

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

134753

**BETONDA SIKIŞTIRMA FAKTÖRÜNÜN
KARBONATLAŞMAYA ETKİSİ**

Tahir GÖNEN

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BİLİMSEL ARAŞTIRMA MERKEZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

134753

ELAZIĞ 2003

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BETONDA SIKIŞTIRMA FAKTÖRÜNÜN
KARBONATLAŞMAYA ETKİSİ**

Tahir GÖNEN

YÜKSEK LİSANS TEZİ
YAPI EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

Bu tez 27.08.2003 tarihinde, aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği / ~~çokluğu~~ ile başarılı / ~~başarılı~~ olarak değerlendirilmiştir.

Jüri Başkanı: Prof.Dr. Ali Sayıl ERDOĞAN

Jüri Üyesi: Yrd. Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU

Jüri Üyesi: Yrd. Doç. Dr. Servet YILDIZ

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 03/09/2003 tarih ve 13/5 sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tezin önerilmesi, yönlendirilmesi ve tamamlanmasında benden her türlü yardımını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Salih YAZICIOĞLU'na, deney düzeneğinin oluşturulmasında yardımlarından dolayı Makine Eğitimi Bölümü Hocalarından Sayın Yrd. Doç Dr. Vedat SAVAŞ'a ve çalışmalarım süresince desteğini eksik etmeyen Yapı Eğitimi Bölümü araştırma görevlisi Sayın ERDİNÇ ARICI'ya teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	III
TABLolar LİSTESİ	V
ÖZET	VI
ABSTRACT	VII
1. GİRİŞ	1
2. BETONDA KARBONATLAŞMA	4
2.1. Karbonatlaşmanın Oluşumu ve Gelişimi	4
2.1.1. Betonun boşluk yapısı	4
2.1.2. Portland çimentosu	5
2.1.3. Karbonatlaşmanın kimyasal gelişimi	6
2.2. Karbonatlaşmaya Esas Parametrelerin İncelenmesi	8
2.2.1. Çimento	8
2.2.2. Agrega	10
2.2.3. Su	11
2.2.4. Ortam koşulları	13
2.2.5. Hava sürükleyici katkılar	16
2.2.6. Yüksek fırın cürufu	18
2.2.7. Puzolanlar	19
2.3. Karbonatlaşmayı Belirleme Teknikleri	20
2.3.1. İndikatörler	21
2.3.2. X ışınları difraktometre cihazı	21
2.3.3. Termal analiz	22
2.3.4. Taramalı elektron mikroskobu	23
2.4. Karbonatlaşmanın Betonda Etkileri	23
2.4.1. Karbonatlaşma rötresi	23
2.4.2. Beton dayanımı	24
2.4.3. Donatının korozyonu	25
2.5. Karbonatlaşmayı ve Zararlı Etkilerini Azaltma	28
2.5.1. Çimento cinsi ve dozajı	28

2.5.2. Su/çimento oranı	28
2.5.3. Beton dökümü ve kürü	29
2.5.4. Yeniden alkalinizasyon	29
2.5.5. Beton rutubeti	30
3. KARBONATLAŞMA İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	31
3.1. Çevresel Etkiler	31
3.2. Kompozisyonel Etkiler	35
3.3. Teoriksel Çalışmalar	37
4. DENEYSEL ÇALIŞMA	39
4.1. Karışım Elemanları	39
4.1.1. Çimento	39
4.1.2. Agregası	39
4.1.3. Seriler ve özellikleri	40
4.2. Deney Düzenek ve Hazırlığı	40
4.3. Deneyler	43
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	48
KAYNAKLAR	49
ÖZGEÇMİŞ	54

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Karbonatlaşma-Korozyon İlişkisi	2
Şekil 2.1. Sertleşmiş Betondaki Boşluklar ve Göreceli Büyüklükleri	4
Şekil 2.2. Karbonatlaşmanın Beton İçinde İlerleme Şekilleri	5
Şekil 2.3. Çimento Miktarı-Karbonatlaşma İlişkisi	9
Şekil 2.4. Çimento Tipinin Karbonatlaşmaya Etkisi	9
Şekil 2.5. Ağırlıkça 1:3 (Çimento:Kum) Oranındaki Harçlarda S/Ç-Karbonatlaşma İlişkisi	12
Şekil 2.6. Deniz Etkisindeki Bir Yapı ile Çevre Arasındaki Etkileşim	13
Şekil 2.7. Bağlı Nem ile Karbonatlaşma Derinliği İlişkisi	14
Şekil 2.8. Değişik Kür Koşullarına Sahip Uçucu Küllü Betonların Karbonatlaşma Derinlikleri	15
Şekil 2.9. Hava Katkısı İle Mukavemet İlişkisi	16
Şekil 2.10. Hava Katkısına Bağlı Yoğunluk ile Betondaki Boşlukların İlişkisi	17
Şekil 2.11. Beton Türleri Arasındaki Karbonatlaşma İlişkisi	17
Şekil 2.12. Phenolphtalein Püskürtülmüş Beton Yüzeyi	21
Şekil 2.13. X-ışını Difraksiyonu Analizi	22
Şekil 2.14. Elektron Mikroskobu İle Görüntüsü Alınmış Beton Kesiti	23
Şekil 2.15. Karbonatlaşma Rötresi ile S/Ç İlişkisi	24
Şekil 2.16. Korozyonun Sistematik İlerleyişi	26
Şekil 3.1. Bağlı Nem ile Karbonatlaşma İlişkisi	31
Şekil 3.2. Denizden 50 M, 100 M Ve 780 M Uzaklıktaki Betonlarda, 1, 3 Ve 7 Günlük Kür Sürelerinin Ve Basınç Dayanımlarının Karbonatlaşma Sabitine Etkisi	33
Şekil 4.1. Maksimum Tane Çapı 8 Mm'lik Agrega'nın Granülometri Eğrisi	40
Şekil 4.2.a. Hızlandırılmış Karbonatlaşma Tankı Enine Kesiti	41
Şekil 4.3.a. Hızlandırılmış Karbonatlaşma Tankı Enine Kesiti	42
Şekil 4.3. Sıcaklık, Nem ve Tuz İlişkisi	43
Şekil 4.5. Karbonatlaşma Derinliklerinin Ölçümü	44
Şekil 4.6. %35 Bağlı Nemde Karbonatlaşma Derinlikleri	44
Şekil 4.7. %55 Bağlı Nemde Karbonatlaşma Derinlikleri	45
Şekil 4.8. %80 Bağlı Nemde Karbonatlaşma Derinlikleri	45
Şekil 4.9. I. Serinin Farklı Nem Oranlarındaki Karbonatlaşma Derinlikleri	46
Şekil 4.10. II. Serinin Farklı Nem Oranlarındaki Karbonatlaşma Derinlikleri	47
Şekil 4.11. III. Serinin Farklı Nem Oranlarındaki Karbonatlaşma Derinlikleri	47
Şekil 4.12. IV. Serinin Farklı Nem Oranlarındaki Karbonatlaşma Derinlikleri	47

ÇİZELGELER (TABLOLAR) LİSTESİ

Tablo 2.1. Portland Çimentosu Bileşimleri	5
Tablo 2.2. Beton İçin Zararlı Kimyasal Etki Yapan İyon ve Ortamlar İçin Sınır Değerler	11
Tablo 2.3. Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Kompozisyonu %	18
Tablo 2.4. Devamsız Kapiler Boşluk Sistemi Yaratmak İçin Gerekli Kür Süreleri	29
Tablo 3.1. Bağlı Nem ile Karbonatlaşma İlişkisi	31
Tablo 3.2. Singapurdaki Binaların, Yaş ve Basınç Dayanımlarına Göre Karbonatlaşma Derinlikleri	34
Tablo 3.3. Uçucu Küllü Betonlarda %65 Nem ve 20 °C'de Kür Süresinin Hızlandırılmış Karbonatlaşma Derinliğine Etkisi	36
Tablo 3.4. Uçucu Küllü Betonlarda %100 Nem ve 20 °C'de Kür Süresinin Hızlandırılmış Karbonatlaşma Derinliğine Etkisi	36
Tablo 3.5. Beton Karışımlarının Özellikleri	38
Tablo 3.6. Karbonatlaşma Derinliklerinin Deneysel Veriler ve Modelle Kıyaslanması	38
Tablo 4.1. Çimentonun Fiziksel ve Kimyasal Analizleri	39
Tablo 4.2. Beton Üretiminde Kullanılan Ayrıştırıcının Özellikleri	39
Tablo 4.3. Maksimum Tane Çapı 8 mm'lik Agreganın Granülometrisi	39
Tablo 4.4. Seriler ve Özellikleri	40
Tablo 4.5. 100 gr Su'da Değişik Sıcaklıklardaki Doymuş Tuz Çözeltileri	43
Tablo 4.7. Serilerin Karbonatlaşma Derinlikleri ve % Değişimleri	46

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BETONDA SIKIŞTIRMA FAKTÖRÜNÜN KARBONATLAŞMAYA ETKİSİ

Tahir GÖNEN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Yapı Eğitimi Anabilim Dalı

2003, sayfa: 54

Karbonatlaşma atmosferdeki karbondioksit ile betonun boşluk suyunda bulunan kalsiyum hidroksitin reaksiyonu olarak tanımlanmaktadır. Betonarme betonunun içine gömülü olan çelik betona büyük ölçüde alkalın özelliği veren boşluk suyundaki kalsiyum hidroksit tarafından korozyondan korunur. Karbonatlaşmanın sonucu betonun alkalın özelliği kaybolur ve çelik paslanır. Bu olay betonarme elemanların servis ömrünü belirleyen ana faktörlerden biri olarak kabul edilir.

Bu çalışmada betondaki karbonatlaşma hızına sıkıştırma faktörünün etkisi araştırılmıştır. Karbonatlaşma süreci çok uzun yıllar aldığından testler için hızlandırılmış yöntem seçilmiştir. Bu amaçla hızlandırılmış karbonatlaşma testi için hava geçirimsiz bir kabin geliştirilmiştir. Deneylerde farklı sıkıştırma oranlarına sahip betonlar kullanılarak numuneler üç seri olarak hazırlanmıştır. Karbonatlaşma derinlikleri farklı zaman periyodlarında %1 etil alkolde hazırlanan fenolfitaleyn çözeltisi ile ölçülmüştür. Ayrıca sıkıştırma oranları ile karbonatlaşma derinlikleri arasındaki ilişkiyi desteklemek ve aralarında kıyaslama yapmak amacıyla numuneler farklı nem oranlarında (%35, %55, %80) %10 karbondioksitli ortama bırakılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karbonatlaşma, Beton, Sıkıştırma faktörü

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

ABSTRACT

Master Thesis

EFFECT ON CARBONATION OF COMPACTING FACTOR IN CONCRETE

Tahir GÖNEN

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Construction Education

2003, Page: 54

The carbonation is defined as the reaction of calcium hydroxide in the pore water of concrete with carbondioxide in atmosphere. Embedded steel in reinforced concrete members is protected from corrosion by alkaline composition of concrete which is provided mainly by the dissolution in the pore water of the calcium hydroxide. Alkaline property of concrete is lost as a result of carbonation and steel rusts. This phenomenon is accepted as one of the main factors determining the service life of the reinforced concrete members.

In this study the influence of compaction factor on the rate of carbonation in concrete was investigated. Because the process of carbonation is actually a long-term process, accelerated method was chosen for tests. For this reason, an air-tight cabin was developed for accelerated carbonation test. Concretes having different compact ratios was used and specimens were prepared as three series. Carbonation depths were measured with phenolphthalein which was prepared with %1 ethanol in different times. Furthermore specimens were exposed %10 carbondioxide in different humidity ratio (%35, 55, 80) in order to relate and support the compaction ratio and carbonation depth.

Key Words: Carbonation, Concrete, Compacting factor

1. GİRİŞ

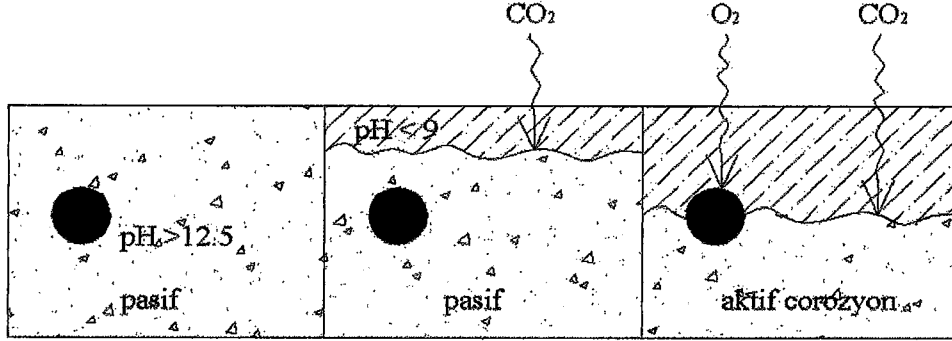
Beton diğer yapı malzemelerine göre; kolay şekil verilmesi, ekonomik olması ve dayanıklı olmasından dolayı en çok kullanılan yapı malzemelerinden biridir. Çevremize baktığımızda, binalar, köprüler, yollar, barajlar, tüneller, havaalanları gibi hayatı direkt olarak etkileyen yerlerin büyük çoğunluğu betondan yapılmıştır. Betondan yakın zamana kadar sadece mukavemetinin yüksek olması istenirdi. Dayanımı yüksek olan beton iyi beton olarak nitelendirilirdi. Son yıllarda ise bu anlayış biraz olsun değişmiştir. Artık betonun dayanımının yanında durabilitesi yani her türlü zararlı dış etkilere karşı dayanıklılığı da istenmektedir.

Betonun özelliklerindeki değişim, karıştırma, dökme, ilk bakım ve servis (kullanım) diye dört kısma ayrılabilir. Bu safhaların her birinin kendine özgü önemli ve hassas kriterleri vardır ki bu dört kısımdaki kriterler kullanım süresinin uzunluğunu direkt etkileyebilmektedir. Karıştırma işleminde karışıma giren malzeme özelliklerinden karıştırma süresine kadar pek çok değişken betonun dayanımını ve dayanıklılığını etkiler. Döküm sırasında ise betonun kalıba döküm mesafesi, sıkıştırma tekniği ve süresi gibi kriterler ilk akla gelenlerdir. İlk bakım sürecindeki kür şartları ve süresi betonun ileriki yıllardaki kullanım süresi üzerinde etkisi çok büyük olabilmektedir. Beton yerleştirilip döküldükten sonra bile zamanla dış etkilere maruz kalması sonucunda ortam şartlarına göre kendi iç yapısında önemli değişimler meydana gelebilir. Bu değişimlerden biri karbonatlaşmadır.

Karbonatlaşma için literatürlerde birbirine yakın tanımlar yapılmıştır. Çimento şerbeti, harç, betondaki kalsiyum hidroksitli veya kalsiyum oksitli bileşikler ile karbondioksitin kalsiyum karbonatı meydana getiren reaksiyonuna karbonatlaşma denilmektedir [1]. Daha sade bir tanım yapmak istenirse; karbonatlaşma: havadaki serbest durumda bulunan karbondioksitin nemli ortamlarda, hidrate olmuş çimento ile reaksiyona girmesidir [2]. Betonun boşluk suyunda bulunan kalsiyum hidroksitler ile atmosferdeki karbondioksitin reaksiyona girmesiyle oluşan fiziko-kimyasal bir süreç olarak da karbonatlaşma tanımlanabilir.

Betonun karbonatlaşması ile karbonatlaşan bölgedeki donatı korozyona açık hale gelmektedir. Yani bir nevi betonu koruyan alkalın özelliğe sahip beton kütlesi bu özelliğini yitirerek donatının paslanmasına müsait bir ortam yaratmaktadır (Şekil 1.1). Donatının korozyonu ise beton ile donatı arasındaki aderansın zayıflamasına betonun dayanımının düşmesine neden olmaktadır. Son yaşanan depremlerde özellikle Marmara Depreminde binaların bodrum katlarındaki betonarme elemanlar buna örnek olarak gösterilebilir. Deprem anında betonarmenin vazgeçilmez iki elemanı olan beton ve çelik donatının arasındaki aderansın kaybolmasından dolayı birlikte çalışamayarak yıkımın hem ani hem de daha fazla

olmasına neden olmuşlardır. Bu yüzden karbonatlaşma olayı betonun dayanıklılığı üzerinde önemli rol oynamaktadır.



Şekil 1.1 Karbonatlaşma-Korozyon İlişkisi [3]

Tüm dünya ortalamasına bakıldığında, toplam ulusal gelirin %1,25’lik bölümü beton yapıların dayanıklılık sorunları nedeniyle boşa harcanmaktadır. Türkiye’deki payı ise henüz bilinmemektedir. Ulusal gelirin %1,25 gibi önemli bir kısmının betonun dayanımı için harcandığı düşünülürse bu konunun da üzerinde titizlikle durulması gerektiği anlaşılmaktadır. Çeliğin, karbonatlaşmadan çok fazla etkilendiği bilinmektedir. Karbonatlaşmanın maksimum hangi değere çıkabileceğinin bilinmesi pas payının seçimi konusunda yol gösterebilir.

Karbonatlaşma olayı, karbondioksitin %0,03 konsantrasyonunun bulunduğu temiz bir havada dahi meydana gelebilir. Büyük kentlerde ise bu oranın %0,3-1,0 olduğu düşünüldüğünde, sorunun sanayileşmiş kentlerde daha büyük boyutlu olduğu görülür [2]. Türkiye’de meydana gelen 18 Ağustos 2000 depremi ile önemi bir kat daha artan betondaki karbonatlaşma ve karbonatlaşmanın neden olduğu korozyonun tüm özelliklerinin bilinmesi kaçınılmaz olmaktadır.

Durability’yi etkileyen tüm parametreler betonun karbonatlaşmasında da rol oynamaktadır. Bu parametrelerden biri de betonun boşluk yapısı ve miktarıdır. Betonun döküm aşamasında bulunmakta olan sıkıştırma ve yerleştirme işlemi betonun boşluk yapısını ve miktarını önemli derecede etkileyebilmektedir. Tekniğine uygun sıkıştırma ve yerleştirme yapılmayan bir beton her türlü zararlı dış etkilere açıktır. Bu bağlamda betondaki sıkıştırma faktörünün karbonatlaşmayı ne derecede etkilediğinin araştırılması önem kazanmaktadır.

Sonuç olarak karbonatlaşma olayını betonun bileşimine giren malzemeler ile uygulama teknikleri açısından bir çok faktör etkileyebilmektedir. Genel olarak çalışmalar beton bileşimine giren malzemeler üzerinedir. Uygulama teknikleri açısından incelemelere hemen hemen hiç rastlanılmamıştır.

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 etkilediği yönündeki araştırmalar hızlandırılmış karbonatlaşma test tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Normal ortamdaki karbonatlaşma ise genelde o bölgenin ikliminin yıllara bağlı olarak karbonatlaşmaya etkisinin incelenmesinde kullanılmaktadır. Deney sonuçlarının daha çabuk elde edilmesi amacıyla bu çalışmada da hızlandırılmış karbonatlaşma test metodu kullanılmıştır. 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. Hızlandırılmış karbonatlaşma test metoduna dair herhangi bir standarda rastlanılmamış fakat genel olarak yapılmış olan çalışmalarda ortam karbondioksitinin %4 ile %100 arasında değişik oranlarda yer aldığı gözlemlenmiştir.

Bu tez çalışmasında özellikle betonun döküm aşamasındaki sıkıştırma ve yerleştirme kriterleri incelenmiştir. Sıkıştırma kriteri incelenirken betonun bulunduğu ortamdaki bağıl nem seviyelerinin oranları değiştirilerek sıkıştırma kriterleri arasındaki farklılığın birbirine paralel olup olmadığı da kontrol edilecektir. Sıkıştırma faktörünün yanı sıra karbonatlaşmayı etkileyen diğer faktörler, incelenmiş olan çalışmalardan aktarılacaktır. Çalışmanın amacına kısa sürede ulaşabilmek amacıyla hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi yapılmıştır. Bu çalışmada karbondioksit oranı %40 olarak seçilmiştir.

2. BETONDA KARBONATLAŞMA

2.1. Karbonatlaşmanın Oluşumu ve Gelişimi

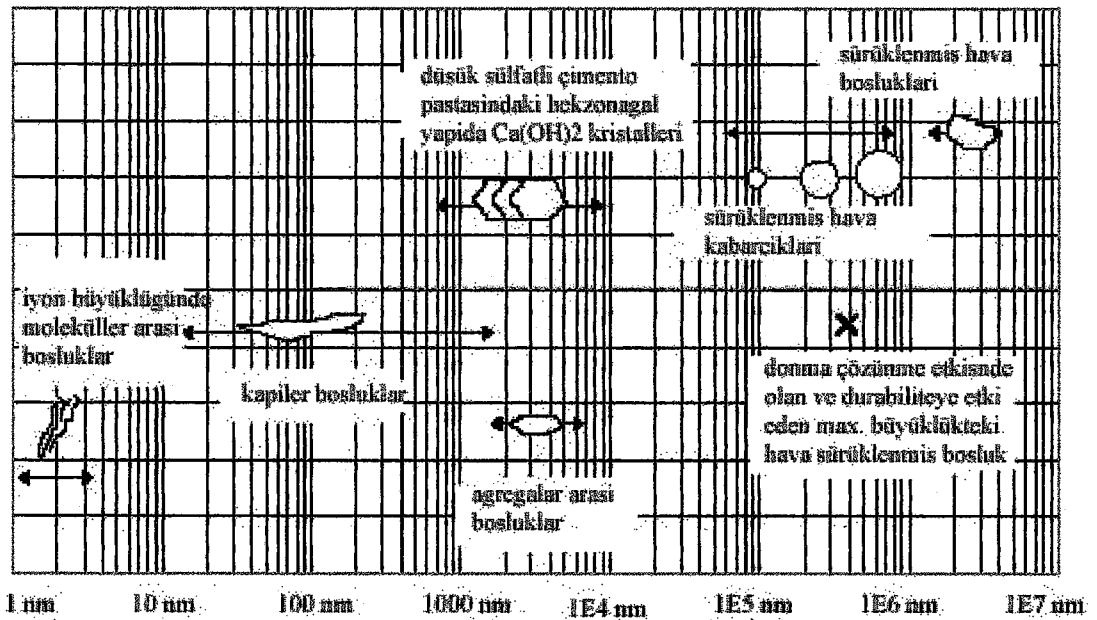
Karbonatlaşmanın oluşması için ilk şart karbondioksitin difüzyonudur. Karbondioksit betona difüze olduktan sonra ortamda yeterince nem varsa karbonatlaşma reaksiyonu başlar. Karbondioksit çeşitli nedenlerle oluşan boşluk sistemlerinin vasıtasıyla betona girer.

2.1.1. Betonun boşluk yapısı

Sertleşmiş beton içerisinde çeşitli boşluklar vardır (Şekil 2.1). Bu boşluklar:

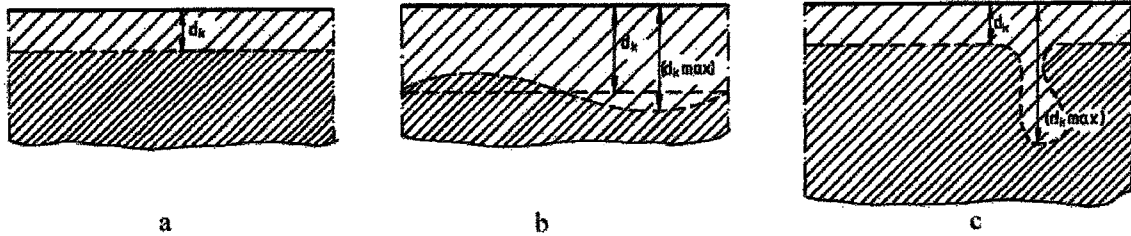
- Agrega boşlukları,
- Sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki jel, kılcal ve büyük boşluklar,
- Agrega yığını içerisinde kalan boşluklar,
- Betonun farklı oturması sonucu ortaya çıkan boşluklar,
- Küresel hava boşluklarıdır.

Çeşitli şekillerde oluşan bu boşluklardan önemli olanları betonun geçirgenliğinde rol oynayan ve karbonatlaşmaya etkisi olan boşluk sistemleridir. Bu boşlukların oluşumu çeşitli sebeplerden olabilir. Boşlukların büyüklüklerindeki en önemli etken beton karışımındaki su/çimento oranıdır.



Şekil 2.1 Sertleşmiş Betondaki Boşluklar ve Göreceli Büyüklükleri [4]

Karbonatlaşma, beton içinde boşlukların büyüklüğüne ve yapısına göre çeşitli şekillerde ilerleyebilmektedir (Şekil 2.2). Karbonatlaşma beton yüzeyinin her tarafında eşit oranda (Şekil 2.2.a), eğrisel olarak min. ve max. değerler alabilir (Şekil 2.2.b) veya sadece belli bölgelerden sızabilir (Şekil 2.2.c) [5].



Şekil 2.2 Karbonatlaşmanın Beton İçinde İlerleme Şekilleri.

Şekil 2.2.a'daki durumun oluşabilmesi için betonun homojene çok yakın oranda karıştırılması ve yerleştirilmesi gerekir. Şekil 2.2.b'deki durum ise daha olağan gibi gözükmemektedir ve her türlü betonda bu şekilde ilerlemesi normaldir. Şekil 2.2.c'deki gibi bir karbonatlaşmanın gerçekleşebilmesi için betonda muhtemel bir çatlağın olması gerekir. Çatlağın bulunduğu bölgede karbonatlaşmanın belli yerlerden sızması daha kolay olur. Çatlağın olmadığı yerlerde ise birinci ve ikinci durumdaki gibi bir karbonatlaşmanın olması söz konusudur.

2.1.2. Portland çimentosu

Karbonatlaşma olayı betonadaki boşluklarda ve uygun nem şartlarında çimentonun bazı kimyasal bileşenleri ile gerçekleşir. Tipik bir portland çimentosunda üretiminden önce karışıma giren kil ve kalkere bağlı olarak çeşitli oksit bileşenler bulunur. Fırında portland çimentosu klinkerinin üretimi sırasında kalsiyum oksit (CaO) hammaddedeki diğer oksitler ile birleşerek karma oksit denilen bileşikler meydana getirirler (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Portland Çimentosu Bileşimleri

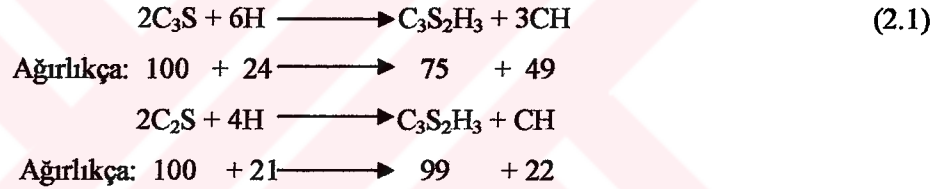
Çimento Hammaddesi		Çimento Klinkeri		
CaO	%60-67	$\left\{ \begin{array}{l} 3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \\ 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \\ 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \\ 4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \end{array} \right.$	(C_3S)	%54.1
SiO ₂	%17-25		(C_2S)	%16.6
Al ₂ O ₃	%3-8		(C_3A)	%10.8
Fe ₂ O ₃	%0.5-6.0		(C_4AF)	%9.1

Döner fırında yüksek sıcaklıkta pişirme sırasında bir takım reaksiyonlar gerçekleşir ve bunun neticesinde çimento klinkeri meydana gelir. Çimento klinkerinin kullanıma hazır hale gelebilmesi için 2800 gr/cm^2 mikron civarında öğütülür. Belirli bir inceliğe ulaşan çimento su ile reaksiyona girebilir ve hidrasyon adı verilen uzun bir süreç başlamış olur.

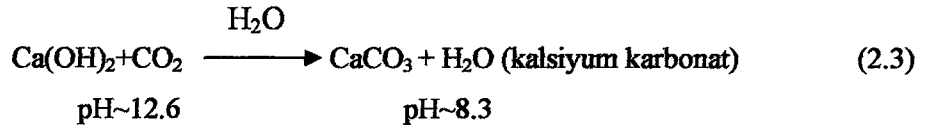
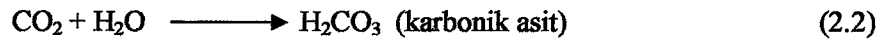
Hidrasyon reaksiyonları sonucu oluşan hidrate çimentonun yaklaşık %50 'sini tobermorit jeli oluşturur. Betona bağlayıcılık özelliği kazandıran ve dayanımda etken olan tobermorit jelinin yanı sıra çimentonun zayıf unsuru olarak kabul edilen %25 oranında kalsiyum hidroksit oluşur.

2.1.3. Karbonatlaşmanın kimyasal gelişimi

Betonun işlenebilirliğini arttırmak için karışıma fazlaca katılan suyun bir kısmı çimento ile (2.1) denklemine göre hidrasyona girecektir. Bu reaksiyonlar sonucu $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$ (C-S-H) tobermorit jeli ve $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (C-H) kalsiyum hidroksit oluşur. Suyun kalan kısmı ise betonun boşluklarına yerleşir.



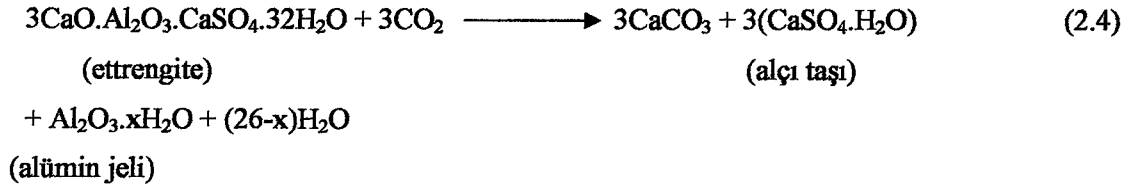
Başlangıçta suyun pH değeri 7'dir. Sertleşmiş portland çimentosu hamurundaki boşluklarda bulunan suyun pH'ı çimentodaki alkalilerin sayesinde 12,5-13,5 değerine yükselir. Atmosferdeki CO_2 betona nüfuz eder ve su ile (2.2) ve (2.3) denklemlerine göre reaksiyona girerek karbonik asit meydana getirir. Karbonik asit kirecin çözünmesinde etkilidir.



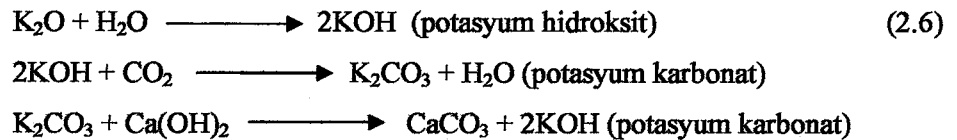
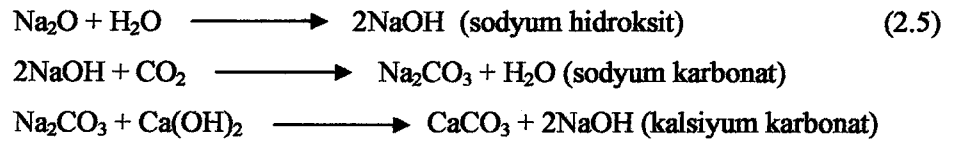
Çimentonun kalsiyum silikat bileşenlerinin hidrasyonu ile ortaya çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile CO_2 reaksiyona girerek hacimce daha büyük olan CaCO_3 'ü (kalsiyum karbonat) meydana getirir. Böylece hidroksit iyonları nötrleşerek pH derecesinin 9'a kadar düşmesine neden olurlar. Kirli

havada bulunan SO_x ve NO_x gazları da yine aynı şekilde reaksiyona girerek beton pH derecesinin düşmesine neden olur [2, 6, 7].

Karbonatlaşma yalnızca serbest kireçten dolayı olan bir süreç değildir. Karbonatlaşmada serbest kirecin yanı sıra C_3A 'nın hidratasyona girmesiyle oluşan monokalsiyumalüminosülfat ve trikalsiyumalüminosülfat (ettrengite) da etkilidir. Ettrengite betona giren karbondioksitin etkimesiyle kalsiyum karbonat (CaCO_3), alçı taşı ($\text{CaSO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$), alümin jeli ve su meydana gelir. Ettrengitenin de karbonatlaşmaya katılması (2.4) denklemindeki gibidir.



Çimento pastası içerisinde bulunan alkaliler yani Na_2O (sodyum oksit) ve K_2O (potasyum oksit) de karbonatlaşmada etkilidir. 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 CO_2 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. Bu olaylar (2.5) ve (2.6) denklemlerinde daha net bir şekilde görülebilir.



Bütün bu reaksiyonlar tüm hidrate elemanlarının karbonatlaşacağını ve NaOH 'ın tekrar tekrar elde edilmesiyle karbonatlaşmanın süreklilik kazanacağını gösterir. Ayrıca açığa çıkan suyun buharlaşmasıyla az miktarda da olsa rötreye sebep olacağı düşünülebilir [7, 8, 9, 10].

2.2. Karbonatlaşmaya Esas Parametrelerin İncelenmesi

Betonun karbonatlaşmasını etkileyen parametreler üç gruba ayrılabilir. Bunlar betonun içeriğini oluşturan; agrega, su ve çimento, betonun sürekli etkisi altında kaldığı ortam koşulları ve gerektiğinde betona katılan katkı maddeleridir.

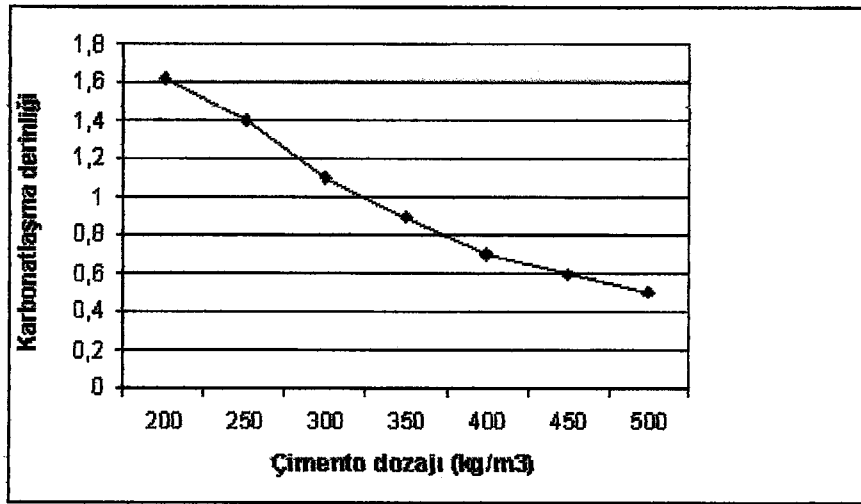
Beton; çimento, agrega ve suyun biraraya gelmesi ile oluşan bir yapı malzemesidir. Bu bakımdan öncelikli olarak betonu oluşturan malzemelerin karbonatlaşma ile olan ilişkileri incelenmelidir. Bu bölümde betonu oluşturan çimento, agrega, su ve havanın yanı sıra ortam koşullarının ve beton katkı malzemelerinin de karbonatlaşma üzerindeki etkinlikleri ayrı ayrı incelenmiştir.

2.2.1. Çimento

Su ile birleştiğinde hidrasyon olayı sonucu sertleşen ve bir daha yumuşamayan hidrolik bağlayıcılara çimento denir. Çimentolar karbonatlaşma üzerinde önemli etkinlik derecelerine sahiptir. Çimentolar hem bileşimleri hem de betondaki dozajı açısından karbonatlaşmayı etkiler. Çimentonun üretimi esnasında killi ve kalkerli malzemenin ayrışması neticesinde çeşitli oksitler meydana gelir. Bu oksitlerden özellikle CaO (kireç) karbonatlaşmanın en önemli elemanlarından biridir. Çimento içerisinde CaO %60-67 gibi bir yüzdeyle en fazla bileşim olma özelliğindedir. Kirecin dışında, az miktarda bile olsa karbonatlaşma olayına katılan, çimento içerisinde %0.2-1.3 oranında bulunan alkaliler (Na_2O ve K_2O) vardır. Kireççe zengin çimentolarda karbonatlaşma daha fazla gerçekleşir.

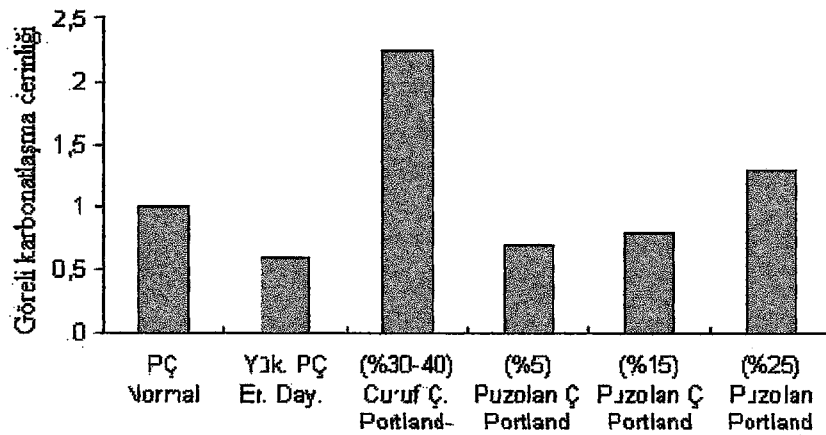
Çimento içerisinde bulunan oksitler üretimin daha ileri safhalarında aralarında reaksiyona girerek ana bileşenleri oluştururlar. Ana bileşenlerin her biri su ile ayrı ayrı reaksiyona girmelerinin ardından karbonatlaşma olayı meydana gelir. Normalde ana bileşimlerden sadece silikatler (C_3S ve C_2S) karbonatlaşmada etkilidir. Çimentonun C_3A bileşiminden dolayı ani priz oluşur. Bunu önlemek amacı ile katılan alçı taşı ve bunun neticesinde oluşan ettrenquite ($\text{C}_6\text{A}\bar{\text{S}}_3\text{H}_{30-32}$) de karbonatlaşmayı etkiler.

Betonda kullanılan çimento miktarı arttıkça karbonatlaşma hızı düşer. 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. Bunun nedeni çimento tanelerinin agregalar arasındaki boşluğu kapatamamasından kaynaklanır. Bu durumda karbonatlaşma hızı artacaktır. Çimento miktarı ile karbonatlaşma arasındaki ilişki şekil 2.3’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.3 Çimento Miktarı-Karbonatlaşma İlişkisi [2]

Betonda kullanılan çimento miktarının dışında kullanılan çimentonun içeriği de önemlidir. Çimentoya üretim sırasında veya beton üretimi sırasında çimentonun yerine katılan değişik katkılar karbonatlaşmayı etkileyebilmektedir. Bilodeau [11], uçucu küllü betonların karbonatlaşmayı azalttığını ileri sürmektedir. Fakat diğer bazı araştırmacılar ise tras, uçucu kül veya cürufu çimentolarda karbonatlaşma hızının yüksek oluklarını belirtmektedir [2, 9]. Bu tip çimentolarla oluşabilecek kalsiyum karbonat miktarı azdır fakat CO_2 'nin karbonatlaştırdığı bölümde azdır ve işlem bu yüzden hızlıdır. Değişik tipteki çimentoların, karbonatlaşma derinliği ile ilişkisi şekil 2.4'de verilmiştir [2, 9].



Şekil 2.4 Çimento Tipinin Karbonatlaşmaya Etkisi [2]

2.2.2. Agregalar

Kum, çakıl, kırma taş, cüruf gibi çeşitli büyüklük ve biçimde olan, betonun $\frac{3}{4}$ 'ünü oluşturan taneli malzemelere agregalar denir. Agregalar betonun hacimce önemli bir bölümünü kapladığı için gerek dayanım gerekse dayanıklılık yönünden önemlidir. Agregaların karbonatlaşma üzerindeki etkisiyle ilgili hiçbir çalışmaya rastlanmamıştır. Fakat karbonatlaşmayı etkileyebilecekleri düşünülerek bu konuyla ilgili çeşitli hipotezler sunulmuştur.

Betonun, üretim öncesi hedeflenmiş özelliklerinin zamanla yitirmemesi ve çevre koşullarına karşı dayanıklı olması, betonda aranan en önemli özelliktir. Betonda kullanılan agreganın dayanıklılığı, gözenekliliği, su geçirgenliği, mineral yapısı, tane şekli, granülometrisi, tanelerin yüzey pürüzlülüğü, bileşiminde kil olup olmadığı ve agreganın temizliği gibi bir çok özelliği durabiliteyi ve dolayısıyla karbonatlaşmayı etkileyebilen özellikleridir.

Karbonatlaşmanın en önemli etkenlerinden biri beton içindeki muhtemel boşluklardır. Sonuçta karbonatlaşma, bu boşluklarda bulunan çeşitli kimyasalların ve suyun yardımı ile gerçekleşecektir. Boşlukların oluşmasında bağlayıcı/agrega oranı en kuvvetli etkiye sahiptir [12]. Kullanılan agreganın en büyük tane büyüklüğü ve tanelerin büyüklüklerine göre dağılım oranı (granülometri) beton içerisindeki boşluk miktarını önemli ölçüde etkiler. Bu tip boşlukların yanında birde agreganın yapısında bulunan boşluklar vardır. Bu boşluklar iki tiptedir. Bir tanesi dışarı ile kesinlikle hiçbir teması olmayan boşluklar, diğeri ise hava ile temasta olan su geçirimli boşluklardır. Su geçirimsiz yani dışarıyla temasta olmayan boşlukların karbonatlaşmaya hiçbir etkisi yoktur. Fakat su geçirimli boşluklar var ise bunlar ileride don etkisine maruz kalabilir. Bilindiği üzere suyun buza dönüşmesi yaklaşık %9 oranında bir hacim artışını doğurur. Su geçirimli boşluklarda bulunan suyun donması ile agregalar ve dolayısıyla beton çatlar. Çatlama durumunda da beton, her türlü dış etkilere açık bir durum alır. Yani karbonatlaşma daha hızlı gerçekleşebilir ve daha derine inebilir.

Agregalar bazı bileşimlerinden dolayı betonda hacim genleşmesine ve dolayısıyla önemli ölçüde çatlaklara yol açabilirler. Bu sebeplerden dolayı oluşabilecek çatlakların karbonatlaşmaya etkisi çok büyüktür. Çatlaklar betonun iç kısımlarına doğru olduğu için karbondioksitin difizyonu bu bölgelerde daha derinlere inme şansı bulacaktır. Bu durum özellikle betonarme beton için çok zararlıdır [13].

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 agregalar beton yüzeyinde yer yer küçük çukurların oluşmasına ve/veya pul pul dökülmelere sebep olur. Bu olay meydana gelebilecek maksimum karbonatlaşma derinliğini artırır. Bu malzemeler standartlarda, ince agregada en çok %3, iri agregada ise en çok %10'a kadar bulunmalarına müsaade edilmiştir.

Kil içeren kalkerler suya maruz kaldıklarında hacimsel genleşme yaparlar ve beton içerisinde oluşturdıkları gerilmeler sonucu betonun çatlamasına neden olurlar [14]. Betonun çatlaması yine maksimum karbonatlaşma derinliğini önemli ölçüde artıracaktır.

2.2.3. Su

Beton yapımında kullanılan su üç değişik amaçla kullanılmaktadır. Bunlar sırasıyla karma suyu, bakım suyu ve yıkama suyudur [15]. Betonun dayanıklılığı açısından en önemlisi ilk ikisi olan karma suyu ile bakım suyu ya da bir başka adı ile temas suyudur. Karma suyu olarak kullanılan suyun en temel fonksiyonu, çimento taneleri ile reaksiyona girip hidrasyonu sağlamak ve ona bağlayıcılık kazandırmaktır. Ayrıca karma suyu betonun karılması ve yerine yerleştirilmesi için gerekli olan plastik kıvamı sağlamaktadır.

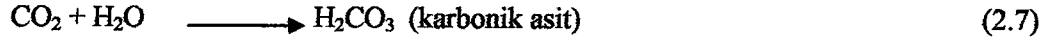
Betondan istenen dayanım ve dayanıklılık gibi işlevlerin istenilen düzeyde olabilmesi için çok iyi bir bakım süreci gereklidir. Bu bakım sürecinin en önemli elemanı da temas suyudur. Çeşitli bakım yöntemlerinden en çok kullanılanı beton yüzeyini sulayarak veya ıslak bezler ile örtmektir. Bu sayede hidrasyonu için gerekli suyun rüzgar, sıcaklık vs. etkenlerden dolayı kaybolması engellenir. Karma ve temas suyu olarak kullanılan suyun betondaki karbonatlaşma üzerine etkisi çok fazladır.

Suyun içerisinde çeşitli asitler vardır. Bu asitler çimento ve agrega içerisindeki çeşitli mimerallerin çözünmesine sebep olarak zararlı etkiler yaratırlar. Suyun içerisinde bulunabilecek bu asitler sırası ile incelendiğinde kalsiyum hidroksitlerin çözülmesine sebep olarak karbonatlaşmayı hızlandıkları görülür. Beton için zararlı kimyasal etki yapan ortam ve çeşitli iyonlar Türk Standartlarınca belirlenmiş olup önemlileri tablo 2.2 'de verilmiştir.

Tablo 2.2 Beton İçin Zararlı Kimyasal Etki Yapan İyon ve Ortamlar İçin Sınır Değerler [16]

Zararlı kimyasal etkisi olan iyonlar	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

Betona zararlı bu asitlerden biri karbonik asittir. Su (2.7) denkleminde görüldüğü üzere, havadaki karbondioksit ile birleşerek karbonik asit meydana getirir. Karbonik asit, Ca(OH)_2 'in (kalsiyum hidroksit) çözülmesine sebep olarak karbonatlaşmayı hızlandırır.

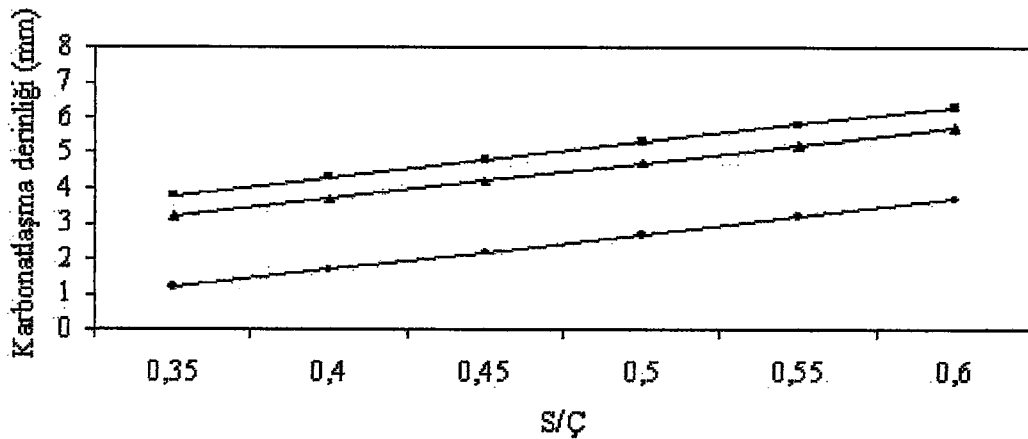


Sertleşmiş beton çok yönlü etkiler altındadır. Su bir taraftan fiziksel olarak çözücü etki yaparken, diğer taraftan kimyasal olaylarla hidrate bileşikler oluşturarak katılaşmayı sağlar. Betonun hazırlanması sırasında silikat yapılı kum veya çakıl kullanıldığında olumsuz kimyasal etkilenme en çok bağlayıcı madde olan çimento kısmında olur. Bu olumsuz kimyasal etkilenme;

- Bağlayıcı maddenin eriyerek kitleden uzaklaşması. Bu etki direncin ve sıklığın azalmasına,
- Bağlayıcı madde kısımlarının genelde sonradan gelen diğer maddelerle yeni kimyasal bileşikler oluşturmaya sebep olur [17].

Harç ve betonun boşluk yapısını etkileyen parametreler, karbondioksit gazının betona difüzyonunu değiştirmeleri açısından önem kazanır. Su/çimento oranı betondaki boşluk yapısını etkileyen önemli faktörlerden biridir.

Su/çimento oranının yüksek olması sertleşmiş betonun boşluk yapısını artırır. Bunun yanı sıra çok düşük su/çimento oranında betonun yerleştirilmesi zor olduğundan yine boşluk yaratma olasılığı yüksektir. Su/çimento ile karbonatlaşma derinliği arasındaki ilişki şekil 2.5'de verilmiştir. Su/çimento oranı arttıkça karbonatlaşma derinliği de lineer bir şekilde artmaktadır (Şekil 2.5) [2, 15].

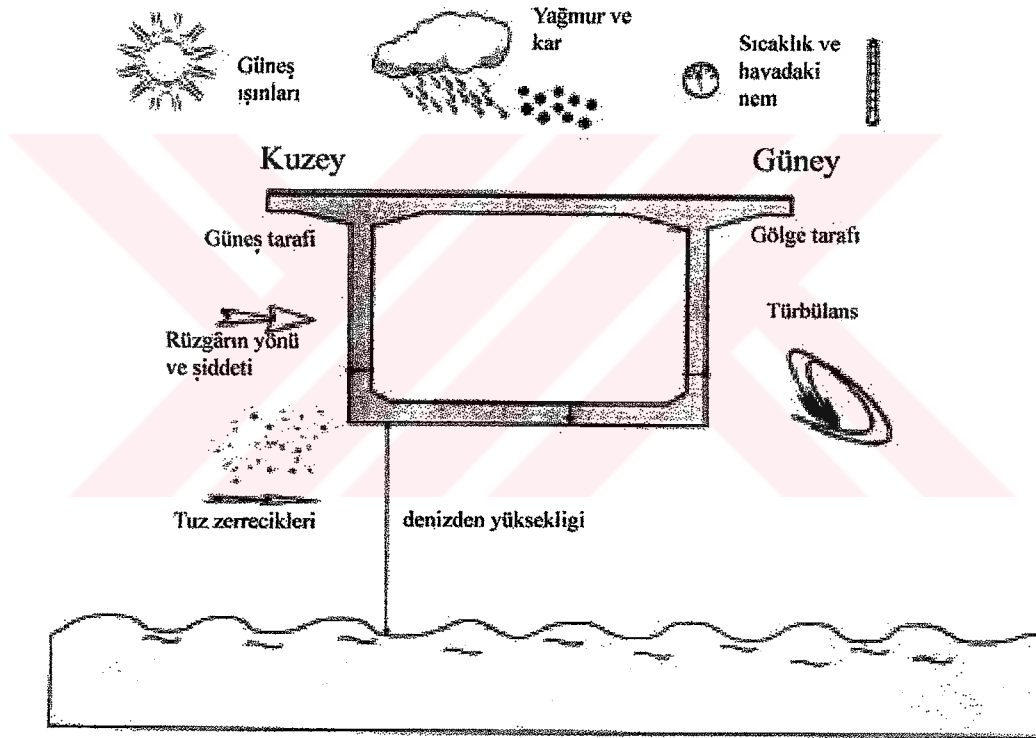


Şekil 2.5 Ağırlıkça 1:3 (Çimento:Kum) Oranındaki Harçlarda S/Ç-Karbonatlaşma İlişkisi [2]

2.2.4. Ortam koşulları

Yapılar bulundukları yere göre çeşitli atmosfer etkilerine maruz kalmaktadır (Şekil 2.6). Güneş ışınları, yağmur, havadaki mevcut nem, rüzgar hızı ve yönü gibi atmosfer etkilerine maruz kalan bir yapıda olabilecek karbonatlaşma süreci ve hızı da bu faktörlere bağlı olarak etkilenecektir. Karbonatlaşma süreci ve hızı bu faktörlerden özellikle üç tanesine bağlıdır. Bu faktörler ortamdaki bağıl nem oranı, karbondioksit miktarı ve sıcaklık derecesidir.

Çevresel etkiler sadece bunlar ile sınırlı değildir. Bu faktörlerin yanı sıra yapının bulunduğu zemin ortamı (sülfatlı zeminler, bataklık çamuru, endüstri atığı dolgu zeminler vb.) ile zemin suyunda çözülmüş olan iyonlar da beton üzerinde önemli etkinlik derecesine sahiptir [17,18].

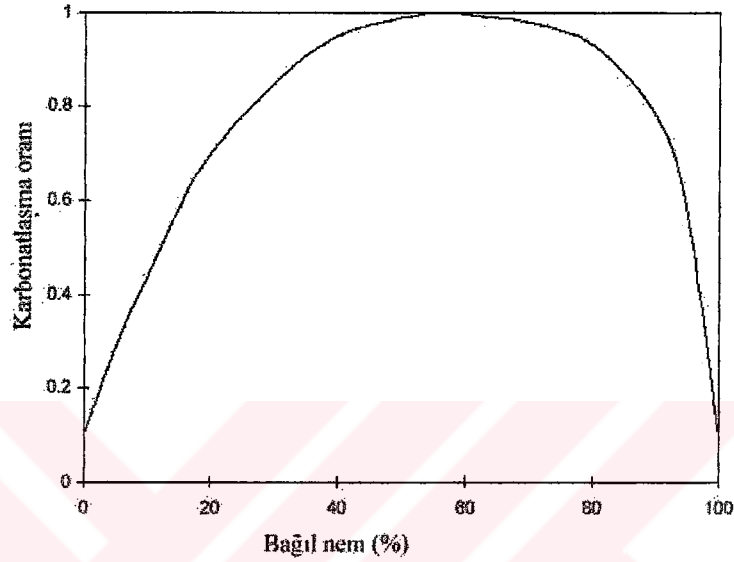


Şekil 2.6 Deniz Etkisindeki Bir Yapı ile Çevre Arasındaki Etkileşim [5]

Şüphesiz 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” [4,19]. 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 difizyonu zorlaşacaktır. Tamamen suyun içinde kalan betonlar karbonatlaşma yapmazlar. Nemin azalması durumunda ise reaksiyonun ihtiyaç duyduğu su

azalacağından karbonatlaşma hızı azalacaktır [2]. Ortamdaki nem parametresinin karbonatlaşmayı ne şekilde etkileyeceğı şekil 2.7’de daha net olarak görülebılır.

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 karbonatlaşmayı yavaşlatır [8].



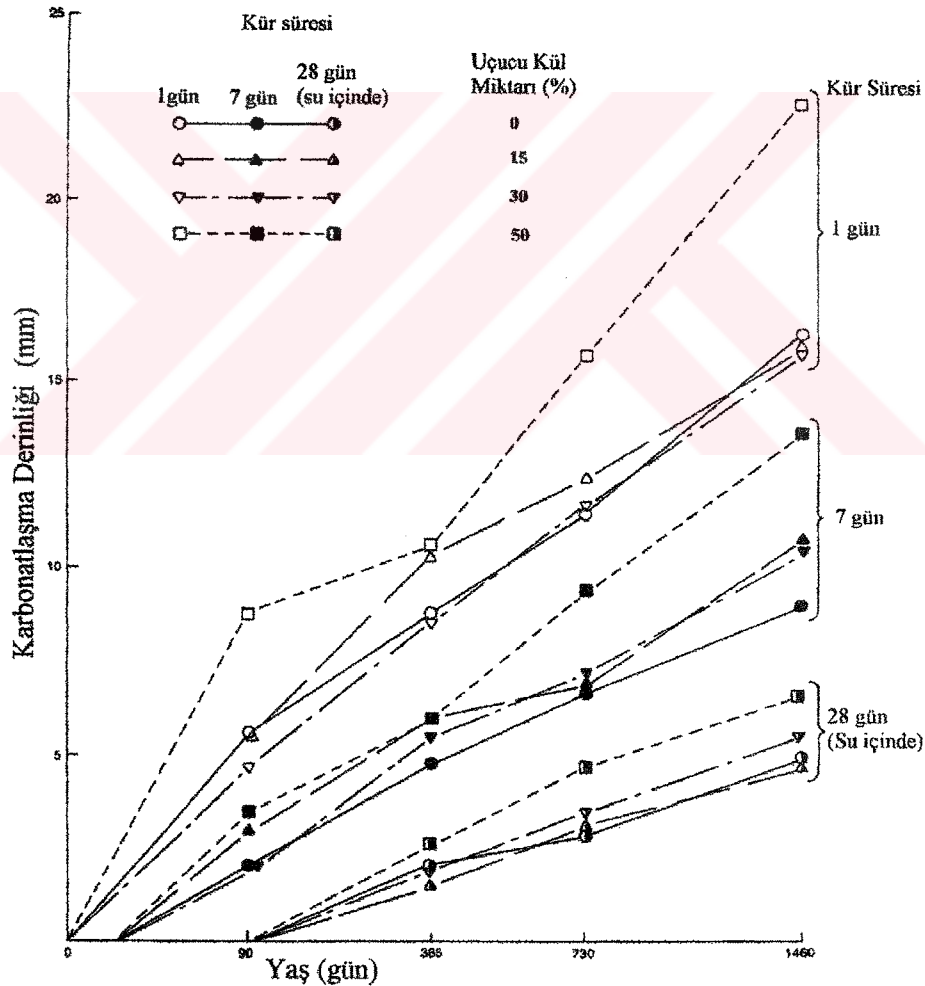
Şekil 2.7 Bağıl Nem ile Karbonatlaşma Derinliği ilişkisi [4].

Havadaki karbondioksit oranı karbonatlaşma hızını önemli ölçüde etkileyen parametrelerden biridir. Karbonatlaşma işi çok uzun yıllar süren bir süreç olduğundan araştırmacılar yaptıkları deneylerde ortamın karbondioksit miktarını artırarak karbonatlaşmayı hızlandırmaktadırlar. Böylece istedikleri neticeleri daha çabuk elde etmektedirler. Büyük şehirlerdeki hava kirliliğinden dolayı karbonatlaşma daha hızlı gerçekleşecektir. Hatta tünel gibi yapı elemanları düşünüldüğünde karbonatlaşmanın korkunç boyutlarda olduğu görülür. Mesela binanın iç kısmında oluşan karbonatlaşma ile dış kısmında oluşan karbonatlaşma arasında belirgin ölçüde fark vardır. Bina içindeki kişi sayısı fazla olduğu zamanlarda ortamdaki karbondioksit miktarı da artacağından karbonatlaşmayı da artıracaktır [10].

Karbondioksitin betona difizyon hızı ve betonun karbonatlaşmış bölgesindeki karbondioksit konsantrasi karbonatlaşmayı doğrudan etkiler. Karbonatlaşmış bölgelerde karbondioksit konsantrasyonu arttığında karbondioksit girişi yavaşlar. Neticede beton karbondioksit ile tamamen doygun hale geldiğinde karbonatlaşma işi son bulur [5]. Havada bulunan kükürt dioksit SO_2 gazı da çimento pastasının pH değerini azalttığı bilinmesi gerekir. Fakat havadaki kükürt dioksit gazı karbondioksitin havadaki oranından binlerce kez daha küçük olduğu için önemsiz sayılabilir [20].

Betonun boşluk yapısını ve dolayısıyla karbonatlaşmayı etkileyen diğer bir faktör betonun kürüdür. Uzun süre ıslak kür edilmiş bir betonda hidratasyon ürünleri boşlukları tıkayarak karbonatlaşmayı azaltmaktadır.

Doğal puzolanlar, yüksek fırın cürufu, uçucu kül silika tozu gibi puzolonik 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 kazanmalarıdır. Bu sebeple bu tür puzolonik 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 edilmiş olur. Kür koşullarının ve süresi ile artan miktarlarda uçucu kül kullanımının karbonatlaşma üzeride etkisi şekil 2.8’de verilmiştir [21].



Şekil 2.8 Değişik kür koşullarına sahip uçucu küllü betonların karbonatlaşma derinlikleri

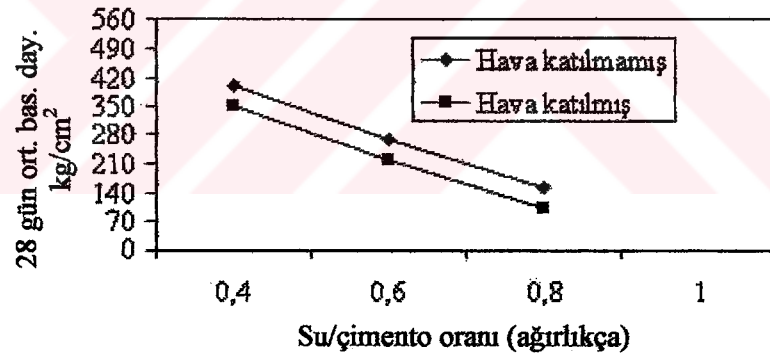
Sadece 1 gün kür edilen örneklerin iki yıl sonunda 7 gün kür edilenlere göre iki kat, 28 gün kür edilenlere göre ise 3 kat daha fazla karbonatlaştıkları ve beton içindeki uçucu kül

miktarının çimento ağırlığının yarısına ulaşması halinde karbonatlaşmanın çarpıcı biçimde artmaktadır (Şekil 2.8).

Puzolanların dışında aynı kür hassasiyetine, blaine inceliği arttırılmış olan çimentolar ile üretilen betonlarda sahiptir. Son yıllarda çimento fabrikaları ürettikleri çimentoya daha fazla oranda puzolan katabilmek amacıyla çimentonun blaine inceliğini 3500-4500 seviyelerine çekmişlerdir. Blaine inceliği arttırılmış olan çimentonun hidrasyon ısı da artmaktadır. Yeterli kür yapılmadığı takdirde hidrasyon ısının fazla oluşu, betonda rötre çatlaklarının oluşmasına yol açar.

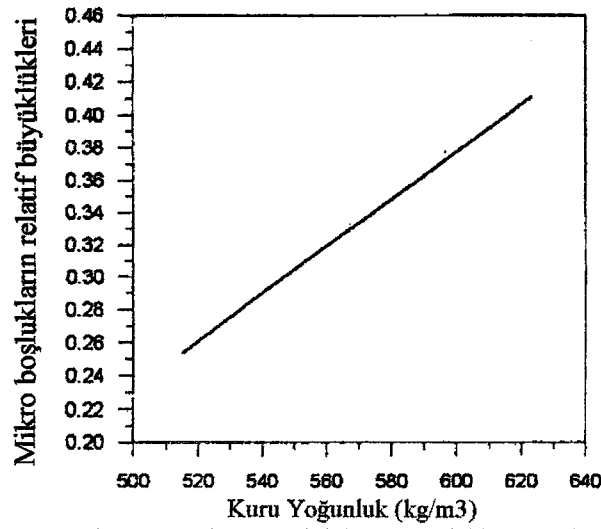
2.2.5. Hava sürükleyici katkılar

Betonda iki şekilde hava bulunabilir. Beton bileşimleri karıştırılırken ve yerleştirme sırasında oluşan ve üniform olmayan hava boşlukları ile betonun dayanıklılığını arttırmak için bilinçli olarak oluşturulan hava boşluklarıdır. Birinci tür oluşan ve istenmeyen boşluklar karbonatlaşmayı önemli derecede etkiler. Betonun zararlı dış etkenlere karşı dayanıklılığını arttırmak için oluşturulan boşluklar ise karbonatlaşmayı önemli ölçüde azaltır fakat betonun mukavemetini de azaltır (Şekil 2.9).



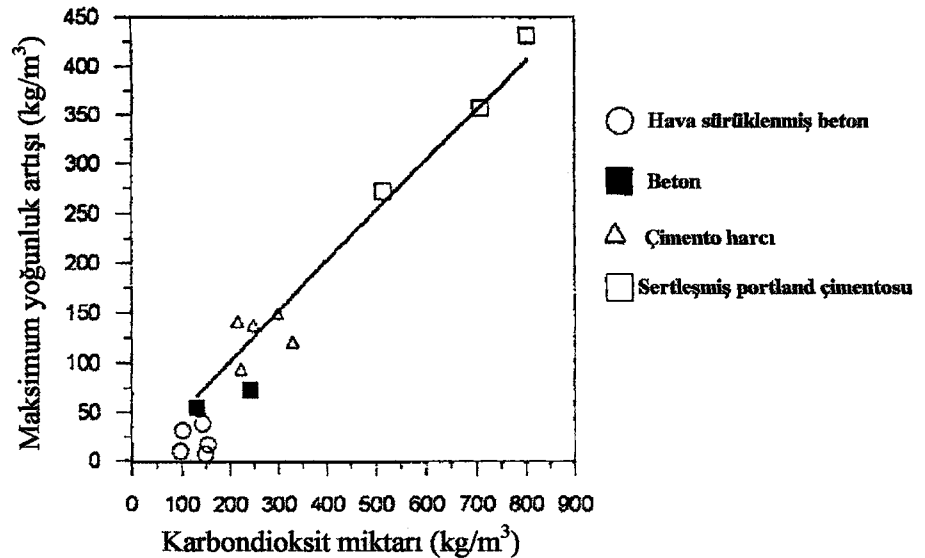
Şekil 2.9 Hava Katkısı İle Mukavemet İlişkisi [22]

Hava sürükleyici katkılar, karışım işlemi sırasında betona katılarak beton içerisinde yaklaşık 0,2 mm boyutlarında birbirinden bağımsız hava boşlukları oluşturan beton katkı maddeleridir. Bilindiği gibi, su donduğunda hacimce genişir. Beton boşluklarındaki su donduğu zaman bu boşlukların duvarlarına gerilmeler uygular ve mikro çatlaklar oluşur. Hava sürükleyici katkılar bu içsel gerilmelere karşı bir tür yastık vazifesi görürler. Su hava kabarcıklarına doğru ilerleyerek bunların bir kısmını doldurur ve genişleme sırasında tamamı dolu olmadığından içsel gerilmeler meydana gelmez. Betonun donma çözülme direncini arttırmak için betona çimento ağırlığının %0,5-2 oranında hava katılması üretici firmalar tarafından önerilmektedir.



Şekil 2.10 Hava Katkısına Bağlı Yoğunluk ile Betondaki Boşlukların İlişkisi [23]

Hava katkısının miktarına bağlı olarak betondaki mikro boşlukların büyüklükleri de şekil 2.10'daki gibi lineer bir şekilde azalma gösterir [23]. Mikro boşluklardaki bu azalma betonun geçirimsizliğini artırdığı için atmosferdeki CO_2 'in betona girmesini zorlaştıracaktır. Bundan dolayı da karbonatlaşma sadece betonun yüzeyinde kalacaktır. Karbonatlaşmanın sadece yüzeyde oluşması beton açısından hiçbir zarar teşkil etmez hatta kompositeyi artırdığı için faydası bile olduğu düşünülebilir. Hava katkısının betondaki karbonatlaşmayı ne derece etkilediği şekil 2.11'de gösterilmiştir. Verilen grafikte hava katkılı betonlar ile diğer harçların kıyaslaması yapılmış ve hava katkılı betonların diğer harç türlerinden daha az karbonatlaştığı gözlemlenmiştir [23].



Şekil 2.11 Beton türleri arasındaki karbonatlaşma ilişkisi [23]

2.2.6. Yüksek fırın cürufu

Demir cevherleri, doğada, esas olarak içerdikleri demir oksit bileşenlerinin yanı sıra silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi bazı yabancı maddeler ile birlikte bulunurlar. Cevher içerisindeki demir oksitten demir elde edebilmek için bu tür hammaddeler yüksek fırın adı verilen fırınlarda kok kömürü (karbon) ve arıtma işleminde yardımcı madde olarak kullanılan kalker taşı ile birlikte yüksek sıcaklığa tabi tutulurlar. Redüklenme sonucunda, demiroksit'teki oksijen kok kömürünün karbonuyla birleşerek karbonmonoksit ve karbondioksit olarak cevheri terk ederken geride, eriyik durumda, demir ile birlikte kireç, kok kömürünün külü, silis, alümin ve diğer yabancı maddelerden oluşan ve "cüruf" adı verilen malzeme topluluğunu bırakır. Eriyiğin üst kısmında yer alan cüruf buradan yan ürün olarak dışarı çıkartılarak geriye sadece demirin kalması sağlanmaktadır.

Yüksek fırından eriyik olarak çıkartılan atık malzemeler soğutulma hızına ve yöntemine bağlı olarak değişik karakteristikler gösterirler. Önce, normal atmosferik koşullarda ve sonradan suda soğutulan cüruflara havada soğutulmuş yüksek fırın cürufu denilmektedir. Su, basınçlı hava ve buharla soğutulanlara genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve suda ani olarak soğutulma işlemine tabi tutulanlar ise granüle yüksek fırın cürufu olarak anılmaktadırlar.

Yüksek fırından çıktığında yaklaşık 1400 – 1600 °C'de eriyik durumda bulunan cüruf havada yavaş soğutulmaya bırakıldığında gri, kristal yapılı taş gibi bir malzemeye dönüşmektedir. Kontrollü miktarda su ile soğutulursa pomza taşı gibi hafif ve gözenekli bir yapıya sahip olmaktadır. Bol suda aniden soğutulma işlemine tutulan cüruflar ise granüle duruma getirilmekte ve bu tür cüruflarda camsı yapı oluşmakta. Tablo 2.3'de değişik ülkelerde çıkan cürufların kimyasal kompozisyonları portland çimentosu ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Tablo 2.3 Yüksek Fırın Cürufunun Kimyasal Kompozisyonu % [24]

	ABD	Güney Afrika	Avusturalya	Türkiye	Portland Çim.
CaO	29-50	30-40	38-44	34-41	60-67
SiO ₂	30-40	30-36	33-37	34-36	17-25
Al ₂ O ₃	7-18	9-16	15-18	13-19	3-8
Fe ₂ O ₃	0,1-1,5	-	0-0,7	0,3-2,5	0,5-6,0
MgO	0-19	8-21	1-3	3,5-7	0,1-4
MnO	0,2-1,5	-	0,3-1,5	1-2,5	-
S	0-2	1-1,6	0,6-0,8	1-2	-
SO ₃	-	-	-	-	1-3

Yüksek fırın cürufları silisli yapıya sahip olduklarından dolayı puzolonik katkı maddesi grubuna girebilmektedirler. Fakat içerdikleri kireçten dolayıda tek başlarına az miktarda da olsa bağlayıcı malzeme özelliğini taşımaktadırlar. Piyasada yüksek fırın cürufu katkılı çimento üretiminde, portland çimentosu üretiminde, agrega olarak ve yol malzemesi olarak kullanılabilmektedir [24].

Yüksek fırın cürufu kullanılarak her sınıf betonun dökülmesi mümkün olabilmektedir. Dayanıklılık açısından da diğer tip çimentolarla üretilen daha üstün özelliklere sahip olması mümkündür. Yinede yüksek fırın cürufu çimento ile yapılan betonlarda permabilitenin azalması ve asit direncinin artması gibi dayanıklılık özelliklerini arttırsa da çimento katkı maddesi olarak kullanımı karbonatlaşma açısından kısıtlıdır. Çimentonun yerine ağırlıkça betona %50'ye kadar katılırsa yukarıdaki kriterleri çok iyi bir şekilde sağlayabilmekte ve karbonatlaşması da normal betonunki ile aynı olmaktadır. Fakat %70 ve daha fazla oranlarda katıldığı takdirde normal betonlara göre daha fazla karbonatlaşma göstermektedir [25].

2.2.7. Puzolanlar

Puzolanlar maliyeti yüksek olan portland çimentosuna belli oranlarda katılarak hem beton maliyetini düşürmekte hem de betonun bazı özelliklerini iyileştirmektedir. Doğal halde ve endüstriyel atık olarak iki şekilde elde edilen puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan katkı maddeleridir. Çimentodaki serbest kireci bağlayarak tobermorit jelinin miktarının artmasını sağlar ve bu sayede betonun dayanımını bir yere kadar arttırabilmektedirler.

Çimentonun hidratasyonunun neticesinde hidratasyon ürünü olan ve bağlayıcılık özelliği taşıyan C-S-H ve bu ürünün yanı sıra fazla miktarda serbest kireç meydana gelir. Puzolanlar ortamda serbest durumda bulunan kireci bağlayarak onları C-S-H'a dönüştürür ve çimentonun bağlayıcılık özelliğinin artmasını sağlarlar. Serbest kirecin bağlayıcılık özelliği yoktur fakat betonun pH'ını yükselterek çeliği korozyondan uzak tutar. Puzolanların katkı maddesi olarak kullanılmasına hem dayanım açısından hem de dayanıklılık açısından dikkat edilmesi gerekir.

Ucucu küllü betonları hidratasyon açısından normal portland çimentosundan ayıran temel farklılık uçucu külün tamamen hidratasyona katılamamasıdır. Kullanılan uçucu külün tamamının hidratasyona katılabilmesi ortamda bulunun kalsiyum hidroksite bağlıdır. Her bir SiO_2 , Fe_2O_3 ve Al_2O_3 moleküllerinin CaO ile bire bir reaksiyona girmesi gerekir. Uçucu kül ve çimentonun içindeki bileşenlerin miktarları dikkate alındığında pratikte kullanılabilecek maksimum uçucu kül miktarı % olarak (2.8) denkleminde göre elde edilebilir [26].

$$M = (C_1 - 0,93S_1 - 0,55A_1 - 0,35F_1 - 0,70\overline{S_1}) / (0,93(S_2 - S_1) + 0,55(A_2 - A_1) + 0,35(F_2 - F_1) + 0,70(\overline{S_2} - \overline{S_1}) - (C_2 - C_1)) \quad (2.8)$$

(2.8) denkleminde bulunan simgeler C_1 , S_1 , A_1 , F_1 , $\overline{S_1}$, sırasıyla çimentodaki CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃ ve C_2 , S_2 , A_2 , F_2 ve $\overline{S_2}$ sırasıyla uçucu küldeki CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, SO₃'dir.

Betonda puzolan miktarı çok fazla artarsa belli bir noktadan sonra buna karşılık gelen serbest kireç ortada kalmayacağından ortamda sadece ince agrega vazifesi görmeye başlarlar. Bu etkinin sonucunda betonun dayanımı ve dayanıklılığı düşer. Puzolanlar ister doğal olsun ister atık olarak elde edilsin aralarında bileşimleri yönünden farklılıklar göstermektedir. Bu yüzden puzolanlar kullanılmadan önce kullanılacak olan yerin özelliğine ve istenen betonun kalitesine göre ön deneylerinin yapılması gerekmektedir. Uygun olan puzolan / çimento oranı bulunduktan sonra kullanılması ileride doğabilecek kusurların önlenmesi açısından önemlidir [27].

2.3. Karbonatlaşmayı Belirleme Teknikleri

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;

$$C = K\sqrt{T} \text{ , dir [6].} \quad (2.9)$$

Burada C karbonatlaşma derinliği (mm), K fiziksel değişkenleri içeren parametre ve T zamandır (yıl). Düşük dayanımlı bir beton için K parametresi genellikle 3-4 mm/yıl^{0,5}'den büyük bir değer alır. Dış ortam koşullarının değişken olması nedeniyle pratikte bu bağıntıyı kullanmak pek mümkün değildir.

Yukarıdaki denklemin dışında ortam nemi, beton içeriği, karbondioksit konsantrasi 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.

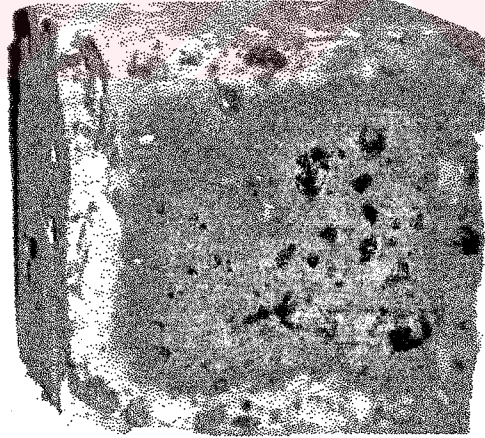
2.3.1. İndikatörler

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 , thymolphthalein 10.0-9.0, in-nitrophenol 8.0 ve yaygın olarak kullanılan phenolphthaleindir 9.0 [28]. Phenolphthalein çözeltisi %1 phenolphthalein ($C_{20}H_{14}O_4$) %70 etil alkol'de çözülerek hazırlanır.

Phenolphthaleinin püskürtüldüğü yüzeydeki renksiz bölgelerin pH derecesi 9,0'ın altındadır. Mor renge dönüştüğü alanlar ise betonun alkalin olduğu bölgelerdir (şekil 2.12). 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 [29].

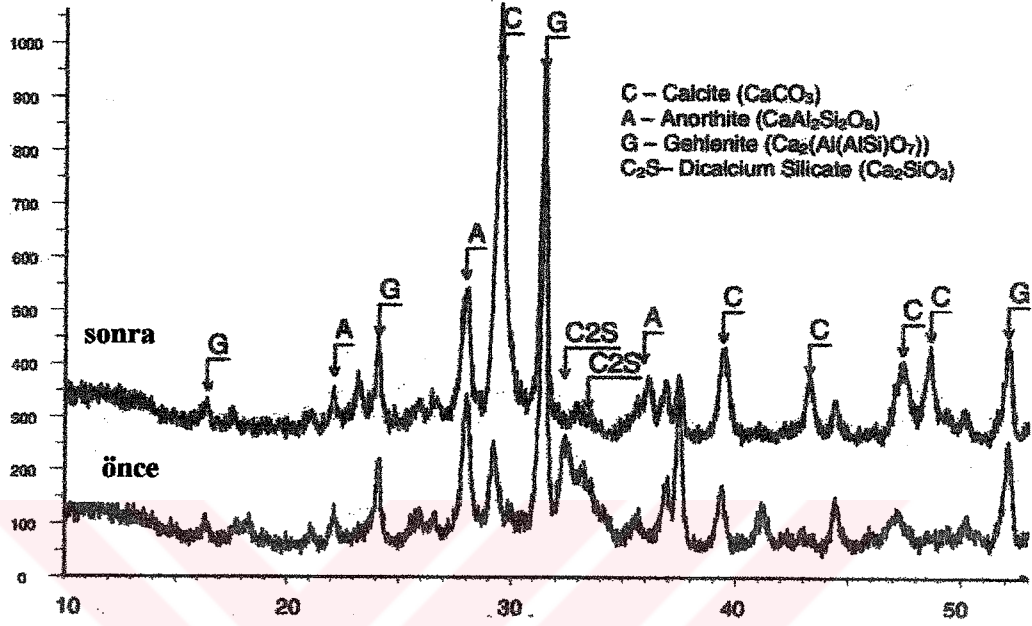


Şekil 2.12 Phenolphthalein püskürtülmüş beton yüzeyi

2.3.2. X-Işımları difraktometre cihazı

Çimentonun hidradatlaşmış ve hidradatlaşmamış kısımlarının pek çoğunun mineralojik açıdan tanımlanmasında oldukça iyi bir yöntemdir. X-ışını difraksiyonu analizi çimentonun mineralojik yapısının belirlenmesinde kesin sonuç verir. Elde edilen grafiklerden betonun

karbonatlaşmasının neticesinde oluşan kalsiyum karbonatın CaCO_3 artışının gözlemlenmesi mümkündür. Fakat CSH'nin ve ince taneli diğer kısımların analizini yapamaz [30]. X-ışını difraksiyonu ile elde edilmiş örnek bir grafiğin görüntüsü şekil 2.13'de görülebilir.



Şekil 2.13 X-ışını difraksiyonu analizi

2.3.3. Termal analiz

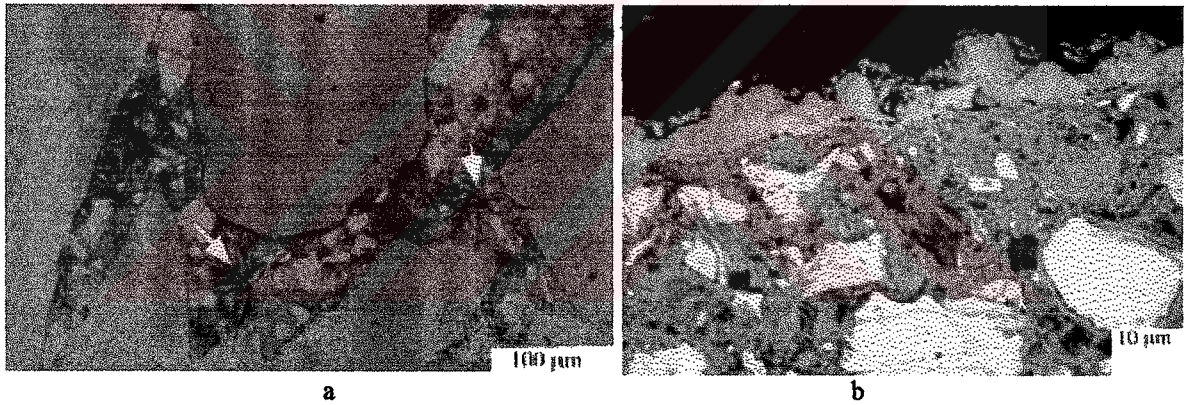
Bu teknik Le Chatelier tarafından ilk olarak 1987'de tasarlanmış ve Roberts-Austen tarafından değişiklik yapılmış. Madde üniform bir hızla ısıtılır. Isıtılan maddenin verileri termik analizde kimyasal ve fiziksel değişikliklere ısı etkisi birleşerek zaman ve sıcaklığın bir analizi olarak kayıt edilerek elde edilir. Kristal inversiyon, dehidratasyon, çürüme ve kimyasal reaksiyonlar termik analiz tarafından taranır. Metot çimento kimyasında hem nitel hem de nicel çalışmalar için kullanılmaktadır. X-ışını difraksiyonunun göstermediği bir madde bu teknikte bulunabilir [30].

Bir malzemenin sıcaklık artışı ile bünyesinde meydana gelen değişimleri belirlemekte kullanılır. Malzeme bünyesinde meydana gelen ağırlık değişimleri termo gravimetri analiz (TGA), ekzotermik yada endotermik reaksiyonlar sonucu meydana gelen sıcaklık değişimleri diferansiyel termal analiz(DTA) ile tespit edilir. Bu amaçla kullanılmakta olan cihazlar 0,1-50 C/dk ısıtma hızları ile 1500 C'ye kadar çıkabilmektedir [30].

2.3.4. Taramalı elektron mikroskobu

TEM (taramalı elektron mikroskobu) tekniği kısaca, özel hazırlanmış sınırlı kalınlıktaki numunelerden yüksek enerjili elektron demeti geçirerek görüntü almaya olanak veren ve elektron demetinin numune içinden geçerken uğradığı difraksiyonla faz karakterizasyonu da sağlayan bir tekniktir. TEM çimento kimyasında çimento klinkerinin ve betondaki agreganın muayenesi için kapsamlı bir şekilde kullanılmaktadır. Çimento kimyasını ilgilendiren pek çok materyal optik mikroskoptan çözümlemek imkansız olduğundan TEM bu alanda oldukça kullanışlı olmaktadır [7].

TEM hidrattlaşmış çimento yapısının anlaşılmasında önemli bir rol oynar. Numunenin yüzeyine elektron saçılır, saçılan elektronlar bir detektör tarafından toplanır ve ışın tüpü üzerine düşen görüntü gözlemlenir. Hidrattlaşmış çimento sisteminde kalsiyumhidroksit ve kalsiyum mono sülfat alüminat'ın hekzogonal kristallerinin varlığı elde edilebilir (şekil 2.14.a). Şekil 2.14.b'deki resmin üst taraflarındaki açık gri kısımlar karbonatlaşma derinliğini göstermektedir[31].



Şekil 2.14 Elektron mikroskobu ile görüntüsü alınmış beton kesiti [31]

2.4. Karbonatlaşmanın Betonda Etkileri

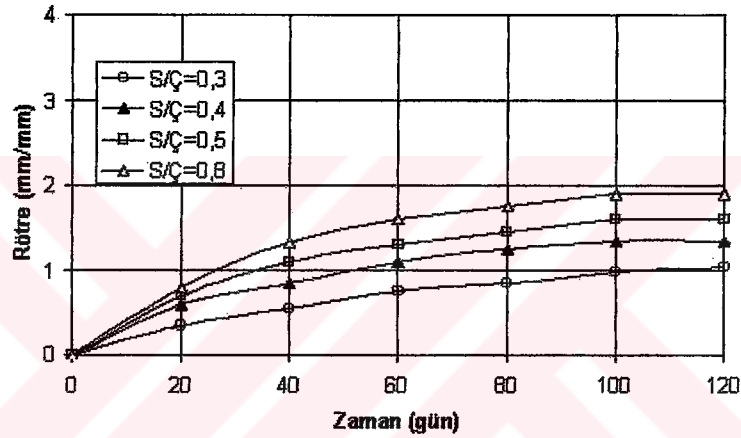
2.4.1. Karbonatlaşma rötresi

Karbonatlaşma ürünleri olan kalsiyum karbonatlar hacim artışı meydana getirdikleri halde betonun yapısında bir rötreyi oluşturur. Bu rötreyi, reaksiyon sırasında açığa çıkan suyun kuruması veya Ca(OH)_2 kristallerinin çözünerek yer değiştirmeleri ve bunun sonucu olarak da iç basınç yaratmaları hipotezleri açıklayabilir.

Karbonatlaşmanın yüzeyden başlayıp iç bölgeye zaman ile geçişi üniform olmayan bir rötreye dağılımına yol açar. Böylece dış bölge çekme ve iç bölge basınç gerilmelerine maruz kalır.

Çekme gerilmeleri rölaksasyon nedeniyle nispeten yavaş artar, ancak çekme dayanımının artışı ilk günlerde olur, sonraları hemen hemen durur. Bu durumda karboatlama rötresi ile oluşan çekme gerilmelerinin birkaç aylık bir süre sonunda çekme dayanımını aşması olasıdır. Üst kabuk iyice kuruduktan sonra yüzeyde çatlaklar meydana gelir. Derin olmayan bu ince çatlaklar ağ teşkil ederler. Mukavemet ve durabilite açısından zararsızdırlar fakat neticede istenmeyen bir görüntü oluştururlar. Karbonatlaşma çok hızlı seyrederse çatlakların derinliği artabilir. Bu da mukavemeti ve durabiliteyi etkileyebilir.

Yüksek su/çimento oranlarında karbonatlaşma daha hızlı olduğuna göre karbonatlaşma rötresinin de buna paralel olarak artması beklenir. Su/çimento ile rötresindeki ilişki şekil 2.15'deki gibidir. Grafikte görüldüğü gibi en yüksek karbonatlaşma rötresi, su/çimento oranı 0,8 olduğu zamandır.



Şekil 2.15 Karbonatlaşma Rötresi ile S/Ç ilişkisi [8]

Rötres miktarı sadece betondaki su/çimento oranına bağlı değildir. Ortam nemi veya kür edilme şartları betondaki karbonatlaşma rötresini etkilemektedir. Karbonatlaşma rötresi karbonatlaşmanın durduğu anda durmaktadır [8].

Rötres karbonatlaşma ile doğrudan ilişkilidir. Karbonatlaşma yüzeyde başlayıp içlere doğru çok yavaş intikal ettiğinden, yüzeysel ağ çatlakları meydana getirir. Bu çatlaklar betonun mukavemeti açısından zararsızdırlar. Fakat karbonatlaşmanın çok ileri seviyeleri çıkabileceği, CO₂ yönünden zengin ortamlarda çatlak derinliği çok fazla artarak beton içinde bulunabilecek çelik donatıya ulaşmaları durumunda zararlı olabilirler [32].

2.4.2. Beton dayanımı

Betonun dayanımı aranan 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 elik betonun alkalın özelliği sayesinde iyi bir şekilde korunur. Karbonatlaşmadan sonra betonun kimyasal kompozisyonu ve mikro yapısı değişir. Bu değişiklikten dolayı karbonatlaşmış betonarme betonu ile normal betonarme betonunun mukavemet, deformasyon ve duktilitte kabiliyetlerinde farklılıklar olması doğaldır. Karbonatlaşmış betondan kastedilen, betonun zamanla yüzey kısmından daha derinlere doğru bir miktarının karbonatlaşmış olmasıdır. Bahsedilen bu tip betona Türkiye’de ve dünyanın bir çok yerinde oldukça fazla rastlanabilir.

Beton dayanımının artması ile karbonatlaşma miktarı azalır. Bu olgu her tip beton için geçerlidir. Hem karbonatlaşma hem de basıncı dayanımı betonun boşluk yapısı tarafından önemli derecede kontrol edilir. Diğer taraftan karbonatlaşmanın bir ürünü olarak ortaya çıkan kalsiyum karbonat kalsiyum hidroksitten daha fazla yer işgal ettiğinden dolayı karbonatlaşmış betonların yüzey porozitesi azalır. Porozitenin azalması ile birlikte betonun basıncı dayanımında bir artmanın olması olağan gözükür. Aynı şekilde betonun yarma dayanımında da basıncı dayanımına benzer bir artış vardır. Hatta mukavemetteki artış %60’lara kadar çıkabilmektedir. Karbonatlaşmış betonun deformasyon kabiliyetinin azalmasına karşın mukavemetinde ve elastisite modülünde artma vardır [33,34].

2.4.3. Donatının korozyonu

Korozyon metallerin kademeli aşınması olarak tarif edilir. Korozyonun elektrokimyasal oluşunu metallerin pozitif yüklü iyonlarının elektrolitik bir ortamın negatif yüklü iyonları karşısında çözülmesi ve osmatik basıncılara bağlı olarak metalde farklı elektrostatik ykller veya potansiyel farklarının ortaya çıkmasıdır.

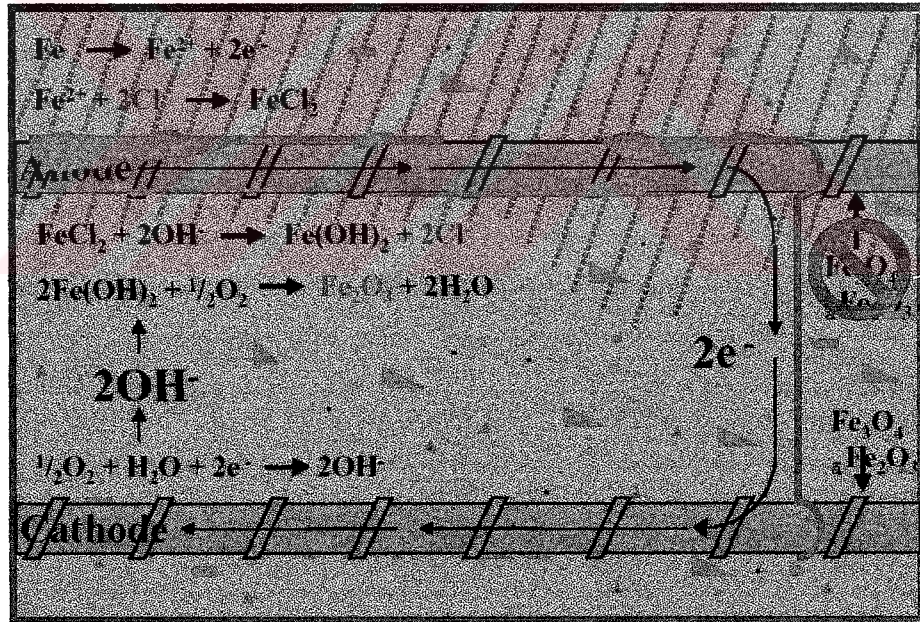
Bir elektrolit ortamda zelme gerilimleri farklı olan iki metalin birbirine değmesi sonucu, zelme gerilimi daha büyük olan metalden zelme gerilimi daha küçük olana doğru bir elektron akımı başlar. Böylece anot görevini yüklenerek devamlı elektron kaybeden metalden katota doğru bir elektron akımı olur ve anot görevini üstlenmiş olan metal sürekli tahrip olur.

İki metalin birbirine değmesi sonucu oluşan korozyonun dışında metallerde ayrıca kendi üzerinde hem anot hem de katotun oluştuğu korozyon eklidi vardır. Kendi kendine oluşan korozyonda bir malzeme yüzeyinin farklı dokuda olması, aynı yüzeyde dövme, haddeme veya kaynak gibi farklı işlemlerin bulunması veya yüzeyde farklı havalandırmaya maruz yerlerin varlığı gibi faktörler önem kazanır [35].

Demir ve çelik genellikle; oksijen ve suyun bulunduğu her ortamda korozyona uğrar. Korozyonun gerçekleşebilmesi için daima su ve oksijen gereklidir. Korozyon miktarını her ikisi de belirler. Örneğin, kuru havada çelikte korozyon görülmez.

Betonarme yapılarda donatı korozyonu iki şekilde başlayabilmektedir. Birinci durum normal olarak, bazik özellikte olan paspayı, betonunun yeterli geçirimsizliğe sahip olmaması nedeniyle karbonatlaşarak bazikliğini yitirmesi, böylece donatının korozyona açık hale gelme şeklidir. İkinci durumda ise korozyon, klor iyonlarının etkisi ile ortaya çıkmaktadır. Özellikle deniz kenarındaki yapılarda klor iyonları paspayını geçerek, donatıya ulaşabilmektedir. Beton alkalitesi sayesinde betonarme çeliği pasif durumdadır. Çeliğin pasifliğini azaltan koşullar aşağıdaki gibi sıralanabilir [17]:

- Ortamda çok fazla Cl^- bulunması (asidik ortama ihtiyaç duyar),
- Pasifliği azaltan iyonların çelik çubuk ile temasta olması ve
- Atmosferdeki karbondioksitin asidik reaksiyonları sonucu betonda alkalitenin azalmasıdır.



Şekil 2.16 Korozyonun sistematik ilerleyişi

Hem klorür iyonlarının hem de oksijenin betona difüzyonu karbonatlaşma tarafından oldukça fazla etkilendir. Betonun boşluk miktarı karbonatlaşma süresince oluşan ve Ca(OH)_2 'den hacimce daha fazla olan CaCO_3 'ün oluşmasıyla azalmaktadır. pH, klorür iyonu ve oksijen difüzyonundan fazlaca etkilenen korozyonun sistematik ilerleyişi şekil 2.16'daki gibidir.

pH'n etkisi: Beton, içerisinde bulunan (OH) iyonları nedeni ile pH derecesi 13 civarında olan bir karışımdır. Bu ortamdaki demirin üstünde siyah renk $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ve $\text{Fe}(\text{OH})_3$ birleşikleri koruyucu film olarak meydana gelir. Bu koruyucu film, betonarme demirinin elektrolit ile temasının kesilmesine ve korozyon reaksiyonunun durmasına neden olur. Bu nedenle demir ve beton yapı elemanı olarak en uyumlu malzeme çiftlidir. Atmosferdeki CO_2 gazı beton içerisine nüfus eder ve OH iyonlarını bağlayarak CaCO_3 nötr tuzunun meydana gelmesine sebep olur. Bu durumda betonarme yapıya özellik kazandıran OH iyonları kaybolacağından 13 pH değeri de 7-8 değerine düşecektir. Bu durumda demir Fe^{+2} ve Fe^{+3} iyonları haline geçer ve korozyona uğrar. Eğer pH değeri 8'den büyük ise oksit tabakası ile demir pasif hale gelir [17].

Klorür iyonu etkisi: Demirler beton içinde mümkün olduğunca derine (en az 5 cm) konularak korozyonun etkisi azaltılmaya çalışılır. Ancak bir çok halde betonarme demirleri üzerinde bulunan beton tabakası kalınlığını (pas payını) çok fazla artırabilmek mümkün olmaz.

Klorür iyonu beton içindeki korozyonun başlama süresini önemli derecede etkiler. Örneğin su/çimento oranı 0,60 olan bir beton, tuzlu su içinde bekletildiğinde, korozyon olayı 50 mm derinlikte yaklaşık olarak 80 günde başladığı halde, 75 mm derinlikteki betonarme demirlerinde korozyon olayının başlaması için en az 380 gün geçmesi gerekmektedir. Bu süreler betonun sürekli olarak su altında bulunması hali içindir. Zaman zaman ıslanan ve kuruyan betonlarda korozyon olayı çok kısa süre içinde başlayabilir.

Oksijen difüzyonu: Oksijen önce beton boşluklarına girerek orada bulunan beton boşluk suyu içinde çözünür. Daha sonra difüzyon yoluyla çözelti içinde hareket ederek metal yüzeyine ulaşır. Eğer beton kuru halde ise, bu durumda beton içinde bulunan boşluklar hava ile doludur ve metal yüzeylerine oksijen taşınması kolaylaşır. Betonarme demirlerinin korozyonu için hem suyun hem de oksijenin bulunması gerekir. Su ile doymuş haldeki betonlarda oksijen yetersizliği, kuru haldeki betonlarda da su yetersizliğinden korozyon hızında yavaşlama olur. Betonarme demirlerinin korozyonu beton boşluklarının yarıya kadar su ile dolu olması halinde ya da zaman zaman ıslanıp kuruyan betonlarda maksimum değere ulaşır.

Betonarme demirlerinin korozyonuna karşı alınabilecek önlemler, beton yüzeylerinin kaplanması, inhibitör kullanılması ve katodik korunma şeklindedir. Bu önlemler sırasıyla kısaca şöyle özetlenebilir.

- Betonun geçirimsizliği artırılarak beton için zararlı iyonlarının betona difüzyonu azaltılabilir. Bunu yapabilmek için beton yüzeyi geçirimsiz bir malzeme ile kapatılmalıdır. Bu amaçla çeşitli polimerler veya su geçirimsiz boyalar kullanılabilir.

- Korozyon hızını azaltıcı yönde etki eden malzemelere inhibitör denir. Beton içine karışım sırasında yeterli oranda inhibitör katarak betonarme demirlerinin korozyon hızı önemli

derecede azaltılabilir. Bu amaçla kullanılan bazı inhibitörler, kromatlar, fosfatlar, nitritler, organik esaslı inhibitör karışımlarıdır. Burada dikkat edilmesi gereken husus bazı inhibitörler betonun fiziksel özelliklerine olumsuz etki yapabilir.

- Betonarme demirlerinin korozyonunu önlemek için kullanılan en etkili yöntem katodik korumadır. Temel prensibi, korunacak olan metalin potansiyeli yeterince eksi yapılarak ona elektron verilir. Elektron verilince metalin çözünmesi azalma eğilimi gösterir. Ekonomik ve kesin bir çözüm olması nedeni ile bilhassa köprülerde ve liman gibi deniz yapılarında kullanılan bu yöntemin uygulanmasında karşılaşılan bazı güçlükler vardır. Bunlardan en önemlisi anotların beton içine yerleştirilme güçlüğüdür. Bu sakıncada tel kafes biçimli anotlar kullanılarak giderilmektedir [36].

2.5. Karbonatlaşmayı ve Zararlı Etkilerini Azaltma

Betonun dayanıklılığını sisteme nüfuz eden üç temel akışkan belirler. Bu akışkanlar: Agresif (zararlı) iyonlar içeren sular, karbondioksit ve oksijendir. Her üçünün de betona nüfuz etmesi çeşitli şekillerde olur. Sonuçta betonun geçirimsizliği (permabilite) betonun dayanıklılığında önemli rol oynar. Karbonatlaşmayı ve zararlı etkilerini de önleme ancak betonun geçirgenliğini önlemek ile mümkündür. Betonun permabilitesini ve porozitesini azaltmak üzere her şeyden önce iyi bir agrega ve uygun bir granülometri seçilmelidir. Bunun dışında aşağıdaki önlemlerin de alınması gerekir:

2.5.1. Çimento cinsi ve dozajı

Çimento dozajı artırıldığında beton yoğunluğu artar ve porozitesi azalır. Her ne kadar betonda karbonatlaşan kısmın miktarı artsa da porozite azaldığından dolayı karbonatlaşma miktarında azalma gözlenebilir. Kullanılan çimento cinsi de önemlidir. Pozolanlı çimentolar, beton boşluklarında bulunan serbest kireci silikat bileşikleri halinde bağlayarak beton boşluklarını doldurur. Böylece betonun permeabilitesinde azalma meydana gelebilir. Fakat fazla miktarda pozolan kullanılması dayanım açısından sakıncalıdır.

2.5.2. Su / Çimento oranı

Beton karışımı içine bazı özel katkı maddeleri katılarak su/çimento oranı düşük beton yapılabilir. Bu sayede beton içindeki boşluklar minimuma indirilmiş olur. Çimentonun

hidratasyonu için kimyasal olarak gerekli su miktarı % 30 dan daha azdır. Pratikte bu oran genellikle % 40-50 arasında alınır. Fazla su betonun boşluklu olmasına neden olur. Ayrıca beton karışımı içine hava katkı maddesi katılarak beton içindeki boşlukların kapalı hücreler halinde oluşması sağlanabilir. Böylece beton porozitesinin zararlı etkileri azaltılmış olur.

2.5.3. Beton dökümü ve kürü

Beton kalıplara yerleştirilirken, vibrasyon yapılarak tam olarak kalıp içine yerleşmesi sağlanmalıdır. Dökümden sonraki ilk günlerde, betonun içinde bulunduğu ortamın sıcaklığı ve relatif rutubeti beton kalitesi açısından büyük önem taşır. Dökümden sonra sıcak ve kuru ortamlarda bekletilen betonlar uygun şekilde kristalleşemediklerinden boşluk yüzdelерinde artış meydana gelir. Kür süresi ne kadar uzatılırsa betondaki karbonatlaşma derinliğinde de o kadar bir azalma olacaktır.

Karbonatlaşmada boşluk sistemlerinin öneminden bahsetmiştik. Özellikle kapiler boşluklar betonun geçirimsizliğinde ve dolayısıyla karbonatlaşmada önemli etkinlik derecelerine sahiptir. Kapiler boşluklar büyük ölçüde su/çimento oranına bağlıdır. Hidratasyon ilerledikçe C-S-H (tobermorit) oluştuğunda kapiler boşluklarda azalmalar görülür. Kapiler boşlukların azalması geçirimsizliğin artması için çimento hamuru iyi bir hidratasyon geçirmesi gerekir. Bu amaçla betonun hidratasyonu için gerekli suyun betonu hemen terk etmemesi için betona kür (taze betonu belirli sıcaklık ve nem altında bekletme) uygulanır. “Bu iş için en uygun ortam %95 nem ve 21-25 °C sıcaklıktır” [22]. Su/çimento oranına bağlı olarak kapiler boşlukların devamsız hale gelebilmesi için gerekli kür süreleri değişir (tablo 2.4).

Tablo 2.4 Devamsız Kapiler Boşluk Sistemi Yaratmak İçin Gerekli Kür Süreleri

Su/Çimento	0.4	0.45	0.50	0.60	0.70	>0.70
Kür süresi (gün)	3	7	28	180	365	İmkansız

2.5.4. Yeniden alkalinizasyon

Betonun hasar görmesi klor iyonları ve karbondioksit gibi maddelerin betona penetrasyonu ve/veya beton içinde çözülmesi ile oluşur. Klor iyonları veya karbonatlaşma sonucu hasar görmüş betonarme yapıların tamiri ve servis ömrünün artırılması için çeşitli kimyasal rehabilitasyon yöntemleri vardır. Elektrokimyasal metotlar betondaki iyon hareketini kontrol ederek betonun hasar görmesini engeller. Elektrokimyasal realkalinizasyona aktif realkalinizasyon da denilebilir.

Aktif realkalinizasyon elektrik akımı kullanarak betona katyon verme işidir. Kalsiyum iyonu (Ca^{+2}) gibi katyonlar, betonun dayanıklılığı için gerekli olan en önemli iyonlardır. Bu yöntem karbonatlaşma sonucu betonun azalan pH değerini arttırmayı sağlayabilir. Realkalinizasyon sırasında, donatılarda suyun elektroliz reaksiyonu ile oluşan hidroksit iyonları betonun karbonatlaşan kısmına ilerleyebilir. Bu ilerleyen hidroksit iyonları betonun pH değerini de düzenleyebilir.

Aktif realkalinizasyonun dışında betonun pH değerini artıran bir de pasif realkalinizasyon vardır. Pasif realkalinizasyon yöntemi beton yüzeyini kireç yönünden zengin portland çimentolu sıva ile örtmektir. Uygulanan sıva tabakasındaki Ca^{++} ve $(\text{OH})^-$ iyonlarının betona süzülmesi için uzun süre ıslak tutulması gerekmektedir. Pasif realkalinizasyon mikro yapı üzerinde hiçbir değişim meydana getirmemektedir. Olumlu sonuç sadece iyon transferi ile gerçekleşmektedir. Pasif yöntemde betonun sadece boşluk suyu alkaline duruma getirilebilir.

Realkalinizasyon tekniğinin çok fazla yaygınlaştığı söylenemez fakat özellikle yeniden yapımı zor olan önemli betonarme yapılar için etkili bir yöntemdir. Ayrıca realkalinizasyon yönteminin uygulanma prosedürü tam olarak netliğe kavuşmamıştır [8].

2.5.5. Beton rutubeti

Elektro kimyasal açıdan bakıldığında, beton rutubetinin korozyon üzerine iki şekilde etki yaptığı görülür. Her şeyden önce su korozyon hücrelerinin elektroliti olarak gereklidir. Rutubetin ikinci etkisi, betonun elektriksel direncini azaltıcı, yani iletkenliğini artırıcı olarak rol oynamasıdır. İyonik iletkenliğin yüksek oluşu korozyon hücrelerinin gelişmesini kolaylaştırır. Tamamen kuru olan bir ortamda ne karbonatlaşma ne de korozyon gerçekleşir. Bu sebeplerden dolayı, özellikle temel gibi yapı elemanlarında yer altı suyuyla karşı tedbir alınmalıdır. Bu amaçla yalıtım yapılabileceği gibi yalıtımın yanı sıra yer altı suyunun fazla olduğu durumlarda drenaj yapılabilir.

Dış ve iç sıva gibi koruyucu malzemeler ile betonun kaplanması karbonatlaşmayı azaltıcı yönde etkilidir. Özellikle sıvalarda perdahlamaya ve son katta boşluksuz bir yüzey elde etme işine özen gösterilmelidir.

3. KARBONATLAŞMA İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

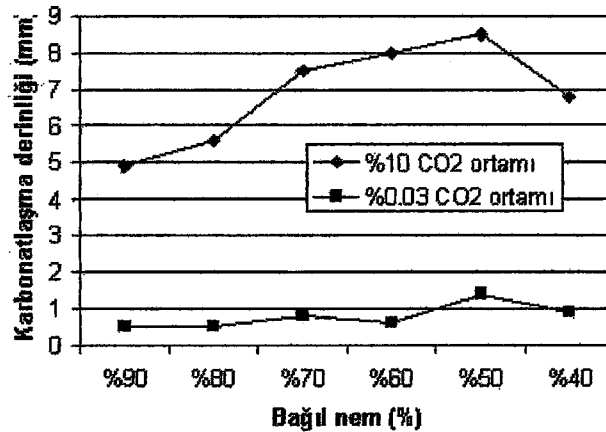
Karbonatlaşma üzerine yapılan çalışmalar için iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler hızlandırılmış karbonatlaşma ve gerçek ortamdaki karbonatlaşmadır. Karbonatlaşma üzerine yapılan çalışmalarda ağırlıklı olarak hızlandırılmış karbonatlaşma yöntemi ile yapılanların çokluğu göze çarpmaktadır. Fakat bazı çalışmalarda her iki yöntemde kullanılmıştır. Bundan dolayı literatür taramaları; çevresel etkiler, kompozisyonel etkiler ve teoriksel çalışmalar olarak üç ana başlık altına toplanmıştır

3.1. Çevresel Etkiler

De Ceukelaire ve Van Nieuwenburg [19], 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. Bağıl nem ve ortamın karbondioksit miktarı ile ilgili bulduğu sonuçlar tablo 3.1 ve şekil 3.1'de özetlenmiştir.

Tablo 3.1 Bağıl Nem ile Karbonatlaşma İlişkisi

Bağıl nem	Karbonatlaşma derinliği %10 CO ₂	Karbonatlaşma derinliği %0,03 CO ₂ 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



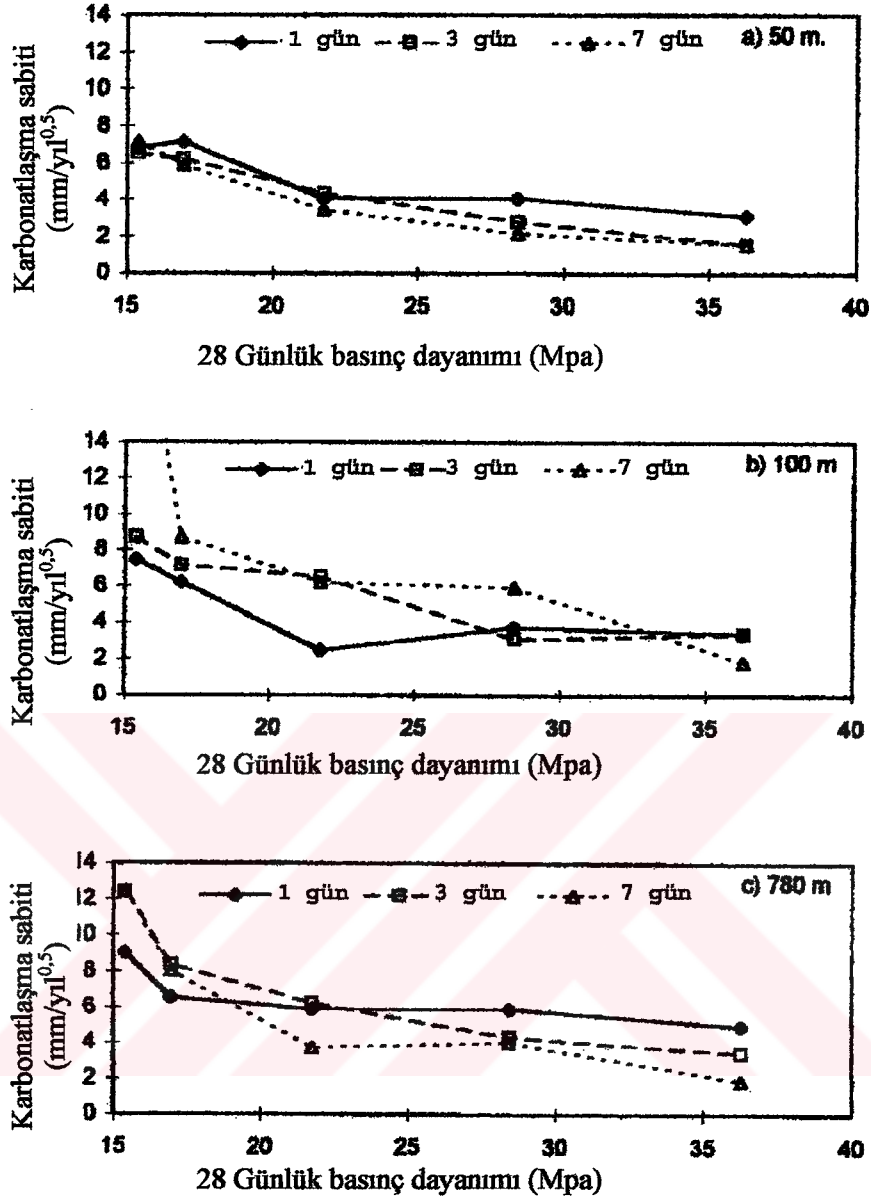
Şekil 3.1 Bağıl Nem ile Karbonatlaşma İlişkisi

Yılmaz [17] , Betonun karma ve bakım suyundaki bazı iyonların beton dayanımı üzerine etkisini araştırmıştır. Çalışmasında KPÇ 325 kullanarak su/çimento oranını 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 karbonasyon olayı ile özdeşleştirilirse şu neticeye varılır. Karbonatlaşma arttıkça betonun basınç dayanımı da artacaktır.

Castro ve diğ. [37], Deniz atmosferinde bulunan yapıların karbonatlaşmadan 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 oranı 0.76, 0.70, 0.53, 0.50 ve 0.46 ve su altında kür edilme süreleri 1, 3 ve 7 gündür. Numunelerin karbonatlaşma derinliklerini 31 ay sonra ölçmüşler (şekil 3.2). 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 konsantrasi 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. Araştırmalarının öneri kısmında küçük çaptaki saha çalışmasının yetersiz olduğunu belirtmektedirler. Araştırmaların daha geniş bir alanda yapılması sonuçların daha mantıklı olacağı kanaatine varmışlardır.



Şekil 3.2 Denizden 50 m, 100 m ve 780 m uzaklıktaki betonlarda, 1, 3 ve 7 günlük kür sürelerinin ve basınç dayanımlarının karbonatlaşma sabitine etkisi.

Al-Khaiat ve Haque [38], 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 ile iklim şartları ve denize mesafeleri aynı uzaklıktaki ama yangından etkilenmeyen binalar ile arasında karbonatlaşma derinliği açısından kıyaslama yapmışlar. Çalışmalarının neticesinde aşağıdaki bulgulara ulaşmışlar.

1. Kuveyt'deki kıyı binalarının karbonatlaşma derinliği yakın kıyı binalarınınkinden daha yüksektir.

2. Karbonatlaşma derinliği beton kalitesi ve basınç dayanımının bir fonksiyonudur

Parott ve Killoh [39] 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 hidroksitin ((Ca(OH)₂) var olduğunu bulmuşlar. Karbonatlaşmanın belirli bir derinliğe inmesi demek o derinliğe kadar olan tüm bölgenin karbonatlaşması anlamına gelmediğini bulmuşlardır.

Roy ve diğ. [40] 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 kültür ile başlıklaması yapıldıktan sonra ölçümleri yapılmıştır (Tablo 3.2) .

Tablo 3.2 Singapurdaki binaların, yaş ve basınç dayanımlarına göre karbonatlaşma derinlikleri

Bina yaşı (yıl)	Küp dayanımı <20 MPa		Küp dayanımı >20 Mpa	
	Karbonatlaşma derinliği (mm)	K (mm/yıl ^{0.5})	Karbonatlaşma derinliği (mm)	K (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, $d = K\sqrt{t}$ formülü ile ortalama K sabitini yaklaşık olarak 7 mm/yıl^{0.5} bulmuşlar. Karbonatlaşma derinliği ve K sabiti betonun yaşından başka betonun dayanımına da bağlı olduğunu belirtilmiş. Çalışmalarında buldukları K değerleri (5.5-8.6 mm7yıl^{0.5}) ılıman iklimler için daha önce rapor edilen K değerlerinden (1-3 mm/yıl^{0.5}) daha yüksek olduğunu belirtmişler. Bunun sebebini beton sınıfının düşük olmasına ve diğer ılıman iklimlerdeki sıcaklıklar 8- 9 °C iken singapurdaki sıcaklığın 27 °C olmasına bağlamışlar.

3.2. Kompozisyonel Etkiler

Cebeci [10], yaptığı çalışmasında; 250, 300, 350 dozajında çimento ve su/çimento oranı 0.45, 0.60, 0.75, olan numunelere 6 ay süre ile %99 nemlikte kür uygulamış daha sonrada %70 nemli 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.

Jhonson [41], daha çok atıl malzemelerin tek başlarına yapmış oldukları karbonatlaşma ve aralarında kıyaslamaya dayalı bir araştırma gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu çalışmada kalsiyum silikat içeren hidrolik olmayan atıl curuf 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 ile yapmıştır. Bu malzemelerden en fazla karbonatlaşmayı paslanmaz çelik imalatından çıkan curuf yapmıştır.

Çalışmasının ikinci aşamasında paslanmaz çelik imalatının curufunu çimento katkı malzemesi olarak kullanmış ve bu malzemeyle dökülen betonların hızlandırılmış karbonatlaşmasına bakmıştır.

Kobayashi ve Uno [42], 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 kanısındadırlar.

Atiş [43] uçucu küller ile yapılan betonların hızlandırılmış karbonatlaşması üzerine bir çalışma yapmıştır. Uçucu küllü betonlar üzerine daha önceden yapılmış çalışmalarda çelişkili ifadeler olduğunu belirtmektedir. Çalışmasında ağırlıkça %50 ve %70 uçucu küllü çimento ile yer değiştirerek numuneler hazırlamıştır. Toplam 5 seri beton numunesi hazırlamış bunlar sırasıyla normal portland çimentolu (M0), 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 (Tablo 3.3 ve 3.4).

Hızlandırılmış karbonatlaşma testinden önce yapılan kür şartlarının tamamında M1 ve M2 betonları hem M3 ve M4'den hem de normal portland çimentolu betonlardan fazla karbonatlaşmıştır. M3 ve M4 betonları normal betonla aynı karbonatlaşma derinlikleri göstermiştir. Süper akışkanlaştırıcı katkı maddesinin karbonatlaşma üzerine etkisinin önemsiz olduğunu vurgulamıştır.

Tablo 3.3 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
M0	9.60	8.50	6.50	5.00
M1	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 3.4 Uçucu küllü betonlarda %100 nem ve 20 °C'de kür süresinin hızlandırılmış karbonatlaşma derinliğine etkisi

Seri no	3 gün	7 gün	28 gün	3 ay
M0	9.10	7.40	4.50	3.30
M1	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 [44] 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 şartlarda 90 gün tutulmuştur. Numunelerde çimentonun yerine ağırlıkça %10, %20 ve %40 oranlarında uçucu kül ilave etmiştir. Bakım 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.

3.3. Teoriksel Çalışmalar

Loo ve diğ. [20] 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

$$K = \alpha(f_{28})^a \cdot (C_0)^b \cdot \exp(cT) \cdot (t_{wc})^d + \beta \quad (3.1)$$

K : Karbonatlaşma hızı

F₂₈ : 28 günlük basınç dayanımı

t_{wc} : Kür süresi

C₀ : Karbondioksit konsantrasyonu

T : Sıcaklık

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

Jiang ve diğ. [26] çalışmalarında 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 C⁰, 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 karşılaştırılmıştır. 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 kullanılabileceğini belirtmektedirler.

$$x = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W/B^* - 0.34}{\alpha k^1 C}} C_0 \sqrt{t} \quad 2.11$$

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. Araştırmacıların kullandıkları serilerin özellikleri ile deneysel çalışma ve modelden elde ettikleri verilerin karşılaştırmalı sonuçları tablo 3.5 ve 3.6'de verilmiştir.

Tablo 3.5 Beton karışımlarının özellikleri

Seri no	Çimento (kg/m^3) (C)	Uçucu kül (kg/m^3) (U)	U/C+U (%)	Su/C+U	Slump (mm)
F1-55	100	122	55	0.46	50
F2-55	150	183	55	0.38	70
F2-70	100	233	70	0.37	70

Tablo 3.6 Karbonatlaşma derinliklerinin deneysel veriler ve modelle kıyaslanması

Seri no	Maruz bırakılan süre (gün)	Tahmin ^a	Deney ^a	Tahmin ^b	Deney ^b
F1-55	7	16	20	14	16
	14	21	22	20	18
	28	29	25	27	22
F2-55	7	10	13	9	9
	14	14	16	13	12
	28	18	18	17	14
F2-70	7	19	17	18	15
	14	27	25	25	22
	28	37	42	36	40

^a 28 günlük kür

^b 90 günlük kür

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Karışım Elemanları

4.1.1. Çimento

Deneylerde Elazığ Altınova Çimento San. T.A.Ş.'nin ürettiği PKÇ/B 32.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan puzolonik katkılı çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1 Çimentonun fiziksel ve kimyasal analizleri

PKÇ/B 32,5 R	Kimyasal Analiz									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K.K.	Katkı	T.E.	Cl ⁻
	26,86	8,09	5,18	45,88	3,64	2,41	2,95	33,27	4,99	0,01
	Fiziksel Analiz									
	45 µ	Blaine	Priz b.	Priz s.	Öz. Ağ.	Yoğunluk	H. gen.	2 gün	7 gün	28 gün
	1,9	4326	02:35	03:45	2,98	925	4	16,9	28,4	39,0

4.1.2. Agregası

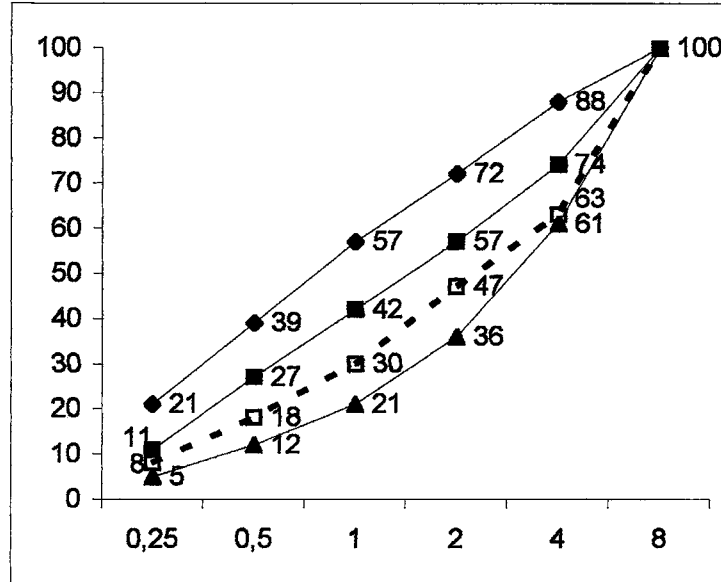
Beton üretiminde kullanılan agrega, minerolojik olarak nehir kumu niteliğindedir. Agregası maksimum tane büyüklüğü 8 mm olarak seçilmiştir. Agregası 0-4 mm ve 4-8 mm olarak iki sınıfa ayrılarak kullanılmıştır. Elazığ Palu ilçesinden geçen Murat Nehri'nden temin edilen agregası ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler tablo 4.2'de verilmiştir. Ayrıca kullanılan agregaların elek analizleri TS 706'ya [45] göre yapılmıştır (Tablo 4.3 ve Şekil 4.1) .

Tablo 4.2 Beton üretiminde kullanılan agreganın özellikleri

Agregası Türü	Özgöl ağırlığı (g/cm ³)	Su emme (%)	Aşınma kaybı (%)	Kil miktarı (%)
Nehir kumu	2.15	3,5	16,8	2

Tablo 4.3 Maksimum tane çapı 8 mm'lik agreganın granülometrisi

Elek No	Her elek üstünde kalan	Kamulatif (%)		Standart limitler (TS 706) % geçen	
	(%)	Kalan	Geçen	Alt	Üst
8	0	0	100	100	100
4	37	37	63	61	85
2	16	53	47	36	72
1	17	70	30	21	57
0.5	12	82	18	12	39
0.25	10	92	8	5	21
Top. Kabı	8	100	0	-	-



Şekil 4.1 Maksimum tane çapı 8 mm'lik agreganın granülometri eğrisi

4.1.3. Seriler ve özellikleri

Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi için 4 farklı sıkıştırma oranında beton numune hazırlanmıştır. Numunelerin tamamında karışıma giren malzeme oranları aynıdır. Karışım giren malzeme miktarları sırasıyla 770 kg/m^3 4-8 mm agreg, 810 kg/m^3 0-4 mm kum, 415 kg/m^3 çimento ve 220 kg/m^3 su'dur. Numuneler arasındaki tek fark sıkıştırma biçim ve teknikleridir (Tablo 4.4). Deneylerde $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$ küp numuneler kullanılmıştır.

Tablo 4.4 Seriler ve özellikleri

Seri No	Su/Çimento	Sıkıştırma oranları	Bekletildiği ortam	
			Dışarıda	0,8 bar
I	0,53	Vibrasyon masası	210, 270 gün	6 saat, 1, 3 gün
II	0,53	25 kez şiş ile	210, 270 gün	6 saat, 1, 3 gün
III	0,53	10 kez şiş ile	210, 270 gün	6 saat, 1, 3 gün
IV	0,53	Sıkıştırılmamış	210, 270 gün	6 saat, 1, 3 gün

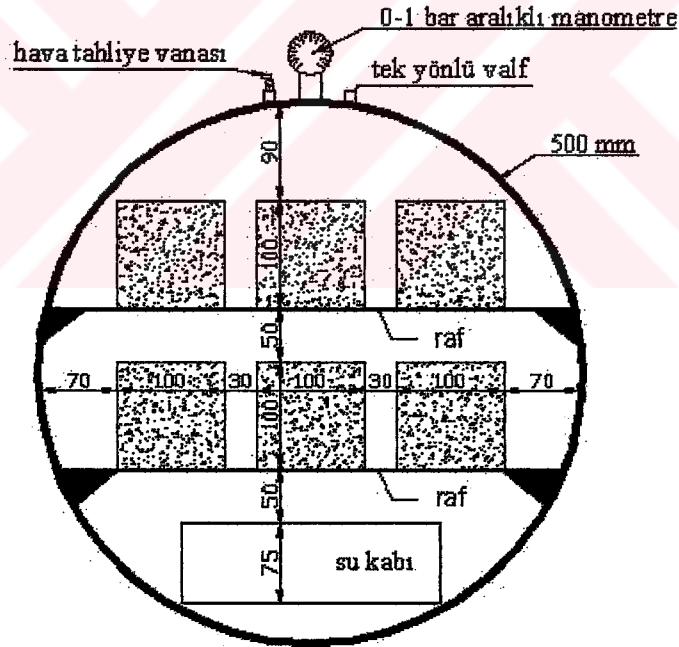
4.2. Deney Düzeneği ve Hazırlığı

Hızlandırılmış karbonatlaşma testi betonun zenginleştirilmiş karbondioksit ortamına maruz bırakılmasından ibarettir. En belirgin avantajlarından biri sonuçların çabuk elde edilmesidir. Hızlandırılmış karbonatlaşma test metoduna dair herhangi bir standarda

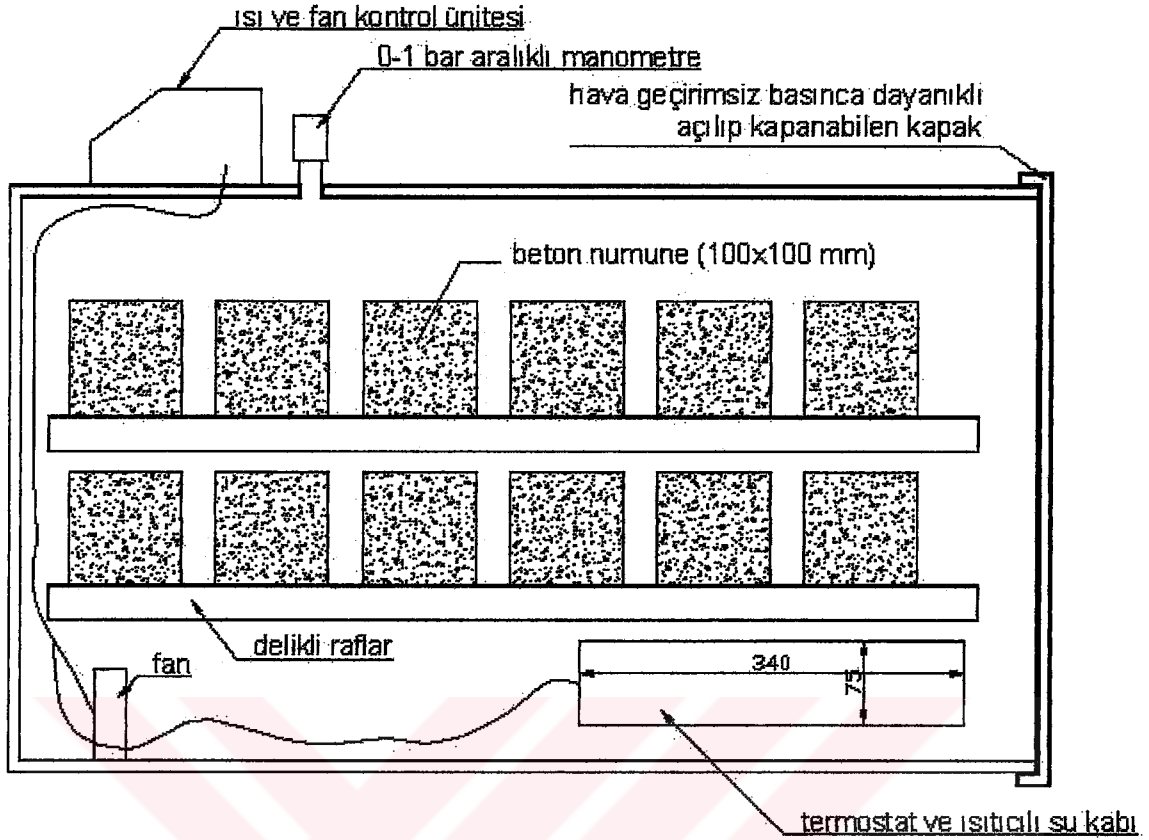
rastlanılmamış fakat genel olarak yapılmış olan çalışmalarda ortam karbondioksitinin %4 ile %100 arasında değişik oranlarda yer aldığı gözlemlenmiştir.

Deney sonuçlarının daha çabuk elde edilmesi amacıyla bu çalışmada da hızlandırılmış karbonatlaşma test metodu kullanılmıştır. Bu amaçla ilk etapta gaz sızdırmazlığı olan bir tank tasarlanmış ve içerisine gerekli ekipmanlar yerleştirilmiştir. Yerleştirilmiş bu ekipmanlar 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. İç hacmi 175 litre olan tankın enine ve boyuna kesitleri şekil 4.2.a ve 4.2.b'de verilmiştir.

Hızlandırılmış karbonatlaşma test tankının hazırlanmasında öncelikli olarak dikkat edilmesi gereken, tankın bir miktar basınca dayanıklı ve gaz sızdırmazlığının olmasıdır. Gazın tank içine eşit miktarda yayılması için silindir şeklinde, 90 cm derinlikte ve 50 cm çapında bir tank tasarlanmıştır. Silindir şeklindeki tankın düz olan yüzeylerinden biri sabitlenerek kapatıldı ve diğer yüzeyine ise açılıp kapanabilen bir kapak yerleştirilmiştir.. Sızdırmazlığı sağlamak için kapak ile gövde arasına özel olarak hazırlanmış conta konulmuştur.



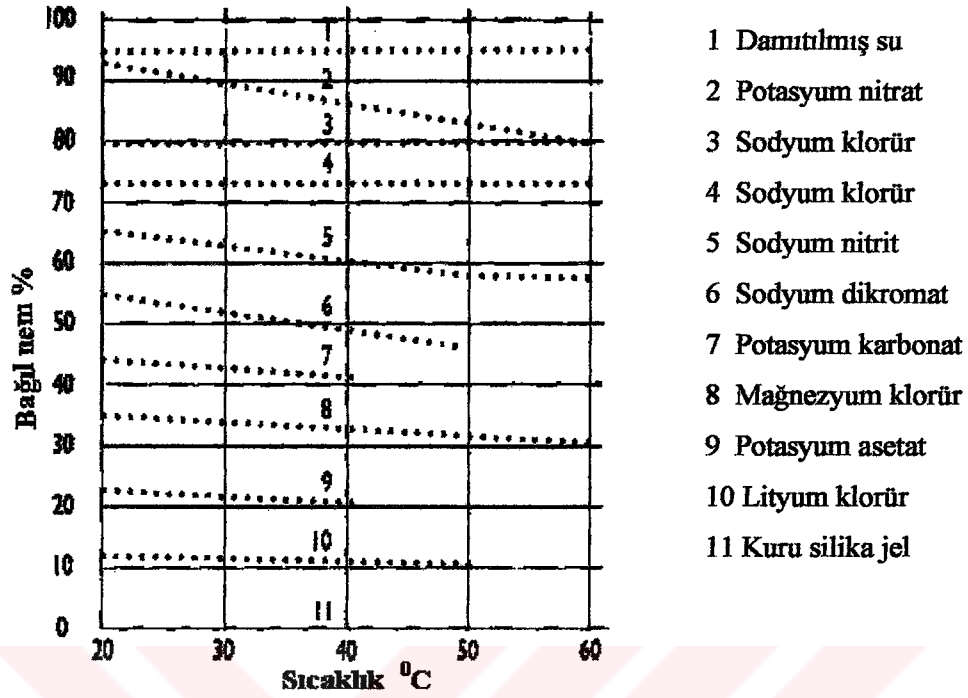
Şekil 4.2.a Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı enine kesiti



Şekil 4.2.b Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı boyuna kesiti

Çok sayıda beton numunenin aynı anda koyulabilmesi amacıyla iki katlı olarak tasarlanan tankın katları delikli raflar ile ayrılmıştır. Bu delikli raflar ve tankın alt kısmına yerleştirilen fan, her iki katta da karbondioksitin eşit bir şekilde dağılmasını sağlamıştır. Kapak ile gövdenin tam oturması amacıyla kapağın her iki tarafına saplamaları olan büyük ölçülerde kelebek somunlar hazırlanmıştır. Son olarak deney boyunca tankın dış tarafından içerideki sıcaklığı, basıncı ve fanı kontrol etmek için; tankın üst tarafına kontrol ünitesi, hava tahliye vanası ve manometre konulmuştur.

Hızlandırılmış karbonatlaşma testi için hazırlanan serilerin arasındaki karşılaştırmaların daha sağlıklı olabilmesi için değişik nem oranlarında ve zaman dilimlerinde ölçümler yapılmıştır. Tank içindeki nemin ayarlanmasında şekil 4.3’de verilen grafikten yararlanılmıştır. Şekil 4.3’den 20 °C sıcaklıkta %80 nem için sodyum klorür, %55 nem için sodyum dikromat, %35 nem için magnezyum klorür seçilmiştir. Seçilen bu tuzların doymuş haldeki çözeltileri sırası geldiğinde tankın su kabına konulmak üzere tablo 4.5’e göre hazırlanmıştır.



Şekil 4.3. Sıcaklık, Nem ve Tuz İlişkisi [46]

Tablo 4.5 100 gr Suda değişik sıcaklıklardaki doymuş tuz çözeltileri [47]

	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Potassium nitrate (KNO ₃)	13,3	20,9	31,6	45,8	63,9	85,5	110	138	169	202	246
Sodium chloride (NaCl)	35,7	35,8	36	36,3	36,6	37	37,3	37,8	38,4	39	39,8
Sodium chloride	35,7	35,8	36	36,3	36,6	37	37,3	37,8	38,4	39	39,8
Sodium nitrite (NaNO ₂)	72,1	78	84,5	91,6	98,4	104,1			132,6		163,2
Sodium dichromate (Na ₂ Cr ₂ O ₇)	163		177,8			244,8		316,7	376,2		
Potassium carbonate (K ₂ CO ₃)	105,5	108	110,5	113,7	116,9	121,2	126,8	133,1	139,8	147,5	155,7
Magnesium chloride (MgCl ₂)	52,8	53,5	54,5		57,5		61		66		73
Lithium chloride	216,7	233,9	255,6	238,8	323,3						

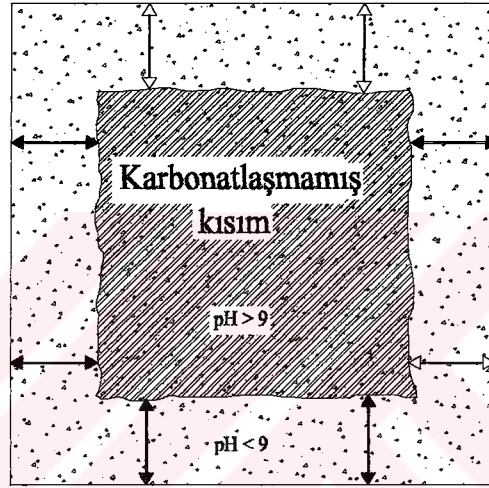
4.3. Deneyler

Deneylere başlamadan önce deneme amaçlı numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelerle hem hızlandırılmış karbonatlaşma tankının kullanılabilirliği hem de deneylerde hangi zaman dilimlerine bakılması gerektiği araştırılmıştır. Deneme amaçlı hazırlanan numunelerden elde edilen sonuçlara göre numunelerin 0,8 bar basınç altında 6 saat, 1 gün ve 3 gün tankta bekletilmesine karar verilmiştir.

Her bir nem gurubu için ayrı zamanlarda 24'er adet numune dökülmüştür. Hazırlanan numuneler 1 gün kalıpta bekletildikten sonra 21 gün 20 °C sıcaklıkta %95 ±5 bağıl nemde bekletilmiş ve 28. günde deneylere hazır hale getirilmiştir. 28 günlük numuneler tankın içine

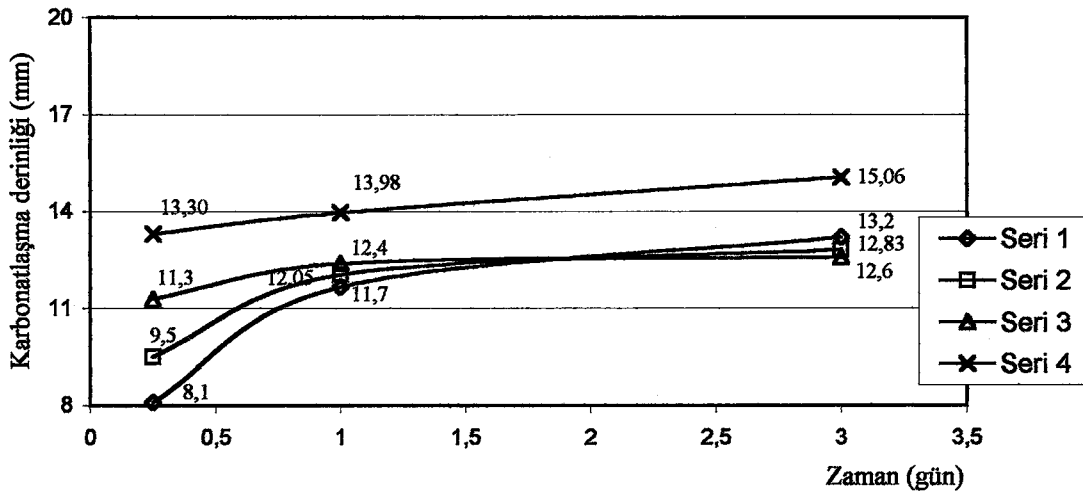
yerleştirilerek ve tankın kapağı sıkıca kapatılmıştır. Tek yönlü valft aracılığı ile karbondioksit dolu tüpten tankın içerisine basınç 0,8 bar (~%40 CO₂) olana kadar karbondioksit verilmiştir. Numuneler 6saat, 1 gün ve 3 günlük süreler halinde bekletilmiştir.

Tanktan çıkarılan numunelerin basınç dayanımlarına bakılmıştır. Pres aletinde kırılan numunelerin kalıp gören karşılıklı iki yüzeyi doğrultusunda kesilmiş ve kesilen bu yüzey tel fırça ile toz ve gevşek partiküllerden arındırılmıştır. Karbonatlaşma derinliği için F.Ü. Kimya Bölümünde %1 phenolphtaleinin %70 etil alkolde çözülmesiyle indikatör hazırlanmıştır. Hazırlanan bu indikatör taze olarak kesilen yüzeyin temizlenmesinin hemen ardından püskürtülmüş ve püskürtülen yüzey üzerinde renksiz kalan kısımların derinliği 0,01 mm hassasiyetli elektronik kumpas ile şekil 4.5’deki gibi 8 farklı yerden ölçümler alınmıştır.

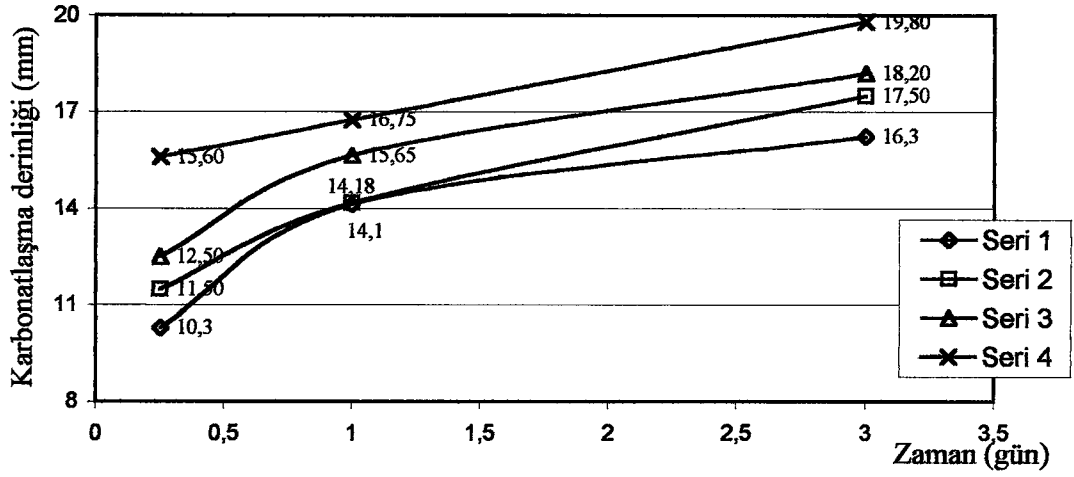


Şekil 4.5 Karbonatlaşma derinliklerinin ölçümü

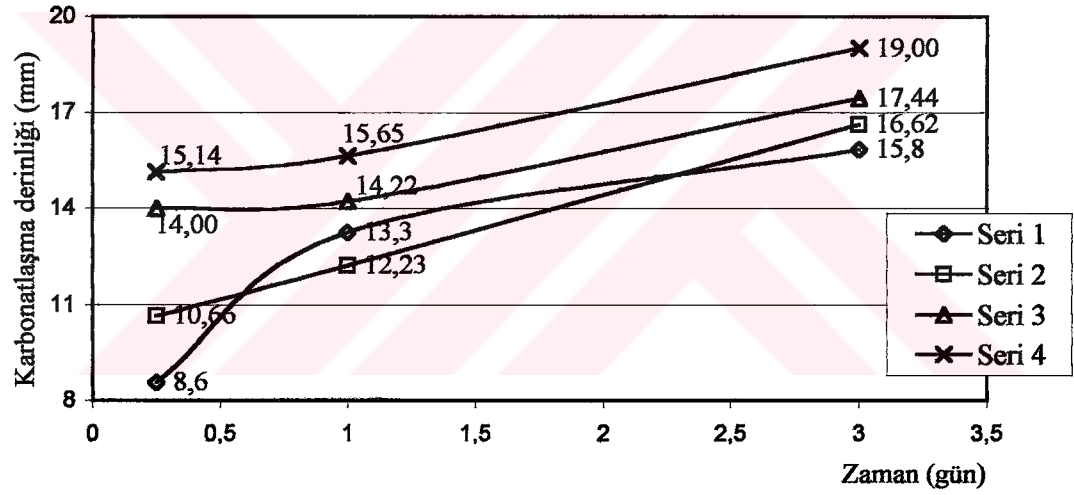
Numunelerin ortalama karbonatlaşma derinlikleri, zaman ve bağıl neme göre 4 serinin karşılaştırması şekil 4.6, 4.7 ve 4.8’de grafiksel olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.6 %35 Bağıl nemde karbonatlaşma derinlikleri



Şekil 4.7 %55 Bağıl nemde karbonatlaşma derinlikleri



Şekil 4.8 %80 Bağıl nemde karbonatlaşma derinlikleri

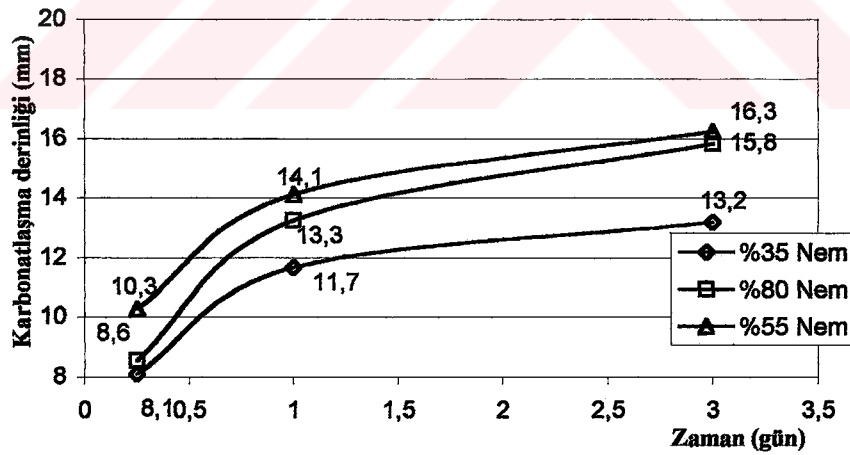
Farklı sıkıştırma oranlarına sahip numunelerin kendi içinde değişik nem ortamlarında nasıl karbonatlaşma davranışı yaptığını gözleyebilmek için aynı serinin farklı nem oranlarında yaptıkları karbonatlaşma derinlikleri tablo 4.6 ve şekil 4.9, 4.10, 4.11, 4.12'de verilmiştir.

Hızlandırılmış karbonatlaşma tankının içerisinde yapılan deneylerin haricinde birde laboratuvar ortamında aynı tarz sıkıştırma oranlarına sahip numunelerin 210 günlük ve 270 günlük karbonatlaşma derinlikleri ölçülmüştür (Tablo 4.6).

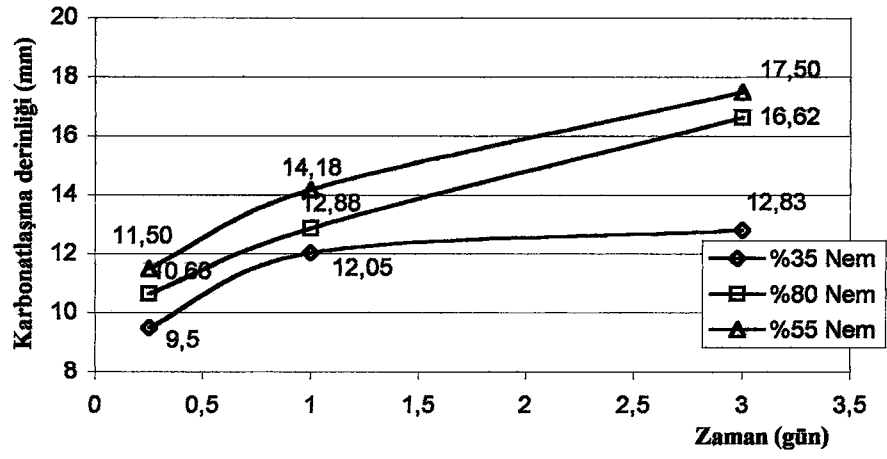
Tablo 4.6 Serilerin karbonatlaşma derinlikleri ve % değişimleri

Nem	Zaman	I. seri		II. seri		III. seri		IV. seri	
		Karb. (mm)	Değişim (%)	Karb. (mm)	Değişim (%)	Karb. (mm)	Değişim (%)	Karb. (mm)	Değişim (%)
% 80 0.8 bar	6 saat	8.60	-	10.66	23.9	14.00	62.7	15.14	76.0
	1 gün	13.30	-	12.23	0.92	14.22	6.9	15.65	17.6
	3 gün	15.80	-	16.62	5.1	17.44	10.4	19.00	20.3
% 55 0.8 bar	6 saat	10,30	-	11.50	11.7	12.50	21.4	15.60	51.5
	1 gün	14,10	-	14.18	-	15.65	11.0	16.75	18.8
	3 gün	16,30	-	17.50	7.4	18.20	11.7	19.80	21,5
% 35 0.8 bar	6 saat	8.10	-	9.50	17.3	11.30	39.5	12.30	51.8
	1 gün	11.70	-	12.05	3.0	12.40	6.0	13.98	19.5
	3 gün	13.20	-	12.83	0.97	12.60	0.95	15.06	14.1
Normal ortam	210 gün	4.34	-	4.83	11.2	5.50	26.7	5.75	32.5
	270 gün	5,68	-	5,79	1,9	6,67	17,4	10,10	77.8
Bas day. (N/mm ²)		31		33		29		19	

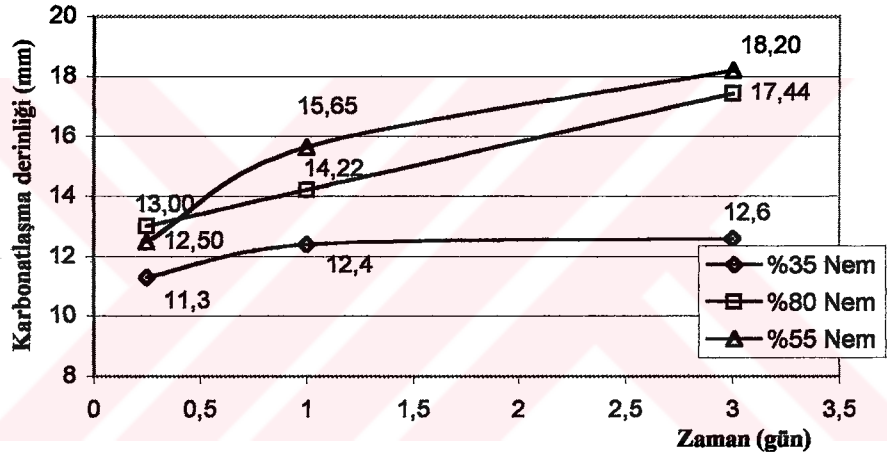
Karbonatlaşmanın % değişim kısmı I. seri baz alınarak yapıldı. Buna göre I. seriye ait numunelerin gördüğü şartlar ile aynı şartlara sahip fakat sıkıştırma oranları farklı olan diğer numuneler arasındaki % değişim kıyaslandı. Tablo 4.6'da verilen basınç dayanımları her bir seriye ait kırılmış olan tüm numunelerden (18 ad.) elde edilen dayanımların ortalamasıdır.



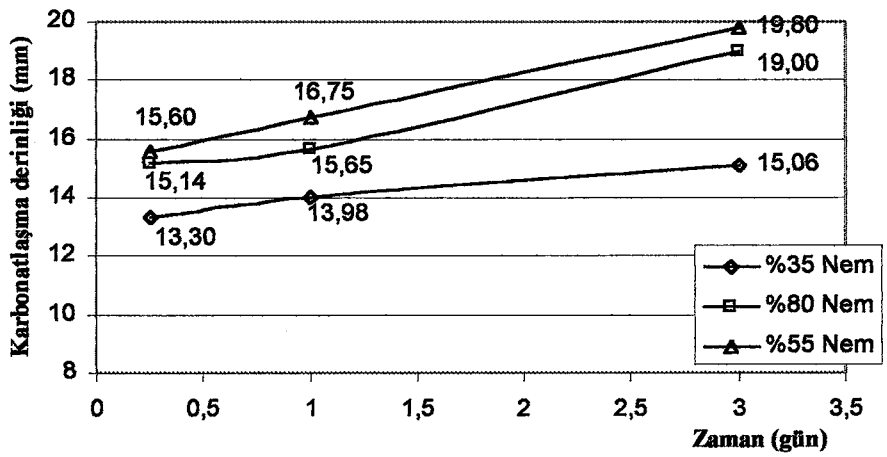
Şekil 4.9 I. Serinin farklı nem oranlarındaki karbonatlaşma derinlikleri



Şekil 4.10 II. Serinin farklı nem oranlarındaki karbonatlaşma derinlikleri



Şekil 4.11 III. Serinin farklı nem oranlarındaki karbonatlaşma derinlikleri



Şekil 4.12 IV. Serinin farklı nem oranlarındaki karbonatlaşma derinlikleri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deneilerin tamamında ilk bakışta IV. seri yani hiç sıkıştırılmayan numunelerin karbonatlaşma derinliğinin diğer serilerden oldukça fazla oluşu dikkat çekmektedir. III. seri az miktarda sıkıştırılmış olmasına rağmen karbonatlaşma açısından diğer serilere yakındır. Sıkıştırma faktörü iyileştikçe karbonatlaşma ona paralel olarak azalmaktadır. Karbonatlaşma açısından en verimli sonucu I. seri (vibrasyonla sıkıştırma) göstermiştir.

Karbonatlaşma derinliği açısından IV. seri %80 bağıl nem'de 6saat sonunda I. seriye göre %76, 3 günün sonunda ise yine I. seriye göre %20 daha fazladır. Diğer nem gruplarında da serilerin aralarındaki fark hemen hemen aynıdır. Tüm nem oranlarında da zaman faktörü ilerledikçe serilerin karbonatlaşma derinlikleri birbirlerine yaklaşmaktadır.

Üç nem gurubunda da serilerin karbonatlaşma eğilimleri birbirine benzemektedir. Daha önceden yapılmış araştırmalardan elde edilen bulgulara göre bu çalışmada en az karbonatlaşma %35 nem gurubundan beklenmekteydi. Bu çalışmada özellikle %35 bağıl nemde bekletilen numunelerin karbonatlaşmaları yavaşlama eğilimindedir. Hatta II. ve III. serinin karbonatlaşmaları 3. günde durmaktadır. Ortamda reaksiyonun ihtiyaç duyduğu suyun az olması %35 nemde karbonatlaşmayı yavaşlatmıştır.

Karbonatlaşma davranışı yönünden 0,8 bar basınç altında 6 saat bekletilen numuneler ile normal ortamda 210 gün bekletilen numuneler benzerlik göstermektedir. Karbonatlaşma derinlikleri aynı olmasa bile serilerin aralarındaki oran hemen hemen aynıdır.

Numunelerde sıkıştırma oranı azaldıkça karbonatlaşma derinliğinin ölçümünün yapıldığı hat daha çok girintili ve çıkıntılı bir görünüm kazanmaktadır. Sıkıştırma oranı azaldıkça betonun homojenliğinin de buna paralel olarak bozulması sebep olarak gösterilebilir.

Hızlandırılmış karbonatlaşma deney düzenekleri hazırlandıktan sonra deneye maruz bırakılacak numunelerin özelliklerine göre hangi zaman dilimlerine bakılacağı araştırılmalıdır. Özellikle hazırlanan düzeneğe ve numunelere göre karbonatlaşmanın ne zaman ölçülebilir değere geldiği, yavaşlamaya başladığı ve durduğu zaman iyi bilinmelidir. Sık aralıklarla ölçümler yapıldıktan sonra bunlar arasından mantıklı en az üç zaman dilimi seçilmelidir.

Sıkıştırma faktörünün betonun geçirgenliğinde önemli rol oynadığı kesindir. Bu çalışmada az sıkıştırılan bir beton iyi sıkıştırılan betona göre en az %6 en fazla %60, hiç sıkıştırılmayan bir beton ise en az %14 en fazla %75 oranında daha fazla karbonatlaşma derinliği göstermişlerdir. Hazır beton tesislerinde veya şantiyelerde teorik olarak en ideal beton üretimi planlansa bile sonuçta beton dökümünde çalışan teknik elemanların da gerekli itinaı göstermeleri zorunludur. Çünkü betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve döküm sonrası ilk bakımı betonun permabilitesini ve dolayısıyla karbonatlaşma olayını etkilemektedir.

KAYNAKLAR

- [1] TS 4834, (1986), **Beton ile İlgili Terimler**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [2] Tokyay, M., (1997), **Agresif Ortamlarda Çimentolu Sistemler**, Çimento ve Beton Dünyası, sayı:8, 13-15.
- [3] Nordström, E., (2000), **Steel Fibre Corrosion in Cracks Durability of Sprayed Concrete**, Licantiate Thesis, Lulea University of Technology, Department of Civil and Mining Engineering, Sweden.
- [4] 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.
- [5] Lindvall, A., (1999), **Enviromental Actions and Response Survey, Inspection and Measurement**, The European Community Brite Euram Project BE95-1347 Working Report, 9-13.
- [6] Neville, A.M., (1981), **Properties of Concrete** (3th ed.), New York: Longman Scientific and Tecnical, 15, 16, 392.
- [7] Yazıcı, H., (1997), **Accelerated Carbonation Test of Concrete**, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- [8] Akman, M. S., (1997), **Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri**, Türkiye İnşaat Mühendisliği, 14. Teknik Kongresi, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Yayın No: 26
- [9] Erdoğan, T.Y., (1995a), **Betonu Oluşturan Malzemeler; Çimentolar**, T.H.B.B., Ankara.
- [10] Cebeci, E., (1988), **Betonda Karbonatlaşma**, Yük. Lis. Tezi, İ.T.Ü., Fen Bil. Ens., İstanbul, 13-32, 75-83.

- [11] Bilodeau, A., and Malhotra, V. M., (1998), **High-Volume Fly Ash System: The Concrete Solution For Sustainable Development**, For Presentation at The Tree-Day CANMET/ACI International Symposium, Canada, MTL:98-22.
- [12] Hayen, R., Van Balen, K., Van Gemert, D., (2001), **The Influence of Production processes and Mortar Compositions on The Properties of Historical Mortars**, 9 th. Canadian Masonry Symposium, Canada.
- [13] Gönen, T., Yazıcıoğlu, S., (2003), **Betonlarda Karbonatlaşma ve Etkinlik Dereceleri**, Standart Ekonomik ve Teknik Dergi, 497, ss. 84-88.
- [14] Erdoğan, T.Y., (1995b), **Betonu Oluşturan Malzemeler; Agregalar**, T.H.B.B., Ankara.
- [15] Erdoğan, T.Y., (1995c), **Betonu Oluşturan Malzemeler; Karışım ve Bakım Suları**, T.H.B.B., Ankara.
- [16] TS 3440, (1982), **Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [17] 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.
- [18] Kılınççeker, G., Yalçın, A., Köseoğlu, D. G., (2000), **Betonarme Demirlerinin Elektro Kimyasal Davranışlarına Sodyum Klorür ve Sodyum Fosfatın Etkileri**, VII Uluslararası Korozyon Sempozyumu, İstanbul, 132 s.
- [19] De Ceukelaire, L., and Van Nieuwenburg, D., (1992), **Accelerated Carbonation of A Blast Furnace Cement Concrete**, Cement and Concrete Research, 23, 443-452.
- [20] 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.

- [21] Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., (2002), **Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)**, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, yayın no 298, ss 137-157, İzmir.
- [22] Güner, M.S. ve Süme, V., (2000), **Yapı Malzemesi ve Beton**, Aktif Yayınevi, Erzurum, 129 s.
- [23] Hanecka, K., Koronthalyova, O., Matiasovsky, P., (1997), **The Carbonation of Autoclaved Aerated Concrete**, Cement and Concrete Research, 27, 589-599.
- [24] Erdoğan, T.Y., (1993) **Atık Malzemelerin İnşaat Endüstrisinde Kullanımı Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Cürufu**, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Ankara, 1-7.
- [25] Osborne, G.J., (1999), **Durability of Portland Blast-Furnace Slag Cement Concrete**, Cement and Concrete Composites, 21, 11-21.
- [26] 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.
- [27] Akyüz, S., (2002), **Doğal Bir Puzolanın Betonda Optimum Kullanımı**, Hazır Beton, Eylül, 74-79.
- [28] Krajci, L., Janotka, I., (2000), **Measurement Techniques For Rapid Assessment of Carbonation in Concrete**, ACI Material Journal, 97, pp. 168-171.
- [29] Roy, S.K., Poh, K.B., Northwood, D.O., (1999), **Durability of Concrete-Accelerated Carbonation and Weathering Studies**, Building and Environment, 34, 597-606.
- [30] Ramachandran, V.S., (1976), **Calcium Chloride in Concrete Science and technology**, London: Applied Science Publisher Ltd.
- [31] Bakharev, T., Sanjayan, J.G., Cheng, Y.B., (2001), **Resistance of Alkali-Activated Slag Concrete to Carbonation**, Cement and Concrete Research, 31 pp. 1277-1283.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

- [32] Akman, M. S., (1992), **Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi**, İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Baskı Atölyesi, Yayın no: 1481, 27, 175.
- [33] Chi, M. J., Huang, R., Yang, C. C., (2002), **Effects Of Carbonation On Mechanical Properties And Durability Of Concrete Using Accelerated Testing Method**, Journal of Marine Science and Technology, Vol: 10 No:1 14-20.
- [34] Xiao, J., Li, J., Zhu, B., Fan, Z., (2001), **Experimental Study on Strength and Ductility of Carbonated Concrete Elements**, Construction and Building Materials, 16, 187-192.
- [35] Eriş, M., (1994), **Yapı Fiziği ve Malzemesi**, Literatür Yayıncılık, İstanbul, 138-167.
- [36] Koç, T., Yalçın, S., (1996), **Betonarme Demirlerinin Korozyonu ve Önlemler**, Çimento ve Beton Dünyası, sayı: 8, 13-15.
- [37] Castro, P., Sanjuan M.A., Genesca, J., (1999), **Carbonation of Concretes in The Mexican Gulf**, Building and Environment, vol. 35, (2000), 145-149
- [38] Al-Khaiat, H., Haque, M. N., (1997), **Carbonation of Some Coastal Concrete Structures in Kuwait**, ACI Materials Journal, Vol. 94-6, pp 602-607
- [39] Parrott, L.J., Killoh, D.C., (1989), **Carbonation in a 36 Year Old, In-Situ Concrete**, Cement and Concrete Research, 19, 649-656.
- [40] 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.
- [41] Johnson, D.C., (2000), **Accelerated Carbonation of Waste Calcium Silicate Materials**, SCI Lecture Papers Series LPS: 108/2000, London,
- [42] Kobayashi, 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

[43] Atış, C.D., (2002), **Accelerated Carbonation and Testing of Concrete Made with Fly Ash**, Construction and Building Materials (yayında), kabul tarihi 25 ekim 2002.

[44] Ramyar, K., (1993), **Uçucu Küllerin Çimento Harcının Büzülmesine ve Betonun Karbonatlaşmasına Olan Etkileri**, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB Ankara Şubesi, 133-147.

[45] TS 706, (1980), **Beton Agregaları**, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara

[46] ELE İnternational, Civil and Enviromental Engineering Test Equipment 9th edition Catalogue, England

[47] Perry, J. H., (1963), **Chemical Engineers' Handbook**, Kogakusha Company LTD, Tokyo



ÖZGEÇMİŞ

1977 İstanbul doğumluyum. İlkokulu İstanbul Etiler, ortaokulu İstanbul Üsküdar ve liseyi İstanbul Ümraniye Endüstri Meslek Lisesi Yapı Ressamlığı Bölümünde tamamladım. 1996 yılında F.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü Yapı Ressamlığı Öğretmenliğine kayıt yaptırđım ve 2000 yılı bahar dönemi sonunda mezun oldum. 2001 yılında F.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Bölümünde Yüksek lisans öğrenimime başladım. Şu anda Teknik Eğitim Fakültesi Yapı Eğitimi Bölümü Yapı Tasarımı Eğitimi Anabilim dalında Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktayım.

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ