

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

**FARKLI ÇİMENTOLARIN BETONDAKİ KARBONATLAŞMAYA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şaziye ÖZER

Enstitü No: 091125102

Anabilim Dalı: Yapı Eğitimi

Danışman: Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 5 Eylül 2012

EYLÜL - 2012

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

FARKLI ÇİMENTOLARIN BETONDAKİ KARBONATLAŞMAYA ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI

Hazırlayan: Şaziye ÖZER

YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu Tez .../.../... Tarihinde, aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği/oyçokluğu ile başarılı/başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman	Üye	Üye
<i>Doç. Dr. Salih Yazıcıoğlu</i>	<i>Doç. Dr. Bahar DEMİREL</i>	<i>Yrd.Doç. Mehmet Karataş</i>

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun .../.../... tarih ve Sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŐEKKÜR

Bu tezin önerilmesinde ve yönlendirilmesinde yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU' na ve beni her konuda destekleyen tez çalışmalarım boyunca hep yanımda olup, tecrübesiyle yoluma ışık tutan Fırat Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Öğretim Üyesi Sayın Doç. Dr. Bahar DEMİREL' e en içten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ayrıca deneysel çalışmalar esnasında bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım Tunceli Üniversitesi Yapı Eğitimi Bölümü Yrd. Doç. Dr. Tahir GÖNEN' e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım. Bunun dışında tüm Teknik Eğitim Fakültesi Öğretim Elemanlarına, Teknik Personellerine ve tüm çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım.

Şaziye ÖZER

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
İÇİNDEKİLER.....	I
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VI
TABLolar LİSTESİ.....	VI
ÖZET.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. GİRİŞ.....	1
2. BETON.....	11
2.1 Beton Çeşitleri.....	11
2.1.1 Hafif Beton.....	11
2.1.2 Normal Beton.....	11
2.1.3 Ağır Beton.....	12
2.2 Beton Sınıfları.....	12
2.3 Betonu Oluşturan Ana Bileşenler.....	13
2.3.1 Çimento.....	14
2.3.2 Agrega.....	15
2.3.3 Beton Karışım Suyu.....	17
2.3.4 Beton Katkı Maddeleri.....	18
2.4 Betonun Özellikleri.....	19
2.4.1 İşlenebilirliği.....	19
2.4.2 Mukavemet.....	19
2.4.3 Dayanıklılık.....	19
2.4.4 Şişme Ve Büzülme.....	20
2.4.5 Su Geçirimsizlik.....	20
2.4.6 Birim Ağırlık.....	20
2.4.7 Kimyasal Mukavemet.....	21
2.4.8 Ortalama Basınç Dayanımı.....	21
2.4.9 Çekme Dayanımı.....	21
2.4.10 Elastisite Modülü.....	22

2.4.11 Sünme.....	22
2.4.12 Rötire.....	23
2.4.13 Termal Genleşme Katsayıları.....	23
2.4.14 Yangın Dayanımı.....	24
2.5 Betonun Avantajları Ve Dezavantajları.....	24
2.5.1 Betonun Avantajları.....	24
2.5.2 Betonun Dezavantajları.....	25
2.6 Betonun Dayanıklılığı (Durabilite).....	26
3. BETONDA KARBONATLAŞMA.....	31
3.1 Karbonatlaşmanın Oluşumu Ve Gelişimi.....	31
3.1.1 Betonun Boşluk Yapısı.....	31
3.1.2 Karbonatlaşmanın Kimyasal Gelişimi.....	33
3.1.3 Beton Bileşenlerinin Karbonatlaşmaya Etkisi.....	35
3.1.3.1 Çimento.....	35
3.1.3.2 Agregası.....	36
3.1.3.3 Beton Karışım Suyu.....	37
3.1.3.4 Ortam Koşulları.....	38
3.1.3.5 Betonda Kullanılan Katkılar.....	39
3.1.4 Çevresel Faktörlerin Etkisi.....	42
3.2 Karbonatlaşmanın Betondaki Etkileri.....	43
3.2.1 Karbonatlaşma Rötresi.....	43
3.2.2 Beton Dayanımı.....	44
3.2.3 Donatının Korozyonu.....	45
3.3 Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi.....	45
3.4 Karbonatlaşmanın Sakıncaları Ve Yararları.....	47
3.5 Karbonatlaşmaya Karşı Alınması Gereken Önlemler.....	48
3.5.1 Çimento Cinsi Ve Dozajı.....	48
3.5.2 Su / Çimento Oranı.....	48
3.5.3 Beton Dökümü Ve Kürü.....	48
3.5.4 Yeniden Alkalinizasyon.....	49
3.5.5 Beton Rutubeti.....	49
3.5.6 Mineral Katkılar.....	49
3.5.7 Basınç Dayanımı.....	49
3.5.8 Kimyasal Bileşimi.....	50

4. DENEYSSEL ÇALIŞMA.....	51
4.1 Karışım Elemanları.....	51
4.1.1 Çimento.....	51
4.1.2 Agrega.....	52
4.1.3 Katkı Maddeleri.....	52
4.1.3.1 Uçucu Kül.....	52
4.1.3.2 Silis Dumanı.....	55
4.2 Uçucu Kül Ve Silis Dumanının Beton Üzerindeki Etkileri.....	57
4.3 Beton Seriler Ve Özellikleri.....	60
5. DENEY DÜZENEĞİ VE HAZIRLIĞI.....	64
5.1 Deneyler ve Ölçümler.....	64
5.1.1 Birim Ağırlık Deneyi.....	64
5.1.2 Kapiler Su Emme (Kapilerite).....	65
5.1.3 Porozite.....	67
5.1.4 Ultrases Deneyi.....	67
5.1.5 Basınç Dayanımı Deneyi.....	69
5.1.6 Karbonatlaşma Deneyi.....	71
5.2 Bulgular ve Değerlendirme.....	79
5.2.1 Birim Ağırlık Deney Sonuçları.....	79
5.2.2 Kapiler Su Emme (Kapilerite) Deney Sonuçları.....	80
5.2.3 Porozite Deney Sonuçları.....	81
5.2.4 Ultrases Deney Sonuçları.....	83
5.2.5 Basınç Dayanımı Deney Sonuçları.....	84
5.2.6 Karbonatlaşma Deney Sonuçları.....	88
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	90
6.1 Sonuçlar.....	90
6.2 Öneriler.....	91
KAYNAKLAR.....	92
ÖZGEÇMİŞ.....	97

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 1.1 Bağlı Nem de Karbonatlaşma İlişkisi.....	4
Şekil 3.1 Karbonatlaşmanın Beton İçinde İlerleme Şekilleri.....	32
Şekil 3.2 Çimento Dozajına göre Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi.....	35
Şekil 3.3 Bağlı Nem ile Karbonatlaşma Derinliği ilişkisi.....	38
Şekil 3.4 Deniz Etkisindeki Bir Yapı ile Çevre Arasındaki Etkileşim.....	39
Şekil 3.5 Karbonatlaşma derinliğinin Belirlenmesi.....	46
Şekil 4.1 Uçucu külün SEM görüntüsü.....	53
Şekil 4.2 Silis Dumanının SEM görüntüsü.....	55
Şekil 4.3 Beton Üretiminde kullanılan beton mikseri.....	62
Şekil 5.1 Birim Ağırlık Aleti.....	65
Şekil 5.2 Kapiler Su Emme Deney Düzeneği.....	66
Şekil 5.3 Beton Serilerin Kapiler Su Emme Deney Düzeneği.....	66
Şekil 5.4 Ultrasonik Test Cihazı.....	68
Şekil 5.5 Ultrases ölçüm şekilleri.....	68
Şekil 5.6 Hidrolik Yük Kontrollü Pres.....	70
Şekil 5.7 Basınç dayanımına uğramış küp numunenin bir görüntüsü.....	70
Şekil 5.8 Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı enine kesiti.....	72
Şekil 5.9 Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı boyuna kesiti.....	72
Şekil 5.10 Karbonatlaşma Sonrası Beton Serilerin Bir Aparat Yardımıyla İkiye Bölünmesi..	76
Şekil 5.11 Farklı Zaman Dilimlerine Göre Fenolfitalein Püskürtülen Beton Serilerin Görüntüsü.....	77
Şekil 5.12 Karbonatlaşma Öncesi Tüm Beton Serilerin Farklı Kür Sürelerine Göre Birim Ağırlıkları (kg/m^3).....	79
Şekil 5.13 Karbonatlaşma sonrası Tüm Beton Serilerin Farklı Zaman Dilimlerine göre Birim Ağırlıkları (kg/m^3).....	80
Şekil 5.14 Tüm Beton Serilerin Porozite Oranları.....	82
Şekil 5.15 Tüm Beton Serilerin Ultrases Geçiş Hızlarının Grafik Gösterimi.....	84
Şekil 5.16 Tüm Beton Serilerin Basınç Dayanımlarının Grafikselsel Gösterimi (Mpa).....	86
Şekil 5.17 Tüm Serilerin Farklı Zaman Dilimlerine Göre Basınç Dayanımlarının Grafikselsel Gösterimi (MPa).....	87
Şekil 5.18 Farklı Zaman Dilimlerine Göre Tüm Serilerin Karbonatlaşma Derinlikleri(mm)..	88

Şekil 5.19 Tüm Beton Serilerin Karbonatlaşmadan Etkilenme Oranlarının Yüzdesel olarak Gösterimi.....89

TABLULAR LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 1.1 Bağıl Nem ile Karbonatlaşma İlişkisi.....	3
Tablo 1.2 Singapurdaki binaların, yaş ve basınç dayanımlarına göre karbonatlaşma derinlikleri.....	6
Tablo 1.3 Uçucu küllü betonlarda %65 nem ve 20 °C'de kür süresinin hızlandırılmış karbonatlaşma derinliğine etkisi	8
Tablo 3.4 Uçucu küllü betonlarda %100 nem ve 20 °C'de kür süresinin hızlandırılmış karbonatlaşma derinliğine etkisi.....	8
Tablo 2.1 Beton Sınıfları Ve Özellikleri.....	13
Tablo 2.2 Çimento Ana bileşenleri.....	14
Tablo 3.1 Beton İçin Zararlı Kimyasal Etki Yapan İyon ve Ortamlar İçin Sınır Değerler.....	37
Tablo 4.1 Kullanılan Çimentoların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	52
Tablo 4.2 Kullanılan Uçucu Külün Özellikleri.....	54
Tablo 4.3 Kullanılan Silis Dumanının Özellikleri.....	56
Tablo 4.4 1 m ³ Beton için Yaklaşık Karışım miktarları (kg).....	61
Tablo 4.5 Beton Seriler ve Özellikleri.....	63
Tablo 5.1 Ultrases – Beton Kalitesi İlişkisi.....	68
Tablo 5.2 Karbonatlaşma Öncesi Tüm Beton Serilerin Kapilerite Oranları.....	81
Tablo 5.3 Karbonatlaşma Sonrası Tüm Beton Serilerin Kapilerite Oranları.....	81
Tablo 5.4 Tüm Serilerin Porozite Oranları.....	82
Tablo 5.5 Tüm Beton Serilerin Ultrases Geçiş Hızları (km/sn).....	83
Tablo 5.6 Tüm Beton Serilerin Farklı Kür Sürelerine göre Basınç Dayanımları(MPa).....	85
Tablo 5.7 Tüm Serilerin Farklı Zaman Dilimlerine Göre Basınç Dayanımları (MPa).....	86

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

FARKLI ÇİMENTOLARIN BETONDAKİ KARBONATLAŞMAYA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Şaziye ÖZER

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Yapı Eğitimi Anabilim Dalı
2012

Karbonatlaşma; beton dayanımını (durabilite) etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Karbonatlaşma olayı; hidrasyonun bir ürünü olan, kalsiyum hidroksitinin atmosferde ve yağmur suyunda bulunan karbondioksit ile reaksiyona girerek betonun boşluklarında kalsiyum karbonat çökeltilerini oluşturması olayıdır.

Bu çalışmada farklı tip çimentoların karbonatlaşmaya olan etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla farklı özelliklere sahip çimento çeşitleri ile iki farklı katkı maddesi kullanılarak toplam 8 farklı beton serisi hazırlanmıştır. Karbonatlaşma süreci çok uzun yıllar aldığından testler için hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılmıştır. Bu test için hava geçirimsiz bir kabin geliştirilmiştir. Karbonatlaşma derinlikleri %1 etil alkolde hazırlanan fenolfitaleyin çözeltisi ile ölçülmüştür. Ayrıca karbonatlaşma derinlikleri arasındaki ilişkiyi desteklemek ve aralarında kıyaslama yapabilmek için numuneler farklı zaman periyodlarında (1, 3 ve 7gün) %40 karbondioksitli ortama bırakılmıştır. 28 günlük kür sürelerini tamamlayan ve karbonatlaşmaya maruz bırakılan numuneler üzerinde basınç dayanımı, kapilarite ve birim ağırlık deneylerine bakılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre; farklı tip çimentolarla ve katkı maddeleriyle yapılan tüm beton serilerinin farklı fiziksel, kimyasal özelliklere sahip olmasının yanında farklı tane inceliklerine sahip olması da deney sonuçlarına yansımıştır.

Anahtar Kelimeler: Beton, Beton Dayanımı (Durabilite), Karbonatlaşma.

ABSTRACT

Master Thesis

AN INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT CEMENTS ON CONCRETE CARBONATION

Şaziye ÖZER

Fırat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

2012

Carbonation; concrete strength (durability) is one of the factors that impact the most important. Carbonation event; hidratasyonun which is a product, calcium hydroxide carbon dioxide in the atmosphere and the rain water in reaction with calcium carbonate çökeltilerini found to create a concrete event.

This study, the effects of different types of concrete carbonation have been studied extensively. With a range of different features to do this with cement using two different additive to total of 8 different series. For many years carbonation process is accelerated carbonation test technique used for tests. This test has been developed for a air-tight cabin. Different time carbonation depths operations beyond checking the fenolfitaleyin 1% ethyl readily soluble in alcohol were measured with a solution. It also support and relationship between carbonation depths, including samples for different time to be able to benchmark operations beyond checking (1-day, 3day, 7day) 40% a carbon dioxide atmosphere has been disabled. And that time carbonation 28-day course on samples exposed concrete pressure resistance, by capillarity, and on to the unit weight tests were attended to. According to the results obtained; different type of çimentolarla with the additives and all concrete series in a different physical and chemical properties as well as with different used inceliklerine in event of a test results with.

Keywords: Concrete, Concrete Durability (Durability), Carbonation.

1. GİRİŞ

Beton; kum, çakıl (veya kırma taş, hafif agrega vb.) çimento ve suyun karışımından elde edilen bir yapı malzemesidir. Sözü edilen malzemeler belirli oranda karıştırıldığında kalıptan istenilen biçimi alabilecek plastik bir malzeme elde edilir. Betonun diğer yapı malzemelerinden üstün kılan en önemli özelliklerinden biri istenilen biçimin verilmesini sağlayan plastik kıvamıdır. Beton karıştırılıp kalıba döküldükten sonra kısa sürede katılaştır ve zamanla dayanım kazanır. Yangına dayanıklılığı, su geçirmezliği ve ses yalıtımı bakımından da tercih edilir.

Betonda durabilite; hava koşullarından, sülfatlı veya asitli sulardan veya betonun kullanıldığı ortam koşullarından kaynaklanan yıpratıcı kimyasal ve fiziksel olaylar karşısında betonun hizmet süresi boyunca gösterebileceği direnme kabiliyeti olarak tanımlanmaktadır. Beton yerleştirilip döküldükten sonra bile zamanla dış etkilere maruz kalması sonucunda ortam şartlarına göre kendi içyapısında önemli değişimler meydana getirmektedir. Bu değişimlerin en önemlisi ve durabiliteyi etkileyen en birincil faktörlerden biri karbonatlaşmadır. Karbonatlaşma olayı ise betonun durabilitesini etkileyen fiziksel ve kimyasal bir süreçtir.

Karbonatlaşma için literatürde birbirine yakın birçok tanım yapılmıştır. Çimento şerbeti, harç, betondaki kalsiyum hidroksitli veya kalsiyum oksitli bileşikler ile karbondioksitin kalsiyum karbonatı meydana getiren reaksiyonuna karbonatlaşma denilmektedir. Daha net bir tanım gerekirse, karbonatlaşma; havadaki serbest durumda bulunan karbondioksitin nemli ortamlarda, hidrate olmuş çimento ile reaksiyona girmesidir. Ayrıca karbonatlaşma; atmosferdeki karbondioksit ile betonun boşluk suyunda bulunan kalsiyum hidroksitin reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır.

Karbonatlaşma tek başına beton için fazlaca bir sorun teşkil etmez. Onun en büyük sakıncası betonarme sistemlerde donatı korozyonudur. Başlangıçta alkalın yani çeliği koruyan pasif tabaka karbonatlaşma neticesinde bozulur ve çelik korozyona açık hale gelir. Donatının korozyonu beton matrisi ile çelik arasındaki aderansın kaybolmasına ve bunun sonucu mukavemetin azalmasını neden olur [1]. Bu parametrelerden biri de betonun boşluk yapısı ve miktarı ile birlikte ortamdaki nemdir. Betonun döküm aşamasındaki sıkıştırma ve yerleştirme işlemleri, betonun boşluk yapısını ve boşluk miktarını önemli derecede etkilemektedir. Tekniğine uygun sıkıştırma ve yerleştirme yapılmayan bir beton her türlü

zararlı dış etkilere açıktır. Günümüz şartlarında en verimli ve yaygın olan sıkıştırma tekniği vibrasyon ile yapılandır [1].

Karbonatlaşma üzerine yapılan birçok çalışma farklı iki yöntem kullanılarak yapılmaktadır. Bunlar hızlandırılmış karbonatlaşma ile gerçek ortamdaki karbonatlaşmadır. Karbonatlaşma üzerine yapılan çalışmalar genellikle hızlandırılmış karbonatlaşma yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. Fakat her iki yöntemi kullanarak yapılan çalışmalar da mevcuttur. Buna bağlı olarak yapılan literatür araştırmaları sonucunda aşağıdaki çalışmalar incelenmiştir:

Gönen ve Yazıcıoğlu, yapmış oldukları bir çalışmada farklı nem ortamlarındaki beton numunelerde karbonatlaşma gelişimini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada 100 mm boyutlarında küp beton numuneler kullanılmış ve çalışma için hazırlanan numuneler özel olarak tasarlanmış hızlandırılmış karbonatlaşma deney düzeneğinde %35, %55 ve %80 bağıl nemde %40 karbondioksitli ortamda bekletilmiştir. Hızlandırılmış karbonatlaşmaya maruz bırakılan numunelerin karbonatlaşması %70 etil alkol ile hazırlanan fenolfitalein çözeltisi ile belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre en fazla karbonatlaşma %55 nem ortamında, en az karbonatlaşma ise kuru bir ortam sayılabilecek olan %35 nem ortamında gerçekleşmiştir [2].

Hızlandırılmış karbonatlaşma sonucu tüm numunelerde en az karbonatlaşma çok kuru bir ortam sayılabilecek olan %35 bağıl nemli ortamda elde edilmiştir. Bu nem gurubunda, karbonatlaşma reaksiyonunun ihtiyaç duyduğu suyun azlığı bu sonucu ortaya çıkarmıştır. Çok nemli bir ortam sayılabilecek olan %80 bağıl nemde de karbonatlaşma biraz yavaş gelişmiştir. Nemin fazlalığı karbondioksitin difüzyonunu zorlaştırmaktadır. Çoğu iklimlerde sıklıkla karşılaşılabilecek olan %55 nem gurubunda ise karbonatlaşma diğer nem oranlarına göre oldukça yüksektir. Sonuç olarak; %55 bağıl nemde karbonatlaşma derinliği %35 bağıl neme göre; 6 saatliklerde %28, 24 saatliklerde %21 ve 72 saatliklerde ise %24'dür, %80 bağıl neme göre ise; 6 saatliklerde %20, 24 saatliklerde %6 ve 72 saatliklerde %3 daha yüksek çıkmıştır. Zamanla birlikte %80 ve %55 bağıl nem grubuna ait numunelerin karbonatlaşma derinliklerindeki fark azalmıştır. Azalmadaki sebep karbonatlaşmanın gelişimi için en müsait ortam olan %55 nemdeki numunelerin karbondioksite daha erken doymaya başlamasından kaynaklanmaktadır [2].

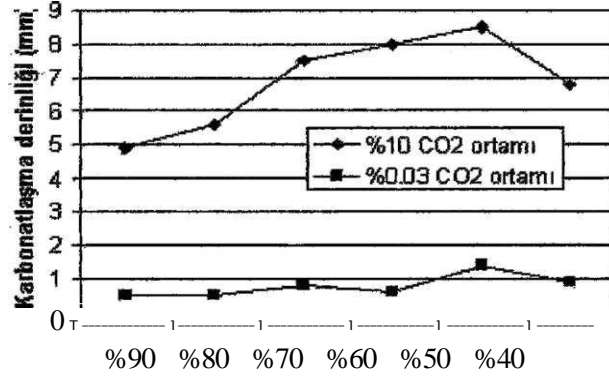
Subaşı ve Arslan, Kalıp yüzey özelliklerinin betonun karbonatlaşma miktarına etkisini araştırmışlardır. Bu amaçla farklı yüzey özelliklerine sahip 7 adet betonarme perde duvar kalıbı hazırlanmıştır. Kalıplarda sarıçam, karakavak, çelik sac ve kontrplak kalıp

yüzey malzemesi olarak kullanılmıştır. Kontrplak yüzeyli olarak hazırlanan 4 adet kalıptan 3 tanesinin yüzeyine drenaj kanal ve delikleri açılarak kalıp yüzeyleri farklı geotekstil astarlarla kaplanmıştır. Beton dökümü gerçekleştirildikten 28 gün sonra kalıplar sökülerek beton bloklar 6 yıl boyunca atmosfer şartlarına maruz bırakılmıştır. Daha sonra beton bloklardan alınan karot örnekler üzerinde karbonatlaşma derinliği ve farklı derinliklerden alınan toz örnekler üzerinde ise Ph değerleri ölçülmüştür. Sonuç olarak; drenajlı-astarlı kalıplara dökülmüş betonların, sarıçam, karakavak, çelik sac ve kontrplak kalıba dökülen betonlara göre; daha az karbonatlaşma miktarına sahip olduğu, SB-20 geotekstil astarla kaplı olan drenajlı kalıba dökülen betonun en az karbonatlaşma derinliğine sahip olduğu, en fazla karbonatlaşma miktarının çelik sac yüzeyli kalıba dökülen betonda oluştuğu görülmüştür [3].

De Ceukelaire ve Van Nieuwenburg; Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi ile normal ortamdaki karbonatlaşma arasında bir karşılaştırmanın yapıldığı çalışmada hızlandırılmış karbonatlaşma için ortamın CO₂ değerini %10'a çıkarmıştır. Numuneleri %10 CO₂ ortamında 14 gün bekletmiş ve eş zamanlı olarak hazırlanmış diğer numuneleri normal ortamda (%0,03 CO₂) sırasıyla 333, 392 ve 575 gün bekletmiştir [4]. Bağlı nem ve ortamın karbondioksit miktarı ile ilgili bulunduğu sonuçlar Tablo 1.1 ve Şekil 1.1'de özetlenmiştir.

Tablo 1.1 Bağlı Nem ile Karbonatlaşma İlişkisi

Bağlı Nem	Karbonatlaşma Derinliği %10 CO₂	Karbonatlaşma Derinliği %0,03 CO₂ 21 Gün
%90	4.9	0.5
%80	5.6	0.5
%70	7.5	0.8
%60	8.0	0.6
%50	8.5	1.4
%40	6.8	0.9



Şekil 1.1 Bağıl Nem de Karbonatlaşma İlişkisi

Yılmaz; Betonun karma ve bakım suyundaki bazı iyonların beton dayanımı üzerine etkisini araştırmıştır. Çalışmasında KPC 325 kullanarak su/çimento oranım 0,55 almıştır. Betona katılan karma suyu - temas suyunun (kür tankının içindeki su) pH değerleri sırası ile 8-8 (A), 8-saf su (B), 5-5 (C), 5-pH 5'e ayarlanmış saf su (D) almıştır. Deney numuneleri ile yapılan 90 günlük basınç dayanımı neticesinde sırasıyla 41,5 MPa, 43,3 MPa, 40,5 MPa, 45,1 MPa, değerleri bulmuştur. A ve C ortamlarındaki sularda çeşitli iyonların (klorür, sülfat, sülfür, amonyum, magnezyum) etkisinden dolayı basınç dayanımı düşse de genel kanı pH değeri düştükçe dayanımın artmasıdır. Ortamdaki temas suyunun pH değeri düştükçe karbonatlaşma hızı ve derinliği artacaktır. Yukarıdaki bulgular karbonatlaşma olayı ile özdeşleştirilirse şu neticeye varılır. Karbonatlaşma arttıkça betonun basınç dayanımı da artacaktır [5].

Castro ve Diğ; Deniz atmosferinde bulunan yapıların karbonatlanmadan ne derece etkilendiği yönünde bir çalışma hazırlamışlardır. Çalışmalarında betonun gerçek servis ömrünü belirlenmesinde hesaplanan katsayının gerçek saha verilerinden elde edilmesi gerektiğini vurgulamışlardır. Bu amaçla Meksika Körfezinde sahile belirli üç bölgeye ki bunlar sırasıyla 50 m, 100 m ve 780 m uzaklığa önceden hazırladıkları numuneleri bırakmışlardır. Bıraktıkları numunelerin su/çimento oram 0.76, 0.70, 0.53, 0.50 ve 0.46 ve su altoda kür edilme süreleri 1, 3 ve 7 gündür. Numunelerin karbonatlaşma derinliklerini 31 ay sonra ölçmüşler. Ayrıca betonların sınıfını belirlemek için aynı şartlarda hazırlanan numunelerin 28 gün sonundaki dayanımlarını ölçmüşler. Denize yakın mesafede olan

betonların dayanımlarına orantılı olarak diğerlerinden daha az karbonatlaşma derinliği göstermiştir. Denize yakın olan bölgelerdeki yüksek nem ve tuz betonun kılcal boşluklarından karbondioksit girişini zorlaştırmaktadır. Denize yakın bölgeye konulan numuneler incelendiğinde kılcal boşluklarında yüksek oranda klorür konsantresi bulunmuştur. Bu sebeple 50 m mesafede bulunan beton numuneler 100 m ve 780 m mesafede bulunanlara göre daha fazla karbonatlaşmıştır. Basınç dayanımı 22 MPa'dan yüksek olan numuneler karbonatlaşma hızına etkisi açık değildir. Araştırmacıların öneri kısmında küçük çaptaki saha çalışmasının yetersiz olduğunu belirtmektedirler. Araştırmaların daha geniş bir alanda yapılması sonuçların daha mantıklı olacağı kanaatine varmışlardır [6].

Al-Khaiat ve Haque Castro ve diğerlerinininkine benzer olan çalışmalarında sıcak, kuru ve tuzlu iklim şartlarına benzer olan Kuveyt gibi yerlerdeki beton yapıların durabilitesini geliştirmek için çok önemli tavsiyelerde bulunmuşlardır. Çalışmalarındaki amaç 1991'deki petrol yangını sonrasında bu yangından kaynaklanan hava kirliliğinin (yangın sırasında ortamın karbondioksit değeri %10'lara kadar çıkmış) bu yangına belirli mesafedeki binalar da iklim şartları ve denize mesafeleri aynı uzaklıktaki ama yangından etkilenmeyen binalar da arasında karbonatlaşma derinliği açısından kıyaslama yapmışlar. Çalışmalarının neticesinde; Kuveyt'deki kıyı binaların karbonatlaşma derinliğinin yakın kıyı binalarınıninkinden daha yüksek çıktığı ve karbonatlaşma derinliğinin beton kalitesi ve basınç dayanımının bir fonksiyonu olduğu bulgularına ulaşmışlardır [7].

Parrott ve Killoh; 36 yıllık betonlar üzerinde çevresel etkiler üzerine bir çalışma yapmışlardır. Karbonatlaşmanın belirlenmesinde fenol fitalein çözeltisi ve gravimetrik termal analiz tekniklerini kullanmışlardır. İç ortamdaki betonların dış ortamdakilerden karbonatlaşmaya daha elverişli olduklarını belirtmişlerdir. Ayrıca iç ortamdaki betonlar üzerine daha ayrıntılı analizlerinde karbonatlaşma derinliği 45 mm iken 25 mm'de hala kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) var olduğunu bulmuşlar. Karbonatlaşmanın belirli bir derinliğe inmesi demek o derinliğe kadar olan tüm bölgenin karbonatlaşması anlamına gelmediğini bulmuşlardır [8].

Roy ve diğ.; Singapurun tropikal iklimindeki 7 yıldan 59 yıla kadar olan betonarme yapılardan alınan karot numuneler üzerindeki karbonatlaşma derinliklerini ve basınç dayanımlarını araştırmışlardır. 1 hastane (7 yıllık), 1 konut (15 yıllık) ve 2 ofis binasından (19 ve 59 yıllık) ölçümler alınmıştır. Karbonatlaşma derinliklerini fenolfitalein çözeltisi

kullanarak yapmışlardır. Numuneler basınç dayanımı testinden önce 48 saat kadar suda bekletilmiş ve kükürt ile başlatılması yapıldıktan sonra ölçümleri yapılmıştır.

Binanın yaşı ile ilişkili olan ortalama karbonatlaşma derinliğini (d) kullanarak, formülü ile ortalama K sabitini yaklaşık olarak $7 \text{ mm/yıl}^{0.5}$ bulmuşlar. Karbonatlaşma derinliği ve K sabiti betonun yaşından başka betonun dayanımına da bağlı olduğunu belirtilmiş çalışmalarında da buldukları K değerleri ($5.5-8.6 \text{ mm } 7\text{yıl}^{0.5}$) ılıman iklimler için daha önce rapor edilen K değerlerinden ($1-3 \text{ mm/yıl}$) daha yüksek olduğunu belirtmişler. Bunun sebebini beton sınıfının düşük olmasına ve diğer ılıman iklimlerdeki sıcaklıklar $8-9 \text{ }^\circ\text{C}$ iken Singapur'daki sıcaklığın $27 \text{ }^\circ\text{C}$ olmasına bağlamışlar. Yapılan çalışmaların özeti Tablo 1.2' de verilmiştir.

Tablo 1.2 Singapur'daki binaların, yaş ve basınç dayanımlarına göre karbonatlaşma derinlikleri

Bina yaşı (yıl)	Küp dayanımı <20 MPa		Küp dayanımı >20 Mpa	
	Karbonatlaşma derinliği (mm)	K ($\text{mm/yıl}^{0.5}$)	Karbonatlaşma derinliği (mm)	K ($\text{mm/yıl}^{0.5}$)
7	26	9.8	18	6.8
15	37	9.6	21	5.4
19	32	7.3	20	4.6
59	56.6	7.4	52.7	6.9

Binanın yaşı ile ilişkili olan ortalama karbonatlaşma derinliğini (d) kullanarak, formülü ile ortalama K sabitini yaklaşık olarak $7 \text{ mm/yıl}^{0.5}$ bulmuşlar. Karbonatlaşma derinliği ve K sabiti betonun yaşından başka betonun dayanımına da bağlı olduğunu belirtmiştir. Çalışmalarında buldukları K değerleri ($5.5-8.6 \text{ mm } 7\text{yıl}^{0.5}$) ılıman iklimler için daha önce rapor edilen K değerlerinden ($1-3 \text{ mm/yıl}$) daha yüksek olduğunu belirtmişler. Bunun sebebini beton sınıfının düşük olmasına ve diğer ılıman iklimlerdeki sıcaklıklar $8-9 \text{ }^\circ\text{C}$ iken Singapur'daki sıcaklığın $27 \text{ }^\circ\text{C}$ olmasına bağlamışlar [9].

Cebeci; yaptığı çalışmasında; 250, 300, 350 dozajında çimento ve su/çimento oranı 0.45, 0.60, 0.75, olan numunelere 6 ay süre de %99 nemlikte kür uygulamış daha sonrada %70 nendi bir ortamda saklamıştır. Numunelerin üretiminden 3, 6, 12 ve 15 ay sonra basınç dayanımlarını ve karbonatlaşma derinliklerini ölçmüştür. Araştırmacı yaptığı

çalışmasının neticesinde, ilk 6 aylık süreç de karbonatlaşmanın çok az olduğu (kür süresinin etkisi var), düşük dozajlı betonlarda karbonatlaşmanın daha fazla olduğu, basınç mukavemetinin artmasıyla karbonatlaşma derinliklerinin azaldığı, karbonatlaşmanın köşelerde daha fazla olduğu, su-çimento oranlarına bağlı olarak karbonatlaşmada küçük değişimler olduğunu bulmuştur [10].

Johnson; daha çok atıl malzemelerin tek başlarına yapmış oldukları karbonatlaşma ve aralarında kıyaslamaya dayalı bir araştırma gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu çalışmada kalsiyum silikat içeren hidrolit olmayan atıl cüruf malzemelerin hızlandırılmış karbonatlaşma deneyini yapmıştır. Atıl malzemeleri 24 saat % 3 bar basınçta %100 CO₂ ortamına maruz bırakmıştır. Deneylerinin neticesinde ortamdaki CO₂ seviyesinin karbonatlaşma üzerine önemli bir rol oynadığını ve ayrıca malzemenin içerisindeki nem oranının da karbonatlaşmayı etkilediğini gözlemlemiştir. Karbonatlaşma ile ilgili ölçümleri malzemelerin ağırlığındaki değişim ve x-ışını difraksiyonu analizi de yapmıştır. Bu malzemelerden en fazla karbonatlaşmayı paslanmaz çelik imalatından çıkan cüruf yapmıştır. Çalışmasının ikinci aşamasında paslanmaz çelik imalatının cürufunu çimento katkı malzemesi olarak kullanmış ve bu malzemeyle dökülen betonların hızlandırılmış karbonatlaşmasına bakmıştır [11].

Kobayashi ve Uno; alkali içeriği farklı oranlara sahip beton numunelere hızlandırılmış karbonatlaşma testi uygulamıştır. Araştırmacılar %10 karbondioksit içeren bir ortamda hidrasyonun 16. haftasında karbonatlaşma derinliklerinin alkali içeriği ile lineer bir şekilde arttığını belirtmektedirler. Ayrıca normal ortam atmosferinde hidrasyonun 6. ayında iç ortamdaki karbonatlaşma derinliğinin (0-5 mm) dış ortamın karbonatlaşma derinliğinden (0-1,6 mm) daha yüksek olduğunu gözlemlemişler. Buna sebep olarak iç ortamın bağıl nem şartlarının karbonatlaşma için daha uygun olduğu kanısına varmışlardır [12].

Atiş; uçucu küller ile yapılan betonların hızlandırılmış karbonatlaşma üzerine bir çalışma yapmıştır. Uçucu küllü betonlar üzerine daha önceden yapılmış çalışmalarda çelişkili ifadeler olduğunu belirtmedir. Çalışmasında ağırlıkça %50 ve %70 uçucu küllü çimento de yer değiştirerek numuneler hazırlamıştır. Toplam 5 seri beton numunesi hazırlamış bunlar sırasıyla normal portland çimentom (MO), ağırlıkça %70 uçucu küllü (M1), ağırlıkça %70 uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı (M2), ağırlıkça %50 uçucu küllü (M3), ağırlıkça %50 uçucu kül ve süper akışkanlaştırıcı (M4) betonlardır. Numuneleri 3, 7, 28, 90 gün kür ettikten sonra %4.70 karbondioksit ortamına alınmıştır. Numuneler iki hafta

bekletildikten sonra karbonatlaşma derinlikleri ölçülmüştür. Hızlandırılmış karbonatlaşma testinden önce yapılan kür şartlarının tamamında MI ve M2 betonları hem M3 ve M4'den hem de normal portland çimentom betonlardan fazla karbonatlaşmıştır. M3 ve M4 betonları normal betonla aynı karbonatlaşma derinlikleri göstermiştir [13]. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin karbonatlaşma üzerine etkisinin önemsiz olduğunu vurgulamış Tablo 1.3 ve Tablo 1.4'de gösterilen sonuçlara varılmıştır.

Tablo 1.3 Uçucu küllü betonlarda %65 nem ve 20 °C'de kür süresinin hızlandırılmış karbonatlaşma derinliğine etkisi

Seri no	3 gün	7 gün	28 gün	3 ay
MO	9.60	8.50	6.50	5.00
Mİ	14.10	12.80	10.40	8.40
M2	14.90	13.40	11.30	8.90
M3	10.30	9.80	6.30	4.50
M4	9.80	9.30	5.70	3.80

Tablo 1.4 Uçucu küllü betonlarda %100 nem ve 20 °C'de kür süresinin hızlandırılmış karbonatlaşma derinliğine etkisi

Seri no	3 gün	7 gün	28 gün	3ay
M0	9.10	7.40	4.50	3.30
Mİ	13.30	10.90	6.50	4.60
M2	13.80	11.70	7.30	5.00
M3	8.70	8.40	3.20	1.80
M4	9.60	7.50	2.10	1.60

Ramyar; Türkiye'de üretilen Afşin-Elbistan, Seyitömer, Soma-B ve Tunçbilek uçucu küllerinin çimento harcının büzülmesine ve betonun karbonatlaşmasına olan etkilerinin incelendiği çalışmasında numunelerin bakım sürelerini iki gruba ayırmıştır. Birinci grupta numuneler, 7 gün (21±1 °C sıcaklık ve %50 ±5 B.N.) ikinci grupta ise aynı sarflarda 90 gün tutulmuştur. Numunelerde çimentonun yerine ağırlıkça %10, %20 ve %40 oranlarında uçucu kül ilave etmiştir. Balom süreleri sonunda numuneler %4 CO₂ konsantrasyonu olan ortamda hızlandırılmış karbonatlaşma deneyine tabi tutulmuştur. Karbonatlaşma derinlikleri 4., 8., ve 20. haftalarda ölçülmüştür. Deneyler neticesinde %10 ve %20 uçucu kül içeren deney numuneleri kontrol numuneleri kadar veya ondan daha az,

%40 içeren numunelerde ise kontrol numunesinden daha fazla karbonatlaşma derinliği göstermiştir [14].

Loo ve diğ.; yaptıkları çalışmada ortamın CO₂ konsantrasyonun, maruz bırakılan sıcaklığın ve kür süresinin betonda karbonatlaşma hızına etkisini belirlemek ve matematiksel bir model oluşturmak için deneysel bir çalışma gerçekleştirmişler. Önermiş oldukları model deneysel verileriyle iyi bir uyum sağlamıştır. 28 günlük basınç dayanımının daha önceden önerilen birkaç modelde beton karbonatlaşmasının etkili bir belirleyicisi olduğunu belirtmişler ve bu parametrelerin yanı sıra su/çimento oranının etkisini de modellerine ilave etmişlerdir. Sonuç olarak hızlandırılmış karbonatlaşma için aşağıda verilen modeli önermişlerdir [15].

$$K = o(f_{28})^a \cdot (C_0)^b \cdot \exp(cT) \cdot (t_{wc})^d + p$$

K: Karbonatlaşma hızı

F₂₈:28 günlük basınç dayanımı

t «e: Kür süresi

C₀: Karbondioksit konsantrasyonu

T: Sıcaklık

a, b, c, d, a, p: Maruz kalma şartlarına bağlı katsayılar.

Jiang ve diğ. Çalışmaların da yüksek oranda uçucu kül içeren betonların karbonatlaşma derinliğinin önceden tahmini üzerine matematiksel bir model geliştirmişler ve modeli desteklemek için hızlandırılmış karbonatlaşma deneyleri yapmışlardır. Hızlandırılmış karbonatlaşma testinde ortam sıcaklığı 20 C°, bağıl nem %70 ve karbondioksit konsantrasyonu %20 olarak seçilmiştir. Numunelerde %70 ve %55 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu küllü betonlar normal portland çimentolu betonlara göre daha fazla karbonatlaşma derinlikleri göstermişler. Bununla beraber kür süresinin artmasıyla uçucu küllü betonların karbonatlaşma derinlikleri normal betonlarınkine yaklaşmıştır-. Tahmin sonucu elde edilen veriler ile hızlandırılmış karbonatlaşma testinin sonuçları karşılaştırmıştır. Karşılaştırma neticesinde deney verileri ile modelin verileri iyi bir şekilde uyum sağlamış ve araştırmacılar uçucu küllü betonlarda zamana göre karbonatlaşma derinliğinin tahmininde ortaya çıkardıkları modelin kullanabileceğini belirtmektedirler [16].

C_0 : ortamdaki CO_2 (%)

C: çimento miktarı (kg/m^3)

RH: bağıl nem

W/B: su/bağlayıcı

n: betonun boşluk sistemi ile ilişkili ve 2,0-2,1 değerleri arasında olan bir katsayı

Bulmuş oldukları bu model su/bağlayıcı oranının karbonatlaşmayı oldukça etkilediğini göstermektedir. Ayrıca modelin uçucu küllü betonlarla hazırlanacak olan betonların ileriki yıllarda karbonatlaşma derinliği hakkında yaklaşık bilgi verebileceğini belirtmişler [16].

Sonuç olarak karbonatlaşma olayının betonu bileşimine giren malzemeler ile uygulama teknikleri açısından birçok faktör etkileyebilmektedir. Yapılan tüm çalışmaların büyük bir kısmı betona giren malzemeler üzerinedir.

Bu tez çalışmasında farklı tip çimentolar ve katkı maddelerinin betondaki karbonatlaşmaya etkisi incelenmiştir. Hazırlanan 8 farklı beton serisinin farklı zaman periyodlarında karbonatlaşmaya maruz bırakılmış ve karbonatlaşma derinlikleri ölçülerek beton seriler arasında kıyaslama yapılmıştır. Çalışma zaman açısından tasarruf kazanılması nedeniyle hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılarak yapılmıştır.

2. BETON

Beton; çimento, beton agregası, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılması ile elde edilen, başlangıçta plastik kıvamda olup zamanla çimentonun hidratasyonu sebebi ile katılaşır, istenilen şekli alarak sertleşen kompozit bir yapı malzemesidir. Betonun özellikleri beton karışımında kullanılan malzemenin özellikleri ile yakından ilgilidir.

2.1. Beton Çeşitleri

Yapılarda kullanılan betonlar; birim ağırlıklarına göre, basınç dayanımlarına göre ve üretildikleri yerlere göre sınıflandırmak mümkündür.

TS EN 206 standardı dikkate alınarak birim ağırlığına göre beton temel olarak 3 sınıfta incelenebilir [17].

2.1.1. Hafif Beton

Etüv kurusu durumdaki birim hacim kütlesi (yoğunluğu), $0,8 \text{ gr/cm}^3$ veya daha büyük olup, 2 gr/cm^3 değerini geçmeyen beton türüdür. Hafif betonda kullanılan agreganın bir kısmı veya tamamı hafif agrega olabilir. Taşıyıcı hafif betonlarda kuru birim ağırlığı en fazla $1,9 \text{ gr/cm}^3$, 28 günlük basınç dayanımının da en az 16 N/mm^2 civarında olması istenir. Taşıyıcı hafif beton düşük birim ağırlığı nedeni ile yapı tasarımında daha küçük eleman kesitlerini ve daha uzun açıklıkları mümkün kılar, taşınması kolaydır, kalıp işlerinde de ekonomi sağlar [18].

2.1.2. Normal Beton

Etüv kurusu durumdaki yoğunluğu, 2 gr/cm^3 değerinden büyük olup, $2,6 \text{ gr/cm}^3$ 'ü geçmeyen ve geçmeyen ve genellikle doğal agrega kullanılarak üretilen beton türüdür. Bu betonlar, önemli bir ayrıcalık istemeyen bina inşaatlarında kullanılırlar. Maliyetleri ucuzdur.

2.1.3. Ağır Beton

Etüv kurusu durumdaki yoğunluğu $2,6 \text{ gr/cm}^3$ 'ten daha büyük olan beton türüdür. Ağır betonlar özellikle zararlı ışınlarla karşı bir kalkan oluşturmak maksadıyla kullanılırlar. Kullanım yerleri arasında nükleer reaktörler, hastanelerin ışın tedavisi yapılan bölümleri gösterilebilir. Ağır betonların agregaları, yoğunlukları yüksek olan agregalardır.

Basınç dayanımlarına göre bir sınıflandırma yapmak gerekirse, 28 günlük basınç dayanımı C 50/60'dan daha yüksek olan normal veya ağır betonlar ile 28 günlük basınç dayanımı sınıfı LC 50/55'den daha yüksek olan hafif betonlar yüksek dayanımlı beton sınıfına girmektedir. Bu sınırlar altında basınç dayanımına sahip betonlar ise normal dayanımlı beton sınıfına girmektedirler [17].

2.2. Beton Sınıfları

Betonun standart basınç dayanımı 28 gün boyunca $20(+/-2) \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve %100 nemli ortamda ve kireçli suda kür edilen, çapı 150 mm, boyu 300 mm olan silindir numunelerin aksel basınç altındaki dayanımı olarak tanımlanır. Gerilme cinsinden ifade edilen dayanım, kırılma yükünün, silindir alanına bölünmesi ile elde edilir. Beton sınıfları concrete = beton kelimesinin baş harfi olan "C" ile ifade edilir. Beton sınıfları ve özellikleri Tablo 2.1' de verilmiştir. Örneğin; C 20/25, 28 günlük karakteristik silindir basınç dayanımı 20 MPa yani 200 kgf/cm^2 olan betondur.

Tablo 2.1 Beton Sınıfları Ve Özellikleri

Beton Sınıfı	Silindir Basınç Dayanımı (MPa)	Küp Basınç Dayanımı (MPa)	Eksenel Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (MPa)
C16/20	16.0	20.0	1.4	27000
C18/22	18.0	22.0	1.5	27500
C20/25	20.0	25.0	1.6	28000
C25/30	25.0	30.0	1.8	30000
C30/37	30.0	37.0	1.9	32000
C35/45	35.0	45.0	2.1	33000
C40/50	40.0	50.0	2.2	34000
C45/55	45.0	55.0	2.3	36000
C50/60	50.0	60.0	2.5	37000

2.3. Betonun Oluşturan Ana Bileşenler

Betonu oluşturan hammaddeler çimento, su, agrega (kum, çakıl, kırma taş), kimyasal katkılar ve mineral katkılarıdır. Kimyasal katkılarla (akışkanlaştırıcı, priz geciktirici, geçirimsizlik sağlayıcı, antifriz.....) mineral katkıları (taş unu, tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb.) betonun performansını istediğimiz yönde iyileştiren çağdaş teknoloji unsurlarıdır. Çimentoyla suyun karışımından oluşan çimento hamuru zamanla katılaşarak sertleşerek agrega tanelerini (kum, çakıl, kırmataş) bağlar, yapıştırır, böylece betonun mukavemet kazanmasına imkân verir. Dolayısıyla betonun mukavemeti,

- çimento hamurunun mukavemetine
- agrega tanelerinin mukavemetine
- agrega taneleri ile çimento hamuru arasındaki yapışmanın gücüne (aderans) bağlıdır.

2.3.1. Çimento

Çimento, ana hammaddeleri kalkerle kil olan ve mineral parçalarını (kum, çakıl, tuğla, briket ..vs) yapıştırma için kullanılan bir malzemedir. Çimentonun bu yapıştırma özelliğini yerine getirebilmesi için mutlaka suya ihtiyaç vardır. Çimento, su ile reaksiyona girerek sertleşen bir bağlayıcıdır. Kırılmış kalker, kil ve gerekiyorsa demir cevheri ve / veya kum katılarak öğütülüp toz haline getirilir. Bu malzeme 1400-1500°C'de döner fırınlarda pişirilir. Meydana gelen ürüne "klinker" denir. Daha sonra klinkere bir miktar alçı taşı eklenip (%4-5) oranında, çok ince toz halinde öğütülerek Portland Çimentosu elde edilir. Çimentolar içinde en yaygın olarak bilinen çimento türü Portland çimentodur. Portland çimentosu için verilen standart TS EN 197-1 dir [19]. Portland çimentosunun ana bileşenleri Tablo 2.2' de verilmiştir.

Tablo 2.2. Çimento Ana bileşenleri

Çimento Ana Bileşenleri	Çimento Kimyasına Göre Sembolü
Dikalsiyum silikat, $2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S
Trikalsiyum silikat, $3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S
Trikalsiyum aluminat, $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Tetrakalsiyum aliminoferrit, $4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Katkılı çimento üretiminde; klinker ve alçı taşı dışında, çimento tipine göre tek veya birkaçı bir arada olmak üzere tras, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı vb. katılır. Çimento birçok beton karışımında hacimce en küçük yeri işgal eden bileşendir; ancak beton bileşenleri içinde en önemlisidir. En çok kullanılan çimento tipleri Portland Kompoze Çimento, Katkılı Çimento, Cürufu Çimento ve Sülfata Dayanıklı Çimento'dur. Bunun dışında özel amaçlar için Beyaz Portland Çimentosu ve diğer bazı tip çimentolar kullanılmaktadır. Normal betonda agrega taneleri en sağlam unsur olduğundan diğer iki unsur (çimento hamuru ve aderans) mukavemeti belirlemektedir. Çimento hamurunun mukavemeti önemli ölçüde su/çimento oranına da bağlıdır.

TS EN 197-1 nolu standartın kapsamındaki 27 farklı çimento tipi vardır. Bu çimentolar beş ana grup altında incelenmektedir:

- ✓ CEM I Portland Çimentosu
- ✓ CEM II Portland-Kompoze Çimento
- ✓ CEM III Yüksek fırın curufllu Çimento
- ✓ CEM IV Puzolanlı Çimento
- ✓ CEM V Kompoze Çimentosudur.

Bu tip çimentoların malzeme oranları birbirinden farklıdır. Bu durum çimentoların özelliklerini, dayanımlarını, her duruma verecekleri tepkiler de farklıdır. Çimentodaki değerler N/mm^2 birimiyle 28 günlük minimum basınç dayanımını verir. Çimentolardaki R ve N ibaresi çimentoların dayanımları hakkında bilgi verir. (R) ibaresi yüksek erken dayanım olduğunu, (N) ibaresi ise yüksek ve geç dayanım olduğunu belirtir.

2.3.2. Agrega

Beton üretiminde kullanılan kum, çakıl, kırmataş gibi malzemelerin genel adı agregadır. Beton içinde hacimsel olarak % 60-75 civarında yer işgal eden agregaya önemli bir bileşendir. En çok kullanılan agregaya türleri, kum ve çakıldır. Agregaları, ince ve iri agregaya olmak üzere iki gruba ayırmak mümkündür. Çakıl, bir doğal iri agregadır. Bazı hallerde iri agregaya olarak çakıl yerine, doğal taş blokların konkasör denilen aletlerle parçalanması sonunda elde edilen kırma taş da kullanılır. O halde, kırma taş, yapay iri agregadır.

Doğal kumun bulunmaması halinde öğütücü denilen aletler yardımıyla yapay ince agreganın da elde edilme imkânı vardır [20].

Agregalarda aranan en önemli özellikler şunlardır:

- Sert, dayanıklı ve boşluksuz olmaları,
- Zayıf taneler içermemeleri (deniz kabuğu, odun, kömür... gibi)
- Basınca ve aşınmaya mukavemetli olmaları,
- Toz, toprak ve betona zarar verebilecek maddeler içermemeleri,
- Yassı ve uzun taneler içermemeleri,
- Çimentoyla zararlı reaksiyona girmemeleridir.

Agreganın kirliliği (kil, silt, mil, toz vb.) olması aderansı olumsuz etkilemekte, ayrıca bu küçük taneler su ihtiyacını da arttırmaktadır. Beton agregalarında elek analizi, yassılık, özgül ağırlık ve su emme gibi deneyler uygun aralıklarla yapılarak kalite sürekliliği takip edilmelidir.

Agregalar için standart TS 706 EN 12620'dır. Bu standart, beton yapımında kullanılmak amacıyla, doğal, yapay ve geri kazanma yoluyla elde edilen agregaların, dolgu malzemesi olarak kullanılan agregaların ve bu malzemelerin oluşturduğu karışımların bütün özelliklerini kapsar [21].

Agregaları çeşitli şekillerde sınıflandırmak mümkündür. Fakat en çok kullanılan sınıflandırmalar, kaynağına, özgül ağırlık veya birim ağırlıklarına, tane büyüklüklerine ve tane şekillerine göre yapılan sınıflandırma tipleridir.

1. Kaynağına göre agregalar

Doğal Agregalar: Bu tür agregalar, nehir yatakları, eski buzul yatakları, deniz ve göl kenarları, taş ocakları gibi doğal kaynaklardan elde edilmiş olan agregalardır. Bu agregalara konkasörde kırma, elekten eleyerek değişik tane boyu sınıflarına ayırma ve yıkama işlemleri haricinde hiçbir işlem uygulanmaz. Kum, çakıl, kırmataş en çok kullanılan doğal agregalardır. Hafif beton üretiminde kullanılan pomza taşı ve bims gibi hafif agregalar ile hematit (Fe_2O_3), magnetit (Fe_3O_4) ve barit ($BaSO_4$) gibi demir cevherinin kırılması ile elde edilen ağır agregalar bu sınıfa girmektedir [22]

Yapay Agregalar: Bu tür agregaların bir diğer adı da sanayi ürünü agregalardır. İkinci bir işlem sonucu beton yapımında kullanılır hale getirilebilirler [23]. Yapay agregalar arasında en çok kullanılanları, yüksek fırın cürufu genişletilmiş kil agregası, uçucu kül agregası ve genişletilmiş perlittir.

2. Özgül ağırlık ve birim ağırlıklarına göre agregalar

Normal agrega: EN 1907-6 standardına uygun olarak tayin edilen etüv kuru tane yoğunluğu 2 gr/cm^3 - 3 gr/cm^3 arasında olan agregalar bu sınıfa girmektedir [17].

Hafif agrega: EN 1907-6 standardına uygun olarak tayin edilen etüv kuru tane yoğunluğu $\leq 2\text{ gr/cm}^3$ veya EN 1907-3 standardına uygun olarak tayin edilen etüv kuru tane

yığın (boşluklu) yoğunluğu $\leq 1,2 \text{ gr/ cm}^3$ olan mineral esaslı agregalar hafif agregalar olarak adlandırılırlar [17].

Ağır agregalar: EN 1907-6 standardına uygun olarak tayin edilen etüv kurusu tane yoğunluğu $\geq 3\text{gr/cm}^3$ olan agregalardır [17].

3. Tane büyüklüğüne göre agregalar

İri ve ince agregalar: TS 706 EN 12620'ye göre, 4mm göz açıklıklı kare delikli elekten geçen agregalar, bu elek üzerinde kalan agregalar ise iri olarak adlandırılmaktadır. İnce agregaya yaygın olarak kum denilmektedir. Büyük taşların konkasörde kırılması ile elde edilen kırmataş bir iri agregadır. Çakıl ise kırma işlemine tabi tutulmamış olan iri agregadır. Standartta, iri ve ince agreganın karışımından meydana gelmiş agregalar için ise tuvenan agregalar tabiri kullanılmaktadır [21].

4. Tane şekline göre agregalar

Yuvarlak, köşeli, yassı ve uzun agregalar: Genellikle nehir yataklarından temin edilen, taneleri küresel şekilde veya küresele yakın şekilde olan agregalar yuvarlak agregalar olarak tanımlanır. Kırılma işleminden dolayı yüzeyinde çıkıntılar bulunan agregalar ise köşeli agregalardır. Kırmataş agregaları bu gruba girer. Üçüncü boyutu diğer iki boyutuna göre çok küçük olan agregalar yassı; iki boyutu dar, üçüncü boyutu ise çok büyük olan agregalar ise uzun agregalar olarak adlandırılırlar. Uzun ve yassı taneler şekilce kusurlu olarak tabir edilirler [22].

2.3.3. Beton Karışım Suyu

Beton üretiminde kullanılan karışım suyunun iki önemli işlevi vardır. Bunları aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz;

1. Kuru haldeki çimento ve agregayı plastik kıvamlı işlenebilirliği yüksek bir kütle haline getirmek,
2. Çimento ile kimyasal reaksiyona girerek plastik kütlede sertleşmesini sağlamak.

Kıvam, m³'e giren su miktarına, betonu mukavemeti ise su/çimento oranına bağlıdır. Bu sebeple şantiyeye teslimi yapılan taze betona daha fazla kıvam kazandırmak amacıyla fazladan su katmak betonun mukavemetini yok eder. Genel olarak içilebilir nitelik taşıyan bütün sular betonda kullanıma uygundur. Ancak, betonda kullanılacak suyun içilebilir özellikte olması şart değildir. Bir takım ön deneyler yapılmak kaydıyla, içilemeyen sularla gayet kaliteli beton üretilebilir. Bununla birlikte karışım suyu içinde bulunabilecek tuz, asit, yağ, şeker, lağım ve endüstriyel atıklar gibi bazı maddeler betonda istenmeyen etkiler yaratabilir. Karışım suyunun analizlerle belirlenmesi ve kalitesinin belli aralıklarla denetlenmesi şarttır. Betonun bünyesinde çimento ile reaksiyona girmeyen fazla suyun bıraktığı boşluklar yalnız dayanımı düşürmekle kalmamaktadır. Boşluklardan içeri giren zararlı unsurlar (klor, sülfat vb. zararlı etkenler) beton ve donatıya zarar vermekte ve betonun ömrünü kısaltmaktadır.

2.3.4. Beton Katkı Maddeleri

Beton karışımını oluşturmak üzere kullanılan temel malzemelerin (çimentonun, agreganın, suyun), karılma işleminden hemen önce veya karılma işlemi esnasında beton karışımının içerisine katılan malzemeye “beton katkı maddesi” denilmektedir [25]. Beton katkı maddeleri, betonun bazı özelliklerini değiştirerek performansını arttırabilmek veya betonun daha ekonomik olmasını sağlayabilmek için kullanılmaktadır.

Ayrıca beton katkı maddeleri taze betonun işlenebilme, kıvam, su ihtiyacı ve priz süreleri gibi özelliklerini istenildiği yönde değiştirmek, terlemesini azaltmak için kullanılmaktadır.

Katkı maddeleri kullanılarak gerek ilk günlerde ve gerekse nihai olarak daha yüksek beton dayanımı elde edilmektedir. Ayrıca, beton katkı maddelerinin kullanımları ile sertleşmiş betonun çevreden veya ortamdan kaynaklanan yıpratıcı etkenlere karşı (donma-çözünme olaylarına, aşınmaya, alkali-agrega reaksiyonuna ve sülfat hücumlarına, korozyona diğer yıpratıcı etkenlere karşı) daha dayanıklı olabilmesi sağlanmaktadır.

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan mineral malzemelerin mutlaka ince taneli olmaları gerekmektedir. İnce taneli mineral katkı maddeleri beton üretiminde kullanılan temel malzemelerin (çimentonun, agreganın ve suyun) yanı sıra ayrı bir malzeme olarak beton karışımına doğrudan dahil edilmekte ve temel malzemelerle beraber karılmaktadır. Çoğu zaman betonda kullanılacak çimento miktarı azaltılmakta ve azaltılan miktar kadar ince

taneli katkı maddesi konulmaktadır [22]. Bunların kullanılabilirlikleri oranlar ilgili standartlarca belirlenmiştir. Bu ince taneli mineral katkıları içerisinde en yaygın kullanılanları, beton üretimi ile doğrudan ilgili olmayan ve bir endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilen silis dumanı ve uçucu küldür.

2.4. Betonun Özellikleri

2.4.1. İşlenebilirliği

İletimi ve yerleştirilmesi sırasında homojen karışımı bozulmuyorsa, döküldüğü kalıbın şeklini alıyorsa ve dış yüzeyi düz teşkil edilebiliyorsa, bu çeşit betona “işlenebilir” denir. Bu özelliği en çok, betonun içinde bulunan su miktarına bağlıdır. Kalıp şekline ve kullanıldığı yapı elemanının özelliğine göre değişik derecede işlenebilirliğe sahip beton arzu edilir.

2.4.2. Mukavemet

Beton, yapılarda basınç ve çekme gerilmelerine maruzdur. Yapılarda taşıyıcı malzeme olarak kullanılır. Her ne kadar pek çok faktör mukavemet üzerine etkili olursa da, en önemlisi su-çimento oranıdır. Oranın az olması yüksek kalitede betonun ortaya çıkmasını sağladığı gibi, betonun su geçirmez, aşınmaya ve çevre şartlarına dayanıklı olmasını sağlar. Su-çimento oranı düşük betonlarda mukavemet, ayrıca belirli miktarda pürüzlü yüzeyli kırma taşın agrega olarak kullanılmasıyla da artırılabilir.

2.4.3. Dayanıklılık

Dış ve iç etkiler karşısında özelliklerini korumasına, betonun dayanıklılığı denir. Dış etkiler, donma, çözülme, zararlı su ve zemin etkileridir. Betonun boşluklarında bulunan suyun donması sonucu, hacmi % 9 oranında genişler. Bu genişleme sonucu, betonda meydana gelen çekme gerilmeleri betonun çatlamasına ve parçalanmasına sebep olur. Betonun su emmesi az veya donan suyun genişlemesi için yeterli boşluk var ise don hasarı azalır. Betona zararlı iç etkiler ise, beton içindeki çimento, agrega ve su arasındaki kimyasal ve fiziko-kimyasal reaksiyonlardan kaynaklanır. Mesela, çimento içinde az miktarda bulunan alkaliler (K_2O, Na_2O), agrega içindeki aktif silis veya karbonatla reaksiyona girerek çözünme ve şişme yoluyla hasara yol açarlar.

2.4.4. Şişme ve Büzülme

Betonun diğeri bir özelliği nemle şişmesi ve kurumayla büzülmesidir. Şişme, nemin su ile kimyasal reaksiyona girmiş portland çimentosunun yapısına girmesi sonucu ortaya çıkar. Hidratasyona uğramış portland çimentosunun jel tanecikleri (küçük kristalleri) iğnecik ve pulcuklar şeklindedirler. Nemin girmesiyle pulcuk tabakaları birbirlerinden ayrılır ve şişme meydana gelir. Betonun kurumayla kasılma olur ve tabakalar daha sıkı hale gelir. Büzülmenin ortaya çıkmasının bir diğeri sebebi de, portland çimentosu ile suyun reaksiyona girerek hidrasyon ilerledikçe suyun zamanla azalmasıdır. Başka bir deyişle dışarıdan su alamıyorsa, sertleşen çimento hamuru kendi kendini kurutur. Hidrasyon ısısının doğurduğu sıcaklık ısıtmasıyla da betonda büzülme ortaya çıkar. Dış katmanlarla beton kütesinin içinde sıcaklıkların farklı olması nedeniyle betonda ince çatlaklar meydana gelir.

2.4.5. Su geçirimsizlik

Beton tamamen su geçirimsiz olmamasına rağmen, barajlarda, su depolarında ve diğeri su ile ilgili yapılarda kullanılır. Bu, karma suyunun meydana getirdiği boşluklar sebebiyledir. Pek önemli sayılmayabilir. Fakat bu boşluklara giren suyun donma ve çözülmesi betonda hasar meydana getirir. Betonun geçirgen olması zararlı tuz ve asitlerin iç bünyeye nüfuz etmesini de kolaylaştırır. Ayrıca saf su, hidrate portland çimentosunun çözülebilir bileşenlerini ayrıştırır. Su geçirimsizlik, beton üretiminde kullanılan karma suyun miktarının yeterli derecede işlenebilmesini sağlamak şartıyla, en aza indirilmesi ile sağlanabilir. Bu gaye ile bazı katkı maddeleri de kullanılabilir

2.4.6. Birim ağırlık

Betonun birim ağırlığı, içine giren bileşenlerinkine ve yerleştirme derecesine bağlıdır. Atom reaktörlerinin inşasında birim ağırlığı 3,2 t/m³'ü aşan beton kullanılır. Isı yalıtım gayesi ile de birim ağırlığı 400-800 kg/m³'e inen hafif beton da elde edilir. Genel olarak 2,5 t/m³ arasındadır.

2.4.7. Kimyasal mukavemet

Hidrate olmuş portland çimentosu, kimyasal olarak bir baz olması sebebiyle asitlerle reaksiyona girer ve ayrışır. Su-çimento oranı düşük olan ve yüksek birim ağırlıktaki betonlar kimyasal etkilere daha mukavimdir. Yangına dayanıklılık: Hidrate olmuş portland çimentosunun bağlayıcı yapısı yaklaşık 1100°C'ye kadar korunduğundan, betonun yangına dayanıklı olduğu söylenebilir. Ancak 300°C' sıcaklığın üstünde sıcaklığa maruz kalan betonlarda çatlaklar teşekkül ettiğinden, mukavemetinde önemli azalmalar meydana gelir.

2.4.8. Ortalama Basınç Dayanımı

Servis koşullarında betonarme yapı dizaynı yapanlara ortalama bir basınç dayanımı değeri gerekebilir. Bu değer genel olarak karakteristik basınç dayanımının 28. günde 3MPa üstü kadardır. Betonun karakteristik dayanımı, beton sınıfını tanımlama için kullanılan, istatistiksel verilere dayanılarak belirlenen ve bu değerden daha küçük dayanım değeri elde edilmesi olasılığı, olan (TS EN 206'ya göre %5) dayanım değeridir. Daha üst dayanım ortalaması aşağıdaki koşullarda kullanılabilir.

Daha sonraki günlerde de beton dayanım kazanmaya devam eder. Bir sene sonraki dayanım, kullanılan çimento cinsi ve mineral katkıya göre değişmekle birlikte daha fazla olabilir.

2.4.9. Çekme Dayanımı

Çekme dayanımı, betonarme yapıların tasarımında, öngerilmeli elemanların çatlama momentlerinin hesaplanmasında, çatlama genişliklerinin kontrol edilmesi için donatı hesaplanmasında, erken yaş termal gerilmelerinin neden olduğu çatlakların belirlenmesinde ve sehim hesabının yapılmasında kullanılan bir parametredir. Özellikle yüksek sınıf beton kullanımıyla yapı elemanındaki çatlak ve sehim miktarı azalır. Diğer yandan yüksek dayanımlı betonlarda erken yaş termal gerilmeler daha geniş aralıklarla daha geniş açıklıkta istenemeyen çatlaklara neden olabilir.

Çekme dayanımı özellikle lifli betonlarda kullanılır. Malzeme en zayıf halkasından kırılır. Deney uygulanan numune ne kadar büyükse o kadar büyük bir olasılıkla belli bir düzlemde boşluklar meydana gelir. Bu nedenle yapı boyutu önemlidir. Eğilmedeki çekme

dayanımı yarmadaki çekme dayanımından daha büyük olur. Yarmada çekme dayanımı da direkt çekme dayanımından daha büyük olur.

2.4.10. Elastisite Modülü

Elastisite modülü gerilme şekil değiştirme arasındaki orandır. Beton tam bir elastik malzeme olmadığından gerilme şekil değiştirme arasındaki oran sabit değildir. 3 Elastisite modülü vardır. Sekant modülü, tanjant modülü ve ilk tanjant modülü. EN 1992-1’de Ecm kullanılır. Dizaynda kullanılan değer Ecd gce ile bölünmüş değerdir. gce değerinin 1.2 alınması tavsiye edilmektedir. E değeri çok önemli bir değerdir. Örneğin döşemelerde sehim hesaplamalarında, ön veya art germeli elemanların hesaplamalarında kullanılır. E değeri ayrıca kalıcı yük altında kolon kısaltmalarını da etkiler.

Betonun elastisite modülü ya agregaya ya da beton sınıfı ile değiştirilebilir. Elastisite modülünü % 20 artırmak için dayanım sınıf 3 sınıf artırmak gerekmektedir. Bu maliyeti agreganın değiştirilmesiyle karşılaştırarak değerlendirmek gerekir. Yüksek elastisite modülünü olan agregaya kullanımı betonun elastisite modülünü artırır. Fakat daha düşük dayanımlı betonlarda bu artış daha az olur. Pasta miktarının artışı yüksek dayanımlı betonlarda elastisite modülünü artırır.

Betonun poisson oranı $\mu=0,2$ olarak kabul edilir. Poisson: Dikey eksendeki elastik bölgede yanal şekil değiştirmenin boyuna şekil değiştirmeye oranıdır. Beton için genellikle 0,20 olarak alınırken metallerde bu değer 0.25’dir.

2.4.11. Sünme

Sünme, sabit yük altında artan şekil değiştirme özelliği olarak tanımlanır. Diğer etkiler, büzülme termal şekil değiştirme gibi etkiler çıkarıldıktan sonra elde edilir. Örneğin bir döşemeden kalıp söküldükten sonra döşeme şekil değiştirir. Bu ilk şekil değiştirme elastik şekil değiştirme olarak tanımlanır. Zamanla döşeme genel olarak sünme etkisiyle daha fazla şekil değiştirir. Sünme nedeniyle olan şekil değiştirme ilk şekil değiştirmeden daha fazla olabilir. Bu nedenle dizaynı yapan tarafından dikkate alınmalıdır. Özellikle kiriş veya döşemenin altına hareketi engelleyici malzemeler konulduğunda bu hesaplamalara dikkat edilmelidir.

Sünme, öngerilmeli elemanlarda çekme gerilmelerini azaltır ve kolonlarda kısalmalara neden olur ve betondan donatıya olan yük transferini azaltır.

Sünme çekme gerilmelerinde faydalı olabilir. Kuruma rötresi, termal gerilme veya yükleme nedeniyle oluşan gerilmeleri azaltır.

2.4.12. Rötire

Rötire kuruma rötresi ve otojen rötrenin birleşimidir. Otojen rötire hidrasyon reaksiyonları sırasında betonun içsel su tüketimi ile oluşur. Hidrasyon reaksiyonları sonucu oluşan ürünlerin hacmi orijinal hidrate olmamış ürünlerin hacminden daha fazladır. Bunun sonucu çekme gerilmeleri ve rötire oluşur. Normal betonda otojen rötire 100 mikron şekil değiştirme kadardır. Daha yüksek dayanımlı ve daha düşük su/çimento oranına sahip betonlarda kuruma rötresi daha fazla olabilir. Kuruma rötresi atmosfere su buharlaşması ile oluşur. Bu buharlaşma genellikle çimento hamurundan kaynaklanır. Kuruma hızı bağıl nem, yüzey/hacim oranına bağlıdır. Bağıl nem arttıkça rötire azalır. Yüzey oranı arttıkça kuruma rötresi artar. Dizayn sırasında rötire dikkate alınmalıdır. Eğer rötire engellenirse çatlamlar meydana gelir. Öngerilmeli betonda rötire gerilmelerin azalmasına neden olur.

2.4.13. Termal Genleşme Katsayıları

Termal genleşme katsayısı, donatı veya başka bir yapı elemanı ile engellenmemiş beton için sıcaklık derecesi başına şekil değiştirme olarak belirlenir. Tipik beton için 8-13 mikro şekil değiştirme Kelvin olarak bilinir. Betonun sıcaklığı değiştikçe beton genişir veya küçülür. Bu özelliğin yapıda birçok etkisi vardır. Derzlerin kesiminden, küçülme sırasında çatlakları kontrol etmek için gerekli donatının hesaplanmasında rötire değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. Çimentoda oluşan hidrasyon ısısından kaynaklanan sıcaklığın yükselmesi ve sonrasında küçülmeden kaynaklanan erken yaş termal çatlaklarına neden olabilir. Çatlaklar engellenmek istenildiğinde, gerekli donatının hesaplanması için betonun genleşme katsayısının bilinmesi gerekmektedir. Termal genleşmesi önlenirse kullanılacak donatı miktarı da azalır.

Betonun termal genleşmesi yaş ve nem miktarı ile değişkenlik gösterir. Kuru betonun termal genleşmesi suya doygun olandan daha fazladır. EN 1992' de termal

genleşme katsayısı daha fazla bilgi verilmediğinde 10 mikro şekil değiştirme /kelvin olarak alınabilir.

2.4.14. Yangın Dayanımı

Beton yanmaz, yangını iletmez ve duman oluşturmaz. Bu nedenle beton yangına karşı A tipi dayanıma sahiptir.

Beton ısıyı yavaş iletir, böylece bir kalkan vazifesi görür ve yangın sırasında dayanımının büyük kısmını muhafaza eder. Betonu yangından etkileyen en büyük husus yüzey artmalarıdır. 300 °C’de başlar ve en fazla 500°C’de görülür. Betondaki yavaş ısı iletiminden dolayı yüksek sıcaklık yüzeyde kalır ve yüzeyde su buharına dönüşerek yüzey atmalarına sebep olur. Yüzey atmaları beton dayanımı yükseldikçe artar, betonun nem oranı arttıkça artar.

EN 1992’de aks uzaklıklarına bağlı olarak donatının ulaşacağı sıcaklıklar hesaplanır. Betonun yangın dayanımının artırılmasına gerek yoktur. Fakat kalker tipi agregaların kullanılması silissi agregalara göre dayanımını artırır. Hafif agrega kullanımı performansını arttırır. Hafif agregalar suya doymun halde ise performansını da kötü hale getirebilir. Kalsiyum alimunatlı çimentonun yangın dayanımı daha fazladır. Fakat yapılarda değil daha çok refraktör üretiminde kullanılır.

2.5. Betonun Avantajları Ve Dezavantajları

2.5.1. Betonun Avantajları

Betonun çok değişik yapılarda çok değişik amaçlarla kullanılan önemli ve popüler bir yapı malzemesi olmasının nedenleri, bu malzemenin sahip olduğu üstün özelliklerden ileri gelmektedir. Betonu diğer yapı malzemelerinden daha elverişli kılan özellikleri, “betonun avantajları “ olarak adlandırılabilir.

Betonun avantajları şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Taze betonun plastik özelliği nedeniyle, istenilen şekil ve boyutlardaki beton elemanlar kolayca üretilebilmektedir.

- ✓ Sertleşmiş beton elemanlar yapıdaki yerinde üretilebildiği gibi, bir fabrikada da önceden üretilebilmekte ve yapıya sertleşmiş beton elemanları olarak getirilip kullanılabilir. kullanılabilmektedir.
- ✓ Beton yerleştirme yöntemlerinde çeşitlilik ve kolaylık bulunmaktadır.
- ✓ Sertleşmiş beton oldukça yüksek basınç dayanımına sahiptir.
- ✓ Sertleşmiş beton, hizmet gördüğü süre boyunca, çevrede oluşan yıpratıcı etkenlere karşı diğer yapı malzemelerinin çoğundan daha dayanıklıdır. Bakım işleri ve masraf gerektirmemektedir.
- ✓ Beton, çelik donatılarla çok iyi aderans (kenetlenme) gösterebilecek kapasitede bir özelliğe sahiptir.
- ✓ Beton, diğer yapı malzemelerine göre, daha ekonomiktir.
- ✓ Beton, estetik amaçlarla kullanılmaya uygun özellikte bir malzemedir.

2.5.2. Betonun Dezavantajları

Mükemmel bir yapı malzemesi olarak nitelendirilebilecek olan betonun, diğer yapı malzemelerine göre bazı eksik yanları da mevcuttur. Bu eksiklikler, “betonun dezavantajı” olarak adlandırılabilir. Betonun dezavantajı olarak belirtilebilecek özelliklerin hiçbiri, betonun kullanımını engelleyecek nitelikte değildir. Ancak, betonun dezavantajlı tarafının bilinmesi ve bu eksiklikleri giderebilecek önlemlerin alınması gerekmektedir.

Betonun dezavantajları şu şekilde sıralanabilir:

- ✓ Sertleşmiş beton, çekme dayanımı düşük olan bir malzemedir.
- ✓ Sertleşmiş beton gevrek özelliğe sahiptir.
- ✓ Beton, çevreden maruz kalabileceği ıslanma-kuruma veya sıcaklık değişiklikleri karşısında bir miktar hacim değişikliği gösterebilmektedir.
- ✓ Beton, birçok yapı malzemesi gibi, sabit yükler altında zamanla kalıcı deformasyon gösterebilmektedir.
- ✓ Beton, mükemmel bir geçirimsizliğe sahip değildir; içerisine bir miktar su veya zararlı maddeler içeren sular sızabilmekte ve betonun dayanıklılığını azaltabilecek olaylara neden olabilmektedir.
- ✓ Betonlardaki “dayanım/ağırlık” oranı, metallerde olduğu kadar yüksek değildir.

2.6. Betonun Dayanıklılığı (Durabilite)

Durabilite; beton teknolojisinde betonun dayanımı, üzerine gelen yüklerin neden olacağı şekil değiştirmelere ve kırılmaya karşı, betonun gösterebileceği maksimum direnme olarak tanımlanmaktadır.

Çeşitli türdeki yapılarda kullanılmakta olan beton, hizmet süresi boyunca, bünyesinde yıpranmaya yol açabilecek birçok kimyasal ve/veya fiziksel etkenlerle karşılaşmaktadır. Bu etkenler, doğa koşullarında, betonun kullanıldığı ortamdan, betondaki alkalilerle reaktif agregalar arasındaki reaksiyonlardan kaynaklanmaktadır. Betonun içerisine sızan su, karbon dioksit, oksijen, sülfat, asit ve klor gibi maddeler, betonda değişik türdeki kimyasal olayların oluşmasına neden olmaktadır.

Beton dayanıklılığı dış ortamdaki agresif ögelere karşı direncidir. Bu ögelerin yanında betonu oluşturan bileşenlerin de bazı durumlarda tepkimelere girişmesi olasıdır (Alkali-Agrega tepkimesi gibi). Bu tür iç korozyon olayları dış ortama bağlı olarak şiddetlenebilir.

Betonun doğal kimyasal zararlara karşı dayanıklı olması, fizikokimyasal dış etkenler sonucu niteliklerini kaybetmemesi gerekir. Bunun için yeterli kimyasal dayanıma (dayanıklığa) sahip bulunması istenir. Çimentoyla yapılmış herhangi bir elemanın çimentoyla yapmış olduğu reaksiyon sonucunda zamanla mukavemeti artacağına azalmamalıdır.

Beton çeşitli zararlı etkiler altında bir takım kimyasal reaksiyonlar nedeniyle sahip olduğu mukavemeti zamanla kaybedebilir. Bu durumda yapı betonun maruz kaldığı kuvvetlere dayanamamanın bir sonucu olarak, kısmen veya tamamen yıkılır veya kullanılamaz hale gelir.

Fiziko-kimyasal bir süreç olan karbonatlaşma ise ortamın alkalinitesini düşürerek koruyucu oksit tabakasının tahrip olmasına neden olur. Betonun alkalinitesi, hidrate olmuş çimentonun içerdiği Ca(OH)_2 ile sağlanır ve pH 12 civarındadır. Ancak Ca(OH)_2 zamanla havadaki CO_2 ile reaksiyona girerek CaCO_3 'e dönüşür ve pH 8'in altına düşebilir. Atmosferdeki miktarı hacimce %0.03 olan CO_2 'nin kırsal bölgelerde bile karbonatlaşmaya olan etkisi söz konusudur. CO_2 konsantrasyonu arttıkça karbonatlaşma oranı artmaktadır. Karbonatlaşma derinliğinin birkaç mm ile sınırlı olduğu bilinmesine karşın kusurlu betonda, herhangi bir mekanik zorlama olmaksızın çatlaklar oluştuğundan, karbonatlaşma derinliğinin 10 cm'den fazla olduğu tespit edilmiştir.

Betonun içerisindeki alkalilerle reaktif agregalar arasında gelişen ve sertleşmiş betonun genişerek yıpranmasına yol açan reaksiyonlar da kimyasal olaylar sonucunda oluşmaktadır. Islanma - kuruma, donma - çözülme, ısınma - soğuma ve aşınma gibi olaylar betonun yıpranmasına yol açacak nitelikteki fiziksel olaylardır. Betonda yer alan kimyasal ve fiziksel olaylar sonucunda, beton daha boşluklu bir malzeme durumuna gelebilmekte, içerisindeki demir donatılar korozyona uğramakta, beton aşınabilmekte ve betonun içerisinde çok büyük gerilmeler oluşabilmektedir. Bütün bu olaylar betonun hasar görmesine, hizmet edemez duruma gelmesine yol açmaktadır. Beton tasarımında, betonun hedeflenen dayanımdan daha düşük dayanıma sahip olmaması gerekmektedir. Kullanım ömrü süresince betonun durabilitesi çeşitli fiziksel ve kimyasal dış etkilere zarar görür. Bu dış etkiler aşağıda maddeler halinde kısaca izah edilmiştir.

- **Betondaki kalsiyum hidroksitin çözünmesi ve beton yüzeyinde çiçeklenme olması**

Kalsiyum hidroksit, sertleşmiş çimento hamurunun yapısında yer alan bir üründür. Kalsiyum hidroksit, suya karşı dayanıklı değildir. Dışarıdan herhangi bir yolla betonun içerisine sızmış olan sular, kalsiyum hidroksitin çözünmesine yol açmaktadır.

Beton içerisine sızan suların etkisiyle çözünen kalsiyum hidroksitli ve tuzları içeren su, kapiler boşluklarda yer alan fiziksel olayla betonun yüzeyine doğru hareket etmektedirler.

Beton yüzeyine çıkan suyun buharlaşması sonucundan da suyun içerisinde bulunan kalsiyum hidroksit ve tuzlar, beton yüzeyinde ince bir çökelti tabakası oluşturmaktadırlar. Kalsiyum hidroksit, havadaki karbondioksitle temas ederek, CaCO_3 (kalsiyum karbonat) haline dönüşmektedir.

Betonun içerisindeki kalsiyum hidroksitin ve tuzların çözünmesi ve betonun yüzeyine çıkması sonucunda, beton yüzeyinde kristaller halinde ince bir beyaz tabaka oluşturması olayına 'çiçeklenme' denilmektedir. Bazen içerisinde çözülmüş kalsiyum hidroksit ve çeşitli tuzlar bulunan su, betonun yüzeyine tamamen çıkamadan buharlaşmaktadır. Bu durumda, yüzeye yakın bir bölgeye yerleşen tuzlar, gereken nemlilik ortamını daha sonraları buldukları takdirde yüzeye çıkarak çiçeklenme yaratmaktadır. Çiçeklenme olayı sonucunda beton yüzeyinde CaCO_3 ve tuz birikintisinin beyaz bir leke gibi yer almış olması, betonun görünümünü bozmaktadır.

- **Sülfat etkisi**

Sertleşmiş betonun içerisine dışarıdan sızan sularla birlikte giren sülfatlar, betonun genişip çatlamasına yol açan kimyasal olayların gelişmesine neden olmaktadır. Sülfatların betonda yarattığı yıpratıcı etki “sülfat hücumu” olarak adlandırılmaktadır.

- **Deniz suyu etkisi**

Deniz suyu etkisine maruz kalan betonlar, sülfat hücumunun yanı sıra, gözeneklerinde çökelen tuz kristallerinin yarattığı basınç nedeniyle de genişip, yıpranabilmektedir. Deniz sularının beton yapılarına esas zararı; bu tür sularda bulunan klorlardan kaynaklanmaktadır. Deniz suyundaki klor, betonun içerisindeki demir donatıların korozyonunu (paslanmasını) hızlandırmakta, betonun parçalanmasına yol açmaktadır.

- **Asit etkisi**

Sertleşmiş betonun içerisine sızan sularda bulunan asitler, betonun genişip hasar görmesine yol açan kimyasal olayların yer almasına neden olmaktadır. Asitlerin betonda yarattığı yıpratıcı etki “asit hücumu” olarak adlandırılmaktadır.

- **Aşınma**

Beton yüzeyine sürtünme veya çarpma şeklinde gelen kuvvetler, betonun yüzeyini adeta törpülemesine etki yaratmakta, yüzeyin aşınmasına yol açmaktadır. Aşınma yavaş tempoda yer alan fiziksel ve mekanik bir olaydır.

- **Alkali - agreg a reaksiyonu**

Alkali-agrega reaksiyonu, sertleşmiş betonun içerisindeki alkalilerle reaktif silika içeren Agregalar arasında oluşan bir reaksiyondur. Alkalilerle, reaktif silika mineralleri arasındaki reaksiyonların etkisiyle, önce, reaktif silika minerali çözünme göstermekte ve ortamdan bir miktar su da alarak, sodyum-silika-hidrat ve potasyum-silika-hidrat gibi alkali-silika jelleri oluşturmaktadır.

Alkali-silika jelleri bünyelerine çok fazla su alabildikleri için sertleşmiş beton içerisinde çok büyük genişlemelere yol açabilmektedir. Sonuç olarak; çatlak ağına sebep olmaktadır.

- **Betonun içerisine yerleştirilen çelik donatının korozyonu**

Yapılarda yaygın olarak kullanılan ve çok önemli görevi olan çelik donatı, zamanla, “paslanma” da denilen “korozyon” olayı ile karşı karşıya kalabilmektedir. Korozyon betonda; çatlamalara, gerilmelere, parçalanmalara ve betonun görünümünü bozmaktadır.

- **Donma - çözülme etkisi**

Donma-çözülme olayı, fiziksel bir etkidir. Islanarak doygun duruma gelen ve donma-çözülme devirlerine, maruz kalan bütün betonlar kısa sürede hasar görmektedirler. Beton donma-çözülme olayları karşısında, betondaki iç gerilmeler nedeniyle, beton yüzeyindeki, agregalar gevşeyip kopmakta, betonun içerisinde çatlaklar oluşmakta ve bu çatlaklar giderek daha büyük çatlaklar haline gelmektedirler.

- **Beton yüzeyinin pullanması**

Beton yüzeyine serilen buz-çözücü tuzlar, zamanla, beton yüzeyindeki rastgele noktalarda, kum ve çakılın gevşeyip çıkmasına ve beton yüzeyinden ince bir tabakanın balık pulu gibi sıyrılıp kalkmasına neden olabilmektedir. Beton yüzeyinin ince tabakalar halinde gevşeyip kopma göstermesine “pullanma” denilmektedir.

- **Karbonatlaşma**

Beton yüzeyi ile temas eden ve betonun içerisine giren karbondioksit, betonun içerisinde bulunan kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek karbonatlaşmaya yol açmaktadır. Karbonatlaşma beton yüzeyinden başlayarak içeriye doğru ilerlemektedir. Betonda karbonatlaşma olmasının beton özelliklerine hem olumlu hem de olumsuz birçok

etkisi vardır. Karbonatlaşma hakkında daha detaylı bilgiler ve karbonatlaşma üzerine yapılan deneysel çalışmalar sonraki bölümlerde ayrıntılı olarak verilecektir.

3. BETONDA KARBONATLAŞMA

Karbonatlaşma; havadaki serbest durumda bulunan karbondioksitin, hidrate olmuş çimento ile reaksiyona girmesidir [26]. Bunun sonucunda pH değeri 12-13'den 8-9'a düşen betonun bazik özelliği zayıflar. Böylece beton içindeki donatıların paslanması kolaylaşır. Betonun karbonatlaşması ile karbonatlaşan bölgedeki donatı, korozyona açık hale gelmektedir. Donatının korozyonu ise beton ile donatı arasındaki aderansın zayıflamasına betonun dayanımının düşmesine neden olmaktadır.

Karbonatlaşma olayı; karbondioksitin %0.03 konsantrasyonunun bulunduğu temiz bir havada dahi meydana gelebilir. Büyük kentlerde ise bu oranın %0,3-1 olduğu düşünüldüğünde, sorunun sanayileşmiş kentlerde büyük boyutlu olduğu görülür [26]. Karbonatlaşma beton yüzeyinden iç bölgelere doğru hızı azalarak devam eder. Bu nedenle pas payı bölgelerinde yoğunlaşır ve donatının paslanmasına neden olur.

Karbonatlaşmanın tüm bu zararlı yönlerinin dışında olumlu tarafları da olduğu söylenebilir. Karbonatlaşma süreci sonunda, yani karbondioksitin (CO_2), kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$) ile yaptığı reaksiyon sonucunda oluşan kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) kalsiyum hidroksitten hacimce daha büyük olduğundan beton yüzeyinin geçirimsizliğini azaltır.

3.1. Karbonatlaşmanın Oluşumu ve Gelişimi

Karbonatlaşmanın oluşmasındaki ilk şart atmosferde bulunan karbondioksitin betona difüzyonudur. Bunun sonucunda kalsiyum hidroksil iyonları oluşur ve karbondioksit ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonata dönüşür. Bu olay betonun pH'nı düşürerek alkali ortamın kaybolmasına neden olur. Karbondioksitin betona nüfuz etmesini ve karbonatlaşmanın oluşmasında etkili olan şartlardan biride betondaki boşluklardır. Betondaki bu boşluk sistemleri sayesinde karbondioksit beton içerisine daha çabuk girer.

3.1.1. Betonun Boşluk Yapısı

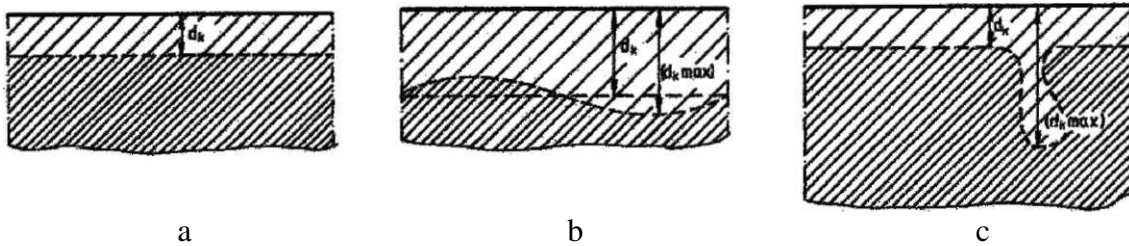
Sertleşmiş betonun içerisinde değişik nedenlerle oluşmuş olan boşluklar şunlardır:

- Çimentonun hidratasyonu ile ilgili olarak, sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan “jel boşlukları” ve “kapiler boşluklar”,

- Hava sürüklenmiş betonlardaki sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan “sürüklenmiş hava kabarcıkları”,
- Taze betondaki terleme nedeniyle betondaki suyun yüzeye çıkma eğilimi sonucunda, sertleşmiş çimento hamurunun içerisinde yer alan boşluklar; ayrıca üst kısımlara hareket eden suyun iri agrega tanelerinin ve betonarme demirlerinin altlarında birikmesi nedeniyle yer alan boşluklar,
- Çimento hamurunun kuruyarak büzülmesi nedeniyle, çimento hamuru ile agrega taneleri arasında oluşabilecek boşluklar,
- Taze betonun karılması ve yerleştirilmesi işlemleri esnasında betonun içerisinde oluşan “hapsolmuş hava boşlukları”, ve
- Agrega tanelerinin yapısında bulunabilecek boşluklardır.

Çeşitli şekillerde oluşan bu boşluklardan bir kısmı betonun geçirgenliğinde rol oynadığı gibi karbonatlaşma üzerinde de etkilidir. Bu boşlukların oluşmasındaki en önemli etken ise su/çimento oranıdır.

Karbonatlaşma beton içerisindeki boşlukların büyüklüğüne ve yapısına göre çeşitli şekillerde ilerlemektedir. Karbonatlaşma beton yüzeyinde çeşitli şekillerde ilerleyerek her tarafında eşit oranda eğrisel olarak min. ve max. değerler alabilir veya sadece belli bölgelerden ilerleyebilir.



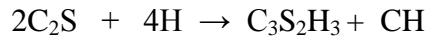
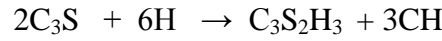
Şekil 3.1. Karbonatlaşmanın Beton İçinde İlerleme Şekilleri [27]

Yukarıdaki şekillere bakıldığında betonda karbonatlaşmanın ilerlemesinin farklılık gösterdiğini ispatlar. Şekil 3.1.a'ya baktığımızda bu durumun oluşabilmesi için betonun homojene çok yakın oranlarda karıştırılması ve yerleştirilmesi gerekir. Şekil 3.1.b' ye baktığımızda ise, bu durum daha olabirlik göstermektedir ki, her türlü betonda bu şekilde ilerlemesi normal bir durumdur. Şekil 3.1.c' ye bakıldığında da bu şekilde bir

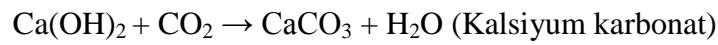
karbonatlaşmanın oluşabilmesi için betonda mevcut bir çatlağın olması gerekir. Çünkü betonda var olan bir çatlağın oluşması o kısımda karbonatlaşmanın sızması çok daha kolay olur. Çatlağın bulunmadığı durumlarda ise birinci ve ikinci şekillerdeki durumların oluşması daha olağandır.

3.1.2. Karbonatlaşmanın Kimyasal Gelişimi

Betonun işlenebilirliğini arttırmak için karışıma ilave edilen suyun bir kısmı çimento ile hidratasyona girecektir. Bu reaksiyonlar sonucu $C_3S_2H_3$ (C-S-H) tobermorit jeli ve $Ca(OH)_2$ (C-H) kalsiyum hidroksit oluşur. Suyun kalan kısmı ise betonun boşluklarına yerleşir.



Başlangıçtaki suyun Ph değeri 7' dir. Sertleşmiş portland çimentosu hamurundaki boşluklarda bulunan suyun Ph'ı çimentodaki alkalilerin sayesinde 12,5-13,5 değerine yükselir. Atmosferdeki CO_2 betona nüfuz eder ve su reaksiyona girerek karbonik asit meydana getirir.

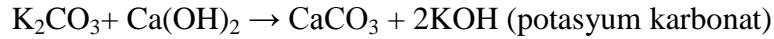
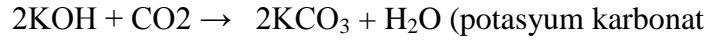
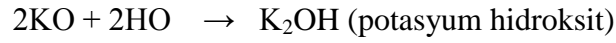
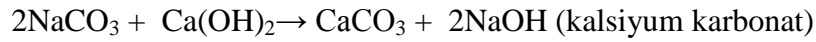
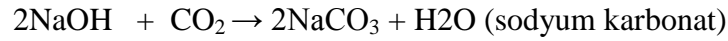


Çimentodaki kalsiyum silikat bileşenlerinin hidratasyonu ile ortaya çıkan $Ca(OH)_2$ ile CO_2 reaksiyona girerek hacimce daha büyük olan $CaCO_3$ (kalsiyum karbonat)'ı meydana getirir. Böylece hidroksit iyonları nötrleşerek PH derecesinin 9'a kadar düşmesine neden olurlar [28, 29, 30]. Kirli havada bulunan SO_2 ve NO_2 gazları da yine aynı şekilde reaksiyona girerek beton derecesinin düşmesine neden olur.

Karbonatlaşma yalnızca serbest kireçten dolayı oluşan bir süreç değildir. Karbonatlaşma da kirecin yanı sıra C_3A' nın hidratasyona girmesiyle oluşan monakalsiyumalüminosülfat ve trikalsiyumalüminasülfat (ettregite) da etkilidir.

Ettrengite betona giren karbondioksitin etkimesiyle kalsiyum karbonat (CaCO₃), alçı taşı (CaSO₄H₂O), alümin jeli ve su meydana gelir.

Çimento pastası içerisinde bulunan alkaliler yani Na₂O (sodyum oksit) ve K₂O (potasyum oksit) de karbonatlaşmaya etki eder. Çimentoda % 0,1-1,3 arasında bulunan bu iki bileşim su ile ayrı ayrı reaksiyona girerek ilk önce sodyum ve potasyum hidroksit iyonlarını meydana getirirler ve ardından havadaki CO₂ ile birleşerek çok kolay çözülebilen potasyum karbonat ve sodyum karbonatı meydana getirirler. Kolay çözülebilen bu iki madde rutubetin durumuna göre çimento pastasındaki serbest kireç ile birleşerek son olarak zor çözülebilen kalsiyum karbonatı meydana getirirler.



Bütün bu reaksiyonlar tüm hidrate elemanlarının karbonatlaşacağını ve NaOH' ın tekrar elde edilmesiyle karbonatlaşmanın süreklilik kazanacağını gösterir [30-31].

3.1.3. Beton Bileşenlerinin Karbonatlaşmaya Etkisi

Betonun karbonatlaşmasını etkileyen bileşenler üç grup halinde incelenir. Bunlar; betonun içeriğini oluşturan çimento, agrega ve su, ayrıca betonun sürekli etkisi altında kaldığı ortam koşulları ve gerektiğinde betona katılan katkı maddeleridir.

Beton, çimento, beton agregası, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin belirli oranlarda homojen olarak karıştırılması halinde edilen bir yapı malzemesidir. Bu bölümde

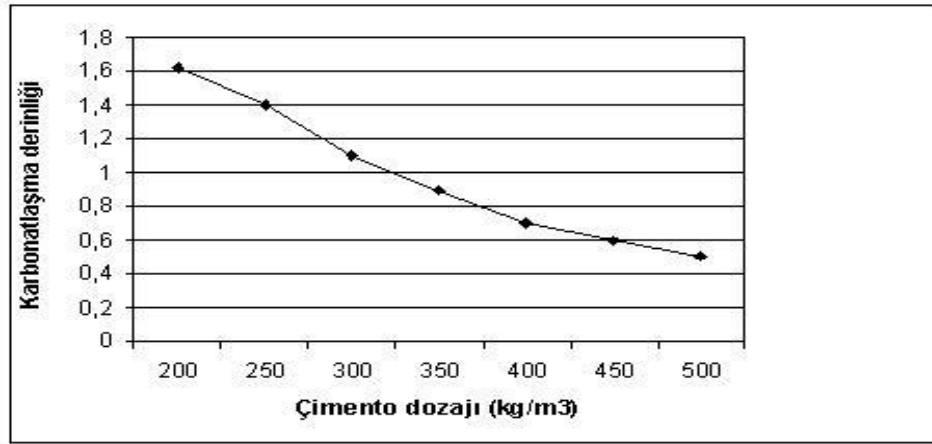
beton içyapısını oluşturan çimento, agrega, su, ortam koşulları ve gerektiğinde kullanılan katkı maddelerinin karbonatlaşma üzerindeki etkileri incelenecektir.

3.1.3.1. Çimento

Çimentolar hem bileşimleri hem de betondaki dozajı açısından karbonatlaşmayı etkiler. CaO çimento içerisinde %60-67 gibi bir yüzdeyle en fazla bileşim olma özelliğindedir. Özellikle bu bileşimin hidratasyonu sırasında oluşan Ca(OH)_2 karbondioksitin etkisi ile karbonatlaşacaktır. Kireç yüzdesi fazla olan çimentolarda karbonatlaşma daha fazla gerçekleşir.

Çimento içerisinde bulunan oksitler üretimin daha ileri safhalarında aralarında reaksiyona girerek ana bileşenleri oluştururlar. Ana bileşenlerin her biri su ile ayrı ayrı reaksiyona girmelerinin ardından karbonatlaşma olayı meydana gelir.

Betonda kullanılan çimento miktarı arttıkça karbonatlaşma hızı düşmektedir. Yüksek dozajlı betonlarda karbonatlaşabilecek hidrate öge miktarı artar. Bu artış karbonik gazın difizyonunu frenleyen bir durum oluşturur. Dozajın azalması halinde agrega taneleri birbirine daha çok yaklaşır ve gaz girişi kolaylaşır. Böylece karbonatlaşma derinliği artar. Bu durum Şekil-3.2’de grafik halinde verilmektedir. Çimento tanelerinin agregalar arasındaki boşluğu kapatamamasından dolayı karbonatlaşma hızı artacaktır [32].



Şekil 3.2. Çimento Dozajına göre Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi [33]

Betonda kullanılan çimento miktarının dışında kullanılan çimentonun içeriği de önemlidir. Çimentoya üretim sırasında veya beton üretimi sırasında çimentonun yerine

katılan değişik katkılar karbonatlaşmayı etkilemektedir [33]. Bilodeau [34], uçucu küllü betonların karbonatlaşmayı azalttığını ileri sürmektedir. Fakat diğer bazı araştırmacılar ise tras, uçucu kül veya cürufllu çimentolarda karbonatlaşma hızının yüksek olduklarını belirtmektedir [19,35]. Bu tip çimentolarla oluşabilecek kalsiyum karbonat miktarı azdır fakat CO₂'nin karbonatlaştırdığı bölümde azdır ve işlem bu yüzden hızlıdır.

3.1.3.2. Agregata

Agregalar betonun hacimce önemli bir bölümü kapladığı için gerek dayanım gerekse dayanıklılık yönünden önemlidir. Betonda kullanılan agreganın dayanıklılığı, gözenekliliği, su geçirgenliği, mineral yapısı, tane şekli, granülometrisi, tanelerin yüzey pürüzlülüğü, bileşiminde kil olup olmadığı ve agreganın temizliği gibi birçok özelliği durabiliteyi ve dolayısıyla karbonatlaşmayı etkileyen özellikleridir.

Karbonatlaşmanın en önemli etkenlerinden biri beton içindeki muhtemel boşluklardır. Sonuçta karbonatlaşma, bu boşluklarda bulunan çeşitli kimyasalların ve suyun yardımı ile gerçekleşecektir. Boşlukların oluşmasında agregalarında etkisi vardır. Kullanılan agreganın en büyük tane büyüklüğünün ne olduğu ve tanelerin büyüklüklerine göre dağılım oranı (granülometri) beton içerisindeki boşluk miktarını önemli ölçüde etkiler. Bu tip boşlukların yanında bir de agreganın yapısında bulunan boşluklar vardır. Bu boşluklardan hava ile temasta olan su geçirimli boşluklar ileride don etkisine maruz kalabilir. Bu boşluklarda bulunan suyun donması ile agregata ve beton çatlar. Çatlama durumunda da beton, her türlü dış etkene açık bir duruma gelir. Yani karbonatlaşma daha hızlı gerçekleşir ve daha derine iner.

Agregalarda kırılabilir kum taşları, yumuşak kalkerler, kil toprakları gibi malzemeler bulunabilir. Bu malzemeler; su ile birleştiği anda kolayca ayrılıp agreganın bütünlüğünü kaybeder ve negatif hacim değişikliklerine yol açar. Bu tür agregaları beton yüzeyinde yer yer küçük çukurların oluşmasına veya pul pul dökülmelere sebep olur. Bu olay, meydana gelebilecek maksimum karbonatlaşma derinliğini artırır. Bu malzemeler, ince agregada en çok %3, iri agregada ise en çok %10'a kadar bulunmalarına müsaade edilmiştir [36].

Kil içeren kalkerler suya maruz kaldıklarında hacimsel genişleme yaparlar ve beton içerisinde oluşturdukları gerilmeler sonucu betonun çatlamasına neden olurlar. Betonun çatlaması yine max. karbonatlaşma derinliğini önemli ölçüde arttırmaktadır.

3.1.3.3. Beton Karışım Suyu

Beton yapımında su; karma ve bakım suyu olmak üzere iki değişik amaç için kullanılır. Karma suyunun en temel fonksiyonu, çimento taneleri ile reaksiyona girip ona bağlayıcılık kazandırmaktır. Betonda istenen dayanım ve dayanıklılık gibi işlevlerin istenilen düzeyde olabilmesi için çok iyi bir bakım süreci gerektirir. Bu bakım sürecinin ise bir numaralı elemanı temas suyudur. Suyun içerisindeki bulunabilecek bu asitler sırası ile incelendiğinde kalsiyum hidroksitlerin çözülmesine sebep olarak karbonatlaşmayı hızlandırdıkları görülür. harç ve betonun boşluk yapısını etkileyen parametreler, karbondioksit gazının betona difüzyonunu değiştirmeleri açısından önem kazanır.

Su/Çimento oranı da betondaki boşluk yapısını etkiler. Bunun yanı sıra çok düşük su/çimento oranında karbonatlaşma derinliğinin de lineer bir şekilde arttığı görülür [28,36]. Suyun içerisinde çeşitli asitlerde vardır. Bu asitler çimento ve agrega içerisindeki çeşitli minerallerin çözünmesine sebep olarak zararlı etkiler yaratırlar. Suyun içerisinde bulunabilecek bu asitler sırası ile incelendiğinde kalsiyum hidroksitlerin çözülmesine sebep olarak karbonatlaşmayı hızlandırmaktadır. Beton için zararlı kimyasal etki yapan ortam ve çeşitli iyonlar Türk standartlarınca belirlenmiş olup önemlileri aşağıdaki Tablo 3.1.'de verilmiştir.

Tablo 3.1. Beton İçin Zararlı Kimyasal Etki Yapan İyon ve Ortamlar İçin Sınır Değerler [37]

Zararlı Kimyasal Etkisi Olan İyonlar	Zararlı Etkinlik Derecesi		
	Zararlı	Kuvvetli	Çok Kuvvetli
PH değeri	6,5-5,5	5,5-4,5	4,5'den büyük
Kireç çözücü (CO ₂ mg/L)	15-30	30-60	60'dan büyük
NH ₄ ⁺ (mg/L)	15-30	30-60	60'dan büyük
Mg ⁺² (mg/L)	100-300	300-1500	1500'den büyük
SO ₄ ⁻ (mg/L)	200-600	600-3000	3000'den büyük

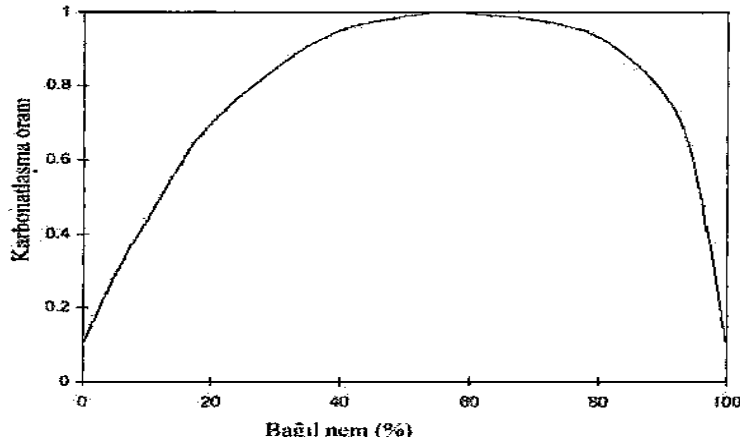
3.1.3.4. Ortam Koşulları

Güneş ışınları, yağmur, havadaki mevcut nem, rüzgar hızı ve yönü gibi atmosferik etkiler yapıda olabilecek karbonatlaşma süreci ve hızını olumsuz etkilemektedir. Karbonatlaşma süreci ve hızı bu faktörlerden özellikle üç tanesine bağlıdır. Bu faktörler ortamdaki bağıl nem oranı, karbondioksit miktarı ve sıcaklık derecesidir.

Karbonatlaşmayı etkileyen en önemli faktör ortamın ve betonun nemidir. Çünkü kalsiyum karbonatın oluşabilmesi için ortamda suyun bulunması şarttır. Karbonatlaşmanın en yüksek mertebesi ortamda %50 bağıl nem olduğu zamandır [38].

Bağıl nem oranı arttıkça veya azaldıkça karbonatlaşma miktarı artmaz. Nem miktarı çok fazla artarsa ortamın karbondioksit difüzyonu zorlaşacaktır. Nemin azalması durumunda ise reaksiyonun ihtiyaç duyduğu su azalacağından karbonatlaşma hızı azalacaktır.

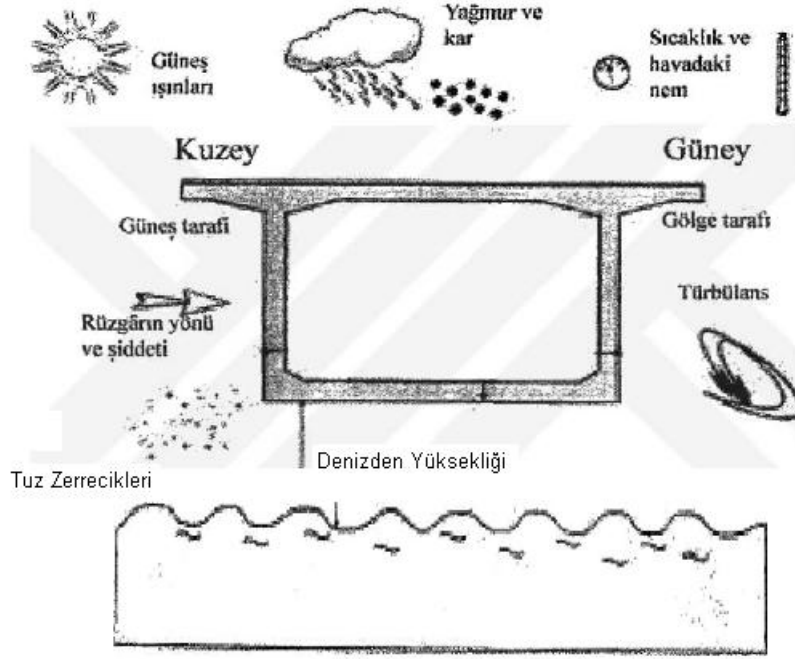
Sıcaklığın artışı karbonatlaşma hızını artırır. Fakat sıcaklığın aşırı derecede artması kurumayı artırır ve karbonatlaşma için gerekli olan nem ortadan kalkar. Bu yüzden sıcaklığın çok fazla miktarda artması karbonatlaşmayı yavaşlatır [35]. Bağıl nem ile karbonatlaşma arasındaki ilişki Şekil 3.3.'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Bağıl Nem ile Karbonatlaşma Derinliği ilişkisi [28]

Havadaki karbondioksit oranı karbonatlaşma hızını önemli ölçüde etkileyen parametrelerden biridir. Karbondioksitin betona difüzyon hızı ve betonun karbonatlaşmış bölgesindeki karbondioksit konsantrasyonu karbonatlaşmayı doğrudan etkiler. Karbonatlaşmış bölgelerde karbondioksit konsantrasyonu arttığında karbondioksit girişi yavaşlar. Yani beton karbondioksite tamamen doygun hale geldiğinde karbonatlaşma işi son bulur.

Bu faktörlerin yanı sıra yapının bulunduğu zemin ortamı (sülfatlı zeminler, bataklık çamuru, endüstri atığı dolgu zeminler vb.) de zemin suyunda çözülmüş olan iyonlar da beton üzerinde önemli etkinlik derecesine sahiptir [1,28]. Örnek olarak verebileceğimiz Deniz etkisinin yapı ve çevre ile olan ilişkisini Şekil 3.4’te gösterildiği gibi anlatılmıştır.



Şekil 3.4. Deniz Etkisindeki Bir Yapı ile Çevre Arasındaki Etkileşim [27]

3.1.3.5. Betonda Kullanılan Katkılar

Betonun özelliklerini geliştirmek üzere üretim sırasında veya dökümden önce beton karışımına, kullanılan katkıının belirttiği teknik verilere göre ilave edilen maddelere katkı adı verilir.

Doğal puzolanlar, yüksek fırın cürufu, uçucu kül silika tozu gibi puzolanik katkı maddeleri içeren çimentolarla veya bu puzolanların doğrudan beton içine katılmasıyla üretilen betonların ortak özelliği erken yaşlardaki dayanımlarının nispeten düşük olması ve daha geç dayanım kazanmalarındır. Bu sebeple bu tür puzolanik katkılı betonlar kür koşullarına daha fazla hassastırlar. Yeterli kür edilmemeleri halinde basınç dayanımları düşük, geçirimsizliği yüksek, dolayısıyla karbonatlaşma hızı oldukça yüksek bir beton kütlesi elde edilir.

Katkı maddelerini kökenine göre kimyasal ve mineral katkıları olarak ikiye ayırmak mümkündür:

A-) Kimyasal Katkıları

Kimyasal katkıları belli çeşitleri aşağıda sıralanmıştır.

• Su Azaltıcıları (Akışkanlaştırıcıları)

Betonda aynı kıvamın veya işlenebilirliğin daha az su ile elde edilmesini sağlarlar. Taze betonda kullanılan su miktarı azaldıkça betonun dayanımı artar. Azalttığı su miktarı ile orantılı olarak normal ve süper olarak ayrılırlar.

• Priz Geciktiriciler

Taze betonun katılaşmaya başlama süresini uzatırlar. Uzun mesafeye taşınan betonlar veya sıcak hava dökümleri için yararlıdırlar.

• Priz Hızlandırıcıları

Priz geciktiricilerin aksine, bu katkıları betonun katılaşma süresini kısaltırlar. Bazı uygulamalarda, erken kalıp almada ve soğuk hava dökümlerinde don olayı başlamadan betonun katılaşmış olmasını sağlamak için kullanılırlar.

• Antifrizler

Suyun donmasını zorlaştırır ve don neticesi çimentonun mukavemet kazanmasındaki aksamaya engel olurlar. Bu katkıları betondaki miktarı hava sıcaklığına göre ayarlanabilir.

- **Hava Sürükleyici Katkılar**

Beton içinde çok küçük boyutlu ve eşit dağılan hava kabarcıkları oluşturarak betonun geçirimsizliğini ve dona karşı direncini ve işlenebilirliğini artırır.

- **Su Geçirimsizlik Katkıları**

Sınırlı miktarda hava sürükleyen katkılardır ancak yerine yerleşmiş betonun su sızdırmazlığının sağlanması uygun yerleştirme tekniğinin iyi bir şekilde yapılmasına bağlıdır.

B-) Mineral Katkılar

Betonda katkı maddesi olarak kullanılan mineral malzemelerin mutlaka ince taneli olmaları gerekmektedir. İnce taneli mineral katkı maddeleri beton üretiminde kullanılan temel malzemelerin (çimentonun, agreganın ve suyun) yanı sıra ayrı bir malzeme olarak beton karışımına doğrudan dâhil edilmekte ve temel malzemelerle beraber karılmaktadırlar. Çoğu zaman betonda kullanılacak çimento miktarı azaltılmakta ve azaltılan miktar kadar ince taneli katkı maddesi konulmaktadır Bunların kullanılabilecekleri oranlar ilgili standartlarca belirlenmiştir. Bu ince taneli mineral katkıları içerisinde en yaygın kullanılanları, beton üretimi ile doğrudan ilgili olmayan ve bir endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilen silis dumanı, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü ve öğütülmüş pomzadır.

- **Silis dumanı**

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımlarının üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızlı soğutulmasıyla yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen ve %85-98 kadar silis içeren amorf yapıya sahip çok ince katı parçacıklardan oluşan malzemeye “yoğunlaştırılmış silis dumanı” veya kısaca “silis dumanı” adı verilmektedir.

- **Uçucu kül**

Atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75-80' i gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir. Bu küllere 'uçucu kül' denir.

- **Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu**

Çeşitli metal endüstrilerinin yan ürünü olarak elde edilen atık maddelere "cüruf" denilmektedir Cüruflar, elde edildikleri metal endüstrisinin ana ürün tipine ve yöntemlerine bağlı olarak birbirinden farklı kimyasal bileşenlere ve özelliklere sahiptir.

- **Pirinç kabuğu külü**

Çeltik bitkisi, yeryüzünde buğdaydan sonra en fazla üretilen tahıldır. Çeltik fabrikalarda işlenerek pirinç elde edilir. Pirinç, dünya nüfusunun hemen hemen yarısının en önemli besin maddesidir. Ekilebilen alanların %11'inde yani yaklaşık 145 hektar da pirinç ekimi yapılmaktadır.

- **Öğütülmüş Pomza**

Pomza taşı, volkanik faaliyetler esnasında ani soğuma ve gazların bünyeyi aniden terk etmesi sonucu oluşan, oldukça gözenekli bir yapı içeren ve dünya endüstrisinde yeni olmamakla beraber, ülkemiz endüstrisine son yıllarda girmeye başlayan ve değeri yeni anlaşılan volkanik kökenli bir kayadır. Pomza, birim ağırlığının düşük olması nedeniyle hafif beton üretiminde kullanılmakla beraber doğal puzolan olma özelliğiyle de çimento katkı maddesi olarak kullanılmaktadır.

3.1.4. Çevresel Faktörlerin Etkisi

Karbonatlaşmanın oluşabilmesi için ortamda bazı bileşenlerin bulunması şarttır. Bunlar;

- Çimentonun betondaki hidratasyonu sonucu oluşan ve fazla miktarda bulunan kalsiyum hidroksit,

- Atmosferde serbest durumdaki karbondioksit,
- Nem'dir.

Bu üç parametre olduğu sürece beton sürekli olarak karbonatlaşacaktır. Karbonatlaşma beton yüzeyinden başlayarak iç kesimlere doğru hızı azalarak ilerler [35,39].

Sıcaklığın artışı karbonatlaşma hızını artırır. Fakat sıcaklığın aşırı derecede artması kurumayı artırarak karbonatlaşma için gerekli olan nemi ortadan kaldırır. Bu yüzden sıcaklığın çok fazla miktarda artması da karbonatlaşmayı yavaşlatır [35]. Şüphesiz karbonatlaşmayı etkileyen en önemli faktör ortamın ve betonun nemidir. Çünkü kalsiyum karbonatın oluşabilmesi için ortamda suyun bulunması şarttır.

Çevresel etkiler ise ortamdaki karbondioksit oranı, bağıl nem oranı ve sıcaklıktır. En temiz havada dahi atmosferde % 0.03 oranında karbondioksit bulunmaktadır ki bu bile karbonatlaşma için yeterlidir. Bu oranın büyük şehirlerde % 1 oranına çıktığı düşünülürse sorunun gelişmiş kentlerde daha korkunç boyutlu olduğu görülür [1,28].

Karbonatlaşmanın en yüksek, mertebesi ortamda %50 bağıl nem olduğu zamandır [17,19]. Bağıl nem oranı arttıkça veya azaldıkça karbonatlaşma miktarı artmaz. En fazla karbonatlaşmanın olduğu nem miktarı %50-70 arasında olduğu zamanlardır. Nem miktarı çok fazla artarsa ortama karbondioksit difüzyonu zorlaşacaktır. Tamamen suyun içinde kalan betonlar karbonatlaşma yapmazlar. Nemin azalması durumunda ise reaksiyonun ihtiyaç duyduğu su azalacağından karbonatlaşma hızı da azalacaktır [28].

3.2. Karbonatlaşmanın Betondaki Etkileri

3.2.1. Karbonatlaşma Rötresi

Sertleşmiş çimento hamuru CO₂ (karbondioksit) ile kimyasal olarak reaksiyona girer. Atmosferde mevcut CO₂ miktarı çimento hamuru ile uzun bir dönemde reaksiyon yapacak düzeye ulaşabilir. Bu reaksiyon karbonatlaşma olarak bilinen büzülme karakterinde bir reaksiyondur. Çimento hamurunun CO₂ ile reaksiyon derecesi ve dolayısıyla oluşan karbonatlaşma rötresi bağıl nemin bir fonksiyonudur. Maksimum büzülme % 50 bağıl neme karşı gelmektedir.

Yüksek bağıl nem durumunda, gözeneklerin su ile dolu olması nedeni ile CO₂'nin hamur içine girmesi zorlaşır ve bu nedenle karbonatlaşma ya görülmez ya da çok düşük

düzyeyde gerçekteşir. Çok düşük nem oranlarında bünye de bir su filmi oluşmaması nedeni ile karbonatlaşmanın çok düşük düzeyde gerçekteştiği düşünölmektedir. Düşük nem oranları hariç, maksimum karbonatlaşma büzölmesinin kuruma sürecinden ziyade hemen kuruma sonrası oluştuğu düşünölmektedir.

Rötre miktarı, sadece betondaki su/çimento oranına bağı değildir. Ortam nemi veya kür edilme şartları betondaki karbonatlaşma rötresini etkilemektedir. Karbonatlaşma rötresi; karbonatlaşmanın durduğu anda durmaktadır [35].

Rötre; karbonatlaşma ile doğrudan ilişkilidir. Karbonatlaşma yüzeyde başlayıp içperlere doğru çok yavaş intikal ettiğinden, yüzeysele ağ çatlakları meydana getirir. Bu çatlaklar, betonun mukavemeti açısından zararsızdırlar. Fakat karbonatlaşmanın çok ileri seviyeleri çıkabileceği, CO₂ yönünden zengin ortamlarda çatlak derinliğı çok fazla artarak beton içinde bulunabilecek çelik donatıya ulaşmaları durumunda zararlı olabilirler [40].

3.2.2 Beton Dayanımı

Betonun dayanımı, aranılan özelliklerin başında gelmektedir. Beton dayanımını döküldüğü andan itibaren ilk saatlerde almaya başlar ve 28. güne gelindiğinde ise mukavemetinin büyük bir kısmını kazanmış olur. Betonarme yapı elemanlarında beton ile çelik arasında yeterli, miktarda aderans vardır ve çelik betonun alkaline özelliğı sayesinde iyi bir şekilde korunur. Karbonatlaşmadan sonra, betonun kimyasal kompozisyonu ve mikro yapısı değışir. Bu değışiklikten dolayı karbonatlaşmış betonarme betonu ile normal betonarme betonun mukavemet, deformasyon gibi farklılıklar olması doğaldır [33]. Karbonatlaşmış betondan kastedilen, betonun zamanla yüzey kısmından daha derinlere doğru bir miktarının karbonatlaşmış olmasıdır.

Beton dayanımının artması ile karbonatlaşma miktarı azalır. Bu durum her tip beton için geçerlidir. Hem karbonatlaşma hem de basınç dayanımı betonun boşluk yapısı tarafından önemli derecede etkilenir. Diğer taraftan karbonatlaşmanın bir ürünü olarak ortaya çıkan kalsiyum karbonat kalsiyum hidroksitten daha fazla yer işgal etmesi, karbonatlaşmış betonların yüzey porozitesini azaltır. Karbonatlaşmış betonun deformasyon kabiliyetinin azalmasına karşın mukavemetinde ve elastisite modülünde artma vardır [41].

3.2.3. Donatının Korozyonu

Gaz halinde beton içerisine giren karbondioksit, yine beton yapısı içinde mevcut olan su içinde çözünerek karbonik asit oluşturur. Karbonik asit, diğer birçok asitten farklı olarak çimento pastasını bozmaz. Bunun yerine, sertleşmiş beton yapısı içinde bulunan, suda çözünebilir, kalsiyum hidroksit veya serbest kireç ile reaksiyona girerek çözünmeyen kalsiyum karbonatı oluşturur.

Bu reaksiyon sonucu, betonun koruyucu bazik ortamı bozulur ve PH değeri 9'un altına düşer. Betonun Ph değeri 9' un altına düştüğünde, koruyucu pasivasyon tabakası bozulur ve korozyon başlar. Korozyonun sonucu pasır ve hacmi yerini aldığı çeliğin yaklaşık 10 katıdır. Böylece genişlemeye ve betona çekme gerilmesi uygulamaya başlayan pas, betonun çekme mukavemeti asıldığında pas payının donatı boyunca çatlayarak ayrılmasına yol açar.

3.3. Karbonatlaşma Derinliğinin Belirlenmesi

Karbonatlaşma deneyi; normal ortamda ve laboratuvarlarda hızlandırılmak suretiyle iki şekilde yapılmaktadır. Genel olarak herhangi bir katkının veya beton içeriğindeki bir değişikliğin karbonatlaşma hızına veya derinliğine ne şekil etki yaptığı yönündeki araştırmalar hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Normal ortamdaki karbonatlaşma ise genelde o bölgenin çevre koşullarının yıllara bağlı olarak karbonatlaşmaya etkisinin incelenmesinde kullanılmaktadır.

Hızlandırılmış karbonatlaşma test metodu, betonu normal atmosferdekinden daha fazla oranda CO₂ ortamına maruz bırakılması esasına dayanmaktadır. Bu ortamdan alınan deney verileri ile gerçek ortamdaki veriler arasında tam bir kıyaslama yapılamasa bile kullanılan malzemelerin karbonatlaşma direnci hakkında bir ön fikir elde edilebilmektedir. Bu çalışmada da beton vibrasyon tekniği ile sıkıştırılarak boşluk miktarı en aza indirilmiş ve ideal boşluk miktarına sahip olduğu varsayılan numunelerin farklı nem oranlarında hızlandırılmış karbonatlaşma çalışmaları yapılmıştır [2].

Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyleri için gaz sızdırmazlığı olan bir tank tasarlanmış ve içerisine gerekli aparatlar yerleştirilmiştir. Bu aparatlar sırasıyla; içeriye konulan gaz miktarının belirlenmesi için manometre, ortamın bağıl neminin kontrolü için termostat ve resistanslı su kabı, tank içindeki havanın türbülansı için fan ve kontrol

panelidir. Karbonatlaşma derinliğinin önceden belirlenmesi dışında deneysel yöntemler kullanılarak karbonatlaşmanın belirlendiği bazı teknikler vardır. Bu tekniklerin en yaygın indikatörlerin beton yüzeyine püskürtmek suretiyle kullanımınıdır.

Laboratuvar ortamında hazırlanan ve değişik şartlara maruz bırakılan düzgün geometrik numunelerin ölçülmek istenilen yüzeyi olabildiğince dik bir şekilde kesilir. Gerçek ortamdan ise karot numuneler alınarak uygulanabilir.

Betonun karbonatlaşma derinliğinin belirleneceği kesilmiş olan yüzey üzerindeki partiküller çelik fırça ile temizlenir. Karbonatlaşma derinliğinin belirlenmesi için taze kesilmiş betonun yüzeyine asit/baz belirleyicisi püskürtülür. Püskürtme sonucu oluşan renk farklılığı kumpas yardımıyla ölçülür.

Bu amaç için kullanılan 4 çeşit indikatör vardır. Bu indikatörler ve belirledikleri pH değerleri şunlardır; nitramin 11.5 , thymolphtalein 10.0-9.0, in-nitrophenol 8.0 ve yaygın olarak kullanılan phenolphtaleindir 9.0 [2]. Phenolphtalein çözeltisi %1 phenolphtalein ($C_2O_4H_{14}$) %70 etil alkol'de çözülerek hazırlanır.

Phenolphtaleinin püskürtüldüğü yüzeydeki renksiz bölgelerin pH derecesi 9,0'm altındadır. Mor renge dönüştüğü alanlar ise betonun alkalın olduğu bölgelerdir. Asit baz belirleyicisinin püskürtüldüğü betonun yüzeyi hemen ölçülmelidir. Renklenme meydana gelmez ise renklenmenin olmadığı bölümler karbonatlaşan bölümlerdir ve bu bölümlerde karbonatlaşma derinliği ölçülebilir. Bu testin başlıca sınırlamaları sadece karbonatlaşmanın boyutlarını göstermesidir [8].



Şekil 3.5. Karbonatlaşma derinliğinin Belirlenmesi [42]

3.4. Karbonatlaşmanın Sakıncaları ve Yararları

Portland türü çimentolarla üretilen betonlarda hidrasyonun ilk aşamasında, alkalinite ölçütü olan PH, 12-13 gibi yüksek bir değere sahiptir. Betonun sertleşmesi ilerledikçe bu değer giderek azalır, PH 8-9 gibi değerlere düşmektedir. PH' ın düşüş hızı traslı, uçucu küllü, cürufli portland çimentolarında daha hızlıdır. Yüksek alkaliniteyi sağlayan hidrasyon ürünü kalsiyum hidroksit Ca(OH)_2 ve daha bilimsel ifade ile bunun çözünmesi sonucu ortaya çıkan OH oksitleridir. Betona alkalın karakter kazandıran kalsiyum hidroksit yani sönmüş kireç donatının paslanmasını önleyen bir ögedir. Çelik donatı hava ve su ile temas eder etmez koruyucu bir pas tabakası ile kaplanır; tabaka altında kalan çelik ileri düzeydeki bir oksidasyondan böylece kurtulmuş olur.

Bu tabakayı yırtabilecek bir fiziksel olay veya bir kimyasal iyon olmadığı sürece paslanma oluşmaz. Kimyasal iyonlar içinde en tanınan ve zararlısı klor iyonları Cl^- dir. Bunları tutan, donatıya yaklaştırmayan bileşen ise hidrasyon ürünü olan Ca(OH)_2 ' dir. Olaya kısaca “ alkalın pasivasyon” adı verilir. Ortamın alkalinitesini yitirmesi sonucu agresif iyonlar donatıya vararak koruyucu tabakayı tahrip ederler ve korozyonun katodik reaksiyonları, donatıyı derinliğine çözecek şekilde başlarlar [40,43].

Karbonatlaşmanın başlıca sakıncası; depassivasyon olayı varsayılr. Bir değer sakınca pek çok kişinin üzerinde durmadığı rötire olayıdır. Hidrolik rötire ile birlikte gelişen karbonatlaşma rötiresi hemen hemen hidrolik rötire mertebesidir. Ancak karbonatlaşmanın çok yavaş gelişmesi nedeniyle rötirenin oluşturduğu çatlaklar yüzeyseldir ve taşıyıcılık yönünden sakıncaları yoktur.

Karbonatlaşmanın yararları; beton içyapısında meydana gelen değişikliklerden kaynaklanır. İlk basit yaklaşım suda çözünme olasılığı bulunan Ca(OH)_2 'nin suda çözülmeyen CaCO_3 (kalsiyum karbonatın) dönüşmesidir. Puzolanik etkilerle Ca(OH)_2 'nin tespiti bilindiği gibi çok önemli bir yarar olarak kabul edilir, bu tespitite oluşan ürün bir kalsiyum silikattır, ancak depassivasyon niteliği yönünden bu çözüm de karbonatlaşma kadar sakıncalıdır. Bazı durumlarda, Ca(OH)_2 'nin karbonatlaşma yoluyla tespiti de istenir ve yararlı olabilir, örneğin donatı içermeyen ve ilerde su içinde kalacak beton bloklar üretilir [44].

Karbonatlaşma toplam boşluk oranını değiştirmemekle beraber kılcal boşlukların mikroporozite bölgelerinde etkili olmaktadır. Bu bölge beton durabilitesi üzerinde en önemli rolü olan bölgedir. Geçirimsizliğin sağlanması durabilitede birincil faktördür.

Karbonatlaşmanın sağladığı geçirimsizlik agrega-harç ara bölgesinde etkindir. Ne var ki bu yararlı etkilerin oluşmasında çimento dozajının, su/çimento oranının, ortamın ve betonun su içeriğinin önemli parametreler olduğu unutulmamalıdır.

3.5. Karbonatlaşmaya Karşı Alınması Gereken Önlemler

3.5.1. Çimento cinsi ve dozajı

Çimentonun dozajı arttırıldığında beton yoğunluğu artar. Bu yüzden kullanılan çimento cinsi çok önemlidir. Puzolanlı çimentolar beton alkali nitesini etkilediğın için daha geçirimsiz bir beton oluşumunu sağlar ve karbonatlaşma oluşumunu engellemeye çalışır. Yüksek dozajlı çimentolar karbonatlaşma hızını azaltacaktır. Uygulamada karbonatlaşma açısından önerilen en az çimento miktarı 300 kg/m^3 'tür.

3.5.2. Su/çimento oranı

Su/çimento oranı betonun basınç dayanımını ve dış iklim faktörlerine karşı dayanıklılığında önemli rol oynar. Su ve çimentodan meydana gelen çimento hamurunda, suyun çimentoya oranı ne kadar küçük olursa çimento hamuru o kadar koyu kıvamlı olur. Koyu kıvamlı hamurla elde edilen betonun basınç ve dış faktörlere dayanımı ve hacim sabitliğı oldukça iyi sonuç verir.

Katkı maddeleri sayesinde düşük su/çimento oranı şartı sağlanabilir ve bu şart sağlandığında çok fazla su alımı engellenir ve geçirimsiz yani boşluksuz bir beton elde edilir.

Su/çimento oranı yüksek olduğunda sertleşmiş betonun boşluğu arttıracağından dolayı CO_2 gazının girişi kolaylaşır. Bu olay karbonatlaşma hızını artırır. Uygulamada yüksek su/çimento oranı ile beton dökümünden sakınmak gerekir.

3.5.3. Beton dökümü ve kürü

Beton kalıplara yerleştirildikten sonra vibrasyon yapılarak tam olarak yerleştirilmesi gerekir. Yerleştirildikten sonra kür süresi ne kadar uzatılırsa geçirimsiz beton oluşumu sağlanır ve karbonatlaşma olayı görülse bile derinlere inmesi engellenmiş

olur. Uzun süre ıslak kür edilmiş betonda hidrasyon ürünleri boşlukları tıkayarak karbonatlaşmayı azaltmaktadır. Uygulamada beton yeterince kr edilmelidir.

3.5.4. Yeniden alkalinizasyon

Betonun alkaline yapısıyla elik donatıyı pasife ederek korozyondan koruma niteliğini kaybetmemesi veya kaybetmişse tekrar kazanması için birçok çalışma yapılmıştır. İlk akla gelen durum ise betona CO₂ girişini engellemektir. Pasif realkalizasyon yöntemi; beton yüzeyini kireç yönünden zengin portland çimentolu bir sıva ile rtmektir. Aktif realkalizasyon da ise; betonarme yapıların zayıf olduğu akımla yapılan katodik koruması gibidir.

3.5.5. Beton rutubeti

Her açıdan su olmayan yani kuru olan bir ortamdaki betonda karbonatlaşma ve korozyon gerçekleşmez. Bu yüzden temel gibi yapı elemanlarında yer altı sularına karşı yalıtım yapılarak karbonatlaşma oluşumu engellenmiş olur.

3.5.6. Mineral Katkılar

Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların betonda kullanılması tartışmalı bir konudur. Mineral katkıların betonda kullanılması ile betonda geçirimsizliğinin azalmasına karşın, Ca(OH)₂'yi bağlanmasından dolayı ortamın Ph'ını düşürmektedir.

3.5.7. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı arttıa karbonatlaşma hızında düşme beklenir. Korozyon riski taşıyan ıslanmaya kurumaya maruz betonarme elemanlarda en düşük beton sınıfı C 30 kullanılması gerekir. Ayrıca pas payı tabakasının kalitesi de istenilen düzeyde sağlanması gerekmektedir.

3.5.8. Kimyasal Bileşimi

Kimyasal bileşim çimento içindeki CaO ve Ca(OH)₂ miktarının azalması, alkali oksitlerin artması durumunda karbonatlaşma hızı artmaktadır. Beton yüzeyine uygulanan kireç katkılı sıva betonun pas payı tabakasını güçlendirir ve gazların betona girişini azaltır. Betonarme yapıların dayanıklılığını artırmanın en ucuz ve en etkili yollarından biridir. Betonda akışkanlaştırıcı kullanılması da geçirimsizliği arttıracığından karbonatlaşma direncini artırır. Pas payını bir miktar arttırmakta önerilebilir.

Karbonatlaşma reaksiyonu sonucunda yüzey sertleşir. Bu olay, özellikle eski yapılarda beton tabancası ile yüzey sertliğine bağlı olarak mevcut beton basınç dayanımını tahmini yöntemi uygulanarak yapılan deneylerin sonuçlarında büyük hatalara yol açabilmektedir.

Karbonatlaşmış betonun yeniden kazanılması yani alkali ortamın sağlanması için aktif ve pasif yöntemler geliştirilmiştir. Pasif yöntemde kireç katkılı çimento harcı ile karbonatlaşmış beton üzeri yaklaşık 20 mm kalınlığında sıvanır.

Karbonatlaşmış tabakanın kaldırılması mümkünse, bu tabaka kaldırılıp yerine özel tamir harçları ile geçirimsiz hale getirilmesi daha sağlıklı bir yöntemdir. Aktif yöntemde ise titanyum anot ile sodyum karbonat esaslı elektrolit kullanılarak verilen doğru akım ile betonun pH değeri 11 civarına çıkarılmasına karşın pratik olmayan uygulaması çok güç, alkali silika reaksiyonu, beton çelik aderansının azalması gibi yan etkileri olan bir yöntemdir.

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışma, literatür de, birçok özellikleri araştırılmış olan çimentoların ve karbonatlaşmaya uğrayan betonlardan farklı olarak, farklı tip çimentolarla hazırlanan beton seriler ile katkı maddeleri ile hazırlanan beton serilerin karbonatlaşma altındaki davranışlarını araştırmak üzere yapılmıştır.

4.1. Karışım Elemanları

4.1.1. Çimento

Numunelerin ana matrisi; su, çimento, ince ve iri agregadan oluşmaktadır. Karışım suyu olarak Elazığ şehir şebeke suyu ve ana bağlayıcı olarak deneylerde Elazığ Çimentoş Çimento San. T.A.Ş'nin ürettiği CEM I 42.5 N, CEM II 42.5 N ve CEM IV 32.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Ayrıca Ankara Çimento Fabrikasından CEM II 32,5 R tipi çimentosu ile Samsun Çimento Fabrikasından da CEM V 32.5 R tipi çimento temin edilerek kullanılmıştır. Kullanılan puzolanik katkılı bu çimentoların fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki Tablo 4.1' de verilmiştir.

Tablo 4.1. Kullanılan Çimentoların Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

(%)	CEM I 42,5 N	CEM II 42,5 N	CEM II 32,5 R	CEM IV 32,5 R	CEM V 32,5 R
SiO₂	19,48	21,17	23.18	25,30	23.82
AL₂O₃	5,57	5,92	6.35	7,30	6.75
Fe₂O₃	3,80	4,46	5.27	5,97	5.89
CaO	61,87	56,96	52.91	48,20	46.93
MgO	2,08	1,83	1.53	2,36	2.09
SO₃	2,97	3,43	2,40	2,81	2.73
Na₂O	-	-	-	-	-
K₂O	-	-	-	-	-
C	-	-	-	-	-
Blaine	3702	4101	4093	4284	4183
Kalker	5,67	5,87	4.55	4,62	4.35
Kızdırma kaybı	2,75	3,57	3.47	3,37	3.25
Yoğunluk,(gr/cm³)	3,13	3,11	3,00	2,99	2,85

4.1.2 Agregası

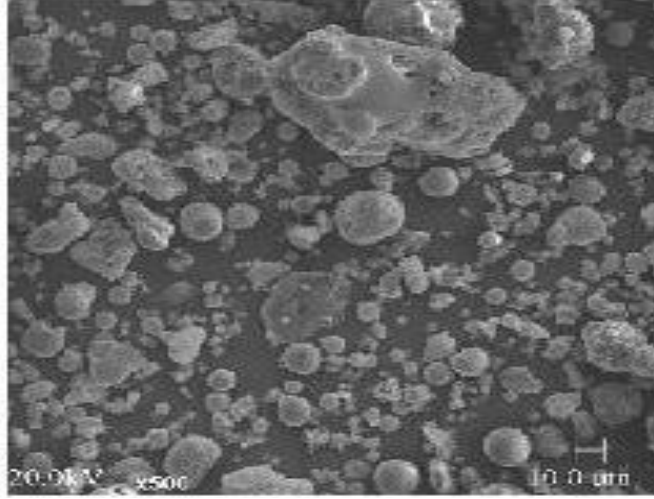
Beton imalatında kullanılacak agreganın; betonun kullanılacağı yapı elemanının şekil, cins ve en dar kesitinin boyutu, beton örtü tabakası (pas payı) kalınlığı ile betonun dökümünde kullanılacak yöntemle bağlantılıdır. Beton üretimde kullanılan agregası, mineralojik olarak nehir kumu niteliğindedir. Agregası maximum tana büyüklüğü olarak 16 seçilmiştir. Agregası 0-4 mm ve 4-16 mm olmak üzere iki sınıfa ayrılarak kullanılmıştır.

4.1.3. Katkı Maddeleri

4.1.3.1. Uçucu Kül

Ülkemizde son birkaç yıldan bu yana tanınmaya başlanan “Uçucu kül” (Fly Ash) tüm dünyada özellikle gelişmiş ülkelerde yıllardır güvenle aranan ve tercih edilen puzolanik bir mineral beton katkıdır. Uçucu kül, son yıllarda yapılan araştırmalar sonucunda, çimento ve beton üretimin de yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Uçucu Külün, içeriğinde silika, alüminyum ve demir bulunur. Diğer çimento ve beton uygulamalarına göre en yüksek performansı elde etmek üzere kullanılan beton katkı maddesidir. Şekil 4.1’ de uçucu küle ait bir SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.1. Uçucu külün SEM görüntüsü

Uygun oranlarda ve doğru kullanımı halinde betonun birçok özelliğini olumlu yönde etkileyici özelliği olan bu materyal, aynı zamanda hazır beton endüstrisinde maliyet düşürücü etkileri ön plana çıkarılarak tercih konusu yapılmaktadır.

Yapılan deney çalışmalarında kullanılan katkı maddesi olan uçucu kül Adana Ekton İnşaat A.Ş.’ den temin edilmiş olup F sınıfı bir uçucu küldür. Aşağıdaki tabloda kullanılan uçucu küle ait özellikler verilmiştir. Ayrıca uçucu kül beton serilere CEM I 42,5 N çimento tipi miktarının %10’u ve %20’si olmak üzere iki farklı seri şeklinde hazırlanmıştır.

Kullanılan uçucu külün fiziksel ve kimyasal özellikleri aşağıdaki Tablo 4.2’te verilmiştir.

Tablo 4.2 Kullanılan Uçucu Külün Özellikleri

(%)	Uçucu Kül
S(SiO₂)	42,82
A(AL₂O₃)	20,82
F(Fe₂O₃)	4,57
S+A+F	68,21
CaO	23,45
MgO	1,74
SO₃	1,47
Na₂O	0,32
K₂O	1,31
C	-
S	-
Kızdırma Kaybı	2,75
Yoğunluk,(gr/cm³)	2,50

Betondaki bağlayıcı hamurun hacmindeki artış ve UK taneciklerinin sürtünmeyi azaltarak betona daha fazla akıcılık sağlamaları, taze betonun pompalanabilirliğini artırmakta, yüzeyinin daha kolay düzeltilebilir olmasına yol açmakta, kalıpları daha kolay sökülebilir duruma getirmektedir [45].

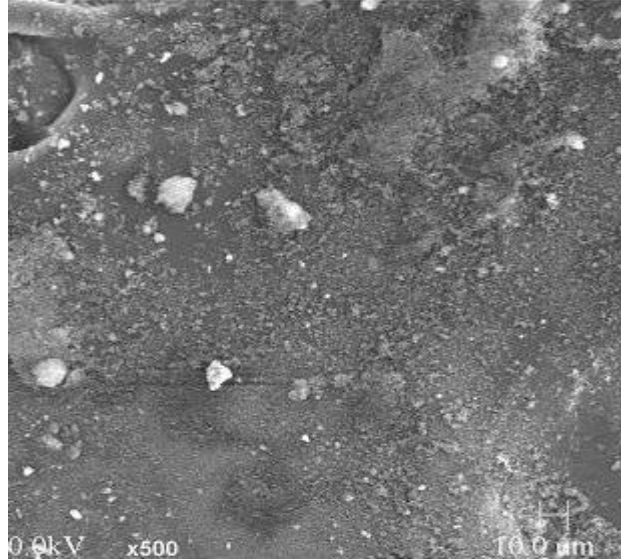
UK katkılı betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlı olmaktadır. İncelik arttıkça su ihtiyacında artma olmaktadır [45].

Uçucu küllü betonun geçirgenliği genelde katkısız betonun geçirgenliğinden daha düşüktür. Geçirgenliğin böyle düşük olmasının nedeni uçucu kül ile çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki puzolanik reaksiyon sonucu ortaya çıkan ilave C-S-H jelleridir. Bu jeller kapiler boşlukları azaltmaktadır. Uçucu kül kullanımının betonda geçirgenliği azaltması ayrıca sülfat atağının beton üzerindeki bozucu etkilerini de azaltmaktadır. Çimentonun alkalileri ile agreganın reaktif silis bileşenleri arasında yer alan alkali agrega reaksiyonu sonucundaki genişleme ve çatlamlar, uçucu kül kullanılması ile azaltılabilmektedir. Uçucu külün bağlayıcı hamurunun hacmini artırdığı durumlarda su miktarı sabit tutulduğu zaman rötre de artış görülebilir. Bunun yanı sıra, uçucu kül ilavesi işlenebilirliği artırdığından sabit işlenebilirlik için su miktarı azaltılabilir, bu da rötre artışını yok edebilir. Uçucu külün yüksek oranda kullanılması rötre azaltmaktadır [46].

4.1.3.2. Silis Dumanı

Silis dumanı; silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime yöntemi ile üretimi sırasında elde edilen ana bileşeni 1 mini mikrondan küçük, küresel, amorf camsı silis partiküllerinden oluşan, yüksek düzeyde puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür. Silis dumanının rengi açık griden koyu griye değişen renkte olabilir. Rengindeki koyuluk, karbon içeriğinin artmasıyla artmaktadır. Su ile birleşmiş durumda, siyaha yakın bir renk göstermektedir [45].

SD'nin özgül ağırlığı 2,2–2,3 kadardır. (Portland çimentosunun özgül ağırlığı 3,1 civarındadır.). SD'nin birim ağırlığı, üretildiği haliyle, 240–300 kg/m³ civarındadır. SD çok ince taneli olduğundan, su ihtiyacı oldukça yüksektir. Ayrıca, çok kuvvetli bir puzolanik bağlayıcılık göstermektedir [45]. Silis dumanı çok ince öğütülmüş parçalar içermektedir. Silis dumanı tanecikleri portland çimentosunun taneciklerinden 100 kat daha küçüktür. Şekil 4.2'de silis dumanına ait bir SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.2. Silis Dumanının SEM görüntüsü [42]

Deney çalışmalarında katkı maddesi olarak kullanılan silis dumanı Elazığ İzamer İnşaat Sanayiden temin edilmiştir. Beton seriler hazırlanırken CEM I 42,5 N çimento tipinin % 10 nu kadar ilave edilen silis dumanı katkı maddesi olarak kullanılmıştır.

Silis dumanı gibi ultra incelikteki tanelerin kullanımı, yoğunluğun artırılması dolayısıyla boşlukların azaltılması taze betonun stabilitesinin geliştirilmesi için önemlidir. Böylece durabilite iyileştirilerek dayanım yükseltilir.

Silis dumanı tanelerinin çok ince olmasından dolayı, belirli bir çökme değeri için betonun su ihtiyacı artmaktadır. Bu yüzden, betonda daha az su kullanmak amacıyla, silis dumanlı katkılarla yapılan betonlarda su azaltıcı katkı malzemelerinin de kullanılması gerekmektedir [45].

Deney çalışmalarımızda kullanılan silis dumanının fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 4.3.'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Kullanılan Silis Dumanının Özellikleri

(%)	Silis Dumanı
S(SiO₂)	91
A(AL₂O₃)	0,58
F(Fe₂O₃)	0,24
S+A+F	91,82
CaO	0,71
MgO	0,33
SO₃	1,06
Na₂O	0,38
K₂O	4,34
C	0.8-1.0
S	0.1-0.3
Kızdırma Kaybı	1,84
Yoğunluk,(gr/cm³)	2,20

Çimento ağırlığının %7- %10'u kadar silis dumanı katılarak yapılan betonların priz süreleri, katkısız betonlara göre daha uzun olmaktadır [47].

SD katkılı betonlarda basınç dayanımını oldukça arttırmaktadır. SD'nin betondaki boşlukları doldurma ve puzolanik etki olmak üzere iki işlevi vardır. Bunlardan hangisinin belirleyici olduğu yönünde değişik görüşler vardır. Silis dumanının puzolanik etkisinin betonda en zayıf halka olarak bilinen agrega-çimento hamuru temas yüzeyini güçlendirmede önemli olduğu, mikro yapısal ve mekanik incelemelerle kanıtlanmıştır [47].

4.2 Uçucu Kül Ve Silis Dumanının Beton Üzerindeki Etkileri

Uçucu küllerin tane yapıları küresel olan katı parçacıklardır. UK taneciklerinin boyutları 1–150 µm arasında değişiklik göstermektedir. Normal olarak, 2,1–2,7g/cm³ yoğunluğa sahiptirler. Renkleri açık griden koyu griye uzanan değişikliktedir. UK daha çok karbon içerdiklerinde, koyu gri renkte daha çok demir içerenler ise açık gri renkte olmaktadır. Silisli ve alüminli amorf yapıya sahip oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildikleri için, uçucu küller de, aynen ince taneli doğal puzolanlar gibi, puzolanik özellik göstermektedirler; kalsiyum hidroksitle sulu ortamlarda birleştiklerinde, hidrolik bağlayıcılığa sahip olmaktadır. O nedenle, hem portland-puzolan tipi çimento üretiminde, hem de beton katkı maddesi olarak doğrudan kullanılmaktadırlar. Genellikle, beton katkı maddesi olarak çok büyük miktarlarda kullanılabilirler. Beton karışımının içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15-%50'si civarında değişebilmektedir [45].

Uçucu külün kimyasal bileşimi kullanılan kömürün yapısı, jeolojik orjini ve süreç koşullarına (kömür hazırlama, yanma, toz toplama, desülfürizasyon gibi) bağlıdır. Uçucu külde bulunan başlıca bileşenler SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, ve CaO olup, diğerleri SO₃, MgO ve alkali oksitlerdir. Ayrıca yanmamış karbon ve bunun yanı sıra titanyum, fosfor, mangan ve molibden de eser bileşen olarak bulunmaktadır [50].

Uçucu külün beton karışımında kullanılması taze ve sertleşmiş beton özelliklerini önemli derecede etkiler. Taze betonun su ihtiyacı, işlenebilirliği, priz zamanı, bitirilebilme özelliği, hidratasyon ısısı uçucu külün kullanımı sonucunda etkilenir. Katılaşmış betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri de uçucu külün beton karışımında kullanılmasıyla etkilenen özellikleridir. Uçucu küllerin beton özellikleri üzerine olan etkileri aşağıda başlıklar halinde özetlenmiştir [46].

UK katkılı betonların işlenebilmesi, katkısız betonlarınkinden daha iyi olmaktadır.

Bunun iki nedeni vardır:

- ✓ UK yoğunluğu portland çimentosunun yoğunluğundan daha azdır. O nedenle, puzolanik beton yapımı için çimento ağırlığının bir bölümünün yerine uçucu kül kullanıldığında, betondaki bağlayıcı hamurun hacmi artmaktadır. Daha büyük

hacme sahip bağlayıcı hamur, taze betondaki agrega arasını daha iyi doldurmakta ve plastiklik sağlamaktadır.

- ✓ UK taneleri küresel şekillidir. Küresel şekilli tanecikler iç sürtünmeyi azaltmakta, betonun akıcılığını arttırmaktadır.

Betondaki bağlayıcı hamurun hacmindeki artış ve UK taneciklerinin sürtünmeyi azaltarak betona daha fazla akıcılık sağlamaları, taze betonun pompalanabilirliğini artırmakta, yüzeyinin daha kolay düzeltilebilir olmasına yol açmakta, kalıpları daha kolay sökülebilir duruma getirmektedir [45].

UK katkılı betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara bağlı olmaktadır. İncelik arttıkça su ihtiyacında artma olmaktadır [45].

UK katkılı betonlarda yer alan portland çimentosu miktarı, katkısız betondakine göre daha azdır. UK katkılı betonların priz süreleri katkısız betondakinden genellikle daha uzun olmaktadır. Priz süresi, kullanılan uçucu külün tipine ve inceliğine göre değişmektedir. C tipi uçucu küller, F tipi uçucu küllerden daha kısa priz süresi göstermektedir.

Katkı maddesi olarak uçucu kül kullanılmasının beton dayanımına etkileri, ince taneli doğal puzolanların etkisine benzemektedir. Normal olarak, ilk zamanlarda, uçucu küllü betonun dayanımı katkısız beton dayanımına kıyasla birazcık daha az olmaktadır. Ancak sonunda dayanım oldukça yüksektir [45].

Silis dumanının rengi açık griden koyu griye değişen renkte olabilir. Rengindeki koyuluk, karbon içeriğinin artmasıyla artmaktadır. Su ile birleşmiş durumda, siyaha yakın bir renk göstermektedir [45].

Son yıllarda beton teknolojisi uzmanları, kimyasal ve puzolanik katkıların özel ihtiyaçlara göre beton yapımında kullanımı konusunda birçok araştırma yapmışlardır. Puzolanik malzemeler arasında, betona yüksek dayanım veren başlıca katkı, silis dumanıdır.

SD katkılı beton, sadece Portland çimentosu ile yapılmış olan betonlarda, yüksek kohezyondan ve ince katı taneciklerin arasında daha çok temas olmasından, silis dumanlı betonların işlenebilmesi azdır. Betona katılan silis dumanının oranı çimento ağırlığının %5'inden daha yukarıya çıktıkça, beton daha yapışkan olmakta, yüzey düzeltme işlemlerinde kullanılan malzemelere yapışarak zorluk çıkartmaktadır [45].

SD tanelerinin çok ince olmasından dolayı, belirli bir çökme değeri için betonun su ihtiyacı artmaktadır. Bu yüzden, betonda daha az su kullanmak amacıyla, silis dumanlı katkılarla yapılan betonlarda su azaltıcı katkı malzemelerinin de kullanılması gerekmektedir [45].

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgindir. Betonun 28 günlük dayanımını artırmayı amaçlayan çalışmalarda silis dumanın genellikle çimentonun %10-20'si oranında kullanıldığı ve gerekli işlenebilmeyi sağlamak için %10'dan yukarı miktarların süper akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanıldığı görülmektedir [48].

Katı kuru tuzlar betona zarar veremezler ancak su ile birlikte bulunmaları sonucu, sertleşmiş çimento harcı ile reaksiyona girerler. Zemin yüzeyinde oluşan tuz birikintileri genellikle sodyum sülfattır. Ancak magnezyum sülfata da birçok bölgede rastlanır. Reaksiyonun gelişimini, sülfatlı ortamın şiddeti, betonun geçirimsizliği, betonda kullanılan çimentonun kimyasal yapısı ve suyun varlığı etkilemektedir.

Betonların sülfat dayanıklılığını artırmak için sülfata dayanıklı çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi puzolanik katkıları kullanılır. Puzolanlar $Ca(OH)_2$ 'i bağlayarak sülfatlarla reaksiyonu önler ve sadece Portland çimentosu ile kıyaslandığında bağlayıcı içindeki $Ca(OH)_2$ ve C_3A oranının düşmesini sağlar [40,51].

SD, yoğun bir yapı oluşturarak betonun geçirimsizliğini azaltmakta ve geniş özgül yüzeyi ile alkalileri bağlayarak boşluk çözeltisinin alkali konsantrasyonunu düşürmektedir. Ayrıca silis dumanının amorf halde bulunan silis içeriği, çimento yerine kullanıldığından beton henüz taze haldeyken alkaliler ile reaksiyona girer. Bu reaksiyonun beton taze iken hızla oluşmasının sebebi, silis dumanının inceliğinin çok yüksek olmasıdır. Yeterli miktarda silis dumanı kullanıldığında, beton gerekli dayanımı kazanmadan önce çimento ve silis dumanı tarafından ortama giren sodyum iyonlarının büyük kısmı reaksiyon esnasında tükenir ve zararlı genleşmeler çatlaklara yol açmazlar [49].

4.3 Beton Seriler ve Özellikleri

Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi için 5 farklı çimento tipi ve 2 farklı katkı maddesi kullanılarak toplamda 8 farklı beton serisi oluşturulmuştur. Numunelerin tamamına yakın karışıma giren malzeme oranları aynıdır. Bu tez çalışması ana matrisi aşağıda belirtilen özellikler TS 802'deki standartlar dikkate alınarak gerçekleştirilen toplam 8 seri numune hazırlanmıştır.

1. su + CEM I 42,5N çimentosu + ince agrega + iri agrega
2. su + CEM II 42,5N çimentosu + ince agrega + iri agrega
3. su + CEM II 32,5R çimentosu + ince agrega + iri agrega
4. su + CEM IV 32,5R çimentosu + ince agrega + iri agrega
5. su + CEM V 32,5R çimentosu + ince agrega + iri agrega
6. su + CEM I 42,5N + %10 silis dumanı + ince agrega + iri agrega
7. su + CEM I 42,5N + %10 uçucu kül + ince agrega + iri agrega
8. su + CEM I 42,5N + %20 uçucu kül + ince agrega + iri agrega

Her serinin 1 m³'ü için kullanılan yaklaşık karışım miktarları ve kullanılan katkı maddelerinin yaklaşık karışım miktarları aşağıdaki Tablo 4.4' de verilmiştir.

Tablo 4.4. 1 m³ Beton için Yaklaşık Karışım miktarları, (kg)

Seriler	Su	Çimento	Silis Dumanı	Uçucu Kül	İnce Agregası (0-4mm)	İri Agregası (4-16mm)
CEM I 42,5N	160	400	-	-	1233	664
CEM II 42,5N	160	400	-	-	1231	663
CEM II 32,5R	160	400	-	-	1223	658
CEM IV 32,5R	160	400	-	-	1222	658
CEM V 32,5R	160	400	-	-	1210	652
CEM I + %10 SD	160	360	40	-	1233	664
CEM I + %10UK	160	360	-	40	1233	664
CEM I + %20UK	160	320	-	80	1233	664

Çimento, katkı maddeleri, su ve agregadan oluşan karışımın su ihtiyacı karışımdaki çimento çeşidine ve katkı maddelerine göre değişim göstermektedir. Bunun nedeni farklı tip çimentoların ve katkı maddelerinin özelliklerinin farklı olması ve bundan kaynaklı olarak su emme ihtiyaçlarının farklı olmasına bağlıdır. Dolayısıyla su/çimento-dayanım ilişkisi yerine, yapılan deneme karışımları sonucunda işlenebilirliğe göre bulunan çimento dozajı-dayanım ilişkisinin dikkate alınması daha sağlıklı sonuçlar vermektedir.

Bu bilginin ışığında, yapılan deneme karışımları sonucunda, tez çalışmasında hazırlanan numune serilerinin çimento dozajı 400kg/m³ olarak belirlenmiştir.

Seriler hazırlanırken ilk önce çimento çeşitleri ve katkı maddeleri için ayrı ayrı seriler hazırlanmıştır. İlk önce çimento, su, ince ve iri agrega hazırlanarak su katılmadan Şekil 4.3'de gösterilen beton mikserinde 3 dk homojen olarak dağılına kadar karıştırıldı. Sonra azar azar su ilave edilerek homojen bir karışım elde edilene kadar 5 dk kadar karıştırıldı. Bu işlem katkı maddeli beton seriler içinde yapıldı.



Şekil 4.3. Beton Üretiminde kullanılan beton mikseri

Çimento, su, ince-iri agrega ve silis dumanlı ve uçucu küllü seriler içinde aynı işlem tekrarlandı. Daha sonra 10×10×10 mm boyutundaki küp numunelere 25 kez şişlenerek kalıplara döküldü.

Çimento çeşitlerine, katkı maddelerine ve kür yaşına göre basınç dayanımının etkisini gözleyebilmek için küp numunelerden 3, 7 ve 28 günlük için karbonatlaşmadan önce ve sonra olmak üzere ayrı numuneler hazırlandı. Hazırlanan numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak kirece doygun 23+- C deki su dolu kür tankının içerisine kürlerini tamamlamaları için yerleştirildi. Tüm beton serilere ait özellikleri Tablo 4.5’de verilmiştir.

Tablo 4.5. Beton Seriler ve Özellikleri

Seriler	Su/Çimento	Sıkıştırma Oranları	Bekletildiği Ortam	
			Kür Ortamında	1 bar
CEM I 42,5 N	0,55	25 kez şiş ile	3,7,28 gün	1,3,7 gün
CEM II 42,5 N	0,55	25 kez şiş ile	3,7,28 gün	1,3,7 gün
CEM II 32,5 R	0,55	25 kez şiş ile	3,7,28 gün	1,3,7 gün
CEM IV 32,5 R	0,55	25 kez şiş ile	3,7,28 gün	1,3,7 gün
CEM V 32,5 R	0,55	25 kez şiş ile	3,7,28 gün	1,3,7 gün
CEM I+ %10 SİLİS DUMANI	0,55	25 kez şiş ile	3,7,28 gün	1,3,7 gün
CEM I+%10 UÇUCU KÜL	0,55	25 kez şiş ile	3,7,28 gün	1,3,7 gün
CEM I+%20 UÇUCU KÜL	0,55	25 kez şiş ile	3,7,28 gün	1,3,7 gün

5. DENEY DÜZENEGİ VE HAZIRLIĞI

5.1. Deneyler ve Ölçümler

5.1.1. Birim Ağırlık Deneyi

Kelime anlamından da anlaşılacağı gibi, bir birim hacim içerisinde yer alan taze betonun ağırlığını belirtmektedir. Betonun birim ağırlığı, genellikle, kg/m^3 veya ton/m^3 olarak ifade edilmektedir.

Betonun birim ağırlığının düşük veya yüksek olması, betonu oluşturan malzemelerin özelliklerine ve beton içerisinde yer alan boşluk miktarına bağlı olmaktadır. Özgül ağırlığı yüksek olan agregaların oluşturduğu betonun birim ağırlığı da yüksek olmaktadır. Öte yandan, içerisinde daha çok hava boşlukları bulunduran betonun birim ağırlığı daha düşük olmaktadır. Betonu oluşturan agregaların gradasyonunun iyi olmaması, maksimum agrega tane boyutunun küçük olması, taze betona sıkıştırılma işleminin yeterince yapılmamış olması ve beton içerisine sürüklenen hava miktarının çok olması, beton içerisindeki boşlukların miktarını arttıran ve dolayısı ile, taze betonun birim ağırlığının düşük olmasına neden olan başlıca faktörlerdir. Taze betonun birim ağırlığının bilinmesi, beton karışım hesapları için gereklidir.

Deney çalışmalarımızda tüm seriler için farklı kür sürelerine göre ve karbonatlaşmadan önce ve sonra olmak üzere tüm serilerin birim ağırlıklarına bakılmıştır. Serilerin birim ağırlıklarına bakılırken Şekil 5.1 'de gösterilen hassas terazi kullanılmıştır.



Şekil 5.1 Birim Ağırlık Aleti

5.1.2. Kapiler Su Emme Deneyi (Kapilerite)

İlk olarak, 28 günlük kürünü tamamlayan numuneler, laboratuvar ortamında kurutulduktan sonra, yan yüzeyleri parafin ile kaplanarak sadece alt yüzeyinden su emmesi sağlanmıştır. Numunelerin suya yerleştirilmesi Şekil 5.2' de görülmektedir. Su seviyesi deney süresince 5 mm olarak sabit tutulmuştur. Numuneler belirli zamanlarda (0, 5, 10, 20, 30, 60, 180, 360, 1440 dk.) tartılarak kapiler su emme katsayıları (1) nolu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır [15,52].

$$Q / A = k \sqrt{t} \dots \dots \dots (1)$$

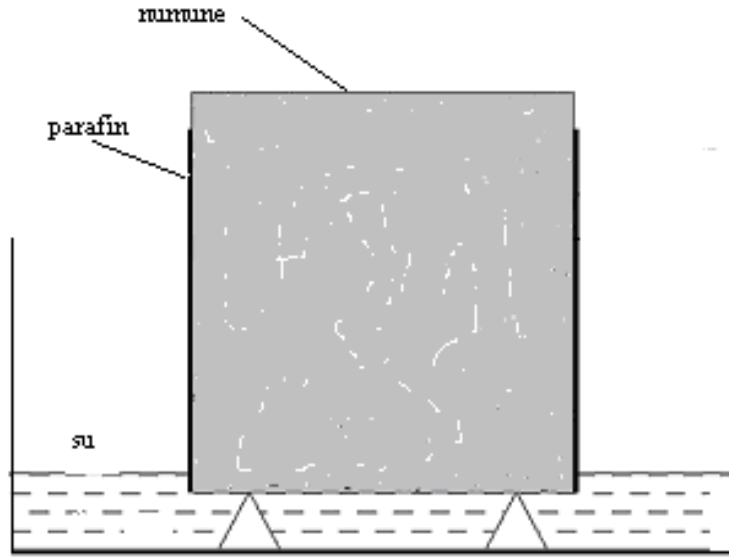
Formülde,

Q= numunenin absorbe ettiği su miktarı (cm³),

A= suya temas eden yüzeyin alanı (cm²),

k= kapiler su emme katsayısı (cm/s^{1/2}) ve

t= zaman (s) parametrelerini belirtmektedir



Şekil 5.2 Kapiler Su Emme Deney Düzenegi [53]

Kapiler su emme deneyi karbonatlaşmadan önce ve sonra olmak üzere iki kısımda incelenmiştir. Bu sayede karbonatlaşmış beton seriler ile karbonatlaşmaya uğramamış beton seriler üzerinde karşılaştırma yapılabilmektedir. Şekil 5.3'deki deney çalışmamızdaki kapiler su emme deneyi için beton serilerin suya yerleştirilme şekli verilmiştir.



Şekil 5.3 Beton Serilerin Kapiler Su Emme Deney Düzenegi

5.1.3. Porozite

Porozite, betonun ihtiva ettiği su miktarı, beton içindeki çimento dozu, cinsi ve tipi, beton içindeki hava miktarı, betonun sıkıştırılması gibi birçok etkene bağlıdır. Tüm bu özellikler betonun dayanımını da etkilemektedir.

Ultrasonik testte olduğu gibi porozite tespiti için yapılan deneylerde de 100 mm küp numuneler hazırlanmış ve 28 günlük kür yaşındaki numuneler kullanılmış ve numunelerin porozitesi (2) no'lu bağıntı ile bulunmuştur [54,55]. Bulunan porozite değerleri betonun dayanımı ile kıyaslanarak sonuçlar yorumlanmıştır.

$$P=(W_{dyk}-W_k)/(W_{dyk}-W_s)*100 \dots \dots \dots (2)$$

Formüldeki;

P= Porozite, (%)

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

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

W_{su} = Numunenin su altındaki ağırlığı, (kg)'dir.

5.1.4. Ultrases Deneyi

Betonun içerisinden geçen sesüstü dalgasının hızı ile beton dayanımı arasında doğrudan bir ilişki yoktur. Ancak, sesüstü dalganın hızı ile betonun yoğunluğu arasında belirli bir ilişki bulunmaktadır. Yoğunluğu az olan bir betonda, yani içerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda, sesüstü dalganın betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça, sesüstü dalganın hızı daha az olmaktadır.

Betonun yoğunluğu ile basınç dayanımı arasında belirli bir ilişki bulunmadığı gibi yoğunluğu yüksek olan betonların basınç dayanımları da genellikle yüksek olmaktadır.. Su/çimento oranı yüksek olan betonlar daha çok kapiler boşluk içerdiğinden, bu betonların yoğunluğu ve basınçları da yüksek değildir [22].

Ultrasonik test yöntemiyle herhangi bir betonun basınç dayanımını yeterince hassas olarak bulabilmek zor olmakla birlikte, herhangi bir beton içerisinden geçen sesüstü dalganın hızı, o betonun içerdiği boşluk miktarı (ve yoğunluğu) ile yakından ilgili olduğu

için, elde edilen sesüstü 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, sesüstü dalga hızı bilindiği takdirde beton kalitesinin ne olabileceğine dair önerilen sonuçlar Tablo 5.1’de gösterilmiştir [22].

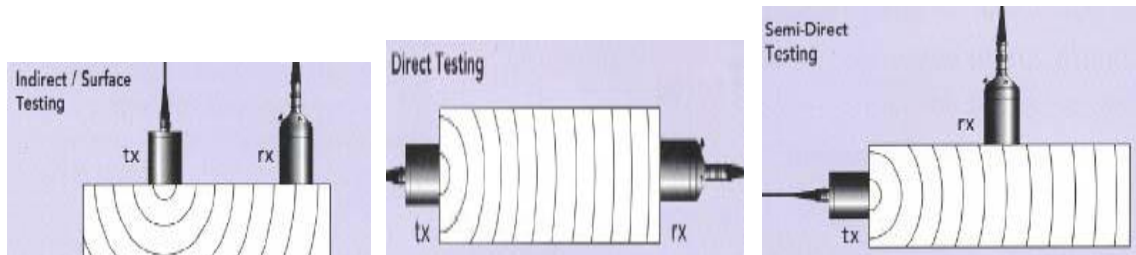
Tablo 5.1. Ultrases – Beton Kalitesi İlişkisi

Dalga hızı, m/sn	>4500	3500-4500	3000-3500	2000-3000	<2000
Beton kalitesi	Mükemmel	İyi	Şüpheli	Zayıf	Çok Zayıf



Şekil 5.4. Ultrasonik Test Cihazı

Şekil 5.4.’de gösterilen ultrasonik test cihazı ile betonun içerisine gönderilen ses üstü dalgaların betonun bir yüzeyinden diğer yüzüne geçme süresi ölçülüp, dalga hızı hesaplanmaktadır. Ultrasonik test cihazı ve yapılan ölçüm şekilleri Şekil 5.5.’de verilmiştir.



Şekil 5.5. Ultrases ölçüm şekilleri

Bulunan bu ses üstü dalga hızı ile betonun basınç dayanımı ve diğer özellikleri arasındaki ilişki elde edilmektedir [45]. Ultrases hız ölçümü, 12 voltluk akümülatör ile çalışan dijital göstergeli Ultrases ölçme aleti ile yapılmıştır. Aletin önce sıfır ayarı yapılarak kalibre edilmiştir. Numunelerin her iki yanına gres yağı sürülerek proplar ile numune arasında boşluk oluşması önlenmiştir. Beton numunenin bir ucuna ultrasesi oluşturan verici, diğer ucuna da malzeme içinden geçen ses dalgalarını alan bir alıcı yerleştirilmiştir. Alıcı tarafından tutulan ses dalgaları bir osilografa nakledilerek sesin örnek içinden geçiş zamanı tespit edilerek burada sesin örnekteki yayılma hızı bulunmuştur. Silindir üç adet numune üzerinde yapılan deney ile ses dalgaları geçirme süreleri ölçülmüştür. Ultrases hızı deney sonuçlarının değerlendirilmesinde mikro saniye (μsn) olarak Ultrases hızı geçiş süresi değerleri (3) nolu denklem ile hesaplanarak bulunmuştur.

$$V=(h/t)*10^6 \dots\dots\dots(3)$$

V: Ultrases hızı (km/sn)

L: Numune boyu (km)

t = Ses üstü dalganın gönderilmiş olduğu beton yüzeyinden, alındığı diğer yüzeye kadar geçen zaman (mikro saniye) [45,56].

5.1.5. Basınç Dayanımı Deneyi

Seriler basınç dayanımına tabi tutulmadan önce, 3, 7 ve 28 günlük kürlerini tamamlayan numuneler için farklı kür sürelerine göre basınç dayanımlarına ayrı ayrı bakılmıştır.

Bu aşamadan sonra, küp numunelerin basınç deneyleri Şekil 5.6' da görülen Autotest 3000 hidrolik yük kontrolü Beton Basınç Dayanım Presinde, TS EN 12390-3'E göre, 3kN/sn yükleme hızı uygulanarak gerçekleştirildi [57]. Karbonatlaşmadan önce ve sonra farklı tip çimentolardan ve katkı maddelerinden hazırlanan 8 farklı beton serisinin her birinde 3'er numune kırılarak bunların ortalamaları o seriye ait basınç dayanımı değeri olarak kaydedildi.



Şekil 5.6. Hidrolik Yük Kontrollü Pres



Şekil 5.7. Basınca maruz kalan numune görüntüsü

Deney çalışmalarımızda Şekil 5.7' de gösterildiği gibi küp numuneler de basınç dayanımı deneyi farklı kür sürelerine göre karbonatlaşmadan önce ve sonra olmak üzere 2

aşamada bakılmıştır. Bunun nedeni ise; beton basınç dayanımının karbonatlaşmaya uğradıktan sonra farklılık gösterip göstermediğini öğrenebilmektir.

5.1.6. Karbonatlaşma Deneyi

Hızlandırılmış karbonatlaşma testi betonun yoğunlaştırılmış bir şekilde karbondioksit ortamına maruz bırakılmasıdır. Hızlandırılmış karbonatlaşma testinin tercih edilme sebebi sonuçların zaman açısından daha kısa sürede sonuçlanmasıdır. Hızlandırılmış karbonatlaşma test metoduna karşın herhangi bir standarda rastlanmamış fakat genel anlamda karbonatlaşma üzerine yapılmış çalışmalarda ortam karbondioksitinin %4 ve %100 arasında değişik oranlarda yer aldığı gözlemlenmiştir.

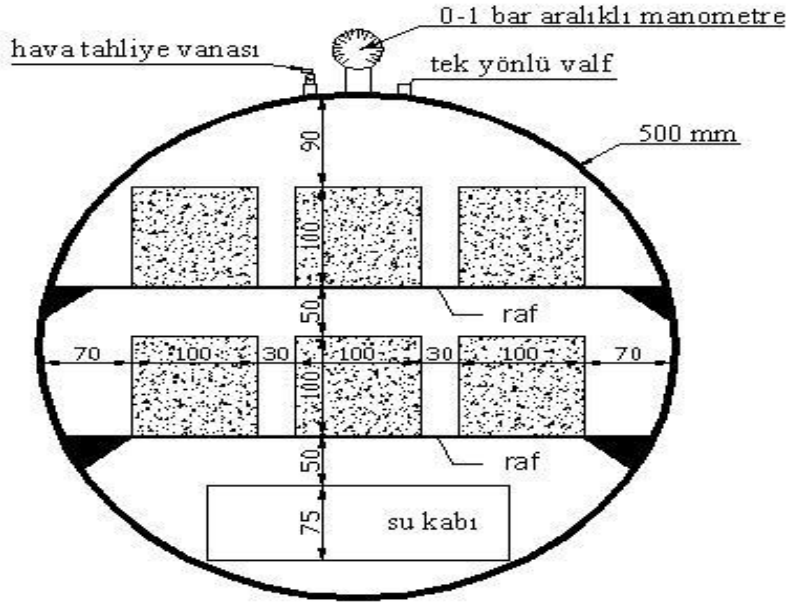
Deney çalışmalarımızda çalışmalarımıza başlayabilmek için ilk önce gaz sızdırmazlığı olan bir tank tasarlanmış ve içerisine gerekli olan ekipmanlar yerleştirilmiştir. Tank içinde bulunması şart olan ekipmanlar sırasıyla;

- ✓ İçeri de bulunan gaz miktarının belirlenmesi için manometre,
- ✓ Ortamdaki bağıl nemin kontrolü için termostat ve resistanslı su kabı,
- ✓ Tank içindeki havanın türbülansı için fan ve kontrol panelidir.

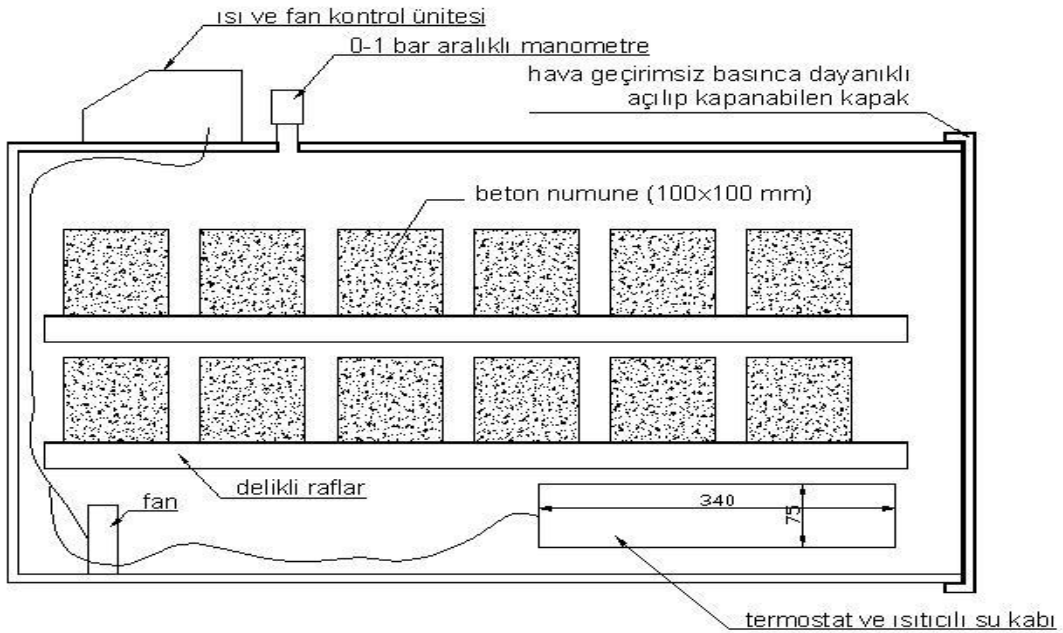
Tankın içinde bulunması gereken ekipmanlar tamamlandıktan sonra deney çalışmalarına başlanmıştır. Tankın iç hacmi 175 litre olup tankın enine ve boyuna kesitleri Şekil 5.8 ve 5.9' da verilmiştir.

Hızlandırılmış test tankının hazırlanmasında öncelikle olarak dikkat edilmesi gereken, tankın gerekli basınca dayanıklı ve gaz sızdırmazlığının olmasıdır. Gazın tank içinde eşit miktarda yayılabilmesi için silindir şeklinde, 90 cm derinlikte ve 50 cm çapında bir tank tasarlanmıştır. Silindir tankın düz olan yüzeylerinden biri sabit bir şekilde kapatılırken diğer düz olan yüzeye açılabilir ve kapanabilir bir kapak yerleştirilmiştir. Sızdırmazlığı sağlamak için ise kapak ile gövde arasına özel olarak hazırlanmış bir conta konulmuştur. Silindir tank içerisine daha fazla beton numune koyulabilmesi amacıyla iki katlı olarak tasarlanan katları delikli raflar ile ikiye ayrılmıştır. Rafların delikli olmasının nedeni; tankın alt kısmına yerleştirilen fan, her iki katta da karbondioksitin eşit bir şekilde dağılmasını sağlamaktadır.

Silindir tankın kapağı ile gövdesinin birbirine tam olarak oturması için kapağın her iki tarafına saplamaları olan büyük ölçülerde kelebek somunlar hazırlanmıştır. Son olarak deney boyunca tankın dış tarafından içerideki sıcaklığı, basıncı ve fanı kontrol edebilmek için; tankın üst tarafına kontrol ünitesi, hava tahliye vanası ve manometre konulmuştur.



Şekil 5.8. Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı enine kesiti [33]



Şekil 5.9. Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı boyuna kesiti [33]

Laboratuvar ortamında hazırlanan ve değişik şartlara maruz bırakılan düzgün geometrik numunelerin ölçülmek istenilen yüzeyi olabildiğince dik bir şekilde kesilir. Gerçek ortamdan ise karot numuneler alınarak uygulanabilir. Karbonatlaşma miktarını belirlemek için farklı araştırma teknikleri vardır. Karbonatlaşma hızı hakkında önceden bilgi alabilmek amacıyla çeşitli denklemler ortaya atılmıştır. Tipik bir beton için karbonatlaşmanın hızını zamana göre veren en temel denklem;

$$C = K\sqrt{T} \text{ 'dir [29].}$$

C: Karbonatlaşma Derinliği (mm),

K: Fiziksel Değişkenleri İçeren Parametre,

T: Zaman (yıl)

Düşük dayanımlı bir beton için K parametresi genellikle 3-4 mm/yd^{0,5}'den büyük bir değer alır. Betonun maruz kalacağı dış ortam koşullarının değişken olmasından dolayı pratikte bu bağıntıyı kullanmak pek güvenli olmamaktadır. Karbonatlaşma derinliğinin yerinde örnekler alınarak belirlenmesi daha güvenli sonuçlar vermektedir. Betonarme yapılarda meydana gelen karbonatlaşma donatıda korozyon oluşmasına neden olabilmektedir [58].

Yukarıdaki denklemin dışında ortam nemi, beton içeriği, karbondioksit konsantrisi vb. karbonatlaşmaya etkisi olan faktörlerinde hesaba katıldığı denklemler çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiştir. Karbonatlaşma derinliğinin önceden belirlenmesi dışında deneysel yöntemler kullanılarak karbonatlaşmanın belirlendiği bazı teknikler vardır. Bu tekniklerin en yaygını indikatörlerin beton yüzeyine püskürtmek suretiyle kullanımındır.

Genel olarak herhangi bir katkının veya beton içerisindeki bir değişikliğin karbonatlaşma hızına veya derinliğine ne şekil de etki yaptığı yönündeki araştırmalar hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılarak yapılmaktadır.

Karbonatlaşma derinliğini belirlemek için betonu mümkün olduğunca yüzeye dik kesip, kesilen temiz yüzeye indikatör sıvı püskürtülür. Karbonatlaşmış kısım renksiz kalırken, karbonatlaşmamış kısım sıvı ile reaksiyona girip renk verir. Bu amaçla genellikle %0,1 phenolphthalein alkol eriyiği kullanılır. Bu eriyik karbonatlaşmamış tabakayı kırmızı-mor renge boyarken pH değeri < 8,3 olan bölgeyi boyamaz [59]. Serbest Ca(OH)₂ pembe renk gösterir iken, karbonatlaşmamış kısım göstermemektedir [25].

Taze betonun kalıba yerleştirilmesi sırasında üst yüzeylerine mala ile düzeltme yapıldığından dolayı, numuneler kalıp gören yüzleri doğrultusunda kesilmiş ve bu yüzeylerdeki karbonatlaşma derinliği (D) hesaplanmıştır. Şekil 5.11’de görüldüğü gibi kumpas aleti ile bu tip ölçümleri daha önce Ramezaniyanpour [60], Claisse [61] ve Paillere [62] tarafından (4) nolu bağıntı kullanılarak hesaplanmıştır.

$$D= (A1+A2+B1+B2+C1+C2+D1+D2) / 8.....(4)$$

Normal ortamdaki karbonatlaşma ise genelde o bölgenin çevre koşullarının yıllara bağlı olarak karbonatlaşmaya etkisinin incelenmesinde kullanılmaktadır. [2]. Karbonatlaşma, beton yüzeyinden başlayarak, içeriye doğru ilerlemektedir. O nedenle, yüzeye yakın bölgeler (yüzeyden 2,5-3,0 cm kadar içerideki beton) karbonatlaşmanın etkisi altındadır. Karbonatlaşmanın gerçekleşebilme hızı, havadaki karbondioksit miktarının ve nem miktarının

yanı sıra, betonun geçirimsizliğine bağlıdır. Karbondioksit miktarının yüksek olması, doğal olarak, karbonatlaşmayı artırmaktadır. Relatif nemin %50 civarında olması da, karbonatlaşmayı artırmaktadır. Relatif nemin % 25’den az veya %100 olması durumunda, karbonatlaşma yer almamaktadır.

Betonun geçirimsizliği arttıkça ve beton yüzeyinde mikro çatlaklar çoğaldıkça, karbonatlaşmanın etki ettiği derinlik artmaktadır [58].



Şekil 5.10. Karbonatlaşma Sonrası Beton Serilerin Bir Aparat Yardımıyla İkiye Bölünmesi



Şekil 5.11 Farklı Zaman Dilimlerine Göre Fenolfitalein Püskürtülen Beton Serilerin Görüntüsü

Hızlandırılmış karbonatlaşma testi için tüm beton seriler için aynı şartlar uygulanmıştır. Bunun nedeni deneyimizde farklı tip çimentolar ve farklı katkı maddeleri kullanılarak oluşturulan küp numuneleri arasında kıyaslama yapılabilmesi için her bir seriye aynı şartlar uygulanmıştır. 40 C sıcaklıktaki gerekli nemi sağlamak için sodyum dikromat seçilmiştir. 28 günlük kür sürelerini tamamlayan numuneler tank içine yerleştirildikten sonra 1,3 ve 7 gün olmak üzere farklı zaman dilimlerine göre karbonatlaşmaya maruz bırakılmıştır. Karbonatlaşmadan sonra tüm beton seriler farklı zaman dilimlerine göre tank içinden çıkarılarak Şekil 5.10'da gösterildiği gibi hidrolik yük kontrollü pres aletinde karbonatlaşma derinliğine bakabilmek için bir aparatın yardımıyla numuneler ortadan ikiye ayrılmıştır. İkiye ayrılan bu numunelere Şekil 5.11'de gösterildiği gibi fenolfitalein çözeltisi püskürtülerek mor rengi alması sağlanan ve bu renk değişikliğine uğrayan beton serilerin kumpas aleti yardımıyla karbonatlaşma derinlikleri ölçülmüştür.

Bu çalışma da farklı tip çimentolarla farklı oranlarda kullanılan uçucu kül ve silis dumanı ikamesinin beton karbonatlaşma derinliğine olan etkisi deneysel olarak belirlenmiştir.

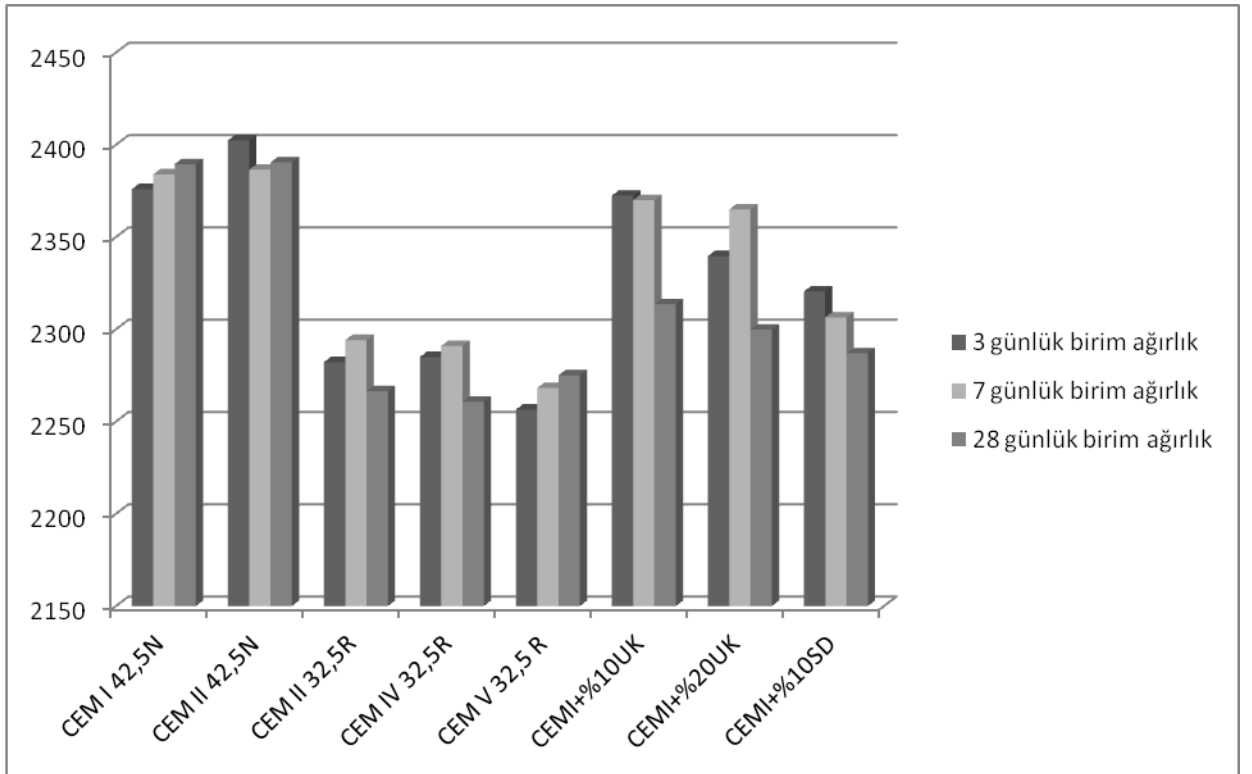
5.2. Bulgular ve Değerlendirme

Tüm beton seriler üzerinde yapılmış olan deneyler sonucu ortaya çıkan veriler bütün ayrıntısıyla birlikte sırasıyla verilecektir.

5.2.1. Birim Ağırlık Deneyi sonuçları

Deney çalışmalarımızda 3, 7 ve 28 günlük kür sürelerini tamamlayan numunelerin farklı kür sürelerine göre ayrı ayrı birim ağırlıklarına bakılmıştır. Ayrıca 28 günlük kür sürelerini tamamlayan tüm numunelerden 3'er tane numune alınarak 1, 3 ve 7 günlük karbonatlaşma testine maruz bırakılmıştır.

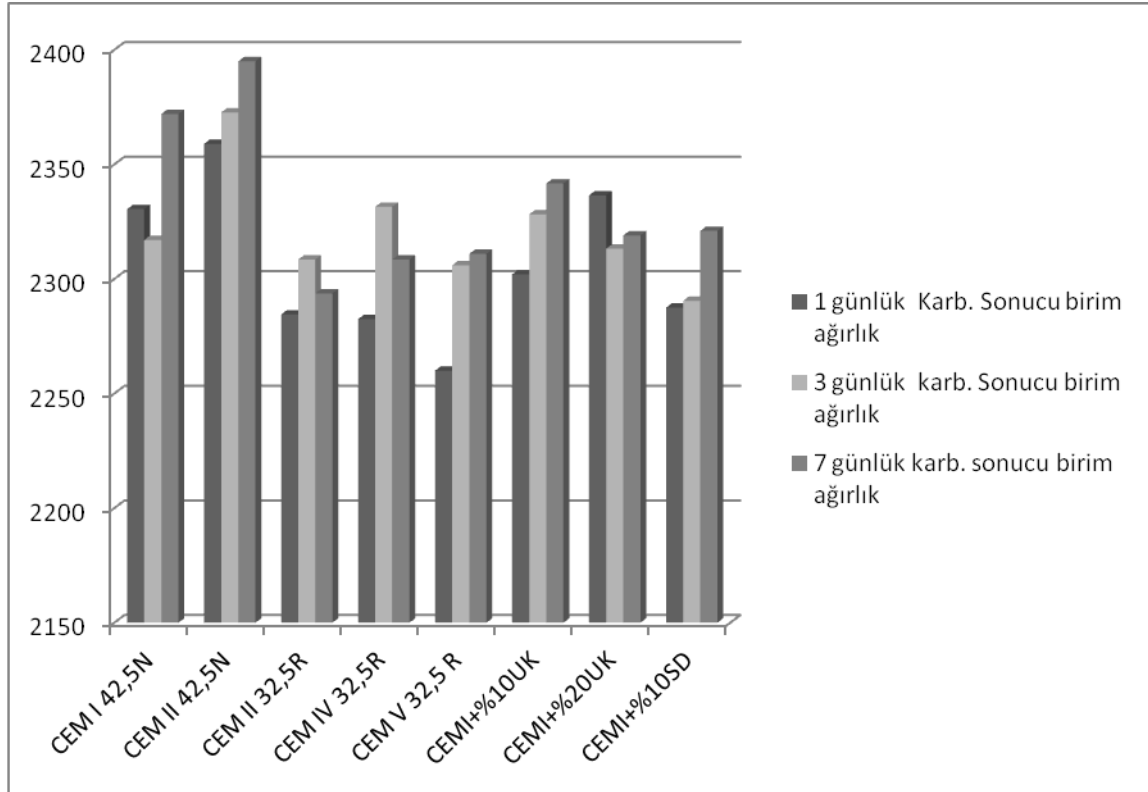
Karbonatlaşmadan önce ve sonra olmak üzere iki şekilde de bakılan birim ağırlık grafikleri Şekil 5.12' de verilmiştir.



Şekil 5.12 Karbonatlaşma Öncesi Tüm Beton Serilerin Farklı Kür Sürelerine Göre Birim Ağırlıkları (kg/m³)

Farklı kür sürelerine göre birim ağırlıklarına bakılan tüm serilerde birim ağırlığı en fazla olan numuneler CEM I 42,5 N ile CEM II 42,5 N olmuştur. Bunun nedeni bu tip çimentolarla yapılan beton serilerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin farklılık

göstermesinin yanında yapılarındaki kalker miktarının fazla olmasıdır. Bu durum farklı günlere göre karbonatlaşma testine maruz bırakılan beton seriler için de değişmemiştir. Şekil 5.13 'de görüldüğü gibi farklı zaman dilimlerine göre karbonatlaşma testine maruz bırakılan tüm serilerde birim ağırlık değerleri yüksek çıkan CEM I 42,5 N ve CEM II 42,5 N olmuştur.



Şekil 5.13 Karbonatlaşma sonrası Tüm Beton Serilerin Farklı Zaman Dilimlerine göre Birim Ağırlıkları (kg/m³)

5.2.2. Kapiler Su Emme Deney Sonuçları

Kapiler su emme deneyi 28 günlük kür sürelerini tamamlayan tüm beton serilerden 3'er tane numune alınarak yapılmıştır. Karbonatlaşma testine tabi tutulan numunelerden de 3'er tane numune alınarak kapiler su emme deneyine tabi tutulmuştur. Karbonatlaşmadan önce ve sonra bakılan kapilarite değerleri Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de verilmiştir

Tablo 5.2 Karbonatlaşma Öncesi Tüm Beton Serilerin Kapilarite Katsayısı,(cm/s^{1/2})

Tüm Seriler	Kapilarite Katsayısı
CEM I 42,5 N	0,863
CEM II 42,5 N	0,957
CEM II 32,5 R	0,987
CEM IV 32,5 R	0,566
CEM V 32,5 R	0,391
CEM I 42,5N+ %10 SİLİS DUMANI	0,733
CEM I 42,5 N +%10 UÇUCU KÜL	0,878
CEM I 42,5 N+%20 UÇUCU KÜL	0,811

Karbonatlaşma öncesi kapilaritesine bakılan tüm seriler de kapilaritesi en yüksek olan CEM II 32.5 R iken en düşük değere sahip beton serisi ise CEM V 32.R olmuştur.

Tablo 5.3 Karbonatlaşma Sonrası Tüm Beton Serilerin Kapilarite Katsayısı, (cm/s^{1/2})

Tüm Seriler	Kapilarite Katsayısı
CEM I 42,5 N	0,795
CEM II 42,5 N	0,653
CEM II 32,5 R	0,680
CEM IV 32,5 R	0,479
CEM V 32,5 R	0,298
CEM I 42,5N+ %10 SİLİS DUMANI	0,722
CEM I 42,5 N +%10 UÇUCU KÜL	0,687
CEM I 42,5 N+%20 UÇUCU KÜL	0,764

Karbonatlaşma sonrası kapilaritesine bakılan tüm beton serilerin kapilaritesi düşmüştür. Bu durumdan şu sonucu çıkarabiliriz ki karbonatlaşmaya uğrayan beton serilerin boşluk oranları azalmıştır.

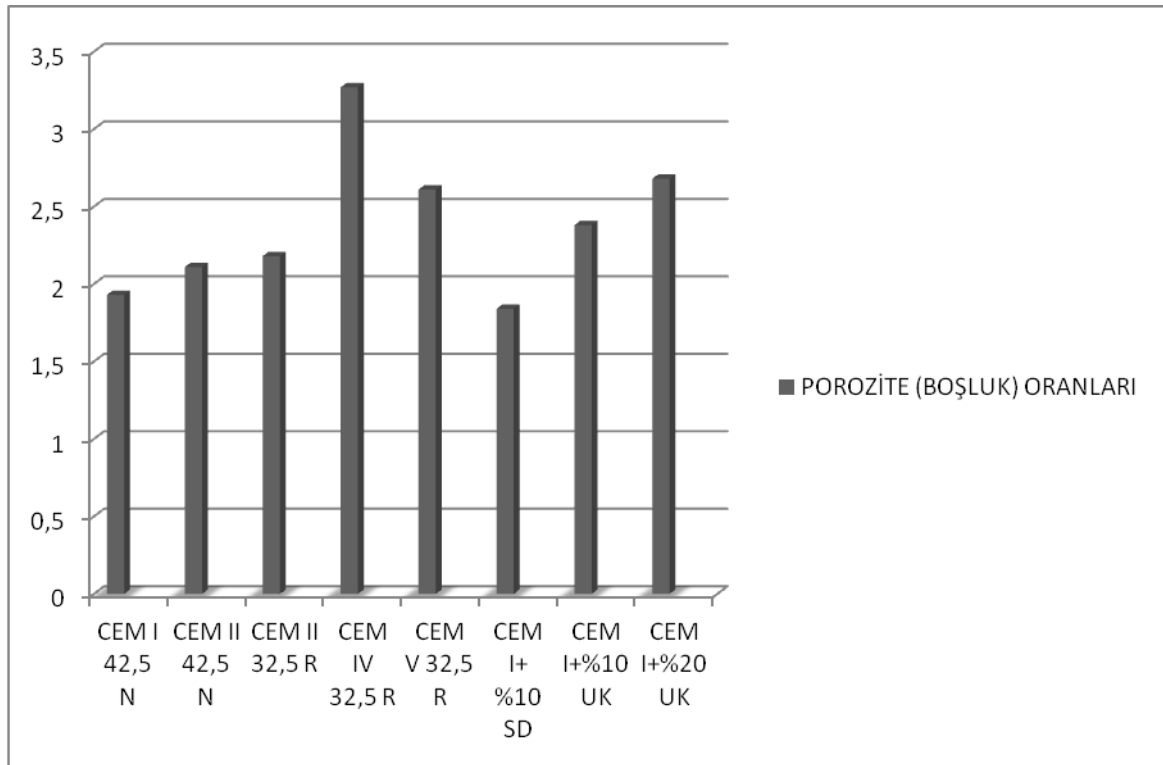
5.2.3. Porozite Deney sonuçları

Karbonatlaşma öncesi 28 günlük kür sürelerini tamamlayan tüm serilerin poroziteleri oranlarına bakılmıştır. Tablo 5.4’de görüldüğü gibi porozite değerleri kontrol

numunesi olarak da seçtiğimiz CEM I 42,5 N tipi çimentosuyla yapılan beton serilerden sonra porozite değerleri düşmeye başlamıştır.

Tablo 5.4 Tüm Serilerin Porozite Oranları, (%)

Tüm Seriler	Porozite (Boşluk) Oranları
CEM I 42,5 N	1,93
CEM II 42,5 N	2,11
CEM II 32,5 R	2,18
CEM IV 32,5 R	3,27
CEM V 32,5 R	2,61
CEM I+ %10 SİLİS DUMANI	1,84
CEM I+%10 UÇUCU KÜL	2,38
CEM I+%20 UÇUCU KÜL	2,68



Şekil 5.14 Tüm Beton Serilerin Porozite Oranları

Şekil 5.14'de gösterildiği gibi özellikle CEM II 32,5 R tipi beton serilerle %10 ve %20 katkı CEM I 42,5 N+UK katkı CEM serilerde porozite oranları daha düşük

çıkmiştir. Bu durumu şöyle açıklayabiliriz ki SD ve UK katkılı beton serilerde boşluk oranları da azdır. Çünkü SD ve UK çimento tiplerine göre çok daha ince bir malzeme özelliği taşıdığı için porozite oranları diğer serilere göre düşük gözlenmiştir.

CEM IV 32,5 R tipi çimento ile CEM V 32,5 R tipi çimento ile yapılan beton serilerde porozite oranlarının düşük çıkmasını da yapısındaki kalker miktarının diğer çimento tiplerine göre daha az olmasına ve çimento inceliğine bağlayabiliriz.

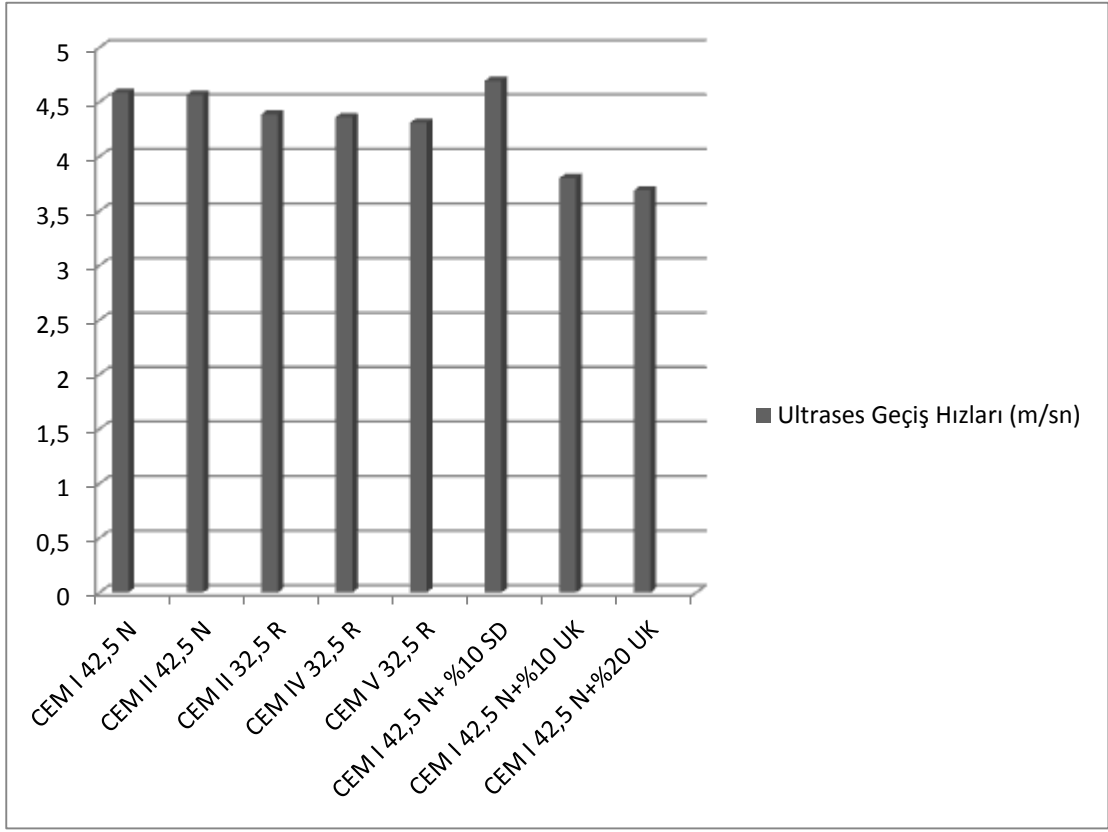
5.2.4. Ultrases Deney Sonuçları

Farklı kür sürelerine göre ultrases geçiş hızlarına bakılan tüm serilerin ultrases geçiş hızları farklılık göstermiştir. Tablo 5.5' da ve Şekil 5.15'de görüldüğü gibi tüm serilerin ultrases geçiş hızları verilmiştir.

Tablo 5.5. Tüm Beton Serilerin Ultrases Geçiş Hızları, (km/sn)

Tüm Seriler	Ultrases Geçiş Hızları
CEM I 42,5 N	4.585
CEM II 42,5 N	4.564
CEM II 32,5 R	4.385
CEM IV 32,5 R	4.361
CEM V 32,5 R	4.310
CEM I 42,5 N + %10 SD	4.694
CEM I 42,5 N + %10 UK	3.802
CEM I 42,5 N + %20 UK	3.690

CEM I 42,5 N ile CEM II 42,5 N tipi çimentolarla yapılan serilerde ultrases geçiş hızı yüksek çıkmıştır. SD ve UK katkılı beton serilere bakıldığında ultrases geçiş hızları farklılık göstermiştir. Bu durum SD'nin çok ince bir malzeme olma özelliğine sahip olduğunu ve SD katkısı ile yapılan beton serilerin CEM I 42,5 N ile CEM II 42,5 N tipi çimentolarla eş değer duruma geldiğini kanıtlar.



Şekil 5.15 Tüm Beton Serilerin Ultrases Geçiş Hızlarının Grafik Gösterimi

5.2.5. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

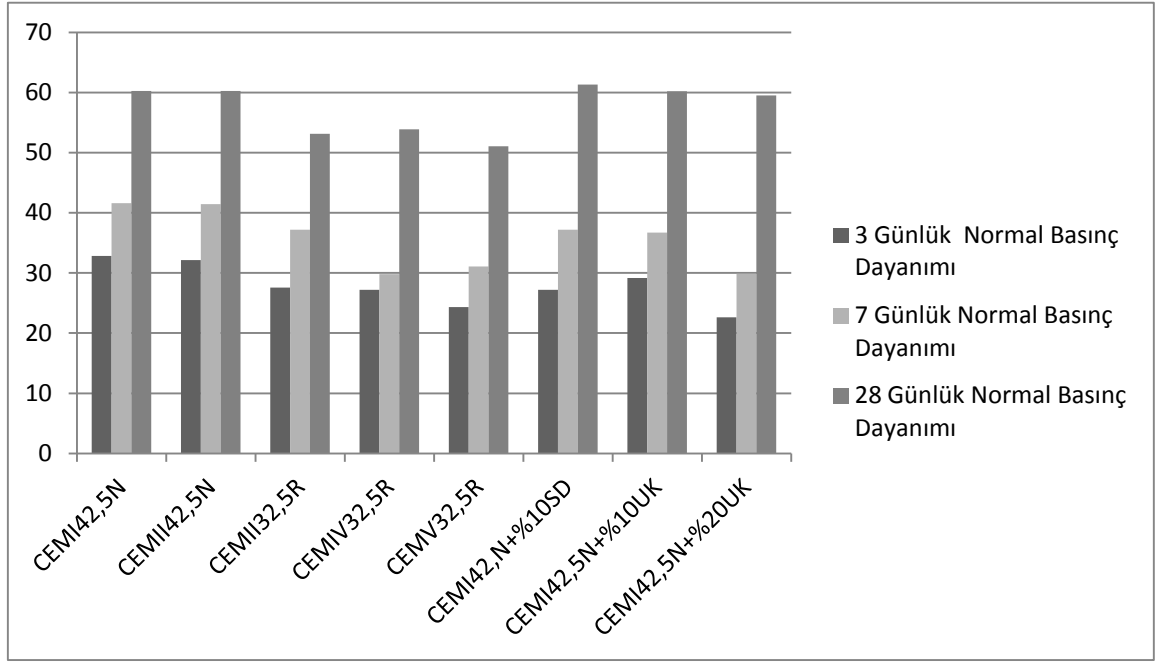
Karbonatlaşma öncesi tüm beton seriler 3, 7 ve 28 gün olmak üzere farklı kür sürelerine göre basınç dayanımlarına ayrı ayrı bakılmıştır.

Tablo 5.6.'da karbonatlaşmadan önce tüm beton serilerin farklı kür sürelerine göre basınç dayanımları ve Şekil 5.16'de tüm serilerin basınç dayanımları grafiksel olarak verilmiştir.

Tablo 5.6 Tüm Beton Serilerin Farklı Kür Sürelerine göre Basınç Dayanımları(MPa)

Tüm Seriler	3 Günlük Basınç Dayanımı	7 Günlük Basınç Dayanımı	28 Günlük Basınç Dayanımı
CEM I 42,5N	32,81	41,59	60,25
CEM II 42,5N	32,16	41,42	60,25
CEM II 32,5R	27,55	37,21	53,15
CEM IV 32,5R	27,19	29,78	53,87
CEM V 32,5R	24,31	31,10	51,04
CEM I 42,5N+%10SD	27,21	37,18	61,31
CEM I 42,5N+%10UK	29,14	36,72	60,20
CEM I 42,5N+%20UK	22,63	29,83	59,51

Karbonatlaşma öncesi basınç dayanımlarına baktığımızda 3 günlük kür sürelerini tamamlayan beton serilerde dayanımı en yüksek CEM I 42.5N ile CEM II 42.5N olmuştur. 7 günlük kür süresini tamamlayan beton serilerde ise basınç dayanımı en yüksek CEM I 42.5N ile CEM II 42.5N olmuştur. Fakat bu beton serilerin basınç dayanımlarına yakın olarak çıkan %10 SD ve %10 UK katkılı beton seriler olduğu kanıtlanmıştır. 28 günlük kür sürelerini tamamlayan beton serilerde ise basınç dayanımı en yüksek %10 SD ve %10 UK katkılı beton serilerdir. Bunun nedeni SD ve UK'nın çok ince bir malzeme olma özelliğine sahip olması ve boşluk oranlarını azaltarak dayanıma daha dayanıklı hale getirmesinden kaynaklıdır.

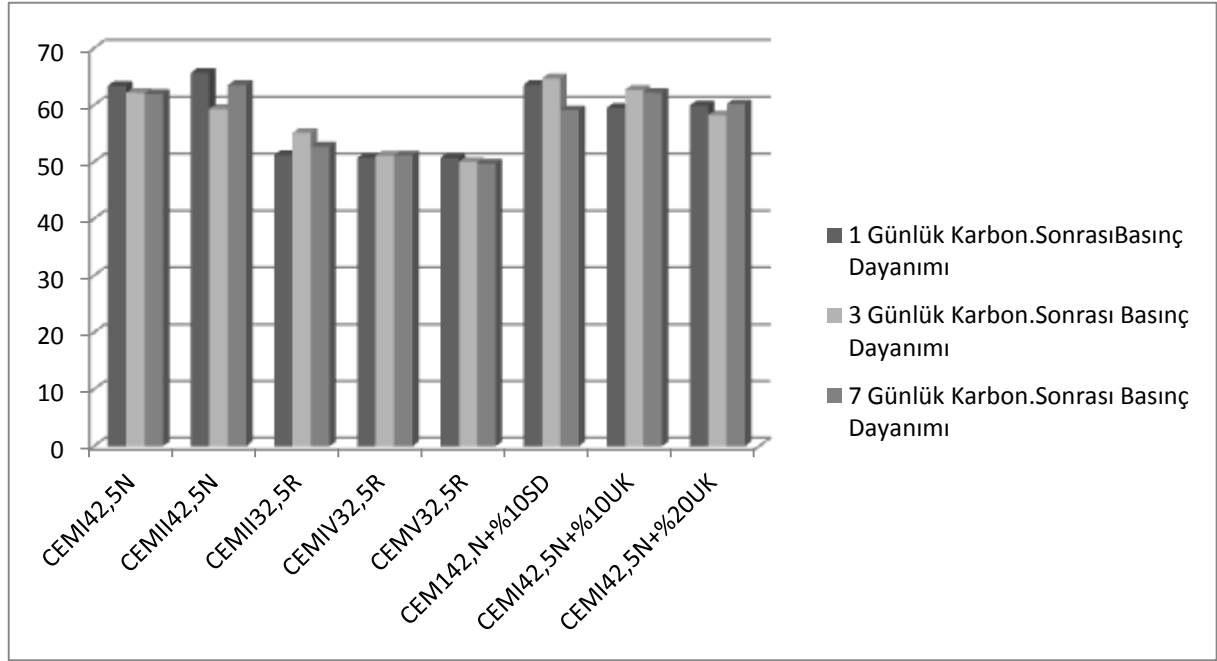


Şekil 5.16 Tüm Beton Serilerin Basınç Dayanımlarının Grafikselsel Gösterimi (MPa)

1, 3 ve 7 gün olmak üzere farklı zaman dilimlerinde karbonatlaşmaya uğrayan ve basınç dayanımlarına bakılan beton serilerin sonuç verileri Tablo 5.7' de ve Şekil 5.17'de verilmiştir.

Tablo 5.7 Tüm Serilerin Farklı Zaman Dilimlerine Göre Basınç Dayanımları (MPa)

Tüm Seriler	1 Günlük Karbonatlaşma Sonrası Basınç Dayanımı	3 Günlük Karbonatlaşma Sonrası Basınç Dayanımı	7 Günlük Karbonatlaşma Sonrası Basınç Dayanımı
CEM I 42,5N	63,36	62,17	61,99
CEM II 42,5N	65,67	59,32	63,55
CEM II 32,5R	51,22	55,14	52,69
CEM IV 32,5R	50,74	51,11	51,16
CEM V 32,5R	50,67	50,01	49,73
CEM I 42,N+%10SD	63,56	64,69	59,11
CEM I 42,5N+%10UK	59,48	62,69	62,17
CEM I 42,5N+%20UK	59,94	58,24	60,18



Şekil 5.17 Tüm Serilerin Farklı Zaman Dilimlerine Göre Basınç Dayanımlarının Grafikselsel Gösterimi (MPa)

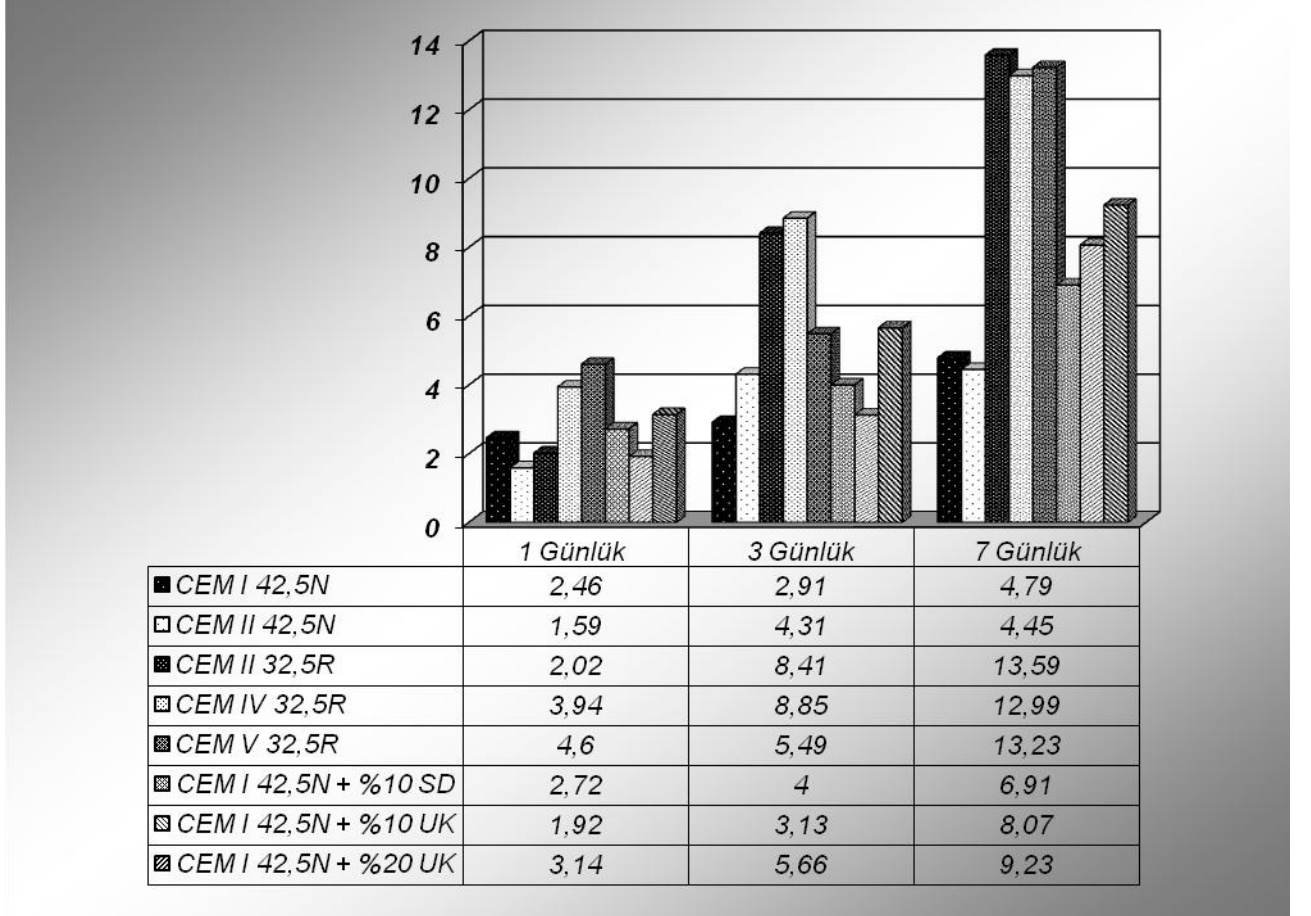
1 günlük karbonatlaşma sonrası basınç dayanımlarına bakılan beton serilerde basınç dayanımı en yüksek olan CEM I 42.5 N ve CEM II 42.5 N olmuştur. Ayrıca basınç dayanımı yüksek çıkan bu beton serilere eş değeri olan beton serisi ise SD katkıli beton serisi olmuştur.

3 günlük karbonatlaşma sonrası basınç dayanımına bakılan tüm beton serilerin basınç dayanımların karbonatlaşmaya karşı tepki gösteren ve dayanımı en yüksek çıkan beton seriler CEM I 42.5 N, CEM II 42.5 N, %10 SD katkıli ve %10 UK katkıli beton seriler olmuştur.

7 günlük karbonatlaşma sonrası basınç dayanımına bakılan tüm beton serilerde karbonatlaşmaya karşı tepki gösteren ve basınç dayanımlarında azalma olmayan beton seriler CEM I 42.5 N ve CEM II 42.5 N olmuştur. Bunun dışında %10 SD ve %10 UK katkıli beton serilerde CEM I 42.5 N ve CEM II 42.5 N'e eş değeri olarak bir tepki vermiştir ki bu durum basınç dayanımına karşı dayanıklılığını göstermiştir.

5.2.6. Karbonatlaşma Deney Sonuçları

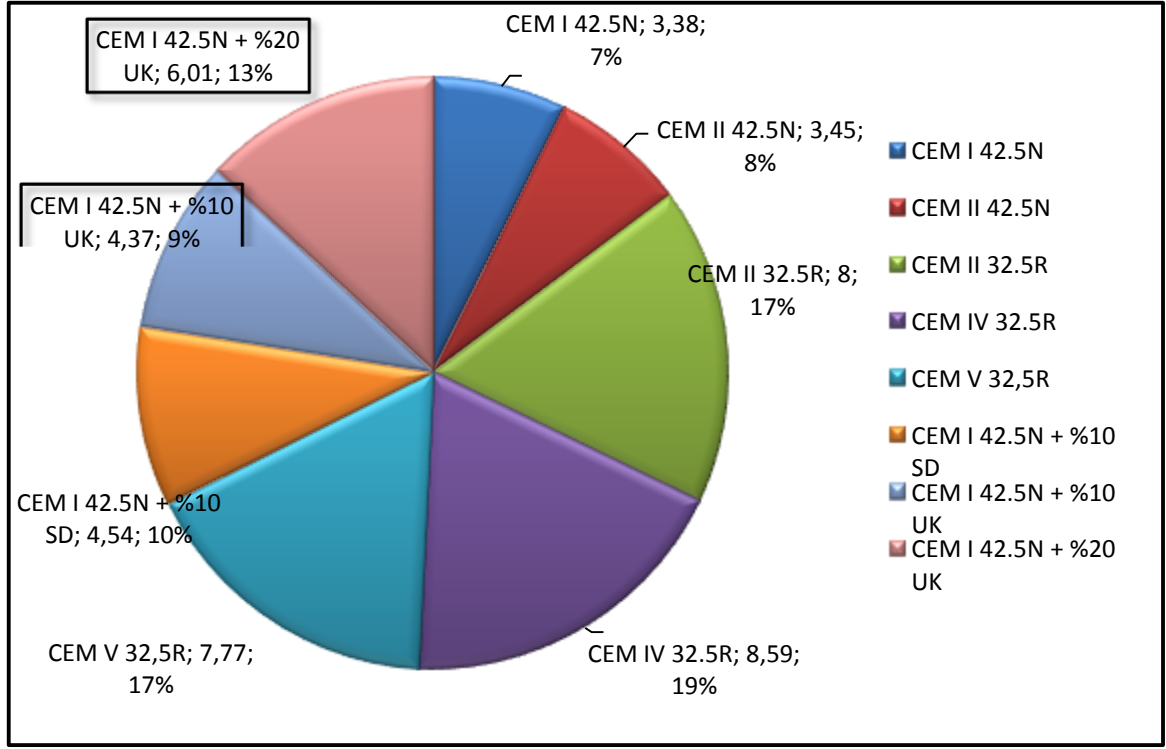
Tüm serilerin 1,3 ve 7 gün olmak üzere farklı zaman dilimlerinde karbonatlaşma derinliklerine bakılarak Şekil 5.18 oluşturulmuştur.



Şekil 5.18 Farklı Zaman Dilimlerine Göre Tüm Serilerin Karbonatlaşma Derinlikleri (mm)

Farklı zaman dilimlerine göre karbonatlaşma derinliklerine bakılan tüm serilerin karbonatlaşmaya karşı gösterdikleri tepkiler farklıdır. Genel olarak bakıldığında karbonatlaşma derinliği az olan yani karbonatlaşmaya karşı direnci en fazla gösteren beton seriler CEM I 42,5 N ve CEM II 42,5 tipi beton seriler olmuştur. SD ve UK katkıli beton serilerde karbonatlaşmaya karşı dirençleri yüksek olan beton serilerdir.

Şekil 5.19’da gösterildiği tüm beton serilerin karbonatlaşmadan etkilenme derinliklerinin ortalamaları ve yüzde oranları verilmiştir.



Şekil 5.19 Tüm Beton Serilerin Karbonatlaşmadan Etkilenme Oranlarının Yüzesel olarak Gösterimi

CEM I 42.5N ile CEM II 42.5N tipi çimentolarla yapılan beton serilerin karbonatlaşma derinlikleri ve yüzde oranlarına bakıldığında tüm beton seriler arasında karbonatlaşmadan en az etkilenen beton seriler olduğu görülmektedir.

SD ve UK katkılı beton serilerin de karbonatlaşma derinlikleri ve yüzde oranlarının da CEM I 42.5N ile CEM II 42.5N tipi çimentolarla yapılan beton serilerden sonra en düşük oranlara sahip olduğu görülmektedir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı tip çimentoların karbonatlaşmaya olan etkileri ve bu duruma verdiği tepkiler incelenmiştir. Bu tepkilerin, farklı tip çimentolarla üretilen beton serilerinin farklı özelliklere sahip olmasından kaynaklı olarak farklılık gösterdiği gözlenmiştir.

Yapılan incelemeler sonucunda, literatürde farklı tip çimentolarla ve katkı maddeleriyle yapılan beton serilerin karbonatlaşmaya etkisi üzerine bir çalışma incelenmemiş, farklı tip çimentoların karbonatlaşmaya karşı verdikleri tepkilerin farklılık gösterdiği gözlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sırasında elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- ✓ Farklı tip çimentolar ve katkı maddeleriyle oluşturulan beton serilerin karbonatlaşma derinlikleri farklılık göstermiştir.
- ✓ Tüm beton serilerin karbonatlaşma derinliklerinin farklı olmasının nedeni her bir serinin farklı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip olmasından kaynaklanmaktadır.
- ✓ Karbonatlaşma derinliği en az olan ve karbonatlaşmaya en fazla direnç gösteren CEM I 42.5N ve CEM II 42.5N tipi çimentolarla yapılan beton seriler olmuştur.
- ✓ %10SD ve %10UK katkılı beton serilerde karbonatlaşma derinliği ve gösterdiği direnç açısından hemen hemen CEM I 42.5N ve CEM II 42.5N tipi çimentolarla yapılan beton serilere yakın değerlerde izlenmiştir.
- ✓ Birim ağırlık deneyi tüm beton serilere uygulanarak karbonatlaşmaya uğramayan beton serilerle kıyaslanmıştır. Farklı kür sürelerine göre birim ağırlıklarına bakılan tüm serilerde birim ağırlığı en fazla olan numuneler CEM I 42,5 N ile CEM II 42,5 N olmuştur. Bunun nedeni bu tip çimentolarla yapılan beton serilerin kimyasal ve fiziksel özelliklerinin farklılık göstermesinin yanında yapılarındaki kalker miktarının fazla olmasıdır. Ayrıca karbonatlaşma sonrası yapılan birim ağırlık deneylerinde bu sonuç değişmemiştir.
- ✓ Karbonatlaşma öncesi ve sonrasında basınç dayanımı en yüksek olan CEM I 42.5N ve CEM II 42.5N tipi çimentolarla yapılan beton seriler olmuştur. Bunu yanı sıra

%10 SD ve %10 UK katkılı beton serilerin basınç dayanımları CEM I 42.5N ve CEM II 42.5N tipi çimentolarla yapılan beton serilere eş değer olarak incelenmiştir.

- ✓ Karbonatlaşmadan önce ve sonra olmak üzere iki şekilde kapilarite deneyi uygulanmıştır. Karbonatlaşma sonrası tüm beton serilerin kapilaritesi düşmüştür.
- ✓ Karbonatlaşma öncesi 28 günlük kür sürelerini tamamlayan numunelerin porozite oranlarına bakılmıştır. CEM I 42.5 N ve CEM II 42.5 N tipi çimentolarla yapılan numunelerin porozite oranları düşük çıkmıştır. SD katkılı beton serilerin boşluk oranları da CEM I 42.5 N ile CEM II 42.5 N tipi çimentoların gösterdikleri performanslara eş değer olarak kabul edilmektedir.
- ✓ Genel olarak bakıldığında, karbonatlaşma öncesi ve sonrasında tüm beton serilerde uygulanan tüm deneylerde en çok direnç gösteren CEM I 42.5 N ve CEM II 42.5 N tipi çimentolarla yapılan beton seriler olmuştur.
- ✓ SD ve UK katkılı beton serilerde karbonatlaşma öncesi ve sonrasında deneylere gösterdikleri performansları açısından CEM I 42.5 N ve CEM II 42.5 N tipi çimentolarla yapılan beton serilere eş değer olarak bulunmuştur.
- ✓ Karbonatlaşmaya uğrayan tüm beton serilerde gün sayısı arttıkça karbonatlaşma derinliği de artmaktadır.
- ✓ Tüm beton seriler üzerinde uygulanan deney çalışmalarımızda çimento inceliğinin önemi ortaya çıkmıştır.

6.2. Öneriler

- ✓ Tüm beton serilerde gün sayısı arttıkça karbonatlaşma derinliği artış gösterdiği için zaman faktörü çok önem taşımaktadır.
- ✓ Hızlandırılmış karbonatlaşma deney düzenekleri hazırlandıktan sonra deneye maruz bırakılacak numunelerin özelliklerine göre hangi zaman dilimlerinde bakılacağı araştırılmalıdır.
- ✓ Özellikle hazırlanan düzeneğe ve numunelere göre karbonatlaşmanın ne zaman ölçülebilir değere geldiği, yavaşlamaya başladığı ve durduğu zaman iyi bilinmelidir.

KAYNAKLAR

- [1] **Gönen, T., Yazıcıoğlu, S., (2003)**, Betonlarda Karbonatlaşma ve Etkinlik Dereceleri, Standart Ekonomik ve Teknik Dergi, 497, ss.8488
- [2] **Gönen, T., Yazıcıoğlu,s.,(2004)**, “Farklı Nem Ortamlarındaki Betonlarda Karbonatlaşma Gelişimi, F.Ü.FEN ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 367-373.
- [3] **Subaşı ve Arslan,(2008)**, Kalıp Yüzey Özelliklerinin Betonun Karbonatlaşması Üzerine Etkileri cilt 23, No 4, 913-921.
- [4] **De Ceukelaire, L., and Van Nieuwenburg, D., (1992)**, Accelerated Carbonation of A Blast Furnace Cement Concrete, Cement and Concrete Research, 23,443-452.
- [5] **Yılmaz, A. B., (1994)**, Bazı İyonların Beton Dayanımı ve Beton Çeliği Üzerine Etkileri, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Anabilim Dalı, Adana, 11, 20, 23, 26-38.
- [6] **Castro, P., Sanjuan M.A., Genesca, J., (1999)**, Carbonation of Concretes in The Mexican Gulf, Budding and Environment, vol. 35, (2000), 145-149
- [7] **Al-Khaiat, H., Haque, M. N., (1997)**, Carbonation of Some Coastal Concrete Structures in Kuwait, ACI Materials Journal, Vol. 94-6, pp 602-607
- [8] **Parrott, L.J., Killoh, DC, (1989)**, Carbonation in a 36 Year Old, İn-Situ Concrete, Cement and Concrete Research, 19,649-656.
- [9] **Roy, S.K., Poh, K.B., Northwood, D.O., (1996)**, The Carbonation of Concrete structures in The Tropical environment of Singapore and a Comparison with Published data for Temperate Climates, Magazine of Concrete Research, 48,293-300.
- [10] **Cebeci, E., (1988)**, Betonda Karbonatlaşma, Yük. Us. Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Ens., İstanbul, 13-32,75-83.
- [11] **Johnson, D.C., (2000)**, Accelerated Carbonation of Waste Calcium Silicate Materials, SCI Lecture Papers Series LPS: 108/2000, London,
- [12] **KobayasM, K., Uno, Y., (1990)**, influence of Alkali on Carbonation of Concrete, Part 2-influence of Alkali in Cement on Rate of Carbonation of Concrete, Cement and Concrete Research, 20,619-622
- [13] **Atiş, CD., (2002)**, Accelerated Carbonation and Testing of Concrete Made with Fly Àsh, Construction and Building Materials (yayında), kabul tarihi 25 ekim 2002.

- [14] **Ramyar, K., (1993)**, Uçucu Küllerin Çimento Harcının Büzülmesine ve Betonun Karbonatlaşmasına Olan Etkileri, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB Ankara Şubesi, 133-147.
- [15] **Loo, Y.H., Chin, M.S., Tam, C.T., Ong, K.C.G., (1994)**, A Carbonation Prediction Model For Accelerated Carbonation Testing of Concrete, Magazine of Concrete Research, No:168,191-200.
- [16] **Jiang, L., Lin, B., Cai, Y, (2000)**, A Model For Predicting Carbonation of High-Volume Fly Ash Concrete, Cement And Concrete Research, 30,699-702.
- [17] **TS EN 206-1, (2002)**, Beton- Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 68s.
- [18] **Yeğınobalı, A., (1997)**, Hafif Beton ve Yüksek Dayanımlı Hafif Beton, Çimento ve Beton Dünyası, Yıl 2, Sayı 18, 20-30.
- [19] **TS EN 197-1, (2002)**, Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 25s.
- [20] **Osman Şimşek (2003)**, Yapı Malzemesi-II, Yayın No:1374, ss:25-26
- [21] **TS 706 EN 12620, (2003)**, Beton Agregaları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 46s.
- [22] **Erdoğan, T.Y., (2003)**, Beton, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 741s.
- [23] **Şimşek, O., (2000)** Yapı Malzemesi-II, Beta Yayınevi, İstanbul, 211s.
- [24] **ACI Committee 116, (116R-90)**, “Cement and Concrete Terminology,” ACI Manual of Concrete Practice, Part I, 1994.
- [25] **Erdoğan, T.Y., (2003)**, Beton, ODTÜ Yayıncılık, Ankara, 135s.
- [26] **Xiao , J., Li, J., Zhu, B., Fan, Z., (2001)**, Experimental Study an Strength and Ductility of Carbonated Concrete Elements, Constrution and Building Materials, 16,187-192.
- [27] **Lindvall A., (1999)**, Enviromental Actions **and** Response Survey, inspection **and** Measurement, The European Community Brite Euram Project BE95-1347 Working Report, 9-13.
- [28] **Tokyay, M., (1997)**, Agresif Ortamlarda Çimentolu Sistemler Çimento ve Beton Dünyası, Sayı:8, 13-15.
- [29] **] Neville, A.,M., (1981)**, Properties of Concrete (3th ed) New York; Longman Scientific and Tecnical, 15,16,392

- [30] **Yazıcı, H., (1997)**, Accelerated Carbonation Test of Concrete, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [31] **Cebeci, E., (1988)**, Betonda Karbonatlaşma Yüksek Lisans Tezi İ.T.Ü , Fen Bil. Ens. , İstanbul, 13-32, 75-83
- [32] **Erdoğan T.,Y., (1995)**, Betonun Oluşturan Malzemeler; Agregalar T.H.B.B., Ankara.
- [33] **T., Gönen (2003)**, Betonda Sıkıştırma Faktörünün Karbonatlaşmaya Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [34] **Bilodeau, A., and Malhotra, V. M., (1998)**, High Volume Fly Ash System: The Concrete Solution For Sustainable Development, For Presentation at The Three-Day CANMET/ACI International Symposium, Canada, MTL:98-22.
- [35] **Akman, M.,S., (1997)**, Betonlarda karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon süreçleri Türkiye, İnşaat Mühendisliği, 14. Teknik Kongresi, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi Yayın No:26
- [36] **Erdoğan, T.,Y., (1995)**, Betonun Oluşturan Malzemeler; Karışım ve Bakım Suları T.H.B.B, Ankara
- [37] **TS 3440, (1982)**, Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [38] **De Ceukelaire, L.,(1992)**, Van Nieuwenburg, D. Accelerated Carbonation of A. Blast Furnace Cement Concrete, Cement and Concrete Research, 23,444,452.
- [39] **Baradan, B., Yazıcı H.,Ün. H.,(2002)**, Betonarme Yapılarda Kalıcılık Durabilite, D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No:298.
- [40] **Akman, M.,S.,(1992)**, Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Baskı Atölyesi; Yayın No:1481,27,175.
- [41] **Chi, M.,J., Huang R.,Yongc C., (2002)**, Effects of Carbonation on Mechanical Properties and Durability of Concrete Using Accelerated Testing Method, Journal of Marine Science on Technology, Vol; No:1 , 14-20
- [42] **Liu., Y., (1996)**, Modeling The Time-to Corrosion Cracking of the cover Concrete in Chloride Contaminated Reinforcement Concrete Structures, Dissertation Submitted, Virginia Polytechnic Institute and State University, 14,20.
- [43] **Gianetti, F., Akman, M.,S.,**"Betonarmenin Dayanıklılığını Geliştirmek üzere Korozyon İnhibitörü olarak Kalsiyum Nitrit Kullanımı",IV. Korozyon Sempozyumu, Korozyon Derneği Yayını, İstanbul Teknik Üniversitesi, 1994, ss.107-114.

- [44] **Akman, M.S.**, “Yapı Malzemeleri”, İstanbul Teknik Üniversitesi 1336 Sayılı Yayın, 1987,ss.8,62.
- [45] **Erdoğan T.Y. 2007.** ”BETON”. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık Ve İletişim A.Ş. Genişletilmiş 2. Baskı. Ankara.
- [46] **Karahan, O., 2006.** Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Doktora Tezi. Adana.
- [47] **Akçaözoğlu, K., 2007.** Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değişiminin Basınç Dayanımı Ve Birim Kısalma Üzerindeki Etkisi. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Adana.
- [48] **Yeğınobalı A., 1993.** Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildirileri, s.149–167. Ankara.
- [49] **TÇMB, 2002,** ‘Alkali- Silika Reaksiyonunun Mineral ve Kimyasal Katkılar Yardımı İle Kontrol Altına Alınması, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 33,45 s. İzmir.
- [50] **Erdoğmuş, E., 2006.** Çimentoya Bor Katkısı, Uçucu Kül, Yüksek Fırın Cürufu İlavesiyle Özelliklerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İstanbul.
- [51] **Mehta, P.K., Montein, re, P.J.M. 1997.** “Concrete Microstructure, Properties and Materials Indian Edition, İndia
- [52] **Tasdemir, C.,** “Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete”, Cement and Concrete Research, 33 1637-1642, 2003
- [53] **Bahar DEMİREL, Tahir GÖNEN,** Karbon Fiber Takviyeli Betonda Farklı Fiber Boyunun Kapileriteye Etkisi, F.Ü. DAUM Dergisi, 6 (1) 2007 12-15.
- [54] **Jacobsen, S., Sxther, D.H., and Sellevold, E.J.,** “Frost testing of high strenght concrete: frost/salt scalling at different cooling rates”, Materials and struct. 30;33-42, 1990.
- [55] **Mazloom, M., Ramezianpour, A.A., Brooks, J.J.,** Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of High-Strength Concrete, Cement And Concrete Composites No.26, pp. 347-357, 2004.
- [56] **ASTM C 597, 1994.** Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete, Annual Book of ASTM Standarts.

- [57] **TS EN 12390-3, (2003)**, Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleleri-Bölüm 3: Deneyle Numunelerinde Basınç Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 12s.
- [58] **S. Subaşı, (2005)**, “Farklı Yüzey Astarları ile Kaplanmış Drenaj Özelliği Bulunan Kalıpların Betonun Bazı Fiziksel özelliklerine Etkileri”, Doktora Tezi, Gazi ün., Fen Bilimleri Enst., Ankara.
- [59] **İ. B. Topçu, (2006)**, “Yapı Malzemeleri ve Beton Deneyleleri El Kitabı”, Eskişehir.
- [60] Ramezaniyanpour AA., Properties and Durability of Pozzolanic Cement Mortars and Concretes, PhD Thesis, Civil Engineering Department, The University of Leeds, UK, 1987.
- [61] Claisse PA., The Properties and Performance of High Strength Silica Fume Concrete . PhD Thesis, The University of Leeds, UK, 1998.
- [62] Paillere AM, Raverdy M, Grimaldi G., Carbonation of Concrete with Low-Calcium Fly Ash and Granulated Blast Furnace Slag: Influence of Air-Entraining Agents and Freezing and Thawing Cycles, Proceedings of ACI Canmet Second International Conference on Fly Ash, Silica Fume , Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Spain, Madrid; SP-91, pp541,562,1986.

ÖZGEÇMİŞ

1985 yılında Malatya’da doğdu, ilk, orta ve lise tahsilini Malatya’da tamamladıktan sonra 2004 yılında Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Ressamlığı Öğretmenliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 4 yıllık lisans eğitiminden sonra 2008 yılında mezun oldu. 2009 yılında Yapı Eğitimi Bölümünde Yüksek Lisansa başladı. Evli olan Şaziye Özer halen Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümünde Yüksek Lisansa devam etmektedir.