilen ısı kondüksiyon ısı transferi ile malzemenin içine ulaşır ve sıcaklık yükselmesine neden olur.

Bu konunun analizinde etkin özellikler; ısı iletkenlik katsayısı(k), kütleli yoğunluk (ρ) ve özgül ısı katsayısı; olmak üzere ısısal sığa ($\rho.c$) ve ısısal genleşme katsayısı(α) dır. Isı iletimine ilişkin sorunlarda bu özellikler tek tek etkili olabildikleri gibi birlikte de etkili olabilirler ve bu durumda ($\alpha=k/\rho.c$) bağıntısıyla tanımlanan *ısı yayılım katsayısı* olarak isimlendirilirler. Isı problemlerinde malzemenin ısı emme oranları da etkin olur ancak pratikte güvenli tarafta kalan bir yaklaşımla, bu özellik ihmal edilebilir (Uysal 2004).

Isı İletkenlik Katsayısı (k)

Isı iletkenlik katsayısı k, L kalınlığında ve A alanlı bir malzemenin, θ_1 sıcaklığındaki bir yüzeyinden θ_0 sıcaklığındaki diğer yüzeyine, birim zamanda iletilen Q ısı miktarı olarak tanımlanabilir.

$$k = \frac{Q}{t} \cdot \frac{L}{A \cdot (\theta_1 - \theta_0)} \quad (2.2)$$

Katsayıda birim olarak (kcal/mh°C) veya (W/m°C) genellikle kullanılmaktadır. Isı iletim katsayısı, gerçekte sabit olmayıp sıcaklığa bağlı olarak değişir (Uysal 2004).

Isısal Sığa (p.c)

Bir malzemenin ısısal sığası, birim kütlesinin sıcaklığını bir derece yükseltmek için gerekli olan ısı miktarı olarak ifade edilebilir. Katı malzemelerde, sabit hacim ya da sabit basınç altında ölçülen ısısal sığalar çok az fark gösterirler (Uysal 2004).

Isıl Yayınım Katsayısı (α)

Isıl yayınım katsayısı, ısı iletim katsayısının ısısal sığaya oranı olarak tanımlanır. Yüzey sıcaklığının malzemenin içine olan ısı iletimini belirler ve 2.3 bağıntısı ile hesaplanır (Uysal 2004).

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (2.3)$$

Yüksek sıcaklığın yapı malzemelerine etkisi incelenirken, yapı elemanlarında en çok kullanılan beton ve donatı malzemelerinin yüksek sıcaklık karşısında etkilerinin daha detaylı açıklanması gerekmektedir.

2.1.3. Beton fazları üzerinde yüksek sıcaklığın etkileri

Betonun özellikleri kendisini oluşturan malzemelerin sıcaklık etkisindeki özellikleri ile belirlenmektedir. Bu malzemelerin özelliklerinin ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir.

2.1.3.a. Agregada üzerinde yüksek sıcaklık etkileri

Beton hacminin büyük bir kısmını oluşturan agreganın türü ve özellikleri, yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun özelliklerini önemli ölçüde etkiler (Uçarkoşar 2013). Agregada özelliklerindeki farklılıklar ısıtma sırasında betonun termal genleşme katsayısı, termal iletkenliğini ve performansını değiştirir. Agregaların mineral yapısı yüksek sıcaklık sonrası beton özelliklerini değiştirmekle birlikte agregaların genellikle yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı oldukları söylenebilir (Güler 2010).

Agregalar genellikle 500°C'ye kadar kararlılıklarını korurlar. Silis esaslı olmayan agregalar genellikle 600°C'nin altındaki sıcaklıklarda değişim ve ayrışmaya uğramazlar (Uçarkoşar 2013). Yaygın olarak kullanılan agregaların çoğu belli sıcaklığa kadar ısıtıldıktan sonra fiziksel olarak bozulurlar. Silis esaslı agregalar için kritik sıcaklık 250°C ile 575°C arasındadır. Kireçtaşı, bazalt ve dolomit agregalar 650-700°C'ye kadar kararlıdırlar. Kalker ve dolomitte oluşan agregalar 800-900°C'lerde CaO ve MgO'ya dönüşürler. Kalkerin ve dolomitin kalsinasyonu endotermik bir olaydır ve sıcaklığın etkisi ile CO₂ ayrışır, MgO ve CaO oluşur ve bu durum büzölmeye neden olur. Hem soğuma esnasında ortamdaki nemin emilmesi hem de söndürme anında sıkılan suyun etkisiyle Ca(OH)₂ tekrar oluşur ve genleşme meydana gelir. Bu büzölme ve genleşmeler dayanımda önemli azalmalara sebep olur. Kireçtaşı agregada içeren betonların bu sıcaklığın üzerinde yangın dayanıklılığına sahip olmadığı ve ayrışma gerçekleşeceği göz önünde tutulmalıdır. Karbonat kökenli agregalar 700°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda CaO ve CO₂'e ayrışır. Granit ve bazalt gibi volkanik kayalar ise 1000°C'ye kadar kararlı yapıdadırlar. Ancak sıcaklığın aniden artıp azalması parçalanmalara neden olabilir (Gölce 2010). Bu nedenle, üretilen betonun artan sıcaklıklarda yüksek performans göstermesi için uygun agreganın seçimi çok önemlidir.

Yüksek sıcaklıklarda beton için agregada seçiminde göz önünde bulundurulması gereken kriterler fiziksel ve kimyasal olarak agreganın ısı kararlılığıdır. Dayanım kaybı, agregada silis içermezse (örneğin kireçtaşı, bazik püskürük kayalar ve özellikle tuğla kırıkları ve yüksek fırın curufü) oldukça düşüktür. Çok ince kristal yapıya sahip veya amorf bazik

malzemeler en iyi yangın dayanıklılığına sahip agrega olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca pomza, köpük curuf ve genleştirilmiş kil ürünleri gibi hafif agregaların yangın dirençleri yüksektir. Hafif agrega içeren betonların ısı iletkenliği düşüktür (Güler 2010).

2.1.3.b. Çimento üzerinde yüksek sıcaklık etkileri

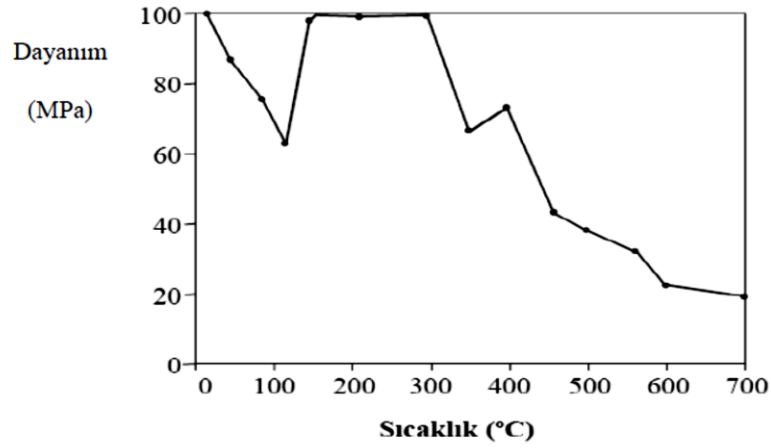
Çimento hamuru ilk ısınma esnasında, önemli fiziksel ve kimyasal değişimlere uğradığı için en kararsız beton bileşenidir. Beton ısınmaya başlayınca ilk kılcal boşluklarda bulunan serbest su daha sonra ise kimyasal bağlı su bileşenlerini kaybeder. Bu su kaybı, betonda mikro çatlaklar oluşması ve %10'a varan basınç dayanım kayıplarına sebep olur. 150°C'den sonra kalsiyum hidroksitten (Ca(OH)_2 :portlandit), 300°C'nin üzerinde ise çimentonun hidrate ürünlerinden oluşan kimyasal bağlı su kaybı belirgindir. Bu kayıptan dolayı çimento hamurunda meydana gelen dayanım kaybı büyük olur. Sıcaklığın artması ile dayanım kayıpları artmaya devam eder ve 350-400°C civarında Ca(OH)_2 dehidrate olup CaO (kalsiyum oksit)'e dönüşür. Yaklaşık 500°C'de beton, ilk dayanımının %50-75'ini kaybeder, 550-600°C ise dayanım kayıpları için üst sınır olarak kabul edilebilir. Nükleer reaktör kazalarında ve bazı durumlarda kimya endüstrisinde agrega ve çimentoyu eritebilecek yüksek sıcaklıklara ulaşılabilir. Portland çimentosunun erime sıcaklığı kimyasal içeriğiyle ilişkilidir. Sıcaklık arttıkça ve 800°C'ye ulaştığında çimento ufalanır, 1150°C'nin üzerinde ise feldspat erir ve çimentonun diğer mineralleri cam fazına dönüşür. Köhl (1955)'e göre %63-71 CaO, %18-30 SiO_2 %5-15 Al_2O_3 ve Fe_2O_3 içeren sertleşmiş çimento pastasının erime sıcaklığı 1200°C'dir. Genellikle normal Portland çimento pastası 1350°C civarında erimeye başlar (Uçarkoşar 2013).

Normal Portland Çimentosu ile yapılmış betonlarda sıcaklık artışına bağlı olarak bünyede oluşan değişimlere kısaca Çizelge 2.1'de değinilmiştir (Baradan vd 2010).

Çizelge 2.1. Beton üzerinde sıcaklığın etkisi (Baradan vd 2010)

Sıcaklık	Beton üzerinde etkisi
100-150°C	Kılcal boşluklardaki suyun buharlaşması, jel boşluklarındaki suyun buharlaşması.
150-250°C	Büzülme, kılcal çatlakların oluşumu, çekme dayanımında düşüş, pembemesi renk.
250-300°C	Alüminli ve demir oksitli bileşenlerde bünye suyunun kaybı, basınç dayanımında düşüş.
400°C	Ca(OH) ₂ 'den CaO'e dönüşüm (%33 hacim azalması).
400-600°C	CSH yapısının tahribi, gri beyaz renk, dayanımda %80'lere varan azalma.

Şekil 2.6'da yüksüz olarak ısıtılan ve sıcak durumda test edilen çimento hamurunun değişimi verilmiştir (Güler 2010). Sıcaklığın 120°C'ye kadar artmasıyla dayanım azalmış ve bu durum, hamurdaki su tabakalarının şişmesi nedeniyle bağların zayıflamasıyla ilişkilendirilmiştir. Dayanımların bu sıcaklıktan sonra tekrar geri kazanılması, kimyasal olarak bağlı olmayan ve buharlaşabilen suyun kaybına (termal kuruma) bağlanmıştır. Termal dehidratasyonun bu faydalı etkisi, mekanik özelliklerin bozulmasına neden olan jelin dehidratasyonu ve mikro çatlakların oluştuğu, 300°C'nin üzerinde sona ermiştir. Sıcaklık 300°C'ye ulaştığı anda CSH ara yüzeylerindeki su ile, CSH ve sülfaluminattan gelen kimyasal bağ suyunun bir bölümü kaybedilir. Mikro çatlaklar ilk olarak (yaklaşık 300°C'de) Ca(OH)₂'in toplandığı bölgelerde ve daha sonra hidrate olmamış tanelerin bulunduğu bölgelerde (yaklaşık 400°C'de) görülür. Sertleşmiş çimento hamurunda mikro çatlakların oluşumu, hamurdan serbest bırakılan su miktarından ziyade mikro gözenekliliğin daha hızlı büyümesinden kaynaklanır. Bu sıcaklığın üzerinde, mekanik özelliklerin bozulmasında beton içerisinde porozite artışının başlaması da etkin rol oynar (Güler 2010).



Şekil 2.6. Yüksüz olarak ısıtılan ve sıcak olarak test edilen çimento harcının basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi

400-600°C arasındaki sıcaklıklar sertleşmiş çimento hamurunda bir dizi tepkimeleri başlatır. Bu tepkimeler boşluk sisteminin tamamen kuruması ile başlar, bunu hidrasyon ürünlerinin ayrışması ve CSH jellerinin parçalanması takip eder. 400°C'nin üzerindeki sıcaklıklardan soğutulma sonrası örneklerin parçalanması, o sıcaklıkta Ca(OH)_2 'in ayrışması ve bu sıcaklıktan soğuma sonunda tekrar hidrate olarak genişmesi ile ilgilidir.

Isınma sırasında kalsiyum hidroksitin kirece ayrışması ve suyun buharlaşması dayanım kaybı açısından önemli değildir. Oluşan çatlakların sebebi çözülen Ca(OH)_2 'in hacminde %44'lük bir artış meydana getiren ve yıkıcı bir şekilde tekrar hidrate olmasından dolayı meydana gelen genişmedir. Ca(OH)_2 'in ayrışma sıcaklığı literatürde 400-600°C arası olarak aktarılır. CSH'in tamamen ayrışması ve kimyasal olarak bağlı suyun kaybı yaklaşık 900°C civarındadır.

Çimento hamurunun elastisite modülü, sıcaklığın 200°C'ye kadar çıkmasıyla %50 oranında azalır. 200°C'den 300°C'ye kadar bir değişiklik olmazken, 300°C'nin üzerinde elastisite modülü ve dayanım önemli derecede ani olarak düşer. 600°C'den sonra elastisite modülü çimento hamuru boşluklarının hızlı artışından dolayı ani bir şekilde düşer (Güler 2010).

2.1.3.c. Arafaz üzerinde yüksek sıcaklık etkileri

Agrega ve çimento hamuru arasındaki bağ, hem çimento hamuru hem de agregadan daha zayıf olduğu için, betondaki en zayıf halka olarak göz önünde tutulur. Diğer faktörler sabit kalmak şartıyla çimento ile agreganın aderansındaki değişiklik beton dayanımının %300'den fazla değişmesine neden olur. Bozulan aderans, dayanım ve rijitlik kaybına neden olur ve sünmeyi artırır (Özbey 2009). Örneğin, agrega yüzeylerini yağlayarak beton üretiminde kullanmak betonun dayanımının 2.5 kat azalmasına neden olurken, agrega yüzeylerinin polimer ile kaplaması beton dayanımının 1.5-2 kat artırır.

Agrega ve çimento hamuru arasındaki bağ,

- a) Su/çimento oranı,
- b) Agreganın porozitesi ve yüzey pürüzlülüğü,
- c) Agrega ve çimentonun kimyasal kompozisyonuna bağlıdır.

Yüksek sıcaklık etkisi söz konusu olduğunda ise, agrega ve çimentonun termal uyumu önem kazanmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda betonda kullanılacak agreganın seçiminde dikkat edilecek birinci kriter, agreganın hem fiziksel hem de kimyasal olarak termal stabiliteye sahip olmasıdır. Ancak termal olarak stabil agregaların seçilmesi tek başlarına bir faktör değildir. Çimento hamuru ile zayıf bir bağ oluşturan termal olarak stabil agregalar veya sıcaklık etkisine dayanıklı olmayan bağ, ısınma esnasında betonun zayıflamasına neden olur. Bu nedenle, agrega ile çimento hamuru ısıya dayanıklı güçlü bir bağ oluşturmalıdır (Güler 2010).

2.1.4. Betonun fiziksel ve termik özellikleri

Isı iletkenlik Katsayısı (k)

Isı iletkenlik katsayısı ne kadar büyük ise ısı kaybı o kadar fazla olacak ve bundan dolayı kapalı bir hacim içinde sıcaklık derecesinin aynı kalmasını sağlamak için daha fazla yakıt tüketmek gerekecektir. Isı iletkenlik katsayısına etkiyen en önemli faktörlerin başında cismin boşluk durumu ve su içeriği gelmektedir. Havanın ısıyı iyi iletmemesinden dolayı bir cisimde boşlukların fazla olması (k) değerinin düşmesine yol açar. Boşluk ile cisimlerin birim ağırlıkları arasındaki bağ göz önünde tutulursa şu sonuç söylenebilir. Isı iletkenlik katsayısı düşük olan cisimlerin birim ağırlığında küçüktür. Cismin rutubet içeriği de suyun ısıyı havaya göre daha fazla geçirmesinden dolayı ısı iletim katsayısını etkiler. Buna göre rutubet içeriği fazla olan cisimlerde (k) daha büyük değerler almaktadır (Uysal 2004).

Beton için bu özellikler göz önüne alındığında şu verileri vermek mümkündür. Betonlarda k katsayısı birim ağırlıkla beraber artmaktadır. Birim ağırlığı 2400 kg/m^3 olan rutubet içeriği en düşük durumda olan betonda $1.8\text{--}1.4 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ değerini alırken, birim ağırlığın 2000 kg/m^3 e düşmesi halinde $0.75 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ değerine doğru bir azalma görülür. Bu durumun doğal bir sonucu hafif betonlarda k'nın oldukça küçük değerler almasıdır. Birim ağırlığı $600\text{--}1600 \text{ kg/m}^3$ arasında bulunan hafif betonların k değeri $0.25\text{--}0.54 \text{ kcal/mh}^\circ\text{C}$ aralığında değerler almakta ve bu betonların ısı yalıtımında kullanımı geniş alanlara yayılmaktadır (Uysal 2004).

Özgül Isı (c)

Betonların özgül ısısı, başka bir ifadeyle cismin sıcaklığını arttırmak için sarf edilmesi gereken ısı miktarı $0,20\text{--}0,28 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$ arasında değişir. Bu büyüklüğün betonun üretiminde kullanılan agreganın mineralojik kökeni ile önemli bir ilgisi yoktur. Buna karşılık özgül ısının artmasında betonun su içeriğinin artması etkilidir. Betonun birim ağırlığının azalması halinde ise bu karakteristik bir artış gösterir (Uysal 2004).

Termik Genleşme Katsayısı

Bir cismin ısıtılması atomların daha fazla titreşim yapmasına neden olur, bunun sonucu olarak cismin boyutlarında bir artış meydana gelir. Lineer termik genleşme katsayısı, sıcaklığın 1°C artması ile cismin birim boyutunda meydana gelen değişime denir. Bu karakteristik α ile gösterilirse sıcaklık derecesinin θ_1 'den θ_2 'ye çıkması halinde meydana gelen ΔL uzaması, L_1 ; θ_1 sıcaklığındaki cismin uzunluğu olduğuna göre şuna eşittir:

$$\Delta L = L_1 \times \alpha_1 \times (\theta_2 - \theta_1) \quad (2.4)$$

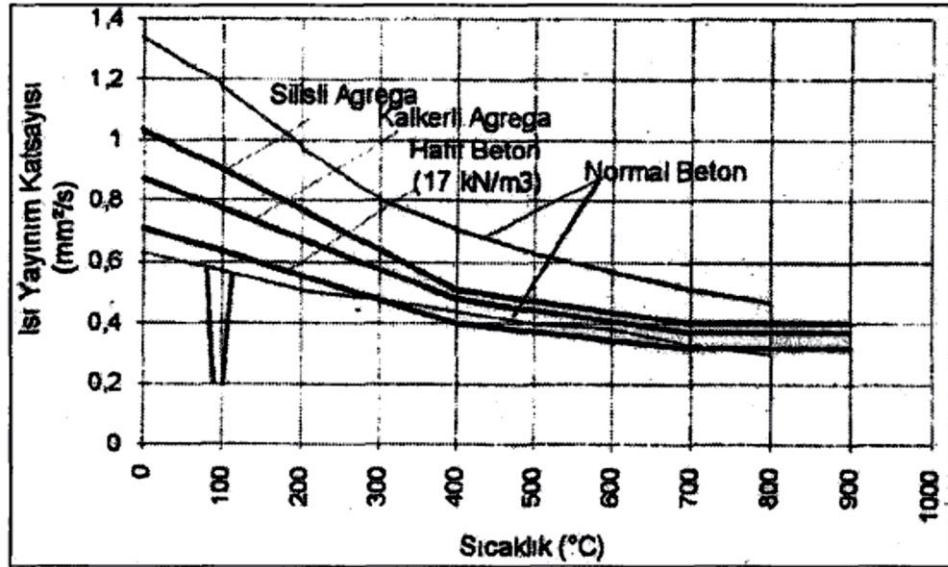
α katsayısı katı cisimlerde çok küçük değerler almasına rağmen ısı değişikliğinin meydana getirdiği genleşmelerin veya uzamaların serbest bir şekilde gerçekleşmemesi cismin içinde bir takım gerilmeler oluşturur. Isı değişikliğinin büyük ölçüde meydana gelmesi halinde bu gerilmeler büyük değerler olarak yapıların büyük hasar görmesine sebep olur. Bunlar ilk olarak bazı çatlakların oluşması, mukavemetin azalması, yapıda bulunan yüklerin meydana getirdiği gerilmelere termik gerilmelerin eklenmesiyle toplam gerilmenin daha büyük değer alması ve bütün bu gelişmelerin sonucu olarak yapının emniyet durumunun azalmasıdır (Uysal 2004).

Betonun genleşme katsayısı ($\alpha, 1/^{\circ}\text{C}$), üretimde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun α 'sı ($11 \times 10^{-6} - 20 \times 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$) agregalarınkinden büyüktür. Genleşme katsayısı en düşük olan doğal taş kalkerdir. Sıcaklık arttıkça α artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termik genleşmelerdeki farklılıklardan dolayı oluşan gerilmeler çimento hamuru ile agrega ara yüzünde çatlamalara neden olur (CEB 1991).

Isı yayılım katsayısı

Yüksek sıcaklık etkisinin sebeplerinden biri olan yangında ısı enerjisinin bir kısmı emilir. Emilen ısı sıcaklığın yükselmesine neden olur. Bu olayda ısı yayılım katsayısı

(α , mm²/sn) etkili olur. Gülce 2009'un CEB, 1991 kaynağından aldığı ısı yayılım katsayısı, Şekil 2.7'de görüldüğü gibi sıcaklığın artması ile azalmaktadır. Bu azalma özellikle 100°C civarında bünyedeki suyun buharlaşması nedeniyle daha belirgindir.



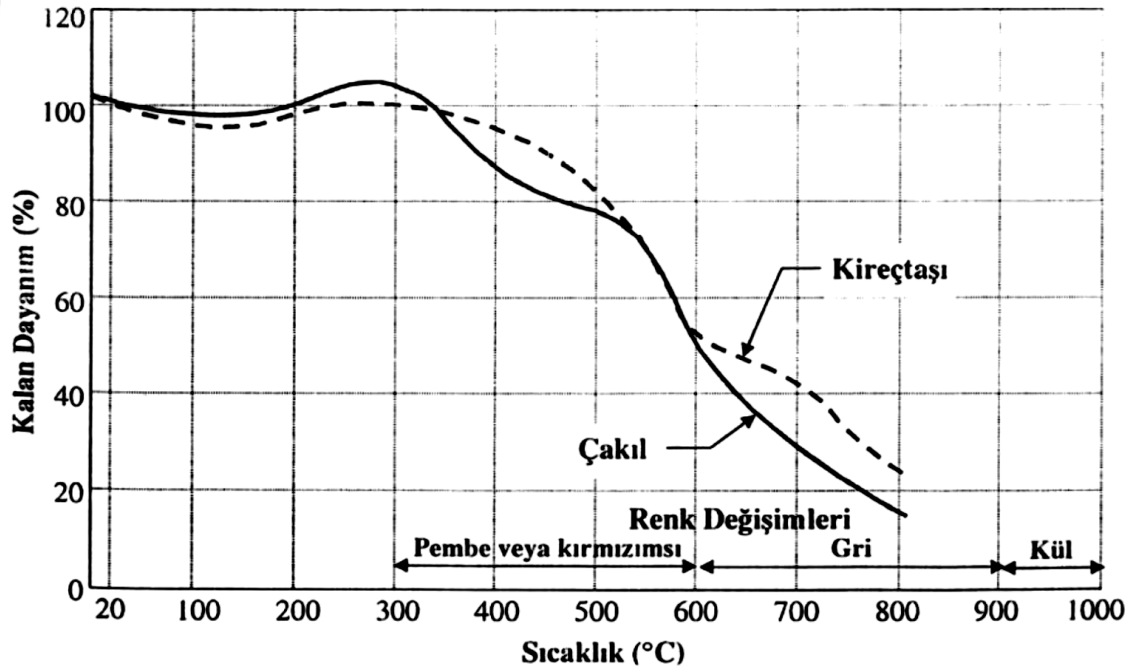
Şekil 2.7. Çeşitli betonlar için ısı yayılım katsayısı (CEB 1991)

Kütle kaybı

Yerleştirme sırasında beton boşluklu ve ıslak bir malzemedir. 70°C'de normal ve yüksek dayanımlı betonlar ilk kütlelerinin %99 kadarını korumaktadırlar. 70 ile 120°C sıcaklıkları arasında betondaki serbest su buharlaşmaktadır. Normal ve yüksek dayanımlı betonlar 120°C'de aynı miktarda su kaybetmektedirler. Kütlelerindeki kayıplar sadece %1.4 civarındadır. En yüksek kütle kaybı 120 ile 300°C arasında %7 civarındadır. Bunun sebebi sertleşmiş betonda bulunan bağlı suyun kurumasıdır. 300 ile 600°C arasındaki kütle kaybı kısmi olarak daha az önem taşımaktadır. Artan sıcaklıklarda yüksek dayanımlı betonlarda kayıp daha azdır. Bunun nedeni büyük olasılıkla yüksek dayanımlı betonun daha az kalsiyum hidroksit içermesidir, bu durum mineral katkıların pozolanik etkisinin sonucudur (Cülfik 2001).

Renk

Önceki çalışmalarda yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun renginde bazen önemli değişiklikler meydana geldiği, bu değişikliklere bakılarak kalker ve silis esaslı agregalı betonun maruz kaldığı maksimum sıcaklığın tahmin edilebildiği, özellikle silisli dere agregaları ile üretilen betonlarda renk değişiminin belirgin olarak görüldüğü, örneğin renk pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600°C'ye, gri ise 600-900°C'ye yükseldiği ifade edilmiştir (Şekil 2.8) (Baradan vd 2010).

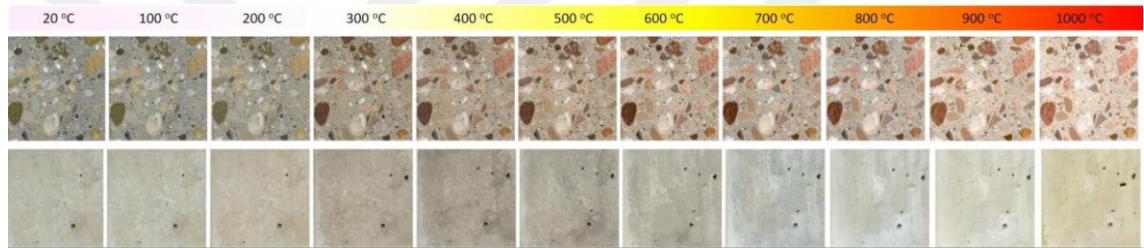


Şekil 2.8. Betonda sıcaklığa bağlı dayanım kaybı renk değişimi (Baradan vd 2010)

Genel olarak, silisli agregaya içeren beton 300°C ila 600°C arasında ısıtıldığında kırmızıya, 600°C ile 900°C arasında, beyaz-gri rengine, ve 900°C ile 1000°C arasında bir kül rengine dönüşür. Isıtılmış betonun renk değişimi asıl itibariyle agregaya içerisinde oluşan dönüşümlerden, çimento hamurundan aralıklarla su çıkmasından ve dehidrasyonundan kaynaklanmaktadır. En yoğun kırmızı renklenme görünümü renk değişimi, demir içeren silisli nehir yatağı agregası için gözlenmektedir. Bu renklenme, mineral bileşenlerin oksitlenmesinden kaynaklanır. Isıtıldıklarında silisli agregalar

kırmızıya dönerken, kalsiyum karbonat içeren agregalar beyazımsı hale gelir. Kalsinasyon işlemi nedeniyle, CaCO_3 kireç haline gelir ve soluk beyaz-gri tonlar verir.

Genel olarak, betonun renk değişimi analiz edildiğinde iki yaklaşım uygulanabilir. İlk olarak elemanın dış yüzeyi incelenebilir. Bu, elemanın dış duvarlarının (özellikle çimento hamuru) gözlemlenmesini içerir. Bir yangından sonra betonun durumunu değerlendirmek gerektiğinde, renk değişimi fiziksel özelliği kullanılabilir. Örneğin; Şekil 2.9'da dere yatağı agregalarıyla yapılan ısıtılmış betonun renk değişiklikleri sunulmaktadır (Hager 2013).



Şekil 2.9. Isıtılmış betonun renk değişimi (Hager 2013)

2.1.5. Betonun mekanik özellikleri üzerine yüksek sıcaklığın etkileri

Yüksek sıcaklık altındaki beton belirli bir süre için zehirleyici gaz ve duman çıkarmaz. Ayrıca betonarme yapılarda, termik iletkenlik katsayısının nispeten düşük olması nedeniyle, beton donatı çeliğini yüksek sıcaklığa karşı korur. Ancak bu dayanıklılık sınırlı süreler ve belirli sıcaklık dereceleri için geçerlidir. Yüksek sıcaklığın betonun dış yüzeylerinde ayrışmaya, kabuk halinde dökülmeye sebep olduğu görülür. Betonarme elemanlarda çatlakların oluşumu daha çok ek yerlerinde, donatıların bulunduğu bölgelerde ve betonun iyi sıkıştırılmamış bölgelerinde görülür. Özellikle pas payının az tutulduğu, donatının açıkta olduğu durumlarda, çelik ısıyı çok iyi transfer edip, zararın mertebesini artırır (Baradan vd 2010).

Genel olarak, yüksek sıcaklık betonun patlayarak kabuk atmasına ve mekanik özelliklerinde kayıpların artmasına neden olmaktadır. Deneysel sonuçlar 20°C ile 400°C

arasında değişen sıcaklıklarda basınç dayanımının korunabileceğini veya artabileceğini belirtmiştir (Chan *et al.* 1999; Luo *et al.* 2000). 400 ile 600°C arasında basınç dayanımında önemli kayıplar meydana gelmektedir. Basınç dayanımının çoğu 600 ile 800 °C arası kaybedilmektedir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonların arta kalan dayanımların araştırıldığı birçok veri doğal soğutma koşulları altında elde edilmiştir. Ancak suya daldırma, su sıkılması veya su ile söndürme gibi işlemlerin kullanıldığı soğutma şekillerinde bu dayanım kayıpları farklılık göstermektedir (Özbey 2009).

Betonarme yapı elemanının yüksek sıcaklığa dayanıklılığını etkileyen parametreler ise pas payı tabakasının kalınlığı, alevin içeriye sızmasına karşı direnci ve ısı transferine karşı direncidir. Elemanın yük taşıma kapasitesi ve yükleme seviyesi de önemli faktörlerdir. Ayrıca yapılan sistematik deneyler sonucu yüksek sıcaklıklarda (500-600°C) bekletilip, daha sonra aniden suya (20°C) daldırılan örneklerin mekanik özelliklerinin, havada yavaş soğumaya terk edilenlere kıyasla önemli derecede düştüğü belirlenmiştir. Bu olayın nedeninin ani soğumanın oluşturduğu termal şok etkisi olduğu sanılmaktadır. Ancak bu konuda çelişkili deney bulguları da vardır. Ayrıca su yüksek özgül ısıya sahiptir ve ısının büyük kısmı buharlaşma yoluyla tüketilir. Bu nedenle nemli beton, yüzeyde oluşan büzölmeye ve çatlaklara rağmen yavaş ısınır. Ancak suyun termik genleşme katsayısının betondan daha büyük olması nedeniyle, nemli betonlar kuru betonlara kıyasla daha fazla zarar görürler (Baradan vd 2010).

Basınç dayanımı

Genellikle beton belirli sıcaklık derecelerine, öreğin 250°C'ye kadar belirli sürelerde dayanabilir. 250°C'nin altındaki sıcaklıklarda betonun dayanımında pek değişim gözlenmez. Fakat 300°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda dayanım kaybı belirgindir. Sıcaklığın etkili olduğu süre kısa ise (örneğin 1 saat), dayanımda az da olsa düzelmeler bile gözlemlenebilir (Baradan vd 2010).

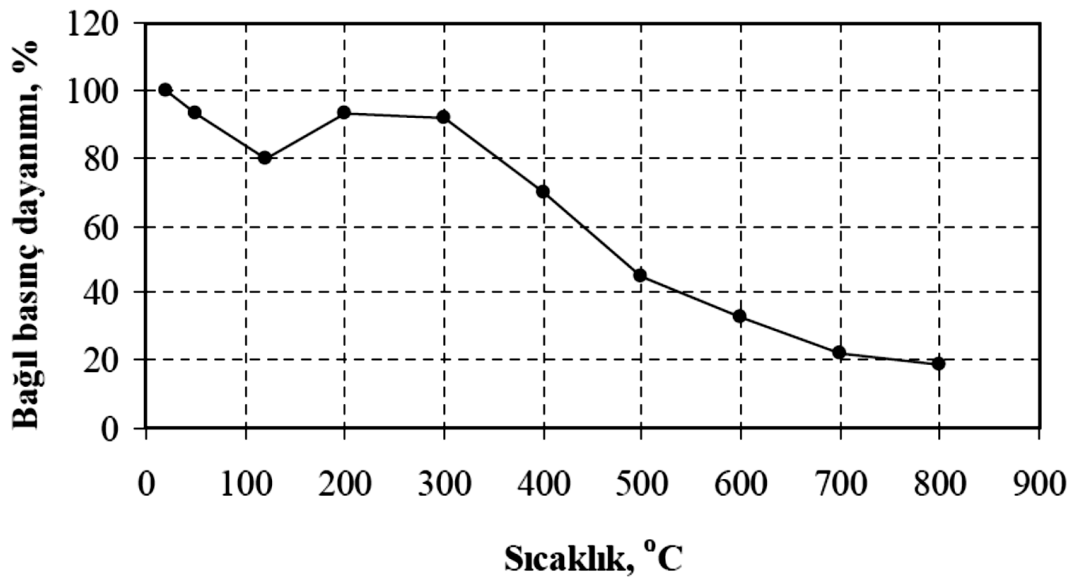
Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımı üzerinde çimento tipi, agrega türü, su/çimento oranı gibi kullanılan malzeme özellikleri ayrıca sıcaklığa maruz

kalınan süre, nem durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi çevresel faktörler etkili olmaktadır (Özbey 2009).

Dayanım kaybı betonun suya doymun olduğu durumda kuru hale kıyasla daha fazladır. Aşırı nemli betonlar yüksek sıcaklık etkisinde kaldığı takdirde betonda dökülmeler görülür.

Normal dayanımlı betonun yüksek sıcaklıkta tek eksenli basınç dayanımı Şekil 2.10'da gösterilmiştir. İlk etapta artan sıcaklıkla birlikte (120°C sıcaklığa kadar) meydana gelen düşüşlerden sonra betonun tek eksenli basınç dayanımı artmıştır. Dayanım 200°C ve üstü sıcaklıklardan sonra tekrar düşmeye başlamıştır. Basınç dayanımı 700°C 'de başlangıç değerine göre %80 dayanımını kaybetmiştir.

Normal betonun basınç dayanımı kür koşullarına bağlı olarak değişmez ancak yüksek sıcaklıklarda beton dayanımındaki düşüşün sebebi olarak aderans bozulması ve Çizelge 2.1'de açıklandığı gibi çimento hamurunda kalsiyum silika hidrat jellerinin yapısının bozulması ve agregadaki ısı genleşme farklılıkları olarak değerlendirilmektedir (Özbey 2009).



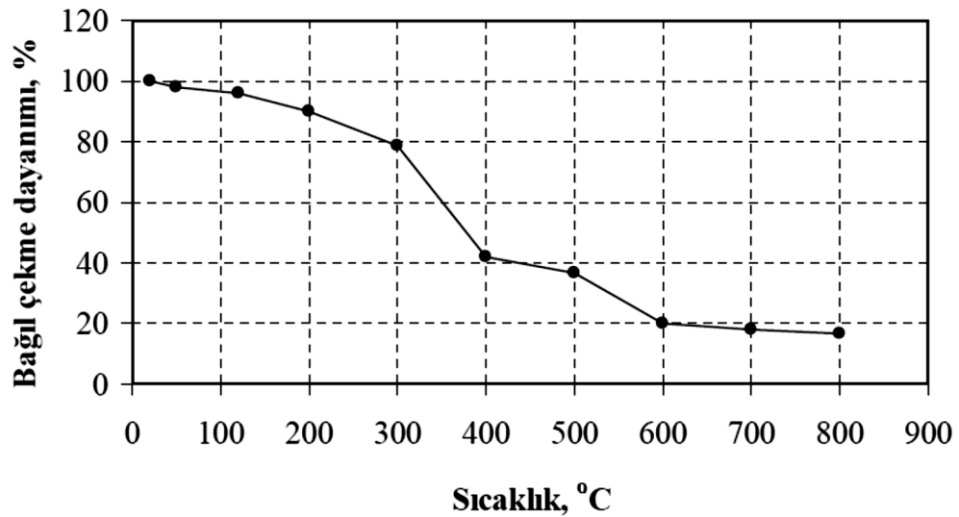
Şekil 2.10. Normal betonda basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisi

Betonda, çimento hamuru ve agregada ortaya çıkan aderans bozulması ve ısı genleşme farklılıkları, beton dayanımının yüksek sıcaklıklarda azalmasına yol açan nedenler arasında kabul edilmektedir.

Çekme dayanımı

Betonun çekme dayanımı, eğilmede çekme ve yarma deneyleri ile araştırılır. Silindirik numunelerde değişik sıcaklık etkisinde iken ve soğutulduktan sonra yapılan yarma deneyi ile elde edilen çekme dayanımlarında 100°C'den itibaren önemli düşüşler olmakla birlikte 600°C'de kayıp %70'e varmaktadır (Şekil 2.11).

Normal betonun çekme dayanımı yükselen sıcaklıkla hızla azalmaktadır. Çimento hamuru ve agregada ortaya çıkan aderans bozulması ve ısı genleşme farklılıkları, betonun çekme dayanımının yüksek sıcaklıklarda azalmasına yol açan nedenler arasında kabul edilmektedir.



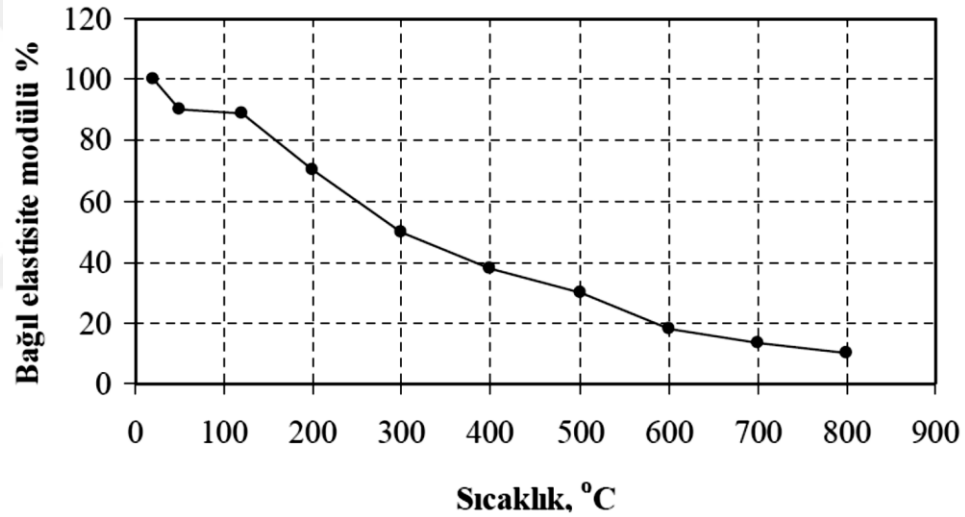
Şekil 2.11. Normal betonda çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisi (Özbey 2009)

Li *et al.* (1993) araştırmalarında çekme dayanımındaki azalmaların basınç dayanımına göre daha fazla olduğunu söylemişlerdir. Çünkü dehidratasyon sonucu çimento hamuru ve agregamur ara yüzeyindeki oluşan çatlaklar çekme dayanımına daha fazla zarar

verir. Li *et al.*'e (1993) göre ele alınan ısıtma yöntemleri, yüksek sıcaklık etkisinden sonraki beton dayanımı daha az etkiler (Özbey 2009).

Elastisite modülü

Normal dayanımlı betonun yüksek sıcaklıklardaki elastisite modülü değerleri Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Elastisite modülünün artan sıcaklığa bağlı olarak azaldığı gözlemlenmiştir. Kür koşullarının veya deney ortam sıcaklığının beton üzerinde bir etkisi yoktur (Özbey 2009).

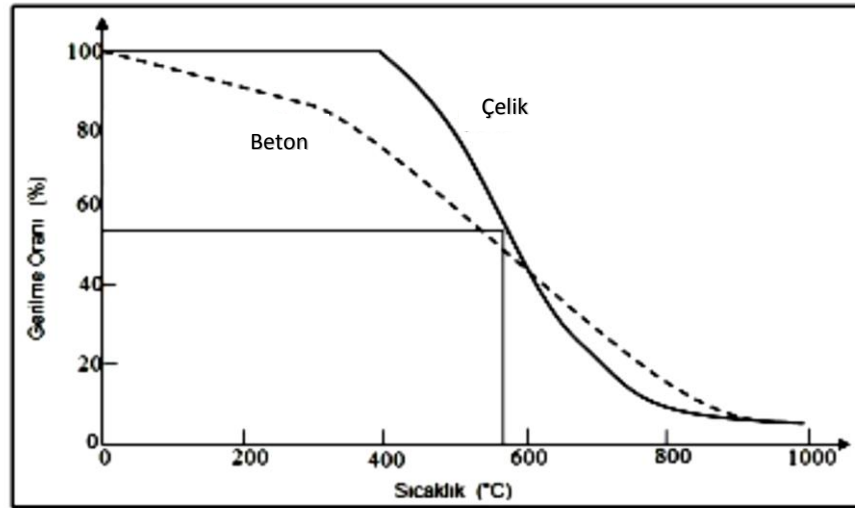


Şekil 2.12. Normal betonda elastisite modülü-sıcaklık ilişkisi (Özbey 2009)

2.1.6. Donatı özellikleri üzerinde yüksek sıcaklığın etkileri

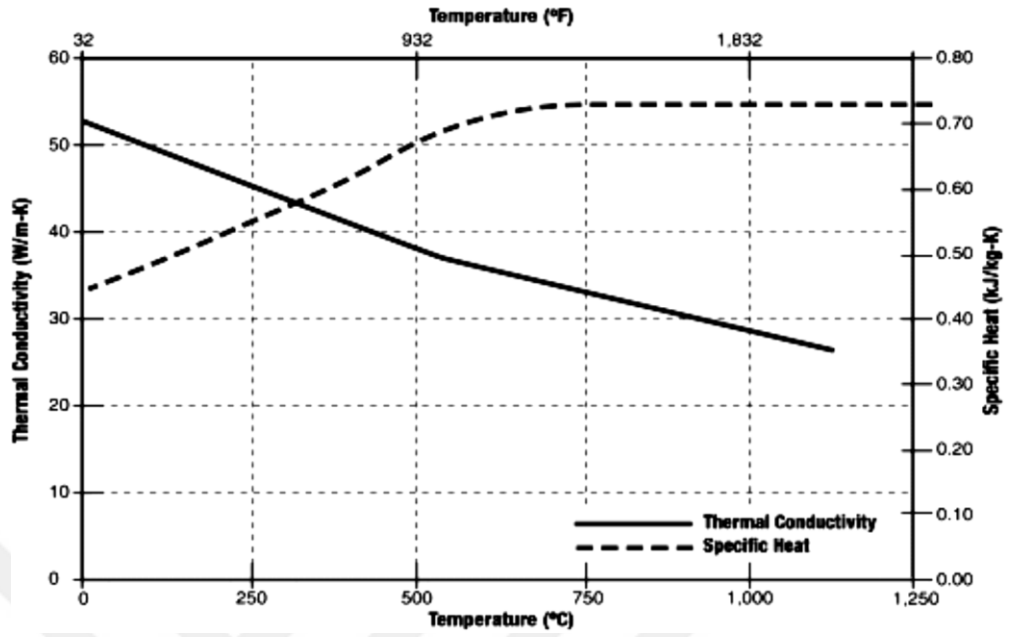
Çelik malzeme sıcaklığın artmasıyla birlikte dayanımını kaybeder. Genellikle çelik eleman üzerindeki statik yükleme, çeliğin akma dayanımının %55'i olacak şekilde tasarlanır. Çeliğin 550°C'deki dayanımı oda sıcaklığındaki akma dayanımının %55'ine eşittir. Bu nedenle yapılar 550°C'ye kadar kararlı kalırlar. Bu sıcaklık kritik sıcaklık olarak bilinir. Statik yükleme azaltılır ise kritik sıcaklık yükselir ve yapılar 550°C'den yüksek sıcaklıklarda kararlı olurlar. Bu sıcaklıklar çeliğin ergime noktasından (1450°C) oldukça düşük olmalı ve çeliğin önemli derecede dayanımını yitirmesi engellenmeli

veya yavaşlatılmalıdır. Şekil 2.13'te görüldüğü gibi yapılan deney sonuçlarına göre çeliğin çekme dayanımı 150-300°C bölgesinde biraz arttıktan sonra daha yüksek sıcaklıklarda hızla düşer ve yangınlarda kolayca ulaşılabilen 600°C'de emniyet gerilmesinin altına düşer. Başlangıçtaki 150-300°C arasında meydana gelen mukavemet artışı, çeliğin yapısındaki gayri saflıkla, azotla alakalıdır. Bu sıcaklıklarda azot kolayca difüzyon yaparak tane sınırlarına yerleşir ve tanelerin içindeki dislokasyonlardan azotun azalması plastik şekil değiştirmeyi artırır ve akma sınırının çok düşmesine sebep olur. Yüksek sıcaklıklarda atomlar arası bağ kuvvetinin azalması, çeliğin elastisite modülünün azalmasına neden olur. Artan sıcaklık ile çelik ve betonda oluşan gerilme oranı kaybı birbirinden farklıdır (Uçarkoşar 2013).

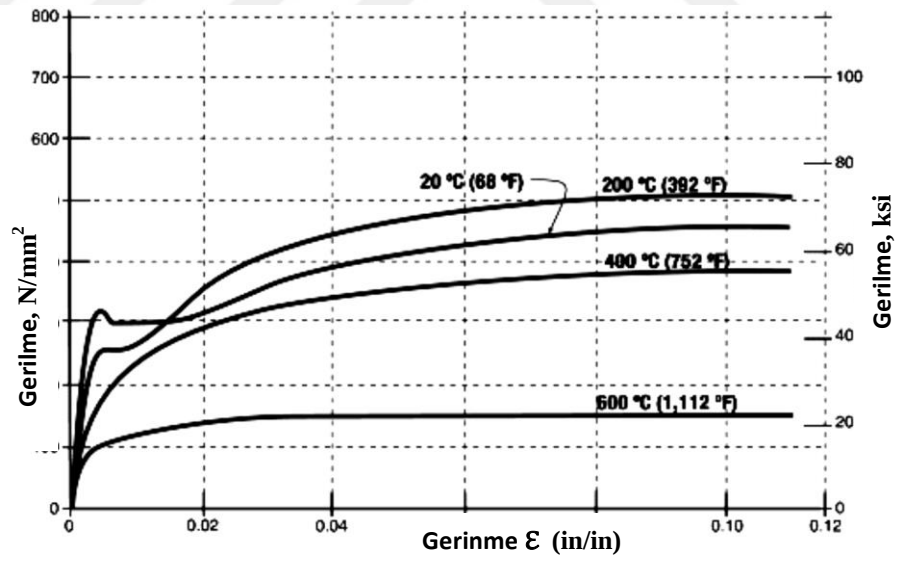


Şekil 2.13. Beton ve çelik için gerilme-sıcaklık ilişkisi (Uçarkoşar 2013)

Sıcaklığın artması ile çeliğin ısı iletim katsayısı düşerken, özgül ısısı artmaktadır (Şekil 2.14). Yüksek sıcaklık etkisi altında çeliğin gerilme-şekil değiştirme davranışı da değişir (Şekil 2.15).



Şekil 2.14. Yüksek sıcaklıkta çeliğin ısısal özellikleri (Uçarkoşar 2013)



Şekil 2.15. Çeliğin farklı sıcaklıklardaki gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Uçarkoşar 2013)

2.1.7. Yüksek sıcaklığın olumsuz etkilerine karşı yapılarda alınması gereken önlemler

Yüksek sıcaklığın olumsuz etkilerine karşı yapılarda alınması gereken önlemler; yapı ve yapı malzemesi açısından olmak üzere 2 kısımda incelenmelidir.

Yapılar açısından öncelikli olarak yangın tehlikesine açık endüstriyel veya askeri yapıların çok iyi şekilde dizayn edilmesi, detayların çözülmesi ve izolasyon önlemlerinin alınması gerekir. Birçok binanın içerisindeki detay ve dekorasyon malzemeleri ile mobilyalar yapının gereğinden çok yanıcılık potansiyeline sahip olduğundan dikkat edilmelidir. Taşıyıcı elemanların, doğrudan yangın etkisinde kalabilecek yüzeyleri en düşük miktarda olmalıdır.

Yangın çıktığı noktadan uzaklara kolaylıkla taşınabileceğinden binalarda özellikle havalandırma ve tesisat kanalları ile asma tavan, çatı içi kaplamalar, bölme duvarları gibi elemanlar yangını sınırlamak gelişimini engellemek konusunda oynadıkları rol açısından daha detaylı bir biçimde ele alınmalıdır.

Yangın kapıları, yangın merdivenleri vd. emniyet önlemleri şartnamelerin öngördüğü şekilde planlanmalıdır. Derzler, bina dilatasyonları, ateşi doğrudan geçirmeyecek ve yapı elemanlarının büyük ısınmalar nedeniyle uzamasına engel olmayacak şekilde düzenlenmelidir. Derzler tüm yapıda ve çatı kaplamasında süreklilik teşkil etmelidir.

Yapı elemanlarının kesit boyutları ne kadar küçük ise zararlı etki o kadar büyüktür. Bundan dolayı büyük boyutlara sahip olan kütle boyutlarının genellikle yangından zarar görmediğini kabul etmek mümkündür.

Günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi beton olduğundan yapı malzemeleri açısından değerlendirme bu malzeme üzerinden yapılacaktır.

Beton bileşenleri açısından; yüksek sıcaklığın olumsuz etkileri Bölüm 2.1.3'de detaylı olarak açıklanmıştı. Bu etkiler altında özellikle son yıllarda popüler olan yüksek performanslı betonlar içyapısındaki sıkılık yangın direncini azaltacağından ve yangın etkisinde normal betona göre daha riskli duruma geleceğinden daha çok dikkat edilmesi gereken beton türüdür (Yüzer vd 2008).

Genellikle silis içermeyen agregalarla, örneğin kalker kökenli, püskürük kökenli agregalarla üretilen betonların yangına karşı davranışı daha iyidir. Özellikle dolomit esaslı agrega kullanmakla yangına dayanıklı betonlar elde edilir. Bunun nedeni karbonatın kalsinasyonunda ısının emilmesinin sıcaklık artışını geciktirmesidir. 1000°C civarındaki sıcaklıklara maruz kalan beton elemanların üretiminde bazalt, yüksek fırın cürufu, limonit, barit, magnetit, ateş tuğlası kırıkları gibi malzemelerin agrega olarak kullanımı uygundur. Çok yüksek sıcaklıklarda ise (1300°C) siliminat (Al_2SiO_3), koronden (Al_2O_3), kromit ($FeCr_2O_4$), refraktar malzeme artıklarının kullanılması önerilir (Uysal 2004; Baradan vd 2010).

Termik iletkenlik katsayısı düşük betonlar, başka bir deyimle hafif betonlar normal betonlara göre yangından daha az zarar görür.

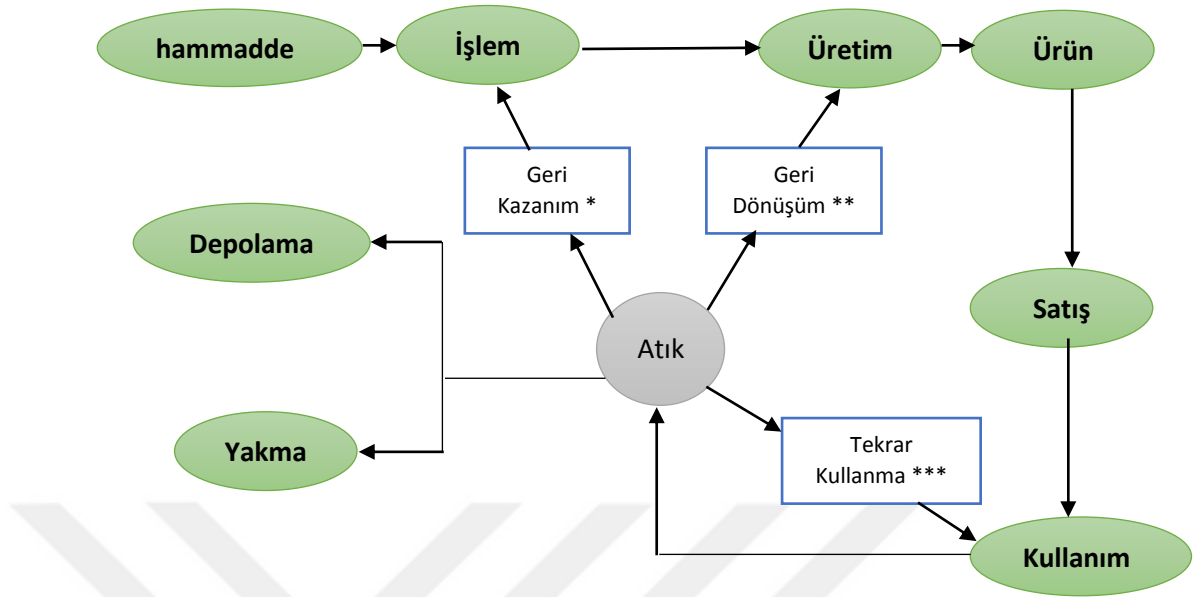
Betonun içerdiği rutubet ve su miktarıda önemlidir. Rutubet içeriğinin fazla olması halinde, suyun genleşme katsayısının daha büyük olmasından dolayı yangına dayanıklılık önemli ölçüde azalır.

Bağlayıcı olarak en iyi sonucu alüminli çimento vermektedir (Uysal 2004; Baradan vd 2010). Ancak alüminli çimentoların asidik karakteri ve yüksek maliyeti nedeniyle betonarme taşıyıcı elemanlarda kullanımı uygun değildir. Araştırma sonuçları uçucu küllü çimentoların normal Portland çimentolarına kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Ayrıca pişmiş toprak tozu gibi puzolanik maddelerin kullanılması hasarın mertebesini azaltmaktadır.

Yangın geçirmiş betonarme bir yapı ayakta kalsa bile beton ve çelik üzerinde yapılacak deneylerle malzeme dayanımlarının tespit edilmesi ve elde edilen sonuçlara göre yapı hakkında karar verilmesi gereklidir (Baradan vd 2010). Yüksek sıcaklıklara maruz kalabilecek yapılarda bu etkiye dayanıklı malzemeler kullanılmalıdır.

2.2. Atık Malzemeler ve Kırmızı Çamur

Çimento dünya ölçeğinde 1970'ten beri hemen hemen her yıl artan ölçüde tüketilmektedir. Özellikle son yıllarda çimentonun hem çevresel açıdan hem enerji tüketimi açısından üretim ve kullanım miktarlarında bazı sınırlandırmalar getirilmesi gerektiği üzerinde durulmaktadır (Sawant vd 2012). Bu çözümün çevresel açıdan ve maliyet açısından birçok faydası bulunmaktadır. Bu amaçla çimento miktarının belli bir oranı kadar mineral katkı maddelerinin kullanımı bir çözüm olmakta ve son yıllarda bu amaçla pek çok çalışma yapılmaktadır (Rathod *et al.* 2014; Rana and Sathe 2015). Üstelik bu maddelerin çoğusu da atık malzeme olmakla beraber Şekil 2.16'de gösterilen çevrimle bir daha kullanılabilirler. Çoğusu atık malzeme olan bu katkıların (silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın curufu,...vb.) içeriğindeki SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 gibi oksitler uzun süreli dayanım artışı da sağladığından yukarıdaki olumlu etkilere ilaveten betonun mekanik özellikleri de geliştirmektedirler.



Şekil 2.16. Atıkların değerlendirilmesi

*Geri Kazanım: Katı atıklar içinde değerlendirilebilir olanların, ayrı toplanması, cinslerine göre ayrılması, fiziksel ve/veya kimyasal ve/veya biyolojik işlemlerle ikincil hammaddeye veya tarım girdisine dönüştürülmesi ve enerji elde edilmesi için yakılması şeklindeki faaliyetlerinin tümü (Organik atıklardan biyogaz üretimi, biyogazın enerjiye çevrilmesi).

**Geri Dönüşüm: Çeşitli fiziksel ve/veya kimyasal işlemlerle ikincil hammaddeye dönüştürülerek, tekrar üretim sürecine dahil edilmesi (Kullanılmış beyaz kağıtlardan gazete kağıdı).

***Tekrar Kullanım : Toplama ve temizleme dışında hiçbir işleme tabi tutulmadan aynı şekliyle ekonomik ömrü doluncaya kadar defalarca kullanım (cam şişeler) (Anonymous 2014).

Bu atık malzemelerden birisi de alüminyum üretim sürecinde açığa çıkan Al_2O_3 açısından zengin kırmızı çamurdur. Alümin içeriği yüksek olmasından dolayı yüksek sıcaklıklara karşı daha dirençli olan bu malzemenin detaylı olarak incelenmesi gerekir.

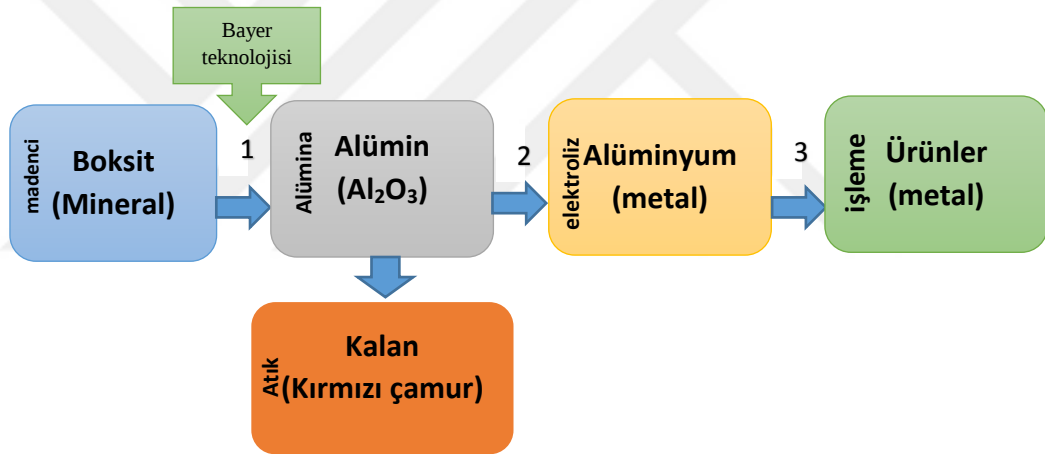
2.2.1. Kırmızı çamur

Kırmızı çamur alüminyum üretimi sonucu çıkan bir atık malzeme olduğundan öncelikle alüminyum üretimini açıklamak gerekmektedir.

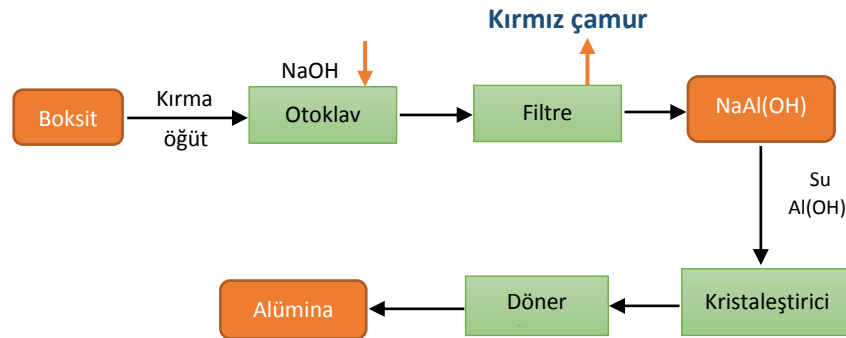
Alüminyum; hafif, yüksek mukavemetli ve geri dönüştürülebilir yapısal bir metaldir. Ulaşım, gıda ve içecek paketlemede, altyapıda, inşaat ve yapıda, elektrik ve elektronikte uzay ve savunmada kullanılan dünyada en çok bulunan üçüncü elementtir.

Ticari olarak madenden çıkarılan alüminyum cevheri boksittir. Boksit; silika, demir oksit ve alüminin en yüksek orandaki içeriğine sahiptir (Rathod *et al.* 2014).

Alüminyum üretim süreci Şekil 2.17'de gösterildiği gibi üç aşamadan oluşur: Boksit mineralinden alümin oluşması (Bayer süreci), alüminden alüminyumun oluşturulması, alüminyumdan ürünlerin oluşturulmasıdır. Şekil 2.18'de detayları verilen Bayer sürecinde, oluşturulan çözilemeyen ürün kırmızı çamur ya da boksit kalıntısı olarak bilinir. Atık ürün demir oksit içeriğinden dolayı kırmızı renktedir ve kırmızı çamur ismini alır. Kırmızı çamur 10.5-12.5 aralığında Ph'a sahip ve yakıcıdır. Boksit çevreye zararlı bir malzemedir (Rathod *et al.* 2014).



Şekil 2.17. Alüminyum üretiminin şeması



Şekil 2.18. Bayer teknolojisi

Üretilen her 1 ton alüminden 0.8~1.76 ton kırmızı çamur meydana gelmektedir. Dünya çapındaki alümin endüstrisi yıllık 70 milyon ton üzerinde boksit kalıntısı üretir. Boksit cevherinin yaklaşık %40'ı kırmızı çamur atığı olarak açığa çıkmaktadır (Levent 2012; Sureshkumar *et al.* 2014). Bayer sürecinde çevresel açıdan en büyük sıkıntı kırmızı çamurdur ve batı ülkelerinde istenmeyen bu zararlı madde miktarı her yıl yaklaşık 35 milyon ton civarındadır (Bishetti and Pammar 2014).

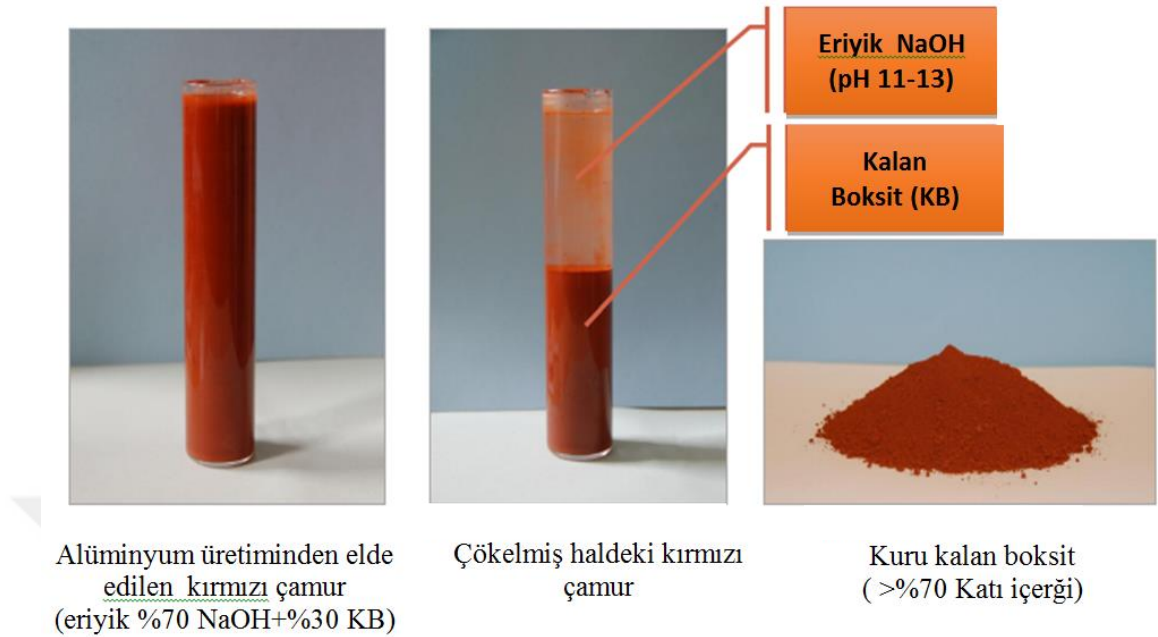
2.2.2. Kırmızı çamur özellikleri ve bileşenleri

Alümin işleme tesislerinden çıkan ve büyük bir çevre kirliliği riskine yol açan bir madde olan kırmızı çamurun genel görüntüsü Şekil 2.19'daki gibidir (Liu *et al.* 2009). Kırmızı çamur, kırmızı-kahverengi renginde ve çok ince tane boyut dağılımına sahiptir.

Kırmızı çamurun mineralojik analizi, boksit kaynağına ve üretim prosesine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Çamur, boksit kaynağından gelen (anataz, böhmit, kalsit, gibsit, götit, hematit, kalsiyum ferrit ve kaolin) ve proste üretilen bileşiklerden oluşmaktadır. İçeriğindeki ana bileşenler: Fe_2O_3 , Al_2O_3 , SiO_2 , TiO_2 ve Na_2O 'dur (Cablık 2007; Levent 2012; Bishetti *et al.* 2014). Kuru atık halinde olan kırmızı çamurun oluşum prosesi Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.19. Kırmızı çamur



Şekil 2.20. Kırmızı amur oluşum prosesi

2.2.3. Kırmızı amurun çevreye etkisi ve bertaraf yöntemleri

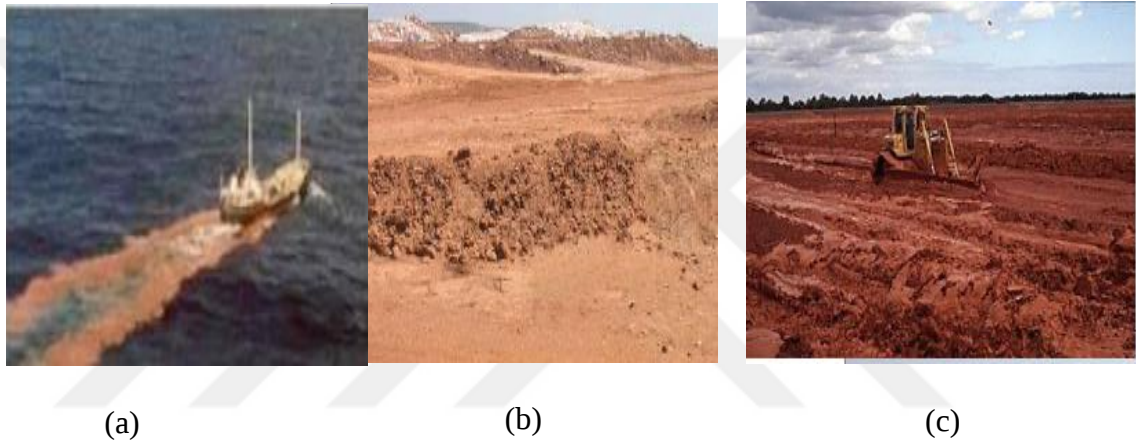
Alümina üretim fabrikaları kırmızı çamuru baraj olarak isimlendiren göl tipi alanlarda depolamakta, depolama metotları fabrikadan fabrikaya değişmekte ve bu depolama insan sağlığına ve çevreye zarar vermektedir. Kırmızı amur, kolloidal yapısı nedeni ile bol miktarda su içermektedir. Bu haliyle barajlarda depolanan atık, rüzgârın ve çeşitli doğa olaylarının etkisiyle, çevreye taşınmaktadır. İçerdiği bleşenler, alkaliler ve mikron boyutlu taneler (1µm–2mm) nedeniyle, evre sağlığı konusunda endişe uyandırmaktadır (Akıncı 2004).

Genel itibari ile bu maddenin dezavantajlarını sıralayacak olursak;

- Kırmızı amurun yüzey suyuyla karıştırıldığında suyun alkali değerini yükseltmesi,
- Kuyular, akifer gibi yer altı su kaynaklarına alkalileri sızdırması,
- İçeriğindeki alkalilerin havayla uçması ile zararlı etkiler oluşturmaması,

- Toprak kalitesini değiştirebilmesi, verimsiz topraklar oluşturması sayılabilir (Kumthekar *et al.* 2012; Rathod *et al.* 2014; Bishetti *et al.* 2014; Rana 2015; Rathod *et al.* 2015).

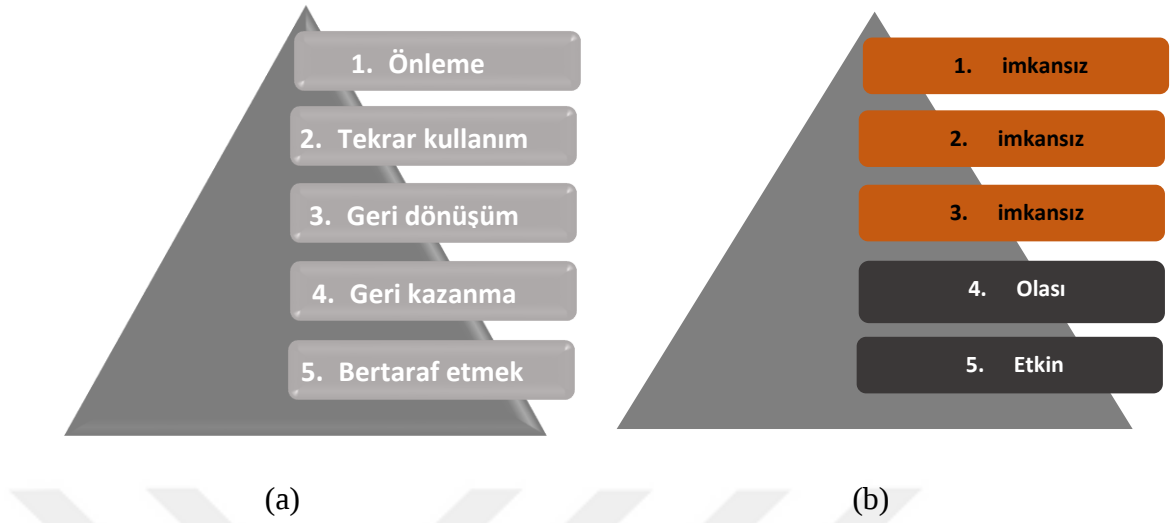
Bu denli zararlı etkileri olan kırmızı çamuru bertaraf etme yöntemleri arasında, deniz suyuna boşaltma, kuru halde yığma ve depolama tarzı yöntemler kullanılmakta fakat hepsi de başka tür sıkıntıları beraberinde getirmektedir.



şekil 2.21. Kırmızı amur bertaraf yöntemleri

a) deniz suyuna boşaltım b) depolama c) kuru yığma yöntemleri (Szepevlgyi 2010)

Atığın tüm bu olumsuz etkileri giderebilmek ve değerlendirebilmek amacı ile şekil 2.22.a'da genel atık yönetim sistemleri ve şekil 2.22.b'de kırmızı çamur yönetim sistemleri verilmiştir. Görüleceği üzere kırmızı çamur üretimini nleme, tekrar kullanım, geri dönüşüm ve imkansız olmakla birlikte geri kazanma ve bertaraf etmek yolları mevcuttur.



Şekil 2.22. (a) Atık yönetim seçenekleri, (b) Kırmızı çamur yönetim seçenekleri

2.2.4. Kırmızı çamur atığının dünya genelinde kullanım alanları

İnsan sağlığına ve çevreye zarar veren kırmızı çamur genel olarak inşaat ve yapı sektöründe, kimya sektöründe, renkli camların üretiminde, puzolanik pigment üretiminde, içme ve kullanma suyu arıtımında flokülant olarak, toprakların ıslahında ve madenlerin zenginleştirilmesinde kullanılmaktadır (Cablık 2007; Levent 2012; Bishetti *et al.* 2014).

- İnşaat ve Yapı Sektöründe;
 - Çimento üretimi, tuğla, kiremit ve seramik malzemesi yapımında,
 - Bina yapımı, kaldırım taşları ve yol sathı yapımında,
- Kimya Sektöründe;
 - Sıcak gazlardan H_2S absorplanmasında,
 - Kauçuk ve plastik endüstrisinde dolgu malzemesi olarak kullanılmasında
- Renkli camların üretiminde, puzolanik pigment üretiminde,
- İçme ve kullanma suyu arıtımında flokülant olarak,
- Toprakların ıslahında ve madenlerin zenginleştirilmesinde,

Kırmızı çamur uygulama ve kullanım için uygun olmayan atık içerisindeki karışık madde olarak sınıflandırılır. Çoğu çalışma bu atığın kullanımı, sabitleştirilmesi ya da eski atık alanlarının yeniden elden geçirilmesi üzerine yapılmıştır (Cablık 2007).

Kırmızı Çamur Atığının Türkiye’de Kullanım Alanları

Türkiye’de genellikle kırmızı çamur, seramik ve tuğla üretiminde kullanılmaktadır. Kırmızı çamurun farklı alanlarda da kullanılması için çeşitli çalışmalar yapılmış, birtakım metotlar geliştirilmiş, ancak bu metotlar hayata geçirilememiştir.

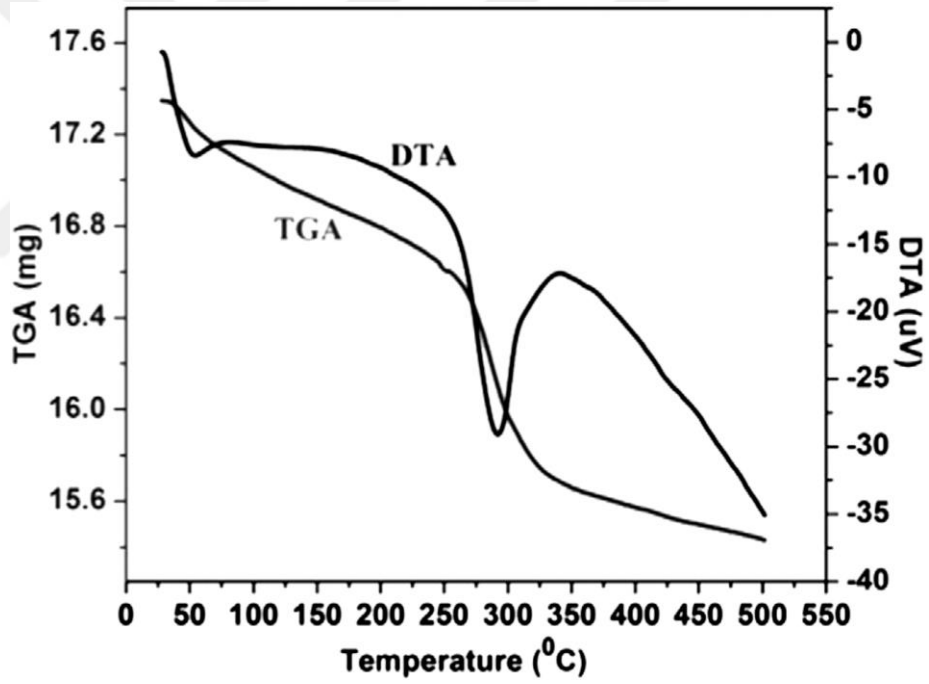
Endüstriyel atıklarla betondaki doğal ham maddelerin yerini değiştirme, bugünün atık yönetim problemlerini azaltmaya fırsat vermekte ve çok büyük bir fayda sunmaktır. Ekonomik ve çevresel açıdan uygulanabilir bir alternatif arayışı yapı endüstrisinde çeşitli uygulamalar için kırmızı çamur kullanımına yönlendirmektedir (Ashok and Sureshkumar 2014).

2.2.5. Kırmızı Çamurun Yüksek Sıcaklık Altında Davranışı

İçeriğindeki Al_2O_3 'den dolayı beton içerisinde özellikle yüksek sıcaklık sonrası etkinin belirlenmesi için salt kırmızı çamurun da bu etki altındaki davranışının belirlenmesi gereklidir. Nath *et al.* 2015’e göre kırmızı çamur termal analiz yöntemleri kullanılarak incelendiğinde Şekil 2.23’deki TGA–DTA diyagramlarından hareketle sıcaklık karşısında bozularak üç aşamada ağırlık kaybettiği gözlenmektedir. Sıcaklığın kırmızı çamur üzerindeki bu etkisinin nedenleri sıcaklıklara bağlı olarak Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Kırmızı çamur üzerinde sıcaklığın etkisi (Nath *et al.* 2015)

Sıcaklık	Kırmızı çamur üzerinde etkisi
25–260°C	Suyun buharlaşması sebebiyle ağırlık kaybı toplam ağırlığının yaklaşık %4.3'ü.
260–325°C	Numunenin bütünündeki H ₂ O kaybı ve Al(OH) ₃ den H ₂ O çıkarılmasından dolayı ağırlık kaybı toplam ağırlığının yaklaşık %8.9'ü.
325–500°C	Toplam ağırlığın %10.9'luk ağırlık kaybı CaCO ₃ 'ün çözünmesi esnasında CO ₂ 'nin salınmasına bağlı olarak gerçekleşebilir.

**Şekil 2.23.** 28°C ila 500°C sıcaklık aralığında KÇ'nin ağırlık kaybını gösteren TGA-DTA diyagramı (Nath *et al.* 2015)

2.3. Nanoteknoloji ve Nano Tozlar

Nano, Yunanca kökenli "küçük, cüce" manasına gelen bir kelime olup 10^{-9} m'yi temsil eder. Nano ölçeği daha iyi anlamak için verilecek en iyi örneklerden birisi insan saçının kalınlığının yaklaşık 80 bin nanometre olması veya bir bilya ile dünya çapı arasındaki oranın bir nanometre ile bir metre ile aynı olmasıdır. Nano ölçekteki maddelere “nanomalzeme” veya “nanopartikül” ve bu malzemeler ile uğraşan teknolojiye de "nanoteknoloji" denilmektedir (Birgisson 2012).

Nanoteknoloji, nano ölçekteki maddelerin anlaşılmasını ve kontrol edilmesini inceleyen ve bu kapsamda ürün özelliklerinin gelişmesini amaçlayan bir bilim alanı olarak ifade edilebilir (Birgisson 2012). N. Taniguchinin 1974'deki bir yayınından ismini alan nanoteknoloji, ilk defa 1959 yılında, Richard Feynmanın atomların yer değiştirilmesi suretiyle yeni cihazların tasarımının mümkün olabileceği öngörüsüyle başlamıştır. 1980'lerde Taramalı Tünelleme Mikroskobu (TTM) veya Atomik Kuvvet Mikroskobu (AKM) gibi ileri teknoloji ürünü mikroskopların geliştirilmesi ile başlangıç öngörüsü gerçekleşmiş olup, 1990'larda Karbon Nanotüplerin bulunması ile bu teknolojinin gelişimi sağlanmış, 2000'lerde ise bu alandaki yarış ülkeler arası boyut kazanmıştır (Mert 2006; Oltulu 2011)

Geniş kullanım alanı olan nanoteknolojinin başlıca kullanıldığı alanlar ile kullanılması düşünülen alanlar aşağıda gruplandırılmıştır: (Oltulu 2011).

1-Malzeme alanında: Malzeme özellikleri kendisini oluşturan atom ve moleküllerin yapılarına ve bir araya nasıl geldiğine bağlı olarak değişmektedir. Bir malzeme nano ölçeğe yaklaştıkça elektriksel iletimi, optik absorpsiyonu, kimyasal reaktivitesi ve mekanik özellikleri değişmekte yeni özellikler bile ortaya çıkabilmektedir (Şahin 2006). Bu amaçla bu teknoloji; Nanolitografi'de, karbon lif ve karbon nanotüp üretiminde, akıllı malzeme üretimi ve kontrolünde, kendiliğinden temizlenen boyalar, korozyona ve aşınmaya dirençli malzemeler ve camlar için buğulanmayı önleyici kaplamalarda (Süzer 2006), termal izolasyon sağlayan kaplama yapımında, küçük gerilmelere bile duyarlı

nanoelektromekanik (NEMS) rezonatörlerin üretiminde, yeni nano mühendislik polimerleri ve yüksek dayanımlı liflerin üretimi ile dayanımı ve işlenebilirliği artıran nano partiküllerde (Sobolev and Gutiérrez 2006) kullanılabilir.

2-Tıp ve sağlık alanında: Mikro-nano cerrahi (özellikle göz ve beyin cerrahisinde), hücre, doku ve moleküllerde hasar belirlenmesi/onarımında, mikroorganizmaların taşınması ve DNA-modifikasyonunda, gelecekte, insan pili (veya aküsü) olarak işlev görebilecek kandan elektrik üreten cihaz yapımında ya da şekerle beslenen robotlar vücuda yerleştirilerek biyo-nano jeneratörlerin geliştirilmesinde (Anonymous 2011),

3-Tekstil alanında: Lotus yaprağının kendini temizleme ve kuru kalma özelliğinden yola çıkılarak su tutmayan, kirlenmeyen, hızlı kuruyan, yanmayan, hatta kurşun geçirmeyen kumaşların ve akıllı elbiselerin üretiminde (Bayındır 2005),

4-Elektronikte: Nano kütüphaneler ve veri depolamada (Yetgin 2006), elektronik devrelerin, chip (yonga) ve CD üretiminde, nanofotonik teknolojilerin kullanıma girmesiyle bilgisayarların hızlandırılması ve DVD'lerin bilgi saklama kapasitesinin artırılmasında (Özbay 2005; Hullman 2006),

5- Diğer endüstriyel alanlarda: Mikro sensör, mikro makineler ve mikro pompa yapımı, nano boyutlu kaplamalar ile sürtünmesiz yüzeylerin oluşturulması, nano boyutlu elemanlar arası bağlantılarda (Yetgin 2006; Hullman 2006) kullanılmaktadır.

Malzeme boyutu değiştikçe o malzeme ile ilgilenen bilim ve teknolojide değişmekte ve bu değişim Çizelge 2.3'de gösterilmektedir. Nano düzeyde, yer çekimi önemsizleşir, elektrostatik güçler yönetime girer ve kuantum etkileri oluşur. Bunun da ötesinde, partiküller nano boyutlandırılmış olduğu için yüzeydeki atomların oranı içerdekilerine nispeten artar ve bu da yeni niteliklere yol açar. Maddeler nano ölçekte genel özelliklerinden farklı özellikler taşıyabilir. Bu duruma örnek olarak manyetik özellik, yalıtım özelliği, iletkenlik, kimyasal reaktivlik, optik özellik vb. verilebilir (Özbora 2014).

Çizelge 2.3. Malzeme boyutu-bilim alanı

Birim (metre)	İlgili bilim ve teknoloji
10^{-12}	Kuantum mekaniği
10^{-9}	Moleküler Dinamik, nanomekanik, Moleküler Biyoloji, Biyofizik
10^{-6}	Elastisite, Plastisite, Dislokasyon
10^{-3}	Malzeme mekaniği
10^{-0}	Yapısal Analizi

Literatürde “mühendislik nano parçacıkları” olarak sınıflandırılan nanotozlar Çizelge 2.4’de verilmiştir. Çimento esaslı kompozitlerde nanoteknoloji ürünlerinin kullanımına ise 2000 yılların başından itibaren başlanmıştır. Aşağıda ise, nano tozlar özelinde, nanoteknolojik ürünler ile çimento ve çimento kompozitleri arasındaki ilişki ile ilgili olarak kısa bir değerlendirme yapılmıştır (Oltulu 2011).

Çizelge 2.4. Toz çeşitleri

Oksitli nano tozlar	Karbonlu nano tozlar	Diğer nano tozlar
Titanyum dioksit	Tek duvarlı karbon nano tüp	Gümüş
Silisyum dioksit	Çok duvarlı karbon nano tüp	Silikon karbit
Çinko oksit	Fulleren	Kuantum noktaları
Alüminyum oksit	Grafit lif	AlZrFeO
Demir oksit	Karbon siyahı	AlZrFeO+CNT
Disporsiyum oksit		
Seryum oksit		
Zirkonyum oksit		

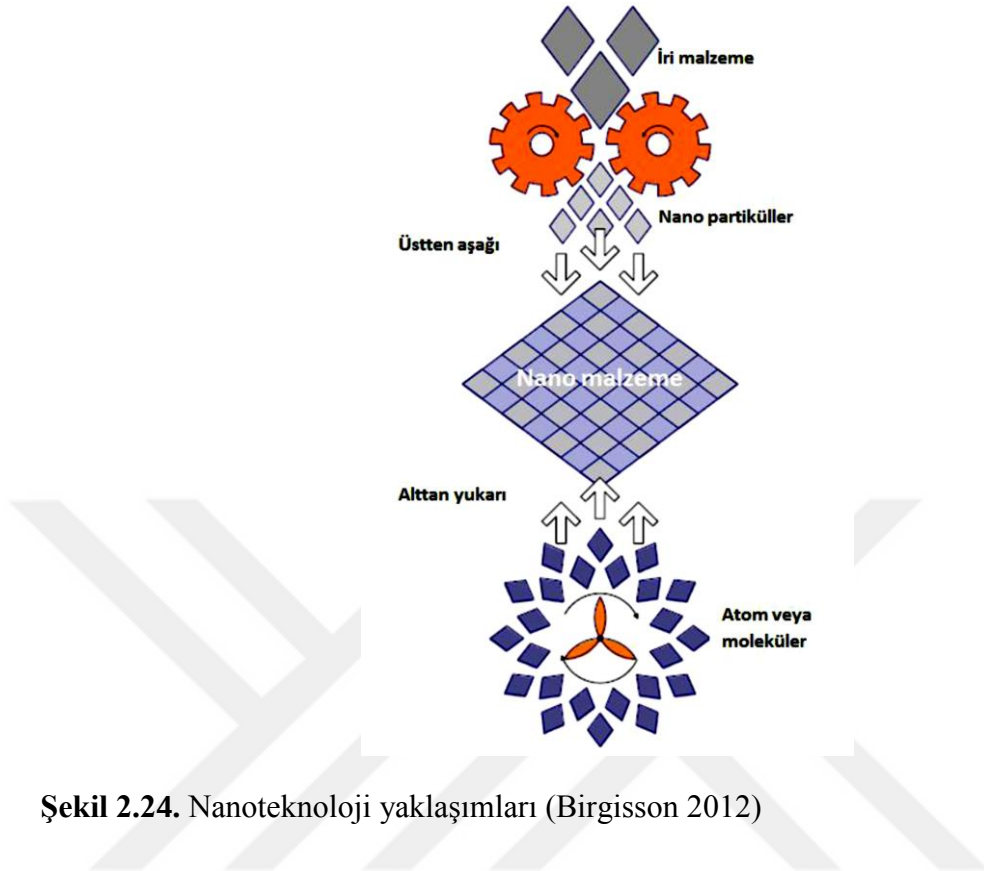
2.3.1. Nano teknolojide toz üretimi

Nanoteknolojide toz üretimi için iki tür yaklaşım vardır Şekil 2.24’de görüldüğü gibi. Bunlar, bottom-up (aşağıdan yukarı) ve top down (yukarıdan aşağı) tasarımıdır. Bazı durumlarda da her iki yöntem birlikte (hibrid üretim) uygulanır. Aşağıdan yukarıya

doğru olan tasarım, atomla atom veya molekülle molekülün birleştirilerek organik ya da inorganik yapıların oluşturulmasıdır. Bu yaklaşımla parçacıkların boyutları ve şekilleri üretim koşullarıyla kontrol edilebilir. Parçacığın içerisindeki atomlar düzgün yerleştiklerinden bu parçacıklar nanokristal olarak düşünülebilir. Yukarıdan aşağıya doğru olan tasarım ise katı bir maddenin aşındırma veya oyma gibi mekanik etkilerle bölünerek oluşturulması esasına dayanır (Sobolev *et al.* 2006).

Yukarıdan aşağıya üretim yöntemi oldukça çeşitlidir. Bunlar; mekanik, yüksek enerji, ısı (termik), kimyasal, litografik (baskı) ve doğal yöntemlere ayrılır. Genel olarak fiziksel üretim yöntemleri yukarıdan aşağıya üretim grubuna girer. Aşağıdan yukarıya üretim ise maddenin içinde bulunduğu faz haline göre sınıflandırılır. Bunlar gaz fazı yöntemi, sıvı fazı yöntemi ve katı fazı yöntemleridir. Her iki yöntemin de alt uygulamaları vardır (Oltulu 2011).

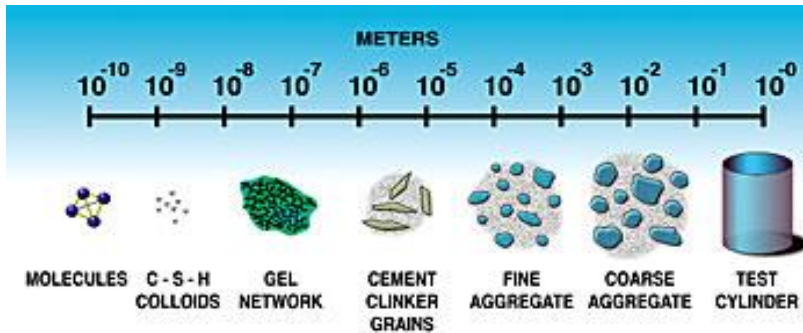
Nanoskala partikülleri doğada ya da bilimde yeni bir olay değildir. Nanoskaladaki test malzemelerini karakterize edip test etme için görüntüleme ve ölçümleme sistemlerindeki son gelişmeler polimerler, plastikler, elektronik, araba üretimi ve tıp gibi alanlarda nanoteknoloji tabanlı malzemelerde patlamaya sebep olmuştur (Birgisson *et al.* 2012).



Şekil 2.24. Nanoteknoloji yaklaşımları (Birgisson 2012)

2.3.2. Beton ve nanoteknoloji

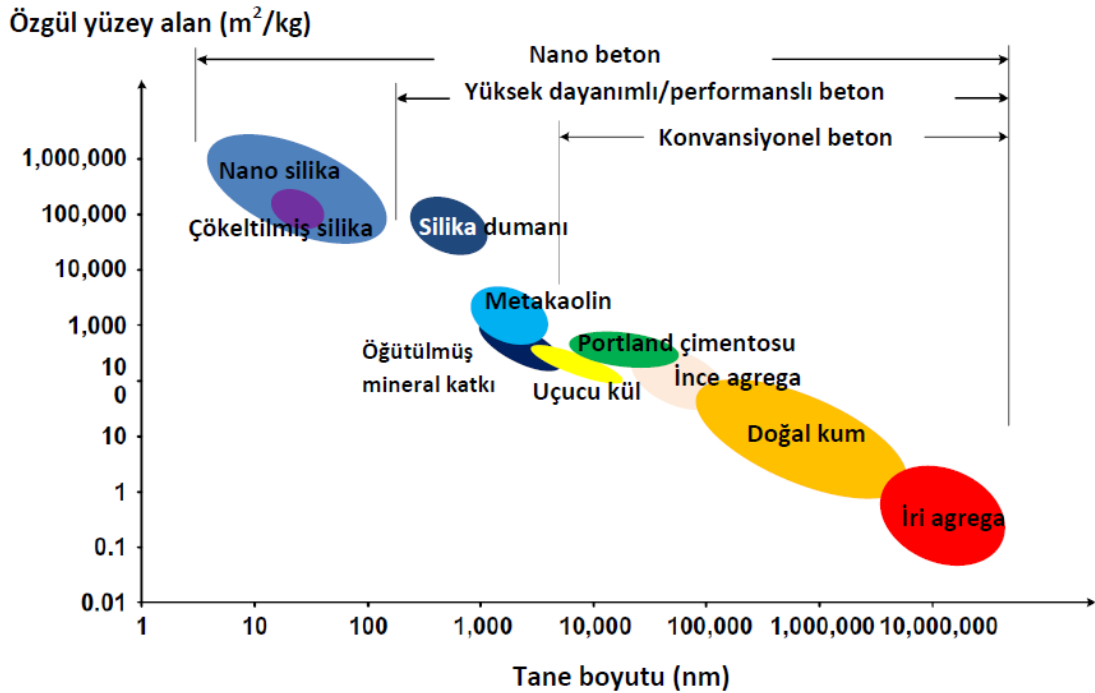
Betonun nanoteknolojiden faydalandığı iddia edilebilir çünkü içerik olarak nano-su partikülleri, nano-hava boşlukları ve nano partikülleri içerir. Beton bileşenlerinin boyutları Şekil 2.25’te gösterilmiştir. Nano boyutlu gözenekleri, bileşenleri ve kalsiyum silikat hidrate ürünlerinden dolayı beton bir nanoteknoloji ürünü olabilir.



Şekil 2.25. Beton bileşenlerinin boyutları

Günümüzde betondaki nanoteknoloji araştırmaları: çimento hidrasyonunun karakterizasyonu, betona nano-boyutlu parçacıklar eklenmesi, betonu korumak için uygulanan nano partikülleri ve kaplamaları (nano boyut partikülleri içeren) ile nano çimento çalışmalarını içerir (Balaguru *et al.* 2006).

Şekil 2.26’da beton bileşenlerinin tane boyutları ve özgül yüzey alanları görülmektedir. Şekil 2.26’dan konvansiyonel betonun nanopartikül içermediği sonucu çıksa da hidrasyon ürünü olan C-S-H jelleri, jel boşluklarındaki su ve kimyasal katkıları aslında nano ölçekteki maddelerdir (Balaguru 2006).



Şekil 2.26. Beton bileşenlerinin tane boyutu ve özgül yüzey alanı (Oltulu 2011)

2.4. Yapılan Çalışmalar

Sancak vd (2008) tarafından yapılan bir çalışmada yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcıların hafif betonun basınç dayanımı ve ağırlık kaybı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yüksek oranda silis dumanı içeren

betonların, genel olarak daha fazla ağırlık kaybı ve daha az dayanımları olduğu görülmüştür.

Madhavi *et al.* (2016) tarafından yapılan bir çalışmada ise 60, 75, 100, 200, 400 ve 600°C gibi yüksek sıcaklıkların, kısmen değiştirilmiş olan ince agreganın 4, 8, 12, 72 saatlik çeşitli sürelerde bekletilmesi sonucunda beton dayanımı üzerindeki etkisini incelemiştir. Beton 12 saat boyunca 400°C'lik sıcaklığa maruz kaldığında betonun basınç dayanımında en yüksek azalmanın yaklaşık %44 olduğu görülmüştür.

Tekdemir (2007) yaptığı çalışmada çelik lifleri betona ekleyerek beton numunelerde sıcaklığın etkisini belirlemek amacıyla 50, 100, 150, 200, 400, 600 ve 800°C'lik sıcaklık değerleri uygulamıştır. Deneylerde numuneleri 6 saat boyunca termal etkiye maruz bırakmış, numunelerin basınç ve çekme dayanımını incelemiştir. 600°C ile 800°C gibi yüksek sıcaklıklarda betonların basınç dayanımında önemli bir artış görülmüştür.

Fındık (2007) tarafından yapılan bir çalışmada ise yüksek sıcaklık etkisinde kalan mineral katkılı ve genleştirilmiş perlit agregalı harçların bazı özelliklerini belirlemek amacı ile numuneler 300, 500, ve 800°C maksimum sıcaklıklarda iki saat bekletilmiş ve dayanımı incelenmiştir. Numunelerin 500 ve 800°C sıcaklıklarda basınç ve eğilme dayanımlarında önemli azalmalar olmuştur.

Horszczaruk *et al.* (2015) tarafından yapılan bir çalışmada ise beton karışımında manyetit agregası kullanımına bakılmış, betonun sıcaklık 450°C sıcaklığa maruz kaldığında mekanik özelliklerinin önemli ölçüde değiştiği görülmüştür. Manyetit içeren betonların daha yüksek sıcaklıklarda mukavemeti azalmış olsa da, performansları normal agrega içeren betonlara göre daha yüksektir.

Akol (2010) tarafından yapılan bir çalışmada ise sıcaklık artışı ile vermikülit içeren hafif betonların basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Buna karşın basınç dayanımındaki azalma vermikülit miktarı yüksek olan betonlarda daha az elde edilmiştir.

Benzer davranış yarmada çekme dayanımı içinde elde edilmiştir. Buna karşılık 900°C’de sıcaklık etkisinde basınç ve yarma dayanımlarında bir toparlanma gözlenmiştir.

Karanfil (2007) tarafından yapılan bir çalışmada ise pas payının sıcaklığın olumsuz etkilerine karşı korunmasında büyük etkisi olduğunu göstermiş ve kullanılan pişmiş kilin yüksek sıcaklıkta donatının mekanik özelliklerinin korunmasında önemli bir fark yaratmadığı belirlenmiştir. Yüksek sıcaklıklarda donatıyı koruyan pas payı harcının hasar görmesine rağmen, numune içerisindeki donatıyı korumaya devam ettiği görülmüştür.

Uçarkoşar (2013), tarafından yapılan çalışmada pirinç kabuğu külü kullanılmış bununla beraber kimyasal yapısı gereği adsorbanlık özelliğine de sahip olan bu malzemenin yangın sırasında zararlı gazları adsorbe edebileceği tahmin edilmektedir.

Mahsanlar (2006), tarafından yapılan bir çalışmada ise yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun basınç dayanımında meydana gelen değişim ile, rengin tür bileşeninde meydana gelen değişimin paralellik gösterdiği tespit edilmiştir.

Kaya (2014), tarafından yapılan bir çalışmada ise polimerle iyileştirilme harcın basınç dayanımını azaltırken eğilme dayanımı ve yüksek sıcaklık direncini olumlu yönde etkilemiştir.

Ashok *et al.* (2014), çimentonun %15’ini kırmızı çamurla değiştirerek kırmızı çamurun optimum kullanım oranını göstermiştir.

Rana and Sathe (2015) tarafından yapılan bir çalışmada ise betona %20 silis dumanı ile %10 oranında kırmızı çamur ilave edildiği zaman betonun içerisindeki çimentonun maliyetinin %6,43 oranında düştüğünü ve bunun daha ekonomik olduğunu belirtmiştir.

Rathod *et al.* (2015), tarafından yapılan bir çalışmada ise çimentonun %10'unu kırmızı çamurla değiştirerek kırmızı çamurun optimum kullanım oranını göstermiştir.

Metilda *et al.* (2015), tarafından yapılan bir çalışmada ise betonun içerisine %15 oranına kadar kırmızı çamur eklendiğinde, betonun basınç dayanımında herhangi bir düşüşün gözlenmediğini belirtmiştir.

Sawant *et al.* (2012) tarafından yapılan bir çalışmada ise kırmızı çamurun betonda optimum kullanımı çimentonun %15'i olarak bulunmuştur.

Ribeiro *et al.* (2010); Bishetti and Pammar (2014), çimentonun kırmızı çamurla %20'ye kadar kısmen değiştirilmesinin mümkün olabileceğini belirtmiştir.

Li *et al.* (2006) matrisin içerisine nano- Al_2O_3 ilave ederek, harçların elastisite modüllerini ve basınç dayanımı arttırdığını görmüşlerdir.

Oltulu (2011), betona %1.25 oranında nano- Al_2O_3 tozunun eklenmesinin, harçların basınç dayanımını diğer oranlardan (0.5, 1.25, 2.5) daha fazla arttırdığını saptamıştır. Nano tozların türü, miktarı ve harç üretim yönteminin çimento harçlarının taze ve sertleşmiş özelliklerini önemli ölçüde etkiledikleri belirlenmiştir.

Campillo *et al.* (2007) betonun içerisine nano- Al_2O_3 ilavesinin basınç dayanımı arttırdığını belirtmiştir .

Farzadnia *et al* (2013)'a göre betonun içerisine %1 oranında nano alüminin ilave edilmesi harçların basınç dayanımını %16'ya kadar artırır. Ancak %2'den fazla nano alümin, harçların basınç dayanımını orijinal dayanımına geri düşürmektedir.

Behfarnia *et al.* (2013) betonun basınç dayanımının, %1 oranında çimento yerine nano- Al_2O_3 partikülleri ile %4.03'e kadar artırıldığını ve nano- Al_2O_3 'nın içeriği %1'den %3'e

çıkarıldığında ise basınç dayanımının %4.03'den %8.00'e kadar yükseldiğini gözlemlemiştir.

Heikal *et al.*(2015)'a göre, %1 NA'lı hamur, normal portland çimentolu ve %2-6 arasında NA'lı diğer çimento hamurlarına kıyasla daha yüksek basınç dayanım değerleri vermektedir.

Yapılan literatür taramasında konu ile sınırlı sayıda araştırmanın yapıldığı belirlenmiştir. Bunlarda da betonda ayrı ayrı kırmızı çamur ve nano tozun etkisi incelenmiştir. Ancak, yüksek sıcaklık sonrası kırmızı çamur ve nano katkılı betonların mekanik özelliklerinin araştırıldığı çalışmaya rastlanılmamıştır.

Bu özelliğinden dolayı tez çalışmasının literatüre Al_2O_3 açısından zengin bir betonun (kırmızı çamurlu ve nano- Al_2O_3 içeren) yüksek sıcaklık etkisini altındaki davranışını göstermesi bakımından büyük katkısı olacaktır.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Agrega

Deneylerde, kum ve kırmataş agrega kullanılmıştır. Agregalardan alınan numuneler üzerinde yapılan deneylerle malzemenin tane yoğunluğu, yüzey nemi ve su emme özellikleri tespit edilmiştir.

3.1.2. Çimento

Aşkale Çimento Fabrikasından temin edilen TS EN 197-1 (Anonim 2012) ve TS EN 196-1 (Anonim 2016)'e uygun olan CEM II/A-M (P-LL) 42,5R tipi Portland çimento kullanılmıştır. Çimento türü belirlenirken litaretürden hareketle yüksek sıcaklık için önerilen çimento türü kullanılmıştır (Bingöl 2008; Klingsch and Zurich 2010). Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

3.1.3. Kırmızı çamur

Kırmızı çamur (KÇ) Konya Etibank Seydişehir Alüminyum Fabrikasının üretim atıklarından alınmıştır. Kırmızı çamurun kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Kırmızı çamur ve çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Bileşik	KÇ	CEM II/A-M
SiO ₂	18,95	17,60
Al ₂ O ₃	25,65	4,45
Fe ₂ O ₃	36,94	3,08
CaO	3,30	60,02

Çizelge 3.1. (devam)

MgO	-	2,29
SO ₃	-	2,67
Kızdırma kaybı	17,75	8,49
Na ₂ O	7,04	0,22
K ₂ O	-	0,63
Na ₂ O+0,658K ₂ O	-	0,63
Cl	-	0,01
ölçülemeyen	-	0,54
s. CaO	-	0,69
katkı	-	19,90
TiO ₂	5,62	-
diğer	2,51	-
Fiziksel özellikleri		
Özgöl ağırlığı	3.05	3,01
Özgöl yüzeyi (cm ² /g)	-	4403
Basınç dayanımı (MPa)	-	51,03
pH	12-13	-

3.1.4. Nano Al₂O₃

Nano-Al₂O₃ Evonik (Degussa) firmadan alınmıştır. Faz yapısı olarak gama alüminyum, özgül yüzey alan olarak 100±15 m²/g, ortalama tanecik boyutu olarak 13 nm, biçim olarak küresele yakın ve renk olarak beyaz kullanılmıştır.

3.1.5. Karma suyu

Beton üretiminde TS EN 1008 Standardı kapsamında olan (Anonim 2013). Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

3.1.6. Akışkanlaştırıcı

Çalışmada, kullanılacak akışkanlaştırıcı türüne ve miktarına karar verebilmek için farklı süper akışkanlaştırıcılar kullanılarak üretilen işlenebilirlik açısından en olumsuz ve en olumlu gruplar üzerinde ön denemeler yapılmıştır. Üretilen ön deneme betonlarının işlenebilirlik değerlerine bakılarak akışkanlaştırıcı türüne karar verilmiştir. TS EN 934-2 (Anonim 2014) Türk standardına uygun olan modifiye polikarboksilat esaslı yeni nesil Süper Akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcının yoğunluğu $1,045 \text{ gr/cm}^3$ ve rengi sütlü - gri/yeşildir.

3.1.7. Deneylerde kullanılan aletler

Elekler

Deneylerde, Şekil 3.1'de gösterildiği gibi, TS1226 (Anonim 1996)'ya uygun 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 25mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Elekler

Betoniyer

Çalışmada, Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, ELE firmasının ürettiği 60 dm³ kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betoniyer kullanılarak beton üretimi yapılmıştır.



Şekil 3.2. Beton numunelerini üretmek için betoniyer

Kalıplar

Deneylerde, Şekil 3.3'de gösterildiği gibi, TS EN 12390-1 (Anonim 2014)'e uygun 100 × 200 mm boyutlarında silindir ve 150 × 150 × 150 mm boyutlarında küp plastik malzemeden yapılmış beton kalıpları kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Beton numunelerini üretmek için küp ve silindir kalıplar

Isıtma Ekipmanı (Fırın)

ISO-834 (Anonim 2002) standardına uygun sıcaklık artış hızına sahip 1200°C sıcaklık kapasiteli yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır (Şekil 3.4). Standart sıcaklık-zaman eğrisi (Şekil 3.5) aşağıda verilen denklem ile tanımlanır:

$$T = T_0 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (3.1)$$

Burada,

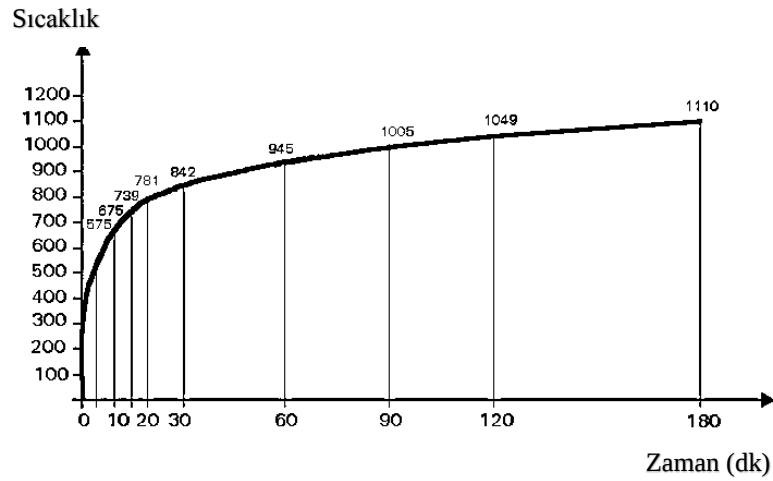
t zaman (dk)'dir.

T (t) anında fırın sıcaklığı (°C)

T₀ Başlangıçtaki fırın sıcaklığı (°C)'dir.



Şekil 3.4. Yüksek Sıcaklık fırını



Şekil 3.5. Standart sıcaklık-zaman eğrisi (ISO 834- BS EN 1363-2:1999)

Basınç Dayanımı Test Presi

Sertleşmiş beton deneylerinden, numunelerin basınç mukavemetlerinin belirlenmesinde İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında bulunan ELE marka AUTOTEST 3000 tipinde 300 ton kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır (Şekil 3.6). Basınç deneyler esnasında sabit bir yükleme hızı 0,4 MPa/sn alınmıştır. Bu yükleme hızı TS 12390-3 (Anonim 2012)'da belirtilen aralık (0,2-1 MPa/s) içinde kalmaktadır.



Şekil 3.6. Basınç dayanımı test Presi

Basıncılı Su Geçirirliiği Cihazı

Numunelerin su işleme derinliklerinin belirlenmesinde İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında (500±50) kPa su basıncı verebilen cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Deneylerde kullanılan basınçlı su geçirirliiği cihazı

3.2. Yöntem

3.2.1. Agregada deneylerinde uygulanan yöntemler

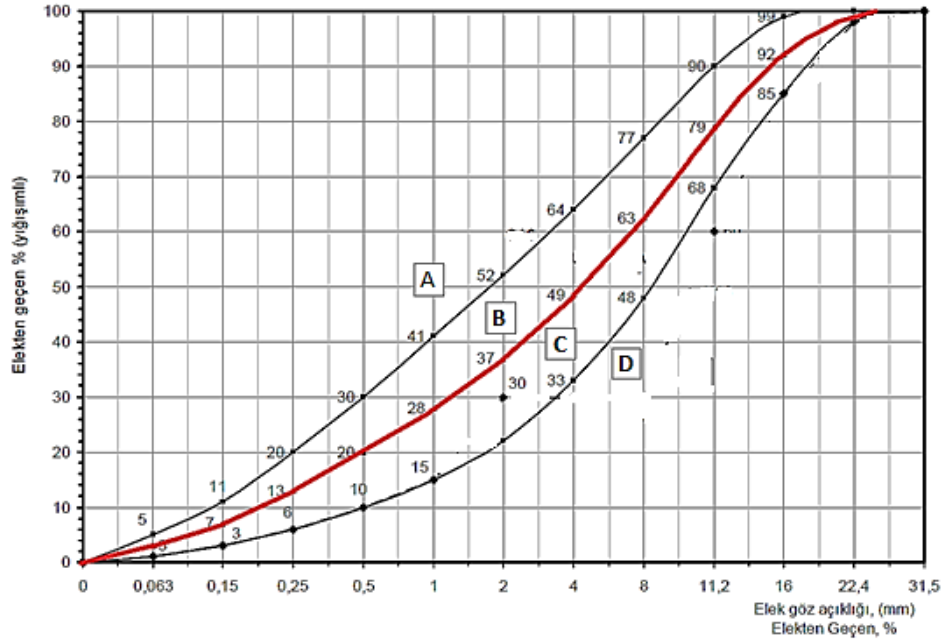
Çalışmada kullanılacak olan agregada; 0–2 mm, 2–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm ve 16–25 mm olmak üzere beş farklı tane sınıfına ayrılmıştır. Kullanılan agregaların tane yoğunluğu, su emme ve yüzey nemi şeklindeki fiziksel özellik deneyleri TS EN 1097-6 (Anonim 2015)’e yapılmış ve değerleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.2. Agregaların tane yoğunlukları, su emme, ve yüzey nemi oranları

Kullanılan agregada	Tane Yoğunluğu (gr/cm ³) (K.Y.D.)	Su emme (%)	Deney anındaki Yüzey nemi (%)
Kum-I	2,686	1,77	1,8
Kum-II	2,671	1,75	1,1
Çakıl-I	2,652	1,92	1,0
Çakıl-II	2,664	1,56	0,8
Çakıl-III	2,678	1,36	0,7

3.2.2. Karışım agregalarının oranları ve granülometrileri

Şekil 3.8’de gösterildiği gibi uygun agregada granülometri eğrisine göre kullanılan agregada karışım oranları (mutlak hacimce %) verilmiştir.



Şekil 3.8. Agreganın en büyük tane büyüklüğü 16 mm olan beton için belirlenen agreganın tane büyüklüğü dağılımı eğrisine ait sınırlar

3.2.3. Numunelerin kodlanmasında kullanılan yöntem

Numune kodlamaları kırmızı çamur kullanırken kırmızı çamur oranı, kırmızı çamur ve nano- Al_2O_3 kullanılırken ise önce kırmızı çamur oranı sonra nano- Al_2O_3 oranı kısaltma olarak verilmiştir.

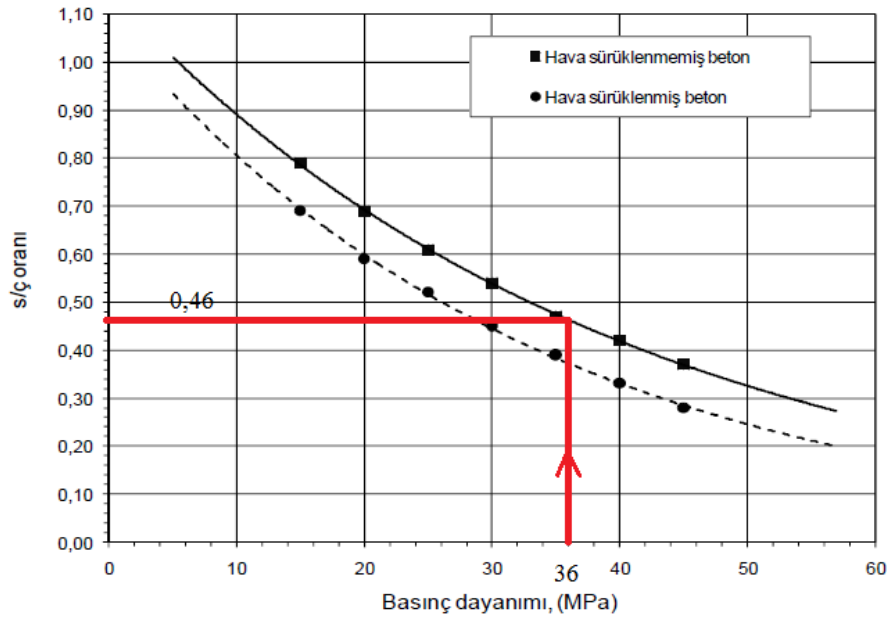
Örnek:

10KÇ: içeriğinde %10 oranında kırmızı çamur bulunan beton numune

10KÇ0.5NA: içeriğinde %10 oranında kırmızı çamur ve %0.5 oranında nano Al_2O_3 bulunan beton numune

3.2.4. Beton karışım oranları

Bu çalışmada üretilen C30/37 sınıfı beton numuneleri üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ağırlık kaybı ve basınç altında su işleme derinliğinin tayini deneyleri yapılmıştır. En büyük agregatane 16mm boyutunda kullanılmıştır. XC2 çevresel etkisinin de dikkate alınarak S/Ç değeri, Şekil 3.9'dan 0.46 ve Çizelge 3.4'tan 0.60 değerlerinden en küçük olan 0.46 değeri S/Ç değeri olarak alınmıştır. Öndeneylemler sonucunda bu değer 0.48 olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.9. Beton basınç dayanımlarına göre yaklaşık s/ç oranları

Çizelge 3.3. Beton çevre etki sınıfları

	Karbonatlaşma nedeniyle korzyon			
	XC1	XC2	XC3	XC4
En büyük S/Ç oranı	0,65	0,60	0,55	0,5
En küçük dayanım sınıfı	C20/25	C25/30	C30/37	C30/37
En az çimento içeriği (kg/m ³)	260	280	280	300
En az hava içeriği (%)	-	-	-	-

TS EN 206 (Anonim 2015)'e göre karışım hesabı yapılarak üretilen beton grupları ve malzeme miktarları Çizelge 3.5'de, üretilen numuneler ise Şekil 3.10'da verilmiştir. Çökme değerleri incelendiğinde artan kırmızı çamur oranı ile çökme değerinin bir miktar azaldığı görülmüştür. NA katkısı ile çökme değeri çok daha fazla azalmıştır.

Çizelge 3.4. Beton karışım oranları

Kullanılan malzeme (kg/m ³)												
				Agregalar								
Gruplar	Ç	KÇ	NA	0-2 (mm)	2-4 (mm)	4-8 (mm)	8-16 (mm)	16-25 (mm)	Su	A	S/B	Çökme (cm)
0KÇ	416.4	-	-	641	206.5	240.3	498.4	137.7	199.6	3.12	0.48	10
10KÇ	374.8	41.64	-	641	206.5	240.3	498.4	137.7	199.6	3.12	0.48	9.5
15KÇ	353.9	62.46	-	641	206.5	240.3	498.4	137.7	199.6	3.12	0.48	9.1
20KÇ	333.1	83.28	-	641	206.5	240.3	498.4	137.7	199.6	3.12	0.48	8.5
10KÇ0.5NA	372.7	41.64	2.08	624.7	201	233.5	483.8	133.6	199.3	3.12	0.48	6
10KÇ1NA	370.6	41.64	4.16	624.7	201	233.5	483.8	133.6	199.3	3.12	0.48	4
10KÇ1.25NA	369.6	41.64	5.21	624.7	201	233.5	483.8	133.6	199.3	3.12	0.48	1.5

A: Akışkanlaştırıcı, B: Bağlayıcı



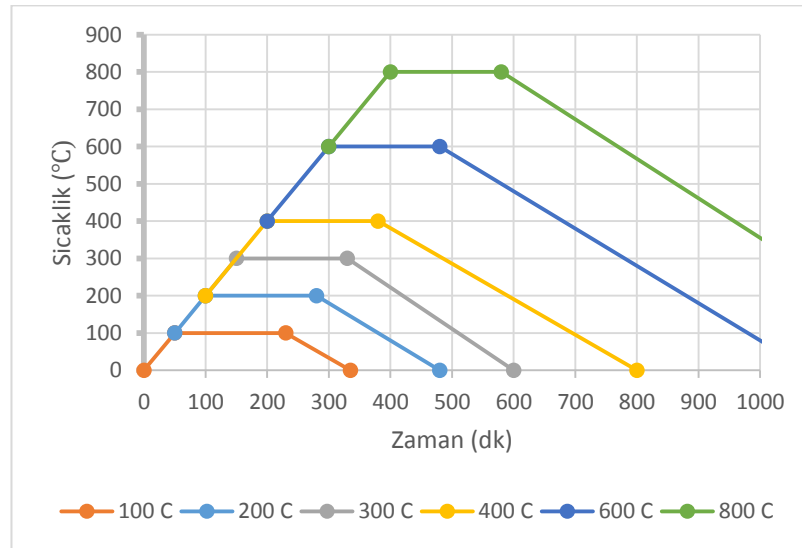
Şekil 3.10. Üretilen beton numuneleri

Yüksek sıcaklığın etkisiyle betonun mekanik özellikleri üzerinde atık bir malzeme olan kırmızı çamurun ve nano toz katkısının etkisi incelenerek performansı daha iyi olan bir beton üretmek amacıyla yapılan bu çalışma iki aşamadan oluşmaktadır:

İlk aşamada optimum kırmızı çamur oranını belirlemek için, %0, %10, %15 ve %20 oranlarında kırmızı çamur kullanılarak üretilen 4 farklı karışım grubu hazırlanmıştır. Deney ve analiz sürelerine kadar numuneler standart su kürü ortamında tutulmuştur. Üretilen beton numuneler literatürde belirtildiği gibi 200°C, 300°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklıklara kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıklarda Şekil 3.11’de gösterildiği gibi 3 saat süreyle bekletilmiştir (Bingöl ve Gül 2009; Beglarigale *et al.* 2016; Al-Salloum *et al.* 2016). Yüksek sıcaklığın etkisinin belirlenmesinde her bir sıcaklık grubu için basınç

dayanımı, çekme dayanımı ve ağırlık kaybı analizleri yapılmış ve her bir karışım grubu için basınçlı su geçirimsizliği deneyi ve kılcal emilim deneyi yapılmıştır.

İkinci aşamada bulunan optimum kırmızı çamur oranı esas alınarak bu betonların yüksek sıcaklığa dayanımı üzerinde Nano Al_2O_3 'nin etkisini belirlemek için %0, %0.5, %1 ve %1.25 oranlarda Nano- Al_2O_3 eklenerek 4 farklı beton grubu daha hazırlanmıştır. Üretilen beton numuneler 200°C, 400°C, 600°C sıcaklıklara kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıklarda 3 saat süreyle bekletilmiştir. Çalışmanın birinci aşamasındaki 300°C ve 800°C de değerlendirmeler ikinci aşamada yapılmamıştır. Bunun nedeni 300°C de belirgin bir değişim görülmemiş 800°C ise birinci aşamada kırmızı çamur oranına karar vermek için seçilmiş bir değer olup nano tozlu beton grupları için yüksek sıcaklık üst değeri literatürden hareketle 600°C olarak seçilmiştir. Yüksek sıcaklığın etkisini incelemek için her bir sıcaklıkta basınç dayanımı, çekme dayanımı ve ağırlık kaybı analizleri yapılmıştır.



Şekil 3.11. Isıtma-soğutma rejimi

3.2.5. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Ağırlık Kaybı Deneyi

Ağırlığın değişimini belirlemek için bütün beton numuneleri test edilmiştir. 1g hassasiyetle, ısıtılmadan önce (W_i) ve soğutulduktan sonra numuneler (W_s) tartılmıştır. Değişiklikler (W) başlangıç ağırlıklarının yüzdeleri olarak aşağıdaki denklem kullanılarak ifade edilmiştir:

$$W (\%) = \frac{w_i - w_s}{w_i} \times 100 \quad (3.1)$$

Basınç ve Yarmada Çekme Deneyi

Basınç dayanımı deneyi TS EN 12390-3 (Anonim 2012)'e göre yapılmıştır. Yarmada çekme deneyi TS EN 12390-6 (Anonim 2010)'e göre yapılmıştır.

Betonun Basınçlı Su Geçirimsizlik Deneyi

Betonun basınçlı su geçirimsizliği TS EN 12390-8 (Anonim 2010)'e göre yapılmıştır. Deney için $200 \times 100 \text{ mm}$ silindir numune, cihaza yerleştirilmiş ve 72 saat süreyle (500 ± 50) kPa su basıncı uygulanmıştır. Basıncın belirtilen süreyle uygulanmasından sonra deneye son verilerek numune cihazdan çıkartılmıştır. Basınçlı su uygulanan yüzeydeki fazla su silinerek temizlenip ikiye bölünmüş ve basınç uygulanan deney alanından itibaren, suyun işlediği en büyükderinlik ölçülerek kaydedilmiştir. Test beton yüzeyi boyunca su emme hızını belirlemektedir (Zhu and Bartos 2003; Medeiros and Helene 2009).

Kılcal Su Emme Deneyi

Betonda kılcal emilim TS EN 13057 (Anonim 2004)'e göre yapılmıştır (Şekil 3.12). Kılcal emilim deneyi için $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ küp numuneler su kürü ortamından alınarak 24 saat süreyle 100°C etüvde tutulmuştur. Etüvden çıkarıldıktan sonra soğutulan numuneler, kesik yüzeyleri batacak şekilde suya konulmuştur. Diğer yüzeyleri ise su almaması için bantlanmıştır. Suda bekletilen numuneler belirli aralıklarla (5dk, 10dk, 20dk, 1s, 2s, 4s, 8s, 24s) su içerisinde çıkarılarak nemli bir bezle kurulanmış, tartılmış ve aşağıdaki formülden hareketle kılcallık katsayısı bulunmuştur:

$$k = \frac{Q^2}{A^2 \times t} \quad (3.2)$$

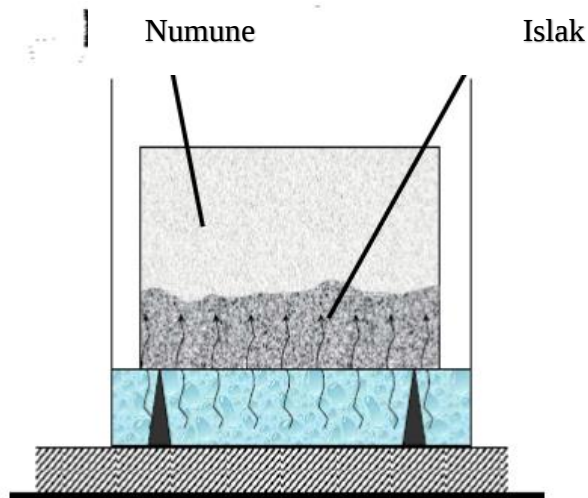
Burada,

Q, emilen su miktarı (cm^3);

K, kılcallık katsayısı (cm^2/sn);

A, numunenin suyla temas ettiği alan (cm^2);

t, geçen süre (sn) dir.



Şekil 3.12. Betonda kılcal emilim deney düzeneği

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1. Kırmızı Çamur Optimum Oranına Karar Verebilmek İçin Yapılan Çalışmalar (1. Aşama)

4.1.1. Ağırlık kaybı

Numunelerin ağırlığı farklı sıcaklıklara maruz bırakılmadan önce ve sonra ölçülmüştür. Maksimum derecede sıcaklığa maruz kalan numunelerin hızlı kurumaları yüzünden ağırlık kaybında artış yaşadıkları gözlenmiştir. (Sancak vd 2008; Alsheikh 2011). Çizelge 4.1'den görüldüğü gibi kırmızı çamurlu ve kırmızı çamursuz yüksek sıcaklıklara maruz kalan numunelerin en yüksek ağırlık kayıpları 200°C, 300°C ve 400°C sıcaklıklarda 15KÇ'de 600°C ve 800°C'de ise 20KÇ'de gözlenmiştir. Kontrol numunesinin sıcaklığı 200°C'ye kadar yükseltildiğinde, serbest su buharlaşması nedeniyle beton numuneleri, başlangıç ağırlığından yaklaşık %0.8 oranında bir ağırlık kaybı yaşamıştır. Sıcaklık 300°C'ye yükseltildiğinde, ağırlık kaybı %1.7 olmuş sıcaklık 400°C'ye yükseltildiğinde ise ağırlık kaybının %6.3 olduğu gözlenmiştir.

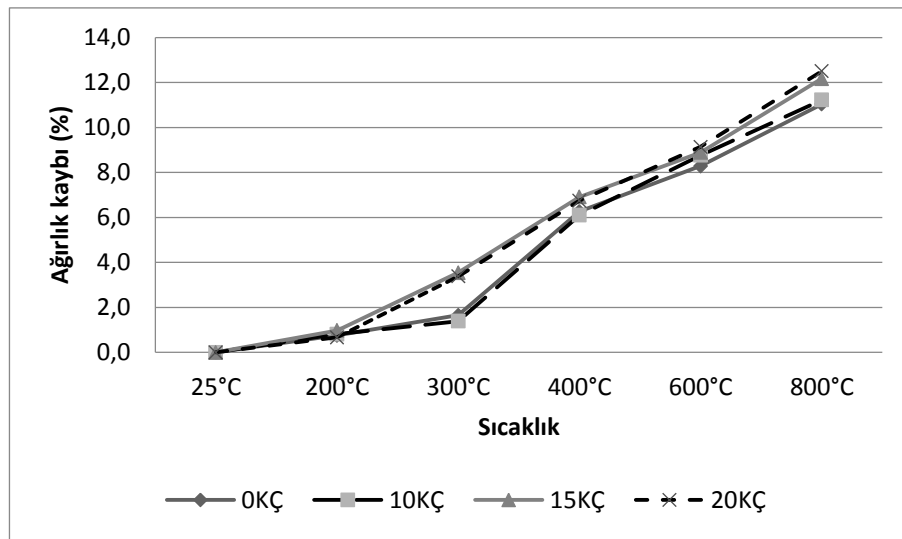
Hidratasyon ürünlerinin dehidrasyonu ile birlikte çimento hamuru ve agrega parçacıklarındaki ince gözeneklerden su kaybı nedeniyle ağırlık kaybında da artış yaşanmıştır. 600°C'deki sıcaklıkta ağırlık kaybı %8.29 iken, 800°C'de ağırlık kaybının %11.04 olduğu görülmüştür.

Kontrol betonuna kıyasla kırmızı çamurun oranının yüksek olması yüzünden, 15KÇ ve 20KÇ betonlarda daha yüksek ağırlık kaybı yaşandığı tahmin edilmektedir. KÇ'nin termal dekompozisyonunu Şekil 2.23'teki TGA-DTA diyagramı göstermektedir. Şekilde, sıcaklık arttıkça üç aşamada ağırlık kaybı yaşandığı görülmektedir. Birinci aşamada görülen ağırlık kaybı, 25-260°C'ler arasında meydana gelir; bu aşamada suyun buharlaşmasından kaynaklanan ağırlık kaybı toplam ağırlığın yaklaşık %4.3'ünü oluşturur. İkinci aşamada görülen ağırlık kaybı 260-325°C'ler arasında gerçekleşir, bu

aşamada ağırlık kaybı toplam ağırlığın yaklaşık %8.9'unu oluşturur. Bunun nedeni, numunenin bir bütün olarak H_2O kaybına ve ayrıca $Al(OH)_3$ 'ten H_2O 'nun çıkarılmasından kaynaklanmaktadır. Üçüncü ve son aşamada ise, 325-500°C'ler arasında gerçekleşir; bu aşamada ağırlık kaybı, $CaCO_3$ ayrışımı sırasında CO_2 'nin salınmasına bağlı olarak toplam ağırlığın yaklaşık %10.9'unu oluşturur. DTA eğrisinde, 60°C ve 290°C civarında merkezlenmiş iki geniş zirve noktası suyun fiziksel ve kimyasal olarak adsorpsiyonunu gösteren noktalardır (Nath vd 2015). Ağırlık kaybı, Çizelge 4.1 ve Şekil 4.1'de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1. Beton ağırlık kaybı

Ağırlık Kaybı (%)				
Sıcaklık	0 KÇ	10KÇ	15KÇ	20KÇ
25°C	0	0	0	0
200°C	0.8	0.8	1.0	0.7
300°C	1.7	1.4	3.5	3.4
400°C	6.3	6.1	6.9	6.7
600°C	8.3	8.8	8.9	9.1
800°C	11.0	11.2	12.2	12.5



Şekil 4.1. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının ağırlık kaybı

4.1.2. Basınç ve yarmada çekme dayanımları

Basınç dayanımı

Çizelge 4.2 ve şekil 4.2'de görüldüğü gibi 25°C'de, kontrol karışımı (0KÇ), 41.5 MPa'lık bir basınç dayanımına ulaşmaktadır. Burada, 25°C yaklaşık ortam sıcaklığı olup numunelere herhangi bir ısıtma uygulanmamıştır. 10KÇ, 15KÇ, 20KÇ karışımları sırasıyla 39.8 MPa, 35.4 MPa ve 30.6 MPa basınç dayanımı elde etmiştir. Basınç dayanımı 10KÇ'de optimum bir değere ulaşmış ve daha sonra 15KÇ ve 20KÇ azalmıştır. 0KÇ'ye göre, 10KÇ, 15KÇ ve 20KÇ için sırasıyla %4.3, %14.8 ve %26.3'lük bir azalma gözlenmiştir. Ayrıca bu sonuçlar (Kushwaha *et al* 2013; Rathod *et al* 2014; Tang 2014) tarafından da gözlemlenmiştir.

Yarmada çekme dayanımı

25°C'de, 0KÇ kontrol karışımının 4.2 MPa'lık yarmada çekme dayanımına ulaştığı Çizelge 4.3 ve Şekil 4.4'de görülmektedir. 10KÇ, 15KÇ ve 20KÇ karışımları sırasıyla 4.1 MPa, 4.2 MPa ve 3.0 MPa yarmada çekme dayanımına ulaşmıştır. Yarmada çekme dayanımı 15KÇ, daha sonra 10KÇ'de en uygun değere ulaşmıştır ve 20KÇ'de ise dayanımda en yüksek kayıp yaşanmıştır. Belirli bir değerden sonra kırmızı çamur oranı arttıkça yarmada çekme dayanımının azalması sonucu literatürle uyumluluk göstermektedir (Bishetti and Pammar 2014).

Isıtma sonrası kalan basınç ve yarmada çekme dayanımları

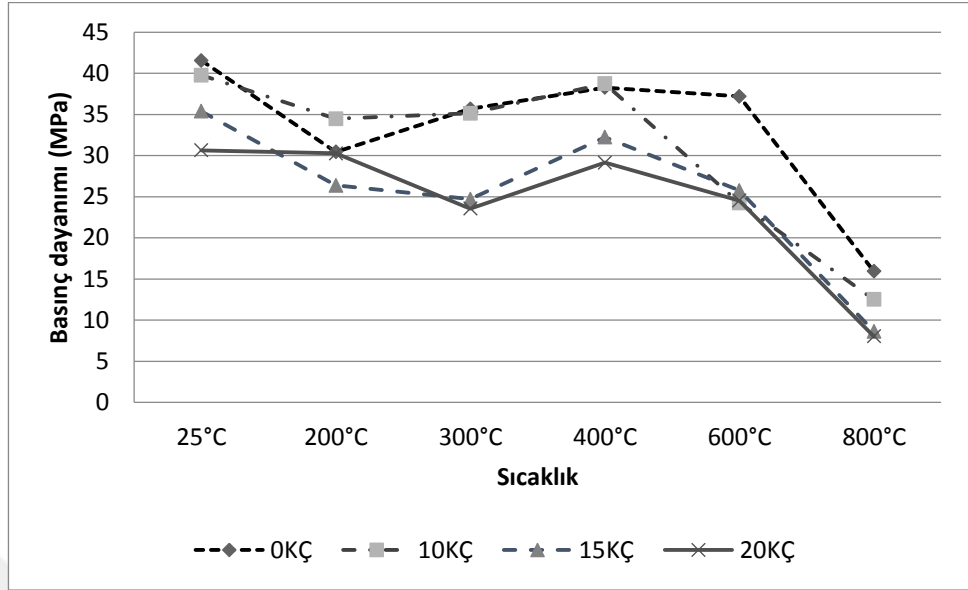
Genel olarak, dört karışımın tümünde kalan basınç dayanımları sıcaklık artışıyla birlikte azalmıştır. Şekil 4.2, 4.3 ve Çizelge 4.2, 25°C sıcaklıkta sırasıyla 0KÇ, 10KÇ, 15KÇ ve 20KÇ için sıcaklık sonrası basınç dayanımını ve % olarak azalan basıncını göstermektedir. 200°C'de, incelenen tüm betonların basınç dayanımları, 25°C'deki dayanımlarına göre %13-27 azalmıştır. 0KÇ ile karşılaştırıldığında 200°C'de 10KÇ'de %13.2'lik bir basınç artışı meydana gelirken, 15KÇ ve 20KÇ'nin basınç dayanımlarında

sırasıyla %13.4 ve %0.6 oranında azalma meydana gelmiştir. Tüm karışımlar 300°C sıcaklığa kadar ısıtıldıklarında basınç dayanımlarında belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir. 20KÇ beton numuneleri, 0KÇ basınç dayanımının yaklaşık %34.0'ında en büyük azalmayı göstermiştir. 400°C'de, 0KÇ'a göre 10KÇ basınç dayanımı %1,2 oranında artarken, 15KÇ ve 20KÇ basınç dayanımında sırasıyla %15,8 ve %23,8 oranında bir azalma meydana gelmiştir. 400°C'de tüm betonların dayanımda küçük bir düşüş gözlemlenmiştir. 400°C'ye maruz bırakıldıktan sonra, 0KÇ, 10KÇ, 15KÇ ve 20KÇ betonların 25°C'deki dayanımları sırasıyla %7.9, %2.6, %8.9 ve %4.9 oranlarındadır. 600°C'ye maruz kaldıktan sonra 0KÇ, 10KÇ, 15KÇ ve 20KÇ betonların 25°C'deki dayanımları sırasıyla %10.5, %39.1, %27.2 ve %19.9'dur. Ayrıca 600°C sıcaklıkta, 0KÇ ile karşılaştırıldığında 10KÇ'nin basınç dayanımında maksimum azalma meydana geldiği görülmüştür. Bu dayanım kaybı büyük ölçüde kalsiyum hidroksitin bozulmasına bağlı olarak gerçekleşmiştir (Behnood and Ghandehari 2009). 0KÇ'ye kıyasla, 800°C'de 20KÇ'de basınç dayanımında azami azalma meydana gelmiştir. Şekil 4.4'te gösterildiği gibi tüm karışımlar için 600°C'ye ve 800°C'ye ısıtıldıktan sonra numunelerin yüzeylerindeki çatlaklar görünür hale gelmiştir. Şekil 4.5'te gösterildiği gibi 800°C'ye ısıtıldıktan sonra %10, %15 ve %20 kırmızı çamurlu betonların renkleri kırmızıdan griye dönüşmüştür.

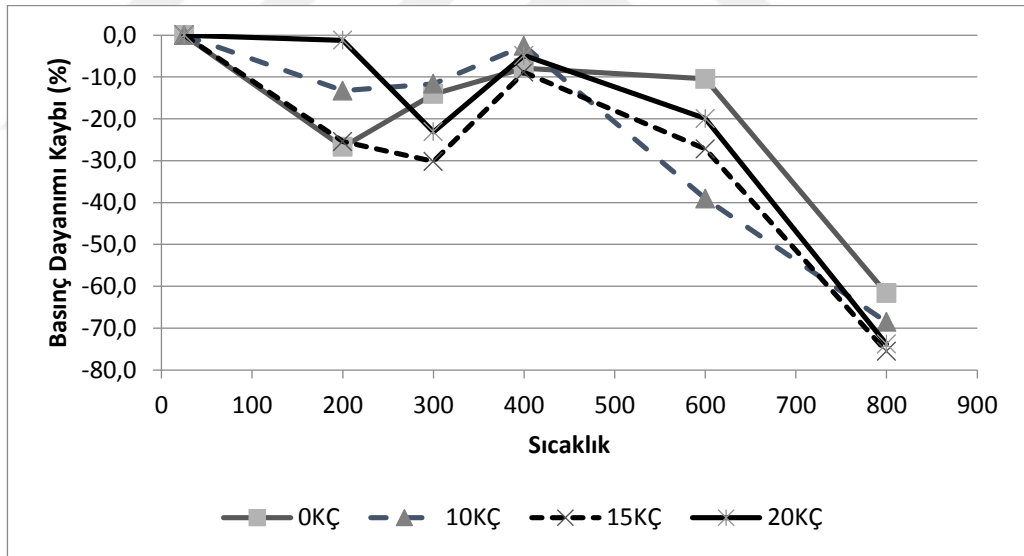
Çizelge 4.2. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları

Basınç dayanımı (MPa) (*)					Kontrol numunesine karşı değişim (%)		
Sıcaklık	0KÇ	10KÇ	15KÇ	20KÇ	10KÇ	15KÇ	20KÇ
25°C	41.5	39.8	35.4	30.6	-4.3	-14.8	-26.3
200°C	30,4(-26.7)	34,5(-13.3)	26,4(-25.4)	30,3(-1.2)	13.2	-13.4	-0.6
300°C	35,7(-14.1)	35,1(-11.6)	24,7(-30.2)	23,6(-23.1)	-1.5	-30.8	-34.0
400°C	38,3(-7.9)	38,7(-2.6)	32,2(-8.9)	29,1(-4.9)	1.2	-15.8	-23.8
600°C	37,2(-10.5)	24,2(-39.1)	25,8(-27.2)	24,5(-19.9)	-34.8	-30.7	-34.1
800°C	15,9(-61.7)	12,5(-68.5)	8,6(-75.6)	8,0(-73.8)	-21.4	-45.7	-49.6

*Ortam sıcaklığındaki (~25°C) dayanımlarına göre değişim %



Şekil 4.2. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları



Şekil 4.3. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları kaybı

Şekil 2.23'de belirtildiği gibi 260-325°C sıcaklıklar arasında kırmızı çamurda oluşan değişimle su serbest kalmaktadır. Belirtilen sıcaklıklar sonrası numunelerde görülen basınç dayanımı artışının, serbest kalan suyun hidrasyona katkısı nedeniyle olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.4. 600°C’de 10KÇ numunesinde görülen renk değişimi



Şekil 4.5. 800°C de 15KÇ numunesinde kırık yüzeyi görüntüsü

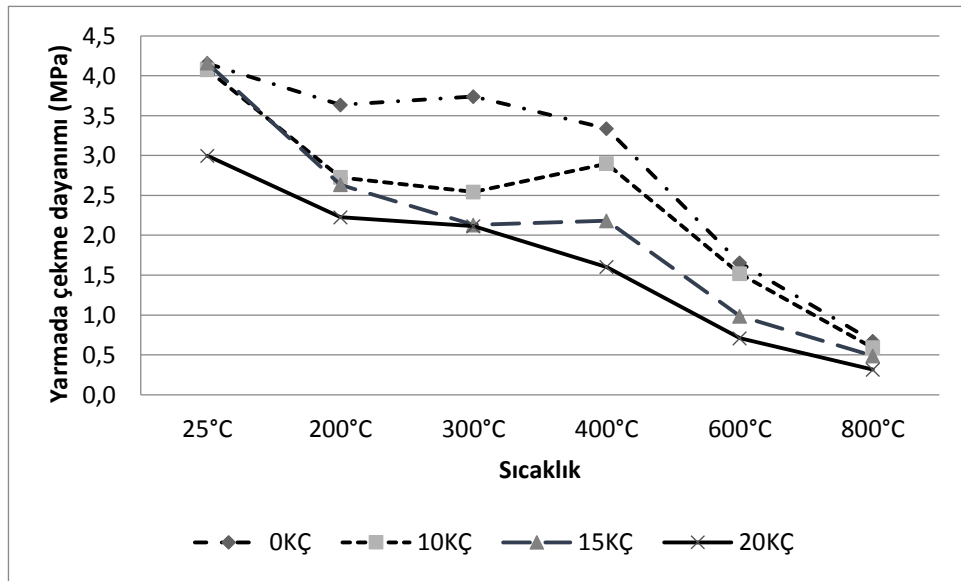
Benzer sonuçlar, 3 saatlik sürede farklı sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra karışımların çekme dayanımları için de elde edilmiştir. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.6’da %0, %10, %15 ve %20 kırmızı çamurlu beton karışımları için 28 günde farklı sıcaklıklara maruz kalmaları sonucu çekme dayanımlarındaki oranlar verilmiştir. En düşük çekme dayanımı, 0KÇ ile karşılaştırıldığında 10KÇ’de görülmüştür. ve 800°C’deki çekme

dayanımının kayıpları, 0RM için %83.8, 10KÇ için %85.5, 15KÇ için %88.3 ve 20KÇ için %89.5'dir. Yüksek sıcaklıklara maruz kalan kırmızı çamurlu betonun çekme dayanımı kayıpları, kontrol betonun çekme dayanımı kayıplarıyla karşılaştırıldığında daha düşük olduğu görülmüştür Şekil 4.7'de ilk 25°C dayanımlarına kıyasla farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları gösterilmiştir.

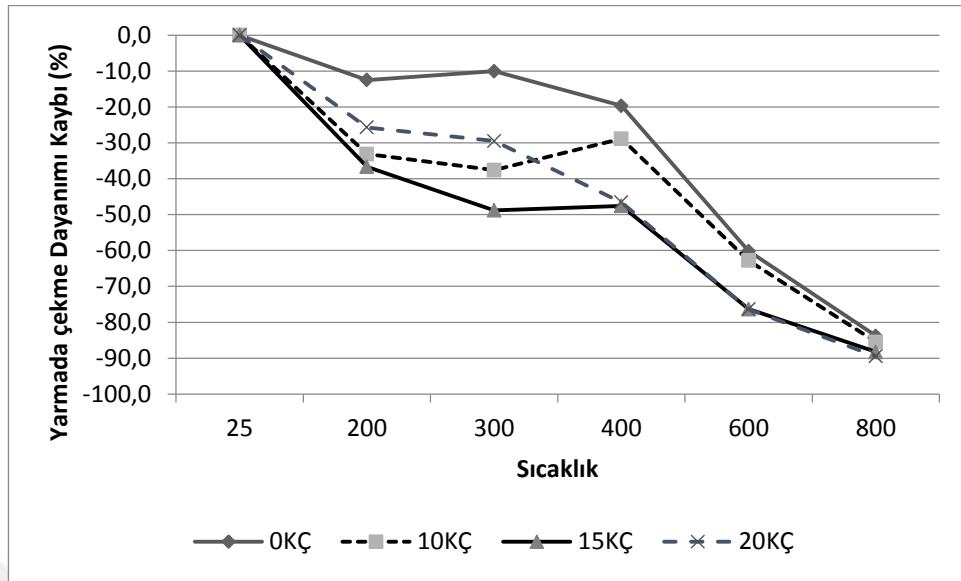
Çizelge 4.3. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları

Temperature	Betonun çekme dayanımı (MPa) (*)				Kontrol numunesine karşı değişim (%)		
	0KÇ	10KÇ	15KÇ	20KÇ	10KÇ	15KÇ	20KÇ
25°C	4.2	4.1	4.2	3.0	-1.9	0.0	-27.9
200°C	3,6(-12.5)	2,7(-33.1)	2,6(-36.7)	2,2(-25.7)	-25.0	-27.6	-38.7
300°C	3,7(-10.0)	2,5(-37.6)	2,1(-48.8)	2,1(-29.5)	-32.0	-43.0	-43.5
400°C	3,3(-19.7)	2,9(-28.9)	2,2(-47.5)	1,6(-46.6)	-13.1	-34.6	-52.0
600°C	1,7(-60.2)	1,5(-62.8)	1,0(-76.3)	0,7(-76.3)	-8.3	-40.5	-57.2
800°C	0,7(-83.8)	0,6(-85.5)	0,5(-88.3)	0,3(-89.5)	-12.3	-27.7	-53.2

*Ortam sıcaklığındaki (~25°C) dayanımlarına göre değişim %



Şekil 4.6. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları



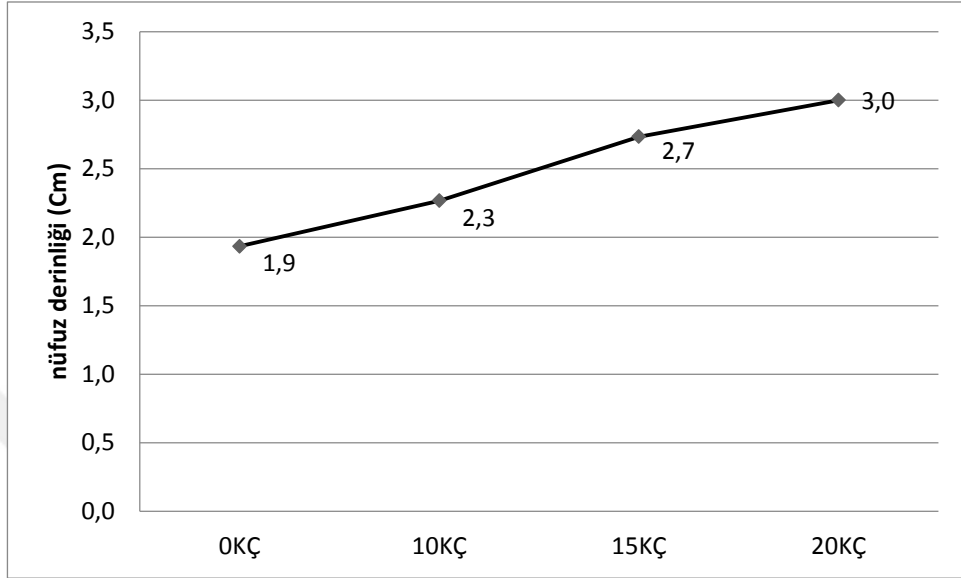
Şekil 4.7. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları kaybı

4.1.3. Basınç altında su işleme derinliği deneyi

Basınç altında su işleme derinliği deneyi, suyun nüfuz etmesine karşı beton direncinin bir ölçüsünü verir. Şekil 4.8, kırmızı çamur ile su penetrasyon derinliğinin artışı göstermektedir. Artış miktarı 0KÇ'ye kıyasla yaklaşık 10KÇ için %21, 15KÇ için %42.1 ve 20KÇ için %57.9'dur. 0KÇ'ye kıyasla, 10KÇ'nin en düşük su penetrasyon derinlik değerini verdiği görülmüş, daha sonra 15KÇ ve 20KÇ'nin en yüksek su penetrasyon derinliğine sahip olduğu görülmüştür. Kırmızı çamur içeriğinin geçirgenlik üzerindeki etkisi açıkça görülebilmektedir. Daha yüksek bir kırmızı çamur içeriği, geçirgenlik katsayısındaki artışla ilgilidir. Normal beton ile kırmızı çamurlu beton arasındaki fark yine çok açık bir şekilde ortaya konulmuştur.

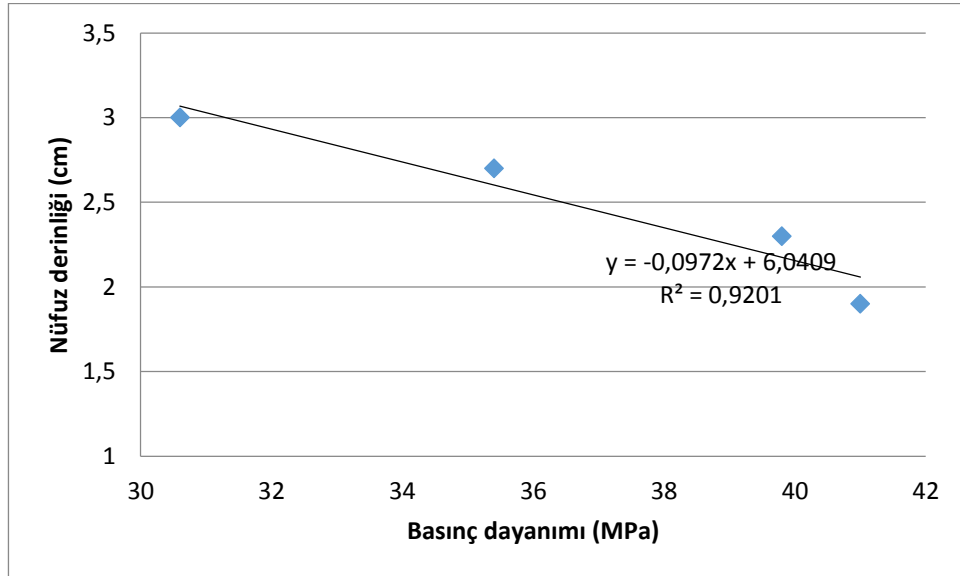
Şekil 4.9'da, basınç dayanımı ve penetrasyon derinliği arasındaki ilişkinin doğrusallığı gösterilmiştir. Genel olarak, su penetrasyon derinliği ile basınç dayanımı değerleri arasında çok iyi bir korelasyon olduğu gözlemlenmiş, yani betonun dayanımı arttıkça, su penetrasyon derinliğinin önemli ölçüde azaldığı görülmüştür. Kırmızı çamur içeriğinin değişimine bağlı olarak değişen penetrasyon derinliği, KÇ oranlarının daha

düşük değerleri için daha düşüktür. Kırmızı çamur oranının düşmesiyle birlikte betonun gözenekliliği azalmıştır.



Şekil 4.8. Beton numunelerine nüfuz eden su derinliği

Basınç dayanımı ile penetrasyon derinliği arasındaki ilişki doğrusaldır ve Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Basınç dayanımı ile nüfuz derinliği arasındaki ilişki

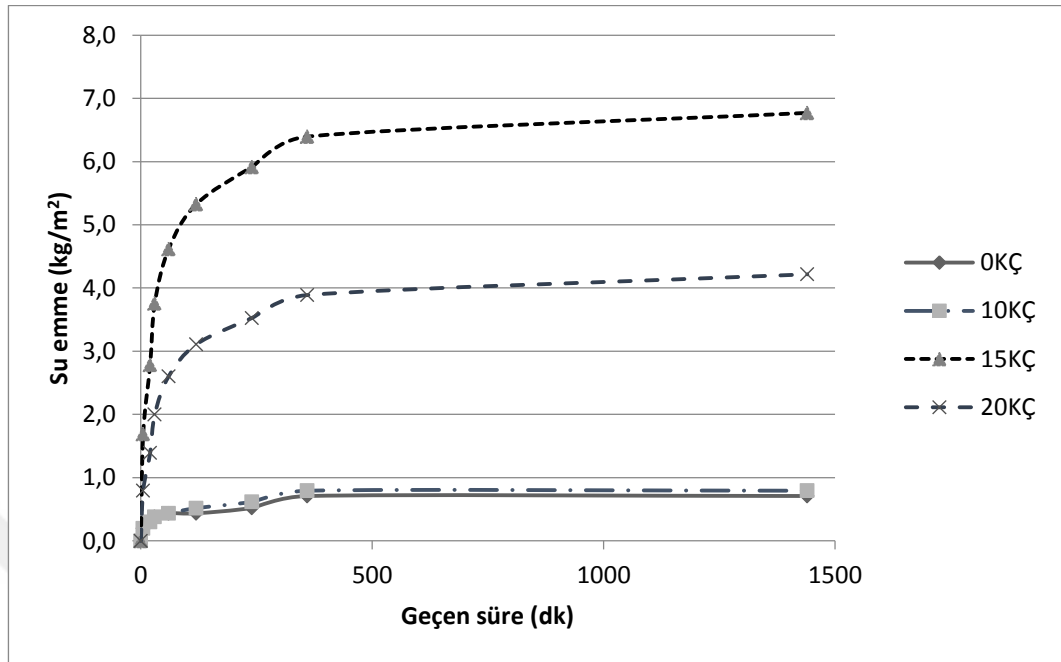
4.1.4. Kılcal su emme deneyi

Kapiler su emme testi, betonun yüzeyi boyunca suyun emme oranını belirlemektedir (Zhu and Bartos 2003; Medeiros and helene 2009). Şekildeki her nokta üç numunenin ölçümlerinin ortalamasıdır. Betonun kılcal geçirimliliği, kırmızı çamur ilavesinin oranına bağlı olarak değişmektedir. Genel olarak, kontrol betonunun, kılcal emme ile, kırmızı çamur içeren betondan daha az su emmektedir. İlk olarak en düşük absorpsiyon değeri 10KÇ'de daha sonra 20KÇ'de görülmüş ve en yüksek absorpsiyon değeri 15KÇ'den elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 4.10 ve Çizelge 4.4'te görüldüğü üzere, 0KÇ ve 10KÇ ile aynı absorpsiyon değeri elde edilmektedir (yani sırasıyla 0KÇ ve 10KÇ için 24 saatte yaklaşık 700, 800 g/m² kılcal absorpsiyon). Aynı zamanda 15KÇ ve 20KÇ'nin en az emme değerlerine sahip olduğunu göstermektedir. (Sırasıyla 15KÇ ve 20KÇ için 24 saatte yaklaşık 6800 ve 4200 g/m² kılcal absorpsiyon).

Kırmızı çamur oranı arttıkça su emme miktarı artacağı düşünülmektedir. Fakat deney verilerinden elde edilen 15KÇ grubunun 20KÇ'den daha fazla su emmesi sonucu ilginçtir. Bu durumun açıklanmasında numunelerin boşluk yapısının daha detaylı analizi gerekmektedir Örneğin; (civalı porozimetre deneyi:MIP ve BET yöntemi gibi).

Çizelge 4.4. Kılcal su emme değerleri

Geçen süre (dk)	Su emme (kg/m ²)			
	0KÇ	10KÇ	15KÇ	20KÇ
5	0.2	0.2	1.7	0.8
20	0.3	0.3	2.8	1.4
30	0.4	0.4	3.8	2.0
60	0.4	0.4	4.6	2.6
120	0.4	0.5	5.3	3.1
240	0.5	0.6	5.9	3.5
360	0.7	0.8	6.4	3.9
1440	0.7	0.8	6.8	4.2



Şekil 4.10. Betonun su emmesi

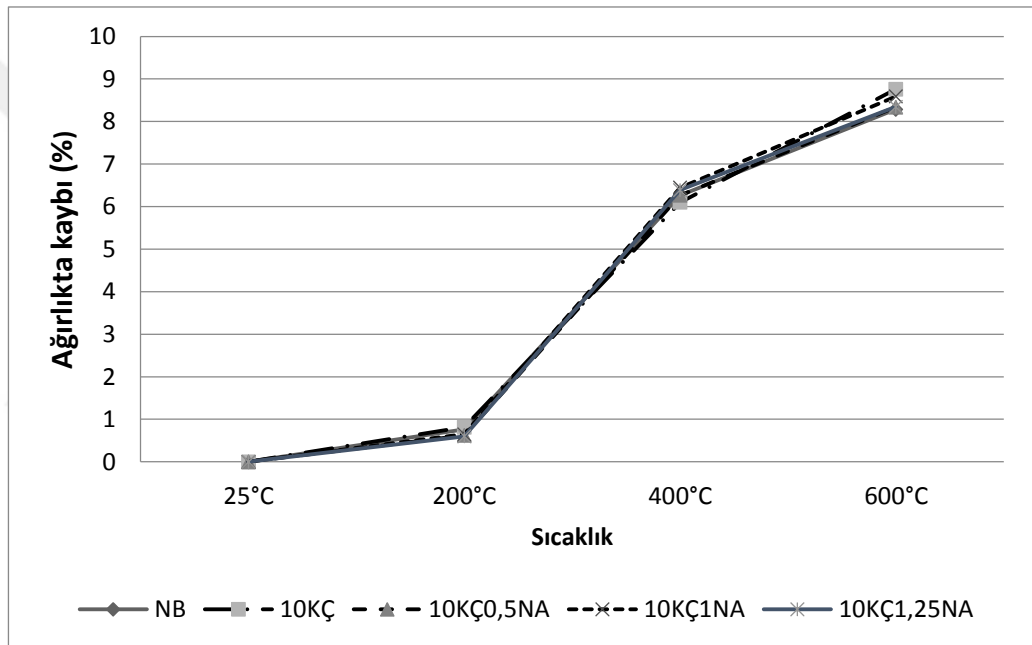
4.2. Kırmızı Çamur ve Nano- Al_2O_3 Eklenerek Yapılan Çalışmalar (2. Aşama)

4.2.1. Ağırlık kaybı

Sonuçlar Çizelge 4.5 ve Şekil 4.11'de gösterildiği gibi 200°C 'de en yüksek ağırlık kaybı, 0KÇ'de ve 10KÇ'de gözlenmiştir, buna karşın 10KÇ1NA ve 10KÇ1.25NA'da 400°C 'de gözlenmiştir. 600°C 'de maksimum ağırlık kaybı, 10KÇ'de (%8.8) ve 10KÇ1NA (%8.6) görülürken, 10KÇ0.5NA ve 10KÇ1.25NA, 0KÇ tarafından elde edilenle aynı değeri vermektedir. 200°C 'lik sıcaklığa kadar kontrol numunesi (beton numuneler) serbest su buharlaşması nedeniyle, başlangıç ağırlığından yaklaşık %0.8 oranında kayıp yaşamıştır. Sıcaklık 400°C 'ye yükseldiğinde, ağırlık kaybı %6.3 olmuştur. Hidratasyon ürünlerinin dehidratasyonu, çimento hamuru ve agrega parçacıklarındaki ince gözeneklerden su kaybı yaşanması nedeniyle ağırlık kaybı da artmıştır. 600°C 'de, ağırlık kaybı %8.3 olmuştur. Beton karışımlarının tümünün ağırlık kaybı yaklaşık olarak aynıdır. Bu durumun sebebi olarak Nano- Al_2O_3 oranının düşük olması gösterilebilir.

Çizelge 4.5. Beton ağırlık kaybı

Ağırlık kaybı (%)					
Sıcaklık	0KÇ	10KÇ	10KÇ0.5NA	10KÇ1NA	10KÇ1.25NA
25°C	0	0	0	0	0
200°C	0.8	0.8	0.6	0.7	0.6
400°C	6.3	6.1	6.3	6.5	6.4
600°C	8.3	8.8	8.3	8.6	8.4

**Şekil 4.11.** Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının ağırlık kayıpları

4.2.2. Basınç ve yarmada çekme dayanımları

Basınç dayanımı

Çizelge 4.6 ve Şekil 4.12'de, nano- Al_2O_3 içeriğine sahip kırmızı çamurlu betonların basınç dayanımları gösterilmiştir. 25°C'de, kontrol karışımı (0KÇ), 41.5 MPa'lık bir basınç dayanımına ulaşmaktadır. 10KÇ, 10KÇ0.5NA, 10KÇ1NA ve 10KÇ1.25NA karışımlarından sırasıyla 39.8 MPa, 43.44 MPa, 42.56 ve 38.1 MPa basınç dayanımları

elde edilmiştir. 10KÇ0.5NA ve 10KÇ1NA basınç dayanımları 0KÇ'den biraz daha yüksek olmasının aksine 10KÇ ve 10KÇ1.25NA basınç dayanımları 0KÇ'den daha düşük çıkmıştır. Sonuçlar, nano- Al_2O_3 'ü %1'e kadar KÇ'yi %10'a kadar ilave edersek basınç dayanımının arttığını ve daha sonra ise azaldığını göstermektedir. Ama en iyi sonucu %0.5 NA'lı %10 KÇ içeren grubun gösterdiği görülmektedir. Nano- Al_2O_3 içeren betonun basınç dayanımının artışı Portland çimentosunun hidrasyonu sırasında oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin hızlı bir şekilde tüketilmesinden kaynaklanabilir. Hidratasyonun hızlı olması Nano- Al_2O_3 parçacıklarının yüksek reaktivitesinden dolayıdır (Behfarnia and Salemi 2013). Öte yandan, %1'den fazla nano- Al_2O_3 ilave edildiğinde, nano- Al_2O_3 çimento içerikli malzemenin bir kısmının yerini alması nedeniyle basınç dayanımında azalmaya neden olabilmektedir. Ayrıca, nano parçacıkların dağılımında yaşanan kusurlardan kaynaklı zayıf bölgeler oluşabilir (Nazari and Riahi 2011).

Yarmada çekme dayanımı

Kontrol karışımı (0KÇ) 4.2 MPa'lık bir yarmada çekme dayanımına ulaştığını göstermiştir. 10KÇ, 10KÇ0.5NA, 10KÇ1NA ve 10KÇ1.25NA karışımları sırasıyla 4.1 MPa, 3.4 MPa, 2.3 MPa ve 3.0 MPa yarmada çekme dayanımına ulaşmıştır. Yarmada çekme dayanımı 10KÇ'de, daha sonra 10KÇ0.5NA'da en uygun değerlere ulaşmış ve 10KÇ1NA'da dayanımda maksimum kayıp yaşanmıştır. Çizelge 4.7 ve Şekil 4.14'de yarmada çekme dayanımının sonuçlarını gösterilmiştir.

Yüksek sıcaklık sonrası basınç ve çekme dayanımları

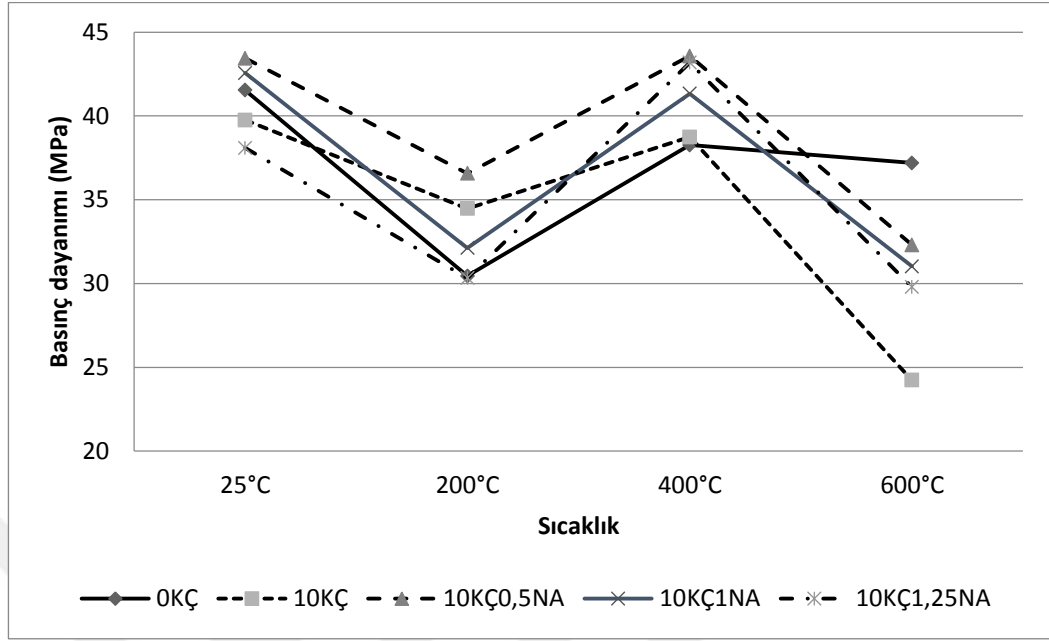
Şekil 4.12, 4.13 ve Çizelge 4.6'da gösterildiği gibi, beş gruptaki sıcaklıkta artışla birlikte basınç dayanımı azalmaktadır. 200°C'de, incelenen tüm betonların basınç dayanımları, 25°C'deki dayanımlarına göre %13-27 oranları arasında azalmıştır. 200°C'de 0KÇ'ye kıyasla 10KÇ, 10KÇ0.5NA ve 10KÇ1NA basınç dayanımları sırasıyla %13.2, %20.1 ve %5.5 oranında artarken, 10KÇ1.25NA basınç dayanımı %0.4 oranında azalmıştır. 400°C'de 0KÇ'ye kıyasla, tüm karışımlar 10KÇ, 10KÇ0.5NA ve 10KÇ1NA, 10KÇ1.25NA için sırasıyla %1.2, %13.9, %8 ve %12.9 oranında basınç artışı ile

sonuçlanmıştır. Bazı çalışmalar, 300°C'ye maruz kaldıkça betonun basınç dayanımının arttığını göstermiş ve 450°C'lik sıcaklıktan sonra düşmeye başlamıştır (Horszczaruk *et al.* 2015; Pineaud *et al.* 2016). 400°C'ye maruz bırakıldıktan sonra, 0KÇ, 10KÇ, 10KÇ0.5NA, 10KÇ1NA ve 10KÇ1.25NA betonlarının 25°C'deki dayanımlarına göre basınç dayanım değerleri sırasıyla -%8, -%3, %0,3, -%3 ve %13 olmuştur. Beton 600°C'ye maruz bırakıldıktan sonra, 25°C'ye göre 0KÇ, 10KÇ, 10KÇ0.5NA, 10KÇ1NA ve 10KÇ1.25NA betonlarının dayanımları -%11, -%39, -%26, -%27 ve -%22 oranlarında düşmüştür. Ayrıca 600°C'de, 0KÇ ile karşılaştırıldığında basınç dayanımının kaybını en fazla 10KB'de meydana gelmiş, bu dayanım kaybı büyük ölçüde kalsiyum hidroksitin bozulmasına bağlı olarak gerçekleşmiştir (Behnood and Ghandehari 2009). Sonuçlar, 10KÇ ile nano-Al₂O₃ içeren betonun, maruz bırakılan tüm sıcaklıklarda en yüksek basınç dayanım değerini verdiğini göstermektedir (Farzadnia *et al.* 2013; Heikal *et al.* 2015).

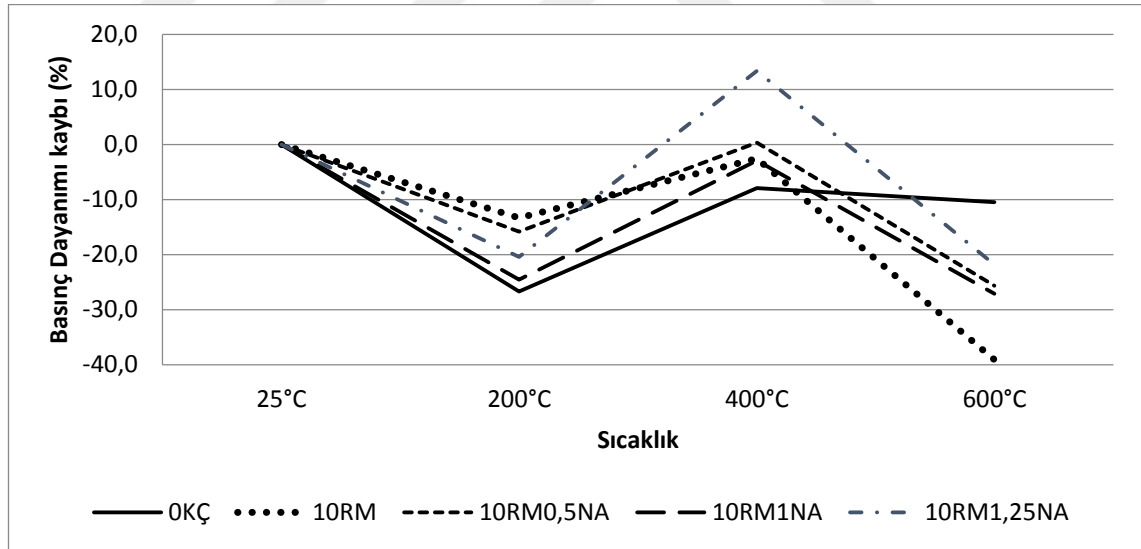
Çizelge 4.6. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları

Sıcaklık	Basınç dayanımı (MPa)(*)					Kontrol numunesine karşı değişim (%)			
	0KÇ	10KÇ	10KÇ0.5NA	10KÇ1NA	10KÇ1.25NA	10KÇ	10KÇ0.5NA	10KÇ1NA	10KÇ1.25NA
25°C	41.54	39.8	43.44	42.56	38.1	-4.3	4.6	2.5	-8.3
200°C	30.45(-26.7)	34.5(-13.3)	36.57(-15.8)	32.12(-24.5)	30.3(-20.4)	13.2	20.1	5.5	-0.4
400°C	38.26(-7.9)	38.7(-2.6)	43.58(0.3)	41.33(-2.9)	43.2(13.3)	1.2	13.9	8.0	12.9
600°C	37.19(-10.5)	24.2(-39.1)	32.30(-25.6)	31.02(-27.1)	29.8(-21.8)	-34.8	-13.1	-16.6	-19.9

*Ortam sıcaklığındaki (-25°C) dayanımlarına göre değişim %



Şekil 4.12. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları



Şekil 4.13. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının basınç dayanımları kaybı

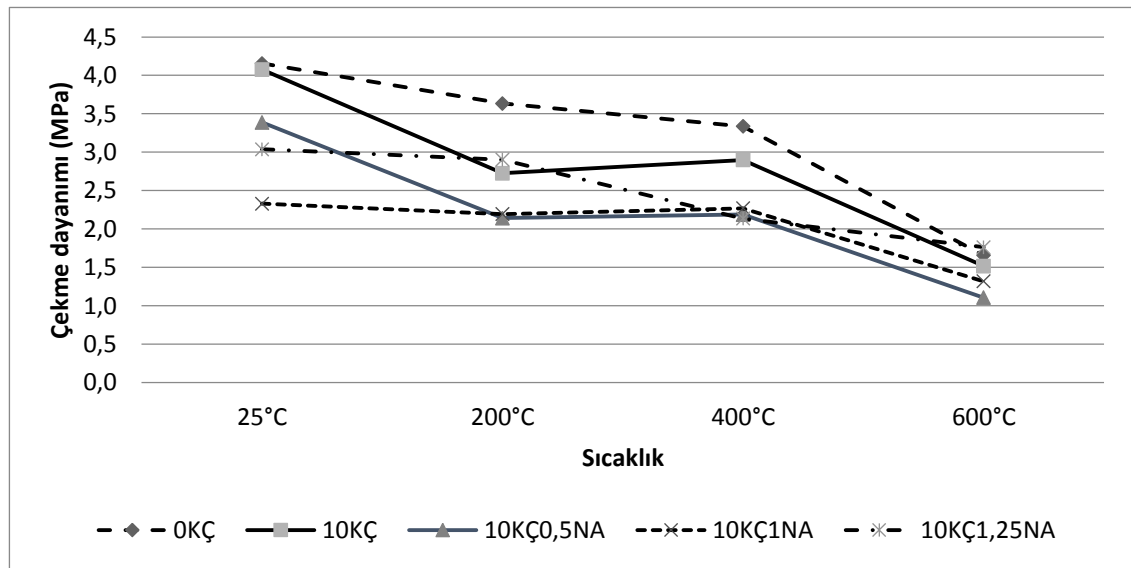
Çizelge 4.7 ve Şekil 4.14, 0KÇ, 10KÇ, 10KÇ0.5NA, 10KÇ1NA ve 10KÇ1.25NA beton karışımlarının farklı derecelerde sıcaklıklara maruz kaldıkları zaman ortaya çıkan çekme dayanımlarını göstermektedir. 0KÇ'ye kıyasla en düşük çekme dayanımı, 10KÇ0,5NA'da yaşanmıştır. 25°C'ye kıyasla 600°C'deki çekme dayanımı kayıpları,

0KÇ, 10KÇ, 10KÇ0,5NA, 10KÇ1NA ve 10KÇ1.25NA için sırasıyla -%60, -%63, -%67, -%43 ve -%42 olarak gözlenmiştir. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kırmızı çamur ve nano- Al_2O_3 'lı betonların çekme dayanımı kayıpları, kontrol (0KÇ) betonlarının çekme dayanımı kayıplarıyla karşılaştırıldığında daha düşüktür. Genel olarak sonuçlar, sıcaklığının artışıyla, betonun basınç ve yarmada çekme dayanımını azalttığını göstermektedir (Hager 2013; Pineaud *et al.* 2016; Xiang *et al.* 2016). Şekil 4.15'te başlangıçtaki 25°C'lik dayanımlara kıyasla farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları gösterilmiştir.

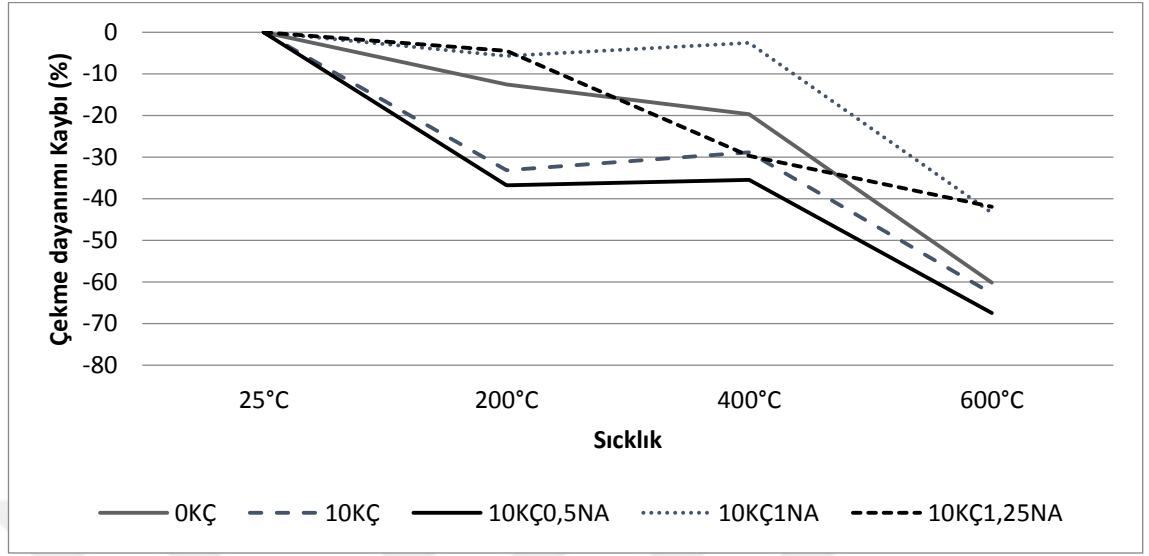
Çizelge 4.7. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları

Sıcaklık	Çekme dayanımı (MPa) (*)					Kontrol numunesine karşı değişim (%)			
	0KÇ	10KÇ	10KÇ0.5NA	10KÇ1NA	10KÇ1.25NA	0KÇ	10KÇ	10KÇ1NA	10KÇ1.25NA
25°C	4.2	4.1	3.4	2.3	3.0	-1.9	-18.4	-44.0	-26.9
200°C	3.6(-12.5)	2.7(-33.1)	2.1(-36.8)	2.2(-5.7)	2.9(-4.5)	-25.0	-41.1	-39.6	-20.2
400°C	3.3(-19.7)	2.9(-28.9)	2.2(-35.5)	2.3(-2.6)	2.1(-29.7)	-13.1	-34.4	-32.0	-36.0
600°C	1.7(-60.2)	1.5(-62.8)	1.1(-67.4)	1.3(-43.4)	1.8(-42.0)	-8.3	-33.3	-20.3	6.5

*Ortam sıcaklığındaki (25°C) dayanımlarına göre değişim %



Şekil 4.14. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının yarmada çekme dayanımları



Şekil 4.15. Farklı sıcaklıklara maruz bırakılan beton karışımlarının çekme dayanımları kaybı

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Farklı kırmızı çamur ve Nano- Al_2O_3 oranları kullanılarak üretilen beton numunelerinde yüksek sıcaklık sonrası meydana gelen değişimlerin incelendiği bu tez kapsamında, üretilen beton numuneleri yüksek sıcaklığa maruz bırakılmış, permeabilite ve mekanik özelliklerindeki değişimlerin belirlenmesi için kontrol deneyleri yapılmıştır. Çalışma yüksek sıcaklık etkisi altında optimum kırmızı çamur oranını belirlemek için yapılan birinci kısım çalışmaları ve bulunan optimum kırmızı çamur oranının özelliklerini iyileyen ikinci kısım çalışmaları içermektedir.

Çalışmanın birinci aşamasında çimento miktarlarının %0, %10, %15 ve %20'si oranlarında kırmızı çamur kullanılarak üretilen 4 farklı karışım grubu hazırlanmıştır. Yüksek sıcaklığın etkisini incelemek için her bir sıcaklık grubu için basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ağırlık kaybı ölçümü, betonun basınçlı su geçirimsizliği deneyi ve kılcal emilim deneyleri yapılmıştır. Bölüm 4'te Araştırma bulguları kısmında verilen değerlerden yola çıkılarak bulunan sonuçlar aşağıdaki gibidir:

- Kontrol betonuna kıyasla kırmızı çamurun oranının yüksek olduğu 15KÇ ve 20KÇ beton gruplarında ağırlık kaybının daha yüksek olduğu, kırmızı çamur DTA-TGA eğrisinden özellikle KÇ'nin ağırlık kaybının fazla olduğu sıcaklıklarda (özellikle 300°C) bu kaybın daha fazla olduğu görülmüştür.
- 25°C'de, basınç dayanımı 10KÇ diğer KÇ'li gruplara göre daha iyi bir değere ulaşmış ve 15KÇ, 20KÇ gruplarında basınç dayanımı azalmıştır. 0KÇ'ye göre, 10KÇ, 15KÇ ve 20KÇ için sırasıyla %4.3, %14.8 ve %26.3'lük bir azalma gözlenmiştir. Buna karşın yarmada çekme dayanımı 15KÇ, daha sonra 10KÇ'de en uygun değere ulaşmıştır ve 20KÇ'de ise dayanımda en yüksek kayıp yaşanmıştır.
- Betonların mekanik özelliklerindeki değişim, bazı farklılıklar olsa bile sıcaklık artışı ile dayanım azalması şeklinde görülmüştür. 200°C'de, incelenen tüm betonların basınç dayanımları, 25°C'deki dayanımlarına göre %13-27 azalmıştır. Tüm karışımlar 300°C sıcaklığa kadar ısıtıldıklarında basınç dayanımlarında belirgin bir

düşüş gözlemlenmiştir. 20KÇ beton numuneleri, 0KÇ basınç dayanımının yaklaşık %34.0'ında en büyük azalmayı göstermiştir. 400°C'de ise, 0KÇ'ye göre 10KÇ'nin basınç dayanımı %1.2 oranında artarken, 15KÇ ve 20KÇ'nin basınç dayanımında sırasıyla %15.8 ve %23.8 oranında bir azalma meydana gelmiştir. 400°C'de tüm betonların dayanımlarında küçük bir düşüş gözlemlenmiştir. Özellikle 400°C'de KÇ'nin olumlu bir etkisinin olduğu, KÇ'li numunelerin davranışını açıklamak için daha detaylı incelemelerin yapılması gerekmektedir. 600°C sıcaklıkta, 0KÇ ile karşılaştırıldığında 10KÇ'nin basınç dayanımında maksimum azalma meydana geldiği görülmüştür. 0KÇ'ye kıyasla, 800°C sıcaklıkta 20KÇ'nin basınç dayanımında azami azalma meydana gelmiştir.

- Yarmada çekme dayanımı açısından 25°C'de 10KÇ ve 15KÇ grupları uygulanan sıcaklıklar sonrası hemen hemen aynı sonuçlar vermiş fakat KÇ'li gruplarda 0KÇ'ye göre düşüşler daha fazla görülmektedir. Fakat bu düşüşler 15KÇ ve 20KÇ'li gruplara göre 10KÇ'de daha az olmuştur.
- Tüm numuneler 600°C ve 800°C'de ısıldıktan sonra numunelerin yüzeylerindeki çatlaklar görünür hale gelmiştir ve 800°C'de ısıtılan kırmızı çamurlu betonların renkleri kırmızıdan griye dönüşmüştür. Sıcaklık sonrası dış yüzeyde gri rengi görülmüş ve özellikle yarmada çekme numuneleri üzerinde bu renk değişiminin kesit boyunca iç kısımlara doğru pembemsi bir renk aldığı belirlenmiştir. Bu durum özellikle yüksek sıcaklık sonrası renk değişimiyle betonun maruz kaldığı sıcaklığın tahmininin yapıldığı çalışmalarda kullanılan malzeme özelliklerinin önemli olacağına işaret etmektedir.
- Su permeabilite testi, 0KÇ'ye kıyasla, 10KÇ'nin en düşük su penetrasyon derinlik değerini verdiği görülmüş, daha sonra 15KÇ ve 20KÇ'nin en yüksek su penetrasyon derinliğine sahip olduğu görülmüştür. Kırmızı çamur içeriğinin geçirgenlik üzerindeki etkisi açıkça görülebilmektedir. Daha yüksek bir kırmızı çamur içeriği, geçirgenlik katsayısındaki artışı oluşturmuştur. Normal beton ile kırmızı çamurlu beton arasındaki fark yine çok açık bir şekilde ortaya konulmuştur.
- Betonun kılcal geçirimliliği, kırmızı çamur ilavesinin oranına bağlı olarak değişmektedir. İlk olarak en düşük absorbasyon değeri 10KÇ'de daha sonra 20KÇ'de görülmüş ve en yüksek absorbasyon değeri 15KÇ'den elde edilmiştir. Ayrıca, 0KÇ

ve 10KÇ ile aynı absorbasyon değeri elde edilmektedir. 15KÇ grubunun 20KÇ'den daha fazla su emmesi sonucunun açıklanmasında numunelerin boşluk yapısının daha detaylı analizi gerekmektedir. Örneğin; (civalı porozimetre deneyi: MIP ve BET yöntemi gibi).

İkinci aşamada 2 ve 3 maddeler incelendiğinde optimum kırmızı çamur oranı (10KÇ) esas alınarak bu betonların yüksek sıcaklığa dayanımı üzerinde nano Al_2O_3 'nın etkisini belirlemek için yine çimento oranının %0, %0.5, %1 ve %1.25'i oranlarında nano- Al_2O_3 eklenerek 4 farklı beton grubu daha hazırlanmıştır. Yüksek sıcaklığın etkisini incelemek için her bir sıcaklıkta basınç dayanımı, çekme dayanımı ve ağırlık kaybı analizleri yapılmıştır.

Kırmızı çamur ve nano Al_2O_3 içeren ve yüksek sıcaklığa maruz bırakılan betonlar üzerinde yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- 200°C'de en yüksek ağırlık kaybı, 0KÇ'de ve 10KÇ'de gözlenmiştir, buna karşın 10KÇ1NA ve 10KÇ1.25NA'da 400°C'de gözlenmiştir. 600°C'de maksimum ağırlık kaybı, 10KÇ'de (%8.8) ve 10KÇ1NA (%8.6) görülürken, 10KÇ0.5NA ve 10KÇ1.25NA, 0KÇ tarafından elde edilenle aynı değeri vermektedir. Beton karışımlarının tümünün ağırlık kaybı yaklaşık olarak aynıdır. Bu durumun sebebi olarak Nano- Al_2O_3 oranının düşük olması gösterilebilir.
- 25°C'de, 10KÇ0.5NA ve 10KÇ1NA'nın basınç dayanımları 0KÇ'den biraz daha yüksek olmasının aksine 10KÇ ve 10KÇ1.25NA basınç dayanımları 0KÇ'den daha düşük çıkmıştır. Nano- Al_2O_3 %1 oranında KÇ %10 oranında kullanıldığında basınç dayanımının arttığını ve daha yüksek oranlarda ise azaldığını göstermektedir. Ama en iyi sonucu %0.5 NA'lı %10 KÇ içeren grubun gösterdiği görülmektedir. Öte yandan, %1'den fazla nano- Al_2O_3 ilave edildiğinde topaklaşabilme ve işlenebilme sıkıntısıyla basınç dayanımında azalmaya neden olabilmektedir.
- Yarmada çekme dayanımı 10KÇ'de, daha sonra 10KÇ0.5NA'da en uygun değerlere ulaşmış ve 10KÇ1NA'da dayanımda maksimum kayıp yaşanmıştır.

- Tüm numunelerin sıcaklıklarındaki artışla birlikte basınç dayanımlarının azaldığı gözlenmiştir. 200°C'de, 0KÇ'ye kıyasla 10KÇ, 10KÇ0.5NA ve 10KÇ1NA basınç dayanımları sırasıyla %13.2, %20.1 ve %5.5 oranında artarken, 10KÇ1.25NA basınç dayanımı %0.4 oranında azalmıştır. 400°C'de 0KÇ'ye kıyasla, tüm karışımlar 10KÇ, 10KÇ0.5NA ve 10KÇ1NA, 10KÇ1.25NA için sırasıyla %1.2, %13.9, %8 ve %12.9 oranında basınç artışı ile sonuçlanmıştır. Beton 600°C'ye maruz bırakıldıktan sonra, 25°C'ye göre 0KÇ, 10KÇ, 10KÇ0.5NA, 10KÇ1NA ve 10KÇ1.25NA betonlarının dayanımları -%11, -%39, -%26, -%27 ve -%22 oranlarında düşmüştür. Ayrıca 600°C'de, 0KÇ ile karşılaştırıldığında basınç dayanımı kaybı en fazla 10KÇ'de meydana gelmiştir. Sonuçlar, 10KÇ ile nano-Al₂O₃ içeren betonun, maruz bırakılan tüm sıcaklıklarda yüksek basınç dayanım değerini verdiğini göstermektedir.

0KÇ'ye kıyasla en düşük yarmada çekme dayanımı, 10KÇ0.5NA'da yaşanmıştır. Yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan kırmızı çamur ve nano-Al₂O₃'lı betonların yarmada çekme dayanımı kayıpları, kontrol (0KÇ) betonlarının yarmada çekme dayanımı kayıplarıyla karşılaştırıldığında daha düşüktür.

Konu üzerinde çalışma yapacak araştırmacılar için;

- Kırmızı çamurun puzolanik aktivitesinin değerlendirilmesinde daha uzun süreli çalışmaların yapılması,
- Farklı kür yöntemleri ve daha mineral katkı malzemeleri ile özelliklerin değişiminin incelenmesi,
- Yüksek sıcaklık sonrasının farklı soğutma türlerinin etkileri incelenmesi,
- Farklı nano tozlar için oluşacak etkinin incelenmesi,
- Yüksek sıcaklığa maruz kalan kırmızı çamurlu betonun mekanizmasını belirlemek için konu üzerinde detaylı mikroyapısal çalışmaların yapılması (örn. MIP, SEM, BET, XRD, TGA),
- Donma çözülme ve diğer durabilite özelliklerinin incelenmesi,

- Kırmızı çamurlu farklı beton tiplerinin (Örn. yüksek dayanımlı beton ve fiber takviyeli beton) yüksek sıcaklıklardaki özelliklerinin incelenmesi tavsiye edilmektedir.



KAYNAKLAR

- Akol, C., 2010. Genleştirilmiş Vermikulit İçeren Hafif Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Davranış. Y. Lisans Tezi, cumhuriyet üniv., sivas.
- Aköz, F. ve Yüzer, N., (1994). “Yüksek Sıcaklığın Nedenleri ve Betonarme Elemanlara Etkileri”, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, No:3.
- Al-Salloum, Y. A., Almusallam, T. H., Elsanadedy, H. M. and Iqbal, R. A., 2016. Effect of elevated temperature environments on the residual axial capacity of RC columns strengthened with different techniques. *Construction and Building Materials*, 115, 345–361.
- AlSheikh, S. A., 2011. Mechanical properties for high performance concrete exposed to high temperature. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2(2), 0976 –4399.
- Anonim, 1996. TS 1226. Deney eleklere-Metal levhalı yuvarlak veya kare delikli.
- Anonim, 2002. ISO-834. Fire resistance tests-Part 2.
- Anonim, 2004. TS EN 13057. Beton yapılar - Koruma ve tamir için mamul ve sistemler - Deney metotları - Kılcal su emmeye direncin tayini.
- Anonim, 2014. TS EN 12390-1. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 1: Deney numunesi ve kalıplarının şekil, boyut ve diğer özellikleri.
- Anonim, 2012. TS EN 12390-3. Beton-Sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini.
- Anonim, 2010. TS EN 12390-6. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 6: Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımının tayini.
- Anonim, 2010. TS EN 12390-8. Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliğinin tayini.
- Anonim, 2015. TS EN 1097-6. Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini.
- Anonim, 2012. TS EN 197-1. Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri.
- Anonim, 2014. TS EN 934-2. Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme.
- Anonim, 2013. TS EN 1008. Tekstil- Renk haslığı deneyleri- Bölüm b02: Yapay ışığa karşı renk haslığının tayini- Ksenon ark soldurma lambası deneyi.
- Anonim, 2015. TS EN 206. Beton- Özellik, performans, imalat ve uygunluk.
- Anonim, 2016. TS EN 196-1. Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini.
- Ashok P., Sureshkumar, M. P., 2014. Experimental studies on concrete utilising red mud as a partial replacement of cement with hydrated lime. (IOSR-JMCE), 2278-1684.
- Baradan B., Yazıcı H., Ün H., 2010. Beton ve betonarme yapılarda durabilite: Turkey, 975-92122-2-6.
- Beglarigale, A., Yalçinkaya, Ç., Yigiter, H. and Yazıcı, H., 2016. Flexural performance of SIFCON composites subjected to high temperature. *Construction and Building Materials*, 104, 99–108.

- Behfarnia, K. and Salemi, N., 2013. The effects of nano-silica and nano-alumina on frost resistance of normal concrete, *Construction and Building Materials*, 48, 580–584.
- Behnood, A. and Ghandehari, M., 2009. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. *Fire Safety Journal*, 44, 1015–1022.
- Bingöl, A. F. ve Gül, R., 2009. Residual bond strength between steel bars and concrete after elevated temperatures. *Fire Safety Journal*, 44, 854–859.
- Bishetti, P. N. and Pammar, L., 2014. Experimental study on utilization of industrial waste in concrete, *International Journal of Technical Research and Applications*, 2(4), 49-52.
- Farzadnia, N., Abang Ali, A. A. and Demirboga, R., 2013. Characterization of high strength mortars with nano alumina at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 54, 43–54.
- Gölce, C., 2009. Farklı Çimentolarla Üretilen Harçların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Özellikleri. Y. lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniv., Eskişehir.
- Güler, S., 2010. Mineral Katkılı Harçlarda Yüksek Sıcaklığın Mekanik Özelliklere Etkisi. Y. lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniv., Eskişehir.
- Hager, I., 2013. Behaviour of cement concrete at high temperature. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, 61(1).
- Heikal, M., Ismail, M.N. and Ibrahim N.S., 2015. Physico-mechanical, microstructure characteristics and fire resistance of cement pastes containing Al_2O_3 nanoparticles. *Construction and Building Materials*, 91, 232–242.
- Horszczaruk, E., Sikora, P. and Zaporowski, P., 2015. Mechanical properties of shielding concrete with magnetite aggregate subjected to high temperature. *Procedia Engineering*, 108, 39 – 46.
- Horszczaruk, E., Sikora, P., Zaporowski, P., 2015. Mechanical properties of shielding concrete with magnetite aggregate subjected to high temperature. *Procedia Engineering* 108, 39 – 46.
- Karanfil, H., 2007. Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Kalan Betonarme Yapılarda Çelik Donatı Özellik Değişimine Pas Payı Kalınlığının Etkisi. Y. Lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniv., Eskişehir.
- Kaya, Y., 2014. Polimerle İyileştirilmiş Harçların Farklı Kür Koşulları ve Yüksek Sıcaklık Etkisi Altında Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. y. lisans tezi, Gümüşhane Üniv., Gümüşhane.
- Kushwaha, M., Akhtar, S. and Rajput, S., 2013. Development of the self compacting concrete by industrial waste (Red Mud). *International Journal of Engineering Research and Application*, 3(4), 2248-9622.
- Mahsanlar, N., 2006. Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Davranışı. Y. Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniv., İstanbul.
- Medeiros, M.H.F. and Helene, P., 2009, Surface treatment of reinforced concrete in marine environment: Influence on chloride diffusion coefficient and capillary water absorption. *Construction and Building Materials*, 23, 1476–1484.
- Metilda, D. L., Selvamony C., Anandakumar R., seeni A., 2015. Investigations on optimum possibility of replacing cement partially by redmud in concrete. *Scientific research and essays*, 1992-2248.

- Nath, H., Sahoo, P. and Sahoo, A., 2015. Characterization of red mud treated under high temperature fluidization. *Powder Technology*, 269, 233–239.
- Nazari, A. and Riahi, S., 2011. The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete. *Composites: Part B*, 42, 570–578.
- Oltulu, M., 2011. Mineral Katkılı Çimento Harçlarının Fiziko-Mekanik Özellikleri ve Mikroyapısı Üzerine Nano-SiO₂, Nano-Al₂O₃ ve Nano-Fe₂O₃ Tozlarının Tekli ve Bileşik Etkisi. Doktora Tezi, Atatürk Üniv. Erzurum.
- Özbey, S., 2009. Farklı Çimento Tipleri ile Üretilen Betonların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Fiziksel ve Mekanik Özellikleri. Y. Lisans tezi, Eskişehir Osmangazi Üniv., Eskişehir.
- Pineaud, A., Pimienta, P., Rémond, S. and Carré, H., 2016. Mechanical properties of high performance self-compacting concretes at room and high temperature. *Construction and Building Materials*, 112, 747–755.
- Rana, A.Y. and Sathe, N. A., 2015. Analysing the potential substitute of red mud in concrete adding lime and silica. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2250-2459.
- Rathod, R. R., Kulkarni, P. M., Shingade, V. S. and Deshmukh, S. S., 2015. Suitability of red mud as an admixture in concrete. *International Journal of Modern Trends in Engineering and Research*, 2349-9745.
- Rathod, R. R., Suryawanshi, N. T. and Memade, P. D., 2014. Evaluation of the properties of red mud concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 2278-1684.
- Sancak, E., Dursun S. Y., Simsek O., 2008. Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*, 30: 715–721.
- Sawant, A. B., Kumthekar M. B., Diwan V. V., Hiraskar K. G., 2012. Experimental study on partial Replacement of Cement by Neutralized Red Mud in Concrete. *International J. Eng. Advanced Tech.*, 2249 – 8958.
- Tang, L., 2014. Study of the possibilities of using red mud as an additive in concrete and grout mortar. *Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co*, 1402-3091.
- Uçarkoşar, B., 2013. Pirinç Kabuğu Katkılı Yüksek Dayanımlı Betonun Yüksek Sıcaklık Performansı. Y. Lisans tezi, Yıldız Teknik Üniv., İstanbul.
- Uysal A., 2004. Yüksek Sıcaklığın Beton Üzerindeki Etkileri. Y. Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniv., İstanbul.
- Xiang Xiong, M., and Richard Liew, J.Y., 2016. Mechanical behaviour of ultra-high strength concrete at elevated temperatures and fire resistance of ultra-high strength concrete filled steel tubes. *Materials and Design*, 104, 414–427.
- Zhu, W. and Bartos, P. J. M., 2003. Permeation properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 33, 921–926.

ÖZGEÇMİŞ

22.05.1987 Yemen'in Taiz şehrinde doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Yemen'in başkenti Sana'da tamamladı. 2007 yılında Sana Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü kazandı ve 2011 yılında mezun oldu. Aralık 2011 tarihinde Sana Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde asistan olarak çalışmaya başladı. 2014 yılında Türkiye Cumhuriyetinin düzenlediği burs programına başvurarak Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemeleri alanında Yüksek Lisans yapmaya hak kazandı.