

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

**FARKLI AGREGALI BETONLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE YÜKSEK SICAKLIĞIN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Serhat AY**

Anabilim Dalı: Yapı Eğitimi

ŞUBAT-2010

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

**FARKLI AGREGALI BETONLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE YÜKSEK SICAKLIĞIN ETKİSİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhat AY

07125102

Anabilim Dalı: Yapı Eğitimi

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: Şubat 2010

ŞUBAT-2010

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI AGREGALI BETONLARIN MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE YÜKSEK SICAKLIĞIN ETKİSİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serhat AY
(07125102)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 05.02.2010

Tezin Savunulduğu Tarih :

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri :

.....

.....

.....

ŞUBAT-2010

ÖNSÖZ

Fırat Üniversitesi Yapı Eğitimi Anabilim Dalında yaptığım çalışma kapsamında farklı agrega türleriyle hazırlanan betona yüksek sıcaklığın etkisi araştırılmıştır.

Bu araştırmanın yapılmasında çalışmanın yürütücülüğünü üstlenerek, her zaman ilgi ve desteğini gördüğüm danışman hocam Sayın Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na, laboratuvar imkanlarını sunan Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölüm Başkanı Sayın Doç. Dr. Ömer KELEŞOĞLU'na, ve çalışmamın adersans deneyinde zamanını bana ayıran Sayın Yrd. Doç. Dr. İlyas SOMUNKIRAN'a teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Serhat AY
ELAZIĞ-2010

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ÖZET	V
SUMMARY	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VII
TABLolar LİSTESİ	IX
FOTOĞRAFLAR LİSTESİ	VIII
SEMBOLLER LİSTESİ	X
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
3. GENEL BİLGİLER	13
3.1. Betonu Oluşturan Malzemeler	13
3.1.1. Agrega.....	13
3.1.1.1. Agrega Çeşitleri ve Özellikleri	14
3.1.1.2. Agreganın Fiziksel Özellikleri.....	15
3.1.1.2.1. Granülometri	15
3.1.1.2.2. İncelik Modülü (I_m)	17
3.1.1.2.3. Birim Ağırlık (Δ)	18
3.1.1.2.4. Özgül Ağırlık (δ_a).....	18
3.1.1.2.5. Tane Biçimi.....	19
3.1.1.2.6. Rutubet Durumları.....	19
3.1.1.2.7. Komposite (k).....	20
3.1.1.3. Agreganın Mekanik Özellikleri.....	20
3.1.1.3.1. Tane Dayanımı.....	20
3.1.1.3.2. Aşınma Dayanımı	21
3.1.1.3.3. Çarpma Dayanımı	21
3.1.2. Çimento.....	22
3.1.3 Karma Suyu	23
3.1.4. Kimyasal Katkı Maddeleri.....	24
3.1.4.1. Betonun İşlenebilir Özelliğini Arttırıcı Katkı Maddeleri.....	24

	<u>Sayfa No</u>
3.1.4.2. Süper Akışkanlaştırıcılar	24
3.1.4.3. Priz Süresini Değiştiren Katkılar	25
3.1.4.4. Hava Sürükleyici Katkı Maddeleri	25
3.1.4.5. Antifirizler	25
3.1.4.6. Hiper Akışkanlaştırıcılar	25
3.1.4.7. Diğer Katkılar	25
3.1.5. Mineral Katkılar	26
3.1.5.1. Silis Dumanı ve Özellikleri	26
3.1.5.2. Uçucu Kül ve Özellikleri	27
3.2. Betondan Beklenen Özellikler	27
3.2.1. Betonun İç Yapısı	28
3.2.2. Çimento Hamurunun İç yapısı	28
3.2.3. Agrega Çimento Ara Yüzeyinin İç Yapısı	29
3.2.4 Taze Betondan Beklenen Özellikler	31
3.2.5. Sertleşmiş Betondan Beklenen Özellikler	31
3.2.5.1. Betonun Basınç Dayanımı	32
3.2.5.1.1 Beton Dayanımını Oluşturan Unsurlar	33
3.2.5.1.2. Beton Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler	33
3.2.5.1.3. Betonun Basınç Dayanımının “Standart Deney Yöntemi” ile Belirlenmesi	34
3.2.5.1.4. Ultrasonik Test Cihazı Kullanarak Beton Basınç Dayanımının Elde Edilmesi	35
3.2.5.2. Betonun Çekme ve Eğilme Dayanımı	37
3.2.5.2.1. Doğrudan Çekme Dayanımı	38
3.2.5.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı	39
3.2.5.2.3. Eğilmede Çekme Dayanımı	40
3.2.6. Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörler	41
3.3. Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri	42
3.3.1. Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri	43
3.3.1.1. Isı Yayımlı Katsayısı	45
3.3.1.2. Isı İletim Katsayısı	45
3.3.1.3 Genleşme Katsayısı	46

	<u>Sayfa No</u>
3.3.1.4	Özgül Isı..... 46
3.3.1.5.	Isı Şoku Parametresi..... 46
3.3.1.6.	Birim Hacim Ağırlığı..... 47
3.3.2.	Yüksek Sıcaklığın Betonun Mekanik Özelliklerine Etkileri..... 48
3.3.2.1.	Basınç Dayanımı 48
3.3.2.2.	Çekme Dayanımı 50
3.3.2.3.	Elastisite Modülü 51
4.	DENEYSEL ÇALIŞMA 53
4.1.	Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler 53
4.1.1.	Agregalar 53
4.1.2.	Çimento..... 55
4.1.3.	Karışım Suyu 56
4.1.4.	Beton Numunelerin Boyutları, Kür ve Bakımı..... 56
4.2.	Yapılan Deneyler 57
4.2.1.	Yüksek Sıcaklık Deneyi 57
4.2.2.	Taze Beton Deneyi 59
4.2.2.1.	Yayıma Tablası Deneyi..... 59
4.2.3.	Sertleşmiş Beton Deneyleri..... 60
4.2.3.1.	Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi 60
4.2.3.2.	Çekip – Çıkarma (pull-out) Deneyi..... 61
4.2.3.3.	Ultrasonik Test 62
4.2.3.4.	Porozite 63
5.	DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ 64
5.1.	Ultrasonik Test Değerlerinin Değerlendirilmesi 64
5.2.	Basınç Dayanımının Değerlendirmesi..... 65
5.3.	Aderans Deneyinin Değerlendirmesi 69
6.	SONUÇLAR ve ÖNERİLER 70
	KAYNAKLAR..... 72
	ÖZGEÇMİŞ..... 80

ÖZET

Beton, yanıcı bir malzeme olmamasına karşın yüksek sıcaklıklar sonrasında değişik davranışlar göstermektedir. Beton hacminin önemli bir kısmını oluşturan agregaların özelliklerindeki farklılıklar ısıtma sırasında betonun performansını önemli derecede etkiler. Bu özelliklerindeki farklılıklardan dolayı betonda çatlama ve parça atmalar gözlenirken aderansa önemli kayıplar oluşmaktadır. Bu sebeple yüksek sıcaklık betonu her zaman tehdit edebilecek bir etkidir ve yüksek sıcaklığın betona verdiği zararları en aza indirmek için çalışmalar yapılmaktadır.

Bu çalışmada, farklı agrega tipleriyle hazırlanan beton numunelere yüksek sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla CEM I 42,5 N tipi Portland Çimentosu ve 4 farklı tip agrega (Bazaltik kırma taş, Dere agregası, Pomza, Kireçtaşı) içeren betonlar hazırlanmıştır. Belirlenen yaşa gelen (28 gün) numuneler sırasıyla 300⁰ C, 600⁰ C ve 900⁰ C sıcaklıklara tabi tutulmuştur. Bu sıcaklıklara maruz kalan beton numunelerin basınç dayanımlarına, ultrases geçiş hızlarına ve aderans dayanımına bakılmıştır.

Yapılan çalışmaların sonucunda yüksek sıcaklığın etkisinde kalan farklı tip agregalarla hazırlanmış betonlarda basınca en dayanıklı olanın bazaltik kırmataş olduğu, en az dayanımında hafif agregayla hazırlanmış olan betonda olduğu görülmüştür. Aynı zamanda hazırlanan beton numunelerde çekip-çıkarma (pull-out) deneyi yapılmış ve sıcaklık arttıkça beton ile donatı arasındaki aderans kuvvetinin azaldığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Basınç Dayanımı, Yüksek Sıcaklık, Beton, Farklı Agregası, Çekip Çıkarma

SUMMARY

EFFECT OF THE TEMPERATURE ON MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE WHICH IS PREPARED BY DIFFERENT TYPES OF AGGREGATES

Concrete shows different behaviours after the higher temperatures in spite of it isn't flammable. Differences in the properties of aggregates which are made up a significant portion of the volume of concrete affect significantly performance of concrete. As cracking and splitting in concrete are being observed due to differences in the properties, it is also made up significant losses in adherence. Because of this reason, it is a factor that may threaten to concrete at high temperature and studies are done to minimize damages to concrete of high temperature.

In this study, the effect of high temperature to the concrete specimens prepared with different types of aggregates are investigated. For this purpose, it is prepared mortars containing Portland cement CEM I 42.5 and four different types of aggregates (basaltic stone crushing, river aggregate, pumice, limestone). The samples in wet determined are respectively subjected to 300⁰ C, 600⁰ C and 900⁰ C temperature. It is investigated to adherence strength, switching speed of ultrasound and compressive strength of concrete specimens exposed to this temperature.

As a result of study done, It has been observed that the basaltic stone crushing is the most resistant to pressure in concretes and the concrete prepared by lightweight aggregate is the minimum resistant to pressure. At the same time, the pull-out of concrete test has been done in the concrete samples prepared and it has been seen decreasing of the adhesion force that is between concrete and matrix with increasing temperature.

Key Words: Compressive Strength, High Temperature, Concrete, Different aggregates, Pull-Out

ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 3.1. Maksimum tane büyüklüğü 8 mm olan agreganın granülometrisi.....	16
Şekil 3.2. Maksimum tane büyüklüğü 16 mm olan agreganın granülometrisi.....	17
Şekil 3.3. Maksimum tane büyüklüğü 32 mm olan agreganın granülometrisi.....	17
Şekil 3.4. Agreganın Çimento hamuru geçiş bölgesinin mikro yapısı.....	29
Şekil 3.5. Agreganın Çimento hamurunun şematik görüntüsü	30
Şekil 3.6. (380mm) boyutlu kare kolonda sıcaklık dağılımı	43
Şekil 3.7. Yangında hasar görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri	44
Şekil 3.8. Betonda sıcaklık deformasyon özellikleri.....	44
Şekil 3.9. Çeşitli betonlar için ısı yayılım katsayısı	45
Şekil 3.10. Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi	47
Şekil 3.11. Betonun basınç dayanımını yükleme durumuna göre sıcaklıkla değişimi.....	49
Şekil 3.12. Basınç dayanımının soğutma şekline göre sıcaklıkla değişimi.....	49
Şekil 3.13. Puzolan katkılı ve katkısız betonların çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi....	50
Şekil 3.14. Betonun eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi	51
Şekil 3.15. Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi.....	51
Şekil 3.16. Farklı beton numuneleri için sıcaklık elastisite modülü ilişkisi.....	52
Şekil 4.1. Pomza agregasının granülometrisi.....	54
Şekil 4.2. Kireçtaşı agregasının granülometrisi	54
Şekil 4.3. Kırmataş agregasının granülometrisi	55
Şekil 4.4. Dere agregasının granülometrisi.....	55
Şekil 5.1. 10x10x10 numunelerin ultrases geçiş hızı – sıcaklık grafiği.....	64
Şekil 5.2. 15x15x15 numunelerin ultrases geçiş hızı – sıcaklık grafiği.....	65
Şekil 5.3. 10x10x10 numunelerin basınç dayanımı - sıcaklık grafiği.....	66
Şekil 5.4. 15x15x15 numunelerin basınç dayanımı - sıcaklık grafiği.....	66
Şekil 5.5. Pomza agregası ile üretilen beton numunelerinin boyutlarının karşılaştırılması	67
Şekil 5.6. Kireçtaşı agregası ile üretilen beton numunelerinin boyutlarının karşılaştırılması....	68
Şekil 5.7. Dere agregası ile üretilen beton numunelerinin boyutlarının karşılaştırılması	68
Şekil 5.8. Kırmataş agregası ile üretilen beton numunelerinin boyutlarının karşılaştırılması ...	68
Şekil 5.9. Aderans dayanımı – sıcaklık grafiği	69

TABLULAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1. Silis Dumanının İncelik Değerinin Karşılaştırılması	26
Tablo 3.2. Ultrasonik test yöntemi ile beton kalitesinin değerlendirilmesi.....	37
Tablo 4.1. Deneyde kullanılan iri agregaların fiziksel özellikleri	53
Tablo 4.2. Deneyde kullanılan çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	56
Tablo 4.3. Yayılma sınıfları.....	60
Tablo 4.4. Sertleşmiş Betonun Bazı Fiziksel Özellikleri	63

FOTOĞRAFLAR LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Fotoğraf 4.1 Deneyde kullanılan agregalar.....	53
Fotoğraf 4.2. Numune Kalıpları	56
Fotoğraf 4.3. Numuneler.....	57
Fotoğraf 4.4. Yüksek Sıcaklık Fırını	58
Fotoğraf 4.5. Etüv (Kurutma Fırını)	58
Fotoğraf 4.6. Yayılma Tablası Deney Elemanları.....	59
Fotoğraf 4.7. Basınç Dayanımı Test Aleti	60
Fotoğraf 4.8. Çekme Makinesi	61
Fotoğraf 4.9. Bazı Numunelerin Deney Sonrası Durumları	62
Fotoğraf 4.10. Ultrasonik Test Aleti.....	62

SEMBOLLER LİSTESİ

- I_m** : İncelik modülü,
Δ : Birim ağırlığı,
δ : Özgül Ağırlık,
σ : Betonun basınç dayanımı,
P : Numunenin kırılmasına yol açan maksimum yük miktarı,
A : Numunenin kesit alanı,
W₁ : Agregaya numune ağırlığı,
W₂ : Su ile dolu ölçü kabı ağırlığı,
W₃ : İçine agregaya numunesi konmuş, su dolu kabın ağırlığı,
k : Kompozite,
p : Porozite,
H : Hacimsel katsayı
E : Elastisite Modülü
D : Yoğunluk
V : Ses üstü dalga hızı, m/s
S : Beton bloğun ses üstü dalga gönderilen yüzey ile dalganın alındığı yüzey arasındaki mesafe, metre
t : Ses üstü dalganın göndermiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman, mikro saniye
σ_ç : Betonun çekme dayanımı
L : Silindir numunenin boyu
D : Silindir numunenin çapı
σ_e : Eğilme dayanımı
M : Maksimum moment
c : Tarafsız eksen ile kiriş yüksekliğinin en uç noktası arasındaki uzaklık
d : Kiriş kesitinin yüksekliği
b : Kiriş kesitinin eni
I : Atalet momenti
τ : Aderans dayanımı
Φ : Donatı çapı
l : Aderans boyu

1. GİRİŞ

Beton, uzun yıllardan beri inşaat sektöründe en önemli yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Beton hammaddesinin doğada bol miktarda bulunması, kolayca istenilen şekli alabilmesi, uzun yıllar hizmet vermesi, dayanıklılık ve ekonomik olarak çok uygun malzeme olması açısından vazgeçilmez bir yapı malzemesidir. Dünya nüfusunun hızla artması ve inşaat teknolojisinin büyük bir hızla gelişmesi ile, başta konutlar olmak üzere, fabrikalar, köprüler, barajlar, yollar ve buna benzer birçok yapılarda beton kullanılması, bu malzemenin önemini daha da artırmaktadır. Çimentonun bulunmasından sonra inşaat teknolojisi uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaya başlanan beton ilginç bir malzemedir. Hazırlandığı andaki plastik kıvamı nedeni ile istenilen şekle girdiğinden modern mimarinin gelişmesinde çok önemli olmuştur.

Beton; çimento, agrega, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasıyla elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidratasyonu sonucu katılaşmış sertleşen yapı malzemesidir [1]. Betonun yapısını oluşturan malzemelerin sahip oldukları özellikler ile bunların birbirlerine olan oranları, betonun kalitesi ve verimine etki etmektedir [2,3].

Agrega, beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı madde yardımı ile bir araya getirilen, organik olmayan, kum, çakıl, kırma taş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın cürufu, genleştirilmiş perlit, genleştirilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemedir [4]. Agreganın beton yapımında ekonomik ve teknik yönden çok önemli bir konumu bulunmaktadır. Agreganın maliyeti çimentoya göre oldukça düşük olduğundan, agrega betonda kullanılan ve oldukça ucuz olan bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmektedir. Betonda agrega kullanılması, sertleşen betonun hacim değişikliğini önlemekte veya azaltmakta, çevre etkilerine karşı betonun dayanıklılığını artırmakta ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonda gerekli dayanımın sağlanmasına yardımcı olabilmektedir. Agreganın kaba ve ince agrega olarak iki kısımda incelenebilir. Şantiyelerde kaba agrega "mıcır" yada "çakıl", ince agrega "kum" olarak isimlendirilir. Bu iki bileşeni tane büyüklüğü olarak birbirinden ayırmak için kullanılan kriter 4 mm boyutudur. 4 mm den iri boyuttaki tanelerden oluşan kısma kaba agrega, 4 mm den küçük boyuttaki kısma ince agrega denir [5].

Beton hacminin % 60-80'ini agregaya bileşeni meydana getirdiği için, seçiminde titizlik gösterilmesi gerekmektedir. Agregaya, gereken mukavemete sahip olmalı ve dış etkenlere dayanabilmelidir. Agreganın fiziki ve mekanik özellikleri istenilen şartları karşılayabilecek nitelikte olmalıdır. Aşınmaya maruz kalacak bir betonun agregası yeterli aşınma mukavemetine sahip olmalıdır. Don yapan iklimlerde kullanılacak betonun agregası ise dayanıklılık bakımından don etkisi için konmuş olan standartları karşılamalıdır[6].

Agrega bileşeninin uygun bir tane boyu dağılımı (granülometri) göstermesi çok önemlidir, iyi bir granülometriye sahip agregaya içindeki hava boşluğu, daha az olacaktır. Dolayısıyla, yoğunluğu da artacaktır. Bu şekilde, toplam beton hacmi içinde çimento-su harcı daha ekonomik olarak kullanılabilir ve beton istenilen yere kolaylıkla, kalitesi bozulmadan yerleştirilebilir.

Betonda agregaya kullanılmasının sağladığı teknik özelliklerin başında; sertleşen betonun "hacim değişikliğini" önlemesi veya azaltması, sertleşmiş betonun "aşınmaya karşı" dayanımını artırması, çevre etkilerine karşı "dayanıklılığını" artırması ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonun taşımakta olduğu yüklerle karşı gerekli "dayanımı" sağlayabilmesi gelir. İçerisinde agregaya bulunmayan bir sisteme göre çok daha az hacim değişikliği (büzülme) gösterir. Yani, çimento hamurunun zamanla kuruması nedeniyle yapacağı büzülme ve meydana gelebilecek çatlamlar agregaya tarafından belirli bir ölçüde engellenmiş veya sınırlandırılmış olur[7].

Beton, agregaya, çimento ve sudan oluşan kompozit bir malzemedir. Bu yüzden agreganın tipi ve özellikleri, yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun özellikleri üzerinde önemli rol oynar. Farklı agregalara sahip betonların mukavemet verimleri, yüksek sıcaklıklarda aynı değildir[8,9]. Bu durum agregaların mineral yapısı ile yorumlanır.

Silisyum agregalarındaki quartz, poliyformolojik olarak hacimsel genişleme ile 570 °C de değişir ve sonuçta hasara yol açar. Kalker ve dolomitten oluşan agregalar 700°C ye kadar kararlıdır[10]. 800-900° C' derece sıcaklıklarda kalker ve dolomitten oluşan agregaların (CaCO₃), CaO ve MgO' ya dönüşüm söz konusudur [11]. CaO oluşumu ile hacim değişimine sebep olup, tahrip eder, yıkar. Pomza, köpük, cüruf ve geliştirilmiş kil ürünleri gibi hafif agregaların yangın dirençleri yüksektir. Hafif agregalardan üretilmiş betonların ısı iletkenliği düşüktür [12]. Granit ve bazalt gibi volkanik kayalar ise 1000° C'ye kadar kararlı yapıda kalabilmektedirler. Ancak sıcaklığın aniden artması ve azalması parçalanmalara neden olabilir [13].

Beton bir bütün olarak düşünülduğünde, genellikle içindeki bileşenlerin termal genleşmelerinin birbirinden farklı olduğu bilinir. Bu nedenle betonda sıcaklık değişimleri, içindeki bileşenlerde birbirinden farklı hacim değişmelerine, çatlak oluşumuna ve beton dayanıklılığının azalmasına neden olur. Bu olay “**betondaki bileşenlerin termal uyumsuzluğu**” olarak bilinmektedir [14,15].

Yapının durabilite (**dayanıklılık**) problemine yol açan başlıca fiziksel etkilerden birisi de yüksek sıcaklıktır. Bu etki, yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına, can ve mal kaybına neden olabilmektedir [16]. Örneğin Danimarkada bulunan Great Belt tüneline ve Channel tüneline, 1994 ve 1996 yıllarında çıkan yangınlarda, yüksek sıcaklık etkisi ile betonda meydana gelen patlama ve parça atma nedeni ile beton kesitindeki azalmalar ağır hasarlara neden olmuştu. 2001 yılında Eylül ayında ABD’de New York’ta meydana gelen trajik olayda iki kulenin yıkılışındaki ana sebep yangındı. Bu olay , inşaat malzemelerinin ateşe olan direncinin ne kadar önemli olduğunu ortaya koydu ve çok sayıda can ve mal kaybına yol açmıştır [17,18,19].

Yüksek sıcaklığın betonarme yapılarına etkisi 1922 den beri günümüze kadar araştırılan bir konudur. Önceki araştırmalardan biliyoruz ki beton, yüksek sıcaklıkların etkisi altında patlayabilir. Bu patlama, yangın esnasında ortaya çıkan diğer zararlı proses’lere katkı yapar, onları tetikler. Yapılan araştırmalarda malzemenin yangın sırasında ve sonrasında malzemenin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğü açısından anlaşılmaya çalışılmıştır [20]. Bundan 10 yıl öncesine kadarki çalışmalar, yüksek sıcaklığın “normal dayanımlı betona” etkileri üzerinde odaklanılmıştı [21]. Ancak günümüzde modern yapılarda, endüstri yapılarında, tünellerde veya özel hizmet amaçlı inşa edilen yapılarda kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile “yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı beton” kullanılmaya başlanmıştır. Bunun sebebi, ekonomik, mimari ve yapısal avantajları olmasıdır. Yüksek dayanımlı beton, normal mukavemetli betonla kıyaslandığında avantajlı olduğu görülür. Yüksek dayanımlı betonun inşaatlarda kullanılmalarının en önemli kullanım sebeplerinden birisi, kiriş ve kolonlardan oluşan yapı çatısının yapılmasıdır. Uygun yangın emniyet ölçümlerinin tedariki, inşaatın tasarımında gerekli olan unsurdur. Yüksek dayanımlı beton kullanımının artması ile, yangında böyle bir beton özelliği ilgi çekti. Bu betonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı iyi bilinmelidir. Çünkü bu betonların boşluk oranı düşük, daha yoğun yapıda olduğu için, yüksek sıcaklık etkisinde performansı normal dayanımlı betona göre daha düşüktür [22].

Sonuç olarak yükselen sıcaklıklar ve yangın, binaların fonksiyonel ve estetik olarak bozulmalarına sebep olur. Estetik zarar, genellikle kolayca tamir olur. Ama fonksiyonel değer kayıpları daha derindir ve şiddetine göre kısmi veya toplam tamir yapmayı gerekli kılabilir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Gustaferro vd [23]., hafif, yalıtkan betonların yangın dayanımları ile ilgili olarak deneysel bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada 500-1600 kg/m³ lük birim ağırlığa sahip betonların yangın dayanımı incelenmiş; numunelerin nem içeriği ve bağıl rutubet arasındaki ilişkiler belirtilmiştir. Deney programında boşluklu hafif beton, perlit betonları, vermikülit betonları kullanılmıştır. Döşeme kalınlığı ile yangın dayanımı arasındaki ilişki değişik birim ağırlığa sahip betonlar için incelenmiştir. Çalışmanın en önemli sonucu olarak, birim ağırlıktaki artışın her beton türü için yangın dayanımında azalmaya sebep olduğu gösterilmiştir.

Zoldners ve Wilson [24]., yaptıkları çalışmada, genişmiş şist ve cüruf agregaları kullanarak hazırladıkları beton karışımlarını yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakmışlardır. Bazı karışımlarda çimento yerine %25-40 arasında oranlarda uçucu kül, silis dumanı, şist külü gibi mikrofiller malzeme kullanılarak bu malzemelerin beton davranışına etkisi incelenmiştir. Numuneler fırında oda sıcaklığından 1000 °C ye kadar sıcaklıklara ısıtılmış, sonra kendiliğinden soğumaya bırakılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda farklı sıcaklık etkilerinde, tam hafif betonların yarı hafif betonlara göre daha iyi dayanım gösterdiği, yüksek fırın cürufu kullanılmasının yangın etkilerinde bir avantaj sağlamayıp aksine betonun eğilme mukavemetini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca portland çimentosu yerine mikro filler malzeme kullanımının 500 °C ye kadar hafif betonun ısı dayanımını iyileştirdiği, silis dumanının basınç mukavemetinde %20, eğilme mukavemetinde %10 artış sağlayarak en belirgin iyileştirmeye sebep olduğu bildirilmiştir.

Ataman [25]., yaptığı çalışmada, yangın etkisinde kalan betonun mekanik özelliklerini belirleyebilmek, yüksek sıcaklığın ve soğutma türlerinin betonun eğilme ve basınç mukavemetleri üzerindeki etkilerini incelemiştir. Agregaların genişmesi, çimentonun büzülmesi, beton boşluklarındaki ve çimento birleşimindeki suyun dehidratasyonu gibi fiziksel ve kimyasal olaylar sonucu beton mukavemetinin azaldığı tespit edilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde kalan betonun hava ve su ortamlarında soğutulmaları sonucu elde edilen mukavemetlerdeki azalmaların, su ortamında soğutulanlarda daha küçük olduğu ifade edilmiş ve bu durum beton numunelerinin su içerisinde iken yeniden hidratasyon yapabilecek ortamı bulması ve bunun sonucunda mukavemetin bir kısmının geri kazanılmasıyla açıklanmıştır.

Kristensen ve Hansen [26]., yangın etkisi veya ısıl şoktan dolayı çimento hamuru ve beton örneklerinde oluşan çatlakları incelediği çalışma iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, numunelerde çatlak oluşmasının beklendiği, hesaplanan değerler ile deneysel olarak çatlakların gözle görülebildiği sıcaklık değerleri arasındaki ilişki incelenmiş, ikinci bölümde ise 0°C - 900C, 0°C - 800C, 0°C - 700C ve 0°C - 500C'ye kadar ısıtarak ultrasonik dalga hızı ölçümlerinde oluşan değişiklikler belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar ve hesaplamalara dayanarak çimento hamuru numunelerinde 300°C sıcaklıkta çatlaklar gözle görüldüğünü, beton numunelerinde ise 500 °C sıcaklıkta iç çatlakların oluştuğu belirtilmiştir.

Saad vd [27]., normal portland çimentosu yerine ağırlıkça %10, %20, %30 oranlarında silis dumanı içeren betonların mekanik ve fiziksel özelliklerine yüksek sıcaklıkların etkisini incelemişlerdir. Numuneler her bir inceleme için 20 - 600°C arası sıcaklıklarda 100°C aralıklarla üçer saat fırında bekletilmiştir. Isı yükseltme işlemi tamamlandıktan sonra numuneler deneylerin yapılacağı koşul olan oda sıcaklığına soğutulmuştur. %10 silis dumanı içeren beton numunelerin bütün sıcaklıklarda daha düşük porozite ve en yüksek basınç mukavemeti değerlerine sahip oldukları, 600 °C ye ısıtılan betonda basınç mukavemetlerinin normal betona göre %64,6 daha fazla olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte %20-30 arasında silis dumanı içeren betonların 600 °C ye ısıtıldığında normal portland çimentosu ile yapılan betonlara göre mukavemetlerindeki artışın sadece %28 olduğu bildirilmiştir.

Lin vd [28]., tarafından yapılan çalışmada laboratuvar şartlarında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılarak soğutulan veya arazide yangın görmüş binalardan alınan örnekler üzerinde stereo mikroskop ölçümleri yapılarak ve SEM fotoğrafları kullanılarak, yüksek sıcaklıklara maruz kalmış betonların mikro yapıları incelenmiştir. Isıtma süresince çatlama ve parçalanmalar ve soğutma esnasındaki dağılmalar yangın esnasında betonda gözlenen yaygın davranışlar olarak ifade edilmiştir. Çalışmada portland çimentosu ve silis agregası kullanılarak üretilen standart silindir numuneler 20 °C, 100 °C, 250 °C, 400 °C, 550 °C, 750 °C ve 900 °C yüksek sıcaklık etkilerine maruz bırakılmıştır. SEM ve polarize ışık mikroskobu deneylerinde, ince çatlaklar hariç, 300°C sıcaklığın altında çatlak gelişimleri gözlenmediği bu sıcaklığın altında betonda bölgesel bağ çatlaklarının belirgin olduğu belirtilmiştir. 300 °C-500 °C arasındaki sıcaklıklarda agrega parçacıklarının bağlarında ve ara yüzeylerde çatlaklar gözle görüldüğü, 500 °C nin üstünde ise çimento hamuru ile agrega parçacıkları arasında çok önemli çatlaklar oluştuğu bildirilmiştir. Yangında zarar görmüş

betonların tamir edilmesinin pratikte bir mühendislik problemi olduğu, bu sebeple tamirde yeni tekniklerin geliştirilmesi için çalışmalar yapılması gerektiği vurgulanmıştır.

Karaca vd [29]., hafif betonun yangın dayanımını incelemek için hazırladıkları prizmatik numuneleri 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C, 1000 °C ve 1200 °C sıcaklık etkilerine bırakmışlardır. Çalışmanın neticesinde, yüksek sıcaklık etkisine bırakılan hafif betonların eğilme mukavemetlerinin tanık numunelerinkine göre, sıcaklık arttıkça azaldığı ancak bu azalmanın normal betonunkilerden daha az olduğu belirtilmiştir. 600 °Cden sonraki sıcaklıklarda havada soğutulan numunelerin mukavemetlerinin son derece azaldığı, suda soğutulan numunelerin ise ayrışarak dağıldığı ve 1000 °C ve daha yüksek sıcaklık etkisinden sonra havada ve suda soğutulan numunelerin basınç mukavemetlerinin son derece düşük olduğu ifade edilmiştir. Betonların yangın dayanımlarının; üretimlerinde kullanılan agrega, petrografik yapı ve mineralojik birleşimiyle yangın söndürme yönteminden bağımsız olamayacağı vurgulanmıştır.

Phan ve Carino [30]., yüksek sıcaklık etkilerinde, yüksek mukavemetli betonların mekanik özelliklerini inceledikleri deneysel çalışmada, normal ağırlıklı, kalkerli ve silisli agregalar ve hafif agregalar kullanmışlardır. Bazı karışımlarda normal portland çimentosu, bazılarında da silis dumanı, uçucu kül, çelik lif gibi katkıları kullanılmıştır. Sıcaklıkların etkisiyle beraber yüksek mukavemetli betonların malzeme özelliklerinin normal mukavemetli betonlarıkinden farklılık gösterdiği ve bu farklılıkların 25 °C ile 400 °C arasında daha belirgin olduğu belirtilmiştir. Bu aralıkta yüksek mukavemetli betonlar normal mukavemetli betonlara göre daha hızlı bir mukavemet kaybı göstermiştir. 300 °C sıcaklık değeri bütün betonlar için elastisite modülünün daha yüksek hızlarda düşmeye başladığı değer olarak bildirilmiştir. Hafif agrega betonlarının normal ağırlıklı betonlara göre orijinal elastisite modüllerinin daha büyük bir oranını muhafaza ettikleri de belirtilmiştir.

Chan vd [31]., basınç dayanımları 39 MPa, 76 MPa ve 94 MPa olan normal ve yüksek dayanımlı betonları 1200 °C'ye kadar ısıtarak, bu sıcaklıklarda 1 saat süreyle bekletmiş ve oda sıcaklığına kadar soğuttuktan sonra basınç ve çekme mukavemetlerini belirlemişlerdir. Çalışmada ayrıca normal ve yüksek dayanımlı betonların gözenek yapıları da incelenmiştir. Deney sonuçlarında yüksek sıcaklıkların etkisi 20 °C – 400 °C, 400 °C - 800 °C ve 800 °C üzeri olmak üzere üç aralıkta belirtilmiştir. İlk aralıkta normal dayanımlı betonların aksine yüksek dayanımlı betonların mukavemetlerini koruduğu, ikinci aralıkta özellikle 600 °C'nin üzerinde her iki betonunda da mukavemetlerinin önemli kısmını

kaybettiği vurgulanmıştır. 800 °C üzerinde ise her iki betonunda mukavemetinin çok az bir kısmı kalmıştır. Normal betona benzer olarak YDB da çekme mukavemetindeki azalma basınç mukavemetine göre çok daha keskindir. Yüksek sıcaklıkların etkisiyle gözenek yapısında irileşme etkisi ortaya çıktığı ve bunun da betonun durabilitesini azalttığı ifade edilmiştir.

Lawson vd [32]., çalışmasında yüksek sıcaklıklara maruz kalan yüksek dayanımlı betonların mekanik özelliklerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Yüksek sıcaklık etkisinden önce basınç mukavemetleri 40-100 MPa arasında değişen betonların üç grubu yüksek dayanımlı, biri ise normal dayanımlı kontrol grubudur. Numuneler ısıtılmadan önce her beton grubu için fiziksel boyutlar, kütle ve boyuna titreşim frekansları ölçülmüştür. Çalışmada belirlenen 100°C, 200°C, 300°C ve 450°C sıcaklıklara 5 °C/dak artış hızı ile ulaşılmıştır. Isıtma işleminden sonra numuneler fırında oda sıcaklığına kadar soğutulmuş ve tartılarak tekrar boyuna titreşim frekansı ölçülmüştür. Her numunenin basınç mukavemeti ve dinamik elastisite modülü belirlenmiştir. Çalışmada 240 °C - 280 °C arasında silis dumanı içeren iki farklı grup yüksek dayanımlı betonun patlayarak parçalandığı ancak silis dumanı içermeyen diğer karışımda patlama olayına rastlanmadığı belirtilmiştir. Patlayarak parçalanma olayının doğrudan sudaki kimyasal bağların açılması anında meydana gelen iç basıncın etkisiyle olduğu ifade edilmiştir.

Luo vd [33]., yaptıkları çalışmada 800 °C ve 1100 °C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonra kademeli ve ani olarak soğutulmuş yüksek dayanımlı ve normal betonların davranışlarını incelemiştir. Hedef sıcaklığa kadar ısıtılan numuneler bu sıcaklıklarda 1 saat süreyle bekletildikten sonra oda sıcaklığına kadar havada yavaş yavaş ve suda aniden olmak üzere iki farklı şekilde soğutulmuştur. YDB'ların basınç mukavemetlerinde normal betona kıyasla daha keskin bir azalma belirlenmiştir. YDB 800 °C'de, yavaş yavaş ve ani soğutma için sırasıyla başlangıç mukavemetinin %26-34 ve %22-28 ini koruyabilmiştir. Bu değerler 1100 °C için ise %8-12 ve %8-10 dur. Bununla beraber ani soğutmaya oluşan termal şokun betonun parçalanarak bozulmasında belirgin bir artışa sebep olmadığı bildirilmiştir.

Kalifa vd [34]., tarafından yapılan çalışmada; kalker agregası kullanılarak üretilen C30 ve C100 betonları, patlayarak parçalanmanın görülebileceği aralık olan 450 °C, 600 °C ve 800°C sıcaklıklara maruz bırakılmış ve numunelerin farklı yüzeylerinde basınç ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Her iki beton grubunun da benzer termal özellikler

gösterdiği ve gözenek basınç eğrilerinin benzer şekilde pik değerler yaptığı belirtilmiştir. Bu pik noktalar C100 de 38 bar C30 da ise 18 bar olarak ölçülmüştür.

Poon vd [35]., silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren yüksek mukavemetli betonların 800 °C'ye kadar olan yüksek sıcaklıklarda mukavemet ve durabilite performanslarını karşılaştırmışlardır. 600 °C'nin altındaki sıcaklıklarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren betonların sadece çimento ile üretilen kontrol gruplarına kıyasla en iyi sonucu verdiği görülmüştür. Yüksek mukavemetli betonların yüksek sıcaklıklarda normal betonlarınkine benzer bir mukavemet azalması gösterdiği ancak arta kalan mukavemetlerinin göreceli olarak çok daha fazla olduğu belirtilmiştir.

Jonatka ve Bagel [36]., 800 °C'ye kadar sıcaklıkların betonun mukavemet karakteristikleri, boşluk yapısı ve hesaplanan geçirimsizlik katsayısına etkilerini deneysel olarak incelenmişlerdir. Çalışma sonucunda 400 °C'ye kadar olan sıcaklıkların, test edilen numunelerin elastisite modülü, mukavemet, ortalama boşluk çapı ve hesaplanan geçirimsizlik katsayıları üzerinde çok belirgin değişikliğe sebep olmadığı görülmüştür. 400 °C – 800 °C aralığında boşluk yapısının irileşmesiyle mukavemet azalmıştır. Betonun yapısal bütünlüğünün bozulmasının ise 800 °C'de gerçekleştiği belirtilmiştir.

Bingöl ve Gül [37]., yaptıkları çalışmada normal agrega yerine %25, %50, %75 ve %100 oranlarında pomza kullanmak yoluyla hafif betonlar üreterek 750 °C'ye kadar ısıtmış ve hafif betonların yüksek sıcaklık etkilerinden sonra dayanımını normal betonunki ile karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Sıcaklık artışıyla beraber bütün beton gruplarının başlangıç mukavemetlerinin bir kısmını kaybettiği ancak kullanılan hafif agrega oranının artmasıyla mukavemetlerdeki kayıp oranlarının azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklıklara maruz kalma süresi de çalışmanın parametrelerinden birisi olarak belirlenmiş ancak ısıtma süresinin mukavemet kaybı üzerinde çok belirgin bir etki göstermediği, ısıtılan sıcaklığın mukavemet kayıplarında daha önemli rol oynadığı belirtilmiştir.

Chen ve Liu [38]., yüksek dayanımlı ve lifli yüksek dayanımlı betonların yüksek sıcaklık etkilerinden sonra arta kalan mukavemetlerini incelemişlerdir. Hazırladıkları numuneleri 20 °C, 200°C, 400 °C, 600 °C ve 800 °C sıcaklıklara üçer saat süreyle maruz bırakmışlardır. Numuneler doğal yolla oda sıcaklığına soğutularak basınç mukavemeti ve çekme mukavemeti belirlenmiştir. YDB'da yüksek sıcaklıklarda patlayarak parçalanma görülmüştür. Karbon ve çelik lif kullanımının patlama zamanını geciktirdiği, polipropilen lifin ise bu olayı ortadan kaldırdığı belirtilmiştir. Lifli YDB'ların arta kalan basınç ve çekme mukavemetlerinin lifsiz YDB'larınkinden daha fazla olduğu belirlenmiştir. Yüksek

erime noktalı (karbon veya çelik gibi) liflerin düşük erime noktalı (polipropilen gibi) lifler ile karıştırılarak kullanılmasının YDB'ların yüksek sıcaklık etkilerinden sonraki özellikleri üzerinde belirgin iyileştirici katkı sağladığı vurgulanmıştır.

Li vd [39]., C40, C60 ve C70 betonlarının yüksek sıcaklık etkilerinden sonra basınç, çekme ve eğilme mukavemetlerini incelemiştir. Üretilen numuneler 200 °C, 400 °C, 600 °C, 800 °C ve 1000 °C sıcaklıklara kadar ısıtılmış, hedef sıcaklığa ulaşıldığında fırın kapatılarak numuneler oda sıcaklığına soğutulmuştur. Bahsedilen sıcaklıklarda C70 betonu başlangıç basınç mukavemetinin sırasıyla %82,3, %62,3, %58,1 ve %27,3'ünü koruyabilmiştir. Numune boyutu arttıkça mukavemetteki kaybın daha az olduğu da belirtilmiştir. Ayrıca 800 °C üzerinde betonun su içeriğinin basınç mukavemeti üzerinde çok etkisi olmadığı ifade edilmiştir.

Sava vd [40]., farklı oranlarda puzolanik malzeme içeren betonların yüksek sıcaklık etkilerinden sonra mekanik özelliklerini tahribatsız deney metotları ile belirlemişlerdir. Kireç taşı ve silis agregaları kullanılarak üretilen numuneler 100 °C, 300 °C, 600 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Çalışma sonuçları betonun arta kalan özelliklerinin agrega ve binder türü ile çok ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. 300 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda puzolanik malzeme kullanılarak üretilen betonların sadece portland çimentosu ile üretilenlere oranla daha iyi sonuç verdiğini ancak sonraki sıcaklıklarda bu betonların daha hassas olduğu belirtilmiştir. 100 °C – 300 °C arasında bütün karışımlarda başlangıç mukavemetine göre bir miktar artış olduğu ve bu artışın silis agregalı betonlarda daha fazla olduğu, 300 °C-750 °C aralığının ise betonda mukavemet kaybı için kritik değerler olduğu bildirilmiştir. Her sıcaklıkta elastisite modülünde düşüş görülmüş ve bu düşüşün kireçtaşı agregaları ile üretilen betonlarda daha fazla olduğu ifade edilmiştir.

Chang vd [41]., tarafından betonun 100 °C ile 800 °C arası sıcaklıklarda ısıtılmasından sonra arta kalan gerilme-deformasyon ilişkisinin belirlenmesi için deneysel bir çalışma yapılmıştır. Betonların başlangıç mukavemetleri 27 MPa ve 40 MPa olarak belirlenmiştir. Bütün numuneler silis agregası ile üretilmiştir. Çalışma sonucunda, yüksek sıcaklıkların etkisiyle en fazla kayıpların sırasıyla elastisite modülü, çekme mukavemeti ve basınç mukavemetinde görüldüğü belirtilmiştir. Ayrıca betonun başlangıç mukavemetinin, arta kalan basınç mukavemeti, elastisite modülü ve çekme mukavemeti oranı üzerinde çok belirgin bir etkisi olmadığı ifade edilmiştir.

Ariöz [42]., normal portland çimentosu, kırılmış kalker ve dere agregaları ile üretilen farklı beton karışımların 200 °C – 1200 °C arası yüksek sıcaklıklara maruz

bırakıldıktan sonra fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. 7x7x7 cm boyutlu küp numuneler 20 °C/dakika artış hızıyla hedef sıcaklıklara kadar ısıtılmış, bu sıcaklıklarda 2 saat süreyle bekletildikten sonra oda sıcaklığına soğutularak ağırlık kayıpları ve basınç mukavemetleri belirlenmiştir. Sıcaklığın 600 °C'ye ulaşmasıyla yüzey çatlaklarının görünür hale geldiği, 800 °C'de daha da arttığı, 1000 °C'de ise iyice arttığı görülmüştür. 1200 °C'de betonlar tamamen bozulmuştur. Betonların ağırlıklarının, sıcaklığın artmasıyla 800 °C'ye kadar kademeli olarak azaldığı bu sıcaklıktan itibaren ise çok keskin düşüşler gösterdiği belirtilmiştir. sıcaklığın etkisinin dere agregası ile üretilen betonlarda daha belirgin olduğu bunun sebebinin ise silis içeriği olabileceği belirtilmiştir.

Aydın ve Baradan [43]., tarafından pomza ve uçucu kül içeren çimento harçlarının yüksek sıcaklık etkilerinden sonra mekanik özellikleri incelenmiştir. Farklı miktarlarda uçucu kül içeren dört farklı karışım 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklara üç saat süreyle maruz bırakılmıştır. Pomza ile üretilen harçların 600 °C'ye kadar yüksek sıcaklıklara karşı iyi dayanım sergilediği ve bu sıcaklıkta basınç ve eğilme mukavemetlerindeki kayıpların sırasıyla %4 ve %32 olduğu belirtilmiştir. Ancak 900 °C'de mukavemette çok keskin düşüşler görülmüştür. Soğutma tekniğinin mukavemet kaybında etkili olduğu ve suda soğutulan numunelerin havada soğutulanlara kıyasla daha fazla mukavemet kaybettiği bildirilmiştir. Yüksek sıcaklıklara karşı en iyi sonuç %60 oranında uçucu kül kullanılan numunelerden elde edilmiştir.

Peng vd [44]., 200 °C – 800 °C arasında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmış lifli betonların soğutulması esnasında termal şokun betonların mekanik özelliklerine etkisi üzerine deneysel bir çalışma yapmışlardır. Doğal soğutma, 5 ile 60 dakika arasında değişen sürelerde su püskürtme ve su içinde tutma gibi farklı soğutma şekilleri uygulanmıştır. Su içinde tutma ve 30 dakikadan fazla sürelerde su püskürtme gibi hızlı soğutma tekniklerinin termal şoka sebep olduğu belirlenmiştir. Hızlı soğutma yöntemlerinin daha fazla hasara sebebiyet verdiği ve betonun basınç mukavemeti, çekme mukavemeti ve kırılma enerjisi özelliklerinde, doğal soğutmaya kıyasla daha fazla kayıplara yol açtığı belirtilmiştir. 30 dakika ve üzerinde su püskürtmenin suda bekletme ile eşdeğer hasara yol açtığı, ayrıca çelik ve polipropilen lif kullanımının hem mukavemet hem de kırılma enerjisi özelliklerine olumlu etki yaptığı açıklanmıştır.

Demirel ve Gönen [45]., yüksek sıcaklığın karbon lif takviyeli hafif betonda basınç dayanımları ve poroziteye etkisini incelemiştirlerdir. Hazırladıkları numuneleri 250, 500, 750 ve 1000°C sıcaklıklara maruz bırakarak betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini

gözlemlemişlerdir. Çalışmanın sonucunda, silis dumanı içeren serilerde basınç dayanımı kayıpları silis dumansız serilere göre daha yüksek çıkmıştır.Basınç dayanımı ile porozite arasındaki ilişkinin de 500 ve 750 ⁰C dışında yüksek olduğu açıklanmıştır.

3. GENEL BİLGİLER

3.1. Betonun Oluşturduğu Malzemeler

Beton; çimento, iri agrega, ince agrega ve suyun, kimyasal ve mineral katkı da ilâve edilerek veya edilmeden karıştırılmasıyla oluşturulan ve çimentonun hidratasyonu ile gerekli özelliğini kazanan yapı malzemesidir.

3.1.1. Agrega

Agrega, beton yapımında çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı madde yardımı ile bir araya getirilen, organik olmayan, kum, çakıl, kırma taş gibi doğal kaynaklı veya yüksek fırın cürufu, genişletilmiş perlit, genişletilmiş kil gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemelerdir[46].

Agreganın beton yapımında ekonomik ve teknik yönden çok önemli bir konumu bulunmaktadır. Agrega maliyeti çimentoya göre oldukça düşük olduğundan, agrega betonda kullanılan ve oldukça ucuz olan bir dolgu malzemesi olarak kabul edilmektedir. Betonda agrega kullanılması, sertleşen betonun hacim değişikliğini önlemekte veya azaltmakta, çevre etkilerine karşı betonun dayanıklılığını arttırmakta ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonda gerekli dayanımın sağlanmasına yardımcı olabilmektedir. Agrega, iri ve ince agrega olarak iki kısımda incelenebilir. Şantiyelerde iri agrega “**mıcır**” ya da “**çakıl**”, ince agrega “**kum**” olarak isimlendirilir. Bu iki bileşeni tane büyüklüğü olarak birbirinden ayırmak için kullanılan kriter 4 mm boyuttur. 4 mm den iri boyuttaki tanelerden oluşan kısma iri agrega, 4mm den küçük boyuttaki kısma ince agrega denir [47].

Beton hacminin %60-80’ini agrega bileşeni meydana getirdiği için, seçiminde titizlik gösterilmesi gerekmektedir. Agrega, gereken mukavemete sahip olmalı ve dış etkenlere dayanabilmelidir. Agreganın fiziki ve mekanik özellikleri istenilen şartları karşılayabilecek nitelikte olmalıdır. Aşınmaya maruz kalacak bir betonun agregası yeterli aşınma mukavemetine sahip olmalıdır. Don yapan iklimlerde kullanılacak betonun agregası ise dayanıklılık bakımından don etkisi için konmuş standartları karşılamalıdır[48].

Agrega bileşeninin uygun bir tane boyu dağılımı (**granülometri**) göstermesi çok önemlidir. İyi bir granülometriye sahip agrega içindeki hava boşluğu, daha az olacaktır.

Dolayısıyla, yoğunluğu da artacaktır. Bu şekilde, toplam beton hacmi içinde çimento-su harcı daha ekonomik olarak kullanılabilir ve beton istenilen yere kolaylıkla, kalitesi bozulmadan yerleştirilebilir.

Betonun sıkıştırılmasındaki kolaylık veya zorluğuna **işlenebilirlik** denir. “**Segregasyon**” diye tabir edilen husus betonda agrega ile harcın ayrışmasıdır. Ağır olan agrega aşağı kısımda kalırken ince harç ve su betonun üst kısmında toplanır. Dolayısı ile arzu edilen dayanıklılığa erişilemez.

Betonda agrega kullanılmasının sağladığı teknik özelliklerin başında; sertleşen betonun “**hacim değişikliği**” önlemesi veya azaltılması, sertleşmiş betonun “**aşınmaya karşı**” dayanımını artırması, çevre etkilerine karşı “**dayanıklılığını**” artırması ve kendi dayanım gücünün yüksekliği nedeniyle betonun taşımakta olduğu yüklere karşı gerekli “**dayanımı**” sağlayabilmesi gelir. İçerisinde agrega bulunmayan bir sisteme göre çok daha az hacim değişikliği (büzülme) gösterir. Yani, çimento hamurunun zamanla kuruması nedeniyle yapacağı büzülme ve meydana gelebilecek çatlamlar agrega tarafından belirli bir ölçüde engellenmiş veya sınırlandırılmış olur [49].

3.1.1.1. Agrega Çeşitleri ve Özellikleri

Agrega (Kum-Çakıl) : Doğal, yapay veya her iki cinsi yoğun mineral malzemesinin genellikle 100 mm ye kadar çeşitli büyüklüklerdeki kırılmamış ve/veya kırılmış tanelerinin bir yığındır.

Aşağıda agrega çeşitleri ve özellikleri hakkında temel tanımlar verilmektedir.

Doğal Agrega: Doğal taş agrega; teraslardan, nehirlerden, denizlerden, göllerden ve taş ocaklardan elde edilen kırılmış veya kırılmamış agregadır.

Yapay Agrega: Yüksek fırın cüruf taşı, izabe cürufu veya yüksek fırın cüruf kumu gibi sanayi ürünü olan kırılmış veya kırılmamış agregadır. (Yapay taş veya Yapay kum da denir.)

İri Agrega: 4 mm açıklıklı kare delikli elek üzerinde kalan agregadır.

Çakıl: Kırılmamış tanelerden meydana gelen iri agregadır.

Kırma Taş: Kırılmış tanelerden meydana gelen iri agregadır.

Kum: Kırılmamış tanelerden meydana gelen ince agregadır.

Kırma Kum: Kırılmış tanelerden meydana gelen ince agregadır. Çakılın kırılması ile elde edilir.

Karışık Agregâ: İnce ve iri agregâ karışımıdır.

Doğal Karışık Agregâ (Tuvenan Agregâ): Agregâ ocağından, kırıcıdan veya sanayiden doğrudan doğruya elde edilen karışık agregâdır. Maksimum tane büyüklüğünden büyük taneleri ayırmak için elenmiş agregâlara da doğal karışık agregâ denir.

Hazır Karışık Agregâ: İnce ve iri agregânın veya birkaç tane sınıfına ayrılmış bu agregâların belirli tane dağılımı (granülometri) sağlayacak şekilde beton yapımı sırasında yerinde birbirine karıştırılması ile meydana gelen agregâdır.

3.1.1.2. Agregânın Fiziksel Özellikleri

3.1.1.2.1. Granülometri

Agregâ granülometrisi taze haldeki betonda işlenebilme, sertleşmiş betonda mekanik dayanım, kompasite, geçirimsizlik, durabilite, rötre gibi özellikleri üzerinde etkilidir. Agregâ granülometrisi doluluk oranını arttıracak şekilde az boşluklu olmalıdır. Tek bir tane büyüklüğü kullanılması durumunda sağlanabilecek doluluk belli bir değerden fazla olamaz [50]. Aradaki boşlukları doldurmak için daha küçük taneler gereklidir. Ancak tane boyutları küçüldükçe toplam yüzey alanı artar ve bunun sonucu su ihtiyacı fazla olur. Agregâ granülometrisinin hangi değerler arasında olması gerektiği TS 706 EN 12620'de belirtilmiştir.

Agregânın maksimum tane boyutu da beton özelliklerini etkileyen bir faktördür. Maksimum tane çapının belirlenmesindeki ilk faktör betonun kullanılacağı yerdeki beton kalıp boyutları ve donatı sıklığıdır. Normal dayanımlı betonda verilen bir kıvam için maksimum agregâ boyutunun arttırılmasıyla, örneğin 12 mm'den 25 mm'ye çıkarılmasıyla su ihtiyacında azalma sağlanabilir. Ancak yüksek dayanımlı betonlarda maksimum tane çapının arttırılmasıyla sağlanan dayanım artışı, yan etkilerle kaybedilen dayanım kadar çok olmayabilir.

Maksimum tane boyutunun arttırılmasıyla agregâ çimento hamuru arasındaki ara yüzeyi büyür ve daha heterojen bir yapı oluşturur. Bunun sonucunda ise mikro çatlamlar artar.

Çeşitli kayaç çeşitlerinden elde edilen iri agregâlarda, küçük taneler büyük tanelere göre daha sağlamdır. Bunun sebebi tane boyutunun küçülmesiyle birlikte agregâ tanesi içindeki büyük boşlukların, mikro çatlaklar gibi iç kusurların, yumuşak mineral içeren

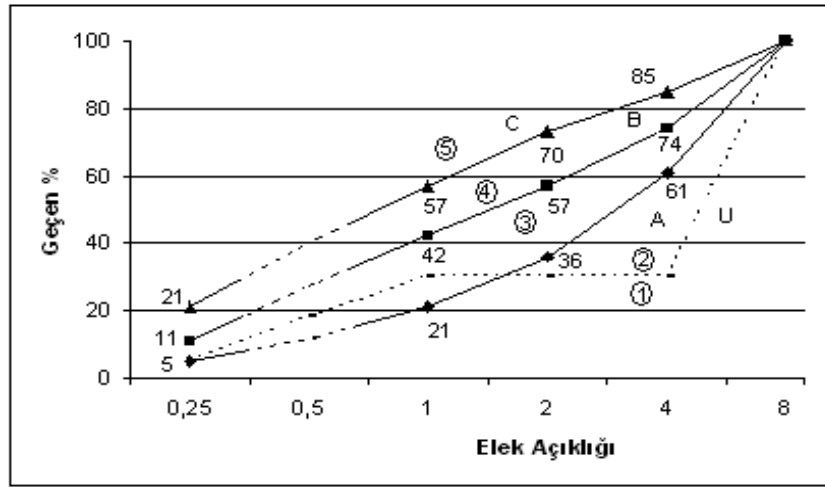
kısımların azalmış olmasıdır. Ayrıca genellikle kırma agregası kullanıldığı için kırılma işlemi sırasında iri agregada çatlak vb. kusurlar oluşabilir bu ise agregayı zayıflatır [51].

Bir agregası yığılmasında granülometri tanımlarda belirtilen elekler yardımıyla elde edilir. Elek analizi TS 3530 EN 933-1'e göre yapılır.

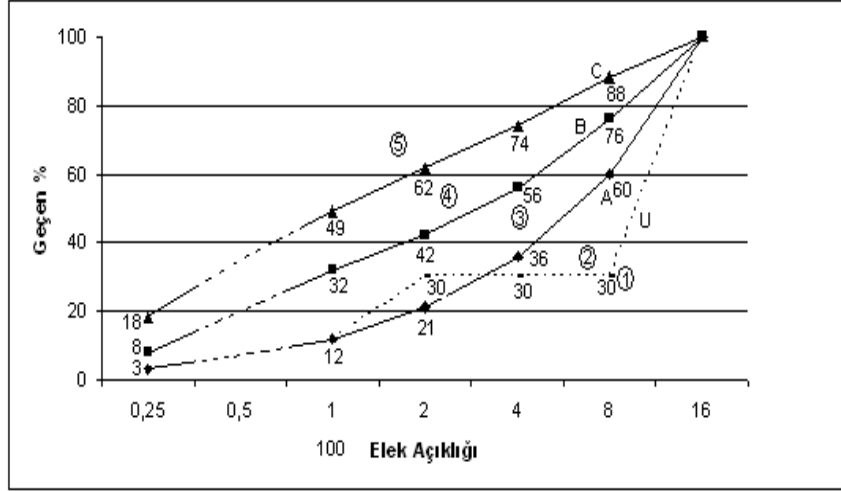
En büyük agregası boyutu ;

- betonarme yapılarda : 16-32 mm
- yol ve hava meydanlarında : 32-90 mm
- barajlarda : 90-250 mm olarak seçilebilir

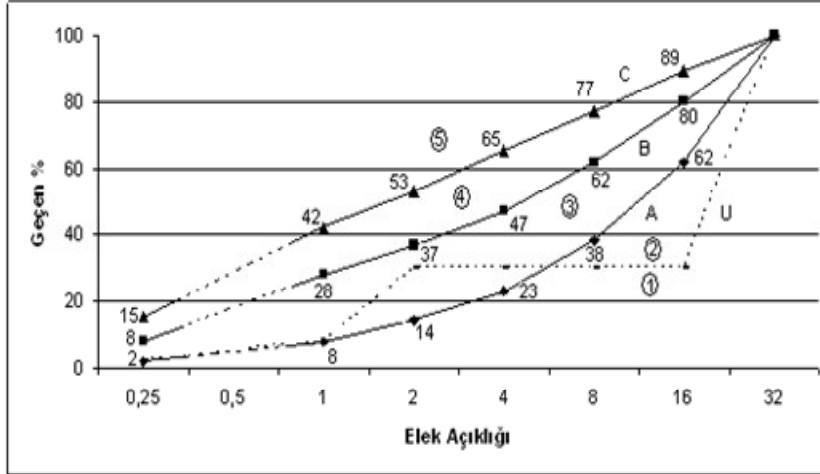
Beton üretiminde kullanılacak agregaların karışım granüle metresinin "ideal granülometri" ile uyuşmalı veya ideal bölgeler olarak adlandırılan bölgeler içinde kalmalıdır. TS 706 EN 12620'ye göre en büyük agregası boyutuna bağlı olarak kabul edilen referans eğrileri tanımlanır. A-B arası 'en iyi', B-C arası ise 'kullanılabilir' bölgelerdir. Öte yandan, granülometrisi A ve C eğrileri dışında kalan agregası, beton üretiminde kullanılmamalıdır.



Şekil 3.1. Maksimum tane büyüklüğü 8 mm olan agregası granülometri eğrisi[51]



Şekil 3.2. Maksimum tane büyüklüğü 16 mm olan agreganın granülometri eğrisi[51]



Şekil 3.3. Maksimum tane büyüklüğü 32 mm olan agreganın granülometri eğrisi[51]

Granülometrinin ideal bölgede kalmasıyla, doluluk (kompasite) oranı yükselir, boşluklar azalır, böylece boşlukları doldurmak için daha az çimento kullanılarak ekonomik çözüm elde edilir. Ayrıca betonda agreganın yüzeylerini ıslatmak için gerekli su da azalmış olur[51].

3.1.1.2.2. İncelik Modülü (I_m)

İncelik modülü (I_m), granülometrik bileşim hakkında bilgi veren sadece bir sayıdır. Bu modül, her bir eleğe karşı gelen ordinatların 100' den çıkarılıp, toplamının 100'e bölünmesiyle elde edilir. Böylece incelik modülü aşağıdaki formülden hesaplanır.

$$I_m = \frac{\Sigma (100 - p)}{100} \quad (3.1)$$

Aynı incelik modülüne sahip agregaların granülometri eğrileri farklı olabilir. Diğer bir deyişle farklı granülometri eğrilerine sahip agregaların incelik modülleri aynı çıkabilir. Bu nedenle herhangi bir agreganın granülometrisi hakkında kesin bilgi isteniyorsa, agreganın granülometri eğrisinin bilinmesi gerekmektedir [52].

3.1.1.2.3. Birim Ağırlık (Δ)

Birim Ağırlık (Δ), hacmi belli bir kaba doldurulan agreganın ağırlığının (p) kabın hacmine (V) oranıdır. Bu V hacmine agrega taneleri arasındaki boşluklar da dahildir. Böylece **birim hacim ağırlığı** aşağıdaki formülden hesaplanır;

$$\Delta = \frac{P}{V} \quad (3.2)$$

Küp veya küre hacmine yakın agregalarda birim ağırlık **1600-1800 kg/m³** ağırlığında olabilir. Kalker kökenli kırmataş agregalarında ise birim ağırlık **1300-1500 kg/m³** ağırlığında değişebilir. Eğer agrega taneleri kaba yerleştirilirken bir çubukla şişlenirse sıkışık birim hacim ağırlığı elde edilir. Beton üretiminde agregalar gevşek halde ölçülecekse birim ağırlığa gerek duyulur[52,53,54].

3.1.1.2.4. Özgül Ağırlık (δ_a)

Özgül ağırlık, agrega tanelerinin sahip olduğu mutlak birim hacmin ağırlığıdır. Kaplanan hacme agrega taneleri arasındaki boşluklar dahil değildir. Deney TS 3526' a göre yapılır. Özgül ağırlık (δ_a) aşağıdaki formülden hesaplanır;

$$\delta_a = \frac{W_1}{(W_1+W_2+W_3)} \quad (3.3)$$

Burada;

δ_a = Agreganın özgül ağırlığı,

W_1 = Numune ağırlığı,

W_2 = Su ile dolu ölçü kabı ağırlığı,

W_3 = İçine numune konmuş, su dolu kabın ağırlığıdır

Normal beton agregaların özgül ağırlıkları genellikle 2,5 – 2,9 kg/dm³ değerleri arasındadır. Beton karışım hesabını yapabilmek için üretimde kullanılacak agregaların özgül ağırlıklarını bilmek gerekir. Öte yandan bir agreganın özgül ağırlığı, elde edilen kayanın kökenine bağlıdır[52,53,55].

3.1.1.2.5. Tane Biçimi

Agregaların biçimi küp veya küreye yakın olmalıdır. Böylece agregalar arasındaki boşluklar en aza iner. Disk ve silindirik biçimli agregalar boşluk oluşturacağından sakıncalıdır; bunlar ağırlıkça %15'i aşmamalıdır.

Agrega tanesinde “**en büyük boyutun, en büyük boyuta oranı**” hacimsel katsayı (**H**) ise aşağıdaki bağıntıda ve şekilde görüldüğü gibi “n sayıda agreganın hacminin her bir agreganın en büyük boyutunu çap kabul eden kürelerin hacimleri toplamına oranı” olarak tanımlanır[52].

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\frac{\pi}{6} \sum_{l=1}^n (d_l)^3 \max} \quad (3.4)$$

3.1.1.2.6. Rutubet Durumları

Normal agregalar genel olarak % 0.5 – 2 oranında su emerler. Agregaların rutubet durumları 4 gruba ayrılır;

- **Tam kuru (fırın kurusu)** : Boşluklar tamamen sudan ayrılmıştır.
- **Hava kurusu**: Boşluklarda kısmen su vardır.
- **Yüzey kuru suya doymuş**: Bütün boşluklar su ile dolu, yüzey ise kurudur.
- **Islak**: Boşluklar su ile dolu yüzeyde ise serbest su vardır.

İnce agrega olarak kumun hacmi içerdiği rutubet miktarına bağlı olarak değişir. Belirli bir rutubet yüzdesi için kumun inceliği arttıkça kumun hacmindeki artış daha fazla olmaktadır. Agreganın özelliklerini belirlemek için yapılan deneylerde ve beton karışım hesaplarında agreganın yukarıdaki hallerden yüzey kuru suya doymuş (YKSD) durumu esas alınır. Bir şantiyedeki veya beton santralindeki agregaların mevcut su içeriği dikkate

alınarak, YKSD duruma göre bulunan beton bileşimleri için gerekli düzeltmeler yapılmalıdır [52].

3.1.1.2.7. Kompasite (k)

Herhangi bir agreganın birim ağırlığı ve özgül ağırlığının bilinmesi ile aynı zamanda bu agreganın kompasitesi yani birim hacmindeki tanelerin işgal ettiği gerçek hacim belirlenmiş olur. Çünkü agreganın kompasitesi (k);

$$k = \frac{\Delta}{\delta} \quad (3.5)$$

ifadesiyle hesaplanır. Birim ağırlık daima özgül ağırlıktan küçük olduğuna göre kompasite 1'den küçük değer alacaktır. Bu durumda yığın halindeki agreganın birim hacmindeki boşluk, kompasiteyi 1'e tamamlayacak değer olacaktır. Boşluk (porozite) p,

$$p=1-k \quad (3.6)$$

formülü ile hesaplanır[50,52,56].

3.1.1.3. Agreganın Mekanik Özellikleri

3.1.1.3.1. Tane Dayanımı

Yüksek dayanımlı beton elde etmek için mekanik dayanımı belirli değerlere ulaşan agregalara gereksinim vardır. Bu nedenle agregaların tane dayanımlarını da belirlemek gerekir.

Agreganın tane dayanımı, alındığı kayacın cinsi ve mevcut durumunun petrografik yönden incelenmesi ile yaklaşık olarak değerlendirilebilir. Eğer kullanılan agregası kırma taş ise; TS 706 EN 12620' ye göre taşın suya doygun haldeki küp basınç dayanımı veya çapı yüksekliğine eşit silindirik basınç dayanımı en az 1000 kgf/cm² (98N/mm²) ise mekanik özellikler ile ilgili başka bir incelemeye gerek olmaksızın yeterli olduğu kabul edilebilir. Basınç dayanımı 1000 kgf/cm² den küçük olması halinde ve kuşkulu durumlarda agregalarda aşınmaya dayanıklılık deney sonuçlarına bakılmalıdır. Eğer iri agregası olarak

çakıl kullanılıyorsa, bahsi geçen basınç deneyini yapmak mümkün olmayacağından, yine bu agregalar üzerinde aşınmaya dayanıklılık deneyleri uygulanarak çakılların sağlamlığı hakkında bilgi edinilir[52].

3.1.1.3.2. Aşınma Dayanımı

Yol ve hava meydanlarındaki beton çarpma ve aşınma etkisi altındadır. Betonun bu etkilere dayanabilmesi için yapımında kullanılan iri agreganın aşınmaya ve çarpmaya karşı büyük mukavemete sahip olması gerekir.

Basınç dayanımının 1000 kgf/cm^2 den az olması halinde, kuşkulu durumlarda veya yapay agregalarda aşınmaya dayanıklılık deneyleri sonuçlarına bakılır. Bilyalı Tanburla (Los angles aşınma cihazı) yapılan aşınmaya dayanıklılık tayini deneyinde 100 devir sonunda %50'den az, darbe ile aşınmaya dayanıklılık tayini deneyinde aşınmaya maruz beton yapımında kullanılacak agregalar için %30'dan, diğer agregalar için ağırlıkça %45'en az kayıp bulunmuş ise, agrega yeterli olarak kabul edilebilir[57].

Deneyler sonunda saptanan kayıpların bu değerlerden büyük olması halinde söz konusu agrega ile beton yeterlik deneyleri yapılmalıdır. Camsı agregalar, şistler, marnlı kireçtaşları, iri kristalli taşlar aşınmaya mukavemet gösteremezler. Özgül ağırlığı fazla ve sert olan taşların (bazalt) ise aşınmaya mukavemetleri yüksektir. Aşınmaya karşı mukavemetleri yüksek olan agregaların basınç mukavemetleri de yüksek olur.

3.1.1.3.3. Çarpma Dayanımı

Betonun çarpmaya dayanıklı olmasında, kullanılan agreganın önemli etkisi vardır. Bu nedenle kullanılmadan önce kontrol edilmelidir. Basınç deneyinden pek farklı olmayan çarpma deneyinde agrega çelik bir silindir içine yerleştirilir ve belirli bir mesafeden belirli bir ağırlık belirli sayıda düşürülmek suretiyle malzeme çarpma etkisi altında tutulur. Elekten elenmek suretiyle çarpma etkisi altında agreganın dayanıklılığı hakkında fikir edinilebilir [52].

3.1.2. Çimento

Çimento, su ve agrega ile birlikte betonu oluşturan temel malzemelerden biridir. Çimento su ile reaksiyon sonucu hem havada hem de su altında katılaştıkları ve sertleştikleri için bağlayıcılar olarak sınıflandırılmaktadır.

Yalnızca portland çimentosu klinker ve alçı taşının birlikte öğütülmesi sonucu elde edilmektedir. Öğütme sırasında portland çimentosu ve alçı taşına belirli miktardaki katkı maddeleri eklenirse farklı tiplerdeki katkılı çimentolar elde edilmektedir. Bu katkı kullanımı, enerji ve hammadde kaynaklarının daha az kullanılması bakımından, ekonomik açıdan önemli olmakla beraber kullanıldığı yerlerde, sülfatlı, klorürlü vs. ortamlardaki zararlı etkilere dayanıklılık açısından önem taşımaktadır. Mesela sülfat etkisine karşı dayanıklı beton yapmak amacıyla yüksek fırın cürufu veya puzolanlı ya da sülfata dayanıklı portland çimento (C3A<5) kullanılmalı, baraj inşaatları gibi kütle betonlarında hidrasyon ısısının düşüklüğü ve maruz kalacağı su etkisine karşı dayanıklılık açısından cürufu ve puzolanik çimentolar gibi katkılı çimentolar tercih edilmelidir [58].

Çimentolarda 4 ana bileşen vardır;

1. **Bikalsiyum Silikat - C2S** (2 CaO_ SiO₂),
2. **Trikalsiyum Silikat - C3S** (3 CaO_ SiO₂),
3. **Trikalsiyum Aluminat - C3A** (3 CaO_ Al₂O₃),
4. **Tetrakalsiyum Alumino ferrit - C4AF**.(4 CaO_ Al₂O₃ _ Fe₂O₃).

Çimento ve suyun birleşmesiyle ortaya çıkan ve hidrasyon adı verilen kimyasal reaksiyon sonucunda bu bileşenler hidrate bileşimlere dönüşürler. Kalsiyum silikatların hidrasyon reaksiyonları sonucunda C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrate) ve CH (Kalsiyum Hidroksit) oluşur. Çimentoya bağlayıcılık özelliğini kazandıran madde C-S-H'dır [52].

Çimento hamurunun boşluklu bir iç yapısı vardır. Hidrasyon sonunda oluşan ürünler aralarında çeşitli türde boşluklar oluşur. Bu boşluklar kapiler boşluklar ve jel boşlukları olarak sınıflandırılabilir. Kapiler boşluklar, beton taze halde iken su ile dolu olan ancak sertleşmiş betonda hidrasyon sonucunda oluşan ürünlerle dolmamış boşluklardır. Çimento hamurunun kapiler porozitesi karışımın su/çimento oranına ve hidrasyon derecesine bağlıdır. Hidrasyon derecesi arttıkça hidrasyon ürünleri boşlukları doldurur ve kapiler boşluklar azalır. Su/çimento oranı arttıkça hidrasyon ürünlerinin bu boşlukları doldurması zorlaşır. Çok yüksek su/çimento oranlarında çimento tamamen hidrate olsa bile bu boşlukların tamamen dolması imkansız olur. Jel boşlukları ise hidrasyon ürünleri

içinde bulunan, hidrasyonla birlikte sayıları ve toplam hacimleri artan boşluklardır. Jel boşluklarının boyutları kapiler boşluklardan çok daha küçüktür [52].

Bunların yanında, büyüklükleri milimetre boyutunda olan hava boşlukları da betonda mevcuttur. Hava boşlukları betonun yetersiz yerleştirilmesinden veya bazı katkıları kullanıp hava sürüklenmesinden oluşabilir.

3.1.3 Karma Suyu

Karışım suyu olarak doğada bulunan her türlü su kullanılabilir. Ancak, karışım suyunda beton prizini, katılaşmayı engelleyecek, donatı korozyonuna sebep olacak maddeler, bitkisel ve hayvansal yağlar, alkali tuzlar, amino asitler ve diğer zararlı maddeler bulunmamalıdır. Bu nedenle tuzlu, şekerli sular, deniz suları, endüstri atıkları ile kirlenmiş sular, bataklık suları vs. beton yapımında kullanılmamalıdır.

Bir dereceden alınan ve içerisinde çeşitli maddeler bulunan su, ya dinlenme havuzlarında dinlendirilmeli, yada çeşitli metotlarla temizlenmelidir. Bu konuda yapılan bazı deneyler göstermiştir ki, %1'e kadar SO_4 ihtiva eden suların betonda tesiri pek fazla değildir. %0,5'lik bir SO_4 konsantrasyonu betonda ortalama %4'lük bir mukavemet düşmesine neden olurken, %1'lik bir konsantrasyonda azalma %10'u geçmektedir. %5'lik bir tuz, mukavemeti %30 azaltmaktadır. Az miktarda sülfat ve klorür ihtiva eden yüksek karbonlaşmış minarelli sular, %80 kadar düşük mukavemete neden olmaktadır [46].

Betonda kullanılacak en iyi karma suyu olarak içme suyu tavsiye edilir. Önceden denenmiş uygun sonuçlar alınmış sularda kullanılabilir. İçerisinde beton dayanımını olumsuz etkileyen amonyum tuzları, serbest klor, organik maddeler ve madeni yağlar gibi maddeler bulunmaması gerekir. Kullanılan su çimentonun katılaşması için gerekli olmasının yanında betonun işlenebilirliğini de sağlamalıdır.

Kullanılacak su/çimento oranı iyi ayarlanmalıdır. Su/çimento oranı, betonun basınç dayanımını ve dış etkilere karşı dayanıklılığını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Su/çimento oranı ile betonun dayanımı ters orantılıdır. Karışımdaki kullanılacak su/çimento oranı küçüldükçe betonun dayanımı artar.

Beton üretiminde kullanılacak suyun iki önemli işlevi vardır;

— Kuru haldeki çimento ve agregayı plastik, işlenebilir bir kütle haline getirmek,

— Çimento ile kimyasal reaksiyon yaparak plastik kütlenin sertleşmesini sağlamaktır.

Kıvam 1 m^3 giren su miktarına bağlıdır. Beton mukavemeti su/çimento orana bağlıdır. İşte bu sebeple taze betona daha fazla kıvam kazandırmak amacı ile fazladan su katmak betonun mukavemetini önemli ölçüde azaltır. Genel olarak içilebilir nitelik taşıyan bütün sular betonda kullanıma uygundur. Ancak, betonda kullanılacak suyun içilebilir özellikte olması şart değildir. Bir takım ön deneyler yapılarak, içilmeyen sularla gayet kaliteli beton üretilebilir [59].

3.1.4. Kimyasal Katkı Maddeleri

Betonun birtakım özelliklerini iyileştirmek amacıyla beton içerisindeki çimento miktarı baz alarak belli oranlarda katılan organik veya inorganik kökenli kimyasal bileşikler katkı maddesi olarak adlandırılırlar. Katkı maddeleri çoğunlukla beton karışım suyuna katılır.

Gereğinden fazla kullanıldığında aksi etkiler oluşturabileceği gibi yine gereğinden az kullanıldığı takdirde hiçbir faydası olmayabilir.

Kurallarına uygun üretilen betonların da katkı maddeleri ile uyumu önceden yapılan deneylerle belirlenmelidir.

Beton üretiminde kullanılan kimyasal katkı maddeleri aşağıda belirtildiği şekilde gruplandırılır[56].

3.1.4.1. Betonun İşlenebilir Özelliğini Arttırıcı Katkı Maddeleri

Bu guruba giren katkılar çoğunlukla çimento ağırlığının %0.2 -0.5 arası oranlarda kullanılır. Taze betonun işlenebilirliğini arttıran bu katkılar aynı zamanda beton karma suyu ihtiyacını azalttıklarından betonun dayanımını da arttırlar[56].

3.1.4.2. Süper Akışkanlaştırıcılar

Daha çok yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılan bu katkılarla betonun su/çimento oranını 0.25'lere düşürmek olanaklıdır. Ancak süper akışkanlaştırıcılar normal akışkanlaştırıcılara kıyasla %1-%3 gibi çok daha yüksek dozajlarda kullanılır[56].

3.1.4.3. Priz Süresini Değiştiren Katkılar

Taze betonun priz adı verilen sertleşme sürecinin bazı koşullarda hızlandırılması veya geciktirilmesi istenir. Özellikle yaz aylarında, uzun taşıma mesafelerinde priz geciktiriciler, kış aylarında ise priz hızlandırıcılar kullanılır[56].

3.1.4.4. Hava Sürükleyici Katkı Maddeleri

Soğuk iklim koşullarında donma-çözülme tehlikesine karşı koruyan bu maddeler, aynı zamanda betonun işlenebilirliğini arttırlar[56].

3.1.4.5. Antifrizler

Bu tip katkı beton içindeki suyun donma sıcaklığını düşürerek suyun donmasını ve betonun çatlamasını engeller. Ancak soğuk hava şartlarında betona sadece antifriz katkı ilave edilmesi kesin çözüm olmayıp döküm yerinde betonun korunması için özel önlemlerin alınması gereklidir[56].

3.1.4.6. Hiper Akışkanlaştırıcılar

Yeni nesil akışkanlaştırıcılarıdır. % 20-25 oranlarına kadar su kesme özellikleri vardır. Elektrostatik dağılma mekanizmasıyla Çimento partiküllerini harekete geçirir. Bu özellikleriyle de büyük ölçüde su içeriği azaltılmış ancak yüksek akışkan bir beton elde edilir[56].

3.1.4.7. Diğer Katkılar

Hafif beton, geçirimsiz beton, rötreyi önleyici, aderansı artırıcı, renklendirici vb... değişik katkı maddeleri vardır. Uçucu kül, silis dumanı gibi puzolanik özelliklere sahip mineral malzemeler de bir yerde katkı maddesi sayılabilir [56].

3.1.5. Mineral Katkılar

Çimento gibi öğütülmüş toz halde silolarda depolanan cüruf, uçucu kül, silis dumanı, taşunu vb. çeşitli maddelere Mineral Katkı adı verilir. Mineral katkıları tek başına iken çimento gibi bağlayıcılık özelliği taşımazlar fakat, birlikte kullanıldıklarında çimentoya benzer görev yaparlar. Dolayısıyla çimento ekonomisi sağlarlar. Mineral katkıları doğa puzolanları, uçucu küller, silis dumanı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu olarak sınıflandırmak mümkündür.

3.1.5.1. Silis Dumanı ve Özellikleri

Silis dumanı oldukça ince ve küresel bir şekle sahiptir. Portland çimentosundan 100 kat daha ince bir malzemedir. Ferro silikon gibi silikon metal veya silikon alaşımlarının üretiminde atık olarak elde edilir. Bundaki silis miktarı % 85 – 95 arasında değişmektedir. Karbon (geriye kalan yanmamış kömür), demir oksit (Fe_2O_3), Alüminyum oksit (Al_2O_3), Magnezyum oksit (MgO) ve alkaliler (Na_2 , K_2O) çok az bulunan miktarlardır. Silis dumanı, yoğunlaşmış silis dumanı veya mikro silis dumanı diye adlandırılır [60].

Tablo 3.1. Silis dumanı incelik değerinin karşılaştırılması[61].

Malzeme	İncelik (cm^2/gr)
Silis Dumanı	200.000
Tütün Külü	100.000
Uçucu Kül	4000-7000
Portland Çimentosu	3000

Silis dumanı katkılı beton numunelerinin basınç dayanımı gelişimi, Portland çimentosu betonlarından genelde farklılık göstermektedir. Silisli betonların bu karakteristik özelliği, ilk günlerde bariz bir şekilde puzolonik reaksiyonları dışında uçucu küllere biraz benzemektedir. Bu da aslında silis dumanının çok ince ve yüksek oranda amorf silis içermesindedir. Normal sıcaklıkta, silis dumanının betonun dayanımına etkisi 3 gün ile 28 gün arasında meydana gelmektedir [61].

Silis dumanı, katılan betonlarda Portland çimentosuna göre daha az geçirimli olduğu ve bunun sebebi toplam gözenek hacmi hemen hemen aynı kalmasına rağmen iri gözenekliliği düşürdüğünden dolayı olduğu belirtilmektedir[62].

3.1.5.2. Uçucu Kül ve Özellikleri

TS 639'a göre uçucu kül, toz halinde veya öğütülmüş taş kömürü yada linyit kömürünün yüksek sıcaklıklarda yanması sonucunda oluşan ve baca gazları ile sürüklenen, silis ve alimino silisli toz halinde bir yanma kalıntısı olarak tanımlanır. Uçucu küller içerdikleri $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ ' ün yüzde toplamları 70 veya daha fazla ise uçucu kül teknik olarak F sınıfı kül olarak adlandırılır. C sınıfı uçucu küllerde önemli oranda CaO bileşeni bulunduğundan $\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, \text{Fe}_2\text{O}_3$ bileşenlerinin toplamı %50 'den büyük olması gerekmektedir. F sınıfı küllerin esas aktif bileşeni silisli veya Alumina silikatlı cam olup bitümlü kömürden elde edilmektedir. C sınıfı küllerde ise aktif bileşen kalsiyum Alumino Silikattır ve linyit kömürünün yanmasıyla elde edilmektedir[63].

Uçucu küller, puzolanik içeriğine göre şu şekilde sınıflandırılmaktadır;

Sınıf 0 : Puzolanik içeriği (uçucu külün-portland çimentosuna oranla dayanımı) %70-94 arasındaki küller için özgül yüzeyin düşük olduğu ($2500-3500\text{cm}^2/\text{gr}$) yani, tanelerin iri olduğu ve cam içeriğinin düşük olduğu (<%60) küllerdir. Bu küllerin betonun su ihtiyacını arttırdığı belirtilmektedir.

Sınıf I : Puzolanik içeriği %95-114 olan küllerin portland çimentosu ile aynı inceliğe sahip olduğu ve bu küllerin ya karışım işlenebilirliğini etkilemediği veya biraz artırdığı belirtilmektedir. Bunların özgül yüzeyleri çoğunlukla $4500\text{cm}^2/\text{gr}$ dan büyük küllerdir. Bunlardaki cam içeriği en az %65 'dir.

Sınıf II : Bunların puzolanik içeriği %115 'den büyüktür. Bunların tane şekli küresel ve portland çimentosundan incedir. Özgül yüzeyleri $4500\text{cm}^2/\text{gr}$ 'dır.

3.2. Betondan Beklenen Özellikler

Yapıda istenilen şekil ve boyutlarda betondan yapılmış elemanların kullanılması için, öncelikle, o şekil ve boyutlardaki kalıplar hazırlanmakta ve içlerine taze haldeki beton yerleştirilmektedir. Kalıpların içerisindeki beton yeterince sertleşip dayanım kazandıktan sonra da, kalıplar sökülmektedir.

Bazen istenilen şekil ve boyutlardaki kalıplar kullanılarak, içerisinde çelik donatı bulunmayan veya çelik donatı ile takviye edilmiş beton elemanlar, yapının bulunduğu yere taşınarak kullanılmaktadır. Beton bloklar, direkler, borular, panel duvarlar, kirişler, döşemeler gibi elemanlar, ön yapımlı (prefabriğe) elemanlara örnek olarak belirtilebilecek elemanlardır [64].

3.2.1. Betonun İç Yapısı

Betonun iç yapısı ile ilgili birçok çalışma yapılmaktadır. Beton özellikleri iç yapısıyla yakından ilgilidir. Malzemelerin iç yapıları daha iyi anlaşıldıkça beton özelliklerinde büyük gelişmeler sağlanacaktır. İç yapının beton özelliklerine etkisi, betonu oluşturan malzemelerin iç yapıyı nasıl değiştirdikleri, bu malzemeler arasındaki ara yüzeylerin özellikleri anlaşıldıkça istenen şartları sağlayacak malzemeler üretmek daha kolay olacaktır ve böylece çimento esaslı malzemelerin kullanım sahaları genişleyecektir.[65].

3.2.2. Çimento Hamurunun İç yapısı

Çimento hamurunun boşluklu bir iç yapısı vardır. Hidratasyon sonunda oluşan ürünler aralarında çeşitli türde boşluklar oluşur. Bu boşluklar kapiler boşluklar ve jel boşlukları olarak sınıflandırılabilir. Kapiler boşluklar, beton taze halde iken su ile dolu olan ancak sertleşmiş betonda hidratasyon sonucunda oluşan ürünlerle dolmamış boşluklardır. Çimento hamurunun kapiler porozitesi karışımın su/çimento oranına ve hidratasyon derecesine bağlıdır.

Hidratasyon derecesi arttıkça hidratasyon ürünleri boşlukları doldurur ve kapiler boşluklar azalır. Su/çimento oranı arttıkça hidratasyon ürünlerinin bu boşlukları doldurması zorlaşır. Çok yüksek su/çimento oranlarında çimento tamamen hidrate olsa bile bu boşlukların tamamen dolması imkansız olur. Jel boşlukları ise hidratasyon ürünleri içinde bulunan, hidratasyonla birlikte sayıları ve toplam hacimleri artan boşluklardır. Jel boşluklarının boyutları kapiler boşluklardan çok daha küçüktür.(66)

Bunların yanında, büyüklükleri milimetre boyutunda olan hava boşlukları da betonda mevcuttur. Hava boşlukları betonun yetersiz yerleştirilmesinden veya bazı katkıları kullanıp hava sürüklenmesinden oluşabilir.

3.2.3. Agrega Çimento Ara Yüzeyinin İç Yapısı

Beton agrega ile çimento hamurundan oluşan iki fazlı bir kompozit malzeme olarak göz önüne alındığında malzeme özellikleri sadece bileşenlerin özelliklerine bağlı değildir. Heterojen bir malzeme olan betonun dayanımı 3 faktörden etkilenir .

Bunlar :

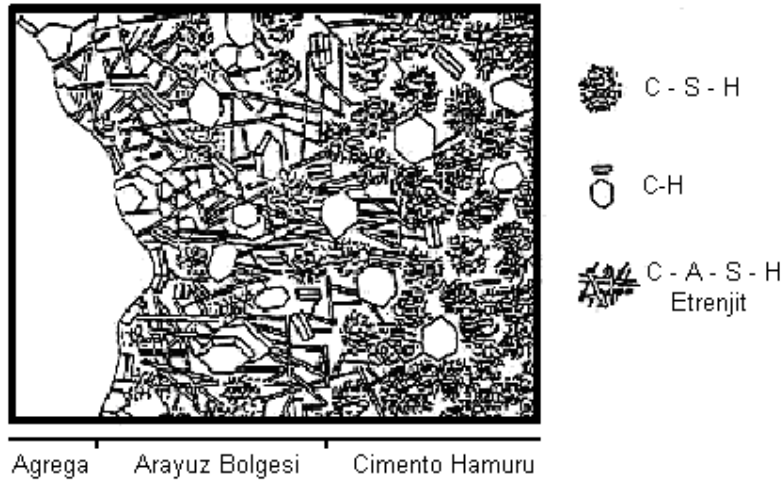
- matrisin dayanımı (çimento hamurunun dayanımı),
- agreganın dayanımı
- ara yüzeyinin dayanımıdır.

Bu faktörlerin her birinin çeşitli sınıflardaki betonların dayanımlarında etkileri farklıdır. Ancak agrega-çimento arayüzeyi betondaki en zayıf halka olarak kabul edilmektedir. Çimento hamuru ile agrega arasındaki temas yüzeyi, çimento hamurundan farklılıklar gösterir. Bu ara yüzeyler betonun mekanik davranışında oldukça etkilidir.

İri agreganın hemen yanındaki hidrate olmuş çimento hamurunun iç yapısı agregadan uzaktaki çimento hamurunun iç yapısından farklıdır[51].

Geçiş bölgesinin iç yapısı şöyledir:

- Agrega yüzeyine dik doğrultuda CH filminin birikmesi
- Saç fırçasını andıran uzamış C-S-H tanelerinden oluşan bir film ile örtülmesi
- Agrega yüzeyinde paralel doğrultuda geniş CH kristallerinin birikmesi
- Temas yüzeyinde CH ile dolu hacim formasyonu (Şekil 3.4).



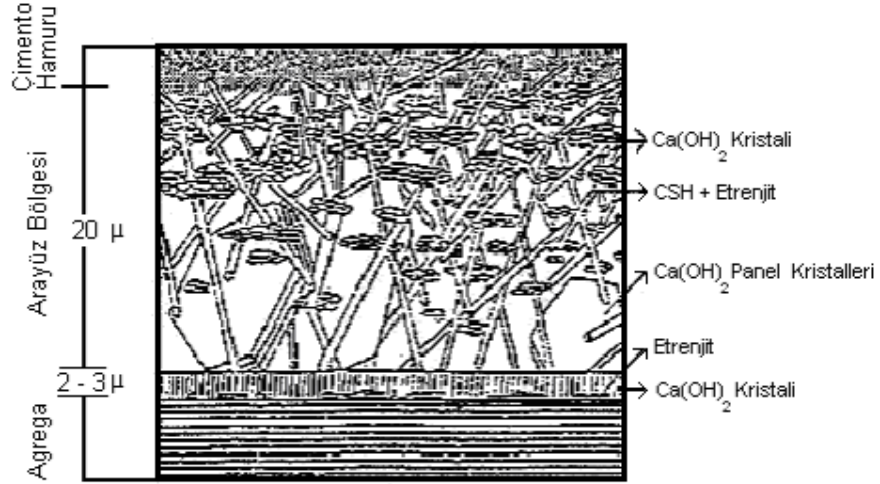
Şekil 3.4. Geçiş Bölgesinin Mikro Yapısı[51]

Başka bir görüşe göre de ara yüzeyin yapısı şu şekildedir.

Çimento, su ile karıştırıldıktan birkaç dakika sonra agrega yüzeyinde etrenjit iğneleri görülür. Agrega yüzeyine dik doğrultuda CH kristalleri etrenjit iğnelerini kaplar.

CH kristal tabakasının kalınlığı 2-3 mikron kadardır. Bu tabakadan sonra büyük hegzagonal biçimli CH panel kristalleri gelişmeye başlar. Bu panellerin boyutu 10 ile 30 mikron kadardır. Temas bölgesi modellenmesi Şekil 3.5'de şematik olarak görülmektedir.

Ara yüzeyde su/çimento oranı ve porozite daha yüksektir. Hidratasyon ürünlerinden CH daha büyük kristal taneli ve hacim olarak daha fazladır. Bunların sonucu olarak da arayüz çimento hamuruna göre daha zayıf ve geçirimlidir. Arayüzeyin kalınlığı 10 ile 50 mikron arasında değişir.



Şekil 3.5. Çimento hamuru ile agreganın şematik görüntüsü[51]

Temas bölgesi ince olduğu halde betonun önemli bir bölümünü kaplar. Çimento hamuru hacminin %25-%35'ini bu temas yüzeyi oluşturur. Bu sebepten arayüzeyin sertleşmiş beton özellikleri üzerinde önemli etkisi olması doğaldır.

Arayüzeyin boşluklu iç yapısının oluşum sebebiyle ilgili çeşitli görüşler vardır. Karıştırma sırasında, agrega taneleri birkaç mikron kalınlığında su filmiyle kaplanırlar. Hidratasyon başladığında hidratasyon ürünleri su tabakasıyla birleşirler, böylece buradaki su/çimento oranı orijinal su/çimento oranından yüksek olur.

Arayüzeydeki yüksek porozitenin oluşumuyla ilgili olası bir mekanizma da iki faktörün birleşmesiyle ortaya çıkabilir.

Bu Faktörler;

- Çeper etkisi: çimento taneleri nispeten büyük agrega tanesi yanında boş bir hacimdeki kadar yakın sıkışamazlar.

- Tek taraflı gelişim etkisi: hidrasyon ürünleri sadece çimento tarafından gelir, agrega tarafından gelmez [67].

3.2.4 Taze Betondan Beklenen Özellikler

Taze beton kolayca karılabilir, taşınabilir, yerleştirilebilir, sıkıştırılabilir ve yüzeyi düzeltilebilir olmalıdır. Bu işlemler sırasında iri agregalarla çimento harcı arasında ayrışma olmamalıdır.

Yerine yerleştirilen taze betonun içerisindeki suyun yukarıya çıkma eğilimi (terleme) mümkün olduğu kadar az olmalıdır. Betonun homojen yapısı bozulmamalıdır.

Ayrıca malzemenin karılmasından hemen sonra plastik duruma sahip bir betonda, plastikliğin kaybolmasına kadar geçen sürenin uzunluğu (priz süresi) gerekenden daha uzun veya daha kısa olmamalıdır [64].

3.2.5. Sertleşmiş Betondan Beklenen Özellikler

İster yapıdaki kalıbına yerleştirilerek elde edilen beton elemanların üretilmesinde, isterse ön yapımlı beton elemanların üretilmesinde, üreticinin ve kullanıcının son hedefi, sertleşmiş durumdaki betonun, kendisinden beklenen özellikleri gösterebilecek kalitede olmasıdır [64].

Sertleşmiş betondan beklenen özellikler başlıca şu şekilde belirilebilir.

- 7 günlük, 28 günlük, 90 günlük gibi herhangi bir yaş için hedeflenmiş olan minimum beton dayanımından daha az bir dayanım göstermemelidir.

- Çevredeki suyun ve diğer sıvıların içerisine kolayca girerek olumsuz etki oluşturmaması için, yeterince geçirimsiz olmalıdır.

- Yapıda hizmet gördüğü süre içerisinde çevrede oluşa yıpratıcı etkenler karşısında yeterince dayanıklı olmalıdır bir başka ifade ile donma-çözölmeye, ıslanam-kurumaya, aşınmaya, asitlere, sülfatlara ve alkali-agrega reaksiyonu gibi kimyasal reaksiyonlara karşı dayanıklılık gösterebilecek kalitede olmalıdır.

- Yeterli hacim sabitliğine sahip olmalıdır; yani, çatlamalara yol açacak ölçüde büzülme (rötre) veya genişleme göstermemelidir.

Basınç dayanımı, eğilme dayanımı, çekme dayanımı, tekrarlı yükler altında yorulma dayanımı, gerilme-birim deformasyon ilişkisi, elastisite modülü, poisson oranı, ısısal genişleme katsayısı, büzülme (rötre), sabit yükler altında sünme ve yoğunluk, betonda aranan önemli özelliklerdir [64].

3.2.5.1. Betonun Basınç Dayanımı

Betonun basınç dayanımı “eksenel basınç yükü etkisi altındaki betonun kırılmamak için gösterebileceği direnme kabiliyeti (eksenel basınç yükü etkisiyle, betondan oluşan maksimum gerilme)” olarak tanımlanmaktadır.

Beton basınç dayanımını ölçebilmek için değişik deney yöntemleri kullanılmaktadır. Basınç dayanımının bulunabilmesi için uygulanan deney yöntemleri arasında en çok kullanılanları şunlardır:

- Taze betondan hazırlanan standart boyutlu numunelerin beton standartlarında belirtilen süre ve koşullarda kür edildikten sonra kırılmaya tabi tutuldukları “standart deney yöntemi”

- Taze betondan hazırlanan numunelerin 1-2 gün gibi kısa süreyle yüksek sıcaklık ve nem içeren bir ortamda kür edildikten sonra kırıldıkları “hızlandırılmış küre tabi tutulan numunelere uygulanan basınç dayanımı yöntemi”

- Sertleşmiş betondan kesilerek çıkartılan karot numunelerin kırılmaya tabi tutuldukları “karot numunelere uygulanan basınç dayanımı yöntemi”

- Beton test çekici denilen bir alet yardım ile sertleşmiş betonun yüzey sertliğini hasarsız olarak ölçerek betonun basınç dayanımı hakkında yaklaşık bir bilgi elde edildiği “beton test çekici uygulayarak basınç dayanımının bulunduğu deney yöntemi”

- Ultrasonik test cihazı olarak adlandırılan bir cihaz vasıtası ile sertleşmiş betonun içerisinden hasarsız olarak geçirilen ses dalgalarının hızının ölçüldüğü ve betonun basınç dayanımı hakkında yaklaşık bir bilgi elde edildiği “ultrasonik test cihazı uygulayarak basınç dayanımının bulunduğu deney yöntemi”

Betonun basınç dayanımının belirlenebilmesi için uygulanan değişik deney yöntemleri sonucunda birbirinden farklı değerler elde edilmektedir. Herhangi bir deney yöntemi özel olarak belirtilmediği takdirde ve betonun basınç dayanımından söz

edildiğinde, böyle bir değerin “standart deney yöntemi” ile elde edilen değer olduğu anlaşılmaktadır[46].

3.2.5.1.1 Beton Dayanımını Oluşturan Unsurlar

Beton yapısı makro ölçekte ele alınacak olursa; betonun, çimento hamurundan ve bu hamur içerisinde gömülmüş olan agrega tanelerinden oluşan kompozit bir malzeme olduğunu kabul edebilmek mümkündür. Betonun yük altında kırılması, çimento hamuru veya agreganın yeterli direnci göstermemesinden yada çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansın yeterince yüksek olmamasından kaynaklanmaktadır.

Çimento hamuru bağlayıcı özelliğe sahip bir malzemedir. Agregaların yüzeyini kaplamakta, agrega tanelerinin arasındaki boşlukları doldurmakta, agrega taneleri ile aderans kurarak, betonun tek bir malzeme durumunu alabilmesini sağlamaktadır. Sertleşmiş çimento hamurunun dayanımının yüksek olmadığı takdirde betona uygulanan yükler karşısında, çatlamların ve kırılmaların oluşması bu malzemedен başlamaktadır.

Beton üretiminde kullanılan agregaların sert, dayanıklı ve temiz olmaları, mümkün olabildiği kadar reaktif silis ve reaktif karbonat içermemeleri gerekmektedir. Normal ağırlıklı beton üretiminde kullanılan agregalar genellikle çimento hamurunun dayanımından daha yüksek dayanıma sahiptirler. Ancak, beton yapımında kullanılan agregalar düşük dayanımlı ve kolayca kırılabilir türde iseler, uygulanan yükler altında betonda meydana gelebilecek çatlama ve kırılma, iri agrega tanelerinin kırılmasıyla başlamaktadır.

Sertleşmiş betondaki kırılmanın başladığı en zayıf bölgeler, iri agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki yüzeylerdir. Yüzey dokusu pütürlü agregalarla yapılan betonların eğilme ve çekme dayanımları, düzgün yüzeyli agregalarla yapılan betonlarınkinden daha fazla olabilmektedir[46,52].

3.2.5.1.2. Beton Basınç Dayanımını Etkileyen Faktörler

Beton üretiminde kullanılan agregaların genellikle yeterli dayanıma sahip oldukları göz önünde tutulur ise, çimento hamurunun dayanımının beton dayanımı üzerindeki rolünü daha iyi anlayabilmek mümkün olur. Çimento hamurunun yeterli dayanmada olması, bir yandan bu malzemenin yük taşıma kapasitesinin yeterli düzeyde olabilmesini sağlarken,

bir yandan da çimento hamuru ile agrega taneleri arasındaki aderansın daha kuvvetli olabilmesine yardımcı olmaktadır. Ayrıca, çimento hamurunun dayanımının yüksek olması, çimento hamurunun içerisinde yer alan jel boşlukları dışındaki diğer boşlukların daha az miktarda yer almış olduklarını işaret etmektedir.

Jel boşluklarının dışında çimento hamurunun içerisinde yer alabilecek diğer boşluklar olarak, kapiler boşluklar, hapsolmuş hava boşlukları ve hava sürükleyici katkı maddeleri kullanıldığı takdirde çimento hamuru içerisinde oluşan sürüklenmiş hava kabarcıkları kastedilmektedir.

Betonun içerisinde bulunan boşluklar sadece çimento hamurunun içerisinde yer almış olan boşluklardan ibaret değildir. Taze betonun üretimi, taşınması ve özellikle yerleştirilmesi esnasında betonun içerisine bir miktar hava girmektedir. İçerisinde çok büyük boşluklar bulunan beton, o haliyle sertleştiği takdirde, çok düşük dayanımlı bir beton olmaktadır. O bakımdan, yerine yerleştirilen taze betona vibrasyon veya başka yöntemlerle sıkıştırma uygulanarak, taze betonun içerisindeki havanın mümkün olduğu kadar dışarı çıkartılması gerekmektedir.

Yeterli dayanıma sahip agregaların kullanılması durumunda elde edilecek olan beton dayanımı, hem hidrasyon sonunda oluşacak jel miktarındaki artışa ve hem de betonun içerisinde yer alan boşlukların miktarındaki azalmaya bağlı olduğuna göre, beton dayanımını etkileyen faktörler;

- Su/çimento oranı,
- Karma suyunun kalitesi,
- Çimento özellikler,
- Agrega özellikleri,
- Betona uygulanan karılma, taşıma, yerleştirilme ve sıkıştırma işlemler,
- Kür koşulları ve betonun yaşıdır[64].

3.2.5.1.3. Betonun Basınç Dayanımının “Standart Deney Yöntemi” ile Belirlenmesi

Betonun basınç dayanımının elde edilmesi için uygulanan “standart deney yöntemi” ile ilgili Türk ve ASTM standartları şunlardır: TS 3068, TS 3114, ASTM C 31 ve ASTM C 39. Bu konudaki Türk ve ASTM standartları birbirine oldukça benzerdir.

Standart deney yönteminin uygulanmasında beton standartlarında belirtilen boyutlara sahip standart silindir veya küp numuneler kullanılmaktadır. Bu numuneler beton

taze iken silindir veya küp şekilli kalıplara, beton standartlarının belirttiği tarzda, yerleştirilmekte ve bir gün sonra kalıptan çıkarılmaktadır. Kalıptan çıkarılan sertleşmiş beton numuneleri, deney tarihine kadar (betonun yaşı 28. güne gelinceye kadar) beton standartlarının belirttiği kür ortamında saklandıktan sonra, deney presi olarak adlandırılan bir alet vasıtasıyla üniform basınç yükü altında kırılmaya tabi tutulmaktadır[68,69].

Basınç dayanımı şu şekilde hesaplanmaktadır;

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.7)$$

Burada;

σ = Basınç Dayanımı

P = Numunenin kırılmasına yol açan maksimum yük miktarın

A = Numunenin kesit alanıdır.

3.2.5.1.4. Ultrasonik Test Cihazı Kullanarak Beton Basınç Dayanımının Elde Edilmesi

Ultrasonik test cihazının kullanılması ile herhangi bir beton bloğun bir yüzüne ultrasonik pulse (nabız atışı gibi ritmik sesüstü vuruş) uygulanarak, beton içerisinde basınç dalgaları oluşturulmaktadır. Beton içerisinde ilerleyen sesüstü dalgalar, beton bloğun bir başka yüzeyinden geri alınmaktadır. Ultrasonik ses cihazı, ses üstü dalganın, betona gönderildiği yüzey ile geri alındığı yüzey arasındaki bir mesafeyi ne kadar zaman süresinde geçtiğini ölçmektedir[64].

Ultrasonik cihazın kullanılmasıyla, betonun içerisine gönderilen ses üstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğerine geçme süresini ölçmekte, dalga hızı hesaplanmaktadır. Hesaplanan ses üstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikler arasındaki ilişki yaklaşık olarak elde edilmektedir[70].

Ultrasonik test cihazı ile ölçüm yapabilmek için belirli boyutlarda numunelerin kullanılması şart değildir. Ultrasonik test cihazı ile yapıdaki betonun basınç dayanımı ölçülebilmektedir. Ultrasonik test yönteminin uygulanması durumunda, ölçüm yapılan betonda çatlama veya kırılma oluşmamaktadır. Bu yöntem hasarsız deney yöntemidir.

Ultrasonik cihazın üzerinde bulunan bir anahtar, elektronik devrenin açılmasına veya kapanmasına kumanda etmektedir. Cihaz çalışır durumdayken, sesüstü dalgalar üretebilmektedir.

Ultrasonik cihaza kablolarla bağlı olan, birisi “dalga gönderici” diğeri “dalga kaydedici” iki adet transdüser başlık bulunmaktadır.

Cihaz çalışır durumdayken, dalga gönderici başlık, ölçüm yapılmak istenen beton bloğun bir yüzüne tamamen temas edecek tarzda elle bastırılmaktadır. Beton bloğun diğeri yüzüne de, dalga alıcı başlık tamamen temas edecek tarzda elle bastırılmaktadır. Gönderici başlık vasıtasıyla betonun bir yüzünden içeriye gönderilen dalgalar, betonun diğeri yüzünden alıcı başlık vasıtasıyla kaydedilmekte ve zaman ölçücü devreye nakledilmektedir.

Ultrasonik test cihazı, ses üstü dalgaların dalga gönderici ve alıcı başlıklar arasındaki bir mesafeyi ne kadar zamanda geçtiğini mikrosaniye birimiyle otomatik olarak belirlemekte ve cihazın üzerindeki ekranda gösterilmektedir.

Katı bir malzemenin içerisinde geçen ses üstü dalgaların hızı (V), sesüstü dalganın geçtiği malzemenin elastik modülü (E) ve malzemenin yoğunluğu (D) ile ilişkilidir. Bu ilişki $V^2 = E/D$ olarak gösterilmektedir.

Beton bloğun bir yüzeyinden içeriye gönderilen ses üstü dalganın, bloktaki diğeri bir yüzeye ne kadar zamanda geçtiği ölçüldükten sonra, dalga hızı aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$V = \frac{S}{t} 10^6 \quad (3.8)$$

Burada;

V = Ses üstü dalga hızı (metre/saniye)

S = Beton bloğun ses üstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzey arasındaki mesafe (metre)

t = Ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman (mikrosaniye).

Ultrasonik test yöntemi ile herhangi bir betonun basınç dayanımını yeterince hassas olarak bulabilmek zor olmakla birlikte, herhangi bir beton içerisinde geçen ses üstü dalganın hızı, o betonun içerdiği boşluk miktarı ve yoğunluğu ile yakından ilgili olduğu için, elde edilen ses üstü hız ile betonun kalitesi hakkında genel bir ilişki kurabilmek

mümkün olabilmektedir. Whitehurst tarafından yoğunluğu yaklaşık 2400 kg/m^3 olan betonlar üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonunda, ses üstü dalga hızı bilindiği takdirde beton kalitesinin ne olabileceğine dair önerilen sonuçlar tablo 3.2’de gösterilmektedir[70].

Tablo 3.2. Ultrasonik Test Yöntemi İle Beton Kalitesinin Değerlendirilmesi

Dalga Hızı m/sn	Beton Kalitesi
>450	Mükemmel
3500- 4500	İyi
3000-3500	Şüpheli
2000-3000	Zayıf
<2000	Çok Zayıf

3.2.5.2. Betonun Çekme ve Eğilme Dayanımı

Betonun çekme dayanımı, betonda çekme etkisi oluşturacak kuvvetlerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmalara karşı, betonun gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Genellikle, yapıdaki betona doğrudan çekme dayanımı uygulanmamaktadır. Ancak, beton elemanların üzerine gelen basınç ve/veya eğilme kuvvetleri betonun içerisinde dolaylı olarak çekme kuvvetlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Betonda büzülme olması durumunda yer alacak şekil değiştirmelerin agrega taneleri ve betondaki donatı tarafından engellenerek serbestçe yer almaması nedeniyle betonun içerisinde çekme kuvvetleri oluşmaktadır.

Basit bir kirişin üzerindeki eğilme yükleri kiriş kesitinde kesme kuvveti ve eğilme momenti oluşturmaktadır. Eğilme momenti, kirişteki tarafsız eksenin üstünde kalan bölgede basınç gerilmesi, altında kalan bölgede ise çekme gerilmesi meydana getirmektedir. Buna göre, tarafsız eksenin hemen alt kısmında hem çekme hem de kayma gerilmeleri oluşmaktadır. Kayma gerilmelerine diyagonal olan düzleme (eğik düzleme) dik

olarak “eğik çekme ” kuvveti oluşmaktadır. Eğik çekme kuvveti, eğik düzlem üzerinde “eğik çatlak” olarak adlandırılan çatlakların yer almasına neden olmaktadır.

Betonda oluşan çekme kuvvetleri, betonun çatlamasına ve kırılmasına yol açan en önemli neden olarak kabul edilmektedir[71,72,73]. Betondaki basınç ve çekme dayanımları birbirleriyle yakından ilgilidir. Genel olarak, betonun çekme dayanımı, basınç dayanımının %9 - %10 u kadardır. Betonun kalitesine ve yaşa bağlı olarak, bu oran %7 ile %17 arasında değişmektedir.

Yapıların tasarım hesaplarında genellikle kullanılmakta olan dayanım türü basınç dayanımıdır. Ancak, oldukça gevrek bir malzeme olan betonun çekme kuvvetine karşı direnme kabiliyeti çok düşük olduğundan, çekme dayanımının değeri betonun içerisindeki çatlakların oluşmasında önemli rol oynamaktadır. Betonda oluşan bu çatlaklar kırılmalara neden olmaktadır.

Betonun kırılmasına yol açabilecek kadar büyük çatlakların oluşmadığı durumlarda dahi, karşılaşılabilecek sorunlar ortadan kalkmamaktadır. Çatlakların oluşması ile, betonun içerisine dışarıdan su veya bu sularla birlikte sülfat, asit, klor gibi maddelerin girebilmesi daha kolay olmaktadır; betonarme elemanlardaki demir donatı korozyon göstermektedir.

Betonun çekme dayanımının bilinmesi, çatlakların ve yapıyla ilgili analizlerin yapılabilmesi bakımından büyük önem taşımaktadır[64].

3.2.5.2.1. Doğrudan Çekme Dayanımı

Betonun doğrudan çekme yükleri altındaki dayanımını bulabilmek için standart bir deney yöntemi yoktur. O nedenle, böyle bir deneyde kullanılmak üzere standart boyutlu ve şekilli numuneler de bulunmamaktadır.

Doğrudan çekme yükleri, değişik boyutlardaki silindir, prizma ve özel boyutlu numuneler üzerinde uygulanabilmektedir. Ancak, beton numuneye doğrudan çekme yükleri uygulayabilmek için, kullanılacak numunenin uçlarına özel olarak hazırlanmış metal başlıkların yapıştırılması ve bu başlıkların ortasına 90⁰ açıyla dik olacak tarzda metal çubukların bağlı olması gerekmektedir.

Özel başlık düzeni takılan beton numunelerin uçlarındaki metal çubuklar, normal demir çubukların çekme deneyinde olduğu gibi, deney makinesinin çeneleri tarafından sıkıca kavranacak tarzda deney makinesine yerleştirilmektedir. Deney makinesi çalıştırıldığında, makinenin çeneleri birbirinden uzaklaşmakta ve böylece çubuklara ve

metal başlıklara sıkıca bağlanmış olan beton numuneye doğrudan çekme yükleri uygulanmış olmaktadır. Yük uygulaması, beton numune kırılıncaya kadar devam etmektedir[64].

Betonun çekme dayanımı (σ_c) kırılma oluşturacak yükün, numune boyunun ortasındaki numune kesit alanına bölünerek hesaplanır. Yani;

$$\sigma_c = \frac{P}{A} \quad (3.9)$$

olarak hesaplanmakta ve kgf/cm^2 veya MPa birimiyle ifade edilmektedir.

3.2.5.2.2. Yarmada Çekme Dayanımı

Dolaylı çekme yükleri betonun çekme dayanımının elde edilmesini belirleyen deney yöntemi bütün ülke standartlarında yer almaktadır. Bu konudaki Türk standardı, TS 3129 dur[71].

Bu deney yönteminde genellikle silindir şekilli numuneler kullanılmaktadır. Küp şekilli numunelerin kullanılabilmesi de mümkündür.

Deneylerin uygulanmasında, numune, deney presinin üzerine, numune eksenini presin alt tablasına paralel olacak tarzda yatırılmaktadır. Numunenin yan yüzünün alt ve üst kısımlarına 25 mm eninde ve yaklaşık 3 mm kalınlığında kontraplak çıtalar yerleştirilmektedir. Deney presi vasıtasıyla uygulanan basınç yükü numune kırılıncaya kadar devam ettirilmekte ve kırılma yükü (P) ölçülmektedir. Böyle bir yükleme altında, silindir numunenin ortadan yarılarak iki parçaya ayrılması şeklinde gerçekleşmektedir.

Silindir şekilli beton numuneye bu şekilde basınç yükünün uygulanması durumunda, beton, yük ekseninde kısalma ve yük eksenine dik olan yatay ekseninde ise uzamaya maruz kalmaktadır. Betondaki çekme gerilmeleri bulunmaktadır.

$$\text{Çekme Gerilmesi} = \frac{2P}{\pi LD} \quad (3.10)$$

Yukarıdaki formüllerde;

P = Kırılmaya neden olan basınç yükü,

L = Silindir numunenin boyu,

D = Silindir numunenin çapıdır.

Beton içerisinde oluşan basınç gerilmesinin değeri çekme gerilmesinden daha yüksektir. Beton kesitin ortasında yani D/2 noktasında, betonda oluşan basınç gerilmesi, çekme gerilmesinden 3 kat daha fazladır. Ancak, betonun çekme yüklerine karşı gösterebileceği direnç yüksek olmadığından, betondaki kırılma, çekme yükleri nedeni ile yer almış olmaktadır.

Şayet silindir numune yerine boyutları a x a x a olan küp numuneler kullanılırsa;

$$\sigma_c = \frac{2P}{\pi a^2} \quad (3.11)$$

formülünden hesaplanır.

Dolaylı çekme dayanımı yönteminin uygulanması sonucunda beton numune yarılarak iki parçaya ayrıldığı için, bu yöntem genellikle yarma deneyi yöntemi olarak adlandırılmaktadır[71].

3.2.5.2.3. Eğilmede Çekme Dayanımı

Betonun eğilme dayanımının bulunabilmesi ile ilgili Türk standartları TS 3284 ve TS 3285 dir. Betonun eğilme dayanımının bulunması için kiriş numuneler hazırlanmakta ve eğilme yükü altındaki kırılmaya tabi tutulmaktadır[72,73].

Eğilme dayanımı deneylerinde genellikle kare kesitli kirişler kullanılmaktadır. Numunelerin hazırlanması için kalıplara yerleştirilen taze beton sıkıştırılmakta ve deney gününe kadar 23 ± 2 °C sıcaklıkta ıslak küre tabi tutulmaktadır[72,73].

Beton kiriş numunelerde kırılmaya neden olan yük deney presinin göstergesinde okunduktan sonra eğilme dayanımının hesaplanabilmesi için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$\sigma_e = \frac{Mc}{I} \quad (3.12)$$

Burada ;

σ_e = Eğilme dayanımı,

M = Maksimum moment,

c = Tarafsız eksen ile kiriş yüksekliğinin en uç noktası arasındaki uzaklık,

d = Kiriş kesitinin yüksekliği,

b = Kiriş kesitinin eni,

l = Atalet momentidir.

Orta noktadan yüklenen dikdörtgen kesitli beton kiriş numunelerde ($\sigma_e = Mc / I$ formülüne uyarak) eğilme dayanımı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\sigma_e = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (3.13)$$

Mesnetlerden L/3 uzaklıktaki iki noktadan yüklenen dikdörtgen kesitli beton kiriş numunelerde ise eğilme dayanımının hesaplanması için aşağıdaki formül kullanılmaktadır.

$$\sigma_e = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.14)$$

Eğilme yüküne maruz kalan beton kirişte yer alan kırılmaya, betonun tarafsız eksenin altında oluşan çekme gerilmeleri neden olmaktadır. Bunun nedeni ise betonun oldukça düşük çekme dayanımına sahip olmasıdır. O bakımdan beton kirişlerde elde edilen eğilme dayanımı değeri aslında betonun çekme dayanımını işaret etmektedir[72,73,74,75].

3.2.6. Beton Özelliklerini Etkileyen Faktörler

Gerek taze betonun ve gerekse sertleşmiş betonun tüm özellikleri, beton karışımının oluşturulmasında kullanılan çimentonun, agreganı, suyun ve katkı maddelerinin özellikleri ve karışım içerisinde yer almış oldukları oranlar tarafından etkilenmektedir. Sertleşmiş beton, taze betonun katılaşmasından sonraki safhadaki durumu olarak tanımlandığı için, sertleşmiş betondan beklenen performans, önemli ölçüde taze betonun özelliklerine bağlı olmaktadır [64].

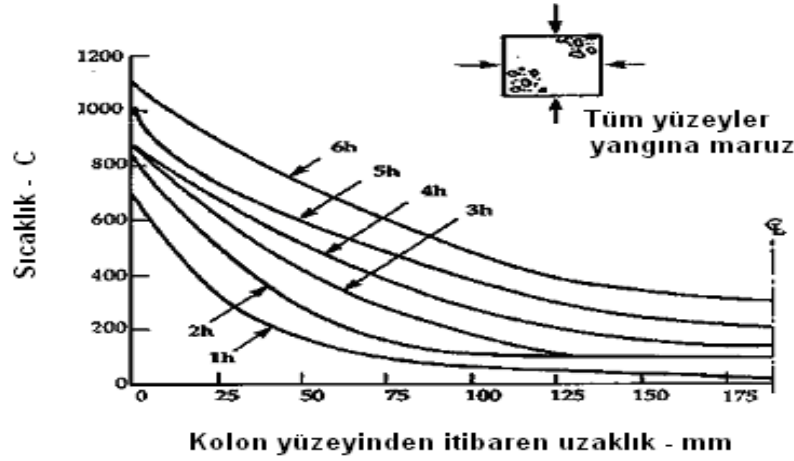
Sertleşmiş betonun özelliklerini çok büyük ölçüde etkileyen başka faktörlerde bulunmaktadır. Bunlar, taze betonun uygun tarzda taşınması, yerine yerleştirilmesi, sıkıştırılması, yüzeyinin düzleştirilmesi v hidrasyonun sağlıklı şekilde yer alabilmesi için kür edilmesi işlemleridir. Sertleşmiş betondan beklenen özelliklerin elde edilebilmesi için bu işlemlerin uygun tarzda yerine getirilmiş olmaları gerekmektedir [64].

3.3. Yüksek Sıcaklığın Betona Etkileri

Betonun diğer yapı malzemelerine göre en önemli bazı avantajları sıralandığında istenilen şekil ve boyutlarda üretilebilmesi, 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 [64]. Beton, yanmayan madde olusu, belirli bir süre için önemli bir zarar görmemesi ve zehirli duman çıkarmaması ile yangın direnci yüksek bir malzemedir [76]. Ancak bu dayanıklılık, sınırlı süre ve belirli sıcaklıklar için geçerlidir [20].

Yüksek sıcaklık etkisinde oluşan parça atmalar, yapı elemanının yük taşıma kapasitesini ve bütünlüğünü kaybetmesine neden olur. Parça atmalar sonucu donatılar yüksek sıcaklığa maruz kalırlar. Polipropilen lif ve hava sürükleyici kullanılması parça atma riskini azaltır. Hava sürükleyicileri 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 [77].

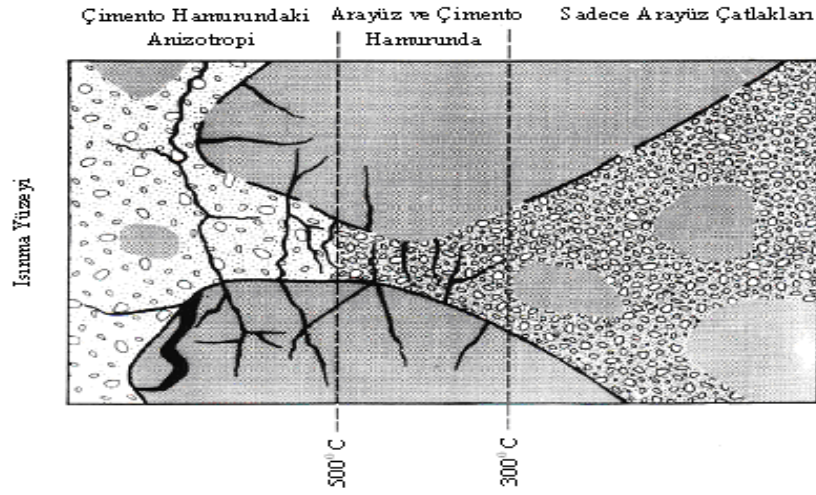
Yüksek sıcaklığın betona etkisi, betonun maruz kaldığı sıcaklık ve sürenin yanı sıra çimento hamuru fazı ve agrega türüne bağlı olarak da değişir ve bu etki betonun basınç dayanımının belirgin bir şekilde azalması ile sonuçlanır [14]. Nispeten büyük boyutlu beton elemanları, davranışlarında yapının son 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. Şekil 3.6'da kare bir kolonda farklı zamanlarda sıcaklık değişimi görülmektedir. Dıştan içe doğru oluşan sıcaklık değişimi zamanın bir sonucudur [78].



Şekil 3.6. (380 mm) boyutlu kare kolonda sıcaklık dağılımı (78)

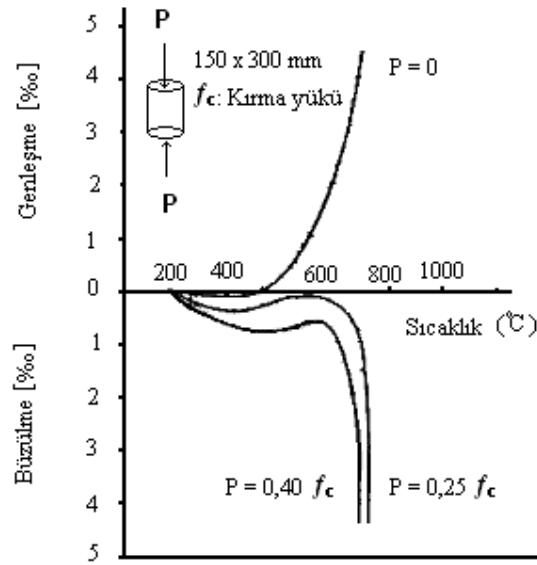
3.3.1. Yüksek Sıcaklığın Betonun Fiziksel Özelliklerine Etkileri

Yüksek sıcaklık, betonun ısı yayınımına, ısı iletkenliğine, ısıl genişmesine, 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. Riley (1991) bir deneysel çalışmada, 30 mm çapında 60 mm yüksekliğinde silindir harç numuneleri yüzeyden itibaren ısıtmış ve sıcaklıkları 5 adet termokupul ile ölçerek izotermeleri çizmiş ve bu noktalardan aldığı ince kesitlerin analizi ile betonun fiziksel özelliklerinin bu izotermelere benzer değişimler gösterdiğini belirtmiştir. Şekil 3.7’de 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 ara yüz çatlakları, 300–500 °C arasında ara yüz 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 özleniyorsa, sıcaklık 500 °C yi aşmış demektir [79].



Şekil 3.7. Yangında hasar görmüş betonun izotermine bağlı özellikleri (79)

Papayianni vd. (2005) tarafından Şekil 3.8’de görüldüğü üzere 150 mm çapında 300 mm yüksekliğindeki silindir beton numunelerde yüksek sıcaklık etkisi esnasında yapılan ölçümlerde yüksüz durumda 400 °C’ye kadar büzülme daha sonra genleşme gözlenmiştir[80].



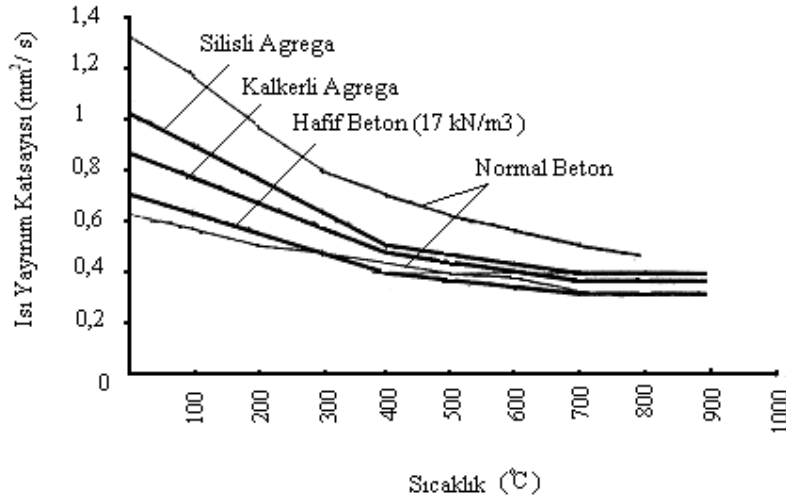
Şekil 3.8. Betonda sıcaklık deformasyon ilişkisi (81)

3.3.1.1. Isı Yayınım Katsayısı

Yüksek sıcaklık etkisinin nedenlerinden biri olan yangından, ısı enerjisinin bir kısmı emilir. Emilen ısı sıcaklığın yükselmesine neden olur. Bu olayda ısı yayınım katsayısı (a), (mm^2/s) etkili olur. Isı yayınım 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 aşağıdaki formül ile hesaplanır [81].

$$a = \frac{\lambda}{c \beta} \quad (3.15)$$

Isı yayınım katsayısı, Şekil 3.9'da de görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu azalma özellikle 100°C civarında bünyedeki suyun buharlaşması nedeniyle daha belirgindir.



Şekil 3.9. Çeşitli betonlar için a ısı yayınım katsayısı (81)

3.3.1.2. Isı İletim 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 iletmesinden 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 [82].

3.3.1.3 Genleşme Katsayısı

Malzemelerin şekil değiştirmesini de etkileyen ısıya ilişkin bir diğer özelliği de ısı genleşmesidir. Betonun genleşme katsayısı (α), ($1/^\circ\text{C}$), üretimde kullanılan agregaların genleşmesine bağlıdır. Çimento hamurunun α 'sı ($11 \cdot 10^{-6}$ - $20 \cdot 10^{-6}$ $1/^\circ\text{C}$) ile agregalarınkinden büyüktür. Genleşme katsayısı en düşük olan doğal taş kalkerdir. Sıcaklık arttıkça α artmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda termik genleşmelerdeki farklılıklardan dolayı oluşan gerilmeler çimento hamuru ile agrega ara yüzünde çatlamalara neden olur [81,83].

3.3.1.4 Özgül Isı

Betonun özgül ısısı, diğer bir deyişle bir gramının sıcaklığını 1°C arttırmak için gerekli olan ısı enerjisi, sıcaklıkla çok az değişir. Bu büyüklüğe agreganın önemli etkisi yoktur [83].

3.3.1.5. Isı Şoku Parametresi

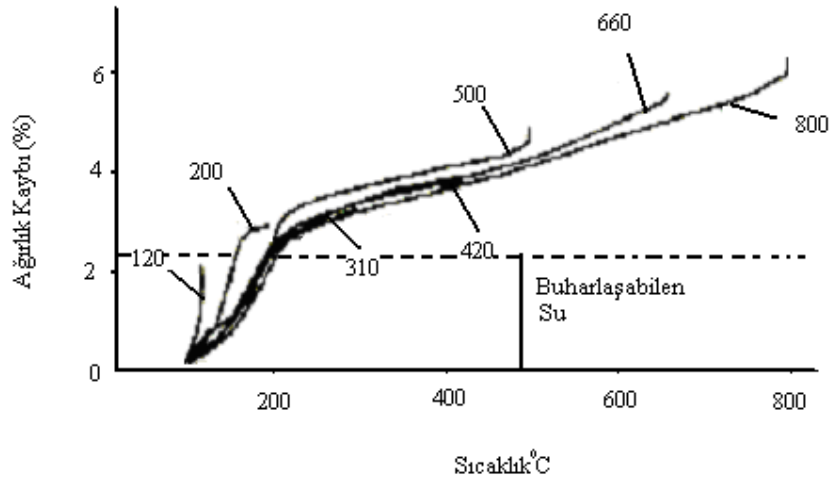
Gevrek malzemelerde sıcaklık değişimleri hızlı ve sıcaklık gradyanı yüksek ise büyük ısı gerilmeleri ve dolayısıyla çatlamlar oluşabilir. “**Isıl şoku**” denilen bu olay ısı iletimine ve ısı genleşmeye büyük ölçüde bağlıdır. Isı iletimi yüksek ve ısı genleşmesi küçük malzemelerde ısı enerji hızla çevreye 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 λ ısı iletim katsayısına, α ısı genleşme katsayısına, σ_c malzemenin çekme mukavemetine ve E elastisite modülüne bağlı olarak aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [84].

$$P = \frac{\lambda \sigma_{\varphi}}{E\alpha} \quad (3.16)$$

3.3.1.6. Birim Hacim Ağırlığı

Sıcaklığın artması ile boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu ağırlık azalır, genleşme nedeniyle hacim artar [82]. Porozite ve su içeriği betonun yangından sonraki hasar kontrol parametreleridir [78]. 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 [85]. Ağırlık ve hacimdeki bu değişimler sonucu birim hacim ağırlığı (β) azalır. Ancak bu azalma ihmal edilebilir düzeydedir [82].

Anderberg-Thelanderson[86] adlı araştırmacı, sıcaklığın etkisi ile birim ağırlığın azalmasına sebep olan ağırlık kaybını silis esaslı agregası ile üretilen betonda araştırmış, bu çalışma sonucunda ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi şekil 3.10'de verilmiştir.



Şekil 3.10. Ağırlık kaybının sıcaklıkla değişimi [86]

Silis dumanı ve uçucu kül mineral katkıları kullanılarak yapılan başka bir çalışmada, suda soğutma etkisi havada soğutmaya nazaran daha az boşluk kalmasını sağlamıştır. Suda soğutma, mikro yapının yoğunluğunun artmasına yardımcı olur. Bunu

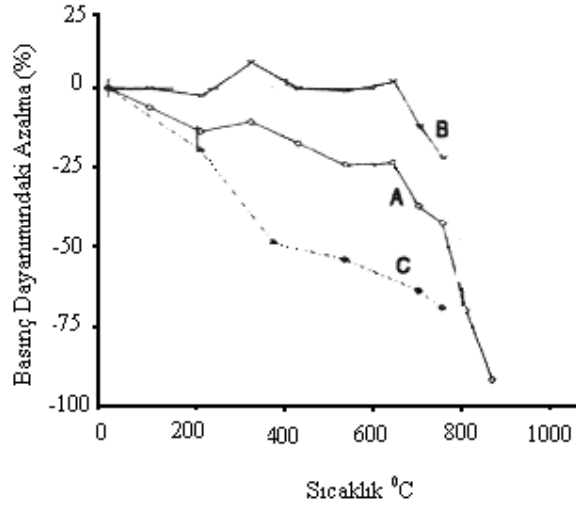
yüksek sıcaklık etkisinden sonra dehidrate olmuş çimento hamuru bileşenlerinin tekrar hidrate olmasını sağlayarak yapar [85].

3.3.2. 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 [87]. Betonarme yapılarda ana taşıyıcının beton olduğunu düşünürsek, betonun yüksek sıcaklıklardaki mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi gerekmektedir.

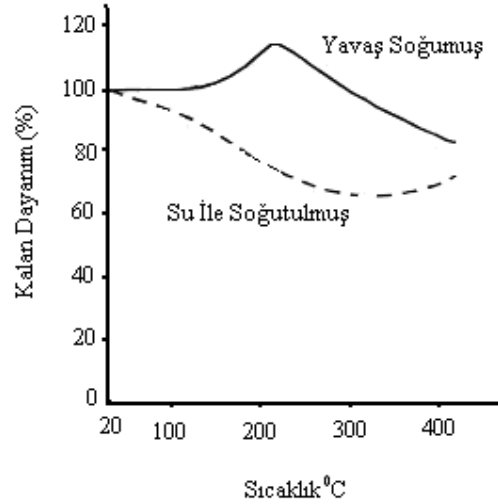
3.3.2.1. Basınç Dayanımı

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 [76]. Yükleme durumuna göre basınç dayanımındaki değişim şekil 3.11’de 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 [76]. Şekil 3.11’deki basınç deneyi sonuçları, C grubu numunelerin temsil ettiği, yüksüz durumda ısıtılıp soğutulduktan sonra basınç dayanımlarının belirlenmesi yönteminin daha güvenli bölgede kaldığını göstermektedir.



Şekil 3.11 Betonun basınç dayanımının yüklemeye göre sıcaklıkla değişimi [76]

Soğutma türünün de yüksek sıcaklığa maruz betonun basınç dayanımına etkisi vardır. Su ile soğutulan numunelerin basınç dayanımlarındaki azalma (Şekil 3.12) havada soğutulan numunelere nazaran daha fazladır [76].



Şekil 3.12. Basınç dayanımının soğutma sekline göre sıcaklıkla değişimi [76]

Shoab vd. [88] 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

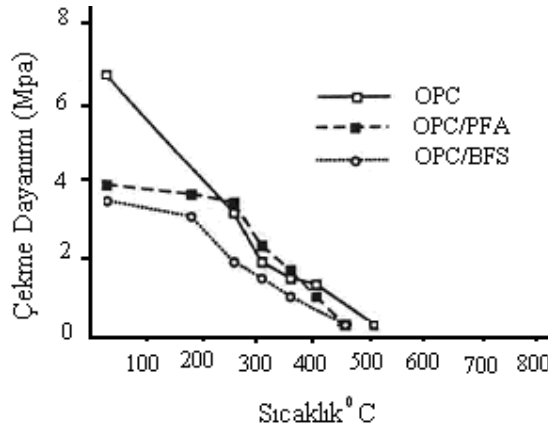
kalan betonda CaO'nun CaCO₃'e dönüşmesiyle ve bunun hacim değişimine ve çatlaklara neden olmasıyla açıklanmıştır.

Lea ve Straaling[40] betonda 300 °C'ye kadar olan dayanım artısına dikkat çekmişlerdir. Dayanımdaki artış silis esaslı agregre ile üretilen betonlarda daha fazladır ve bunun nedeni çimento ile agregre arasındaki aderansın silisli agregalarda daha yüksek olmasıdır.

3.3.2.2. Çekme Dayanımı

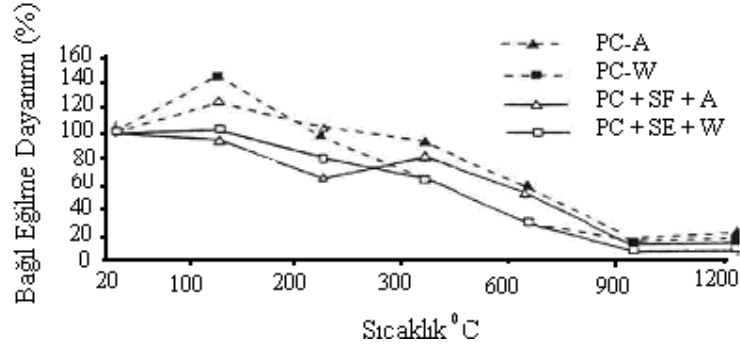
Betonun çekme dayanımı, eğilmede çekme ve yarma deneyi sonuçları ile araştırılır. Silindir numunelerde değişik sıcaklık etkisinde iken ve soğutulduktan sonra yapılan yarma deneyi ile elde edilen çekme dayanımlarında 100 °C'den itibaren önemli düşüşler olmakta ve 600 °C'de kayıp %70'e varmaktadır [81].

Guise vd. [89] 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 şekil 3.13 görülmüştür.



Şekil 3.13. Puzolan katkılı ve katkısız betonların çekme dayanımının sıcaklıkla değişimi[89]

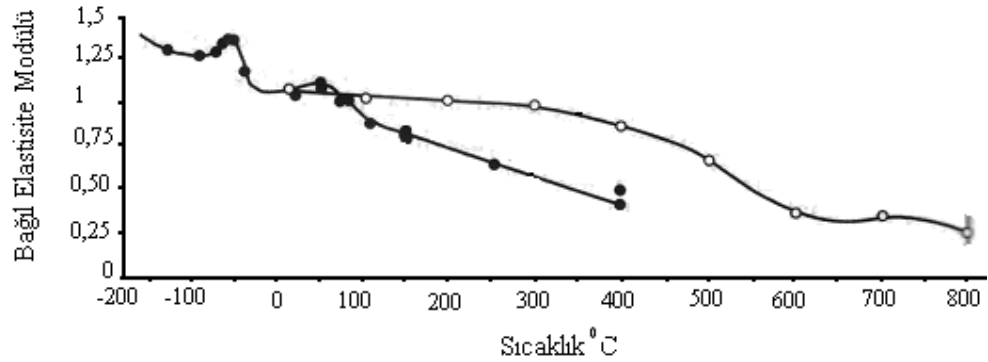
Yüksek sıcaklık etkisinin araştırıldığı silis dumanı katkılı ve katkısız harçlar üzerinde yapılan diğer bir deneysel çalışmada, harçların eğilme dayanımı (Şekil 3.14) 100 °C'den itibaren bütün gruplarda azalmaya başlamış, suda soğutulanlardaki kayıp, 300 °C'de yaklaşık %40'a varmıştır [82].



Şekil 3.14. Betonun Eğilme dayanımının sıcaklıkla değişimi [82].

3.3.2.3. Elastisite Modülü

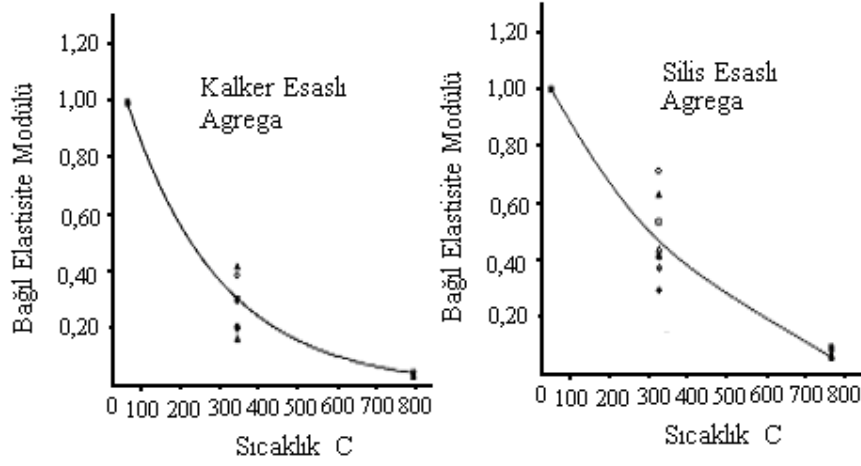
Betonarme yapıların davranışı betonun elastisite modülüne bağlıdır ve bu modül sıcaklıktan oldukça etkilenir. Sıcaklığın betonun elastisite modülüne etkisi şekil 3.15’de verilmiştir. Kütle halinde kür edilmiş betonlarda 21 °C ile 96 °C’ler arasında elastisite modülünün değerinde herhangi bir değişiklik yoktur. Ancak sıcaklık 121 °C’ye ulaştığında elastisite modülünün değeri azalmaktadır. Su betonundan uzaklaştığında, 50 °C ile 800 °C’ler arası elastisite modülündeki azalma giderek artmaktadır. Genel olarak dayanımdaki azalma ile elastisite modülündeki azalma benzer eğilim göstermektedir [76].



Şekil 3.15. Betonun elastisite modülünün sıcaklıkla değişimi [46]

Savva vd. [90] 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

üretile gruplarda daha fazladır (şekil 3.16). Puzolanların elastisite modülüne etkisi açıkça görülmemekle birlikte betonun kırılması daha az gevrektr.



Şekil 3.16. Farklı beton numuneleri için sıcaklık- elastisite modülü ilişkisi [90]

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Farklı agrega türleriyle hazırlanan betona yüksek sıcaklığın etkisinin araştırıldığı bu tez çalışmasında dört değişik tip agrega kullanılmıştır. Kullanılan agregalar sırasıyla kırmataş, kireçtaşı, pomza ve doğal agregadır. Hazırlanan beton numuneler 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklıklara maruz bırakılarak fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

4.1. Numune Üretiminde Kullanılan Malzemeler

Beton üretiminde özellikleri aşağıda verilen agregalar ve çimento kullanılmıştır.

4.1.1. Agregalar

Beton üretiminde, tablo 4.1 de, fiziksel özellikleri verilmiş, tane çapı 16 mm olan ve Elazığ bölgesinden temin edilen doğal agrega, pomza, kırmataş ve kireçtaşı kullanılmıştır(Fotoğraf4.1).

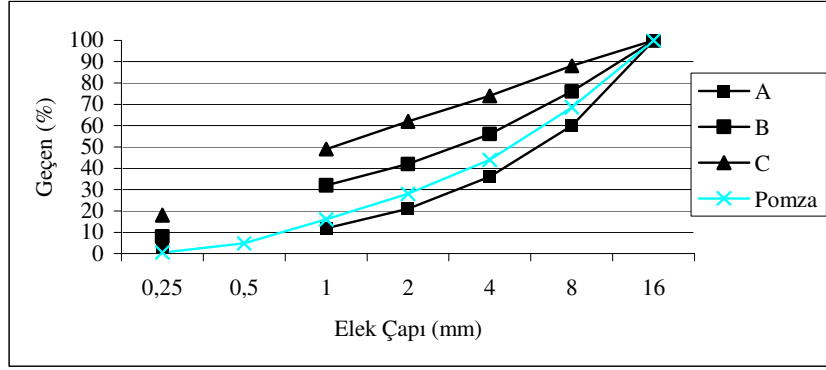


Fotoğraf 4.1 Deneyde Kullanılan Agregalar

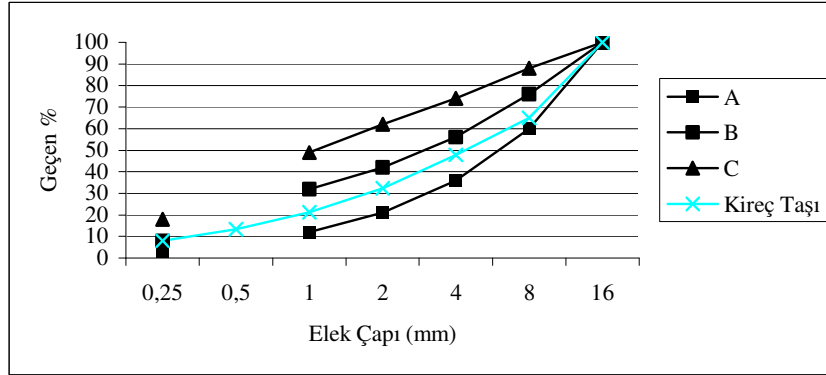
Tablo 4.1.Deneyde kullanılan iri agregaların fiziksel özellikleri

Agrega Tipi	Özgül Ağırlık (gr/cm ³)	Su Emme (%)
Pomza	1,91	22,33
Kireçtaşı	2,66	1,33
Kırmataş	2,70	1,12
Dere	2,79	0,93

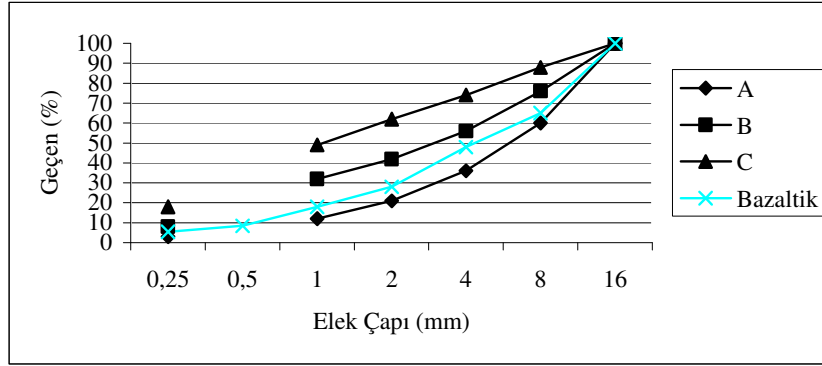
Eleme işlemine tabi tutulacak agrega numunesi önceden etüvde $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ kurutulmuştur. Elek serisi paslanmaz çelikten üretilen 16 mm, 8 mm, 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm ve 0,25 mm olmak üzere 7 adet elekten oluşmuştur. Her elek üzerinde kalan malzemeler alınarak hassas bir şekilde tartılmıştır. Bu işlem sonrasında her elek üzerinde ağırlıkça yüzde ne kadar agrega geçtiği hesaplanarak tane boyutuna göre gerekli granülometrik eğriler çizilerek tane dağılımı bulunmuştur. Agregalara ait granülometri eğrileri şekil 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4’de verilmiştir.



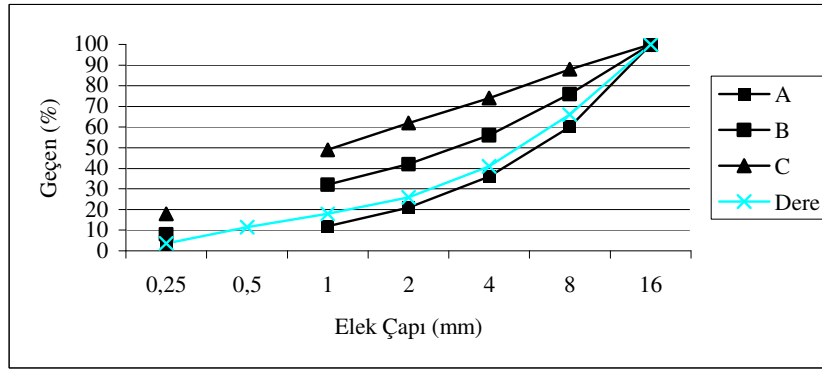
Şekil 4.1. Pomza Granülometrisi



Şekil 4.2. Kireçtaşı Granülometrisi



Şekil 4.3. Bazaltik Kırmataş Granülometrisi



Şekil 4.4. Doğal Agregra Granülometrisi

4.1.2. Çimento

Numunelerin hazırlanmasında Elazığ Çimento Fabrikası A.Ş.'nin üretmiş olduğu CEM I 42,5 kullanılmıştır. Çimento Fabrikadan alındıktan sonra deney süresi boyunca uygun koşullarda saklanarak tüm seriler için aynı koşullarda kullanılmıştır. Tez çalışmasında kullanılan çimentonun dozajı 400 kg/m^3 'tür. Bu çimentoya ait fiziksel ve kimyasal özellikler tablo 4.2'de verilmiştir.

Tablo 4.2. Deneyde Kullanılan Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Çimento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K.K.	Blaine	Özg.Ağ.	F _{ce}
PC.42,5	21,12	5,62	3,24	62,94	2,73	1,79	1,78	3382	3,07	51,7

4.1.3. Karışım Suyu

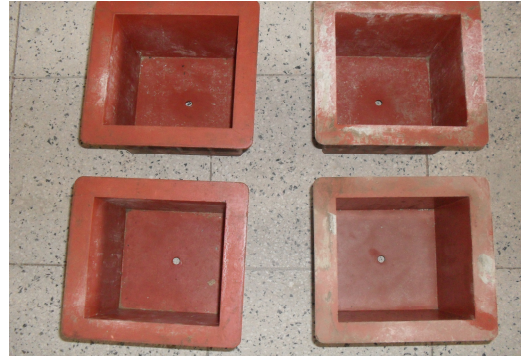
Beton numunelerinin hazırlanmasında kullanılan karışım suyu Elazığ şehir şebekesinden (içme suyu) temin edilmiştir.

4.1.4. Beton Numunelerin Boyutları, Kür ve Bakımı

Çalışmada kullanılacak betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile 100x100x100 mm ve 150x150x150 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir(Fotoğraf 4.2).



a) 10x10x10 Beton Numune Kalıbı



b) 15x15x15 Beton Numune Kalıbı

Fotoğraf 4.2. Numune Kalıpları

Dökülen numuneler bir gün süre ile kalıplarda bekletildikten sonra, özellikle numune köşe ve kenarları zarar görmeyecek şekilde özenle kalıplardan sökülerek kür tankına yerleştirilmiştir. Kür tankının sıcaklığı 23±2 °C'de sabit tutulmuştur.



a) 15x15x15 cm Numuneler

b) 10x10x10 cm Numuneler

Fotoğraf 4.3 Numuneler

4.2. Yapılan Deneyler

Betonun mekanik özelliklerini belirlemek amacı ile hazırlanan beton numunelere hasarlı ve hasarsız bazı deneyler yapılmıştır. Ayrıca numunelerin üretim aşamasında taze beton deneyi de yapılmıştır. Taze betonlarda yapılan deney yayılma tablası deneyidir. Sertleşmiş betonlara uygulanan hasarsız deney, ultrases geçiş hızı deneyidir. Hasarlı deney olarak da, basınç deneyi ve aderans dayanımını belirlemek içinde çekip çıkarma (pull-out) deneyi yapılmıştır. Farklı türde agregalarla hazırlanan beton numuneleri, oda sıcaklığı, 300⁰ C, 600⁰ C ve 900⁰ C maruz kaldıktan sonra yukarıda belirtilen hasarlı ve hasarsız deneylere tabi tutulmuşlardır.

4.2.1. Yüksek Sıcaklık Deneyi

Beton numunelere yüksek sıcaklık uygulaması, Fırat Üniversitesi Yapı Laboratuvarında bulunan ısınma hızı 6⁰C/dk. olan 1200⁰C kapasiteli Protherm HLF 150 markalı laboratuvar tipi fırında yapılmıştır.



Fotoğraf 4.4 Yüksek Sıcaklık Fırını

Bu fırında sırasıyla 300⁰ C, 600⁰ C, 900⁰ C'lik sıcaklıklar uygulanmıştır. Her bir numune sıcaklık deneyinde önce 1 gün süreyle 100 ±5⁰ C etüv sıcaklığında bekletilmiş ve bu işlem sonucunda kurutulan beton numuneler yüksek sıcaklıklara tabi tutulmuşlardır. Yüksek sıcaklık gören beton numuneler hasarlı ve hasarsız deneylere alınmışlar bulunan sonuçlar grafiğe taşınmış ve daha sonra karşılaştırılmışlardır.

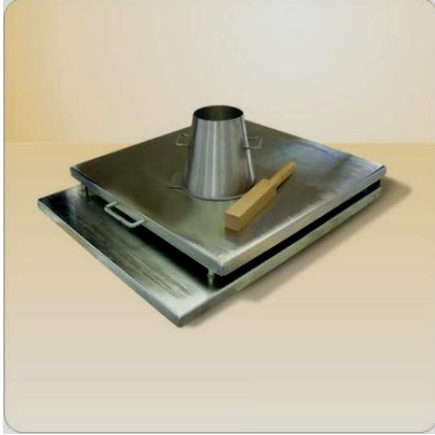


Fotoğraf 4.5 Etüv (Kurutma Fırını)

4.2.2. Taze Beton Deneyi

4.2.2.1. Yayılma Tablası Deneyi

Yayılma tablası deneyi TS EN 12350-5 standartlarına uygun olarak taze betonun işlenebilirliğinin, bir tabla üzerinde düşme hareketi yapılarak üzerindeki betonun yayılmasını ölçme yoluyla taze betonun kıvamını belirlemektir. Çalışmada yayılma deneyi için, üzerine betonun konulabileceği 700 ± 2 mm ölçülerinde kare yüzey alanlı hareketli düz plaka ve bu plakanın üzerine belirli yükseklikten düşürüleceği üstteki plakanın menteşeye bağlı olduğu sert alt tabakadan meydana gelen tabla, taban çapı 200 ± 2 mm üst yüz çapı 130 ± 2 mm olan çökme hunisi ve yaklaşık 200 ± 2 uzunluğunda 40 ± 1 mm kare kesitli sıkıştırma çubuğu kullanılır. Taze beton çökme hunisine iki eşit tabaka halinde kepçe kullanılarak doldurulur. Her tabaka sıkıştırma çubuğu ile 10 defa şişlenerek yerleştirilir.



Fotoğraf 4.6. Yayılma Tablası Deney Elemanları

Çökme hunisinin üst yüzeyinin sıyırılmasından sonra, çökme hunisi el tutamaklarından tutularak düşey şekilde yukarıya çekilerek alınır. Üst plaka, alt durdurucular üzerine serbestçe düşürülür. Bu düşürülme işlemi 15 kez yapılarak tamamlanır. Düşürülme işlemi tamamlandıktan sonra üst plakaya yayılan beton tabakasının en büyük boyutları, plaka kenarlarına paralel iki doğrultuda cetvelle d_1 ve d_2 mm olarak ölçülür[64].

Tablo 4.3. Yayılma Sınıfları

Sınıf	Yayılma çapı (mm)	Tolerans
F ₁	≤ 340	± 30
F ₂	350 - 410	
F ₃	420 - 480	
F ₄	490 - 550	
F ₅	560 - 620	
F ₆	≥ 630	

Bu çalışmada, bütün taze beton numunelerinde tablo 4.3'de ki yayılma sınıflarından F₃ deki yayılma çapı (420-480 mm) esas alınmıştır.

4.2.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

4.2.3.1. Tek Eksenli Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyi, 100x100x100 mm ve 150x150x150 mm küp numuneler üzerine gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanım deneyi, TS EN 12390-3 standardı uyarınca ve 3000 kN kapasiteli otomatik konsollu pres kullanılarak uygulanmıştır.



Fotoğraf 4.7 Tek Eksenli Basınç Dayanım Test Aleti

Basınç dayanımı aşağıdaki formülle hesaplanmıştır;

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4.1)$$

Burada;

σ_c : Beton deney numunesi basınç dayanımı (N/mm²)

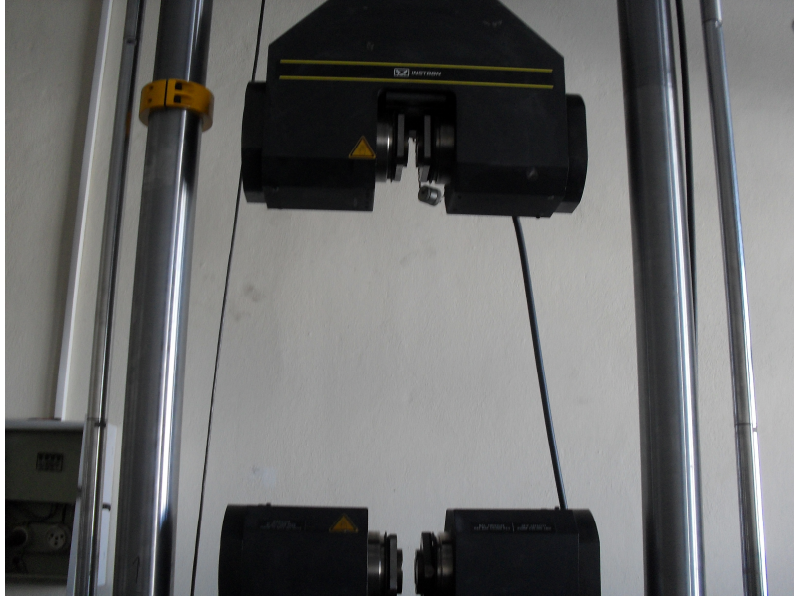
P: Kırılma yükü (N)

A: Kesit alanı (mm²)

Basınç dayanım deneyi, farklı sıcaklıklara maruz kalmış her üç numune için gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı bu numunelerin ortalamaları alınarak belirlenmiştir.

4.2.3.2. Çekip – Çıkarma (pull-out) Deneyi

Çekip-çıkarma deneyi, 150x150x150 mm küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Bütün deney numuneleri belirlenen yaşa (28 gün) geldiklerinde sonra ASTM C 234-9 standardı uyarınca yapılmıştır. Çekip - çıkarma deneyi için INSTRON 8503 çekme makinesi kullanılmıştır. Deneylerde çekme makinesinin hızı 2 mm/dk. olacak şekilde sabit tutulmuştur.



Fotoğraf 4.8 Çekme Makinesi

Çekip - çıkarma deneyi aşağıdaki formülle hesaplamıştır;

$$\tau = \frac{\text{Aderans Kuvveti}}{\pi \cdot \Phi \cdot l} \quad (4.2)$$

Burada;

τ = Aderans gerilmesi

Φ = Donatı çapı

l = Aderans boyu (betona gömülü donatı uzunluğu) alınmıştır.



Fotoğraf 4.9 Bazı numunelerin deney sonrası durumları

4.2.3.3. Ultrasonik Test

Ultrasonik test için 10x10x10 mm ve 15x15x15 mm boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. Beton numuneler ASTM C 597 standartına uygun 0,1µs duyarlıklı ultrases aleti ile ölçülmüştür. Bu deney için hazırlanan numunelerin 4 yüzeyinden karşılıklı olarak 2 okuma gerçekleştirilmiş ortalama değerler alınmıştır.



Fotoğraf 4.10 Ultrasonik Test Aleti

Ultras ses geçiş hızı aşağıdaki bağıntıdan yararlanılarak hesaplanmıştır,

$$V = \frac{S}{t} \cdot 10^6 \quad (4.3)$$

Burada;

V = Ses üstü dalga hızı (metre/saniye)

S = Beton bloğun ses üstü dalga gönderilen yüzeyi ile dalganın alındığı yüzey arasındaki mesafe (metre)

t = Ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman (mikrosaniye).

4.2.3.4. Porozite

28 gün sonra kür tankından çıkarılan numuneler yüksek sıcaklık öncesi porozite değerleri kaydedilmiştir. Porozite değerini bulmak için aşağıdaki formülden faydalanılmıştır,

$$P = \frac{(W_{dyk} - W_{kuru})}{(W_{dyk} - W_{su})} \times 100 \quad (4.4)$$

Burada;

W_{dyk} = Numunenin doygun yüzey kuru ağırlığı (kg)

W_{kuru} = Numunenin etüvde kurutulduktan sonraki ağırlığı (kg)

W_{su} = Numunenin su altı ağırlığı (kg)

Tablo 4.4 Sertleşmiş Betonun Bazı Fiziksel Özellikleri

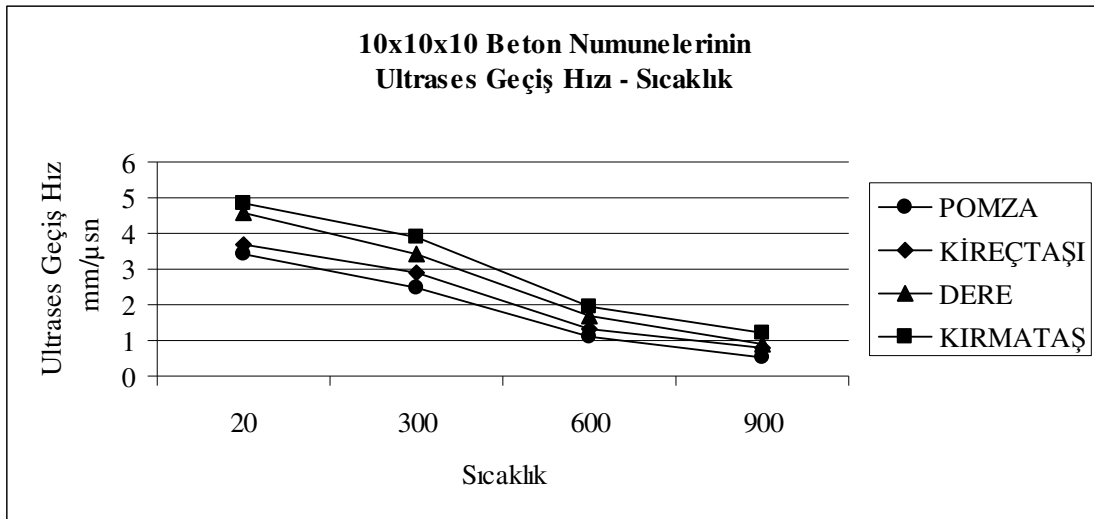
Malzeme	Porozite (%)	Birim Ağırlık (gr/cm ³)
Pomza	17,6	1,56
Kireçtaşı	10,6	2,06
Dere	5,98	2,19
Kırmataş	4,82	2,3

5. DENEYSEL ÇALIŞMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

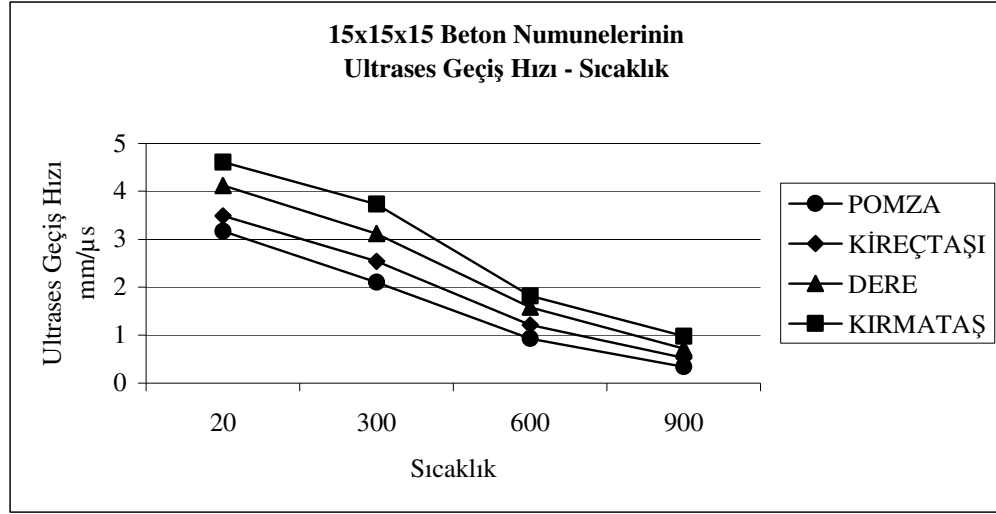
5.1. Ultrasonik Test Değerlerinin Değerlendirilmesi

Boyuna ses geçiş dalgalarının değerlendirilmesi esasına dayanan ultrases metodu, basit ve ucuz olması nedeni ile betonun tahribatsız deneyleri için çok kabul gören yöntemlerden biridir. Ultrasonik dalga'nın bir ortamda yayılma hızı o ortamın boşluk yapısına dolayısıyla yoğunluğuna ve elastik özelliklerine bağlıdır. Bu bölümde yapılan ultrases ölçümleri ile yüksek sıcaklığın betonun boşluk yapısına etkileri değerlendirilmiştir.

Ultrasonik test için 10x10x10 cm ve 15x15x15 cm boyutlarında küp numuneler kullanılmıştır. Ses geçiş sürelerinin ölçülmesinde mala yüzeyindeki pürüzleri doldurmak amacı ile numunenin yanal yüzlerine vazelin sürülmüş, 55 kHz 'lik ses dalgaları gönderen ve alan iki pulslar numunenin düzgün yüzeylerine yerleştirilmiş ve ses geçiş süreleri okunmuştur. Bu şekilde deney için hazırlanan numunelerin 4 yan yüzeyinden karşılıklı olarak 2 okuma gerçekleştirilerek ortalama değerler kaydedilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar şekil 5.1 ve 5.2 de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. 10x10x10 Numunelerin Ultrases Geçiş Hızı – Sıcaklık Grafiği



Şekil 5.2. 15x15x15 Numunelerin Ultras ses Geçiş Hızı – Sıcaklık Grafiği

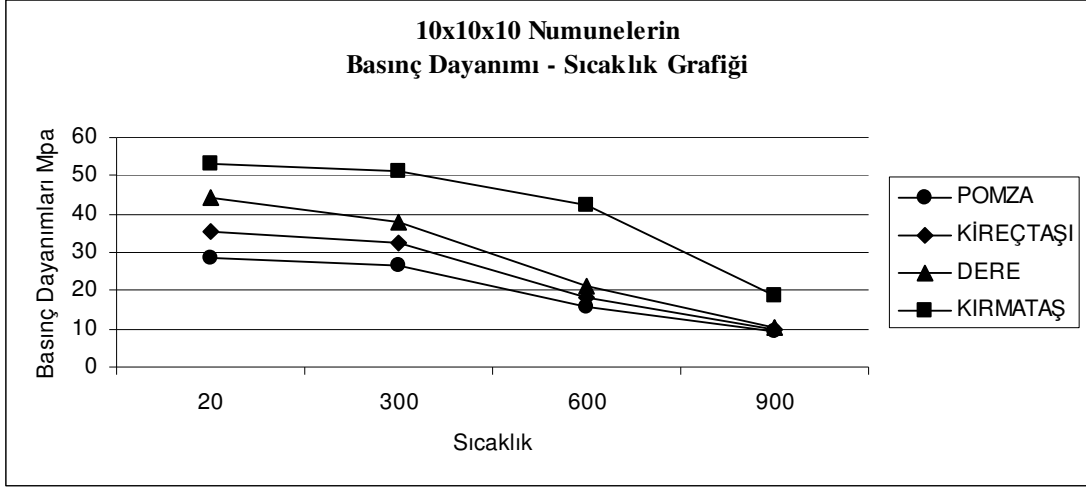
Boşluk miktarı çok olan bir betondan ses üstü dalga hızının geçiş süresi daha uzundur. Betonun boşluk yapısı, yoğunluğu ve agregalarla yakından ilişkilidir. Bundan dolayı test sonuçlarının kontrol numuneleri incelendiğinde doğal agregalı ve kırmataş agregalı betonlar birbirine yakın özellik gösterirken kireçtaő agregalı ve hafif agregalı betonlar da ses üstü dalga hızı geçişi daha düşüktür.

Kontrol numunelerinden en düşük ses geçiş hızını 3,4 mm/μs ile hafif agregalı betonlar verirken en yüksek ses geçiş hızını 4,83 mm/μs ile kırmataş agregalı betonlar vermiştir.

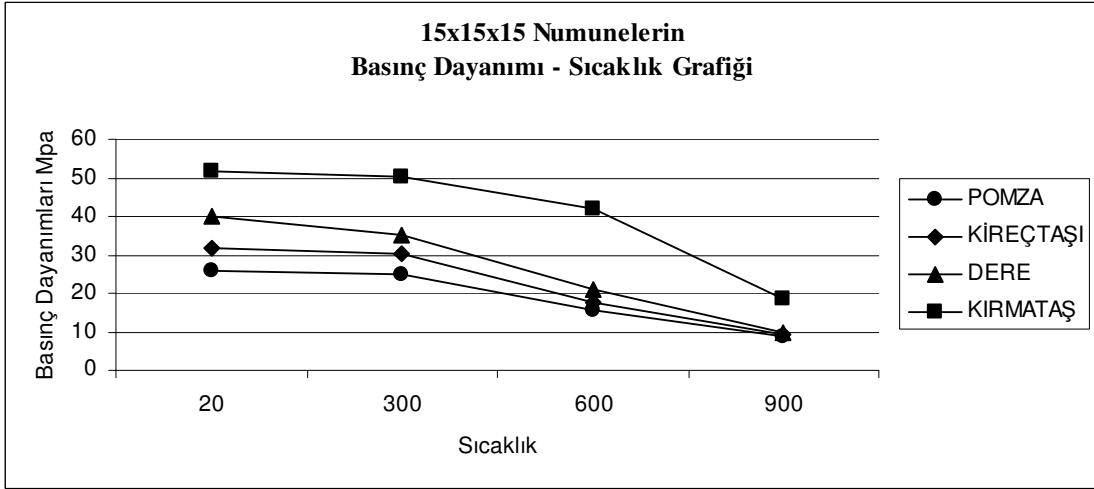
Tüm numunelerin ultras ses deneyi sonuçlarına göre ses geçiş hızlarında 300 °C 'de yaklaşık % 21, 600 °C'de %65, 900 °C de %85 düşüş olmuştur. Bu durum sıcaklığın etkisiyle betondaki agrega ile çimento hamuru arasındaki termal uyumsuzluğun toplam boşluk oranının arttırması ile açıklanabilir.

5.2. Basınç Dayanımının Değerlendirmesi

Basınç dayanım deneyi için 10x10x10 cm ve 15x15x15 cm boyutlarındaki küp numuneler kullanılmıştır. 300 °C, 600 °C,ve 900 °C sıcaklıklara maruz kalan numuneler havada soğutulup, standartlarda belirtilen hususlara da dikkat edilerek deney presine yerleştirilmiş ve kırım gerçekteştirilmiştir. Çalışmada elde edilen sonuçlar Şekil 5.3 ve 5.4 gösterilmiştir.



Şekil 5.3 10x10x10 Numunelerin Basınç Dayanım – Sıcaklık Grafiği



Şekil 5.4 15x15x15 Numunelerin Basınç Dayanım – Sıcaklık Grafiği

Tüm beton serilerinin uygulanan sıcaklıklara göre dayanım ilişkileri incelendiğinde sıcaklık arttıkça basınç dayanımında azalmalar gözlenmiştir. Tüm kontrol numunelerinden elde edilen değerler çerçevesinde en yüksek dayanımı kırmataş agregalı beton elde ederken en düşük dayanıma sahip olan hafif agregalı beton olduğu gözlemlenmiştir.

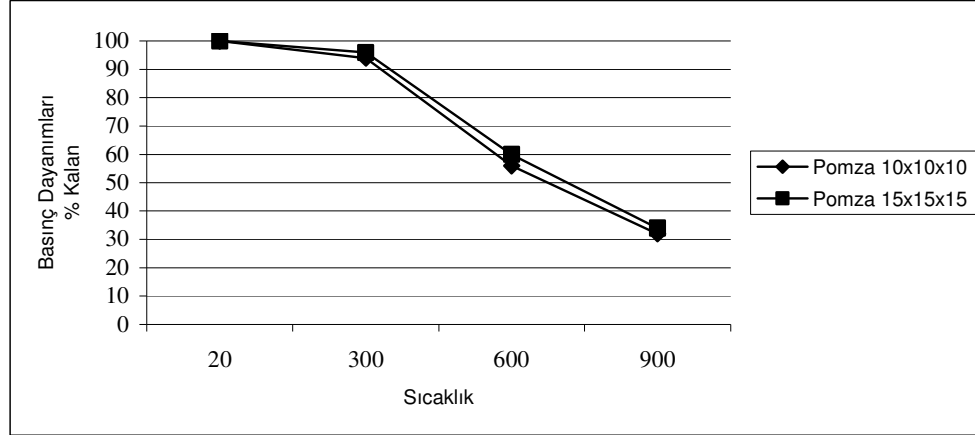
Tüm numunelerinin basınç dayanımları sonuçlarına göre 300 °C de yaklaşık %5, 600 °C de yaklaşık %45, 900 °C de ise yaklaşık % 70 dayanım kaybına uğramışlardır. Bunun nedeni olarak çimento hamurunda jel yapıyı oluşturan kalsiyum silikat hidratinin (CSH) katı ögeleri, adsorpsiyon suyu yardımıyla birbirine 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 büzülme (rötreye) neden olur. Üretimdeki su/çimento oranına bağlı olarak serbest su, beton hacminin yaklaşık %4'üne kadar varabilir. Bu su kaybının neden olduğu büzülme ve beton içinde oluşan buhar basıncı betonun çatlamasına ve parça atmasına neden olur.

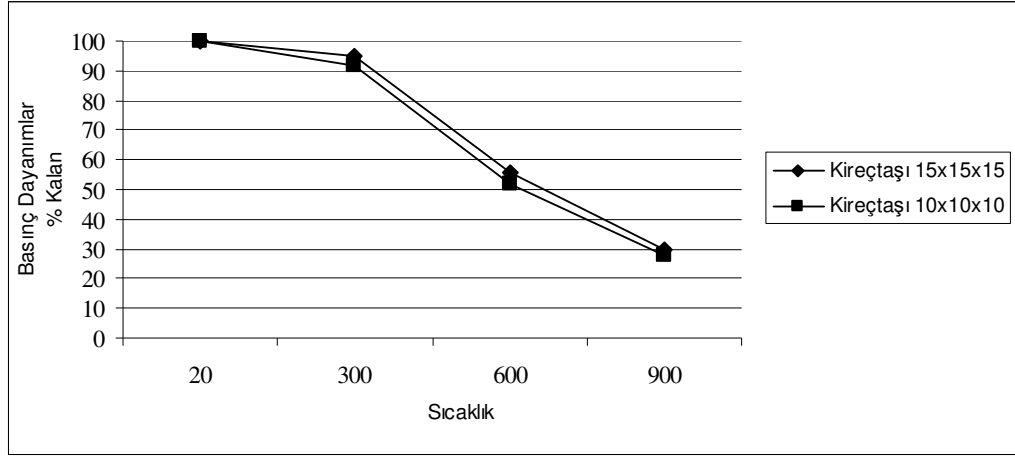
Çimento hamurundaki bir diğer önemli bileşen kalsiyum hidroksittir. Ca(OH)_2 530 °C civarında sönmemiş kirece dönüşür. Bu dönüşümde yaklaşık %33'e varan bir büzülme meydana gelir. Bu büzülme ve hacim değişikliği sonucu bünyede çatlaklar oluşur, beton ufalanır, boşluklu bir yapıya dönüşür[91].

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 [92]. Kalkerli ve dolomitli agregalarda ise karbonatlar 800-900 °C de CaO veya MgO ya dönüşür. Sıcaklık yükseldikçe kalker veya dolomit genişir, CO_2 'nin ayrışması ve CaO nun veya MgO nun meydana gelmesi ile büzülme başlar. Bu olaydaki hacim değişikliği hasara neden olur[93].

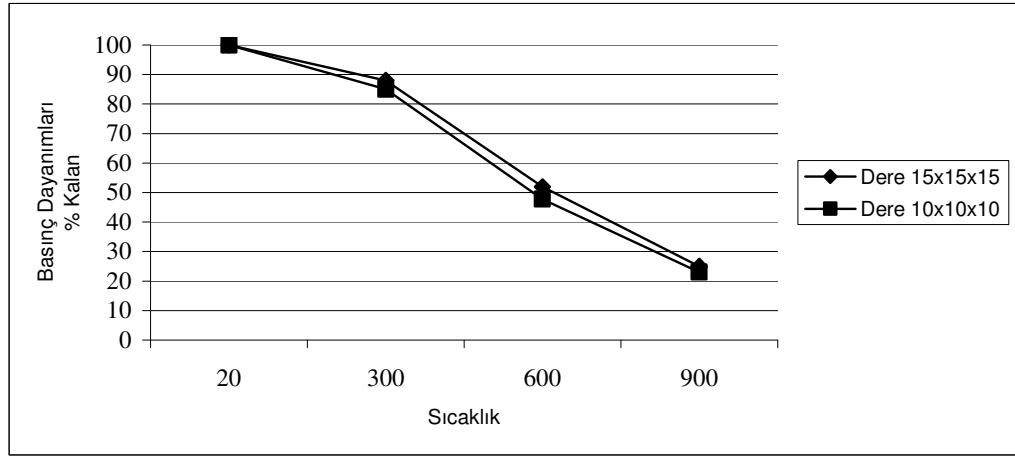
Yapılan deneysel çalışmada yüksek sıcaklığın numunenin boyutuna etkisi de araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar aşağıdaki şekil 5.5, 5.6, 5.7 ve 5.8 de verilmiştir.



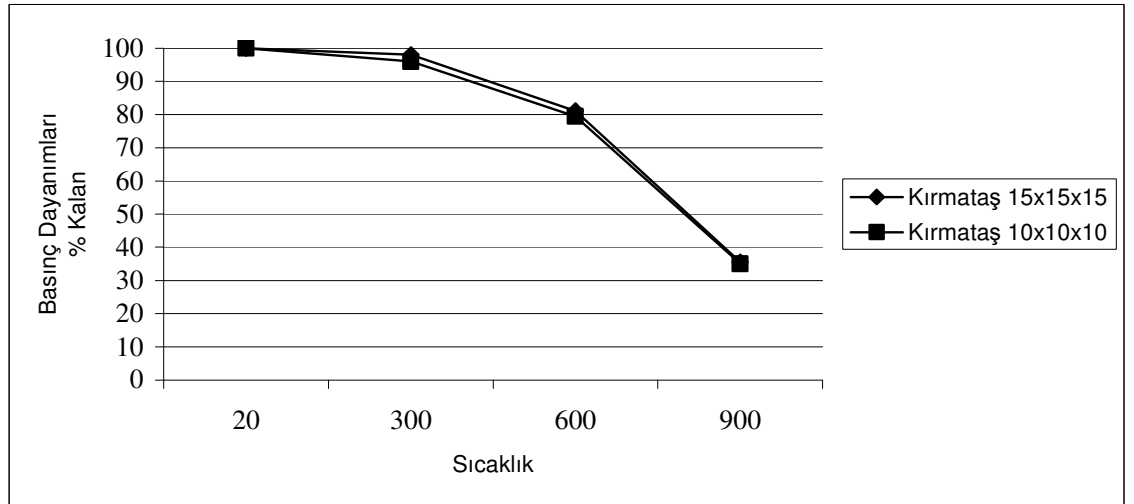
Şekil 5.5 Pomza agregası ile üretilen beton numunelerin boyutlarının karşılaştırılması



Şekil 5.6. Kireçtaşı agregası ile üretilen beton numunelerin boyutlarının karşılaştırılması



Şekil 5.7. Dere agregası ile üretilen beton numunelerin boyutlarının karşılaştırılması

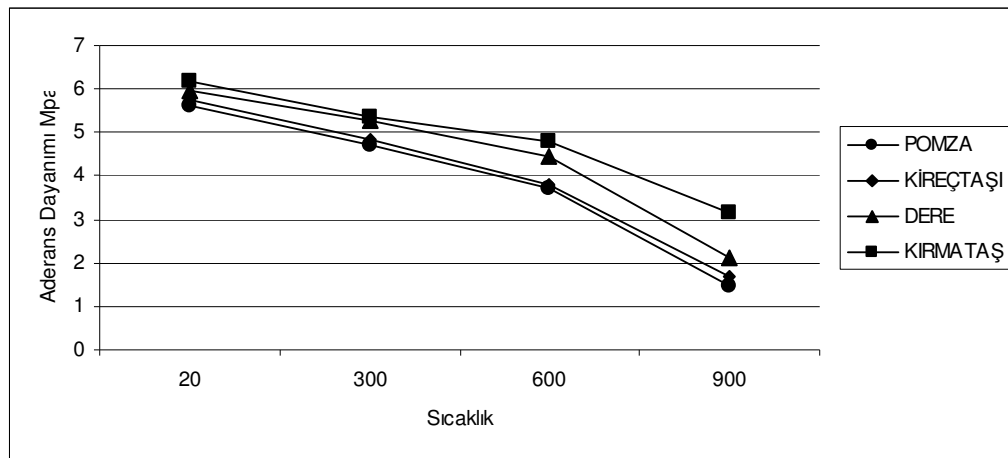


Şekil 5.8. Kırmataş agregası ile üretilen beton numunelerin boyutlarının karşılaştırılması

Basınç dayanım kayıpları 15x15x15 cm lik numunelerde 10x10x10 cm lik numunelere nazaran daha azdır. Bunun nedeni, sıcaklığın büyük numunelerin merkezine etkisinin daha zor olduğu haliyle sıcaklık etkisinin sadece yüzeyde kaldığı olarak açıklanabilir. Bu durum 10x10x10 cm lik numunelerde ise tam tersidir. Sıcaklık, küçük numunelerde betonun merkezine kadar etkileyerek dayanım kaybının artmasını sağlamıştır.

5.3. Aderans Deneyinin Değerlendirmesi

Yüksek sıcaklığın betonun aderans dayanımına etkisini araştırmak için 15x15x15 cm lik beton numunelere çekip çıkarma (pull - out) deneyi uygulanmıştır. Bu deneyden elde edilen sonuçlar şekil 5.9 da verilmiştir.



Şekil 5.9 Aderans Dayanımı – Sıcaklık Grafiği

Sıcaklık etkisi ile betondaki çatlakların genişlemesi ve betonun donatıyı yeterince sarmaması, beton ile donatı arasındaki aderans kuvvetinin düşmesine neden olmaktadır. Sıcaklıklara göre aderans dayanımlarının verildiği şekil 5.9 da bu düşme belirgin olarak göze çarpmaktadır. Kırmataşla hazırlanan betonlar her sıcaklıkta diğer agregalı betonlara göre daha yüksek dayanım sergilediği ve doğal agregalı betonların bunu takip ettiği görülmektedir. Kireçtaşı ve hafif agregalı betonların aderans dayanımları daha düşüktür.

6. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında farklı agregalı betonların mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler ışığında aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Kontrol numuneleri incelendiğinde ses üstü dalga hızı geçişi, doğal agregalı ve kırmataş agregalı betonlarda birbirine yakın özellik gösterirken kireçtaşı agregalı ve hafif agregalı betonlar da daha düşüktür.
- Sıcaklığın artması agrega ile çimento hamuru arasında termal uyumsuzluğa neden olduğundan betondaki toplam boşluk hacmi artar bunun sonucu olarak ta ses geçiş hızlarında düşüşler gözlenmiştir.
- Farklı agregalı betonların basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek dayanımı kırmataş agregalı betonlar gösterirken, en düşük dayanımı hafif agregalı betonlar göstermiştir.
- 10x10x10 cm ile 15x15x15 cm lik numunelerin basınç dayanımları arasındaki oran 0,90-0,93 arasında değişmektedir.
- Sıcaklık artışı agregaların değişik özelliklerinden dolayı betonlarda farklı dayanım kayıplarına neden olduğu gözlenmiştir. Hafif agregalı betonların agrega yapısından dolayı dayanım kayıplarındaki azalmalar diğer agregalarla hazırlananlara nazaran daha azdır.
- Beton numunelerin boyut farklılıkları sıcaklığın etkilediği derinlik bakımında değişiklik göstermiştir. 10x10x10 cm lik beton numunelerin basınç dayanım kayıpları sıcaklıktan daha fazla etkilenirken 15x15x15 cm lik beton numuneleri daha az etkilenmiştir. Bunun sebebi olarak da sıcaklık küçük numunelerin içerisine kadar etki ederken büyük numunelerde bu etki daha azdır.
- Çekip-çıkarma deneyi sonucunda sıcaklık artışı, beton ile donatı arasındaki aderans kuvvetini zayıflatmıştır.
- Yapılan literatür taramasında yüksek sıcaklığın betonun mekanik özelliklerine etkisi hakkında hazırlanan bir çok makaleye rastlanmıştır. Ancak beton hacminin %60-80 oranında kaplayan agregaların yüksek sıcaklık altındaki davranışı üzerine hazırlanan makale sayısı azdır. Agregaların yüksek sıcaklık altındaki

davranışları daha iyi Değerlendirmeleri ve bu konu üzerinde daha fazla durulması önerilir.

- Yapılan deney sonuçlarına göre kırmataş ile hazırlanan beton numuneler yüksek sıcaklık altında en iyi verimi sağlamıştır. Bu yüzden hazırlanacak beton numunelerin kırmataş ile hazırlanması önerilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Luccioni B.M., Figueroa MI, Danesi RF.,**(2003) “Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures.” *Engineering Structure* 2003;25:729–42
- [2] **Sanad A.M., Lamont S, Usmani AS, Rotter JM.,**(2000) “Structural behaviour in fire compartment under different heating regimes—Part 1 (slab thermal gradients).” *Fire Safety Journal* 2000;35:99–116.
- [3] **Hertz K.D.,** “Concrete strength for fire safety design.” *Magazine of Concrete Research*, 2005;57(8):445–53.
- [4] **Khoury G.A., Majorana CE, Pesavento F, Schrefler B.A.,**(2002) “Modelling of heated concrete.” *Magazine of Concrete Research*, 2002;54(2): 77–101
- [5] **Akman M.S.,**(2000) “Building damages and repair principles” *Turkish Chamber of Civil Engineers* 2000: Istanbul, Turkey; 2000.
- [6] **Ali F., Nadjai A., Silcock G., Abu-Tair A.,**(2004) “Outcomes of a major research on fire resistance of concrete columns.” *Fire Safety Journal* 2004;39:433–45.
- [7] **Cioni P., Croce P., Salvatore W.,**(2001) “Assessing fire damage to r.c. elements.” *Fire Safety Journal* 2001;36:181–99.
- [8] **Kalifa P., Menneteau DF, Quenard D.,**(2000) *Cement Concrete Research* 2000;30:1915–27.
- [9] **Ichikawa Y., England GL.**(2004) “Prediction of moisture migration and pore pressure build-up in concrete at high temperatures.” *Nuclear Engineering Design*, 2004;228:245–59.
- [10] **Hertz K.D., Sorensen L.S.,**(2005) “Test method for spalling of fire exposed concrete”. *Fire Safety Journal*, 2005;40:466–76.
- [11] **Sakr K., El-Hakim E.,** (2005) “Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties.” *Cement and Concrete Research*, 2005;35:590–6.
- [12] **Savva A., Manita P., Sideris K.K.,**(2005) “Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates”. *Cement Concrete Composites* 2005;27:239–48.

- [13] **Alonso C., Andrade C. ve Castellote M. ve Khoury G.A.**, (2003), “Microstructure-Solid Phases”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy
- [14] **Akman M.S.**, (2000), “Yapı Hasarları ve Onarım İkeleri” TMMOB İnsaat Mühendisleri Odası, İstanbul.
- [15] **Shoaib M.M., Ahmed S.A. ve Balaha M.M.**, (2001), “Effect of Fire and Cooling Mode on the Properties of Slag Mortars”, Cement and Concrete Research, sayı 31, sayfa 1533-1538.
- [16] **Perkins P.H.**, (1986), “Repair, Protection and Waterproofing, of Concrete Structures”, Elsevier Applied Science Publishers Ltd., England.
- [17] **Riley, M. A.**, (1991)“Possible New Method for the Assessment of Fire Damaged Concrete ” Magazine of Concrete Research, Cilt 43, No155, 87-92, 1991.
- [18] **Hammer, T. A.**, (1995)“Compressive Strength and E Modulus of Elevated Temperatures”, Report 6.1, High Strength Phase 3.SINTEF-repport nr STF70 A 95023, Trondheim, 16 pp, 1995.
- [19] **Aydın S., Baradan B.**, (2003), “Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Gelistirilmesi”, TMMOB İnsaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, sayfa 451-460, İstanbul,
- [20] **Baradan B., Yazıcı H. ve Ün H.**, (2002), “Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)”, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, yayın no 298, İzmir.
- [21] **Khoury G.A.**, (2003), “Fire & Assessment”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- [22] **Schrefler B.A., Brunello P., Gawin D., Majorana C.E. ve Pesavento F.**, (2002)“Concrete at High Temperature with Application to Tunnel Fire”, Computational Mechanics, Vol 29, p: 223-234, 2002
- [23] **Gustaferro, A.H., Abrahms, M.S. and Litvin A.**,(1971) “Fir Resistance of Lightweight Insulating Concrete” Lightweight Concrete, ACI Publications SP 29, p: 161-180, 1971
- [24] **Zoldners, N.G. and Wilson, H.S.**, (1973)“Effect of sustained and cyclic temperature exposures on lightweight concrete, Behavior of concrete under temperature extremes” ACI Publication, (39) 9 p: 149-178, 1973

- [25] **Ataman, R.**, (1991) "Beton Yapıların Yangın Dayanımlarının İncelenmesi" Yüksek Lisans Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1991
- [26] **Kristensen, L. ve Hansen, T.C.**, (1994) "Cracks in concrete core due to fire on thermal heating shock" ACI Materials Journal, 91 (5), p:453-459, 1994.
- [27] **Saad, M., El-Enein, A., Hana, G.B. ve Kotkata, M.F.**, (1996) "Effect of temperature on physical and mechanical properties of concrete containing silica fume" Cement and Concrete Research, 26, p:669-675, 1996.
- [28] **Lin, W.M., Lin, T.D. and Powers-Couche, L.J.**, (1996) "Microstructures of Fire Damaged Concrete" ACI Materials Journal, 93(3), p:199-205, 1996
- [29] **Karaca, Z., Durmuş, A. ve Hüsem, M.**, "Hafif Betonların Yangın Dayanımlarının İncelenmesi" İnşaat Mühendisliğindeki Gelişmeler 3. Teknik Kongre, Ankara, 1997
- [30] **Phan, L.T. ve Carino, N.J.**, "Review of Mechanical Properties of HSC at Elevated Temperatures" Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.10, p:58-64, 1998.
- [31] **Chan, Y. N., Peng, G.F. ve Anson, M.**, "Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures" Cement and Concrete Composites, 21, p:23-27, 1999.
- [32] **Lawson, J.R., Phan, L.T. ve Davis, F.**, (2000) "Mechanical Properties of high performance concrete after exposure to elevated temperatures" Department of Commerce Technology Administrations. NIST, USA, 2000
- [33] **Luo, X., Chan, S.Y.N., ve Sun, W.**, (2000) "Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete" Construction and Building Materials, 14, p: 261-266 2000.
- [34] **Kalifa. P., Menneteau, F.D. ve Quenard, D.**, (2000) "Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures" Cement and Concrete Research, p: 1915-1927, 2000.
- [35] **Poon, C.S., Azhar, S., Anson, M. ve Wong Y.L.**, (2001) "Comparison of the strength and durability performance of normal and high strength pozzolanic concretes at elevated temperatures" Cement and Concrete Research, 31, p: 1291-1300, 2001.

- [36] **Jonatka, I. ve Bagel, L.**, (2002)“ Pore structures, permabilities and compressive strengths f concrete at temperatures up to 800⁰C. ” ACI Materials Journal, 99 (2), p:196-200, 2002.
- [37] **Bingöl, A.F., ve Gül, R.**, (2004)“Compressive strength of lightweight aggregate concrete exposed to high temperatures” Indian Journal of Engineering and Materials Sciences, 11, p: 68-72, 2004.
- [38] **Chen B. ve Liu, J.**, (2004)“Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-sternngth concrete after exposure to high temperatures.” Cement and Concrete Research, 34, p: 1065-1069, 2004.
- [39] **Li, M., Qian, C. ve Sun W.**, (2004)“Mechanical properties of high-strength concrete after fire” Cement and Concrete Research, 34, p:1001-1005, 2004.
- [40] **Sava, A., Manita, ve P.Sideris, K.K.**, (2005)“İnflunce of elevated temperatues on the mechanical properties of blended cement concretes prapered with limestone and siliceous aggregates” Cement and Concrete Composites, 27, p:239-248, 2005.
- [41] **Chang, Y.F., Chen, Y.H., Sheu, M.S. ve Yao, G.C.**, (2006)“Residual stres-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures” Cement and Concrete Research, 36, p:1999-2005, 2006.
- [42] **Ariöz, Ö.**, (2007)“Effect of eleveted temperatures on properties of concrete” Fire Safety Journal, 42, p:516-522, 2007.
- [43] **Aydın, S. ve Baradan, B.**, (2007)“Effect of pumice and fly ash incorporation on high temperature resistance of cement based montars” Cement and Concrete Research, 37(6), p:988-995,2007.
- [44] **Peng, G.F., Bian, S.H., Guo, Z.Q., Zhao, J., Peng, X.L., ve Jiang Y.C.**, (2008)“Effect of thermal shok due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures” Construction and Building Materials, 22, p:948-955, 2008.
- [45] **Demirel B., ve Gönen T.**, (2008), “Yüksek sıcaklığın karon lif takviyeli hafif betonda basınç dayanımı ve poroziteye etkisi” Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt:14, No:2, S: 223-228.
- [46] **Özışık., G.**, (1998), “Beton” İstanbul Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

- [47] **Cilason., N.**, (1992), “Beton” STFA Yayınları No:21, İstanbul
- [48] **Erdoğan., M.**, “İstanbul ve Dolayının Yapay Agregata Potansiyeli” 3. Mühendislik Jeoloji Sempozyumu, Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi, Adana
- [49] **Erdoğan., T.Y.**, (1995), “Betonu Oluşturan Malzemeler – Agregalar” Türkiye Hazır Beton Birliği Yayını, İstanbul
- [50] **Akman. S.**, (1990), Yapı Malzemesi, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- [51] **Zimbelmann, R.**, (1989),”A contribution to the problem of cement-aggregate bond” Cement and Research, vol 15 p: 801-808.
- [52] **Özkul, H., Taşdemir, M.A., Tokyay, M., ve Uyan, M.**, (1999), “Her Yönüyle Beton”, Türkiye Hazır Beton Birliği, İstanbul.
- [53] TS 707, 1980, Beton Agregalardan Numune Alma ve Deney Numunesi Hazırlama Yöntemi, TSE, Ankara
- [54] TS 3529, 1980 Beton Agregaların Birim Ağırlıkları Tayini, TSE, Ankara
- [55] TS 3526, 1980, Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini, TSE, Ankara
- [56] **Postacıoğlu, B.**, (1987), Bağlayıcı Maddeler, Agregalar, Beton Teknik Kitaplar Yayınevi Cilt 2
- [57] TS 699,1987, Tabii Yapı Taşları – Muayene ve Deney Metotları, TSE, Ankara
- [58] TS 19, 1994, Portland Çimentoları, TSE Ankara
- [59] **Demirli. İ. H.**, (2004), “Kırma taşla Üretilen Hazır Betonların Donma-Çözölmeye Karşı Dayanıklılığın Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [60] **Tekin, T., Demircioğlu, N.,Kobyay, M., ve Bayramoğlu, M.**, (1998), “Air Modelling of Sulfur Dioxide Pollution in Erzurum City,” Chimica Acta Turcica, 26, 69-74
- [61] **Malhotra, V.M. ve Carette, G.G.**, (1983), “Silica Fume Concrete Properties,” Applications and Limitations, Concrete International, ACI,40-46.
- [62] **Mehta, P.K. ve Gjore, O.E.**, (1982), “Properties of Portland Cement Concretes Containing Fly Ash and Silica Fume” Cement and Concrete Research, 12 587-595.

- [63] **Akaman, M.S.**, (1993), Ağır Barajlarında Uçucu Küllü Ralkrit Kullanımı, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, 9-23, Ankara
- [64] **Erdoğan, T.Y.**, (2003), Beton, ODTU Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara.
- [65] **Jennigs, H.M.**, (1998), Toward High Performance Cement Based Materials, New Horizons in Construction Materials, St.Louis, October
- [66] **Popovics, S.**, (1986), Design of High Strength Cement Based Materials, Materials Science and Technology, April, 285-290.
- [67] **Popovics, S.**, (1998), "Strength and Related Properties a Quantative Approach of Concrete." 1998
- [68] TS 3323, 1979, Beton Basınç Deney Numunelerinin Hazırlanması Hızlandırılmış Kürü ve Basınç Dayanım Deneyi, TSE Ankara
- [69] TS 3114, 1980, Beton Basınç Mukavemeti Deney Metodu, TSE Ankara
- [70] ASTM C 597, 1994, Standart Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, Annual Book of ASTM Standarts.
- [71] TS 3129, 1978, Betonda Yarma Çekme Dayanımı Tayini Deneyi, TSE Ankara
- [72] TS 3284, 1979, Betonda Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini Deneyi, (1/3 Noktalarında yüklenmiş basit kiriş metodu ile) TSE Ankara
- [73] TS 3285, 1979, Betonda Eğilmede Çekme Dayanımı Tayini Deneyi, (Orta noktasından yüklenmiş basit kiriş metodu) TSE Ankara
- [74] TS 3068, 1978, Laboratuarda Beton Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Bakımı, TSE Ankara
- [75] ASTM C 31, 1994, Standart Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field, Annual Book of ASTM Standarts.
- [76] **Neville, A.M.**, (2000), Properties of Concrete, Fourth Edition, Longman Scientific and Technical, New York/USA
- [77] **Khoury G.A.**, (2003), "Spalling", International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- [78] **Andrade C., Alonso C. ve Khoury G.A.**, (2003), "Relating Microstructure to properties", International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.

- [79] **Riley, M.A.**, (1991), “Possible New Method for the Assessment of Fire Damaged Concrete”, Magazine of Concrete Research, vol 43, p: 87-92.
- [80] **Papayianni I. ve Valliasis Th.**, (2005), “Heat Deformation of Fly Ash Concrete”, Cement & Concrete Composites, sayı 27, sayfa 249-254.
- [81] CEB, Bulletin D’Information, (1991), “Fire Design of Concrete Structures”, Lausanne, 1991
- [82] **Aköz F. ve Yüzer N.**, (1994), “Yüksek Sıcaklığın Nedenleri ve Betonarme Elemanlara Etkileri”, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, sayı 3, İstanbul.
- [83] **Postacıoğlu B.**, (1987), “Beton”, Cilt 2, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul.
- [84] **Onaran K.**, (2000), “Malzeme Bilimi”, Yedinci Basım, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- [85] **Alonso C., Andrade C. ve Khoury G.A.**, (2003), “Porosity&Microcracking”, International Centre for Mechanical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- [86] **Anderberg Y.**, (2003), “Thermal Properties & Analysis”, International Centre for Technical Sciences, Course on Effect of Heat on Concrete, Udine/Italy.
- [87] **Cülfik M.S. ve Özturan T.**, (2002), “Effect of Elevated Temperatures on the Residual Mechanical Properties of High-Performance Mortar”, Cement and Concrete Research, sayı 32, sayfa 809-816.
- [88] **Shoaiab M.M., Ahmed S.A. ve Balaha M.M.**, (2001), “Effect of Fire and Cooling Mode on the Properties of Slag Mortars”, Cement and Concrete Research, sayı 31, sayfa 1533-1538.
- [89] **Guisse S.E., Short N.R. ve Purkiss J.A.**, (1996), “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.
- [90] **Savva A., Manita P. ve Sideris K.K.**, (2005), “Influence of Elevated Temperatures on the Mechanical Properties of Blended Cement Concretes Prepared with Limestone and Siliceous Aggregates”, Cement & Concrete Composites, sayı 27, sayfa 239-248.
- [91] **Akman M.S.**, (1992) “Betonarme Yapılarda Yangın Hasarı ve Yangın Sonunda Taşıyıcılığının Belirlenmesi”, Yapıda Yangından Korunma Sempozyumu, İstanbul, 1992.

- [92] **Hayden H.W., Moffatt W.G., ve Wulff J.**, “The Structure and Properties of Materials”, Vol. 3., John Wiley & Sons, Inc, USA, 1965.
- [93] **Khoury, G.A.**, (1992) “Compressive Strength of Concrete at High Temperatures : Reassessment”, Magazine of Concrete Research, 44, 161, 291-309, 1992

ÖZGEÇMİŞ

Serhat AY 1980 yılında Sakarya’da doğmuştur. İlk, orta ve lise öğrenimini Balıkesir’de, sırasıyla Altıeylül İlkokulu, Özel Altuğ Yurdakuloğlu Lisesi (Orta kısmı), Balıkesir Lisesinde tamamlamıştır. 1999 yılında Antalya Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler M.Y.O. kazanmış 2002 yılında buradan mezun olmuştur. 2004 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Tapı Öğretmenliğini kazanmış 2007 yılında mezun olmuştur. Aynı yıl, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Ana Bilim dalında yüksek lisansa başlamıştır.