



T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK SICAKLIĞIN
DOĞAL ZEOLİT KATKILI BETONLAR
ÜRERİNDEKİ ETKİSİ

RECEP ÖCAL

OCAK 2014

T.C.
NİĞDE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK SICAKLIĞIN
DOĞAL ZEOLİT KATKILI BETONLAR
ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

RECEP ÖCAL

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

OCAK 2014

Recep ÖCAL tarafından **Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU** danışmanlığında hazırlanan “**Yüksek Sıcaklığın Doğal Zeolit Katkılı Betonlar Üzerindeki Etkisi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.


Başkan : Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Niğde Üniversitesi


Üye : Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR, Niğde Üniversitesi


Üye : Yrd. Doç. Dr. İbrahim Özgür DENEME, Aksaray Üniversitesi

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/..../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu'nun/..../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20...

Doç. Dr. Osman SİVRİKAYA
MÜDÜR

ÖZET

YÜKSEK SICAKLIĞIN DOĞAL ZEOLİT KATKILI BETONLAR ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

ÖCAL, Recep
Niğde Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU
Ocak 2014, 97 sayfa

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığın doğal zeolit katkıli betonun bazı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Doğal zeolit kullanılarak %0, %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 ikame miktarlarında 7 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımlarda su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuş ve hiperakışkanlaştırıcı kullanılarak çökme değerleri 13 ± 2 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Numunelerin kuru birim ağırlık, su emme oranları, boşluk oranları, basınç dayanımları ve ısı iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Ayrıca, numunelerin yüksek sıcaklık karşısındaki davranışlarını belirlemek amacıyla, numuneler elektrikli fırında 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıklarda iki saat süreyle bekletilmişlerdir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmüş, ayrıca numunelerin mineral ve doku değişimlerinin mikroskopik analizi yapılmıştır. Doğal zeolit katkısı numunelerin ilk günlerdeki basınç dayanımlarını azaltmış, ilerleyen günlerde ise arttırmıştır. Doğal zeolit katkısının yüksek sıcaklık etkisi altında beton dayanımına olumlu etkileri görülmüştür. Buna ek olarak karışımlarda doğal zeolit miktarı arttıkça beton agregalarının yüksek sıcaklıktan daha az etkilendikleri görülmüştür. Ayrıca doğal zeolit ilavesinin betonun ısı iletkenlik katsayısını düşürdüğü gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Doğal zeolit, beton, yüksek sıcaklık, basınç dayanımı, ısı iletkenlik, polarizan mikroskop analizi, mikroyapı.

SUMMARY

THE EFFECT OF ELEVATED TEMPERATURE ON THE NATURAL ZEOLITE SUBSTITUTED CONCRETE

ÖCAL, Recep

Nigde University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU

January 2014, 97 pages

In this study, the effect of elevated temperature on the properties of natural zeolite substituted concrete was investigated. Seven different mixtures were prepared by using natural zeolite in substitution ratios of 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 30% and 40%. The water/binder ratio was kept constant in the mixtures and slump values were set to be 13 ± 2 cm by using hyperplasticizer. The dry unit weights, water absorption ratios, porosity ratios, compressive strengths and thermal conductivity coefficients of the mixtures were measured. Also, the specimens were left in the electric furnace at the temperature of 250, 500, 750 and 1000 °C in order to determine the behavior of the specimens at elevated temperatures. and they were left for two hours at these temperatures. The compressive strengths and ultrasonic wave velocity values of the specimens which were exposed to elevated temperatures were measured. In addition the microscopic analysis of mineral and texture changes of the specimens was also carried out. Natural zeolite substitution decreased the compressive strength of the specimens in early days, but increased at later days. The positive effects were observed about natural zeolite substitution on the concrete strength under the influence of elevated temperatures. In addition it was observed that, as the amount of natural zeolite increased in the mixtures, concrete aggregates were less affected from elevated temperatures. Additionally, natural zeolite substitution decreased the thermal conductivity coefficient of the concrete.

Keywords: Natural zeolite, concrete, elevated temperature, compressive strength thermal conductivity, polarized microscope analysis, microstructure.

ÖN SÖZ

Bu çalışmada, dünyada birçok sektörde yoğun olarak kullanılan doğal zeolit maddesinin beton içerisinde mineral katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmak amacıyla laboratuvar deneyleri yürütülmüştür. Farklı ikame oranlarında doğal zeolit içeren karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışımlar kullanılarak hazırlanan betonların, boşluk oranları, basınç dayanımları, ısı iletkenlik katsayıları değerleri belirlenmiştir. Ayrıca numuneler elektrikli fırında 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıklarda iki saat süreyle bekletilmişlerdir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler üzerinde, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmüş ve mineral ve doku değişimlerinin mikroskopik analizi yapılmıştır. Elde edilen deney sonuçlarına göre, doğal zeolit beton içerisinde mineral katkı olarak kullanılabilirliği yorumlanmaya çalışılmıştır.

Hem lisans hem de yüksek lisans eğitimim süresince, her türlü yardım ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU'na içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında desteklerinden ötürü Sayın Yrd. Doç. Dr. Semiha AKÇAÖZOĞLU'na, Doç. Dr. Fatih ÖZCAN'a, Doç. Dr. Mustafa SARIDEMİR'e, Doç. Dr. Metin H. SEVERCAN'a ve Jeoloji Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Sayın Doç. Dr. Mustafa FENER'e teşekkür ederim. Laboratuvar çalışmalarında, santral operatörü Sayın Mehmet ALİM'e, laboratuvar teknisyeni Sayın Şahin ONGİ kardeşlerime yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Bu tez çalışmasını FEB 2013/24 proje numarası ile destekleyen Niğde Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimine teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman ve her konuda yanımda olan, desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aileme şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

ÖZET	iii
SUMMARY	iv
ÖN SÖZ	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiv
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II YÜKSEK SICAKLIK VE YÜKSEK SICAKLIK ALTINDA BETONUN DAVRANIŞI	4
2.1 Yüksek Sıcaklık Kaynakları	4
2.1.1 Yangın.....	4
2.1.2 Endüstri fırın bacaları	5
2.1.3 Hava alanı pistleri	6
2.1.4 Nükleer reaktörler	6
2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Elemanlara Etkileri	6
2.2.1 Yüksek sıcaklığın betona etkileri.....	8
2.2.1.1 Çimento hamuru	9
2.2.1.2 Agregası.....	11
2.2.1.3 Mineral katkı malzemeleri	12
2.2.2 Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel özelliklerine etkileri.....	14
2.2.2.1 Isı yayılım katsayısı	15
2.2.2.2 Isı iletim katsayısı	15

2.2.2.3 Genleşme katsayısı	16
2.2.2.4 Özgül ısı.....	16
2.2.2.5 Isı şoku parametresi	16
2.2.2.6 Birim hacim ağırlık.....	17
2.2.2.7 Yüksek sıcaklığın betonun rengine etkileri	17
2.2.3 Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkileri.....	18
2.2.3.1 Basınç dayanımı.....	19
2.2.3.2 Çekme dayanımı	21
2.2.3.3 Elastisite modülü.....	22
BÖLÜM III DOĞAL ZEOLİT	24
3.1 Zeolitin Tanımı	24
3.2 Zeolitin Fiziksel Özellikleri	26
3.3 Zeolitlerin Kullanım Alanları	30
3.3.1 Zeolitlerin genel kullanım alanları.....	30
3.3.2 Zeolitlerin hammadde olarak kullanıldığı alanlar.....	31
3.3.3 Zeolitin inşaat sektöründeki kullanım alanları.....	32
3.4 Doğal Zeolitin Dünyadaki Yeri	35
3.5 Doğal Zeolitin Türkiye’deki Yeri	38
BÖLÜM IV ISI İLETKENLİK	41
4.1 Isı İletkenliği Ölçüm Yöntemleri.....	41
4.1.1 Eksenel akış yöntemleri	41
4.1.1.1 Mutlak eksenel ısı akış yöntemi.....	42
4.1.1.2 Referans numuneli ölçüm yöntemi	42
4.1.1.3 İzolasyonlu veya izolasyonsuz ısı akış ölçüm yöntemi	43
4.1.2 Plaka metodu ile ısı iletkenliği ölçüm yöntemi (Koruyuculu sıcak plaka yöntemi).....	43

4.1.3 Sıcak tel yöntemi	45
4.1.4 Sıcak kutu (Hot - box) yöntemi	46
BÖLÜM V MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA.....	48
5.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri.....	48
5.1.1 Çimento.....	48
5.1.2 Doğal zeolit.....	49
5.1.3 Agregası.....	50
5.1.4 Kimyasal katkı malzemesi	53
5.1.5 Karışım ve bakım suyu	53
5.2 Beton Karışım Oranları.....	54
5.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması	55
5.4 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar	57
5.4.1 Kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı tayini	57
5.4.2 Basınç dayanımı.....	58
5.4.3 Ultrases geçiş hızının belirlenmesi	60
5.4.4 Isı iletkenlik katsayısının belirlenmesi	61
5.4.5 Mineral ve doku değişimlerinin mikroskopik analizi	62
5.4.5.1 İnce kesitlerin hazırlanması	63
5.4.5.2 İnce kesitlerin bölgelere ayrılması	64
5.4.5.3 Polarizan mikroskop analizi.....	65
BÖLÜM VI BULGULAR VE TARTIŞMA	67
6.1 Kuru Birim Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı	67
6.2 Basınç Dayanımı.....	68
6.3 Yüksek Sıcaklığın Basınç Dayanımına Etkisi	70
6.4 Yüksek Sıcaklığın Ultrases Geçiş Hızına Etkisi.....	73
6.5 Isı İletkenlik Katsayıları.....	75

6.6 Mineral ve Doku Değişimlerinin Mikroskopik Analiz Sonuçları	76
BÖLÜM VII SONUÇLAR.....	83
KAYNAKLAR.....	86
ÖZ GEÇMİŞ.....	97

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Doğal zeolitin kimyasal özellikleri.....	27
Çizelge 3.2. Dünya klinoptilolit dağılımı	37
Çizelge 3.3. Yörelere göre Türkiye’deki zeolit mineral bileşimleri	40
Çizelge 5.1. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri.....	48
Çizelge 5.2. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri	49
Çizelge 5.3. Doğal zeolitin kimyasal özellikleri.....	49
Çizelge 5.4. Deneysel çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özellikleri	50
Çizelge 5.5. İnce agrega (0-3 mm) elek analizi sonucu.....	51
Çizelge 5.6. İnce agrega (0-6 mm) elek analizi sonucu.....	51
Çizelge 5.7. İri agrega (5-16 mm) elek analizi sonucu.....	51
Çizelge 5.8. Kullanılan agrega granülometrisi	52
Çizelge 5.9. Kullanılan karma ve kür suyunun analiz sonuçları	54
Çizelge 5.10. Bir metreküp betonu oluşturan malzeme miktarları	55
Çizelge 6.1. Beton karışımlarına ait kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı değerleri	67
Çizelge 6.2. Çalışmada kullanılan betonların basınç dayanımları (MPa).....	69
Çizelge 6.3. Havada soğutulmuş beton numunelerinin basınç dayanımları (MPa).....	70
Çizelge 6.4. Suda soğutulmuş beton numunelerinin basınç dayanımları (MPa)	70
Çizelge 6.5. Havada soğutulmuş numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri (km/sn) ..	73
Çizelge 6.6. Suda soğutulmuş numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri (km/sn)	73
Çizelge 6.7. Numunelerin ısı iletkenlik katsayıları.....	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS EN 13501-2, 2009).....	5
Şekil 2.2. Boşluk suyu transferi	9
Şekil 2.3. Doygun buhar basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki	11
Şekil 2.4. Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri.....	14
Şekil 2.5. Çeşitli betonlar için ısı yayılım katsayısı.....	15
Şekil 2.6. Betonun basınç dayanımının yükleme durumuna göre sıcaklıkla değişimi (Neville,2000).....	19
Şekil 2.7. Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000).....	20
Şekil 2.8. Puzolan katkılı ve katkısız betonların çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Guisse vd., 1996)	21
Şekil 2.9. Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Aköz vd., 1995)	22
Şekil 2.10. Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000).....	22
Şekil 2.11. Farklı beton numuneleri için sıcaklık- elastisite modülü ilişkisi (Savva vd., 2005).....	23
Şekil 3.1. Zeolit kristal yapısını oluşturan dörtyüzeylilerin zincir bağlanmaları.....	28
Şekil 3.2. SiO ₄ ve AlO ₄ dörtyüzeylilerinden oluşan çökyüzeylilerin (a)yapay zeolitlerde, (b) foyasitte yapıyı oluşturmak için bağlanışları	29
Şekil 4.1. Referans numuneli ölçüm yöntemi.....	42
Şekil 4.2. Isı akışı diyagramı (ASTM C177, 1985).....	44
Şekil 4.3. Plaka yöntem cihazı (ASTM C177, 1985)	45
Şekil 4.4. Sıcak tel yöntemi (ASTM C1113, 1990).....	45
Şekil 4.5. Sıcak tel cihazının diyagramı (ASTM C1113, 1990).....	46
Şekil 4.6. Hot Box Cihazı Konfigürasyonu (Arı, 2009).....	47
Şekil 5.1. Doğal zeolit granülometri eğrisi.....	50
Şekil 5.2. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi.....	53
Şekil 5.3. Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi	61
Şekil 6.1. Deney numunelerinin su emme oranları ile boşluk oranları arasındaki ilişki	68
Şekil 6.2. Çalışma kapsamında üretilen betonların basınç dayanımları	69
Şekil 6.3. Havada soğutulmuş beton numunelerinin basınç dayanımları (MPa).....	71

Şekil 6.4. Suda soğutulmuş beton numunelerinin basınç dayanımları (MPa)	72
Şekil 6.5. Havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile ultrases hızları arasındaki ilişki	74
Şekil 6.6. Suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile ultrases hızları arasındaki ilişki	75
Şekil 6.7. Isı iletkenlik ve kuru birim ağırlık arasındaki ilişki	76
Şekil 6.8. Yüksek sıcaklığın numune yüzeyinden merkeze doğru etkileri	78
Şekil 6.9. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerde DZ miktarı ile bazalt agregası arasındaki bozuşma ilişkisi	80
Şekil 6.10. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerde DZ miktarı ile kuvars agregası arasındaki bozuşma ilişkisi	81
Şekil 6.11. Doğal zeolit miktarının matriks bozuşmasına etkisi	82

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 5.1. Taze betonun hazırlanması.....	55
Fotoğraf 5.2. Taze betonların kalıplara yerleştirilmiş hali.....	56
Fotoğraf 5.3. 30x30x10 cm ebatlarındaki numune	57
Fotoğraf 5.4. Basınç dayanımı test cihazı.....	59
Fotoğraf 5.5. Deney numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz bırakılması	60
Fotoğraf 5.6. Numunelerin ultrases geçiş hızının belirlenmesi	61
Fotoğraf 5.7. Sıcak kutu (hot box) deney aleti	62
Fotoğraf 5.8. İnce kesit hazırlama süreci.....	64
Fotoğraf 5.9. İnce kesit yapılmış numunelerin bölgelere ayrılması	65
Fotoğraf 5.10. Polarizan mikroskop	66

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
t	Yangın süresi
T ₀	Başlangıç sıcaklığı
a	Isı yayılım katsayısı
λ	Isı iletim katsayısı
c	Özgül ısı
β	Birim ağırlık
α	Genleşme katsayısı
E	Elastisite modülü
σ_c	Malzemenin çekme mukavemeti
P	Isı şoku parametresi

Kısaltmalar	Açıklama
ACC	Autoclaved cellular concrete
ASTM	Amerikan deney ve malzeme birliği
DZ	Doğal zeolit
HA	Hiper akışkanlaştırıcı
LZC	Light zeolite concrete
MPa	Megapascal
PÇ	Portland çimento
TS EN	Türk Standartları Enstitüsü

BÖLÜM I

GİRİŞ

Betonun durabilitesini etkileyen önemli fiziksel bozulma süreçlerinden birisi de yüksek sıcaklıktır. Yüksek sıcaklık yapıda kalıcı hasarlara neden olabilmekte; yüksek sıcaklığa maruz kalan yapılar genellikle servis dışı kalabilmektedir (Khoury ve Majorana, 2003a). Yanıcı olmayan bir malzeme olması dolayısıyla yangına dirençli sayılabilen beton; yangın sırasında belirli bir süre hasar görmemekte ve yüksek sıcaklıkta zehirli gazlar çıkarmamaktadır (Li ve Ding, 2003). Bununla beraber betonun bu direnci belirli süre ve sıcaklıklar için geçerlidir (Kızılkant ve Yüzer, 2008). Yüksek sıcaklığın beton üzerindeki etkileri birçok faktöre bağlıdır ve bu faktörler betonun basınç dayanımını önemli derecede etkilemektedir.

Betonun hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri yüksek sıcaklık etkisiyle değişmektedir. Yüksek sıcaklık, genel olarak betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü ve betonun donatı ile aderansı gibi özelliklerinde bozulmaya sebep olmaktadır (Lau ve Anson, 2006). Numune yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında boşluklarındaki serbest su ve hidrate çimento hamurunda bulunan bazı kimyasal bağlı sular açığa çıkmakta ve büyük miktarda enerji tüketilmektedir (Othuman ve Wang, 2011). Serbest su 100 °C civarında açığa çıkar ve 120 °C'de tamamen yok olur. Yaklaşık 150 °C sıcaklıkta kalsiyum- silikat- hidrat (C-S-H) jelleri içinde bulunan kimyasal bağlı sular kaybedilmeye başlar ve bu kayıp hızı 270 °C civarında maksimum seviyeye ulaşır (Othuman ve Wang, 2011; Hertz, 2005; Al-Sibahy ve Edwards, 2012). Çimento hamuru ve agreganın termal genişleme katsayısının farklı olması, agreganın genişmesi ve çimento hamurunun rötresi sonucu termal gerilmeler oluşur. Oluşan gerilmeler sonucu agrega ve çevresindeki çimento hamuru arayüzünde kırılmalar gerçekleşir ve bu durum basınç dayanımında kayıplara sebep olur (Cülfik ve Özturan, 2010). Sıcaklık 300 °C'ye ulaştığında mikroçatlaklar yayılmaya başlar, mekanik özellikler ile ısıl iletkenlik özellikleri bu aşamada bozulmaya başlar ve bununla bağlantılı olarak genişmeler gerçekleşir (Hertz, 2005; Demirel ve Keleştemur, 2010). 400-600 °C sıcaklıklarda tamamen kuruma gerçekleşir ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kristalleri orijinal bileşenlerine ayrışır (kalsiyum oksit ve su) ve daha zayıf bir beton ortaya çıkar (Go vd., 2010). 600 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda C-S-H jelleri daha fazla bozunur ve

pullanmalar gözlenir. 1150 °C’de çimento hamuru camsı faza dönüşür (Al-Sibahy ve Edwards, 2012).

Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımına, çimento tipi, mineral katkı tipi ve miktarı, agrega türü, su/çimento oranı gibi kullanılan malzeme özellikleri ve sıcaklığa maruz kalınan süre, nem durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi çevresel faktörler etken olmaktadır (Yüzer vd., 2007).

Puzolanik özellikteki mineral katkıların beton içerisindeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i tüketmesi sebebiyle yüksek sıcaklık karşısında beton dayanımını olumlu yönde etkilediği bilinmektedir (Haddad and Shannis, 2004). Doğal zeolit katkısının da aynı zamanda betonun yüksek sıcaklığa karşı dayanımını arttırdığı yapılan araştırmalarda belirtilmiştir (Bilim, 2011). Zeolit molekül elek yapısında olması, zeolitle üretilen betonların yüksek sıcaklığa karşı dayanımının artmasının yanında ısıl iletkenlik değerlerinin de düşmesine sebep olmaktadır. Bu açıdan bakıldığında doğal zeolit diğer mineral katkılara oranla daha avantajlı olmaktadır.

Zeolit doğal ya da yapay olmak üzere atomik düzeyde gözenekli yapıya sahip sulu alümina silikat bileşiklerine verilen isimdir. İlk olarak İsveç’li mineralog Fredrick Cronstedt tarafından 1756 yılında bulunmuştur. Bu kristaller ısıtıldıklarında yapılarında bulunan suyun köpürmesinden dolayı Yunanca kaynayan taş anlamına gelen zeolit adını almıştır.

Zeolitlerin endüstriyel alanlarda kullanılabilirdiği 1940’lı yıllarda ortaya konulmasına rağmen tali mineral olarak volkanik kayaların boşluk ve çatlaklarında bulunduğu bilinmesi kullanımlarını sınırlamıştır. Ancak 1950’li yıllardan sonra denizel ve gölsel tüflerin de zeolit içerdiklerinin saptanmasıyla, doğal zeolitlerin kullanım alanları hızla genişlemiştir.

Zeolitlerin başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri olan; iyon değişikliği yapabilme adsorbsiyon ve buna bağlı moleküler elek yapısı, silis içeriği, ayrıca tortul zeolitlerde açık renkli olma, hafiflik, küçük kristallerin gözenek yapısı zeolitlerin çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmasına neden olmuştur.

Son yıllarda önemli bir endüstriyel hammadde durumuna gelen doğal zeolitlerin bu özelliklerinden dolayı kullanım alanları radyoaktif atıkların temizlenmesi, atık suların temizlenmesi, baca gazlarının temizlenmesi, oksijen üretimi, doğal gazların saflaştırılması, güneş enerjisinden faydalanma, petrol ürünleri üretimi, gübreleme ve toprak hazırlanması, tarımsal mücadele, toprak kirliliğinin kontrolü, besicilik, organik atıkların muamelesi, su kültürü, maden yataklarının aranması, metalurji, kağıt endüstrisi, inşaat sektöründe hafif agrega, sağlık sektörü ve deterjan sektörlerinde geniş yer bulmaktadır.

Bu çalışmada, yüksek sıcaklığın doğal zeolit katkılı betonun bazı özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Doğal zeolit kullanılarak farklı ikame miktarlarında 7 karışım hazırlanmıştır. Numunelerin kuru birim ağırlık, su emme oranları, boşluk oranları, basınç dayanımları ve ısı iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Ayrıca, numunelerin yüksek sıcaklık karşısındaki davranışlarını belirlemek amacıyla, numuneler elektrikli fırında 4 farklı sıcaklıkta iki saat süreyle bekletilmişlerdir. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı değerleri ölçülmüş, ayrıca numunelerin mineral ve doku değişimlerinin mikroskobik analizi yapılarak doğal zeolitin yüksek sıcaklık altında betona etkisi araştırılmıştır.

BÖLÜM II

YÜKSEK SICAKLIK VE YÜKSEK SICAKLIK ALTINDA BETONUN DAVRANIŞI

Yapılarda durabilite problemine yol açan başlıca fiziksel etkilerden biri de yüksek sıcaklıktır. Bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir (Aydın vd., 2003). Örneğin Danimarka’da bulunan Great Belt Tünelinde ve Channel Tünelinde, 1994 ve 1996 yıllarında çıkan yangınlarda, yüksek sıcaklık etkisi ile betonda meydana gelen patlama ve parça atmalar nedeni ile beton kesitindeki azalmalar ağır hasarlara ve New York’taki Dünya Ticaret Merkezi Binalarının çökmesi ile çok sayıda can ve mal kaybına yol açmıştır (Khoury, 2003b; Schrefler vd., 2002; Baradan vd., 2002).

2.1 Yüksek Sıcaklık Kaynakları

Yapıya ve malzemeye zarar veren, hasara yol açan yüksek sıcaklık kaynakları, yangın, özel üretimlerden dolayı endüstri fırın bacalarında görülen sıcaklık ve hava alanı pistlerinde sürtünmenin sebep olduğu ısınma olarak gösterilebilir (Aköz ve Yüzer, 1994). Bu etkiler aşağıda sırası ile açıklanmıştır.

2.1.1 Yangın

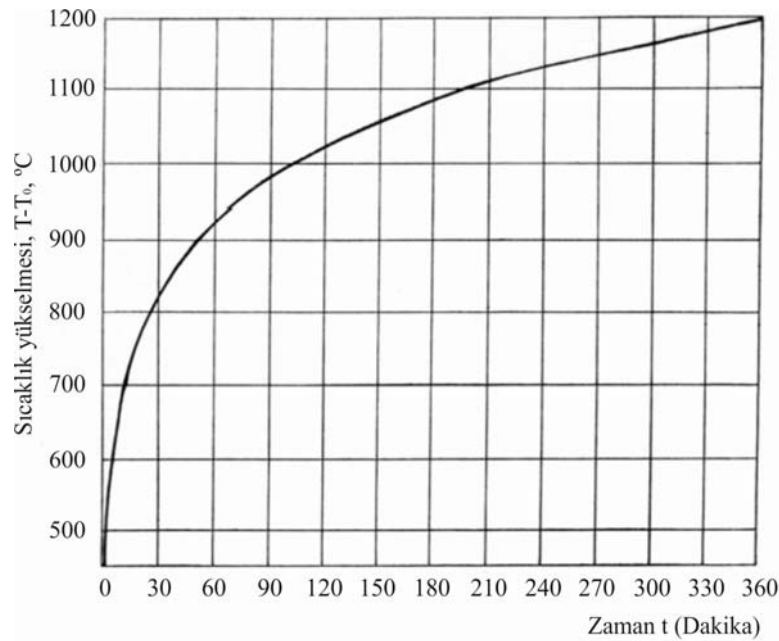
Yanma, yakacakların oksijenle hızlı bir şekilde reaksiyona girerek, yakacak içinde depolanmış bulunan enerjinin, ısı enerjisi biçiminde açığa çıktığı kimyasal bir işlemdir. Bu işlem sırasında çıkan enerji, genellikle sıcak gazlar şeklinde olmasına rağmen, çok küçük miktarlarda elektromanyetik (ışık), elektrik (serbest iyonlar ve elektronlar) ve mekanik (ses) enerjiler şeklinde de ortaya çıkmaktadır. Yanma, yanıcı maddelerin oksijen ile kimyasal reaksiyon hızına, oksijen miktarına ve yanma bölgesindeki sıcaklığa bağlıdır (Ashrae, 1997).

Yüksek sıcaklığa sebep olan yangın ise katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması olayıdır. Araştırmalar, tabii bir yangının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma olmak üzere dört fazdan oluştuğunu göstermektedir.

Ateşleme ve yanma fazları tüm-parlama öncesi (pre-flashover), ısınma ve soğuma fazları ise tüm-parlama sonrası (post-flashover) fazları olarak adlandırılmaktadır. Tüm-parlama öncesi fazı gelişmekte olan yangın, tüm-parlama sonrası fazı ise gelişmiş olan yangın durumunu göstermektedir (Ashrae, 1997). Şekil 2.1’de verilen standart sıcaklık-zaman eğrisinde, sıcaklığın 10 dakika gibi kısa bir zamanda yaklaşık 650°C’ye hızla yükseldiği ve yangın süresince de 1200°C’ye ulaşabileceği görülmektedir, ISO-834 yangın eğrisi olarak tanımlanan bu eğri (2.1) bağıntısı ile ifade edilmektedir (TS EN 13501-2, 2009).

$$T-T_0=345 \log_{10} (8t+1) \quad (2.1)$$

Denklemden, t yangın süresini (dakika), T₀ 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 EN13501-2, 2009).



Şekil 2.1. Standart sıcaklık-zaman eğrisi (TS EN 13501-2, 2009).

2.1.2 Endüstri fırın bacaları

Bazı endüstri fırın bacalarında sıcaklığın 1250-1300 °C’ye ulaştığı bilinmektedir. 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 düşürülebilmektedir (Avcı, 1984).

2.1.3 Hava alanı pistleri

Uçakların kalkış ve inişlerindeki sürtünmeler ve jet motorlarından 260 km/saat hızla çıkan 196 °C'deki egzoz gazları, hava alanı pistlerinde sıcaklığın artmasına sebep olmaktadır. İniş ve kalkışlardaki tekrarlı ısınma ve soğuma etkisi ile pistlerde aşınma ve tozlanma görülmektedir. Pistler bu durumda yük alma kapasitelerini muhafaza etseler de hava alanının işlevlerini kısıtlamaktadır (Ramakrishnan vd., 1991).

2.1.4 Nükleer reaktörler

Nükleer reaktörlerde, sistemin sıcak parçalarından transfer olan ısı ve nötron ve gama ışınlarının baskısı ile oluşan sıcaklık nedeniyle, reaktörü koruyan beton yüksek sıcaklığa maruz kalır. Radyasyon, koruyucu betona önemli zarar vermez ancak beton sıcaklık nedeniyle daha zayıf hale gelir ve nötron baskısına karşı etkisi azalır. Hızlı nötron ve gama ışınları yavaşlatılırken reaktör çekirdeğinden açığa çıkan enerji, koruyucu malzemede tutulur ve ısı şeklinde salıverilir. Bu ısı özellikle reaktör çekirdeğine yakın bölgeleri etkiler. Sodyum yakma havuzlarının etkisi ile tipik bir sodyum-beton reaksiyonu 400 °C'de başlar ve yarım saat sonra sıcaklık 800 °C'den daha yüksek bir değere ulaşır (Sakr vd., 2005).

2.2 Yüksek Sıcaklığın Betonarme Elemanlara Etkileri

Çelik ve beton yanıcılık açısından A1 sınıfı yani “hiç yanmaz” grubuna girerler. Ancak bu malzemelerin yangın hasarı malzeme kaybı olarak değil, akma sınırı ve elastisite modülündeki azalmalar ve içyapı değişiklikleri olarak ortaya çıkar (Akman, 1992).

Betonarme yapıların yüksek sıcaklığa karşı davranışlarını belirlemedeki temel değişken aderans dayanımıdır. Çünkü yapılan deneysel çalışmalarda kritik beton sıcaklıkları, her zaman kritik aderans sıcaklığından daha büyük olmaktadır (Diederichs ve Schneider, 1981). Çeliğin ısı iletkenlik katsayısı büyük olduğundan sıcaklık artışı dakikada 40 °C'den fazladır. Yangında 10-20 dakika gibi kısa bir sürede çeliğin sıcaklığı 600 °C'ye

ulaşabilir. Sıcaklık 300 °C'yi aştığında dayanım ve akma sınırında düşme başlar. Sıcaklık 600 °C'ye yükseldiğinde çekme dayanımı güvenlik gerilmesinin altına iner. Yangınlarda sıcaklığın 600 °C'ye kolaylıkla eriştiği ve hatta 1200 °C'ye vardığı gözönüne alınırsa bu sıcaklıklarda çeliğin plastik deformasyon yapacağı açıktır. Ancak donatı üzerindeki örtü betonu çelikte sıcaklık yükselme hızını oldukça engellemektedir. Örneğin, 3 cm örtü betonu olan bir betonarme eleman, 600 °C sıcaklıkta bir saat bekletildiğinde çeliğin sıcaklığı ancak 350 °C'ye ulaşmaktadır (Akman, 1992).

Beton, donatıyı da koruması bakımından yüksek sıcaklık etkisinde çok önemli bir malzemedir, bunun için betonun ve harcın davranışının iyi bilinmesi gerekir. Sıcaklık etkisinde, basınç dayanımı kaybına neden olan olayların açıklanmasında zaman zaman farklı görüşler olmasına karşın model oluşturulmasında problem; çimento hamuru ile agrega arasındaki termal uyumsuzluk, agrega çimento ara yüzündeki bağlantı, ısıtma sırasında buharlaşan suyun basıncı, çimento hamuru ve agregadaki kimyasal yapı değişikliği gibi olaylar esas alınarak incelenmektedir (Aköz ve Yüzer, 1994).

Çimento hamurunda jel yapıyı oluşturan C-S-H'nin katı ögeleri, adsorpsiyon suyu yardımıyla birbirine bağlanır. Jeldeki adsorpsiyon suyu ve hidratlardaki kimyasal bağlı su, 300 °C'den itibaren buharlaşmaya başlarken kılcal boşluklardaki serbest su 100 °C civarında buharlaşabilir. Buharlaşan su, betonda büzölmeye (rötreye) neden olur. Üretimdeki su/çimento oranına bağlı olarak serbest su, beton hacminin yaklaşık % 4'üne kadar varabilir. Bu su kaybının neden olduğu büzölme ve beton içinde oluşan buhar basıncı donatı üzerindeki beton örtünün çatlamasına ve kopmasına neden olur. Betonun tahrip olması sonucu donatı daha yangının başlarında sıcak gazla temas eder (Akçaözoğlu, 2012).

Çimento hamurundaki bir diğer önemli bileşen Ca(OH)_2 'dir. Ca(OH)_2 530 °C civarında sönmemiş kirece dönüşür. Bu dönüşümde yaklaşık % 33'e varan bir büzölme meydana gelir. Yangın sırasında sıkılan su ile CaO tekrar Ca(OH)_2 'ye dönüşür ve bu olay % 44 mertebesinde bir hacim artışına neden olur. Bu hacim değişimleri sonucu bünyede çatlaklar oluşur, beton ufalanır, boşluklu bir yapıya dönüşür. Ca(OH)_2 'nin boşluklardan süzülmesi yangın sonrasında yüzeyde beyaz lekeler oluşturur. Bu lekelerin varlığı yangında sıcaklığın 530 °C'nin üzerine çıktığının kanıtıdır (Akman, 1992).

Agregaların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına bağlıdır. Silisli agregalarda kuvarz, 570 °C'de polimorfik değişime uğrar, α kuvarzdan β kuvarza dönüşür. Bu olay hacim artışına ve hasara neden olur (Neville, 2000). Kalkerli ve dolomitli agregalarda ise karbonatlar 800-900 °C civarında CaO veya MgO'ya dönüşür. Sıcaklık yükseldikçe kalker veya dolomit genişir, CO₂'in ayrışması ve CaO'in veya MgO'in meydana gelmesi ile büzülme başlar. Bu olaylardaki hacim değişiklikleri hasara neden olur (Scherefler vd., 2003).

2.2.1 Yüksek sıcaklığın betona etkileri

Betonun diğer yapı malzemelerine göre en önemli bazı avantajları sıralandığında istenilen şekil ve boyutlarda üretilmesi, yüksek basınç dayanımına sahip olması, çelik donatı ile iyi aderansa sahip olması, diğer taşıyıcı malzemelere kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine daha dayanıklı bir malzeme olması gibi özellikleri söylenebilir (Erdoğan, 2003). Beton, yanmayan madde oluşu, belirli bir süre için önemli bir zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzemedir (Neville, 2000). Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir (Baradan vd., 2002).

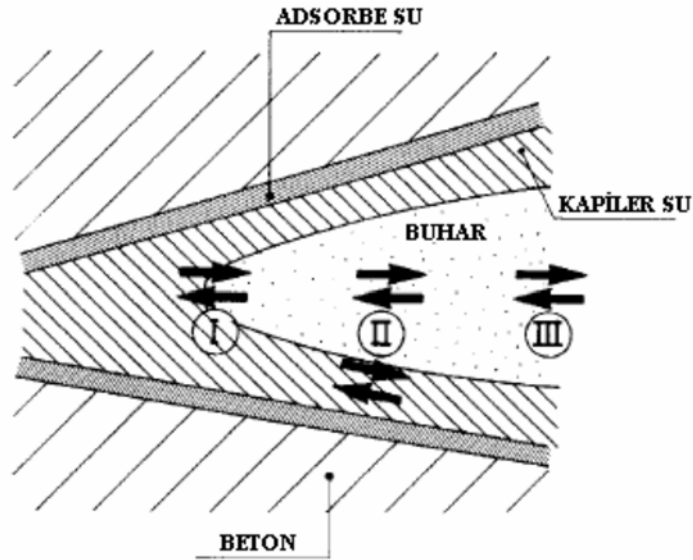
Yüksek sıcaklık etkisinde oluşan parça atmalar, yapı elemanının yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmesine neden olur. Parça atmalar sonucu donatılar yüksek sıcaklığa maruz kalırlar. Hava sürükleyici katkılar nem içeriğini ve boşlukların miktarını artırarak boşluk basıncını düşürür. Parça atmaları azaltmak için termal bariyerler, polipropilen lifler, hava sürükleyici, büyük boyutlu elemanlar ve düşük termal genişlemeye sahip agregalar kullanmak gerekir (Khoury, 1992).

Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da değişir ve bu etki betonun basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalması ile sonuçlanır (Akman, 2000; Baradan vd., 2002; Riley, 1991). Nispeten büyük boyutlu beton elemanları, davranışlarında yapının son durumunu önemli derecede etkileyen iyi bir eğilim gösterirler. Bu nedenle, betonda mikro yapısal değişiklikler göz önünde tutulduğunda malzemenin homojen olmaması ve elemanların geometrisi hesaba katılması gereken iki önemli unsurdur. Gerçek bir yangında beton elemanın geometrisi ve boyutları kritik bir rol oynar (Andrade vd, 2003).

Beton, farklı termal karakteristiklere sahip bileşenleri, nem ve poroziteden dolayı yüksek sıcaklık karşısında karmaşık bir davranış sergiler (Li vd., 2004). Bu nedenle betonun yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı, çimento hamuru, agregalar ve mineral katkı maddeleri gibi bileşenlerini ve özelliklerinin değişimi için aşağıda ayrı ayrı ele alınmıştır.

2.2.1.1 Çimento hamuru

Çimento hamuru ilk ısıtma boyunca oldukça kararsız bir bileşendir, çünkü sıcaklık etkisi ile önemli fiziksel ve kimyasal dönüşümler geçirir. Bu dönüşümlerde, 100 °C ve altındaki sıcaklıklarda serbest suyun buharlaşması, 100 °C'den sonra kimyasal bozulma ve bağlı suyun kaybı önemli bir rol oynamaktadır (Khoury, 1992). Şekil 2.2'de basitleştirilmiş boşluk suyu transferi görülmektedir. Şekilde; I suyun buharlaşması veya yoğuşması, II betonun içine suyun transferi, III ise suyun dış çevreye transferini temsil etmektedir (Andrade vd., 2003).



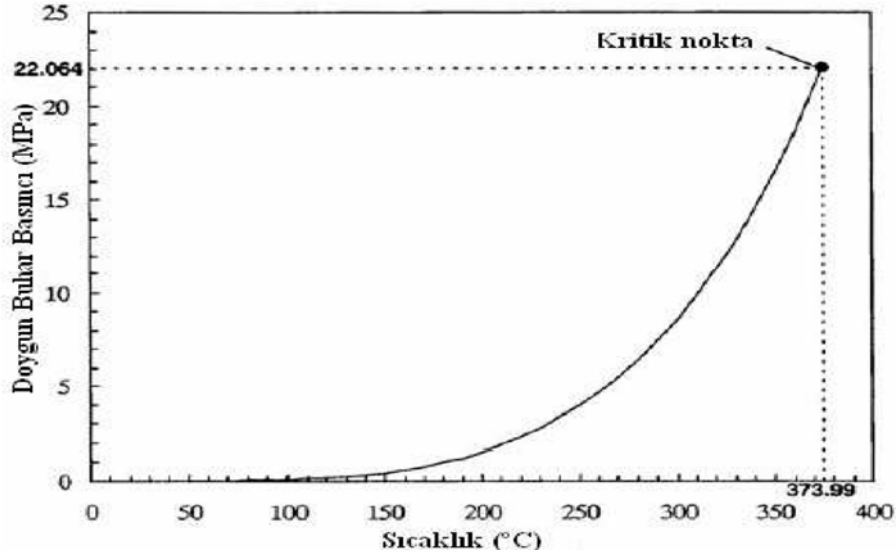
Şekil 2.2. Boşluk suyu transferi

Bilindiği gibi betonun basınç dayanımı ile porozitesi arasında ilişki bulunmaktadır. Betonun porozitesi arttıkça basınç dayanımı azalır. Beton bünyesinde boşluklar, C-S-H jeli boşlukları, kapiler boşluklar ve hava boşlukları olmak üzere üç farklı şekilde bulunmaktadır. Betonun katı fazları çimento hamuru ve agregalar, yüksek sıcaklığa maruz kaldığında gözenek yapısını etkiler. Katı fazlarda meydana gelen fiziksel ve

kimyasal değişiklikler toplam porozitede ve gözenek boyutunun dağılımında değişikliklere neden olur. Genellikle, sertleşmiş çimento hamuru 20-200 °C civarında genişir. 200 °C'nin üstünde farklı yoğunlukların etkisiyle büzülür, bu sırada da agregalar genişir. Bütün bu değişiklikler gözenek boyutunu büyütür (Alonso vd., 2003). 500 °C'ye kadar kapiler ve jel suyunun ayrılması toplam boşluk hacminde önemli bir artışa neden olur (Haddad vd., 2004). 600 °C'ye kadar toplam boşluk hacmi artar. Bu artış beklenenden fazladır ve ağırlık kaybıyla benzerlik gösterir. Bunun nedeni ya katı fazın bozularak boşlukların artması ya da oluşan mikro çatlaklar olabilir. Yüksek sıcaklıklarda küçük boşlukların oranı azalır, bu da 900 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda sinterleşmeye neden olabilir (Alonso vd., 2003).

Yüksek termal gerilmelere maruz kalmış betonlarda çatlak oluşumunun birçok nedeni vardır. Çimento hamurundaki başlangıç mikro çatlakların varlığı, sertleşirken oluşan rötrenin sonucudur. Bu çatlaklar yüksek sıcaklıklarda kolaylıkla ilerlerler. Bunların bazıları 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda yok olurlar, sonuçta az miktarda ama daha büyük çatlaklar oluşur. Anhidrit tanelerin etrafındaki mikro çatlaklarda bu sıcaklıkta gelişir. 300 °C civarında çimento fazını geçerler ve agregaları çevrelerler. Sıcaklık 500 °C'nin üzerindeyken, çatlaklar çimento hamurunda gelişir, boyutları 0,01mm'den büyüktür. Ayrıca agregaları çatlatırlar, bunların boyutları ise 0,05 mm'den büyüktür ve artık çatlaklar gözle görülebilir (Alonso vd., 2003).

Beton bünyesinde su, üç farklı şekilde bulunmaktadır. Bunlar, jel yapılı çimento hamurundaki C-S-H katı ögelerini birbirine bağlayan adsorpsiyon suyu, hidratlardaki kimyasal bağlı su ve kılcal boşluklarda serbest sudur. Çimento türüne ve üretim sırasındaki su/çimento oranına bağlı olarak, betonda hacminin % 4'ü kadar bulunabilen serbest su 100 °C'de, kimyasal bağlı su ise 300 °C 'de buharlaşmaktadır. Sıcaklık etkisi ile bu mertebedeki suyun kaybı ile oluşacak büzülme ve beton içinde oluşan buhar basıncı, donatı beton örtüsünün çatlamasına ve parçalanarak kopmasına neden olur. Beton örtünün tahrip olması sonucu donatı daha yangının başlangıcında sıcak gazla temasa geçer (Akman, 2000). Şekil 2.3' de boşluk suyu basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki görülmektedir. 373,99 °C'de 22,064 MPa kritik su basıncı oluşmaktadır. Kritik noktanın üstünde su buhar halinde, altında ise sıvı halinde kabul edilir (Schrefler vd., 2003).



Şekil 2.3. Doygun buhar basıncı ile sıcaklık arasındaki ilişki

Bazı araştırmacılar 100 °C civarında permeabilitede azalma bulmuşlardır. Bu durum diğer araştırmalar tarafından aynı bölgede düşük basınç dayanımı bulunmasıyla çelişir. Olası tek açıklama artan basınçtan dolayı suyun yoğuşmasıdır, çünkü nemli betonun düşük dayanım gösterdiği bilinir. Benzer sıcaklık aralıklarında etrenjitin yok olmasıyla da ilişkili olabilir. Bu olay çok miktarda suyun serbest kalmasını sağlar ve taşıyıcı fazların azaldığı farz edilir (Andrade vd, 2003). Ca(OH)_2 'in CaO ve H_2O 'ya dönüşümü 500 °C civarında olurken, C-S-H'in dehidratasyonu 110 °C'den itibaren başlamaktadır. Her iki olay da çimento pastasındaki katı madde miktarının azalmasına sebep olur.

2.2.1.2 Agregalar

Agregalar betonda % 60-80 arasında bir hacmi doldururlar. Özelliklerindeki farklılıklar ısıtma sırasında betonun termal genişleme katsayısı ve termal iletkenliğini ve performansını önemli derecede etkiler. Agregaların yüksek sıcaklıkta betona etkisi mineral yapılarına bağlıdır ve yüksek sıcaklığa dayanıklı oldukları söylenebilir. Silis esaslı agregalar için kritik sıcaklıklar 250 °C ile 575 °C'ler arasındadır. Yüksek sıcaklıklarda karbon bileşimi ayrışır ve 1200 °C'de erir (Haddad ve Shannis, 2004). Kumların büyük çoğunluğunu teşkil eden kuvarz, 575 °C'de yaklaşık % 5.7'lik bir hacim artışı ve endotermik bir reaksiyonla α -kuvarzdan β -kuvarza dönüşür (Andrade vd, 2003).

Kalker ve dolomitten oluşan agregalar 700 °C'ye kadar kararlıdır (Andrade vd, 2003). 800-900 °C sıcaklıklarda CaO ve MgO'ya dönüşüm söz konusudur (Akman, 2000). Kalkerin ve dolomitin kalsinasyonu endotermik bir olaydır ve sıcaklığın etkisi ile CO₂'nin ayrışması, MgO ve CaO'nun oluşması büzölmeye neden olur (Scherefller vd., 2003). Gerek soğuma esnasında ortamdaki nemin absorplanması gerekse söndürme anında sıkılan suyun etkisiyle Ca(OH)₂ tekrar oluşur. Bu büzölme ve genleşmeler dayanımda ciddi azalmalar meydana getirir (Perkins, 1986).

Nükleer reaktörlerde kullanılan ağır betonlar 400-800 °C arasında sıcaklığa maruz kalırlar. Sakr ve El-Hakim (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada çakıl, barit ve ilmenite agregaları kullanılarak üretilen betonlar 250, 500, 750 ve 950 °C'ye maruz bırakılmıştır. Kontrol deneyleri sonunda ilmenite kullanılarak üretilen ağır betonlar fiziksel ve mekanik açıdan en yüksek performansı göstermiştir.

Khoury'nin (1992) yapmış olduğu bir derlemede Abrams'ın (1971) çalışmasına yer verilmiş ve bu çalışmada üç farklı tür agreganın kullanıldığı beton numunelere yüksek sıcaklık etkisi araştırılmıştır. Çalışmada 600 °C'ye kadar ısıtılan kalker esaslı ve hafif agregalı betonların basınç dayanımlarının, silis esaslı agregalara göre daha yüksek olduğunun gözlemlendiğı belirtilmiştir. Granit ve bazalt gibi volkanik kayalar ise 1000 °C'ye kadar kararlı yapıda kalabilmektedir. Ancak sıcaklığın aniden artması ve azalması parçalanmalara neden olabilir (Perkins, 1986).

Pomza, köpük cüruf ve genleştirilmiş kil ürünleri gibi hafif agregaların yangın dirençleri yüksektir. Hafif agregalardan üretilmiş betonların ısı iletkenliğı düşüktür (Shoab vd., 2001). Allen ve Desai (1967) tarafından yapılan deneysel bir çalışmada farklı tip agregaların kullanıldığı betonlar 300 °C sıcaklığa maruz bırakılmış, agrega olarak killi ateş tuğlasının kullanıldığı betonlar, en iyi mekanik özelliğı göstermiştir. Genellikle silis içermeyen agregalar, örneğın kalker ve volkanik kökenli agregalar ile üretilen betonlar yüksek sıcaklık etkisine karşı daha dayanıklıdır (Postacıoğlu, 1987).

2.2.1.3 Mineral katkı malzemeleri

Yüksek sıcaklık etkisinde puzolanlardan beklenen fayda, Ca(OH)₂'i tüketerek C-S-H oluşumuna katkıda bulunmalarıdır (Haddad ve Shannis, 2004). Günümüzde betondan

beklenen farklı özellikler için üretimde cüruf, uçucu kül, silis dumanı vb. puzolan malzemeler ve katkı maddeleri kullanılmaktadır.

Ferrosilisyum ve silisyum metal endüstrisinin bir yan ürünü olan silis dumanı, çok ince oluşu nedeniyle çimento hamuru içindeki ve agrega-çimento hamuru arayüzündeki boşlukları doldurur, betonda geçirimsizlik sağlar. Bünyesindeki aktif silisyumdioksit sayesinde silikatların hidratasyonu sonucu oluşan kalsiyum hidroksiti (CH) bağlayarak kalsiyum silikat hidrate C-S-H jeli oluşturur, CH'in erimesini önler (Yüzer vd., 2004). Yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan silis dumanının, yüksek sıcaklığa maruz kalan betona etkileri çeşitli yönleri ile araştırılmaktadır (Aköz ve Yüzer, 1994).

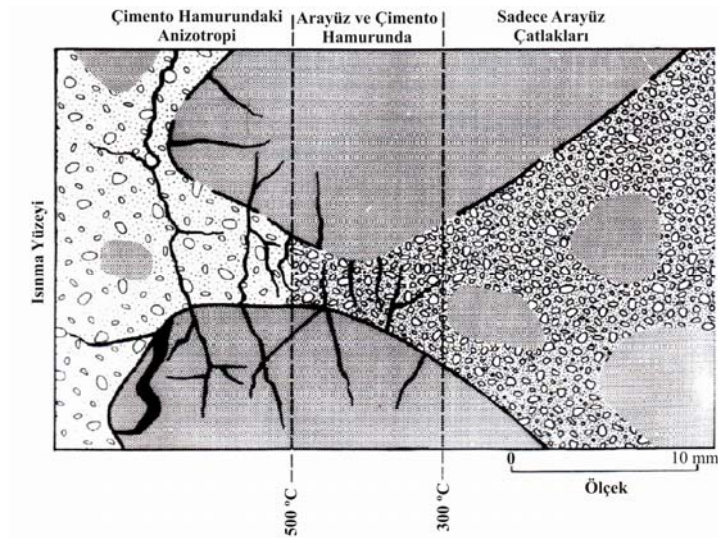
Silis dumanı içeren betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişebilmektedir. Silis dumanı oranı % 20'nin üzerinde olan yüksek dayanımlı betonların direnci normal betonlara göre daha azdır. Sıcaklık 300 °C'yi aştığında jel adsorbe suyu serbest hale geçmekte, yüksek performanslı betonlarda kılcal boşlukların boyutu küçük olduğundan bu boşluklarda buhar basıncı artmakta, betonda büyük gerilmeler oluşmaktadır. Ortaya çıkan basınç etkisi, betonda patlamalara ve dağılmalara neden olmaktadır (Yeğınobalı, 2002). Poon vd. (2001) tarafından yüksek sıcaklığın yüksek dayanımlı betona etkilerinin araştırıldığı çalışmada, % 14-20 silis dumanı katkılı, basınç dayanımı 170 MPa olan beton numunelerde, 350°C'ye kadar olan sıcaklıklarda basınç dayanımının arttığı belirtilmiştir. Yüksek sıcaklıklarda ise dayanımda ani bir düşme olmuş, 650°C'de çatlama, parça atma ve patlama şeklinde hasarlar görülmüştür. Aynı çalışmada % 10 silis dumanı katkılı numunelerde, silis dumanının yüksek sıcaklık etkisinde betona herhangi bir yararının olmadığı ifade edilmiştir.

Uçucu kül, 121-149 °C'ler arasında, sıcaklığın ve basıncın etkisiyle C-S-H jelinden iki üç kat daha güçlü tobermorit jeli oluşturarak betonun basınç dayanımını % 152 oranında arttırmaktadır. Yüksek fırın cürufu ise yüksek sıcaklıkta diğer puzolanlara göre en iyi performansı göstermektedir. Silis dumanı katkılı betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişmekle birlikte, % 10'un üzerinde silis dumanı katkılı betonlar hariç tüm puzolan katkılılar, katkısız betonlara oranla yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans göstermektedir (Yeğınobalı, 2002).

2.2.2 Yüksek sıcaklığın betonun fiziksel özelliklerine etkileri

Yüksek sıcaklık, betonun ısı yayınımına, ısı iletkenliğine, ısıl genleşmesine, özgül ısısına, birim ağırlığına ve rengine etki eder. Bu fiziksel değişimler sırasında betonun mekanik özelliklerinde de değişiklikler meydana gelir. Beton yüksek sıcaklık etkisinde kalırsa, düşük ısı iletkenliğine sahip yüzey tabakasının oluşması ile ısı yayınımı azalır. Bunun sonucu olarak yüksek sıcaklığa maruz yüzey ile betonun iç kısımları arasında sıcaklık farkları oluşur (Akçaözoğlu, 2012).

Riley (1991) bir deneysel çalışmada, 30 mm çapında 60 mm yüksekliğinde silindir harç numuneleri yüzeyden itibaren ısıtmış ve sıcaklıkları 5 adet termokupul ile ölçerek izotermi çizmiş ve bu noktalardan aldığı ince kesitlerin analizi ile betonun fiziksel özelliklerinin bu izotermelere benzer değişimler gösterdiğini belirtmiştir. Şekil 2.4'te görüldüğü gibi çatlak kısım bütün numunelerde, yüksek sıcaklığa maruz kalan yüzeyinden itibaren 25-30 mm içeriye girmiştir. 300 °C'den daha düşük sıcaklığa maruz kalan bölgelerde yerel arayüz çatlakları, 300-500 °C arasında arayüz ve çimento pastasında, 500 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda ise çimento pastasında ve agrega tanelerinde ciddi çatlaklar meydana gelmiştir. Bu da betonun anizotropik özelliğinin başlangıcıdır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış bir betonda anizotropik özellikler gözleniyorsa, sıcaklık 500 °C'yi aşmış demektir (Riley, 1991).



Şekil 2.4. Yangın hasarı görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri

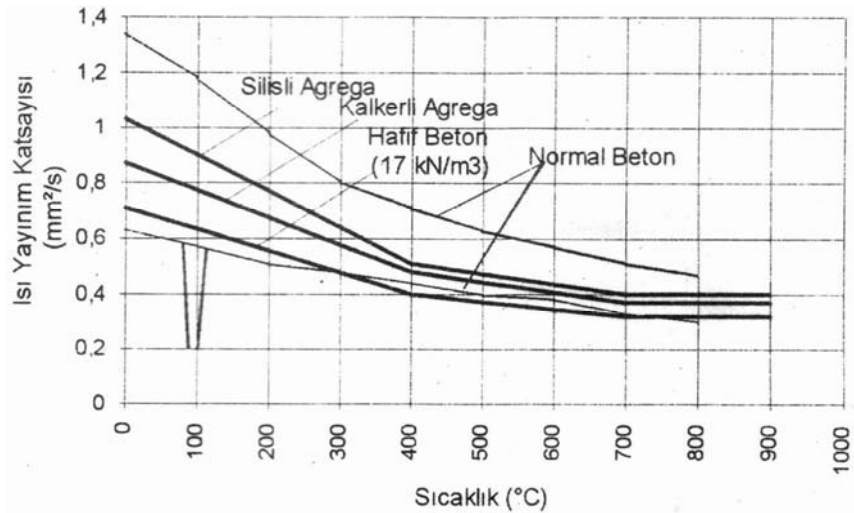
Papayianni ve Valliasis (2005) tarafından 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindirik beton numunelerde yüksek sıcaklık etkisi esnasında yapılan ölçümlerde yüksüz durumda 400 °C'ye kadar büzülme daha sonra genleşme gözlenmiştir.

2.2.2.1 Isı yayılım katsayısı

Yüksek sıcaklık etkisinin nedenlerinden biri olan yangından, ısı enerjisinin bir kısmı emilir. Emilen ısı sıcaklığın yükselmesine neden olur. Bu olayda ısı yayılım katsayısı (a , mm^2/s) etkili olur. Isı yayılım katsayısı, malzemenin ısı iletim katsayısına (λ , $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$), özgül ısısına (c , $\text{KJ}/\text{kg}^\circ\text{C}$) ve birim ağırlığına (β , kg/m^3) bağlı olarak 2.2 bağıntısı ile hesaplanır (Mahsanlar, 2006).

$$a = \frac{\lambda}{c} \beta \quad (2.2)$$

Isı yayılım katsayısı sıcaklık arttıkça azalmaktadır (Şekil 2.5). Bu azalma özellikle 100°C civarında bünyedeki suyun buharlaşması nedeniyle daha belirgindir (Mahsanlar, 2006).



Şekil 2.5. Çeşitli betonlar için ısı yayılım katsayısı

2.2.2.2 Isı iletim katsayısı

Yapılan araştırmalar, betonun ısı iletimine etki eden temel unsurun agrega türü olduğunu göstermektedir. Betonun kalker ve dolomit esaslı agregalarla üretilmesi durumunda λ büyük değerler almaz. Buna karşın silis esaslı agreganın kullanıldığı betonda λ 'nın %15-

20 daha büyük olduğu kabul edilir. Isı iletim katsayısına etki eden diğer iki önemli unsur, boşluk oranı ve boşluk yapısı ile su içeriğidir. Suyun ısıyı havaya göre daha fazla iletmemesinden dolayı kuru haldeki bir cisimde gözeneklerin fazla olması λ 'nın düşmesine yol açar. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun, gözeneklerinden su kaybettiği, çimentonun dehidratasyonu ile boşluklu bir yapıya dönüştüğü ve ısı iletim katsayısının azaldığı bilinir (Aköz ve Yüzer, 1994).

2.2.2.3 Genleşme katsayısı

Malzemelerin şekil değiştirmesini de etkileyen ısıya ilişkin bir diğer özelliği de ısıl genleşmesidir. Betonun genleşme katsayısı (α , $1/^\circ\text{C}$), üretimde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun ısı iletim katsayısı ($\alpha=11.10^{-6}-20.10^{-6} 1/^\circ\text{C}$) agregalarınkinden büyüktür. Genleşme katsayısı en düşük olan doğal taş kalkerdir. Sıcaklık arttıkça ısı iletim katsayısı artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termik genleşmelerdeki farklılıklardan dolayı oluşan gerilmeler çimento hamuru ile agrega arayüzünde çatlamalara neden olur (Postacıoğlu, 1987).

2.2.2.4 Özgül ısı

Betonun özgül ısı, diğer bir deyişle bir gramının sıcaklığını 1°C arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi, sıcaklıkla çok az değişir. Bu büyüklüğe agreganın önemli etkisi yoktur (Aköz ve Yüzer, 1994).

2.2.2.5 Isı şoku parametresi

Gevrek malzemelerde sıcaklık değişimleri hızlı ve sıcaklık gradyanı yüksek ise büyük ısıl gerilmeler ve dolayısıyla çatlamlar oluşabilir. Isıl şoku denilen bu olay ısı iletimine ve ısıl genleşmeye büyük ölçüde bağlıdır. Isı iletimi yüksek ve ısıl genleşmesi küçük malzemelerde ısıl enerji hızla çevreye yayılır bu nedenle sıcaklık gradyanı düşük, boyut değişimleri az, dolayısıyla gerilmeler küçük olur. Malzemelerin ısı şokuna dayanıklılığını belirtmek için ısı şoku parametresi kullanılır. Isıl şoka dayanıklılık yüksek ısı iletimli ve yüksek çekme mukavemetlilerde büyük, ısı genleşmesi ve elastisitesi büyük olanlarda ise küçük olur. Bu etkenlere bağlı olarak ısı şoku parametresi (P), ısı iletim katsayısına (λ),

ısı genleşme katsayısına (α), malzemenin çekme mukavemetine (σ_c) ve elastisite modülüne (E) bağlı olarak 2.3 bağıntısı ile hesaplanır (Onaran, 2000).

$$P = \lambda \cdot \frac{\sigma_c}{E \cdot \alpha} \quad (2.3)$$

2.2.2.6 Birim hacim ağırlık

Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genleşme nedeniyle hacim artar. Porozite ve su içeriği betonun yangından sonraki hasar kontrol parametreleridir (Andrade vd, 2003). Isıtma sırasında betondaki ağırlık kaybı genellikle porozitenin artmasıyla sonuçlanır. Bu artış normal ve yüksek dayanımlı betonlar için yaklaşık lineer bir artıştır. Buna karşın ultra yüksek dayanımlı betonlar için bu geçerli değildir. Anhidrit çimento tanelerinin çokluğu ve kılcal boşlukların neredeyse olmaması buharın salıverilmesini zorlaştıran nedenlerdir, fakat ağırlık kaybının derecesi arttıkça porozite etkili bir şekilde artar. Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler sonucu birim hacim ağırlığı (β) azalır. Ancak bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir (Aköz vd., 1995).

Silis dumanı ve uçucu kül mineral katkıları kullanılarak yapılan bir çalışmada suda soğutma etkisi havada soğutmaya nazaran daha az boşluk kalmasını sağlamıştır. Suda soğutma, mikroyapının yoğunluğunun artmasına yardımcı olur. Bunu yüksek sıcaklık etkisinden sonra dehidrate olmuş çimento hamuru bileşenlerinin tekrar hidrate olmasını sağlayarak yapar (Andrade vd, 2003).

2.2.2.7 Yüksek sıcaklığın betonun rengine etkileri

Yüksek sıcaklığın etkisinde kalan betonun renginde bazen önemli değişiklikler meydana geldiği, bu değişikliğin özellikle silisli nehir agregaları ile üretilen betonlarda belirgin olarak görüldüğü, örneğin renk, pembe veya kırmızı ise sıcaklığın 300-600°C'ye, gri ise 600-900 °C'ye yükseldiği literatürde ifade edilmiştir. Sıcaklık 600 °C'ye ulaştığında beton, dayanımının % 50'sini, 800 °C'ye ulaştığında ise yaklaşık % 80'ini kaybettiği gözönüne alınırsa, renk incelemesi ile betonun hangi sıcaklığa maruz kaldığı, dolayısı ile basınç dayanımındaki değişim hakkında fikir edinilebilir. Buradan yüksek sıcaklık etkisinde kalan betondaki renk değişiminin önemli bir parametre olduğu anlaşılmaktadır

(Neville, 2000). Günümüzde yapı malzemelerine ultraviyole ışınlarının etkisinin araştırıldığı çalışmalarda, renk dizgelerinden yararlanılarak kalite kontrolü yapılmaktadır.

Munsell (ASTM D 1535-68,1974) tarafından geliştirilen Munsell Renk Dizgesi'nde, rengin tür, değer ve doymuşluk bileşeni yaklaşık olarak eşit algılama adımları ile ondalık sayı dizgesine oturtularak numaralanmıştır. Tür, bir rengin öteki renklerden ayırt edilmesini sağlayan bileşendir (kırmızı, sarı, yeşil gibi), 1-100 arasındaki sayılar ile belirtilir. Munsell (1974) dizgesinde türler bir tür çemberine yerleştirilmiştir. Tür çemberinde, sırası ile kırmızı 5, sarı 25, yeşil 45, mavi 65 ve mor 85, çemberi beş eşit parçaya bölecek biçimde dizilmiştir. Bu türlerin karışımları olan, kırmızı-sarı 15, sarı-yeşil 35, yeşil-mavi 55, mavi-mor 75 ve mor-kırmızı 95, çember üzerinde yine eşit uzaklıklarda yerleştirilmiştir. Böylece, tür çemberinde ayrılan 10 bölge de kendi içinde 10 eşit parçaya bölünerek ondalık sayı dizgesi oluşturulmuştur.

Değer, bir rengin açıklık koyuluğunu belirten bileşendir ve 0-10 arasındaki sayılar ile anlatılır. Değer, on eşit adıma bölünmüş olup, 0 siyahı, 10 beyazı belirtir. Her renk türünün değişik değerleri vardır. Doymuşluk, bir rengin içindeki gri miktarını belirten bileşendir ve 0-20 arasındaki sayılar ile gösterilir. Siyahtan beyaza, içinde tür ögesi olmayan tüm grilerin doymuşlukları sıfırdır. Bir renk griden uzaklaştıkça doymuşluğu artar, griye yaklaştıkça doymuşluğu azalır. Her renk türünün değişik değerlerinde elde edilebilecek maksimum doymuşluk basamağı farklıdır. Bu nedenle, doymuşluk için sayısal bir üst sınır verilemez, 20 sayısı, ortalama bir üst sınır olarak alınır (Sirel, 1974). Munsell (1974) Renk Dizgesi'nin standart renk örnekleri, renk görünümü ve renkle ilgili eğitim, tasarım vb. alanlardaki çalışmalarda kullanılmaktadır (Akçaözoğlu, 2012).

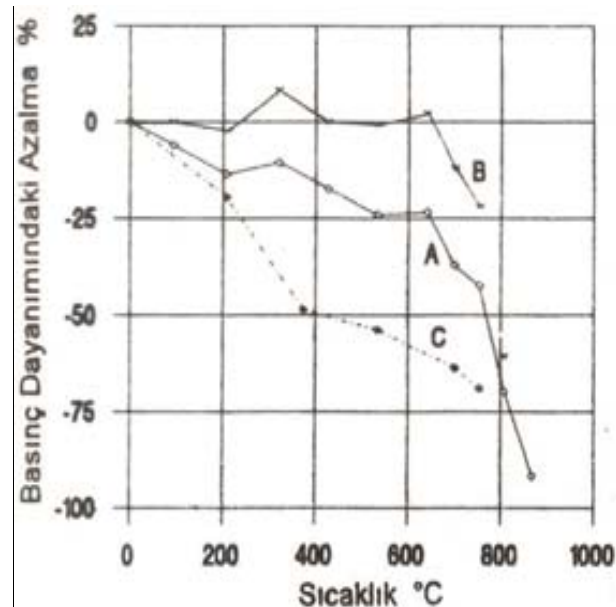
2.2.3 Yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkileri

Betonarme yapılar, yangın, termal şok, endüstriyel uygulamaları vb. durumlarda yüksek sıcaklığa maruz kalmaktadır. Çoğu durumda yüksek sıcaklık beton elemanlarda ve taşıyıcı duvarlarda önemli hasarlara yol açmaktadır (Cülfik ve Özturan, 2002). Betonarme yapılarda ana taşıyıcının beton olduğunu düşünürsek, betonun yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir. Yüksek sıcaklığın betonun basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü gibi mekanik özelliklerine etkisi ayrı ayrı incelenmelidir.

2.2.3.1 Basınç dayanımı

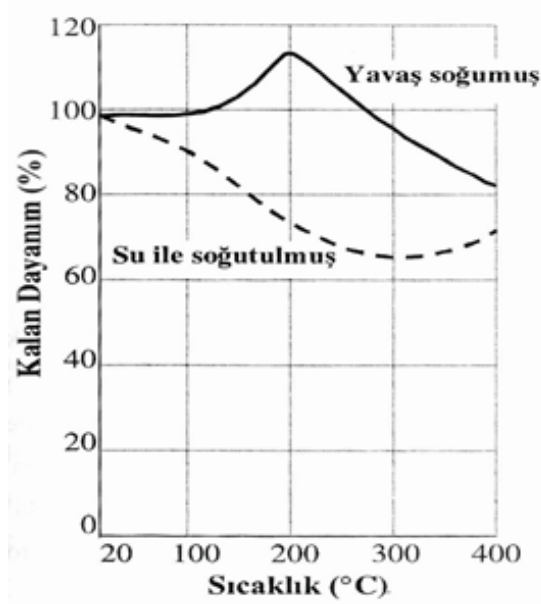
Yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun basınç dayanımına, çimento tipi, agrega türü, su/çimento oranı gibi kullanılan malzeme özellikleri ve sıcaklığa maruz kalınan süre, nem durumu, ısınma ve soğuma hızı, yükleme durumu gibi çevresel faktörler etken olmaktadır (Neville, 2000). Kullanılan malzeme bakımından agrega türünün dayanımdaki etkisi Bölüm 2.2.1.2’de incelenmiştir.

Yükleme durumuna göre basınç dayanımındaki değişim Şekil 2.6’da verilmiştir. Şekilde verilen A grubu numuneler herhangi bir yüklemeye maruz kalmadan ısıtılan, B grubu numuneler, basınç dayanımlarının % 40’ı kadar bir gerilme altında iken ısıtılan, C grubu numuneler ise ısıtılıp 7 gün 21 °C ’de bekletilen numunelerin basınç deneyi sonuçlarını temsil etmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere yüklü numunelerde 600 °C’de basınç dayanımı kaybı görülmemiş, yüksüz numunelerde % 25, ısıtmadan 7 gün sonra basınç deneyi yapılan grupta ise % 60 dayanım kaybı olmuştur (Neville, 2000). Şekil 2.6’daki basınç deneyi sonuçları, C grubu numunelerin temsil ettiği, yüksüz durumda ısıtılıp soğutulduktan sonra basınç dayanımlarının belirlenmesi yönteminin daha güvenli bölgede kaldığını göstermektedir.



Şekil 2.6. Betonun basınç dayanımının yüklemeye göre sıcaklıkla değişimi (Neville,2000)

Soğutma türünün de yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç dayanımına etkisi vardır. Su ile soğutulan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma (Şekil 2.7) havada soğutulan numunelere nazaran daha fazladır (Neville, 2000; Yüzer vd. 2004).



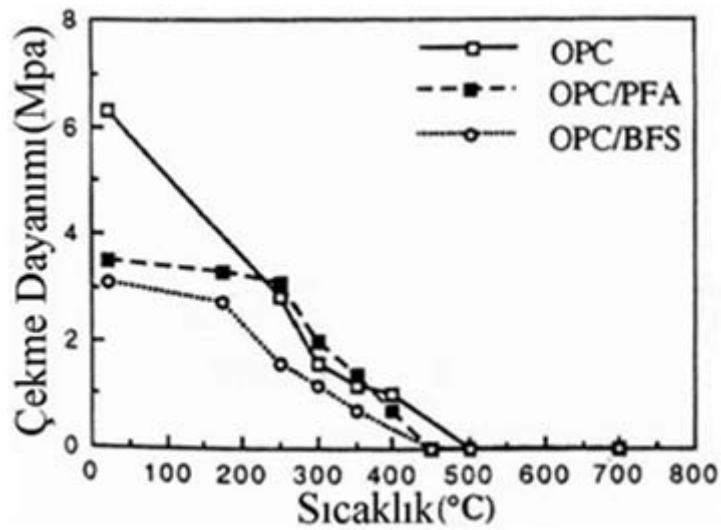
Şekil 2.7. Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)

Shoab vd. (2001) tarafından agrega olarak ayrı ayrı kum ve iki farklı cüruf kullanılarak üretilen farklı su/çimento oranlarına sahip 7.5x15 cm boyutlu silindir numuneler 600 C'ye kadar ısıtılmış ve bu sıcaklıkta iki saat bekletilmiştir. Numunelerde havada soğutulan grupların basınç dayanımındaki azalmanın suda ve fırında soğutulanlardan daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun nedeni atmosferik ortama maruz kalan betonda CaO'nun CaCO₃'e dönüşmesiyle ve bunun hacim değişimine ve çatlaklara neden olmasıyla açıklanmıştır.

Lea ve Straaling betonda 300 °C'ye kadar olan dayanım artışına dikkat çekmişlerdir. Dayanımdaki artış silis esaslı agrega ile üretilen betonlarda daha fazladır ve bunun nedeni çimento ile agrega arasındaki aderansın silisli agregalarda daha yüksek olmasıdır (Savva vd., 2005).

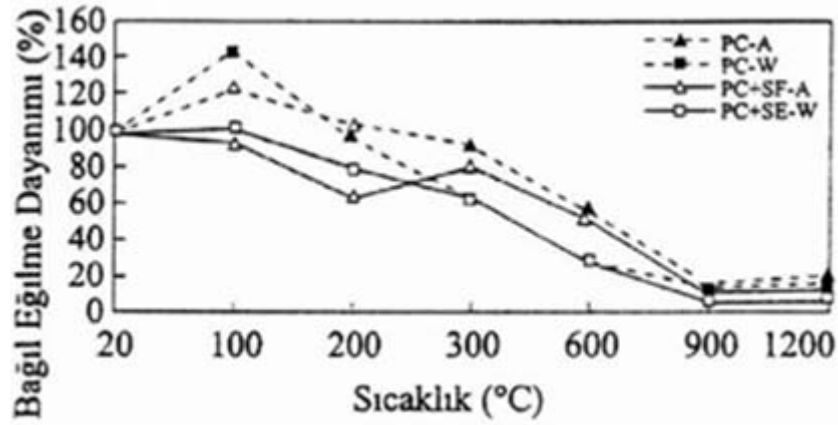
2.2.3.2 Çekme dayanımı

Betonun çekme dayanımı, eğilmede çekme ve yarmada çekme deneyi sonuçları ile araştırılır. Silindir numunelerde değişik sıcaklık etkisinde iken ve soğutulduktan sonra yapılan yarma deneyi ile elde edilen çekme dayanımlarında 100 °C'den itibaren önemli düşüşler olmakta ve 600 °C'de kayıp % 70 'e varmaktadır (CEB, 1991). Guise vd. (1996) tarafından yapılan deneysel çalışma sonucu yüksek sıcaklık etkisinde, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkılı ve katkısız beton numunelerde, 200 ve 300 °C 'de eğilmede çekme dayanımında önemli ölçüde azalma olduğu görülmüştür (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Puzolan katkılı ve katkısız betonların çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Guise vd., 1996)

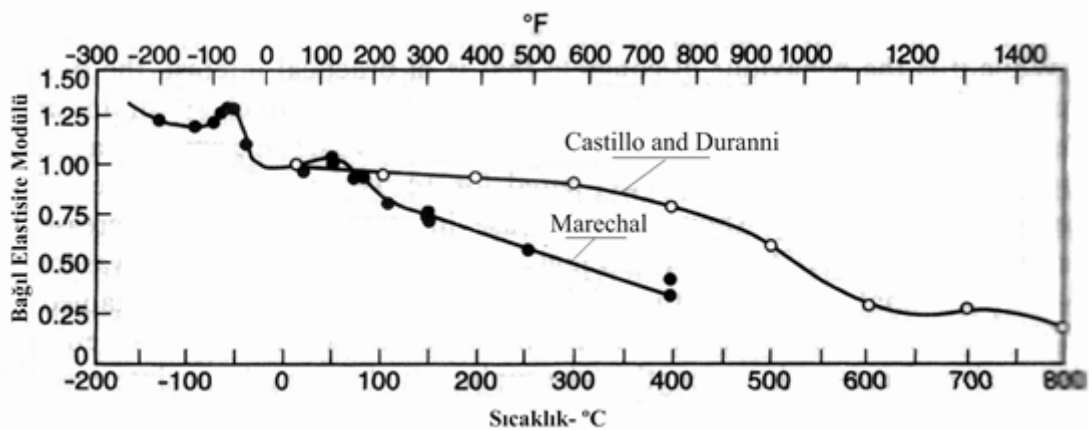
Yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı silis dumanı katkılı ve katkısız harçlar üzerinde yapılan diğer bir deneysel çalışmada, harçların eğilme dayanımı (Şekil 2.9) 100 °C'den itibaren bütün gruplarda azalmaya başlamış, suda soğutulanlardaki kayıp, 300 °C'de yaklaşık % 40'a varmıştır (Aköz vd., 1995).



Şekil 2.9. Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi (Aköz vd., 1995)

2.2.3.3 Elastisite modülü

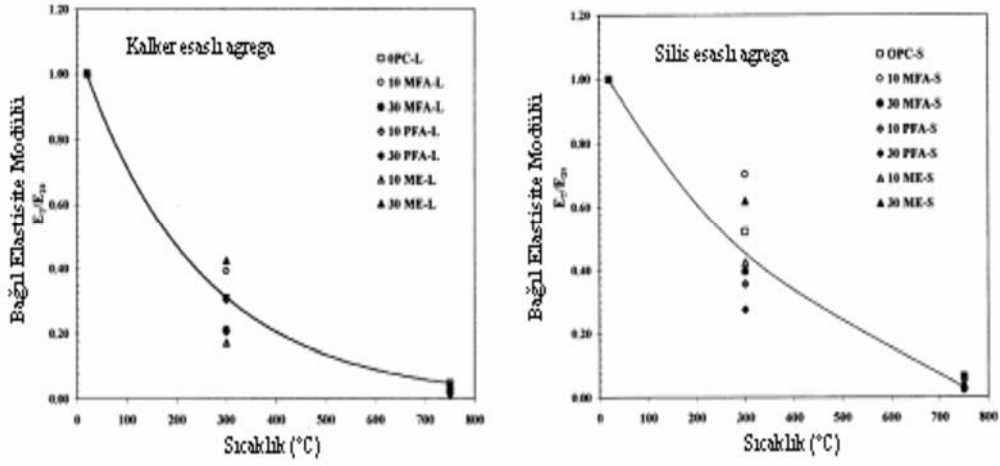
Betonarme yapıların davranışı betonun elastisite modülüne bağlıdır ve bu modül sıcaklıktan oldukça etkilenir. Sıcaklığın betonun elastisite modülüne etkisi Şekil 2.10'da verilmiştir. Kütle halinde kür edilmiş betonlarda 21 °C ile 96 °C'ler arasında elastisite modülünün değerinde herhangi bir değişiklik yoktur. Ancak sıcaklık 121 °C'ye ulaştığında elastisite modülünün değeri azalmaktadır. Su betondan uzaklaştığında, 50 °C ile 800 °C'ler arası elastisite modülündeki azalma giderek artmaktadır. Genel olarak dayanımdaki azalma ile elastisite modülündeki azalma benzer eğilim göstermektedir (Neville, 2000).



Şekil 2.10. Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi (Neville, 2000)

Savva vd. (2005) tarafından yapılan deneysel çalışmada farklı tür ve oranda puzolan katkılı silis esaslı ve kalker esaslı agrega ile üretilen betonlarda tüm sıcaklıklarda elastisite

modülünde devamlı bir azalma gözlenmiştir. Bu azalma kalker esaslı agrega ile üretilen gruplarda daha fazladır (Şekil 2.11). Puzolanların elastisite modülüne etkisi açıkça görülmemekle birlikte betonun kırılması daha az gevrektrir.



Şekil 2.11. Farklı beton numuneleri için sıcaklık- elastisite modülü ilişkisi (Savva vd., 2005)

Uçucu kül kullanılarak yapılan diğer bir çalışmada 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindir beton numunelerde yüksek sıcaklık etkisinden sonra elastisite modülündeki azalmanın uçucu kül içeren betonlarda daha fazla olduğu görülmüştür (Papayianni vd., 2005).

BÖLÜM III

DOĞAL ZEOLİT

3.1 Zeolitin Tanımı

Yirminci yüzyıl teknolojisinin giderek artan hammadde gereksiniminin en çok yansıdığı alan endüstriyel hammaddeler olmuştur. Bunlar içinde ise yoğun araştırmaların yapıldığı ve en çok zincirleme buluşların birbirini izlediği ham maddelerden biri zeolittir. Zeolitler kristal yapıları ve kimyasal özellikleri nedeni ile günümüz endüstrisinde kullanılabilen hammaddedir (Sarız ve Nuhoglu, 1992).

Doğal zeolitler, yaygın kullanım alanlarının varlığı ve büyük pazar potansiyeline rağmen bir çok pazar alanında daha yeni yeni kabul görmeye başlamıştır. Doğal zeolitlerin, tabiatta büyük rezervler halinde bulunup işletilmesi diğer madenlere göre daha kolay ve ucuz olmasının yanı sıra, sentetik zeolitlerden daha ucuz olmasına rağmen, doğal zeolit madenciliği dünyada son yıllarda gelişmeye başlamış ve doğal zeolitlere olan rağbet biraz artış göstermiştir. Fakat doğal zeolitler dünya pazarında henüz tam yerini almış değildir. Bunun başlıca nedeni de istenilen saflık ve istenilen gözenek çaplarında üretilen sentetik zeolitlerin endüstride daha yaygın olarak kullanılmalarına karşın, doğal zeolitlerin kullanım alanlarının sentetik zeolitlere göre daha sınırlı olmasıdır. Ancak doğal zeolitlerin yakın zamanda sentetik zeolitlere üstünlük sağlamaları ve daha yoğun bir şekilde kullanılmaları uzak bir ihtimal değildir (DPT, 1996). Zeolit literatürde farklı şekillerde tanımlanmıştır. Bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Zeoliti 1756'da İsveç'li mineralog Cronstedt keşfetmiştir ve doğal zeolitleri sınıflandırmıştır. Keşfettiği zeolit ısıtıldığında çok çabuk su kaybeden yapısından dolayı Latince "zeo" ve kaya parçalarının ısıtılmasına da "lithos" denilmesinden dolayı malzemeye zeolit adını vermiştir (Karauç, 2008).

"Zeolit" kelime olarak "Kaynayan Taş" anlamındadır. Isıtıldığında patlayarak dağılması nedeni ile bu isim verilmiştir. Alkali ve toprak alkali metallerin kristal yapıya sahip sulu alümina silikatları olup çerçeve silikatlar grubundadır. İskelet yapılarındaki Si/Al oranlarındaki ve içerdikleri katyon cinsi ve miktarlarındaki bazı farklılıklara rağmen;

(M^+ , M^{+2}) $O \cdot Al_2O_3 \cdot 9SiO_2 \cdot nH_2O$ genel formülü ile ifade edilebilirler. Burada M^+ bir alkali katyon olup genellikle Na^+ veya K^+ , nadiren de Li^+ olur. M^{+2} ise bir toprak alkali katyondur ve genellikle Mg^{+2} , Ca^{+2} , Fe^{+2} nadiren de Ba^{+2} , Sr^{+2} olur. Herhangi bir zeolit kristalinin en küçük yapı birimi SiO_4 veya AlO_4 tetraederleridir (dört yüzeyli). Si ve Al tetraederlerinin oluşturduğu birincil yapı ünitelerinin birleşmesi ile tek ve çift halkalı ikincil yapı üniteleri ve yüksek simetrikli parametreler meydana gelir. Bu polieder ve ikincil yapı ünitelerinin üç boyutta değişik şekillerde dizilmesi ile de mikro gözeneklere sahip zeolit iskeleti ortaya çıkar. Poliederler ve bunları birbirine bağlayan ikincil yapı üniteleri arasında yer alan bu mikro gözenekler mikro pencerelerle birleşip bir, iki veya üç boyutlu boşluk sistemleri ve/veya kanalları oluşturur. Boşluk miktarı toplam hacmin %20'si ile %50'si arasındadır. Zeolit minerallerinin en önemli özelliği; bu boşluklar ve bu boşluklara kolayca girebilen ve yer değiştirebilen sıvı ve gaz molekülleri ile toprak alkali iyonlardan ileri gelen "moleküler elek" olmalıdır (Karaüç, 2008).

Günümüzde kullanılan iyon değiştiriciler zeolitler, sentetik reçineler ve sentetik polimerlerdir. Özellikle zeolitler doğada ham olarak bulunabilmeleri, katyon değişim kapasitelerinin ve sıcaklığa dirençlerinin yüksek olması ve çevreye iyi uyum sağlayabilmeleri sebebiyle çok kullanılmaktadır (Colella, 1996).

Zeolitler, alkali ve toprak alkali metal katyonları içeren, kristal yapıya hidratlaşmış alüminosilikat mineralleridir. Zeolitler SiO_4 ve AlO_4 düzgün dörtyüzlülerinin üç boyutlu dizilmeleri ile oluşmuştur. Bu üç boyutlu dizilim sonucunda oluşan boşluk ve kanallarda su molekülü ve I-II A katyonları vardır. Zeolitleri oluşturan dörtyüzlülerde merkezde Si_4^+ veya Al_3^+ iyonu, köşelerde ise oksijen iyonları bulunmaktadır. Dörtyüzlü yapının merkezinde Al_3^+ iyonları bulunduğunda ortaya bir negatif yük çıkmaktadır. Yapıdaki bu negatif yükün dengelenmesi için ek bir yüke ihtiyaç vardır. Bu yük I.A ve II. A grubu metal katyonları tarafından sağlanır. Bu iyonlar kafes yapıda belirli sabit pozisyonlarda bulunmayıp, kafes yapıdaki kanallarda hareket edebilmektedirler. Doğada en çok bilinen zeolit türleri klinoptilolit, çabazit, eriyonit, mordenit gibi minerallerdir. Bu minerallerin yeryüzündeki dağılımı homojen olmamakla birlikte yer kabuğunda daha çok klinoptilolit minerali bulunmaktadır (Uzun, 2009).

Doğal zeolit büyük miktarda reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 içeren bir alüminosilikat mineral tipidir. Çimento katkı maddesi olarak Çin'de çimento endüstrisinde yaygın olarak

kullanılır. Çin’de her yıl 200 milyon tondan daha fazla çimento üretilir ve ortalama 2/3’si düşey fırınlarda imal edilir. Uçucu kül, cüruf ve zeolit gibi katkıları düşey fırınlarda imal edilen çimentoya sağlamlığı geliştirmek için eklenir. Doğal zeolit Çin’de yaygın bir şekilde bulunabilirken bu amaç için kullanılan zeolitin toplam miktarı yılda 30 milyon ton kadardır (Öz, 2006).

Zeolitler alkali ve toprak alkali elementlerin kristal yapıya sahip, sulu alüminyum silikatları olup, son 30 yıldır katalizör, adsorbent ve iyon değiştirici olarak kimya endüstrisinde kullanılmaktadır. Uygulama yelpazesinin genişliği, yüksek iyon değiştirme kapasitesi, mikro gözenekli yapısı, moleküler elek işlevi yapabilmesi, düzenli kristal yapısı, bünyesine su alabilmesi ve kurutulduğunda bu suyun örgü yüzey yapısındaki katyonları bırakarak uzaklaştırabilmesi vb özelliklerine bağlıdır. Bunlara ilave olarak zeolitlerin düşük yoğunluklu olmaları, adsorplayıcı olarak kullanılabilmeleri, silis bileşimine sahip olmaları özellikle çevre analitik kimyasında uygulama alanı bulmalarına olanak sağlamıştır (Öter, 2002).

3.2 Zeolitin Fiziksel Özellikleri

Zeolitler, geniş uygulama alanları için spesifik kullanımı sağlayan, karakteristik özelliklere sahiptirler. Bu özellikler kabaca;

- Yüksek hidrasyon enerjisi,
- Hidrate oldukları zaman sahip oldukları düşük yoğunluk ve boşluk hacmi,
- Katyon değişim özellikleri,
- Dehidrate olmuş kristaller içerisindeki düzgün moleküler boyutlu kanal sistemi,
- Elektriksel iletkenlik,
- Gaz ve su buharı adsorpsiyonu
- Katalik davranışları şeklinde özetlenebilir (Kurama, 1994).

Zeolitlerin başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleri olan; iyon değişikliği yapabilme açık renkli olma, hafiflik, küçük kristallerin gözenek yapısı zeolitlerin çok çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılmasına neden olmuştur (Karaüç, 2008). Tipik bir doğal zeolitin fiziksel özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Doğal zeolitin kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşenler	Miktar (%)
SiO ₂	62.17
Al ₂ O ₃	9.76
Fe ₂ O ₃	2.02
CaO	1.43
MgO	0.75
SO ₃	0.07
KK	14.06
Na ₂ O	0.46
K ₂ O	3.72
TOPLAM	94.44

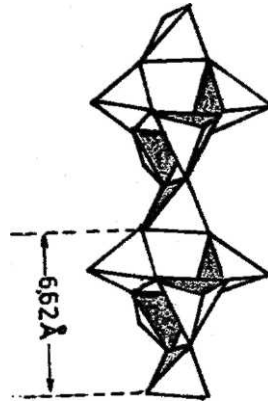
Zeolit Çin’de betonun yüksek performansını sağlamak için mineral bağlayıcı olarak da kullanılır. Feng’e göre çimentonun bir bölümünün zeolit ile yer değişimi, alkali-agrega reaksiyonları sonucu oluşan hacim genişmesini engelleyici ve beton dayanımını yükseltici yönde betonun özelliklerini geliştirebilir. Zeolit katkılı betonun mekanik ve mikroyapısal özellikleri ve dayanımı konusunda çok sayıda araştırma çalışması yürütülmüştür. Zeolitin, betonun çimento pastası ve agregasının ara yüzeyinin mikroyapısal özelliklerini geliştirdiği katkılı çimento pastasının gözeneklerini azalttığı yönünde yayımlar bulunmaktadır (Öz, 2006).

Zeolitin betonun dayanımına katkısı diğer puzolonlar uçucu kül ve silis dumanı gibi; Ca(OH)₂ ile girdiği puzolanik reaksiyon sonucudur. Asıl ilgilenilen nokta bu maddenin puzolanik aktivitesidir (Öz, 2006).

Zeolitler alkali ve toprak alkali metallerin su taşıyan alüminasilikatlarıdır. Zeolitler temelde SiO₄ ve AlO₄ dörtyüzeylelerin (tetrahedronlarının) üç boyutta sonsuz bağlanmaları ile oluşan temel silikat yapısına sahiptirler. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi yapıdaki her oksijen iki dörtyüzlü tarafından paylaşılır. Böylece O/(Al-Si) = 2 atomik oranı meydana gelir. Üç değerli alüminyumun dörtyüzeylelerde yer alması sonucu açığa çıkan eksi yükün Ca, Na, K gibi artı yüklü alkali metal ve toprak alkali iyonları tarafından dengelenmeleri gerekir. Tam dengeli bir yapıda silisyumun yerini alüminyum en fazla

1/1 oranında alabilir. Bu durum, aynı temel silikat yapısına sahip feldispat grubu minerallerde eksi yükün Ca, Na, K gibi katyonlar tarafından dengelenmesi şeklindedir. Yalnız feldispatlarda artı yüklü katyonlar yapı içindeki küçük boşluklarda yer alırlar ve oksijen atomları ile çevre sarılmaları nedeniyle yapı bozulmadan yer değiştiremezler. Aynı durum zeolitlerde farklı durum göstermektedir (Breck, 1975).

Dörtüzeyslilerin oluşturduğu alüminasilikat temel yapısında Na, Ca, K katyonlarının yer aldığı boşluklar daha büyük olup tüm boşlukları doyumadıkları için kolaylıkla yer değiştirebilirler.



Şekil 3.1. Zeolit kristal yapısını oluşturan dörtüzeyslilerin zincir bağlanmaları

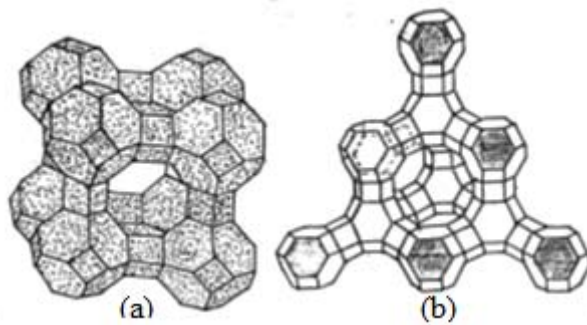
Zeolitlerin benzer yapıdaki mineral gruplarından ayrılan en önemli özelliklerinden birisi de yapı içindeki kanallarda su moleküllerinin bulunmasıdır. Yapıda bu su moleküllerinin yer alabileceği birkaç olası boşluk bulunmaktadır. Bu boşluklarda Na, Ca, K katyonları su molekülleri ile çevrilirler ve su molekülleri zayıf bağlarla hem artı yüklü katyonlara hem de silikat yapısına bağlıdır. Genel olarak yapısında kalsiyum iyonu bulunan zeolitler diğer zeolitlere göre daha fazla su içerirler. Şabazit, höylandit ve stilbit yapısı içindeki su molekülleri potasyumdan daha çok kalsiyum katyonu ile bağlantılıdır (Breck, 1975).

Zeolitler ısıtıldıklarında, 100°C-350°C'de su molekülleri yapıda değişiklik oluşturmadan, birçok mineralde görülen tersine, belli sıcaklıklarda kesikli olarak değil de, sürekli şekilde yapıdan ayrılırlar (Mumpton, 1974).

Suyun yapıdan uzaklaşması sırasında katyonlardan bazıları da dışarı atılırlar. Yapıda elektrik dengesini korumak için bazı katyonlar kanalların çeperlerinde veya kanal yakınlarındaki boşluklar içinde yer alırlar ve diğer katyonlarla her zaman yer değiştirebilirler. Su moleküllerinin ve katyonlardan bazılarının atılması kanallardaki tıkanmaların giderilmesini sağlar. Ancak tutulan katyonların özellikleri kanal açıklığını büyük ölçüde etkiler. Örneğin elektrik yükünün dengelenmesi için Ca^{++} katyonu iki Na^+ katyonunun yerini alabilir. Böylece kanal genişliği artar. Na^+ katyonunun yerini daha büyük K^+ alırsa kanal genişliği azalır. Yapıda katyonlar ne kadar az bulunurlarsa, o kadar dolaşım özgürlüğüne sahiptirler. Ayrıca tek yüklü K^+ ve Na^+ daha zayıf elektrik yükleriyle bağlı olduklarından, çift yüklü Ca^{++} daha hareketlidir (Şenatalar, 1982).

Birçok zeolitin temel kristal yapısı, dörtyüzeylelerin birleşmesinden oluşmuş basit bir yüzeylelerin (polihedronların) üç yönlü bağlanması ile şekillenir. Bu çok yüzeylelerin birbirine bağlanma şekli çok değişik olabilir ve bu bağlanma zeolitlerin kanal özelliklerini belirler. Kanallar bir, iki veya üç yönde birbirleriyle ilişkili oluşabilir (Şenatalar, 1982).

Dört veya altı çok yüzeylelinin birleşmesinden oluşan tek veya çift sıralı halkaların birbirine bağlanması ile kübik yapı hekzagonal prizma yapısı ortaya çıkar. Şekil 3.2 (a)'da yapay zeolitin yapısını oluşturan çift sıralı çok yüzeyleli halkalar (veya kübik yapı), Şekil 2.2 (b)'de ise foyasiti oluşturan çok yüzeylelerin bağlantısı görülmektedir (Şenatalar, 1982).



Şekil 3.2. SiO_4 ve AlO_4 dörtyüzeylelerinden oluşan çokyüzeylelerin (a) yapay zeolitlerde, (b) foyasitte yapıyı oluşturmak için bağlantıları

Birçok zeolitin kanal genişlikleri birkaç angstrom boyutundaki moleküllerin geçmesine uygundur. Zeolitlerin kristal yapısında yabancı moleküllerin barınabileceği boşluk miktarı toplam hacmin %20-50'sine ulaşabilir. Bu nedenle de zeolitlerin birçoğu ticari adsorbent olarak kullanılırlar (Şenatalar, 1982).

Doğal ve yapay zeolitlerden çoğunun kristal yapısı bilinmektedir. Zeolitlerin sınıflandırılması çok yüzeylilerinin dizilimlerine göre yapılmaktadır. Bugün 150 değişik yapıda yapay zeolit üretilmiştir. Bunlardan bazılarının kristal yapıları bilinen doğal zeolitlere benzemektedir. Fakat birçoğunun kristal yapısı henüz çözümlenmemiştir (Şenatalar, 1982).

3.3 Zeolitlerin Kullanım Alanları

3.3.1 Zeolitlerin genel kullanım alanları

Zeolitlerin alterasyona uğramış volkanik küller şeklinde yapı malzemesi olarak kullanımları 2000 yıl öncesine dayanmaktadır. Tarihsel gelişim içerisinde farklı özelliklere sahip zeolit türlerinin katılımları ile doğal zeolitlerin birçok ülkede yapı malzemesi amaçlı kullanımları artan bir eğilimle sürmektedir (Kurama, 1994).

Zeolitlerin endüstriyel proseslerde ilk kullanımları, kristalin zeolitlerin moleküler elek davranışları ve bu özelliklerin kullanıldığı ayırım işlemlerindeki yüksek performanslarına dayalı olarak 1940'lı yılların son döneminde başlamıştır. Devam eden yıllarda, kristalin, yapı, içerik ve özellikleri iyi şekillendirilmiş sentetik zeolitlerin üretilmesi ile zeolitler, Absorpsiyon ve katalitik proseslerde bilinen adsorbant ve katalitik malzemeler yerine etkin bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Bu konudaki ilk örnekler arttırılmış kapasite ve daha büyük selektivite değerleri ile Zeolit A ve X'in kurutma ve safsızlaştırma işlemlerinde aktive edilmiş alüminyum ve silikajel yerine kullanılmalarıdır. Sentetik zeolitlerin katalitik parçalama proseslerinde akışkan veya hareketli yataklar şeklinde uygulamaları 1962 yılında başlamıştır. Gelişim daha yüksek aktiviteye sahip zeolit Y'nin ve petrol rafinasyonundaki spesifik reaksiyonlar için ZSM-5 üretilmesi ile devam etmiştir (Kurama, 1994).

Doğal zeolitlerin sedimanter yataklar içindeki büyük potansiyel yataklarının bulunmalarından sonra artan kullanımlarına ek olarak, son yıllarda termal ve kimyasal reaksiyonlarla modifiye edilmiş doğal zeolitlerin özel amaçlı kullanımları ile endüstriyel prosesler için zeolit talebi artarak gelişimini sürdürmektedir. Günümüzde 40'a yakın doğal zeolit minerali, 150'nin üzerinde sentetik zeolit bulunmakla birlikte bilinen doğal zeolitlerin % 10'u, sentetik zeolitlerin ise % 10'dan fazlası başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Kurama, 1994).

Günümüzde zeolitlerin başlıca kullanım alanları aşağıda özetlenmiştir (Ammæ, 2011).

- Kağıt-deterjan sanayi
- Madencilik
- İnşaat sektörü
- Sağlık sektörü
- Bitkisel ve hayvansal üretim
- Meyve ve sebzelerin depolanması ve nakli
- Çevre kirliliği kontrolü.

Yurdumuzdaki zeolit yataklarının çeşitli amaçlarla endüstride kullanılma alanı bulabileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte bir kaç kuruluş dışında bu konuya yeterince eğilindiği söylenemez. Henüz M.T.A. Genel Müdürlüğü tarafından da zeolit oluşumlarının bir rezerv çalışması yapılmamıştır (Yörükoğulları, 1985).

3.3.2 Zeolitlerin hammadde olarak kullanıldığı alanlar

İyon değişirme, özellikle kation sorpsiyonu ve buna bağlı moleküler elek yapısı, silis içeriği, tortul zeolitlerde açık renkli olma, hafiflik ve küçük kristallerin gözenek yapısı, dehidratasyon vb zeolitlerin başlıca fiziksel ve kimyasal özellikleridir. Zeolitler bu özellikleri ile endüstriyel hammadde olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda önemli bir endüstriyel hammadde haline gelen zeolitlerin kullanım alanlarını şöyle sıralayabiliriz: radyoaktif atıkların temizlenmesi; atık suların temizlenmesi, baca gazlarının temizlenmesi, petrol sızıntılarının temizlenmesi, oksijen üretimi, kömürün gazlaştırılması, doğal gazların saflaştırılması, güneş enerjisinden faydalanma, petrol

ürünleri üretimi, gübreleme ve toprak hazırlanması, tarımsal mücadele, toprak kirliliğinin kontrolü, maden yataklarının aranması, metalürji, kağıt endüstrisi, inşaat sektörü, deterjan sektörü (Gottardi, 1985).

Zeolitler, yüksek seçicilik, az çözünürlük, radyasyona karşı dayanıklılık ve yüksek iyon değiştirebilme kapasitesine sahip olmaları nedeniyle nükleer alanda da kullanılmaktadır. Özellikle radyoizotopların depolanması, radyoaktif atıkların muamelesi ve radyonükleidlerin ayrılmasında büyük oranda kullanılmaktadır (Öter, 2002). Ayrıca nükleer santral atıklarındaki, çevre sağlığını olumsuz etkileyen Sr^{90} , Cs^{137} , Co^{60} , Ca^{45} gibi izotoplar zeolitler tarafından tutulabilmektedir. Bu tür uygulamalarda asitlere dayanıklılıkları sebebiyle klinoptilolit ve mordenit tercih edilmektedir (Ames, 1961).

Şehir ve endüstri tesislerinin atık sularında bulunan azot, balık ve diğer su faunasına toksik etki yaparak, bu faunanın beslendiği alglerin üretilmesini engellemektedir. Atık sularda bulunan azot ve bazı ağır metal katyonları zeolitler tarafından tutulabilmekte ve amonyum da %99 oranında temizlenmektedir (Öter, 2002). Beslenme zincirinde de Pb-Cd-Zn-Cu gibi istenmeyen ağır metal katyonların tutulmasında doğal zeolitler kullanılmaktadır (Öter, 2002).

3.3.3 Zeolit inşaat sektöründeki kullanım alanları

Zeolitler inşaat sektöründe başlıca şu alanlarda kullanılırlar:

- Puzolan çimento üretiminde
- Hafif agrega üretiminde
- Boyutlandırılmış taş üretiminde

Doğal zeolitlerin sulu alt yapılarda kullanılacak puzolan çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir (Sarıkaya, 2006).

İlk puzolan çimentosu yol, su geçidi ve kamu binalarının yapılması için Napoli yakınlarındaki zeolitik tüfler kullanılarak İtalya tarafından üretilmiştir. Zeolitik puzolan çimentoları sürekli su ile temas içinde olan yapılarda etkin bir biçimde kullanılmaktadır. Zeolitik tüfler dünyanın birçok yerinde içlerinde zeolit olduğu bilinmeden yalnız silis

bileşimlerinden yararlanılmak amacıyla kullanılmaktadır. Yugoslavya, Bulgaristan ve Almanya'da büyük miktarlarda zeolitik tuf, puzolan çimentosu üretimi için işletilmektedir (Sarıkaya, 2006).

Zeolitler 200 yıldan beri yapı taşı olarak kullanılmışlardır. Zeolitli tüflerin hafif oluşu kadar dayanıklı oluşları ve kolaylıkla kesilip işlenebilmeleri de yapı taşı olarak kullanılmalarının en önemli nedenleridir. Güney Meksika' da birçok binalar % 90 mordenit ve klinoptilolit içeren zeolitik tüflerden kesilmiş taşlardan yapılmışlardır. Aynı şekilde Japonya' nın Otsunomiyo kenti yakınlarında yüzlerce yıldır yapı taşı olarak işletilen zeolitler 100 metreden fazla kalınlığa sahiptirler. Bu yapı taşı olarak işletilen zeolitler, % 80–85 klinoptilolit yanında az miktarlarda montmorilonit, kaledonit ve volkanik cam içerirler. Orta İtalya'daki ünlü Napoli kentinin hemen hemen tüm binaları büyük miktarlarda şabazit ve filipsit içeren sarı zeolit tüflerinden yapılmışlardır. Orta Avrupa'daki birçok büyük binalarda, Almanya'daki Leacher bölgesindeki zeolitik tüflerden kesilmiş yapı taşları kullanılmıştır. Avrupa'daki birçok ülkede, zeolitlerin yapı endüstrisinde değişik biçimlerde kullanılma olanakları araştırılmaktadır. Klinoptilolit, perlit gibi, 1200–1400 °C' ye kadar ısıtıldığında, içerdiği suyun ani olarak buhar fazına geçmesi ile genişmekte ve bu anda soğuma sağlanırsa hafif ve gözenekli bir silikat malzemesi oluşmaktadır. Böylece geliştirilmiş zeolitlerde yoğunluk 0,8 g/cm³ 'e kadar düşmekte, gözeneklilik de % 65'e kadar çıkabilmektedir (Sarıkaya, 2006).

Genleştirilmiş doğal zeolitlerin sıkışma ve aşınmaya karşı dayanımı daha yüksek olup, genleştirilmiş hafif agrega üretilmektedir. Doğal zeolitik tüfler düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapıdadırlar. Bu özelliklerinden dolayı hafif yapı taşı olarak yapı endüstrisinde kullanımları mümkündür (Sarıkaya, 2006).

Gelişmiş ülkelerde doğal zeolitlerin yapı endüstrisinde kullanımı görülmektedir. Bu ülkelerin başında Rusya, Kanada, A.B.D., Japonya ve Belçika gelmektedir. Özellikle Rus bilim adamları doğal zeolitlerden yapı endüstrisinde, dekoratif süslemelerde kullanılması için çalışmalar yapmışlar ve bu çalışmaların sonuçlarını patent alarak hayata geçirmişlerdir (Sarıkaya, 2006).

Zeolitik tuf yatakları birçok ülkede puzolanik hammadde olarak kullanılmaktadır. Zeolit puzolanları, son beton ürününün daima yeraltı su korozyonuna maruz kalacağı hidrolik çimentolarda, önemli uygulamalar bulmaktadır. Zeolitlerin sulu altyapılarda kullanılacak

puzolan çimento üretiminde kullanılması, yüksek silis içermeleri nedeniyle, betonun katılaşma sürecinde açığa çıkan kirecin nötrleşmesini sağlayabilmektedir. Zeolitik tüfler, düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen, sıkı-sağlam yapıdadırlar. Kolayca kesilip işlenebilmeleri ve hafiflikleri ile iyi bir yapı taşı olarak kullanılabilirler. Doğal zeolitlerden elde edilen hafif yapı malzemelerinin kullanılmasıyla, yapı ağırlıklarının azaltılması sonucu, deprem güvenliğinin artması da sağlanacaktır. Bu malzemelerin hafif olması yapıların taşıyıcı sistemlerinde ekonomi sağlandığı gibi, deprem yüklerine karşı güvenliği de arttırmaktadır (Sarıkaya, 2006.).

Doğal zeolitlerin kullanılmasıyla elde edilen hafif yapı malzemeleri, yüksek ısı yalıtım özelliği ile ısıtma ve soğutma sistemlerinin hem ilk yatırımlarında hem de yapıların kullanımları süresince ortaya çıkan enerji harcamalarında önemli tasarruflar sağlayacaktır. Bu malzemelerin istenilen boyutlarda üretilebilmesi, ahşap gibi kolay işlenebilmesi, delme ve oyma işlemlerinin çok kolay gerçekleştirilmesi, milimetrik duyarlıktaki boyutları nedeniyle düzgün derzler elde edilmesi, sıva işlemlerinin en az kalınlıklara indirilmesi mümkündür. Bütün bunların sonucunda elde edilen düzgün yüzeyler nedeniyle bu malzemelerin üretilmesi, yapımcılara çağdaş teknolojinin üstün özelliklerini sunacaktır (Sarıkaya, 2006).

Doğal zeolitlerden yapılan hafif yapı malzemelerinin, taşıma ve işçilik giderlerinde önemli tasarruf sağlayacağı bir gerçektir. Bu malzemeler ile yapılan yapının ağırlığı azalacak ve deprem güvenliği artacaktır. Bu malzemelerden yapılan blokların düzgün yüzeyli ve düzgün kenarlı olması, duvarların sıvasız bırakılmasına veya sadece ince sıva ile sıvanması olanak verecektir. Bu malzemelerin çeşitli yüksek dayanım gücüne sahip türde üretilmeleri mümkündür. Bu malzemeler yüksek düzeyde ısı yalıtım özelliğine sahiptirler. Doğal zeolitlerin özelliklerinden dolayı bu malzemeler, iklim ve çevre koşullarından etkilenmez. Dayanıklı ve uzun ömürlüdür. Bu malzemelerin hafifliği nedeniyle, büyük boyutlarda üretilmesi mümkündür. Büyük boyutlu ve düzgün yüzeyli bloklarla duvar örülmesi özel bir beceri gerektirmez. Ahşap gibi kesilebilir, delinebilir, tesisat kanalları açılabilir. Bu özellikleri ile yapıyı hızlandırır, malzeme israfını ortadan kaldırır. Doğal zeolitlerden yapılan bu yapı malzemelerinin atış dayanıklı olması yangın güvenliğini artırır ve yangından korunmuş mekânların oluşturulmasını sağlar (Sarıkaya, 2006).

Avrupa'nın bilinen ve ana hammadde olarak silika kumu kullanarak hafif inşaat blokları üreten "Autoclaved Cellular Concrete, (ACC)" teknolojisine rakip olarak geliştirilen yeni bir teknolojiye doğal zeolitler kullanılarak daha ekonomik olarak daha üstün özelliklerde hafif inşaat blokları geliştirilmiştir (Sarıkaya, 2006).

"Light Zeolite Concrete (LZC)" olarak adlandırılan bu yeni hafif inşaat bloklarının bazı özellikleri aşağıda özetle verilmektedir (Sarıkaya, 2006).

- LZC değişik yoğunluklarda üretilebilmektedir. 750–1000 kg/m³ yoğunluklar en yaygın olanlardır. Bu yoğunluklarda üretilen hafif inşaat bloğunun basınç dayanımı 7,5–10 MPa'dır. 750 kg/m³ yoğunluktaki bir blok aynı boyutlardaki bir beton bloğun 1/3 ağırlığında, diğer yöntemlerle üretilmiş olan gözenekli hafif blokların 2/3 ağırlığındadır. Bu nedenle taşıma ve inşaat-montaj işlemlerinde önemli tasarruflar sağlamaktadır.
- LZC hafif inşaat bloklarının sıkıştırılabilme gücü 5–30 MPa arasında istenilen değerde ayarlanabilmektedir. İçi boş olarak üretilerek hafif olmaları sağlanan diğer inşaat bloklarından daha fazla taşıma gücüne sahiptir.
- LZC, klasik inşaat bloklarına kıyasla, boyutları çok daha değişmez ve tekrarlanabilir olarak üretilebilir. Bu nedenle inşaat sıvasında bloklar arasında kullanılacak harçtan önemli tasarruflar yapılabilir. Bir LZC üreticisinin iddiasına göre klasik inşaat bloklarında bloklar arası için 10 mm harç kalınlığına ihtiyaç duyulurken, bu kalınlık LZC için 4 mm'dir.
- LZC blokların ısı yalıtımı diğer inşaat bloklarına kıyasla çok üstündür.
- LZC bloklar ayrıca ses ve gürültü yalıtımı da sağlamaktadır.
- LZC atmosferik koşullarda çok dayanıklıdır (Sarıkaya, 2006).

3.4 Doğal Zeolitin Dünyadaki Yeri

Dünya zeolit rezervlerini tam olarak tespit edilmiş rakamlarla vermek mümkün değildir. Dünyada zeolit oluşumları 1950'lerden sonra saptanmaya başlamış ve hemen hemen bütün kıtalarda yaygın olarak görülmüştür. Yeryüzünde sedimanter kayalarda en fazla

klinoptilolit mevcut olmakla birlikte, en az onun kadar ticari değeri olan mordenit, filipsit, şabazit, erionit ve analsim minerallerine de oldukça sık rastlanmaktadır. Zeolit konusunda rezerv miktarlarından ziyade, tespit edilen oluşumlarından mineralojik-kimyasal-fiziksel detay araştırmalarının yapılıp yapılmadığından bahsetmek daha yerinde olacaktır. Çünkü özellikle volkanik sedimenter bölgelerde tesbit edilen zeolit oluşumları, en kaba tahminler ile ve tüm sınır değerleri en düşük seviyelerde tutulsa bile milyar ton'larla ifade edilebilen yayılmalara sahiptir. Bu tip jeolojik bölgelere sahip ülkelerin birçoğu yüksek zeolit rezervlerine sahiptir. Bu durumda teknolojik parametreler açısından araştırmalarını tamamlamış ülkeler sanki dünya ülkeleri arasında en büyük rezervlere sahip gibi görünmektedir. Bu değerlendirmeler çerçevesinde önemli zeolit üreticisi olan Küba, Eski SSCB, A.B.D, Japonya, İtalya, Güney Afrika, Macaristan ve Bulgaristan'ın önemli rezervlere de sahip olduğu söylenbilir (Sarıkaya, 2006).

Zeolitik kayaların dağılımı volkanizma ile çok yakından ilgilidir. Hidrotermal kontak metamorfizma örtü diyajenezi, yeraltı suyu sızması, kaynaklı zeolitler çoğunlukla kalın yığılımların ve eř zamanlı volkanizmanın oluştuğu daha geç cevher kuşaklarında ve sıcak spotlar içerisinde geniş bir dağılım gösterirler. Bu dağılım pasifik halkası için Yeni Zelanda, Japonya, Kore, Sakkalin, Alaska, Batı Amerika; Tethys bölgesi için İspanya, Fransa, İtalya, İsviçre, Yugoslavya, Romanya, Macaristan, Türkiye ve Rusya'yı kapsar. Asidik vitrik tf ve vitrik sedimanlar içindeki klinoptilolitler örtü diyajenezi kaynaklı gözüken ada yayı ve kıtalara yakın hızlı sedimantasyonun bulunduğu alanlarda derin deniz sedimanları ile i yataklanma gösterirler. Yan kurak iklimlerde volkanizma ile oluşan alkali tuzlu gl yatakları içinse Doğu Afrika ve Batı Amerika'daki oluşumlar gösterilebilir (Kurama, 1994).

Bugün çok iyi bilinen Itoya (Japonya), Hector (Kaliforniya), Tokaj (Macaristan), Rhodope (Bulgaristan), Ozequi ve Khekordzula (Gürcistan) ve Aydağ (Azerbaycan) klinoptilolit yatakları; Itado ve Shiroiski (Japonya) mordenit yatakları, Bowie (Arizona) abazit yatakları vitrik tften türemişlerdir (Kurama, 1994).

Çizelge 3.2. Dünya klinoptilolit dağılımı

Kıta	Ülke	Kalite
Avrupa	Bulgaristan	Mükemmel
	Çekoslovakya	İyi
	Danimarka	Fakir
	Fransa	İyi
	İngiltere	Fakir
	Macaristan	Mükemmel
	Polonya	Mükemmel
	Romanya	Mükemmel
	Sovyetler Birliği	Mükemmel
	İspanya	Mükemmel
	İsviçre	Fakir
Yugoslavya	Mükemmel	
Türkiye	Mükemmel	
Afrika	Angola	İyi
	Güney Afrika Cum.	Mükemmel
	Tanzanya	Mükemmel
Asya ve Avustralya	Iran	Mükemmel
	İsrail	Mükemmel
	Pakistan	İyi
	Çin	Mükemmel
	Japonya	Mükemmel
	Kore	Mükemmel
	Yeni Zelanda	İyi
Avustralya	İyi	
Güney Amerika	Arjantin	Mükemmel
	Şili	Mükemmel
Kuzey Amerika	A.B.D	Mükemmel
	Kanada	İyi
	Küba	Mükemmel
	Meksika	Mükemmel
	Panama	Mükemmel

Dünyaya yayılmış birçok ülkede klinoptilolit oluşumu mevcuttur. Bu yatakların çoğunda klinoptilolit kalitesi ile orantılı olarak yatakların bir çoğunda işletme çalışmaları yapılmakta ve elde edilen ürünler değişik endüstriyel prosesler için pazarlanmaktadır. Çizelge 3.2'de dünya klinoptilolit dağılımı ve kalitesi görülmektedir (Kurama, 1994).

3.5 Doğal Zeolitin Türkiye'deki Yeri

Ülkemiz doğal zeolitler açısından ideal jeolojik ortamlara sahip olmasına rağmen, ülkemizde ilk defa 1971 yılında Gölpazarı-Göynük civarında analsim oluşumları saptanmıştır. Daha sonra Ankara'nın batısında analsim ve klinoptilolit yatakları bulunmuştur. Volkanik tortul oluşumlarının gözlenebildiği ülkemizde daha çok klinoptilolit ve analsim türleri yoğunlukta olup diğer türlere çok az rastlanmıştır. Türkiye'de detaylı etüdü yapılmış tek zeolit sahası Manisa-Gördes civarındaki MTA ruhsatlı sahadır. Sahada 18 milyon ton görünür zeolit rezervi ve 20 milyon ton zeolitik tüf rezervi tespit edilmiştir. Balıkesir-Bigadiç bölgesinde ise, Türkiye'nin en önemli zeolit yataklanmaları tespit edilmiş olup kolaylıkla işletilebilir nitelikte yaklaşık 500 milyon ton rezerv 1995 yılında tahmin edilmektedir. Diğer bölgelerde detaylı bir çalışma yapılmamış olup, ülkemiz genelinde toplam rezervin 50 milyar ton civarında bulunduğu tahmin edilmektedir. Ülkemizde kesin doğal zeolit rezerv tespit çalışması bulunmamaktadır. Bunun başlıca nedeni, henüz bilinen zeolit oluşumlarının birçoğunda volkanikler içerisindeki zeolitik zonların sınırlarının belirlenmemiş olmasıdır. Ancak, Gördes, Bigadiç, Emet, Kırka ve Karamürsel gibi bazı bölgeler için gerek zeolitli zonlar gerekse kayaç içerisindeki zeolit oranları ile ilgili yapılan ayrıntılı çalışmalar milyarlarca ton zeolitli tüf rezervini ortaya koymuştur. Özellikle Gördes ve Bigadiç' de kayaç içerisindeki zeolit oranı ortalama %80 civarındadır (Şen, 2006).

Türkiye' deki yatakların büyüklüğü ve kalitesine rağmen işletilebilirliği ve kullanım alanları üzerindeki bilgilerin azlığı, zeolit kaynaklarının değerlendirilmesine engel olmaktadır. Dünyada doğal zeolitlerin kullanımı ve üretimi hızla gelişmekte ise de ülkemizde bu zamana kadar, zeolit üretimi yapılmamıştır. Pilot çapta ürün kullanımı belirleme çalışmaları için küçük yapılmaktadır (Sarıkaya, 2006).

İç Batı Anadolu'da Bigadiç, Şaphane, Gediz ve Emet dolaylarında bol miktarlarda ve saf olarak klinoptilolit ve analsim bulunmuştur. Ca⁺⁺ ve K⁺ esaslı olmaları yönünden

höylandit mineralini andıran bu oluşumların, ısıl kararlılıkları ve diğere özelliklerinin araştırılması sonucu bu yatakların klinoptilolit olduğu kesinlik kazanmıştır (Ataman, 1997).

Ege Bölgesi'nde, İzmir-Urla karayolu ve Aydın yörelerinde de benzeri oluşumlara rastlanmıştır. Genel olarak, Ege Bölgesi'ndeki bu yatakların, kaba rezerv çalışmalarına göre 50 milyon ton olduğu, gerçekte ise rezerv bu sayının çok üstündedir. Ayrıca, Ürgüp yakınlarında bol safsızlık içeren lifli şabazit, eriyonit ve mordenit bulunmuştur (Yörükoğulları, 1985).

Analsim ve klinoptilolit dışındaki şabazit, eriyonit ve mordenit gibi kullanım potansiyelleri olan doğal zeolitlerin saf olmamaları ve rezervlerinin yeterli olmaması yapılan yayınlardan anlaşılmaktadır. Analsimin kapalı yapılı ve kil minerallerine benzer bir zeolit türü olması kullanılma potansiyelini sınırlamaktadır. Bugün yalnızca İç Batı ve Batı Anadolu'daki klinoptilolit yataklarının ekonomik değere taşıdıkları söylenebilir (Yörükoğulları, 1985).

Zeolit minerallerinin değişik türleri vardır. Bazıları eriyonit ve mordenit gibi lifsi, çubuksu ve iğnemsî yapılıdır ve akciğere zarında kanser yapıcı mezotelyome hastalığına neden olurlar. Orta Anadolu ve Ege bölgelerinde bu tür zeolit oluşumlarına rastlanmıştır. Ülkemizin doğal zeolit yatakları mineral türleri ile birlikte Çizelge 3.3'te verilmektedir (Öter, 2002).

Çizelge 3.3. Yörelere göre Türkiye’deki zeolit mineral bileşimleri

Yörelere	Mineral bileşimleri
Gördes, Manisa	Holandit, Kuvarts, Muskovit, Eriyonit, Mordenit, Klinoptilolit, Analsim
Bigadiç, Balıkesir	Klinoptilolit, Analsim, Holandit, Kuvarts, Muskovit, Şabazit Dakiardit, Eriyonit, Mordenit
Emet, Kütahya	Klinoptilolit, Analsim
Kırka, Eskişehir	Holandit, Klinoptilolit, Filipsit
Mustafa Kemal Paşa, Bursa	Holandit, Klinoptilolit
Keşan-Uzunköprü, Edirne	Klinoptilolit
Gelibolu, Çanakkale	Klinoptilolit
Şile, İstanbul	Mordenit
Karamürsel-Yalova, Yalova	Klinoptilolit
Beypazarı, Ankara	Analsim, Klinoptilolit, Wairakit, Şabazit
Gediz, Kütahya	Analsim, Klinoptilolit
Şaphane, Kütahya	Klinoptilolit
Urla, İzmir	Analsim
Ürgüp, Nevşehir	Analsim, Klinoptilolit, Şabazit, Mordenit
Çankırı-Çorum-Şabanözü	Analsim
Kalecik-Ankara	Analsim
Polatlı-Ayaş-Nallıhan-Çayırhan	Analsim
Sandıklı, Afyon	Şabazit, Analsim, Klinoptilolit
Yağmurlu, Manisa	Klinoptilolit, Holandit, Kuvarts, Mikroklin, Kalsit
Foça, Çeşme, İzmir, Gölcük, Isparta	Klinoptilolit, Holandit, Mikroklin, Şabazit, Eriyonit, Mordenit

BÖLÜM IV

ISI İLETKENLİK

Isı iletimi; atomik ya da moleküler seviyedeki aktiviteler ile ilişkili olup, maddenin molekülleri arasındaki temastan dolayı, daha fazla enerjiye sahip olan moleküllerden daha az enerjiye sahip moleküllere doğru enerji transferi olarak ifade edilebilir (Kayfeci, 2005). Ortam içerisinde bir bölgede sıcaklığın yüksek olması o bölgedeki moleküllerin ortalama kinetik enerjilerin yüksek olduğunu gösterir. Ortalama kinetik enerjileri yüksek olan moleküller enerjilerinin bir kısmını ortalama kinetik enerjileri düşük olan komşu bölgedeki moleküllere iletirler (Arı, 2009).

4.1 Isı İletkenliği Ölçüm Yöntemleri

Genel olarak sabit koşullarda katı malzemelerin ısı geçirgenliklerini belirlemek için birçok yöntem mevcuttur. Bu yöntemler sırasıyla; Eksenel Akış Yöntemleri, Plaka Metodu ile Isı İletkenliği Ölçüm Yöntemi, Sıcak Tel Yöntemi ve Sıcak Kutu (Hot-Box) yöntemidir.

4.1.1 Eksenel akış yöntemleri

Eksenel akış yöntemleri; literatürde tutarlı, doğru sonuç veren en iyi yöntemler arasındadır. Bu yöntemde bir elektrikli ısıtıcı kullanılmaktadır ve ısıtıcıdan yayılan ısı numune boyunca ilerlemekte ve numune alt ve üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farklılıkları tespit edilmektedir. Burada en önemli husus radyal yönlerdeki ısı kayıplarının en alt seviyede olmasını sağlamaktır. Isıtıcının gücü kolon ısı akış hesaplarında kullanılmaktadır. Bu kayıplar düşük sıcaklık seviyelerinde minimumdur. Numune sıcaklığı, oda sıcaklığının üzerinde olduğunda ısı kayıplarının kontrolü sıcaklık artışına bağlı olarak zorlaşmaktadır. Bu yüzden, yanal izolasyon iletiminin, numunenin etkili iletimine oranı gibi deneysel parametrelere büyük önem verilmelidir. Bu da kaliteli izolasyon malzemesinin kullanımını gerektirmektedir.

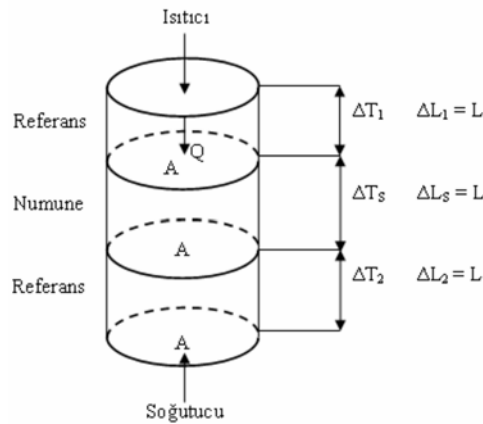
Eksenel akış yöntemleri üçe ayrılır. Bunlar; mutlak eksenel ısı akış yöntemi, referans numuneli ölçüm yöntemi, koruyuculu ve koruyuculu olmayan ısı akış ölçüm yöntemidir.

4.1.1.1 Mutlak aksenal ısı akış yöntemi

Bu yöntemde numunenin bir tarafında ısı akışı verilirken, diğer taraftan soğutma işlemi uygulanmaktadır. Numunenin alt ve üst yüzeyleri arasındaki ısı farkları ölçülür. Ayrıca ısıtıcıya beslenen elektriğin gücünün de belirlenmesi gerekir. Bu yöntemde ısıtıcının yüzeylerinde ısı kaybı büyük bir önem taşımaktadır. Bu nedenle ısıtıcının da izolasyonu yapılmalıdır.

4.1.1.2 Referans numuneli ölçüm yöntemi

Yöntem, ısı iletkenliği bilinen numunelerin arasına ısı iletkenliği bilinmeyen numunenin yerleştirilmesiyle gerçekleştirilir (Şekil 4.1). Küçük ısı kayıplarını belirlemek çok zor olduğundan, hesaplamalarda göz ardı edilmektedir. Sisteme belirlenen güç, numunenin alanı ve boyu bilindiğinden eşitlik 4.1 kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmektedir. Referans numuneler ile numune boyu aynı alınmaktadır (ASTM E1225, 1988).



Şekil 4.1. Referans numuneli ölçüm yöntemi

$$\frac{Q}{A} = K_s \frac{\Delta T_s}{L} = K_R \frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2} \frac{1}{L} \quad (4.1)$$

Burada;

Q : Isı miktarı (W)

A : Isı iletkenliği bilinen ve bilinmeyen numunelerin alanı (m²)

ΔT₁ : Birinci referans numunenin alt-üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (°C)

ΔT₂ : İkinci referans numunenin alt-üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı (°C)

- ΔL_1 : Birinci referans numunenin uzunluğu (m)
 ΔL_2 : İkinci referans numunenin uzunluğu (m)
 K_R : Ölçüm yapılan numunenin ısı iletkenliği (W/m°C)

Buradan, ısı iletkenlik katsayısı bilinmeyen numunenin ısı iletkenliği eşitlik 4.2 deki gibi belirlenir;

$$K_s = K_R \frac{\frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2}}{\Delta T_s} \quad (4.2)$$

Bu yöntemin uygulanmasında izolasyon malzemesi kullanılması gerekmektedir (ASTM E1225, 1988).

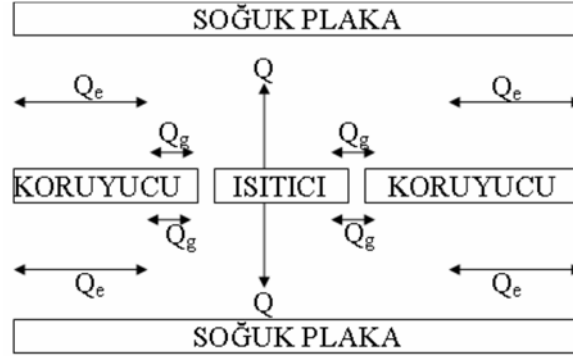
4.1.1.3 İzolasyonlu veya izolasyonsuz ısı akış ölçüm yöntemi

Bu yöntem daha önce bahsedilen ölçüm yöntemlerine çok benzer. Tek farkı akımölçer kullanılmasıdır. Referans numune çok düşük ısı iletkenliğine sahip olmalı ve ince numune kullanılmalıdır. Genellikle, referans numunenin her bir yanına, termokupl çiftleri yerleştirilir. Ayrıca sistemdeki ısı kayıpları tespit edilmeye çalışılmaktadır. Bu yöntem pek çok değişik çevre koşulları ve örneklerin ısı geçişini ölçmeye uygulanabilmektedir. Genellikle 10 – 25 mm kalınlığında, numune çapı 50 mm'ye kadar olan numunelere uygulanmaktadır (ASTM C518, E1530, 1991).

4.1.2 Plaka metodu ile ısı iletkenliği ölçüm yöntemi (Koruyuculu sıcak plaka yöntemi)

Bu yöntem, izolasyon malzemelerinin ısı iletkenliğini ölçmek için çok yönlü ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Her ne kadar ölçüm yapılan numuneler, genellikle geniş olmakla birlikte, bu durum herhangi bir ölçüm zorluğu oluşturmamaktadır. Ölçüm sisteminin ortasında her bir yanı izole edilmiş ısıtıcı yer almaktadır. Isıtıcının tüm yönlerinde termokupl yerleştirilmiştir ve elektrik kaynağı ile desteklenmiştir. Isıtıcının, altına ve üstüne ölçüm yapılan numune yerleştirilmekte, numunelerin diğer yüzeyleri ise soğutucu ile temas ettirilmektedir (Şekil 4.2). Bu sistemde, bir veya iki numune ile çalışmak mümkündür (ASTM C177, 1985).

Isıtıcıdan, akışın sağlanması sonucunda ısı akışı, numunenin sıcak ve soğuk yüzeyleri arasındaki sıcaklık farklarının tespitinden sonra hesaplamalar Eşitlik (4.3) veya (4.4)'e göre yapılmaktadır.



Şekil 4.2. Isı akışı diyagramı (ASTM C177, 1985)

- Q : Isıtıcıdan yayılan ısı akışı
- Q_e : Kenarlardaki ısı akışı
- Q_g : Boşluklardaki ısı akışı

Eğer iki numune ile ölçüm yapılıyorsa;

$$k = \frac{Q \cdot L_{ort}}{2A \cdot \Delta T_{ort}} \quad (4.3)$$

Q : Isı miktarı (W)

L_{ort} : Numune uzunluklarının ortalaması $\frac{L_1 + L_2}{2}$ (m)

ΔT_{ort} : Numunenin alt-üst yüzeyleri arasındaki sıcaklık farkı ortalaması $\left(\frac{\Delta T_1 + \Delta T_2}{2}\right)$ (°C)

A : Ölçüm alanı (m²)

Eğer tek numune ile ölçüm yapılıyorsa;

$$k = \frac{Q \cdot L}{A \cdot \Delta T} \quad (4.4)$$

Bu yöntemin bir diğer uygulaması da Şekil 4.3.'deki gibi olmaktadır. Yedek ısıtıcılar; numune yüzeylerinin sıcaklıkları, oda sıcaklıklarına yakın iken kullanılmamaktadır. Ayrıca söz konusu durumda ikinci izolasyona da gerek yoktur. Daha yüksek sıcaklıklarda

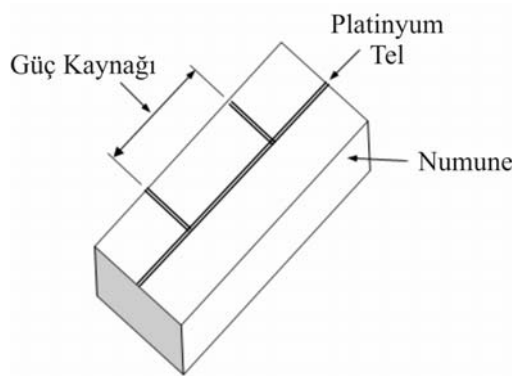
iki yedek ısıtıcıda aynı sıcaklıkta çalıştırılmaktadır. Amaç, radyal ısı akışını azaltmaktır. Soğutma üniteleri ise, ısıtma birimlerinin meydana getirdiği enerjiyi gideren izotermik plakalardır (ASTM C177, 1985).



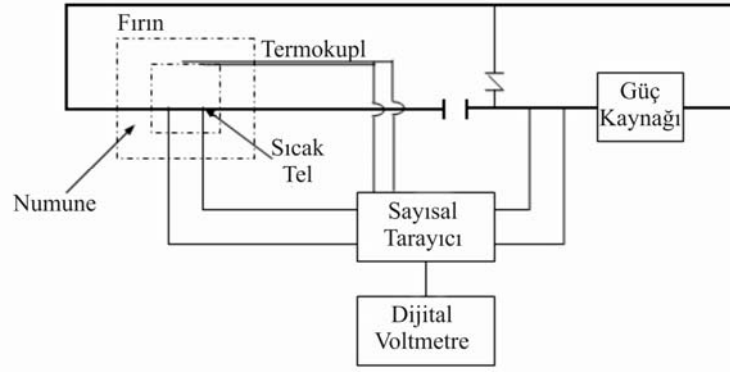
Şekil 4.3. Plaka yöntem cihazı (ASTM C177, 1985)

4.1.3 Sıcak tel yöntemi

Bu yöntem, izolasyon tuğlası, pudra ve lifli malzemeler gibi refrakterlerin ısı iletkenliğini ölçmek için çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Yöntem izotropik numuneleri gerektirir. Nispeten düşük ısı iletkenli plastik ve sıvı malzemelerin ısı özelliklerini ölçmek için, sınırlı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 4.4. Sıcak tel yöntemi (ASTM C1113, 1990)

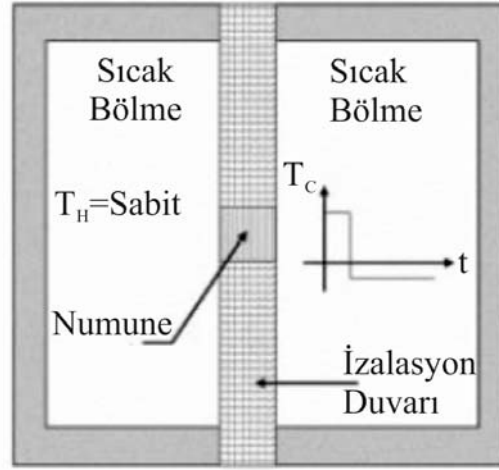


Şekil 4.5. Sıcak tel cihazının diyagramı (ASTM C1113, 1990)

İki numune arasına yerleştirilen Şekil 4.4’deki gibi saf platinyum tele sabit bir elektrik akımı uygulanmaktadır. Platinyum telin sıcaklık artış oranı belirlenmekte, Fourier eşitliği kullanılarak, sıcak telin sıcaklık artış oranı ve güç girişini baz alan ısı iletkenlik değeri hesaplanmaktadır. Bu yöntemin, son uygulamasındaki değişme; bir sonda (probe) kullanılmasıdır. Bu uygulamada, sonda, test numunesine yerleştirildiğinde, sondanın ibresi numunenin iletkenliğini gösterir. Bu yöntem, düşük iletkenliğe sahip toz ya da yarı katı malzemeler de uygulanmaktadır. Sonda cihazı katıların yerinde ısı özelliklerini ölçmek için de kullanılabilir. Ancak, genel uygulama numunenin kapalı kontrollü bir fırın içerisine yerleştirilmesi ve bir baz sıcaklığı uygulayarak sabit ortam yaratılmasından sonra ve deneylerin gerçekleştirilmesi şeklindedir. Sonda (probe) Şekil 4.5’deki gibi, bir ısıtıcı ve bir termokupl da ihtiva eder (ASTM C1113, 1990).

4.1.4 Sıcak kutu (Hot - box) yöntemi

Sıcak kutu yönteminde ise bir bloğun ısı iletkenlik değeri, “Yapı Elemanlarının Yalıtılmış Sıcak Kutu Yardımıyla Denge Durumunda Isısal Performanslarının Test Yöntemi” olarak kabul edilen ve TS EN ISO 8990 standardında öngörülen test düzeneği yardımıyla, bir yapı elemanının birebir boyutta ısı iletkenliği ve ısı geçirgenlik direnci gibi teknik parametreler ölçülebilmektedir (Şapçı, 2008). Sıcak kutu yöntemine ait şematik gösterim Şekil 4.6 da verilmiştir.



Şekil 4.6. Hot Box Cihazı Konfigürasyonu (Arı, 2009)

Sıcak kutu (Hot box) yöntemi, sıcak oda ve soğuk olmak üzere iki bölüme ayrılmış ve yalıtılmış bir kutudan oluşan deney cihazı ile kagir birim deney numunelerinde ısı iletkenlik ve ısı geçirgenlik direncinin tayinini kapsayan bir yöntemdir. Bu yöntemde, bir yapı elemanı yalıtılmış bir kutu içerisine kutuyu iki bölüme ayırarak şekilde yerleştirilir. Bir bölümden ısı kaynağı-direnç arkasında bulunan vantilatör ve bölme içerisinde hava cevrimi sürekli sağlanmaktadır. Bu şekilde ısınan malzeme yüzeyinden diğer bölmeye aktarılan ısı, hassas sıcaklık ölçerler (termo-couple) ile ölçülmekte ve ısı geçirgenlik değeri hesaplaması yapılmaktadır (Şapçı, 2008).

Deney düzeneği, güç kaynağını ve sıcaklık değişimlerini tam olarak ölçebilmektedir. Isı sensörleri 0,1 °C hassasiyette ve sıcaklık °C olarak okunabilmektedir. Verilen ısının kontrolü, sürekli değişebilen (20-400 watt) akım ile sağlanabilmektedir. Deney cihazı, ısının geçişi üç boyutlu olması nedeniyle, hatalar minimize edilerek dizayn edilir. İletimin temel ilkesi, tasınım ile ısı transferinin olmadığını göstermektir. Deney düzeneğinin kalibrasyonu, ısı iletkenlik değeri bilinen malzemelerin test edilmesi ile sağlanabilmekte ve rezistans bağlanarak, kararlı durumun önemli özellikleri gösterilebilir. Bu teçhizat ile boşluklu veya kagir birim elemanlarının veya farklı katı maddelerin ısı iletkenliğini ölçmek için kullanılır (Şapçı, 2008).

BÖLÜM V

MALZEME ÖZELLİKLERİ VE DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri ile beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları, numune boyutları ve bu numuneler üzerinde yürütülen deneyler hakkında bilgi verilmektedir.

5.1 Kullanılan Malzeme Özellikleri

Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen çimento, doğal zeolit, agrega ve akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır.

5.1.1 Çimento

Bu çalışmada, BAŞTAŞ Başkent Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş tarafından üretilen, TS EN 197-1 (2002) ile uyumlu CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun taze olarak kullanılmasına özen gösterilmiş ve nem almayacak şekilde koruyucu kaplarda korunmuştur. Kullanılan çimentoya ait kimyasal özellikler Çizelge 5.1’de, fiziksel özellikler ise Çizelge 5.2’de verilmiştir. Bu değerler BAŞTAŞ Başkent Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş’den alınmıştır.

Çizelge 5.1. Kullanılan çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Cl	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	K.K
Miktar (%)	20.39	5.25	3.07	62.91	1.42	0.02	3.43	0.58	0.91	1.91

Çizelge 5.2. Kullanılan çimentonun fiziksel özellikleri

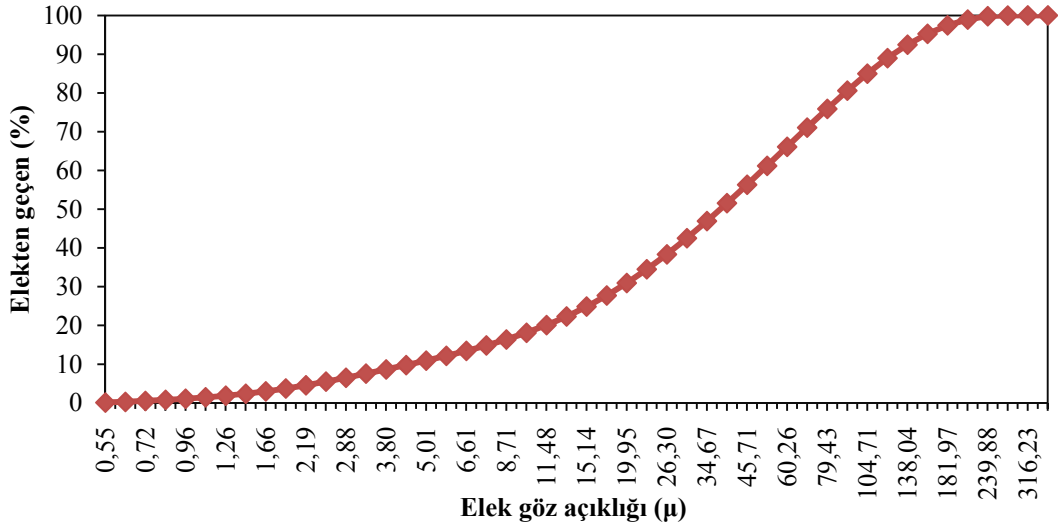
Özgül Ağırlık (gr/cm ³)		3,11
Priz süresi	İlk (Dakika)	160
	Son (Dakika)	214
	Özgül yüzey(cm ² /gr)	3530
İncelik	0.040 mm elek kalıntı(%)	11,13
	0.090 mm elek kalıntı(%)	0,79
Basınç Dayanımı (MPa) 2 günlük		26.81
Basınç Dayanımı (MPa) 7 günlük		40,02
Basınç Dayanımı (MPa) 28 günlük		49,91

5.1.2 Doğal zeolit

Çalışmada kullanılan doğal zeolit (DZ) Manisa-Gördes'te faaliyet gösteren Rota Madencilik Dış Tic. A.Ş. tesislerinden temin edilmiştir. DZ'nin kimyasal özellikleri Çizelge 5.3'te verilmiştir. Çalışmada kullanılan DZ'nin granülometri eğrisi Şekil 5.1'de verilmiştir. Kullanılan DZ'nin özgül ağırlığı 2,18 gr/cm³ olup özgül yüzeyi 3900 cm²/gr'dır. Ayrıca DZ'nin 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksi sırasıyla %60 ve %72'tir.

Çizelge 5.3. Doğal zeolitin kimyasal özellikleri

Kimyasal bileşenler	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	K.K
Miktar (%)	68,4	10,9	1,3	3,1	1,1	0,5	2,9	10



Şekil 5.1. Doğal zeolitin granülometri eğrisi

5.1.3 Agregata

Deneysel çalışmalarda, 5-15, 0-6 ve 0-3 mm olmak üzere üç grup agregata kullanılmıştır. 5-15 mm agregata Nevşehir ili Sulusaray Kasabası Karayazı bölgesindeki konkasör tesisinden elde edilen bazalt agregatdır. 0-6 ve 0-3 mm agregatlar ise Nevşehir'de Kızılırmak üzerindeki kum ocaklarından temin edilen dere kumudur. Beton karışımında kullanılan agreganın maksimum dane çapı 16 mm'dir. Agreganın su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı TS EN 1097-6'ya (2002) göre tespit edilmiş olup Çizelge 5.4'te verilmiştir. Karışımında kullanılan agregatların her birine ait elek analizleri ise Çizelge 5.5, 5.6, ve 5.7'de verilmiştir.

Çizelge 5.4. Deneysel çalışmada kullanılan agregatların fiziksel özellikleri

Fiziksel özellik	İnce agregata		Kaba agregata
	0-3	0-6	5-15
Özgül ağırlık, (DYK)	2,58	2,54	2,75
Su emme yüzdesi, (%)	1,35	1,57	1,70
Toplam nem içeriği, (%)	2,00	1,00	1,00

Çizelge 5.5. İnce agrega (0-3 mm) elek analizi sonucu

Elek açıklığı(mm)	Elek üzerinde kalan(gr)	Elek üzerinde kalan(%)	Kümülatif kalan(%)	Elekten geçen(%)
16	0,00	0,00	0,00	100,00
11.2	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0,00	0,00	0,00	100,00
4	3,50	0,16	0,16	99,84
2	12,50	0,56	0,72	99,28
1	237,00	10,63	11,35	88,65
0.5	652,50	29,26	40,61	59,39
0.25	597,00	26,77	67,38	32,62
0.125	486,50	21,82	89,19	10,81
0.063	202,50	9,08	98,27	1,73
Tava	38,50	1,73	100,00	0,00
Toplam	2230,00			

Çizelge 5.6. İnce agrega (0-6 mm) elek analizi sonucu

Elek açıklığı(mm)	Elek üzerinde kalan(gr)	Elek üzerinde kalan(%)	Kümülatif kalan(%)	Elekten geçen(%)
16	0,00	0,00	0,00	100,00
11.2	0,00	0,00	0,00	100,00
8	0,00	0,00	0,00	100,00
4	199,50	7,27	7,27	92,73
2	779,50	28,39	35,65	64,35
1	692,50	25,22	60,87	39,13
0.5	713,50	25,98	86,85	13,15
0.25	40,50	1,47	88,33	11,67
0.125	252,50	9,20	97,52	2,48
0.063	54,00	1,97	99,49	0,51
Tava	14,00	0,51	100,00	0,00
Toplam	2746,00			

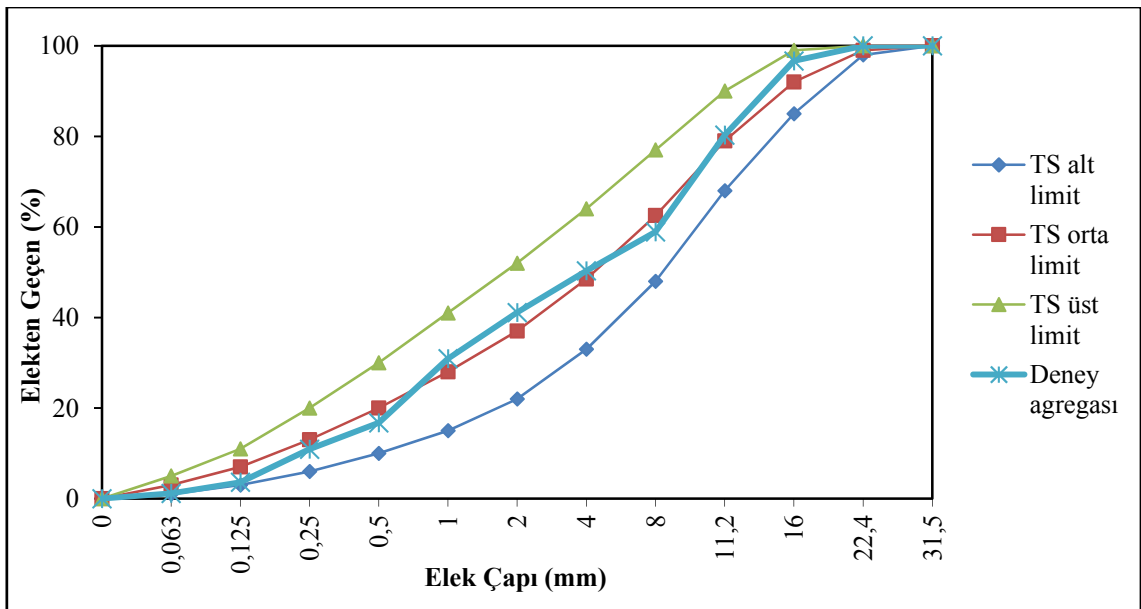
Çizelge 5.7. İri agrega (5-16 mm) elek analizi sonucu

Elek açıklığı(mm)	Elek üzerinde kalan(gr)	Elek üzerinde kalan(%)	Kümülatif kalan(%)	Elekten geçen(%)
31,5	0	0	0	100
22,4	0	0	0	100
16	403,50	6,93	6,93	93,07
11,2	1988,00	34,13	41,06	58,94
8	2594,00	44,54	85,60	14,40
4	758,00	13,02	98,62	1,38
2	0,00	0,00	98,62	1,38
1	0,00	0,00	98,62	1,38
0,5	0,00	0,00	98,62	1,38
0,25	0,00	0,00	98,62	1,38
0,125	0,00	0,00	98,62	1,38
0,063	0,00	0,00	98,62	1,38
Tava	80,5	1,38	100	0,00
TOPLAM	5824,00			

Deneyisel çalışmada kullanılan agregalar TS 802'de (2009) agrega en büyük dane büyüklüğü 16,0 mm olan beton için belirtilen agrega dane büyüklüğü dağılımı eğrisine ait sınırlar içerisinde kalacak şekilde ağırlıkça 0-3mm ince kumdan % 20, 0-6mm ince kumdan % 32 ve 5-16mm agregadan % 48 oranlarında karıştırılmıştır. Karışımın elek analizi sonuçları Çizelge 5.8'de, granülometri eğrisi Şekil 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 5.8. Kullanılan agrega granülometrisi

Elek Açıklığı (mm)	Elekten Geçen (%)			Kullanılan Agrega
	TS 706 EN 12620 + A1			
	Alt Limit	Orta Limit	Üst Limit	
31,5	100	100	100	100
22,4	98	99	100	100
16	85	92	97	96,67
11,2	68	79	80	80,29
8	48	63	59	58,91
4	33	49	50	50,31
2	22	37	41	41,11
1	15	28	31	30,92
0,5	10	20	17	16,75
0,25	6	13	11	10,92
0,125	3	7	4	3,62
0,63	2	3	1	1,17



Şekil 5.2. Kullanılan agreganın granülometri eğrisi

5.1.4 Kimyasal katkı malzemesi

Karışımlarda işlenebilirliği sağlamak amacıyla TS EN 934-2'ye (2011) uygun yüksek oranda su azaltıcı hiperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Kullanılan hiperakışkanlaştırıcı polikarboksilik eter esaslı olup yüksek oranda su azaltan, yoğunluğu 1.082-1.142 kg/litre arasında değişkenlik gösteren, kahve renkli bir katkıdır.

5.1.5 Karışım ve bakım suyu

Beton karışımında su iki önemli görev üstlenmektedir. Bunlardan birincisi; çimento ile birleşerek hidrasyonun (çimento ve su arasındaki kimyasal reaksiyonların) yer almasını sağlamak, ikincisi ise, betonun karılma işleminde agrega ve çimento tanelerinin yüzeyini ıslatarak taze beton karışımında istenilen işlenebilmeyi sağlamaktır.

Ayrıca kür suyu olarak, yerine yerleştirilmiş olan betonun yüzeyini ıslak tutup içerisindeki suyun buharlaşmasını önlemek, böylece, betonun içerisinde kimyasal reaksiyonların gelişebilmesi için yeterli miktarda suyun bulunmasını sağlamak gibi bir görevi daha vardır. Beton üretiminde kullanılacak karışım suyunun kalitesi ve miktarı betonun özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Kür suyunun kalitesi, beton karışımında yer alacak suyun kalitesi kadar önemli olmasa da, kür suyu olarak kullanılacak suyun içinde de betonda zararlı kimyasal olaylara yol açacak veya betonun yüzeyinin lekelenmesine neden olabilecek yabancı maddelerin yer almaması gerekmektedir (Erdoğan, 1995).

Deneylerde kullanılan karışım ve bakım suyu Nevşehir Merkez İlçesi Sulusaray Beldesi mevkiinde açılmış sondaj kuyusuna aittir. TS-1008 (2003) standardına göre DSİ XII. Bölge Müdürlüğü'nde analizi yaptırılan suyun parametreleri beton karma suyu limitlerine uygundur. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.9'da belirtildiği gibidir.

Çizelge 5.9. Kullanılan karma ve kür suyunun analiz sonuçları

Suyun fiziksel ve kimyasal özellikler	
pH (25 C°)	7.03±0.03
Sülfat (mg/l)	83.93
Klorür (mg/l)	463.87
Fosfat, (mg/l)	0.067
Alkaliler(Na ₂ O), (mg/l)	709.73
Nitrat, (mg/l)	25.51

5.2 Beton Karışım Oranları

Beton karışım hesabı TS 802'de (2009) belirtilen mutlak hacim metoduna göre yapılmıştır. Karışımlarda kullanılan su-bağlayıcı oranı 0.475'tir. Doğal zeolit katkılı numuneler, doğal zeolitın şahit betonda bulunan çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15, %20, %30 ve %40 oranlarında yer değiştirilmesiyle elde edilmiştir. Böylece şahit numuneyle birlikte toplam 7 farklı karışım hazırlanmıştır. Karışımların çökme değerleri 13±2 cm olacak şekilde hiperakışkanlaştırıcı (HA) kimyasal katkı maddesi kullanılarak ayarlanmıştır. Bir metreküp beton numunesi içinde bulunan malzeme miktarları Çizelge 5.10'da verilmiştir.

Çizelge 5.10. Bir metreküp betonu oluşturan malzeme miktarları

Karışım Kodu	Çimento (kg)	DZ (kg)	Su (kg)	Agrega (kg)			HA (%)	Çökme (cm)
				İnce (0-3)	İnce (0-6)	İri (5-16)		
DZ0	400	0	190	344	536	869	0,35	13
DZ5	380	20	190	344	536	868	0,50	13
DZ10	360	40	190	343	534	866	1,00	15
DZ15	340	60	190	342	533	864	1,50	13
DZ20	320	80	190	341	531	861	2,00	12
DZ30	280	120	190	340	529	858	2,68	12
DZ40	240	160	190	337	525	851	4,00	11

5.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Beton üretiminde, 135 lt kapasiteli dram tipi beton mikseri kullanılmıştır (Fotoğraf 5.1). Beton mikserinin içerisine önce kaba ve ince agregalar konularak karışım homojen hale gelinceye kadar mikser çalıştırılmıştır. Daha sonra çimento ve zeolit ilave edilmiş ve homojenlik sağlanıncaya kadar karıştırmaya devam edilmiştir. Son olarak da karma suyu ve hiper akışkanlaştırıcı karışıma mikser çalışır haldeyken ilave edilmiştir.



Fotoğraf 5.1. Taze betonun hazırlanması

TS EN 206-1/A1'e (2005) uygun olarak hazırlanan beton numuneleri Fotoğraf 5.2'de görüldüğü gibi 10x10x10 cm'lik küp kalıplara yerleştirilmiştir. Yaş birim ağırlıkları ölçülen numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkartılmış ve 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzuna konularak basınç deneyi yapılacak zamana kadar bekletilmiştir.



Fotoğraf 5.2. Taze betonların kalıplara yerleştirilmiş hali

Üzerinde yüksek sıcaklık testleri yapılacak olan numuneler ise; üç ay süre ile 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzunda bekletildikten sonra, üç ay süre de 20 ± 2 °C sıcaklıktaki ve % 45 ± 5 bağıl nemli laboratuvar ortamında bekletilmişlerdir. Yüksek sıcaklık sonrası, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı, mineral ve doku değişimlerinin mikroskobik analizi deneylerini gerçekleştirmek için her bir karışımdan 36 adet numune hazırlanmıştır. Ayrıca yüksek sıcaklığın betonun mikro yapısına ve agrega-çimento hamuru ara yüzeyine etkisinin incelenebilmesi için 500 °C sıcaklıkta ısıl işlem görmüş numunelerden her bir beton karışımından ikişer tane olmak üzere toplam 14 adet numune daha hazırlanmıştır.

Numunelerin ısıl iletkenlik değerlerinin ölçülebilmesi için her bir karışımdan 30x30x10 cm ebatlarında birer adet numune hazırlanmış, üç ay süre ile 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kür havuzunda bekletilip, üç ay süre de 20 ± 2 °C sıcaklıktaki ve % 45 ± 5 bağıl nemli laboratuvar ortamında bekletildikten sonra deneylere tabi tutulmuşlardır (Fotoğraf 5.3).



Fotoğraf 5.3. 30x30x10 cm ebatlarındaki numune

5.4 Numuneler Üzerinde Yürütülen Deneysel Çalışmalar

5.4.1 Kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı tayini

Deney numunelerinin 28. gündeki kuru birim ağırlıkları, su emme ve boşluk oranları tespit edilmiştir. Her beton karışımından 3'er adet numune kullanılarak kuru birim ağırlıkları, su emme oranları ve boşluk oranları TS 3624'e (1981) uygun olarak bulunmuştur. Deney numuneleri $100 \pm 5^\circ\text{C}$ sıcaklıkta bir etüvde 24 saat kurutulmuştur. Etüvden çıkarılan numuneler tartılarak etüv kurusu ağırlıkları bulunmuştur (A). Etüv kurusu ağırlığı saptanmış numuneler $20^\circ\text{C} \pm 25^\circ\text{C}$ ye kadar soğutulduktan sonra $21 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki su içinde 24 saat bekletilmiş ve bu sürenin sonunda sudan çıkarılan numunelerin yüzey ıslaklığı bir havlu ile alınıp tartılmıştır. Çıkan değer doymuş kuru yüzeyli numune ağırlığı olarak kaydedilmiştir (B). Son tartımı yapılmış deney numuneleri 5 saat süreyle kaynatıldıktan sonra sıcaklığı $20-25^\circ\text{C}$ ye düşünceye kadar 14 saatten az olmamak üzere çevre sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Kaptan çıkarılan deney numunelerinin yüzey ıslaklığı bir havlu yardımı ile alınarak doymuş kuru yüzey kuru duruma getirilmiş ve tartılmıştır (C). Kaynatılmış doymuş kuru yüzeyli deney numunesi su dolu bir kap içine asılarak numunenin su içindeki ağırlığı saptanmıştır (D). Bu işlemlerden sonra numunelerin kuru birim ağırlıkları, su emme ve boşluk oranları TS 3624'te (1981) yer alan eşitlikler yardımı ile bulunmuştur.

$$S_k = \frac{A}{C-D} \quad (5.1)$$

Burada;

S_k : Kuru birim ağırlık (kg/dm^3)

A : Etüv kurusu ağırlığı

C : Kaynatma sonrası doymuş kuru yüzeyli numune ağırlığı

D : Numunenin su içindeki ağırlığı

$$m_1 = \frac{B-A}{A} \times 100 \quad (5.2)$$

Burada;

m_1 : Ağırlıkça su emme oranı (%)

A : Etüv kurusu ağırlığı

B : Doymun kuru yüzeyli numune ağırlığı

$$B_0 = \frac{C-A}{C-D} \times 100 \quad (5.3)$$

Burada;

B₀: Görünür boşluk oranı (%)

A : Etüv kurusu ağırlığı

C : Kaynatma sonrası doymun kuru yüzeyli numune ağırlığı

D : Numunenin su içindeki ağırlığı

5.4.2 Basınç dayanımı

10x10x10 cm boyutlu beton numuneler, TS EN 12390-3'e (2010) uygun olarak 1, 3, 7, 28, 90, ve 180. günlerde tek eksenli basınç deneyine tabi tutulmuştur. Deneyler, Fotoğraf 5.4'de görülen 3000 kN kapasiteli basınç aletinde yaklaşık 0.5 MPa/sn yükleme hızı ile gerçekleştirilmiştir.



Fotoğraf 5.4. Basınç dayanımı test cihazı

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılacak numuneler ise üç ay standart kür havuzunda ve üç ayda laboratuvar koşullarında bekletildikten sonra sıcaklık artış hızı 8 °C/dk olan bir elektrikli fırına yerleştirilerek 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara kadar ısıtılmışlardır (Fotoğraf 5.5). Belirtilen sıcaklık değerinde 2 saat süreyle yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numuneler havada ve suda olmak üzere iki farklı soğutma yöntemi ile soğutulmuştur. Her bir sıcaklık değeri için her karışımdan 4'ü havada 4'ü suda soğutulmak üzere 8 numune kullanılmıştır. Havada soğutulan numuneler soğumanın yavaş olması amacıyla laboratuvar ortamına bırakılmıştır. Diğer numuneler ise su içerisinde hızlı soğutma yöntemi ile soğutulmuştur. Daha sonra bu numunelerin basınç dayanım değerleri bulunarak, sıcaklığa maruz bırakılmamış numunelerin basınç dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Numunelerin basınç dayanımları (5.4) eşitliği yardımıyla bulunmuştur.

$$f_c = \frac{P}{A_c} \quad (5.4)$$

Burada:

f_c : Basınç dayanımı

P: Preste kırılma anında okunan en büyük yük

A_c : Numunenin basınç yükü uygulanan kesit alanı



Fotoğraf 5.5. Deney numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz bırakılması

5.4.3 Ultrases geçiş hızının belirlenmesi

Yangın sonrası ultrases geçiş hızlarının belirlenmesi amacıyla; 250, 500 ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılan beton numunelerde, ASTM C 597-09'ye (2009) uygun 0,1 µs duyarlıklı ultrases aleti ile ses geçiş süreleri (t) µs cinsinden ölçülmüştür. Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde numune yüzeyindeki pürüzlerin oluşturduğu boşlukları doldurmak amacı ile numunelerin alt ve üst yüzeylerine ultrason jeli sürülmüş 55 kHz'lik ses dalgaları gönderen ve alan iki transduser Fotoğraf 5.6 ve Şekil 5.3'de görüldüğü gibi numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş, direkt iletim yöntemi uygulanarak ses geçiş süresi (t, µs cinsinden) okunmuştur. Problar yer değiştirilerek ikinci okuma alınmış, her numune için bu iki okumanın ortalaması alınarak (5.5) eşıtlığı ile hesaplanmıştır.



Fotoğraf 5.6. Numunelerin ultrases geçiş hızının belirlenmesi

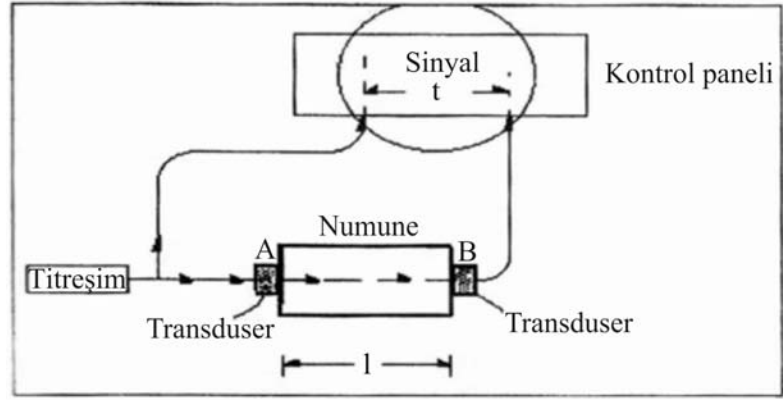
$$V_s = \frac{l}{t} \cdot 10 \quad (5.5)$$

Burada;

V_s : Ultrases geçiş hızı (km/sn)

l : Numune boyu (cm)

t : Süre (µs)



Şekil 5.3. Ultrasonik yöntem ile ses geçiş süresinin belirlenmesi

5.4.4 Isı iletkenlik katsayısının belirlenmesi

Hazırlanan deney numuneleri üzerinde ısı iletkenlik katsayılarının ölçümü Fotoğraf 5.7’de görülen cihaz yardımı ile TS EN 1934’e (1999) uygun olarak sıcak kutu yöntemi ile yapılmıştır. Isı iletkenlik katsayısı değerleri eşitlik 5.6 yardımı ile bulunmuştur.

$$k = \frac{Q \cdot l}{A \cdot (T_1 - T_2)} \quad (5.6)$$

Burada;

k: Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)

Q: A alanı üzerinden geçen ısı miktarı (W)

l: Numune kalınlığı (m)

A: Numune alanı (m²)

T₁: Sıcak haznenin sıcaklığı (°C)

T₂: Soğuk haznenin sıcaklığı (°C)



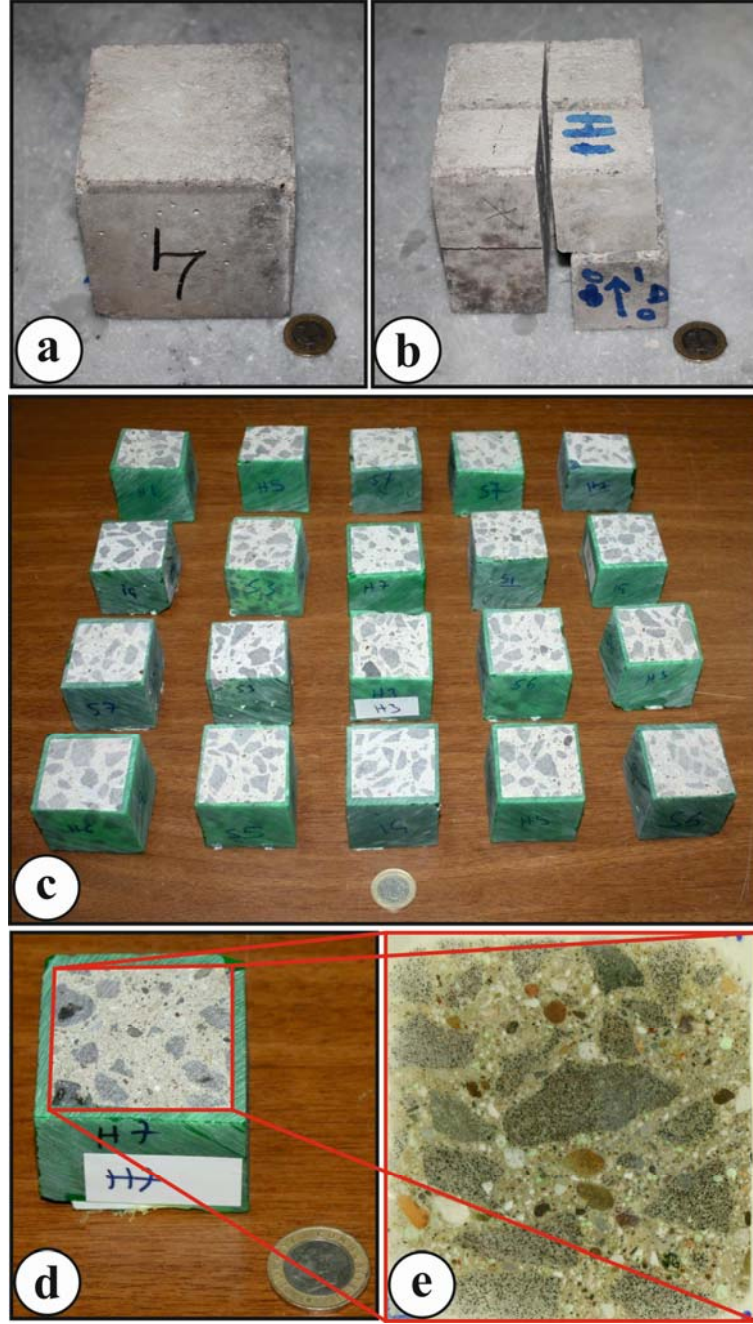
Fotoğraf 5.7. Sıcak kutu (hot box) deney aleti

5.4.5 Mineral ve doku değişimlerinin mikroskopik analizi

500 C° ısıya maruz bırakılmış farklı oranlarda zeolit içeren (%0, %5, %10, %15, %20, %30, %40) betonlardaki dokusal değişim farklılıkları makroskopik olarak tanımlanamamıştır. Doku değişimlerini mikroskopik boyutta tanımlayabilmek için mineraloji, petroğrafi ve birçok alanda yaygın olarak kullanılan polarizan (altyan aydınlatmalı) mikroskop analiz tekniği kullanılmıştır. Bu amaç doğrultusunda hazırlan %0, %10, %20, %30 ve %40 oranlarında doğal zeolit içeren betonlardan aşağıdaki adımlar izlenerek 0.030 mm kalınlığında ince kesitler hazırlanmıştır.

5.4.5.1 İnce kesitlerin hazırlanması

10x10x10 cm boyutlarında (Fotoğraf 5.8 a) hazırlanan betonlardan pratikte ince kesit yapmak mümkün olmadığı için öncelikle boyut indirilmesi yapılmıştır. Laboratuvarda taş kesme makinesiyle numunenin boyutları 1/8 oranında indirilerek, yaklaşık 5x5x5 cm boyutlarında Fotoğraf 5.8 b’de görülen küp numuneler elde edilmiştir.



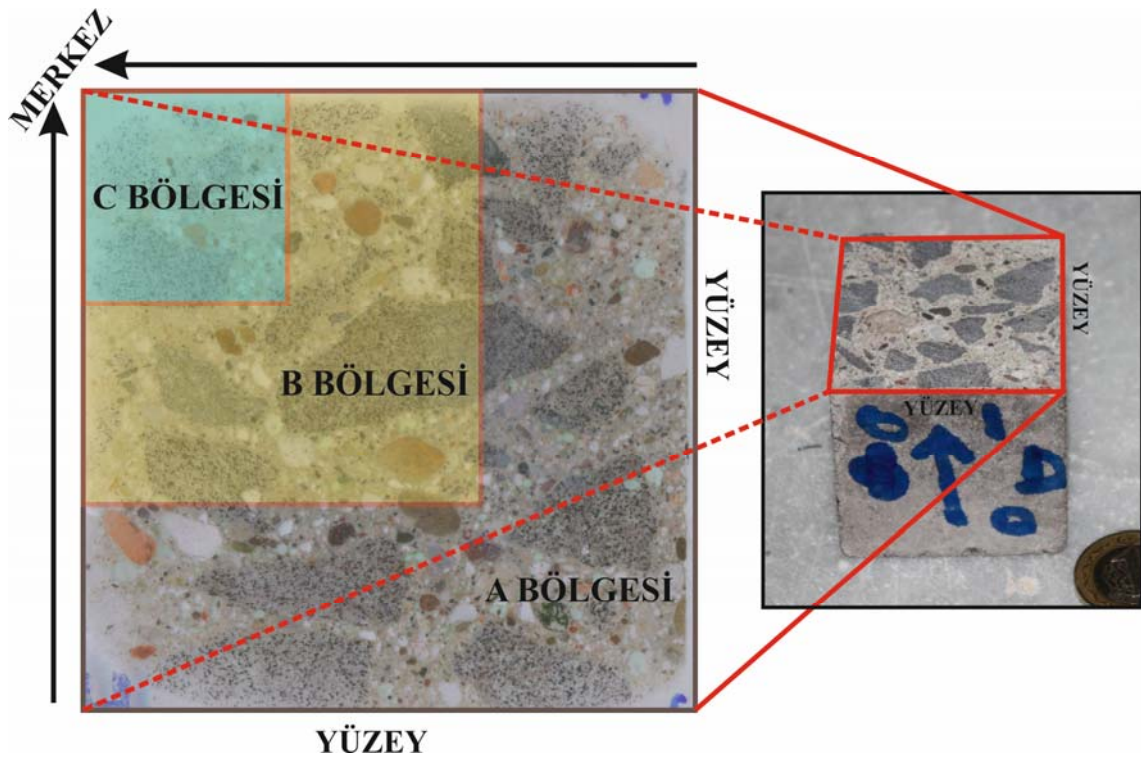
Fotoğraf 5.8. İnce kesit hazırlama süreci

Beton numuneleri gevrek bir yapıya sahip oldukları için ince kesit hazırlanması sırasında numunelerin dağılmasını önlemek amacıyla tüm numunelere reçine uygulaması yapılmıştır. Boyut indirilmesi yapılan numuneler etüvde kurutulmuş, boşluklarda hapsolan nemin ortamı terk etmesi için çeker ocak altında aseton uygulaması yapılmıştır. Hazır hale getirilen küp numuneler kalıp içerisine konduktan sonra reçine karışımı (1000 ml Vestopal, 250 ml Styrene, 3 ml Chclohexanonperoxid ve 1 ml Cobalt octat) ilave edilmiştir. Numuneler daha sonra vakum desikatörü içerisine alınmış, beton

numunelerindeki boşluk, çatlak gibi süreksizliklerin reçine ile 5 barlık ters basınç altında doldurulması sağlanmıştır. Bu işleme reçine yüzeylerinde kabarcık görünmeyene kadar yaklaşık 2 gün süreyle kademeli olarak devam edilmiştir. Reçine işlemi tamamlandıktan sonra 5 ay oda sıcaklığında kurumaya bırakılan numuneler bu süre sonunda 40 C°'ye ayarlı etüvde 2 gün süreyle bekletilmiş, tamamen sertleştirilmesi sağlanmıştır (Fotoğraf 5.8 c, d). Kenar etkileşiminden kaçınmak, dış yüzeyden iç merkeze doğru dokusal değişimi daha net olarak gözlemleyebilmek için numunelerin kalıp yüzeylerinden değil kesilme yüzeylerinden ince kesitler yapılmıştır (Fotoğraf 5.8 e). Çalışmada her bir grup numune için ikişer adet olmak üzere toplamda 20 adet ince kesit yapılmıştır.

5.4.5.2 İnce kesitlerin bölgelere ayrılması

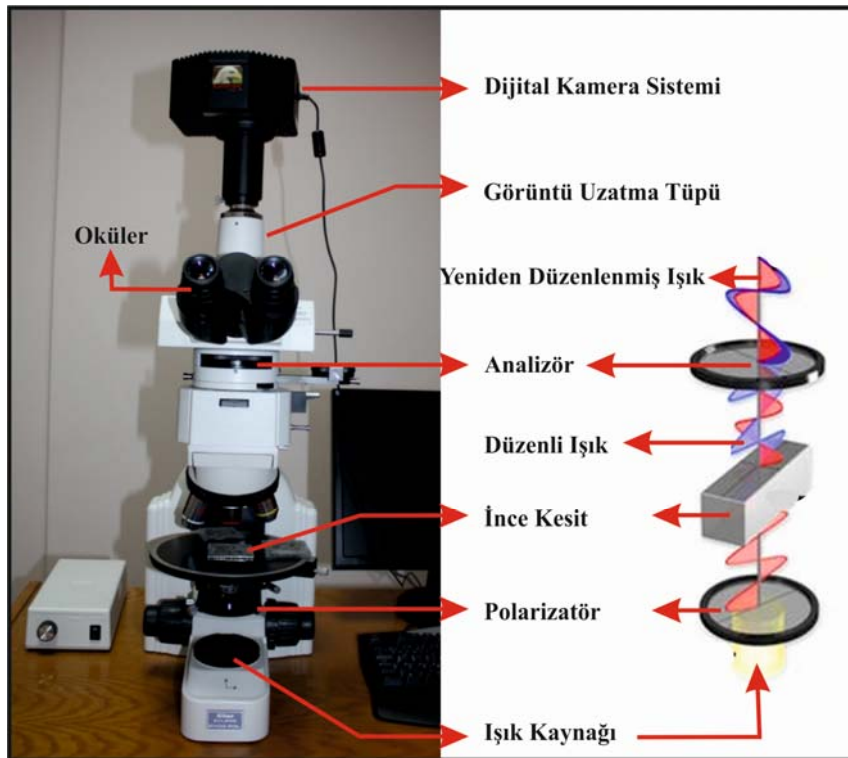
Isıya maruz kalan beton numunelerinin dış yüzeyleri daha fazla iç yüzeyleri ise daha az etkilenecektir. Bu etkinin dokusal yansımaları ortaya koyabilmek amacıyla ince kesitler Fotoğraf 5.9'da görüldüğü gibi dış yüzeyden merkeze doğru A, B, C olmak üzere üç farklı bölgeye ayrılmıştır. Zeolit içeriğine bağlı olarak agrega, matris, aderans gibi değişimlerin polarizan mikroskop altındaki karşılaştırılmaları bu bölgelere göre yapılmıştır.



Fotoğraf 5.9. İnce kesit yapılmış numunelerin bölgelere ayrılması

5.4.5.3 Polarizan mikroskop analizi

Petrografi biliminde mineraller ışığı geçiren şeffaf mineraller ve ışığı geçirmeyen opak mineraller olmak üzere iki gruba ayrılır. Işığı geçiren minerallerin analizinde polarizan mikroskop adı verilen alttan aydınlatmalı mikroskop kullanılır (Fotoğraf 5.10). Polarizan mikroskop günümüzde doğal ve endüstriyel minerallerin analizi başta olmak üzere çimento sektörü, seramik endüstrisi, mineral lifleri, ağaç endüstrisi gibi malzeme mühendisliğini ilgilendiren birçok alanda anizotrop numunelerin sayısal ve doku analizlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Farklı yönlerde titreşen normal ışık polarizatörden geçtikten sonra 0.030 mm kalınlıkta inceltilmiş numuneden geçer, analizatörden geçtikten sonra tek bir yönde titreşim yapan ışık göze ulaşır. Göze gelen ışık içinden geçtiği numunenin optik özelliklerine göre farklı renk ve dokuda gözlenir. Polarizen ışığın bu özelliği kullanılarak malzemelerin mineral ve doku özellikleri analiz edilir. Bu çalışmada Nikon ECLIPSE E400 Pol marka polarizen mikroskop kullanılmıştır.



Fotoğraf 5.10. Polarizan mikroskop

BÖLÜM VI

BULGULAR VE TARTIŞMA

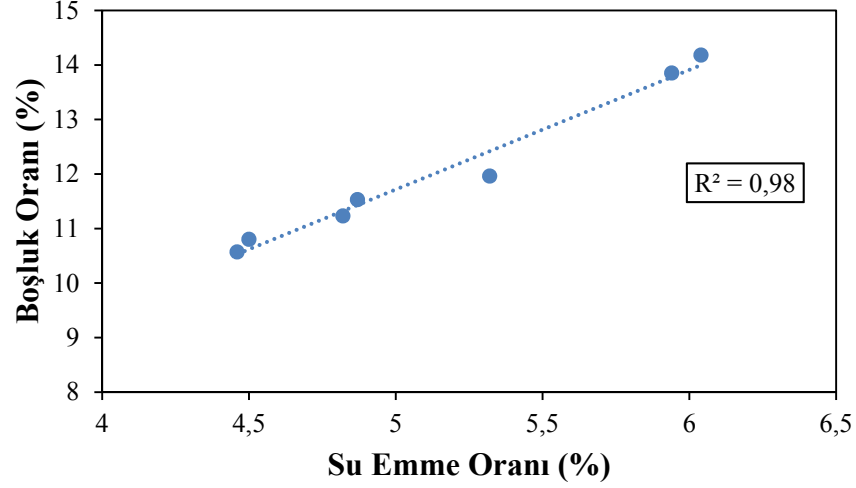
6.1 Kuru Birim Ağırlık, Su Emme ve Boşluk Oranı

Beton karışımlara ait kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı değerleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Çizelge 6.1 incelendiğinde DZ miktarı arttıkça karışımların kuru birim ağırlıklarının düştüğü görülmektedir. Numunelerin kuru birim ağırlıkları 2224 kg/m^3 ile 2027 kg/m^3 arasında değişmektedir. DZ içeren numunelerin kuru birim ağırlıkları kontrol numunenin kuru birim ağırlığından daha düşüktür. Bunun sebebinin DZ’nin özgül ağırlığının çimentoya göre daha düşük olması ve porozitesinin de çimentodan daha yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Bilim, 2011).

Çizelge 6.1. Beton karışımlarına ait kuru birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı değerleri

Karışım	Kuru Birim Ağırlık (kg/m^3)	Su Emme Oranı (%)	Boşluk Oranı (%)
DZ0	2224	4,87	11,53
DZ5	2207	4,82	11,23
DZ10	2186	4,50	10,80
DZ15	2136	4,46	10,57
DZ20	2114	5,32	11,96
DZ30	2067	5,94	13,85
DZ40	2027	6,04	14,18

Beton numunelerin su emme oranlarının % 4,46 ile % 6,04 ve boşluk oranlarının ise %10,57 ile %14,18 arasında değiştiği görülmektedir. Numunelerin boşluk ve su emme oranları %15 DZ ikameli numunelere kadar düşmüş, %15 DZ ikamesinden sonra artmaya başlamıştır. Bu durum, DZ içerisindeki yüksek miktarda SiO_2 ve Al_2O_3 ’ün çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek, ilave C-S-H jelleri ve alüminatlar oluşturması ile sertleşmiş betonun mikro yapısını iyileşmesinden kaynaklandığı şeklinde açıklanabilir.



Şekil 6.1. Deney numunelerinin su emme oranları ile boşluk oranları arasındaki ilişki

Deney numunelerinin su emme oranları ile boşluk oranları arasında bir ilişki kurulmuştur ve Şekil 6.1’de sunulmuştur. Şekil 6.1’de su emme oranı ile boşluk oranı arasında korelasyon katsayısı 0,98 olan oldukça kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir.

6.2 Basınç Dayanımı

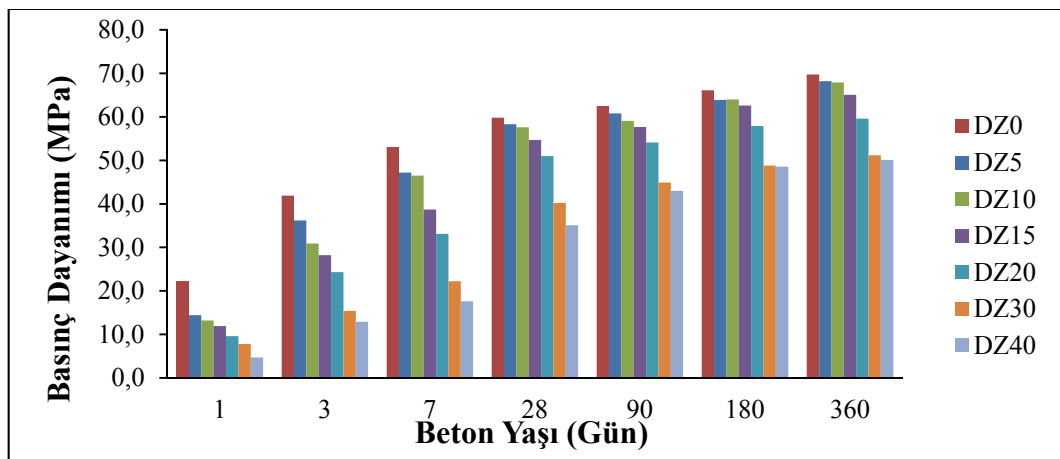
DeneySEL çalışma kapsamında üretilen 7 farklı karışıma ait 1, 3, 7, 28, 90, 180 ve 360 günlük küp numunelere ait basınç dayanımı değerleri Çizelge 6.2 ve Şekil 6.2’de verilmiştir. Çizelge 6.2 ve Şekil 6.2 incelendiğinde tüm karışımlarda zamana bağlı olarak beton basınç dayanımlarının arttığı görülmektedir. Ayrıca üretilen numunelerde doğal zeolit (DZ) katkısı ile birlikte özellikle erken yaşlarda basınç dayanımı değerlerinin şahit numuneye göre azaldığı görülmüştür. 1 günlük DZ5, DZ10, DZ15, DZ20, DZ30 ve DZ40 numunelerin DZ0 numunesine göre dayanım kayıpları sırasıyla %35, %41, %46, %57, %65 ve %79’dur. 28. günden itibaren DZ5, DZ10 ve DZ15’in basınç dayanımı değeri şahit numuneye yaklaşmış ve 360. güne kadar da bu durum devam etmiştir. Ancak DZ20, DZ30 ve DZ40 karışımlarının basınç dayanımları ilk günden itibaren şahit numuneye kıyasla büyük oranda dayanım kaybına uğramıştır. 28 günlük DZ5, DZ10, DZ15, DZ20, DZ30 ve DZ40 numunelerin DZ0 numunesine göre dayanım kayıpları sırasıyla %3, %4, %9, %15, %33 ve %41’dir. 360 günlük DZ5, DZ10, DZ15, DZ20, DZ30 ve DZ40 numunelerinin ise DZ0 numunesine göre dayanım kayıpları sırasıyla %2, %3, %7, %15, %27 ve %28’dir. Bu değerlerden görüldüğü gibi DZ’nin beton basınç dayanımına katkısı ilerleyen yaşlarda ortaya çıkmaktadır. DZ katkılı betonun ilk günlerdeki dayanımının

kontrol numunesine göre çok düşük olması ve ilerleyen günlerde şahit numuneye yakın dayanım vermesi DZ'nin kütle betonu uygulamalarında ortaya çıkan hidrasyon ısısını azaltmak amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir.

Çizelge 6.2. Çalışmada kullanılan betonların basınç dayanımları (MPa)

Karışım	Beton yaşı (Gün)						
	1	3	7	28	90	180	360
DZ0	22,2	41,9	53,1	59,8	62,5	66,1	69,7
DZ5	14,4	36,2	47,2	58,3	60,8	63,9	68,2
DZ10	13,2	30,9	46,5	57,6	59,1	64,0	67,9
DZ15	11,9	28,2	38,7	54,7	57,7	62,6	65,1
DZ20	9,6	24,3	33,1	51,0	54,1	57,9	59,6
DZ30	7,8	15,4	22,2	40,2	44,9	48,8	51,2
DZ40	4,7	12,9	17,6	35,1	43,0	48,6	50,1

Literatürde DZ katkısının betonun basınç dayanımını azalttığını gösteren çalışmalar vardır (Öz, 2006; Uzal vd., 2003). Tez çalışması bu açıdan literatürle uyum içerisindedir. Ancak, DZ katkısının betonun basınç dayanımını arttırdığını belirten çalışmalarda mevcuttur (Sevim ve Okumuş, 2011; Bilim, 2011; Canpolat vd., 2005; Sallı Bideci, 2013). Bu çalışmalarda kullanılan DZ'nin özgül yüzeyinin yüksek olması dikkat çekmektedir. İnceliği yüksek olan DZ ile üretilen betonların basınç dayanımları kontrol betonlara göre daha yüksek olmaktadır.



Şekil 6.2. Çalışma kapsamında üretilen betonların basınç dayanımları

6.3 Yüksek Sıcaklığın Basınç Dayanımına Etkisi

Beton numuneler 250, 500, 750 ve 1000 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra dayanımlarını belirlemek üzere basınç deneyine tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklık işleminden sonra iki farklı türde soğutulan numunelerin basınç dayanım değerleri havada soğutma ve suda soğutma olmak üzere sırasıyla Çizelge 6.3 ve Çizelge 6.4'te verilmiştir. 1000 °C sıcaklığa maruz bırakılmış numuneler her iki soğutma yönteminde de tamamen dağılmış ve basınç dayanımı değeri vermemiştir. Numunelerin basınç dayanım değerlerinin oda sıcaklığında ölçülen basınç dayanım değerlerine göre oranları parantez içinde verilmiştir.

Çizelge 6.3. Havada soğutulmuş beton numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

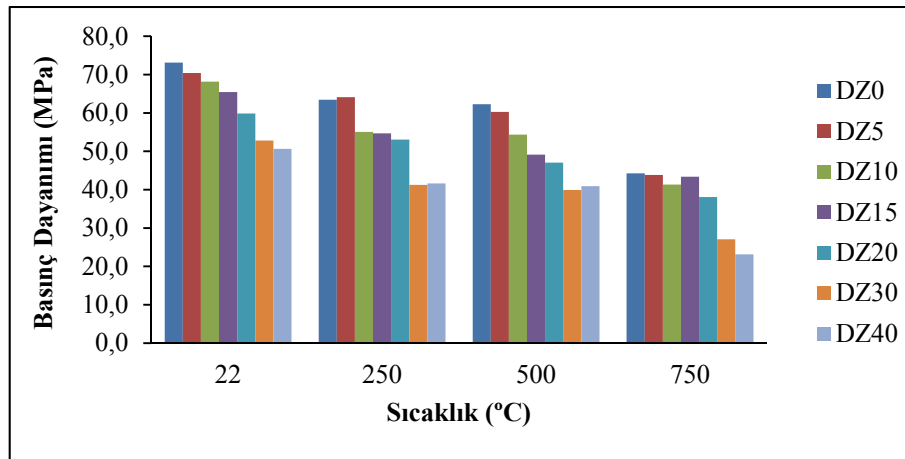
Karışım	Havada soğutma (MPa)							
	22 °C	250 °C		500 °C		750 °C		
DZ0	73,2	63,5	(87%)	62,3	(85%)	44,3	(60%)	
DZ5	70,4	64,1	(91%)	60,3	(86%)	43,8	(62%)	
DZ10	68,2	55,1	(81%)	54,4	(80%)	41,4	(61%)	
DZ15	65,5	54,7	(84%)	49,2	(75%)	43,4	(66%)	
DZ20	59,9	53,1	(89%)	47,0	(79%)	38,1	(64%)	
DZ30	52,8	41,3	(78%)	39,9	(76%)	27,1	(51%)	
DZ40	50,7	41,6	(82%)	40,9	(81%)	23,2	(46%)	

Çizelge 6.4. Suda soğutulmuş beton numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

Karışım	Suda soğutma (MPa)							
	22 °C	250 °C		500 °C		750 °C		
DZ0	73,2	55,5	(76%)	48,3	(66%)	29,9	(41%)	
DZ5	70,4	54,5	(77%)	48,3	(69%)	28,5	(40%)	
DZ10	68,2	51,1	(75%)	43,0	(63%)	24,0	(35%)	
DZ15	65,5	48,9	(75%)	40,6	(62%)	25,1	(38%)	
DZ20	59,9	46,2	(77%)	36,7	(61%)	24,4	(41%)	
DZ30	52,8	35,1	(66%)	34,8	(66%)	17,5	(33%)	
DZ40	50,7	40,1	(79%)	36,3	(72%)	19,1	(38%)	

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış deney numunelerinin basınç dayanım değerleri 73,2 MPa ile 50,7 MPa arasında değişmiştir. Bu değerler maruz kalınan sıcaklığın artması ile düşmeye başlamıştır. Bu durum hem havada hem de suda soğutulan numunelerde görülmüştür. Literatürde sıcaklık değerlerinin 750 °C'ye çıkması ile , C-S-H jelinin bozulması sebebiyle ciddi dayanım kayıplarının görüldüğü belirtilmiştir. (Xu vd., 2001; Khoury vd., 1985; Lin vd., 1996).

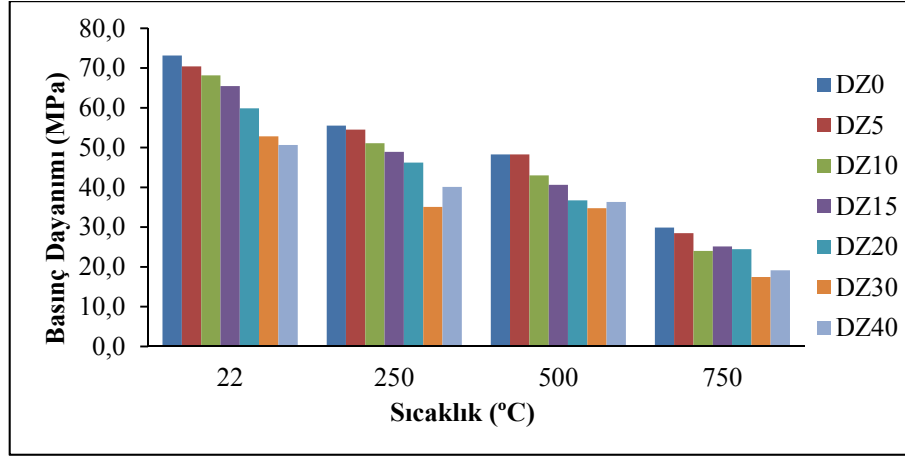
Yüksek sıcaklık sonrası uygulanan soğutma yöntemleri numunelerin basınç dayanım değerlerini etkilemiştir. Havada soğutulan ve 250 °C sıcaklığa maruz kalan numuneler, yüksek sıcaklığa maruz kalmayan numunelere göre %9 ile %22 arasında değişen dayanım kayıplarına uğramıştır. Bu sıcaklık değerinde DZ5 ile DZ20 numuneleri şahit numuneye oranla yüksek sıcaklık karşısında daha iyi performans göstermiştir. 500 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerde ise dayanım kaybı %14 ile %25 arasında değişmiştir. DZ5 bu sıcaklıkta da iyi performans sergilemiştir. 750 °C sıcaklığa maruz kalmış numuneler de ise dayanım kaybı %34 ile %54 arasında görülmüştür. DZ5, DZ10, DZ15 ve DZ20 numuneleri bu sıcaklık değerinde şahit numuneden daha iyi performans sergilemişlerdir. DZ katkısının olumlu etkisi sıcaklık arttıkça ortaya çıkmıştır.



Şekil 6.3. Havada soğutulmuş beton numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

Araştırma kapsamında, yangın sonrasında hem yavaş hem de hızlı soğutulan numunelerin basınç dayanımlarında düşme gözlenmiştir. Ancak bu düşme eğilimi hızlı soğutulan numunelerde daha belirgindir. 250 °C sıcaklığa maruz kalmış ve suda soğutulmuş numuneler %21 ile %34 arasında dayanım kaybına uğramışlardır. DZ30 haricindeki tüm numuneler birbirlerine yakın performans göstermişlerdir. 500 °C sıcaklığa maruz kalmış

numunelerde ise dayanım kaybının %28 ile %39 arasında olduğu görülmüştür. DZ5 ile DZ40 numunesi şahit numuneden daha iyi performans göstermiştir. 750 °C sıcaklığa maruz kalmış numunelerde dayanım kaybının %59 ile %77 arasında olduğu görülmüştür. Bu sıcaklıkta da DZ5 ile DZ20 şahit numuneye yakın performans göstermiştir.



Şekil 6.4. Suda soğutulmuş beton numunelerinin basınç dayanımları (MPa)

Çalışmada suda soğutulan numunelerin havada soğutulan numunelere göre daha fazla dayanım kaybına uğradığı görülmüştür. Bunun sebebi ise literatürde şu şekilde açıklanmaktadır. Beton numunesi 400-500°C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kaldığında serbest Ca(OH)_2 , CaO 'e dönüşür. CaO su ile karşılaştığında tekrar Ca(OH)_2 oluşur ve bu durum hacimde genleşmeye sebep olur (Aydın, 2008; Sarshar ve Khoury, 1993). Suda hızlı soğutma daha yoğun boşluklu bir yapıya sebep olur. Bu durum bileşenlerin yüksek sıcaklıklarda bozunmasının sonucu olabilir (Khoury, 1992). Ayrıca, hızlı soğutma yönteminde numunenin iç sıcaklığının değişmesinden dolayı çatlaklar oluşmakta ve bu durum dayanım değerlerinde düşmeye sebep olmaktadır (Bilim, 2011)

Literatürde puzolanik katkı maddelerinin, yüksek sıcaklığın beton basınç dayanımına olumsuz etkilerini azalttığı belirtilmektedir (Aydın, 2008). Bu çalışmada zeolit katkısının yüksek sıcaklık etkisindeki betonun basınç dayanımına çok fazla bir katkısının olmadığı görülmüştür. Bunun sebebinin kullanılan DZ'in puzolanik aktivitesinin düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. DZ'in yüksek sıcaklık karşısında beton basınç dayanımına olumlu ve olumsuz etkilerinin olduğunu belirten çalışmalar mevcuttur (Bilim, 2011;Karakurt ve Topçu 2012). Yürütülen bu laboratuvar çalışmasında özellikle DZ5'in olumlu bir katkısının olduğu görülmüştür.

6.4 Yüksek Sıcaklığın Ultrases Geçiş Hızına Etkisi

Bir malzemenin ultrases geçiş hızı o malzemenin boşluk yapısına, dolayısıyla yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır (Akçaözoğlu vd., 2013). Betonun kompasitesi ve yoğunluğu azaldıkça ultrases geçiş hızı değeri de azalmaktadır (Whitehurst, 1951; Zoldners, 1971).

Araştırma kapsamında üretilen numunelerin ultrases geçiş hızları ölçülmüş, havada ve suda soğutulan numunelere ait ultrases geçiş hızı değerleri sırasıyla Çizelge 6.5 ve Çizelge 6.6 da sunulmuştur.

Çizelge 6.5. Havada soğutulmuş numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri (km/sn)

Karışım	Havada soğutma(km/sn)			
	22 °C	250 °C	500 °C	750 °C
DZ0	4,57	4,25	3,88	3,31
DZ5	4,44	4,02	3,55	3,28
DZ10	4,44	3,85	3,40	3,20
DZ15	4,42	3,80	3,26	3,30
DZ20	4,21	3,64	3,14	3,15
DZ30	3,96	3,26	2,92	2,62
DZ40	3,68	3,32	2,89	2,67

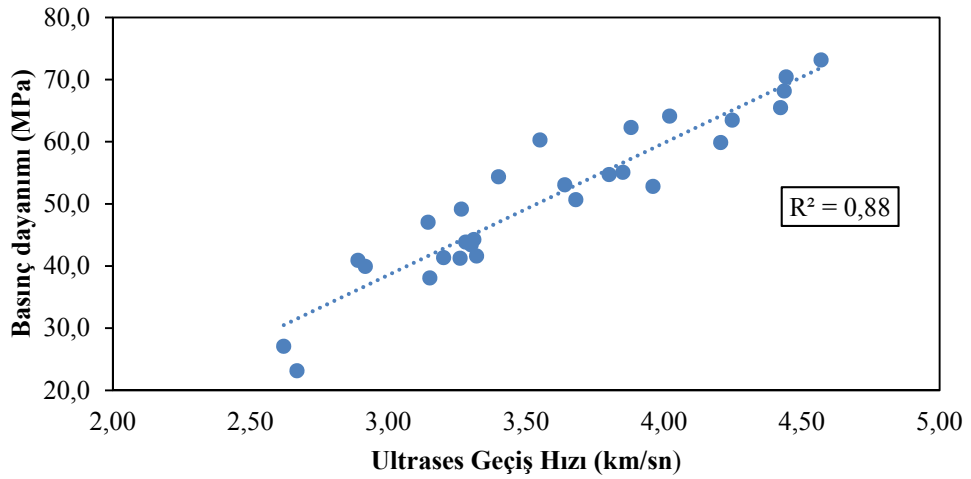
Çizelge 6.6. Suda soğutulmuş numunelerinin ultrases geçiş hızı değerleri (km/sn)

Karışım	Suda soğutma(km/sn)			
	22 °C	250 °C	500 °C	750 °C
DZ0	4,60	4,13	3,64	2,31
DZ5	4,49	4,02	3,62	2,27
DZ10	4,44	4,02	3,64	2,03
DZ15	4,38	4,09	3,59	2,20
DZ20	4,29	4,06	3,44	1,95
DZ30	4,28	3,78	3,53	1,70
DZ40	4,26	3,95	3,27	1,55

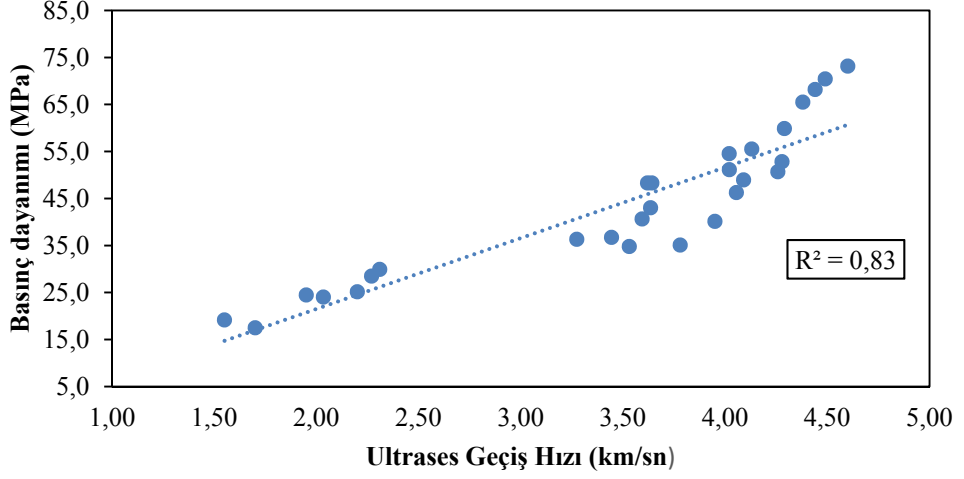
Çizelgeler incelendiğinde uygulanan sıcaklık arttıkça ultrases geçiş hızlarının da düştüğü görülmektedir. Suda soğutulan numunelerin ultrases geçiş hızlarının havada soğutulan numunelere göre daha az olduğu görülmüştür. Bu durum suda soğutmanın numunelere daha fazla zarar verdiğini göstermektedir.

Yüksek sıcaklık etkisi numuneleri olumsuz etkilemiştir. Numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri artan sıcaklığa bağlı olarak düşmüştür. Artan yüksek sıcaklık numunelerin boşluk yapısında artışa neden olmuş ve yapısından suyun buharlaşması nedeniyle numunelerin ağırlıklarında azalmalar ve ilave boşluklu yapılar meydana getirmiştir. Bu durum ultrases geçiş hızlarında da düşmeye neden olmuştur (Demirel ve Keleştemur, 2010; Topçu ve Demir, 2007).

Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ölçülen basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızları arasındaki ilişki havada soğutulan numuneler için Şekil 6.5’de, suda soğutulan numuneler için ise Şekil 6.6’da verilmiştir. Havada soğutulan numunelerde basınç dayanımları ile ultrases geçiş hızları arasında korelasyon katsayısı 0,88 olan, suda soğutulan numunelerde ise korelasyon katsayısı 0,83 olan bir ilişki elde edilmiştir.



Şekil 6.5. Havada soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile ultrases hızları arasındaki ilişki



Şekil 6.6. Suda soğutulmuş numunelerin basınç dayanımları ile ultrases hızları arasındaki ilişki

6.5 Isı İletkenlik Katsayıları

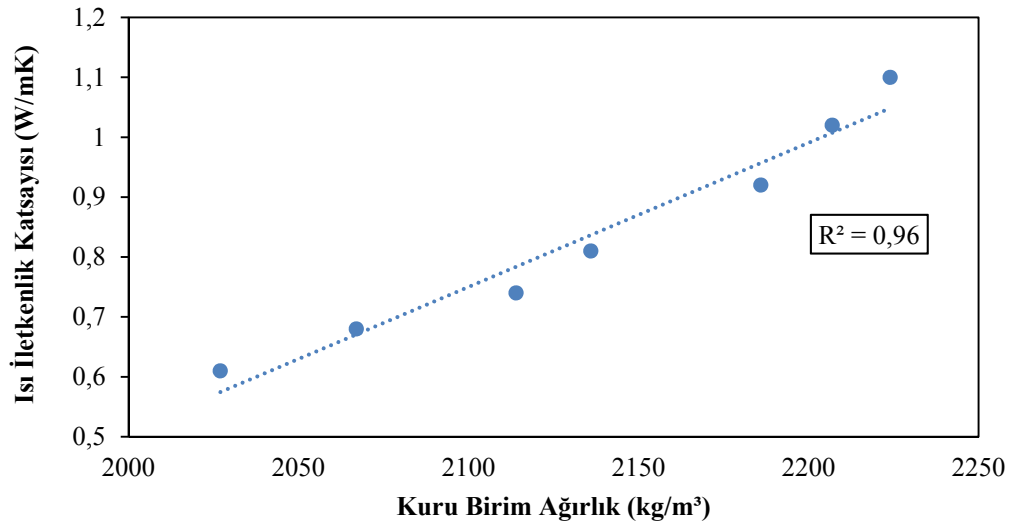
Numunelerin sıcak kutu yöntemine göre ölçülen ısı iletkenlik katsayıları Çizelge 6.7’de verilmiştir. Karışımlardaki DZ miktarı arttıkça ısı iletkenlik katsayıları da düşmüştür. Şahit numunenin ısı iletkenlik katsayısı değeri 1,10 W/mK iken %40 doğal zeolit içeren DZ40 numunesinin ısı iletkenlik değeri 0,61 W/mK olmuştur. Çizelge 6.7’de ayrıca numunelerin ısı iletkenlik katsayılarının azalma oranları da verilmiştir. Bu azalma oranları kontrol numunelerinin ısı iletkenlik değerleri ile karşılaştırıldığında, ikame edilen DZ miktarına göre %7,3 ile %44,5 arasında değişmektedir.

Malzemenin ısı iletkenlik katsayısı birim ağırlık ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Birim ağırlık arttıkça ısı iletkenlik katsayısı da artış göstermektedir (Öz, 2006). Doğal zeolit numunelerin birim ağırlıklarını düşürmesi ve doğal zeolit moleküler elek yapısının numunelerin ısı iletkenlik katsayısını düşürdüğü düşünülmektedir. Bu çalışmada elde edilen değerler literatür ile uyum içerisindedir (Öz, 2006; Kılıçarslan, 2007; Gencel vd., 2013).

Çizelge 6.7. Numunelerin ısı iletkenlik katsayıları

Karışım	Isı iletkenlik katsayısı (W/mK)	Azalma oranı (%)
DZ0	1,10	0,0
DZ5	1,02	7,3
DZ10	0,92	16,4
DZ15	0,81	26,4
DZ20	0,74	32,7
DZ30	0,68	38,2
DZ40	0,61	44,5

DZ katkılı beton numunelerin kuru birim ağırlıkları ile ısı iletkenlik katsayıları arasındaki ilişki incelenmiş ve Şekil 6.7’de verilmiştir. Şekil 6.7’de yer alan grafik incelendiğinde, numunelerin birim ağırlığı ile ısı iletkenliği arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Bunun sebebi numunelerin birim ağırlığı ile ısı iletkenlik katsayısı arasında kuvvetli bir ilişkinin olmasıdır.



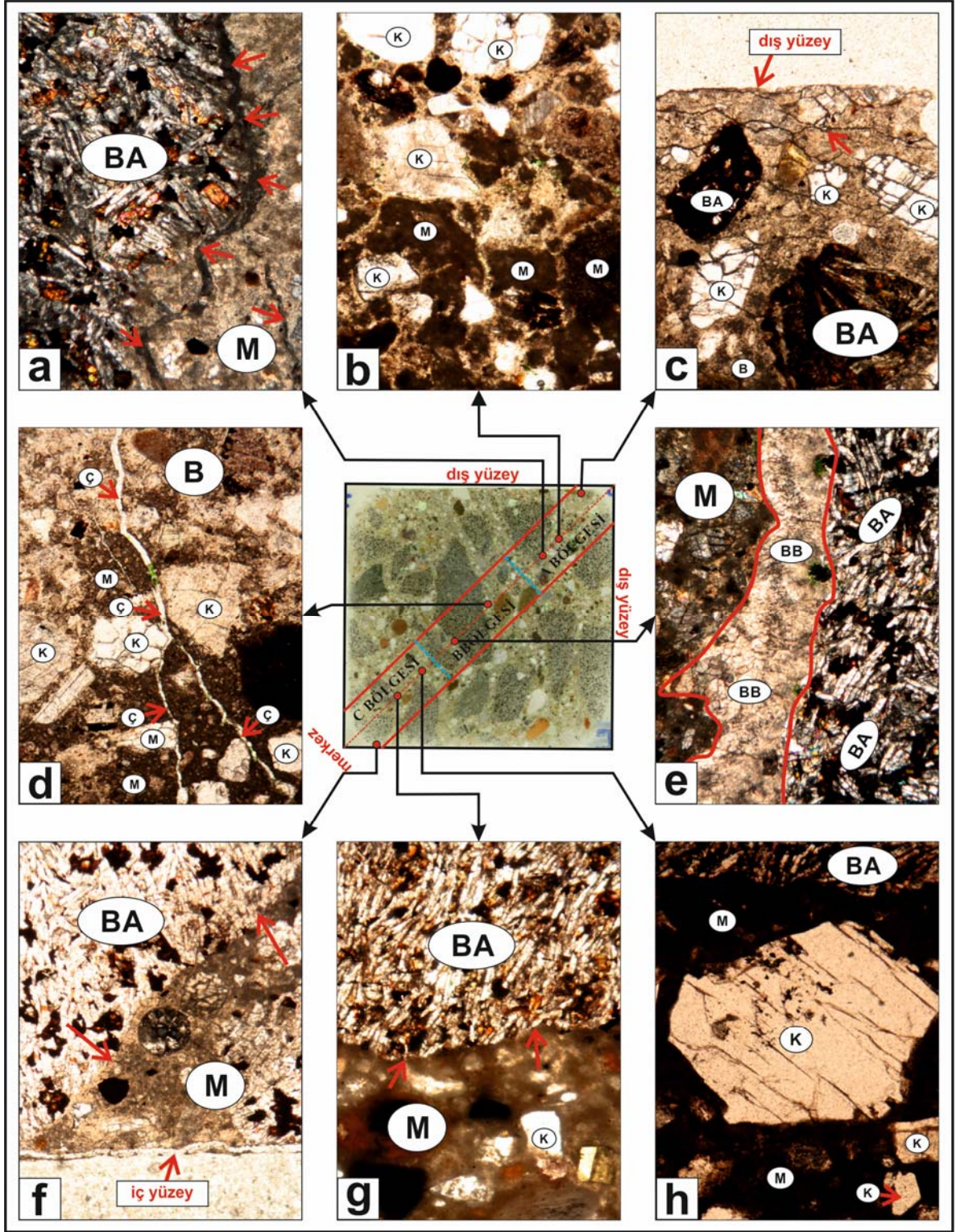
Şekil 6.7. Isı iletkenlik ve kuru birim ağırlık arasındaki ilişki

6.6 Mineral ve Doku Değişimlerinin Mikroskopik Analiz Sonuçları

Çalışma kapsamında, farklı oranlarda (%0, %10, %20, %30, %40) zeolit minerali içeren beton numuneleri 250, 500 ve 750 °C ısıya maruz bırakılıp havada ve suda soğutulmuştur.

Ancak zeolit miktarı ve soğutma yöntemine bağlı dokusal değişimler literatürde belirtilen dokusal değişimlerin keskin olarak gözlemlenmeye başlandığı 500 °C ısıya maruz bırakılan, hem havada hem de suda soğutulan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Akçaözoğlu, 2013; Georgali, 2005). Değerlendirmelerde agrega, matriks değişimleri ve aderans değişimleri ayrı ayrı yapılmış, doku karşılaştırmaları yapılırken detayları metodlar kısmında verilen bölgenmelerine dikkat edilmiştir.

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan tüm numunelerde dış yüzeyden iç merkeze doğru belirgin bir doku farklılaşması gözlenmiştir. Ancak çalışmada orta düzeyde etkilenen % 20 zeolit içeren ve suda soğutulan beton numunesinin mikroskobik görüntüleri sunulmuştur. Dokusal farklılaşmayı ortaya koyabilmek için ince kesitlerde kesit üzerinde kırmızı çizgiler arasında kalan bölge A, B ve C olmak üzere dış yüzeyden iç merkeze doğru bölgelere ayrılmış ve değerlendirmeler buradan alınan görüntülere göre yapılmıştır (Şekil 6.8). A bölgesinin dışa yakın kenar kısmına bakıldığında matriks ve agregalarda aşırı derecede kırılma ve parçalanma mevcuttur. Kırılmalar daha çok kenar yüzeye paralel ve birbirini kesmeyecek şekilde gelişmiştir (Şekil 6.8 c). Çatlaklar ise daha çok bu ana kırık düzlemleri arasında gelişmiş ve daha küçük boyutludur. Kuvars kristallerinde bazalta göre daha fazla kırık ve çatlaklar gelişmiştir (Şekil 6.8 c). A bölgesinde merkeze doğru gidildikçe aşırı derecedeki kırıklı ve çatlaklı yapı yerini bozmuş bir dokuya bırakmış, agregalarda gözlenen kırılma ve çatlamlar azalmıştır (Şekil 6.8 b). A bölgesinde biraz daha merkeze doğru gelindiğinde kırık, çatlak ve bozuşmaların daha da azaldığı sadece agrega ile matriks arasında geliştiği gözlenmiştir (Şekil 6.8 a). B bölgesinde ise kırık ve çatlakların iyice azaldığı, tekil birkaç çatlağın merkeze doğru çatallanarak uzandığı bunun haricinde kırık ve çatlağın olmadığı görülmüştür (Şekil 6.8 d). B bölgesinde dokusal değişimler daha çok agregalar ile matriks arasında gelişen ince bozuşma tabakalarıdır (Şekil 6.8 e). B bölgesinde agregalarda çok fazla bir değişim olmamış, agregadaki değişimler sadece kuvars kristalleri ile sınırlı kalmıştır. Betonun merkez kısmına (C bölgesi) bakıldığında ne matrikslerde nede agregalarda belirgin bir değişim olmamış, kuvars kristalleri özşekilli formlarını korumuş, bazaltlarda ana kayaçlardaki formlarına yakın bir görünüm sunmuşlardır (Şekil 6.8 f,h). Tane ile matriks arası aderans ilişkilerine bakıldığında da herhangi bir değişimin olmadığı gözlenmiştir.

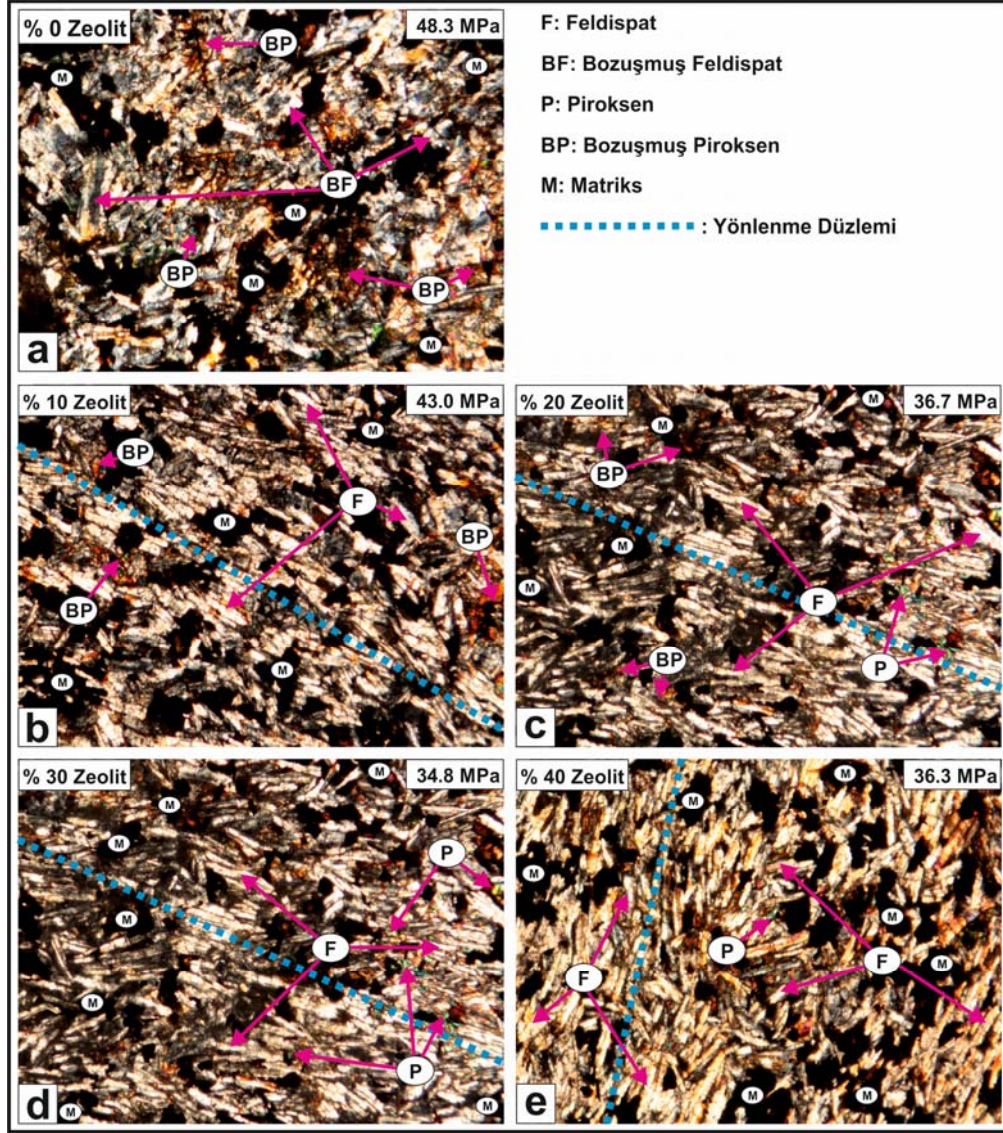


Şekil 6.8. Yüksek sıcaklığın numune yüzeyinden merkeze doğru etkileri

Genel olarak değerlendirildiğinde ısıya maruz kalmış tüm numunelerde betonun yüzeyi ile merkezi arasında oldukça fazla etkileşim farklılıkları vardır. Dış yüzeye yakın 1.5 cm'lik bölgede etkileşim en fazla, paralel kırık ve çatlaklar oldukça yoğun, değişimler

sadece matriks ile sınırlı kalmayıp agregaları da etkilemiştir. Merkezdeki yaklaşık 2 cm'lik bölgede etkileşim en az, matriks ve agregalarda belirgin bir değişim olmamış, agregada içerisindeki kristaller ve serbest haldeki kuvars kristalleri öz şekillerini korumuştur. İkisi arasında kalan yaklaşık 1.5 cm'lik bölgede ise etkileşim orta düzeyde, dokusal değişimler daha çok tekil çatlaklar ve aderans bozuşmaları şeklindedir. Tanımlanan bu dokusal değişimler betonun içerdiği doğal zeolit miktarına ve soğutulma yöntemine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Doğal zeolit miktarına bağlı dokusal değişim farklılıkları çalışmanın bundan sonraki aşamalarında sunulmuştur.

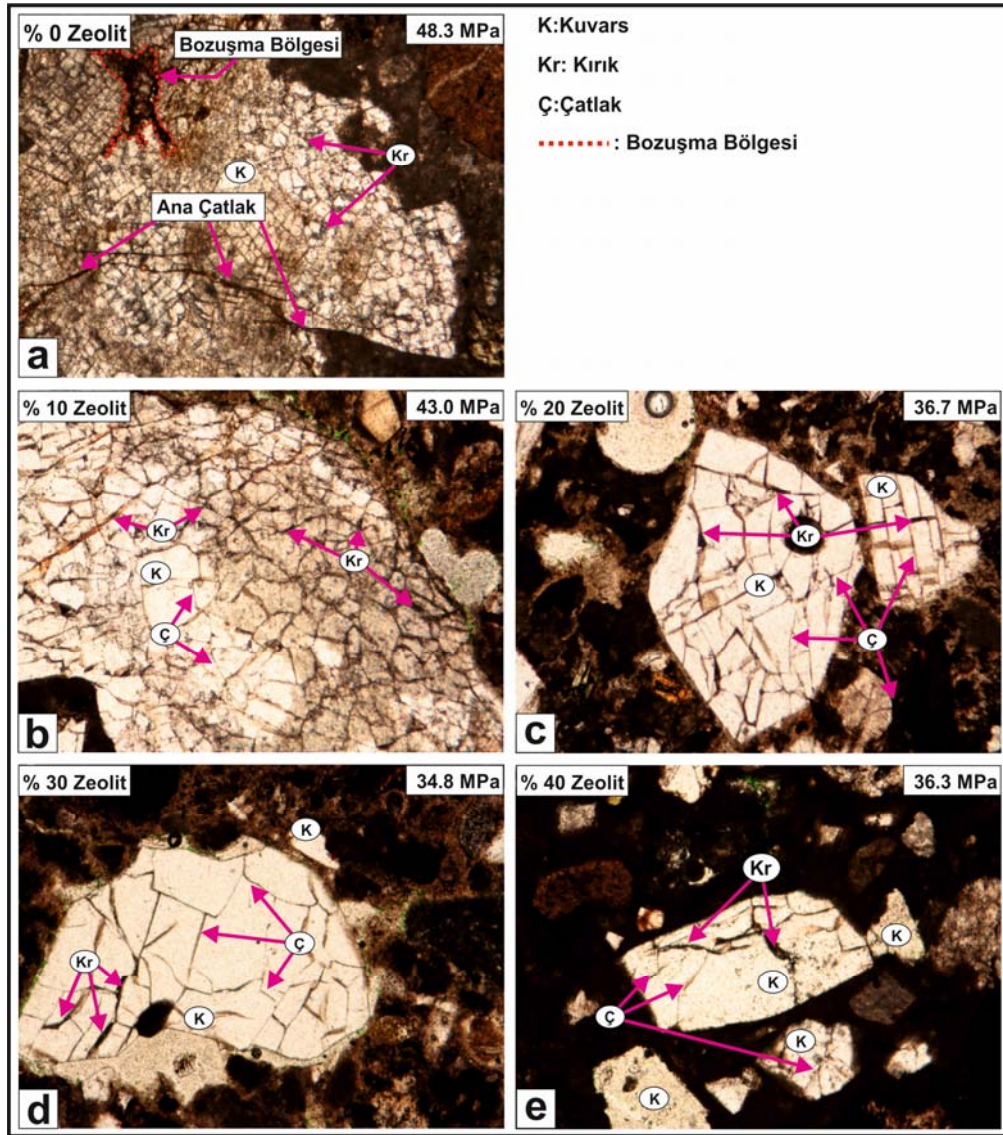
Karışımlarda kullanılan agreganın %48'ini bazalt oluşturmaktadır, bu yüzden agregada değerlendirmelerinde daha çok bazalt üzerinde durulmuştur. Suda soğutulan beton numunelerinde bazalt agregasını oluşturan baskın feldspat ve piroksen kristallerinin hamur içerisinde dağıldığı Şekil 6.9'da gözlenmektedir. Zeolit içermeyen beton numunesindeki agreganın feldspatlarının ısınma neticesinde öz şekillerini yitirerek yarı öz şekilli - öz şekilsiz bir forma dönüştüğü, piroksen kristallerinin ise tamamen bozduğu, hamur içerisine karıştığı görülmektedir (Şekil 6.9 a). % 10 zeolit içeren beton numunesinde de benzer bir doku hakim olup, % 0 zeolit içeriğine göre yarı öz şekilli plajiyoklaz feldspat kristallerinin oranı artmış feldspat mineralleri belli bir yöne doğru uzun eksenleri boyunca yönelmiştir (Şekil 6.9 b). % 0 ve % 10 zeolitli betonda agregada içerisindeki piroksen kristallerinin kırıntılı ve bozmuş olduğu, % 20'den itibaren piroksen kristellerinin daha belirgin olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.9 a,b,c). Beton numunelerinde zeolit oranı arttıkça bazaltı oluşturan mineraller daha iyi korunmakta % 40 zeolit içeren betonda agregada minerallerinin çoğunluğunun öz şekilli forma dönüştüğü görülmektedir (Şekil 6.9 e). Agregada içerisindeki mineral-matriks ilişkisine bakıldığında % 0 zeolit içeren beton agregasında mineral-matriks sınırlarının girift olduğu diğer beton numunelerinde ise daha belirgin olduğu gözlenmiştir.



Şekil 6.9. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerde DZ miktarı ile bazalt agregası arasındaki bozuma ilişkisi

Karışımlarda agrega olarak kullanılan diğer kayaç türü ise kuvars kumudur. Kullanılan zeolit miktarı arttıkça kuvars kristallerinde meydana gelen dokusal değişimlerde azalmaktadır. % 0 zeolit içeren betondaki kuvarslar aşırı derecede kırık-parçalı, mozaik görünümlü bir dokuya sahip ve kuvars kristallerini boydan boy kesen ana kırık hatları mevcuttur. Ayrıca kristal içerisinde diğer numunelerde gözlenmeyen sıcaklığın etkisiyle oluşmuş bozuşmalar mevcuttur (Şekil 6.10 a). %10 zeolit içeren beton numunelerindeki kuvarsların daha az kırık-çatlak içerdiği, ana kırık hatlarının olmadığı ve benzer şekilde mozaik görünümlü bir dokuya sahip olduğu gözlenmiştir (Şekil 6.10 b). % 20-30 zeolit içeren numunelerde ise kırık-çatlak sayıları azalmakta, mozaik görünümü kaybolmakta, kuvars kristalinin ana dış hatları belirginleşmektedir (Şekil 6.10 c,d). % 40 zeolit içeren

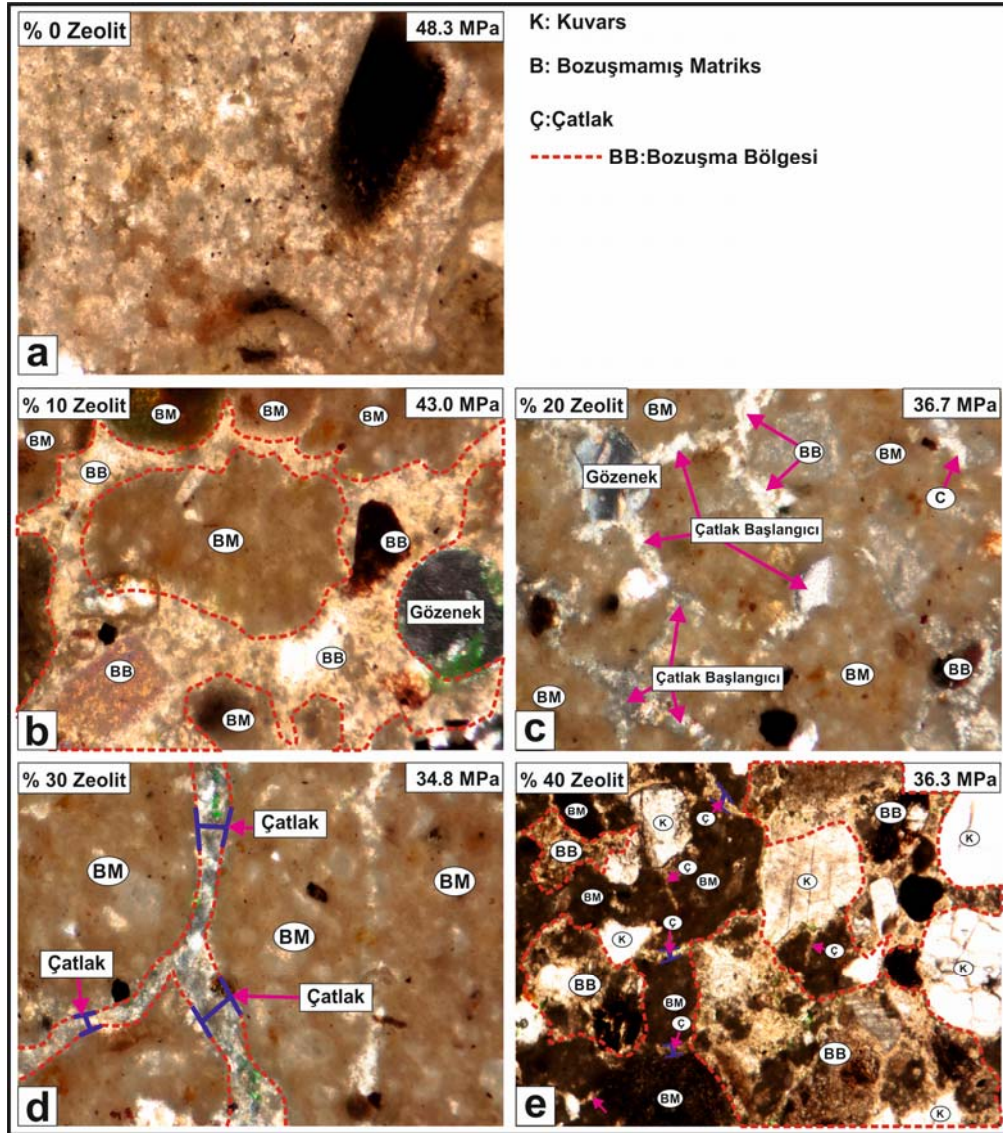
beton numunesinin kuvars kristallerinde ise münferit 3-4 kırık-çatlak gözlenmekte, kristal geometrisi iyice belirginleşmektedir (Şekil 6.10 e).



Şekil 6.10. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış numunelerde DZ miktarı ile kuvars agregası arasındaki bozuşma ilişkisi

Beton numunelerinin matriks değişimlerine bakıldığında agrega değişimlerinin tersi yönde bir dokusal değişim gözlenmiştir. Numunelerde dış bölge olarak adlandırılan A bölgesinde çok fazla değişim, C bölgesinde ise daha az değişim gözlenmiştir, bu yüzden matriks karşılaştırmaları sadece A bölgesinin bitimi B bölgesinin başlangıcında yapılmıştır (AB bölgesi). Hiç doğal zeolit içermeyen numunenin AB bölgesinde matriks masif, kırıksız ve çatlaksızdır (Şekil 6.11 a). % 10 doğal zeolit içeren numunenin belli bölgelerinde matriksin farklılaştığı, açık renkli dairesel bozuşmaların olduğu gözlenmiştir

(Şekil 6.11 b). Bu dairesel bozuşmalar % 20 doğal zeolit içeren numunenin matriksinde belirginleşmekte ve kesit içerisinde yoğunlukları artmaktadır (Şekil 6.11 c). % 30 doğal zeolit içeren betonda bozuşmaların kırılma ve çatlamlara dönüştüğü, matriksin belirgin sınırlarla parçalandığı görülmüştür (Şekil 6.11 d). En fazla matriks bozuşması, kırılma ve çatlamlar % 40 doğal zeolit içeren betonda gözlenmiş, dokusal değişimler AB bölgesinin hemen hemen tamamına yayılmıştır. Diğer görüntülere göre daha küçük ölçekli (X40) objektifle bakıldığında bu değişim daha net olarak görülmektedir (Şekil 6.11 e).



Şekil 6.11. Doğal zeolit miktarının matriks bozuşmasına etkisi.

BÖLÜM VII

SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Çalışma kapsamında üretilen numunelerin kuru birim ağırlıkları 2027 kg/m^3 ile 2224 kg/m^3 arasında değişmiştir. Doğal zeolit miktarı arttıkça karışımların kuru birim ağırlıklarının düştüğü görülmüştür.
- Üretilen beton numunelerin su emme oranları % 4,46 ile % 6,04 ve boşluk oranları ise %10,57 ile %14,18 arasında değişmiştir. Numunelerin boşluk ve su emme oranları %15 doğal zeolit ikameli numunelere kadar azalırken, %15 doğal zeolit ikamesinden sonra artmaya başlamıştır. Deney numunelerinin su emme oranları ile boşluk oranları arasında korelasyon katsayısı 0,98 olan oldukça kuvvetli bir ilişkinin olduğu görülmüştür.
- Tüm karışımlarda zamana bağlı olarak beton basınç dayanımları artmıştır. Ayrıca üretilen numunelerde doğal zeolit katkısı ile birlikte özellikle erken yaşlarda basınç dayanımı değerlerinin şahit numuneye göre azaldığı görülmüştür. Doğal zeolitin beton basınç dayanımına katkısı ilerleyen yaşlarda ortaya çıkmıştır. 28. günden itibaren DZ5, DZ10 ve DZ15'in basınç dayanımı değeri şahit numuneye yaklaşmış ve 360. güne kadar da bu durum devam etmiştir. Ancak DZ20, DZ30 ve DZ40 karışımlarının basınç dayanımları ilk günden itibaren şahit numuneye kıyasla büyük oranda dayanım kaybına uğramıştır. Doğal zeolit katkılı betonun ilk günlerdeki dayanımının kontrol numunesine göre çok düşük olması ve ilerleyen günlerde şahit numuneye yakın dayanım vermesi doğal zeolitin kütle betonu uygulamalarında ortaya çıkan hidratasyon ısını azaltmak amacıyla kullanılabileceğini göstermektedir.
- Yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamış deney numunelerinin basınç dayanım değerleri maruz kalınan sıcaklığın artması ile düşmeye başlamıştır. Bu durum hem havada hem de suda soğutulan numunelerde görülmüştür.

- Araştırma kapsamında, yangın sonrasında hem yavaş hem de hızlı soğutulan numunelerin basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir. Ancak bu azalma eğilimi hızlı soğutulan numunelerde daha belirgindir.
- Doğal zeolit katkılı numuneler yüksek sıcaklık karşısında şahit numuneye göre basınç dayanımı yönünden daha iyi performans göstermiştir.
- Numunelere uygulanan sıcaklık arttıkça ultrases geçiş hızlarının düştüğü görülmüştür. Suda soğutulan numunelerin ultrases geçiş hızları havada soğutulan numunelerin ultrases geçiş hızlarından daha düşük olmuştur. Bu durum suda soğutmanın numunelere daha fazla zarar verdiğini göstermektedir.
- Numunelerin yüksek sıcaklık sonrası ölçülen basınç dayanımları ile ultrases hızları arasında havada soğutulan numunelerde korelasyon katsayısı 0,88 olan, suda soğutulan numunelerde ise korelasyon katsayısı 0,83 olan bir ilişki elde edilmiştir.
- Karışımlardaki doğal zeolit miktarı arttıkça ısı iletkenlik katsayıları da düşmüştür. Şahit numunenin ısı iletkenlik katsayısı değeri 1,10 W/mK iken %40 doğal zeolit içeren numunenin ısı iletkenlik değeri 0,61 W/mK olmuştur.
- Beton numunelerinin kuru birim ağırlıkları ile ısı iletkenliği arasında korelasyon katsayısı 0,96 olan kuvvetli bir ilişki elde edilmiştir.
- Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan tüm numunelerde dış yüzeyden iç merkeze doğru belirgin bir doku farklılaşması gözlenmiştir. Yüzeyden merkeze doğru gidildikçe aşırı derecedeki kırıklı ve çatlaklı yapı yerini bozmuş bir dokuya bırakmış, agregalarda gözlenen kırılma ve çatlamlar azalmıştır. Betonun merkez bölgesinde ise matrikslerde ve agregalarda belirgin bir değişim olmamış, kuvars kristalleri özşekilli formlarını korumuş, bazaltlarda ana kayaçlardaki formlarına yakın bir görünüm sunmuşlardır.
- Yüksek sıcaklık etkisinde şahit numunedeki bazalt agreganın feldspatlarının öz şekillerini yitirerek yarı öz şekilli - öz şekilsiz bir forma dönüştüğü, piroksen kristallerinin ise tamamen bozduğu, hamur içerisine karıştığı görülmüştür. Beton

numunelerinde doğal zeolit oranı arttıkça bazaltı oluşturan mineraller daha iyi korunmuş, % 40 doğal zeolit içeren betonda agrega minerallerinin çoğunluğunun öz şekilli formunu koruduğu görülmüştür.

- Karışımlarda kullanılan doğal zeolit miktarı arttıkça yüksek sıcaklık etkisi altında kuvars kristallerinde meydana gelen dokusal değişimlerde azalmıştır. Yüksek sıcaklığa maruz kalmış şahit numunedeki kuvarslar aşırı derecede kırık-parçalı, mozaik görünümlü bir dokuya sahip iken numunelerdeki doğal zeolit miktarı arttıkça kuvars minerallerindeki kırık-çatlak sayılarının azaldığı, mozaik görünümün kaybolduğu, kuvars kristalinin ana dış hatlarının belirginleştiği görülmüştür. % 40 doğal zeolit içeren beton numunesinin kuvars kristallerinde ise münferit 3-4 kırık-çatlak gözlenmiş, kristal geometrisi iyice belirginleşmiştir.
- Doğal zeolit miktarına bağlı olarak yüksek sıcaklık etkisinde numunelerin matriks değişimleri, agrega değişimlerinin tersi yönde oluşmuştur. Hiç doğal zeolit içermeyen numunenin matriksi masif, kırıksız ve çatlaksız iken doğal zeolit miktarı arttıkça matriksin farklılaştığı, bozuşmaların olduğu gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

Akçaözoğlu, K., “Microstructural examination of concrete exposed to elevated temperature by using plane polarized transmitted light method”, *Construction and Building Materials* 48, 772–779, 2013.

Akçaözoğlu, K., “Yüksek sıcaklığın genleşmiş kil agregalı hafif betonun basınç dayanımına etkisi”, *Niğde Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi*, FEB 2011/20, Niğde, 2012.

Akçaözoğlu, S., Akçaözoğlu, K., and Atiş, C.D., “Thermal conductivity, compressive strength and ultrasonic wave velocity of cementitious composite containing waste PET lightweight aggregate (WPLA)”, *Composites: Part B* 45(1), 721-726, 2013.

Akman, M. S., “Betonarme yapılarda yangın hasarı ve yangın sonunda taşıyıcılığının belirlenmesi”, *Yapıda Yangından Korunma Sempozyumu*, İstanbul, 1992.

Akman, M. S., “Yapı hasarları ve onarım ilkeleri”, *Livane Matbaacılık*, İstanbul, 2000.

Aköz, F. ve Yüzer, N., “Yüksek sıcaklığın nedenleri ve betonarme elemanlara etkileri”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi* (3), 89-98, 1994.

Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., “Portland çimentolu ve silis dumanı katkılı harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkileri”, *TMMOB Teknik Dergi* 6 (1), 919-931, 1995.

Allen, D.C. and Desai, P.M., “The Influence of aggregate on the behaviour of concrete at elevated temperatures”, *Nuclear Engineering and Design* (6), 75-77, 1967.

Alonso, C., Andrade, C. and Khoury, G.A., “Porosity & microcracking”, *International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete*, Udine/Italy, 2003.

Al-Sibahy, A. and Edwards, R., “Thermal behaviour of novel lightweight concrete at ambient and elevated temperatures: Experimental, modelling and parametric studies”, *Construction and Building Materials* 31, 174-187, 2012.

Ames, L.L.Jr., "Cation sieve properties of the open zeolites chabazite, mordenite, erionite and clinoptilolite", *American Mineral* 46, 1120-1131, 1961

Ammae, H.D., “Zeolit ve trombositten zengin plazma uygulamasının deneysel kemik defektleri üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, s. 25, 2011.

Andrade, C., Alonso, C. and Khoury, G.A., “Microstructure & moisture”, *International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete*, Udine/Italy, 2003.

Arı, K., “Dolgulu duvar blokları imali ve ısı iletim katsayılarının karşılaştırılması”, Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 2009.

Ashrae Fundamentals, “Yakacaklar ve yanma”, *Tesisat Mühendisleri Derneği Teknik Yayınları*:2, 15, 1997.

ASTM C 597-09, “Standard test method for pulse velocity through concrete”, *American Society For Testing And Materials*, USA, 2009.

ASTM C1113, “Thermal conductivity of refractories by hot wire”, *American Society For Testing And Materials*, USA, 320-325, 1990.

ASTM C177, “Steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the guarded-hot-plate apparatus”, *American Society For Testing And Materials*, USA, 20-29, 1985.

ASTM C518, E1530, “Steady-state heat flux measurements and thermal transmission properties by means of the heat flow meter apparatus”, *American Society For Testing And Materials*, USA, 151-162, 1991.

ASTM E1225, “Thermal conductivity of solids by means of the guarded-comparati and longitudinal heat flow technique”, *American Society For Testing And Materials*, USA, 594-603, 1988.

Ataman, G., “Batı Anadolu (Ege Bölgesi) zeolit oluşumlarının saptanması”, *TÜBİTAK-197*, 1997.

Avcı, A.U., “Dökümde enerji tasarrufu”, *Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları*, sayı 178, İstanbul, 1984.

Aydın, S., “Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice”, *Fire Safety Journal* 43, 610-617, 2008.

Aydın, S. ve Baradan, B., “Yüksek sıcaklığa dayanıklı geliştirilmesi”, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, s. 451-460, 2003.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., “Betonarme yapılarda kalıcılık (durabilite)”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları*, 298, İzmir, 2002.

Bilim, C., “Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material”, *Construction and Building Materials* 25, 3175-3180, 2011.

Breck, D.W., “Synthetic zeolites: Properties and applications, industrial minerals and rocks”, *A.I.M.E.*, 1243–1257, New York, 1975.

Canpolat, F., Yılmaz, K. ve Sümer, M., “Zeolit katkılı çimentoların özelliklerinin incelenmesi”, *Yüksek Performanslı Betonlar 6. Ulusal Beton Kongresi*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 2005.

CEB, "Fire design of concrete structures", *Bulletin D'Information*, Lausanne, 1991.

Colella, C., "Ion exchange equilibria in zeolite minerals", *Mineral Deposita*, 31, 554-562, 1996.

Cülfik, M.S. ve zturan, T., "Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar", *Cement and Concrete Research* (32), 809-816, 2002.

Demirel, B. and Keleştemur, O., "Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume", *Fire Safety Journal* 45, 385-391, 2010.

Diederichs, U. and Schneider, U., "Bond strength at high temperatures", *Magazine of Concrete Research* (33), 75-84, 1981.

DPT, "Diğer endüstri mineralleri", *Yedinci Beş Yıllık Kalkınma Planı zel İhtisas Komisyonu Raporu* 19, DPT: 2421-OIK 480 s, 1996.

Erdoğan, T.Y., "Beton", *ODT Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını*, Ankara, 2003.

Erdoğan, T.Y., "Karışım ve bakım suları", *Türkiye Hazır Beton Birliği*, İstanbul, 1995.

Feng, N.Q., Li, Z.G., Zang, X. W., "Study on the suppression effect of natural zeolite on expansion of concrete due to the alkali-aggregate reaction", *Magazine of Concrete Research* 50, 17-24, 1998.

Gencel, O., St, M., Erdoğmuş, E., Ko, V., ay, V.V., and Gk, M.S., "Properties of bricks with waste ferrochromium slag and zeolite", *Journal of Cleaner Production* 59, 111e119, 2013.

Georgali, B. and Tsakiridis, P.E., "Microstructure of fire-damaged concrete. a case study.", *Cement and Concrete Composites* 27, 255-259, 2005.

Go, C.G., Tang, J.R., Chi, J.H., Chen, C.T. and Huang, Y.L., "Fire-resistance property of reinforced lightweight aggregate concrete wall", *Construction and Building Materials* 30,725-733, 2010.

Gottardi, G. and Galli, E., "Natural zeolites", *Springer*, Berlin, 1985.

Guisse, S.E., Short, N.R. and Purkiss, J.A., "Colour analysis for assessment of fire damaged concrete, concrete repair, rehabilitation and protection, proceeding of the international conference", *Held at The University of Dundee*, Scotland/UK, 1996.

Haddad, R.H. and Shannis, L., "Post-fire behavior of bond between high strength pozzolanic concrete and reinforcing steel", *Construction and Building Materials* 18, 425-435, 2004.

Haksever A., "Yangın odalarının teorik-nümerik yangın analizleri için modelleştirilmesi, *Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi Dergisi* 6, 57-66, 1991.

Hertz, K.D., "Concrete strength for fire safety design", *Magazine of Concrete Research* 57(8), 445-453, 2005.

Karakurt, C. and Topçu, İ. B., "Effect of blended cements with natural zeolite and industrial by-products on rebar corrosion and high temperature resistance of concrete", *Construction and Building Materials* 35, 906–911, 2012.

Karaüç, E., "Uçucu kül ve zeolit in kendiliğinden yerleşen betonlara etkileri", Yüksek Lisans Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 2008.

Kayfeci, M., "Sıvılar için ısı iletim katsayısı ölçüm cihazı tasarımı ve deneysel olarak incelenmesi", Bilim Uzmanlığı Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 2005.

Khoury, G.A., "Compressive strength of concrete at high temperatures: A reassessment", **Magazine of Concrete Research** 44, 291-309, 1992.

Khoury, G.A., Grainger, B.N. and Sullivan, P.J.E., "Transient thermal strain of concrete: Literature review, conditions within specimen and behavior of individual constituents", **Magazine Concrete Research** 37 (132), 131-144, 1985.

Khoury, G.A. and Majorana, C., "Effect of heat on concrete", **International Centre for Mechanical Sciences**, Udine, Italy, p 1-11, 2003a.

Khoury, G.A., "Fire & assessment", **International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete**, Udine/Italy, 2003b.

Kılıçarslan, Ş., "Zeolit içeren betonların termomekanik özellikleri", **Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi** 11-3, 262-267, 2007.

Kurama, H., "Doğal zeolit (Klinoptilolit) ile atık sulardan ağır metal iyonlarının uzaklaştırılması", Doktora Tezi, **Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, 1994.

Lau, A. and Anson, M., "Effect of high temperatures on high performance steel fibre reinforced concrete", **Cement and Concrete Research** 36, 1698-1707, 2006.

Li, M., Qian, C. and Sun, W., "Mechanical properties of high-strength concrete after fire", **Cement and Concrete Research** 34, 1001-1005, 2004.

Li, Z. and Ding, Z., "Property improvement of portland cement by incorporating with metakaolin and slag", *Cement and Concrete Research* 33(4), 579-584, 2003.

Lin, W.M., Lin, T.D. and Powers-Couche, L.J., "Microstructures of fire-damaged concrete", *ACI Materials Journal* 93(3),199-205, 1996.

Mahsanlar, N., "Yüksek sıcaklık etkisinde beton davranışı", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2006.

Mumpton, F.A. and Sheppard, R.A., "Natural zeolites their properties, occurrences and uses", *Min. Sci. and Engineering* 6, 19-34, 1974.

Neville, A.M., "Properties of concrete", *Fourth Edition, Longman Scientific and Technical*, New York/USA, 2000.

Onaran, K., Malzeme Bilimi, Yedinci Basım, *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul, 2000.

Othuman, M.A. and Wang, Y.C., "Elevated-temperature thermal properties of lightweight foamed concrete", *Construction and Building Materials* 25, 705-716, 2011.

Öter, Ö., "Zeolitin asit-baz modifikasyonu ve modifiye zeolitin çevre koruma uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 2002.

Öz, A., "Yüksek fırın çürüfu ve doğal zeolit katkılı kendiliğinden yerleşen betonların termo-mekanik özellikleri", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, 2006.

Papayianni, I. and Valliasis, Th., "Heat deformation of fly ash concrete", *Cement & Concrete Composites* 27, 249-254, 2005.

Perkins, P.H., “Repair, protection and waterproofing, of concrete structures”, *Elseveir Applied Science Publishers Ltd.*, England, 1986.

Poon, C.S., Azhar, S; Anson, M. and Wong, Y.L., “Comparison of the strength and durability performance of normal-and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures”, *Cement and Concrete Research* 31, 1291-1300, 2001.

Postacıoğlu, B., Beton, Cilt 2, *Teknik Kitaplar Yayınevi*, İstanbul, 1987.

Ramakrishnan, V., Shafai, H.F. and Wu G., “Cyclic heating and cooling effects on concrete durability”, *Concrete Durability*, 1991.

Riley, M.A., “Possible new method for the assessment of fire damaged concrete”, *Magazine of Concrete Research* 43, 87-92, 1991.

Sakr, K. and EL-Hakim, E., “Effect of temperature or fire on heavy weight concrete properties”, *Cement and Concrete Research* 35, 590-596, 2005.

Sallı Bideci, Ö., Bideci, A. ve Oymael, S., “Zeolit katkılı çimentoların özelliklerinin incelenmesi”, *SDU International Technologic Sciences* 5, 70-76, 2013.

Sarıız, K. ve Nuhuğlu, İ., “Endüstriyel hammadde yatakları ve madenciliği”, *Anadolu Üniversitesi* 636, Eskişehir, 1992.

Sarıkaya, H., “Zeolit katkılı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 2006.

Sarshar, R. and Khoury, G.A., “Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures”, *Magazine of Concrete Research* 45(162), 51-61. 1993.

Savva, A., Manita, P. and Sideris, K.K., “Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates”, *Cement & Concrete Composites* 27, 239-248, 2005.

Schrefler, B.A., Gawin, D., Khoury, G.A. and Majorana, C.E., “Physical, mathematical & numerical modelling”, *International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete*, Udine/Italy, 2003.

Sevim, U. K. ve Okumuş, N., “Zeolit ve silika dumanı katkılı betonların mekanik ve geçirimsizlik özellikleri”, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 26 (2), 57-63, 2011.

Shoab, M.M., Ahmed, S.A. and Balaha, M.M., “Effect of fire and cooling mode on the properties of slag mortars”, *Cement and Concrete Research* 31, 2001.

Sirel, Ş., “Kuramsal renk bilgisi”, *Kutulmuş Matbaası*, İstanbul, 1974.

Şapçı, N., “Aksaray bölgesi volkanik hafif agrega oluşumlarının incelenmesi ve endüstriyel kullanılabilirliği”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 2008.

Şen, B., “Çimento süspansiyonlarında Cr⁺ bileşiklerinin zeolitle adsorbsiyonunun araştırılması”, *Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kütahya, 2006.

Şenatalar, A.E., Çandar, V. ve Kadioğlu, E., "Doğal zeolitlerin kullanım potansiyelleri", *İ.T.Ü. Dergisi* 40, 26-34, 1982.

Topçu, İ.B. ve Demir, A., “Yüksek sıcaklık uygulama süresinin harç özelliklerine etkisi”, *7. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 455-463, 2007.

TS 3624, Sertleşmiş betonda özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı tayin metodu, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 1981.

TS 802, Beton karışım tasarımı hesap esasları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2009.

TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler Bölüm 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2002.

TS EN 12390-3, Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2010.

TS EN 13501-2, Yapı mamulleri ve bina elemanları – Yangın sınıflandırması Bölüm 2: Yangına dayanım deneylerinden elde edilen veriler kullanılarak sınıflandırma (Havalandırma tesisatları hariç), **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2009.

TS EN 1934, Binaların ısı performansını - Isı ölçer kullanan sıcak kutu metodu ile ısı direncinin tayini, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 1999.

TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2012.

TS EN 206-1 A1, Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2005.

TS EN 934-2, Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2011.

TS-1008, Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, **Türk Standartları Enstitüsü**, Ankara, 2003.

Uzal, B., Bektaş, F. and Turanlı, L., “Investigation of expansion due to alkali-silica reaction and sulfate attack of granulated natural zeolite”, *TMMOB 5th National Concrete Congress*, 403–409, 2003.

Uzun, P., “Klinoptilolit sentezi ve iyon değişimi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 2009

Whitehurst, E.A., “Soniscope tests concrete structures; Research and development laboratories of the portland cement association”, *J Am Concr Inst* 47, 433-444, 1951.

Xu, Y., Wong, Y.L., Poon, C.S. and Anson, M., “Impact of high temperature on PFA concrete”, *Cement and Concrete Research* 31, 1065-1073, 2001.

Yeğınobalı, A., “Silis dumanı ve çimento ile betonda kullanımı” *TÇMB/Arge/Y01.01*, 2002.

Yörüköğulları, E., “Güneş enerjisinin doğal zeolite depolanması”, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, Eskişehir, 1985.

Yüzer, N., “Yangına maruz kalan yapılarda beton basınç dayanımı-renk değişimi ilişkisinin araştırılması”, *İTÜ*, İstanbul, 2007.

Yüzer, N., Aköz, F. and Öztürk, L.D., “Compressive strength–color change relation in mortars at high temperature”, *Cement and Concrete Research* 34, 1803-1807, 2004.

Zoldners, N.G., “Thermal properties of concrete under sustained elevated temperatures”, *ACI Publ SP-25* (8), 1-31, 1971.

ÖZ GEÇMİŞ

Recep ÖCAL 1987’de Yozgat’ın Sorgun ilçesinde doğdu. 2001’de Sorgun Ertuğrul Gazi İlköğretim Okulunu, 2005’te Sorgun Anadolu Lisesini bitirdi. 2005 yılında Niğde Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’ne girdi. Bu bölümden Ağustos 2009’da mezun oldu. 2010 yılında Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans yapmaya hak kazandı. 2010-2012 yılları arasında Nevşehir’de, Gülşehir Regülâtörü Tuzköy HES şantiyesinde hazır beton şantiye şefi olarak çalıştı. 2012-2013 yılları arasında yedek subay olarak askerlik hizmetini tamamladı. Nisan 2013 yılından beri Niğde Beyazıt Mühendislik bünyesinde çalışmaktadır.

