



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN KARBONATLAŞMA ÖZELLİĞİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Yüksek Lisans Tezi

Ahmet Berk KULA

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2024

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN
KARBONATLAŞMA ÖZELLİĞİ ÜZERİNE BİR
ÇALIŞMA**

Ahmet Berk KULA

Danışman: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
İnşaat Mühendisliği Yüksek Lisans Programı

İzmir
2024

KABUL VE ONAY SAYFASI

Ahmet Berk KULA tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak sunulan “Çimento Esaslı Harçların Karbonatlaşma Özelliği Üzerine Bir Çalışma” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 18/01/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği / oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof. Dr. Şemsi YAZICI
Raportör Üye : Prof. Dr. Gözde İNAN SEZER
Üye : Prof. Dr. Ali Uğur ÖZTÜRK

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Çimento Esaslı Harçların Karbonatlaşma Özelliği Üzerine Bir Çalışma” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

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

Ahmet Berk KULA

VII

ÖZET

ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN KARBONATLAŞMA ÖZELLİĞİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

KULA, Ahmet Berk

Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

Ocak 2024, 76 sayfa

Bu tez çalışması kapsamında, günümüzde endüstriyel atık malzemelerden olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi puzolanik malzemelerin çimento esaslı harçlara ikamesiyle birlikte harçların mekanik özellikleri ve karbonatlaşmaya etkileri araştırılmıştır.

DeneySEL çalışma kapsamında, 0,35 – 0,50 ve 0,65 olmak üzere üç farklı su / bağlayıcı (çimento + puzolan) oranı esas alınmıştır. Biri puzolan ikamesiz; diğerleri uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu ikameli olmak üzere çimento ile kütlece %5 - %10 ve %15 oranında yer değiştirmesiyle toplam 30 farklı harç serisi üretilmiştir. Her bir harç serisinden 4 parti üretim yapılmıştır. Tüm numuneler 28 gün kür havuzunda (bağıl nem %95±5, su sıcaklığı 20 °C) kürlenmiştir. Üretilen bu harç serilerinden bir partisi kürlenmenin ardından su emme, basınç dayanımı, eğilme dayanımı testlerine tabii tutulurken; diğer seriler özel olarak hazırlanmış hızlandırılmış karbonatlaşma testine 1, 3 ve 7 gün tabii tutularak eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve karbonatlaşma özellikleri incelenmiştir. Sonuç olarak harç numunelerinin; su emme, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı özellikleri ve karbonatlaşma derinliklerinin; su / bağlayıcı oranı, karbondioksit maruziyet süresi ve puzolanların kimyasal kompozisyonları, incelikleri ve reaktivitelerinden etkilendiği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Durabilite, karbonatlaşma, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, uçucu kül



ABSTRACT

**A STUDY ON THE CARBONATION PROPERTY OF CEMENT
BASED MORTARS**

KULA, Ahmet Berk

MSc in Civil Eng.

Supervisor: Prof. Dr. Şemsi YAZICI

January 2024, 76 pages

Within the scope of this thesis, the mechanical properties of mortars and their effects on carbonation were investigated by substituting pozzolanic materials such as fly ash, blast furnace slag and silica fume, which are industrial waste materials today, into cement-based mortars.

Within the scope of the experimental study, three different water / binder (cement + pozzolan) ratios of 0.35 - 0.50 and 0.65 were taken as basis. A total of 30 different mortar series were produced, one of which was without pozzolan substitution, the others were with fly ash, silica fume and blast furnace slag, with cement replaced by 5% - 10% and 15% by mass. 4 batches of each mortar series were produced. All samples were cured in a curing pool for 28 days (relative humidity $95\pm 5\%$, water temperature 20 °C). While one batch of these mortar series was subjected to water absorption, compressive strength and flexural strength tests after curing, the other batches were subjected to a specially prepared accelerated carbonation test for 1, 3 and 7 days, and their flexural strength, compressive strength and carbonation properties were examined. As a result, mortar samples; water absorption, bending strength and compressive strength and carbonation depths' properties; It was concluded that was affected by the water/binder ratio, exposure time to carbon dioxide and the chemical composition, fineness and reactivity of the pozzolans.

Key Words: Durability, carbonation, silica fume, blast furnace slag, fly ash

X



ÖNSÖZ

Betonarme yapılarda, betonun belirli bir ekonomik ömre sahip olması istenir. Betonun ömrünü belirleyen durabilite yani dayanıklılıktır. Durabilite problemlerinden biri olan karbonatlaşma; çimentonun hidratasyonu sonucu ortaya çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in, ortamdaki CO_2 ile reaksiyona girerek CaCO_3 'a dönüşmesidir. Bunun sonucunda donatıyı korozyondan koruyan pasif tabakanın bozulması gerçekleşmektedir. Dolayısıyla donatı korozyona uğrayarak, aderans kaybına ve beton matrisinde çatlaklara neden olmaktadır. Bu çalışmada, endüstriyel atık malzemeler olan puzolanlardan; yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül ilavesiyle harç numunelerinin mekanik özellikleri ve karbonatlaşma durumları incelenmiştir. Karbonatlaşma olayının uzun bir süreç alması sebebiyle laboratuvar ortamında hızlandırılmış karbonatlaşma testine tabii tutulmuştur. Bu çalışmadan elde edilen bulgular, sahada yapılacak çalışmalara ve bu konuda çalışma yapacak araştırmacılara ön bilgi sağlayacaktır.

İZMİR

...../...../2024

Ahmet Berk KULA



XIII

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	ix
ÖNSÖZ.....	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
TABLolar DİZİNİ.....	xxii
1. GİRİŞ.....	1
2. DURABİLİTE.....	3
3. KARBONATLAŞMA.....	5
3.1. Karbonatlaşma Açısından Betonda Boşluk Yapısı.....	11
3.2. Karbonatlaşmayı Etkileyen Faktörler.....	12
3.2.1. Su / Çimento oranı.....	13
3.2.2. Kırılma koşulları.....	13
3.2.3. Çimento tipi ve dozajı.....	15
3.2.4. Betonun nem içeriği ve bağıl nem.....	18
3.2.5. Ortamdaki CO ₂ konsantrasyonu.....	20
3.2.6. Ortamın sıcaklığı.....	21

XIV

İÇİNDEKİLER (devamı)

3.2.7. Puzolan kullanımı.....	22
3.3. Karbonatlaşmayı Engellemek İçin Gerekli Önlemler.....	24
3.4. Karbonatlaşmanın Betona Etkileri.....	26
3.4.1. Karbonatlaşma rötresi.....	26
3.4.2. Beton dayanımı.....	27
3.4.3. Donatı korozyonu.....	27
3.5. Karbonatlaşma Derinliği Tayini.....	28
4. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	30
4.1. Kullanılan Malzemeler.....	30
4.1.1. Çimento.....	30
4.1.2. Agrega.....	31
4.1.3. Karışım suyu.....	31
4.1.4. Uçucu kül.....	31
4.1.5. Silis dumanı.....	33
4.1.6. Yüksek fırın cürufu.....	35
4.1.7. Süper akışkanlaştırıcı.....	36
4.2. Harç Karışım Oranları.....	37
4.3. Numunelerin İmalatı.....	38
4.4. Deneyler ve Ölçümler.....	39

İÇİNDEKİLER (devamı)

4.4.1. Yayılma çaplarının ölçümü.....	39
4.4.2. Su emme deneyi.....	39
4.4.3. Üç noktalı eğilme dayanımı deneyi.....	40
4.4.4. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi.....	41
4.4.5. Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi.....	42
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	47
5.1. Su Emme Deneyi Sonuçları.....	47
5.2. Üç Noktalı Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	50
5.3. Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları.....	54
5.4. Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi Sonuçları.....	59
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	65
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	68
TEŞEKKÜR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	76



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Karbonatlaşma ile korozyon olayı (Nordström, 2000)	2
Şekil 2.1. Beton yapı ve yapı elemanlarının bozulma türleri (Baradan, 2010)	4
Şekil 3.1. Karbondioksitin beton veya harç yüzeyine nüfuz etmesi (Park, 2008)...	6
Şekil 3.2. Karbonatlaşma etkisiyle betonarme içerisinde pH değişimi (Ta vd., 2016).....	7
Şekil 3.3. Betonun geçirimliliğini etkileyen faktörler (Bekem vd., 2009)	11
Şekil 3.4. Karbonatlaşmanın beton içerisinde ilerleme modelleri (a-yüzeye paralel b-eğrisel c-bölgesel) (Lindvall, 1999).....	12
Şekil 3.5. Çimento/İnce Agrega: 1/3 olan harçlarda, S/Ç oranındaki değişimin karbonatlaşma derinliğine etkisi (Tokyay, 1997).....	13
Şekil 3.6. Erken yaşlardaki kürlenmenin hızlandırılmış karbonatlaşma derinliğine etkisi (Ballım, 1996)	14
Şekil 3.7. Karbonatlaşma derinliğinin çimento dozajına göre değişimi (Gönen, 2003)	15
Şekil 3.8. Çimento türündeki değişimin karbonatlaşma derinliğine etkisi (Tokyay, 1997)	16
Şekil 3.9. 16 haftalık hızlandırılmış karbonatlaşma ile çimentonun alkali içeriğinin, karbonatlaşma derinliği ile ilişkisi (Kobayashi ve Uno, 1989)	16
Şekil 3.10. Hızlandırılmış karbonatlaşma testi ile su/çimento oranı ve çimentonun alkali içeriğinin karbonatlaşma derinliklerine etkisi (Kobayashi ve Uno, 1990)....	17

XVIII

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.11. Bağıl nem – karbonatlaşma ilişkisi (Tokyay, 1997)	18
Şekil 3.12. Bağıl nemdeki değişimin karbonatlaşma derinliğine etkisi (De Ceukelaire and Van Nieuwenburg, 1993).....	20
Şekil 3.13. Farklı sıcaklık değerlerinde zamanla a) karbonatlaşma derecesi b) basınç dayanımı gelişimi (Tan ve ark, 2022).....	22
Şekil 3.14. Karbonatlaşma reaksiyonu ve klorür iyonu sebebiyle betonun donatıyı korozyona karşı koruma özelliğini kaybetmesi (CEB, 1992).....	28
Şekil 3.15. Karbonatlaşma derinliği ölçüm tekniği (Gönen ve Yazıcıoğlu, 2005)..	29
Şekil 3.16 Yüksek konsantrasyonlu karbondioksit maruz kalan numunelere fenol fitalein indikatörünün püskürtülmesi.....	29
Şekil 4.1. Kullanılan agreganın granülometresi ve standarda uygunluğu.....	31
Şekil 4.2. C sınıfı uçucu küle ait SEM görüntüsü (Moghimi vd., 2022).....	33
Şekil 4.3. Silis dumanı SEM görüntüsü.....	34
Şekil 4.4. Yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü.....	36
Şekil 4.5. Harç numunelerinin hazırlanmasında kullanılan mikser (a) ve kullanılan kalıp sistemi (b)	39
Şekil 4.6 Eğilme dayanımı test düzeneği.....	41
Şekil 4.7 Otomatik hidrolik basınç test presisi.....	42

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.8 Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı hava sızdırmazlığı kontrolü.....	43
Şekil 4.9 Hızlandırılmış karbonatlaşma test kiti.....	43
Şekil 4.10. Sıcaklık, tuz ve nem ilişkisi (Gönen ve Yazıcıoğlu, 2005).....	44
Şekil 4.11. Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı içerisindeki harç numuneleri.....	45
Şekil 4.12. Hızlandırılmış karbonatlaşma test kiti 0,8 bar manometre değeri.....	45
Şekil 4.13. Karbonatlaşma sonrası fenolftalein çözeltisi püskürtülen harç numunesinin arayüzey görüntüsü.....	46
Şekil 4.14. AUTOCAD uygulaması yardımıyla arayüzden karbonatlaşma derinliği ölçülmesi.....	46
Şekil 5.1 Uçucu kül ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları.....	48
Şekil 5.2 Silis dumanı ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları.....	49
Şekil 5.3 Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları.....	50
Şekil 5.4 Uçucu kül ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları.....	51
Şekil 5.5 Silis dumanı ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları.....	53
Şekil 5.6 Yüksek fırın cürufu ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)ŞekilSayfa

Şekil 5.7. Uçucu kül ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değişimi.....56

Şekil 5.8. Silis dumanı ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değişimi.....57

Şekil 5.9 Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı
değişimi.....59

Şekil 5.10 1 gün (24 saat) boyunca hızlandırılmış karbonatlaşma testine maruz
bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri (mm).....61

Şekil 5.11 3 gün (72 saat) boyunca hızlandırılmış karbonatlaşma testine maruz
bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri (mm).....62

Şekil 5.12 7 gün (168 saat) boyunca hızlandırılmış karbonatlaşma testine maruz
bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri (mm).....63



TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1. Farklı bağıl nem düzeylerinde 21 gün sonra karbonatlaşma derinlikleri (De Ceukelaire and Van Nieuwenburg, 1993).....	20
Tablo 3.2. %65 nem ve 20 °C'de kütleme ile, uçucu kül ihtiva eden betonların karbonatlaşma derinlikleri (Atış, 2002).....	24
Tablo 3.3. %100 nem ve 20 °C'de kütleme ile, uçucu kül ihtiva eden betonların karbonatlaşma derinlikleri (Atış, 2002).....	24
Tablo 3.4. Karbonatlaşma derecesini etkileyen parametreler ve etkileri (Özgen, 2006).....	25
Tablo 4.1. CEM I 42,5 R çimentosunun özellikleri ve ilgili standart limitleri.....	30
Tablo 4.2. C sınıfı uçucu külün özellikleri ve ilgili standardın limitleri.....	32
Tablo 4.3. Silis dumanının özellikleri ve ilgili standarda uygunluğu.....	34
Tablo 4.4. Yüksek fırın cürufunun özellikleri ve standart limitleri.....	35
Tablo 4.5. Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri.....	36
Tablo 4.6. Harç numunelerinin karışım oranları.....	37
Tablo 5.1. Uçucu kül ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları.....	47
Tablo 5.2. Silis dumanı ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları.....	48
Tablo 5.3. Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları.....	49

TABLÖLAR DİZİNİ (devam)

Tablo 5.4. Uçucu kül ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları.....	51
Tablo 5.5. Silis dumanı ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları.....	52
Tablo 5.6. Yüksek fırın cürufu ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları.....	53
Tablo 5.7. Uçucu kül ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değerleri.....	55
Tablo 5.8. Silis dumanı ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değerleri.....	57
Tablo 5.9. Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değerleri.....	58
Tablo 5.10. Hızlandırılmış karbonatlaşma testine maruz bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri (mm).....	60



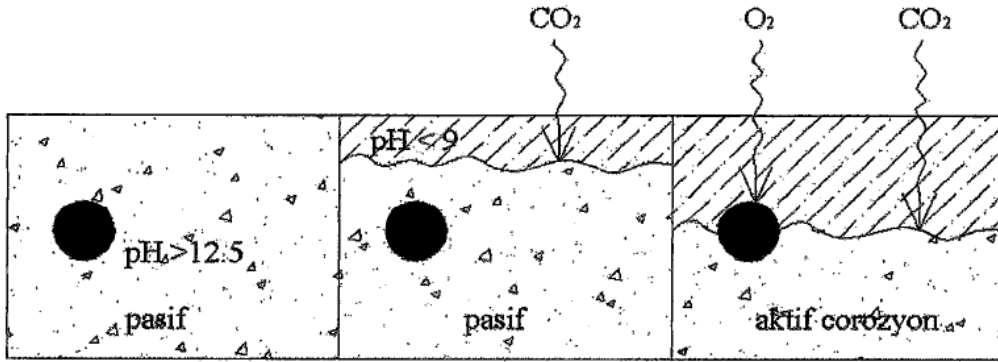
1. GİRİŞ

Beton, günümüzde en yaygın kullanılan yapı malzemesidir. Tüm dünyada yıllık tüketiminin 11 milyar ton civarlarında olduğu düşünülmektedir. Betonun bu denli yapı sektöründe tercih edilmesinin birçok sebebi bulunmaktadır. Bunlara örnek olarak şekil verilebilirliğinin kolay oluşu, uygun mekanik özellikleri, üretimindeki hammaddelere kolay ulaşımı, yüksek sıcaklıklarda gösterdiği performans ve maliyetsel anlamda avantajları sayılabilir (Baradan vd. 2022).

Yapılarda kullanılan malzemelerin ve yapıların, kendilerinden beklenen performansı servis ömürleri süresince eksiksiz bir şekilde gösterebilmesi; durabilite, kalıcık veya dayanıklılık olarak adlandırılmaktadır (Baradan vd. 2010). Betonda durabiliteyi etkileyen etmenlerden birisi de karbonatlaşmadır. En temiz havaya sahip olan şehirlerde bile atmosferde %0,03 oranında karbondioksit bulunurken; nüfusun ve endüstriyelleşme oranının yüksek olduğu şehirlerde bu oran %0,3'e kadar ulaşabilmektedir (Tokyay, 1997). Havadaki karbondioksit konsantrasyonunun yükselmesine bağlı olarak betonun ömrünü azaltan karbonatlaşma olayı da hızlanmaktadır.

Karbonatlaşma için literatürde farklı tanımlamalar mevcuttur. Basit bir tanımlama yapılacak olursa serbest durumda havada bulunan karbondioksitin belirli nem düzeylerinde çimento hamurundaki hidratasyon ürünleriyle reaksiyonu olarak tanımlanabilir (Tokyay, 1997). Bu reaksiyon sonucu CH (kalsiyum hidroksit) miktarının azalması ve ortaya çıkan $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ 'ın (kalsiyum karbonat) betonun alkali durumunu bozarak, pH'ını düşürmesi sebebiyle yüksek alkali beton matrisinde bozulmalara neden olmaktadır. Bu dengesinin bozulmasıyla birlikte betonun içerisinde gömülü halde bulunan donatıyı koruyan pasif tabakanın bozunması gerçekleşir ve donatıda paslanma süreci Şekil 1.1'de görüldüğü gibi başlamaktadır (Ai vd., 2016). Hobbs'a (1988) göre, çelik pasivasyonu için pH eşik değerinin 9,5 olduğunu ve bunun altında çelik korozyonunun gerçekleştiğini öne sürmüştür. Korozyon, betonarme yapılarda durabiliteyi etkileyerek yapının ömrünü azaltan en temel sebeplerden biridir (Revert vd., 2018). Donatının korozyonu ile birlikte hacim genişlemesine bağlı olarak beton matriksinde çatlaklar meydana gelmektedir. Bu çatlaklar dolayısıyla beton ile donatı arasındaki aderans kaybının yanı sıra betonun geçirimsizliği de çok daha hızlı bir şekilde artmaktadır (Gönen ve Yazıcıoğlu, 2003). Bunun sonucu olarak yapı

elemanları ve yapılar, ciddi hasarlar alarak dayanım ve çevresel faktörlere karşı daha hassas duruma gelmektedir. Özellikle deprem nedeniyle yıkılan yapıların büyük çoğunluğunda karbonatlaşmanın ve/veya klorür difüzyonunun neden olduğu korozyon çok fazladır (Taşdemir, 2002). Koç'a (2002) göre, 17 ağustos depreminde yıkılan binaların %67'sinde yıkılma sebeplerinden birinin korozyon olduğu belirtilmektedir.



Şekil 1.1 Karbonatlaşma ile korozyon olayı (Nordström, 2000)

Karbonatlaşmanın gerçekleşebilmesi için ortamda CO_2 'nin bulunması gereklidir ve beton içerisinde ilerlemesi zaman alan bir süreçtir. Bu açıdan düşünüldüğünde ilk dikkat edilecek durumun, betona CO_2 'nin difüzyonunu engellemek olduğu söylenebilir. Bu sebeple geçirimsizliği yüksek beton üretmek ve bunu sağlamak amacıyla katkı maddeleri kullanmak gibi yollar izlenebilir.

Bu çalışmanın amacı; endüstriyel atık yan ürünlerden olan silis dumanı, uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufunun farklı oranlarda çimento yerine ikamesiyle çimento hamuru matrisinde ve boşluklarda oluşturacağı hem fiziksel hem de kimyasal değişimlerin geçirimsizliğe etkisi incelenerek hem karbonatlaşma direnci hem de mekanik özelliklere etkisi araştırılmaktadır.

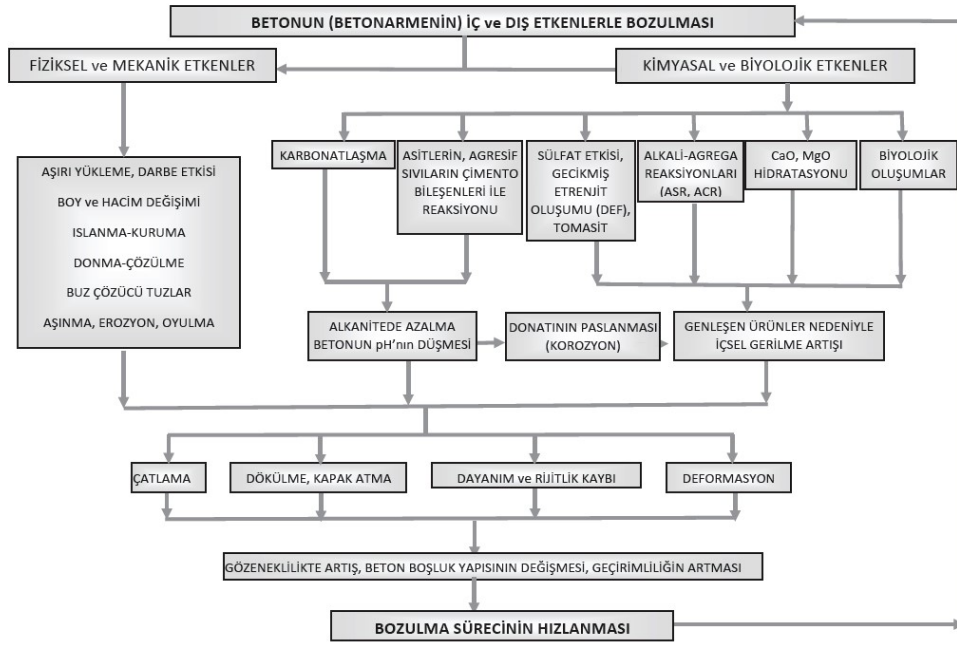
2. DURABİLİTE

Betonun, kendisine tanımlanan yüklere dayanabilme performansının yanında dayanıklı olması da beklenmektedir. Betonun dayanıklılığı veya durabilitesi, iç ve dış etkenlerden kaynaklı bozulmalara karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanabilir. Bu dış kaynaklar arasında iklim koşulları, kimyasal etkiler gibi betonun içerisinde bulunduğu çevresel ve hizmet koşulları etkileri bulunmaktadır. İç nedenler ise betonu oluşturan malzemelerdeki tuz (özellikle klorürler ve sülfatlar) kaynaklı etkiler, alkali-agrega reaksiyonu, hacim değişimleri, emilim ve geçirgenlik gibi kompozisyonda bulunan malzemelerin aralarındaki etkileşimdir (Yazıcı, 1998).

Beton yapı elemanlarının ve/veya betonarme yapıların bozunmasına sebep olan etmenler yani genel durabilite problemleri Şekil 2.1’de özetlenmiştir.

Yeterince dayanıklı (durabil) beton veya harç elde edebilmek için uygun malzemeler seçilmesine önem verilmelidir. Kompozisyonun, homojen ve tümüyle iyi sıkıştırılmış bir beton veya harç üretmeye uygun malzemelerle ve bunların uygun oranlarında yeterli miktarlarda bulundurması da oldukça önemlidir (Jackson and Dhir, 1988; CEB, 1992).

Su veya nemin varlığı; mekanik bozunma haricinde, çoğu bozunma süreçlerini kontrol eden en önemli parametredir. Suyun ve nemin, betonun içerisinde taşınma olayı boşlukların tipine, boşluk ve çatlakların dağılımına ve bunların boyutuna göre belirlenir. Buna karşın betonun (fiziksel, kimyasal ve biyolojik) ve donatının (korozyon) bozunma süreçlerinin hızı ve türü; bir yapıyı oluşturan malzemelerin ve elemanların direncini ve sertliğini belirler. Yapının yüzey koşulları da bu şekilde belirlenir ve bu durum yapının güvenliğine, kullanılışlılığına ve görünümüne yansır; yani bu süreçler yapının performansını belirler.



Şekil 2.1 Beton yapı ve yapı elemanlarının bozulma türleri (Baradan, 2010)

3. KARBONATLAŞMA

Harç ve beton gibi çimento esaslı malzemelerin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksitli veya kalsiyum oksitli bileşiklerin, ortamdaki (CO_2) karbondioksit ile tepkimeye girerek $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ (kalsiyum karbonat) çökeltileri oluşturması olayıdır (TS 4834, 1986). Karbonatlaşma olayının gerçekleşebilmesi için bazı şartların sağlanabilmesi gereklidir. Çimentonun hidratasyon reaksiyonunda ürün olarak çıkan ve oldukça yüksek miktarda bulunan $\text{Ca}(\text{OH})_2$, atmosferde bulunan CO_2 ve reaksiyonun gerçekleşebilmesi için belirli oranlarda nemin bulunması gereklidir (Baradan ve diğerleri, 2002) .

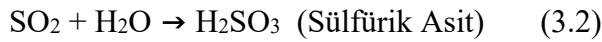
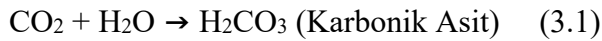
Atmosferdeki bazı gazlar, su veya nem varlığında reaksiyona girerek güçlü asit formlarına dönüşebilirler. Bunlara CO_2 ve SO_2 (Kükürtdioksit) örnek olarak verilebilir. Çimento hamuru içerisindeki bu dönüşüm şu şekilde ilerlemektedir;

1. Adım:

Gazların çimento hamurundaki gözeneklere nüfus etmesi

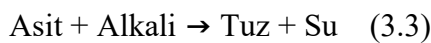
2. Adım:

Gazların gözeneklerde bulunan su ile reaksiyonun gerçekleşmesi

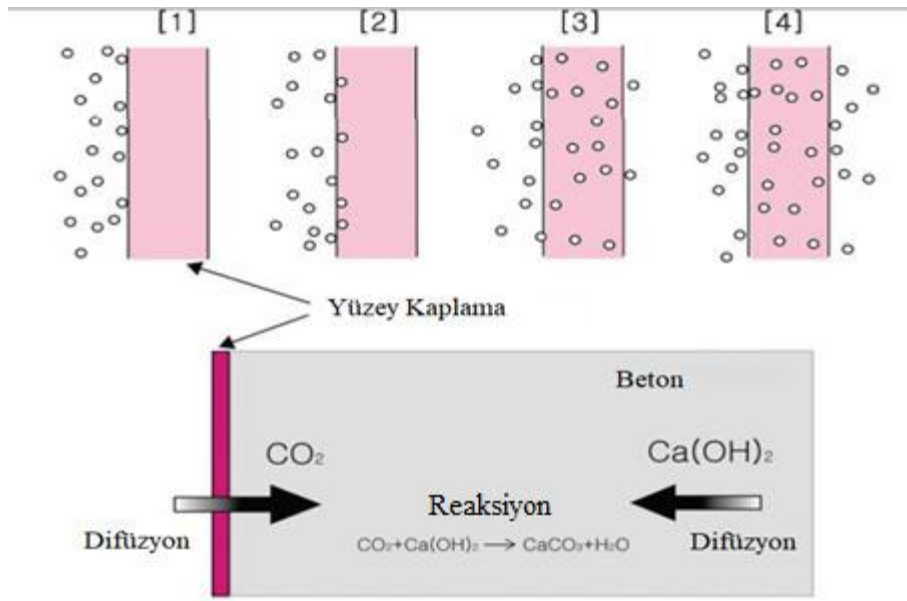


3. Adım:

Gözeneklerde oluşan bu asitler çimento hamurundaki alkali bileşenlerle reaksiyona girerler. Bu alkali bileşenler, gözenek suyunda çözülmüş formda bulunmaktadır.



Özellikle yoğun nüfus ve endüstriyel alanlardaki CO₂ miktarı 1000 ile 2000 mg/m³ ve SO₂ için 0,1 ile 0,2 mg/m³ arası değişebilmektedir. Havada ciddi miktarlardaki bu konsantrasyonlar durabilite açısından problem olan karbonatlaşmanın en büyük sebebidir. Karbondioksitin, beton veya harç yüzeyine nüfuz etmesi Şekil 3.1 ' de görülmektedir. Karbondioksit ilk olarak yüzeye temas etmekte(1), sonrasında gözeneklerde çözünme gerçekleşmekte (2) ve tamamen numunenin içerisine nüfuz etmesi gerçekleşmektedir (3,4) (Kara, 2013).

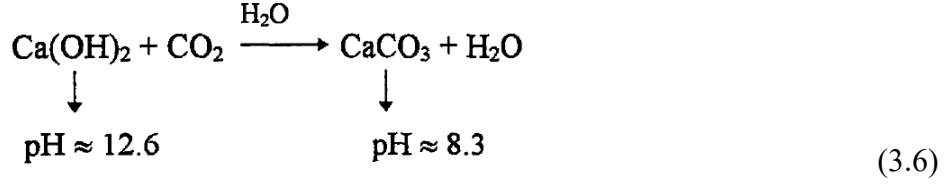


Şekil 3.1 Karbondioksitin beton veya harç yüzeyine nüfuz etmesi (Park, 2008)

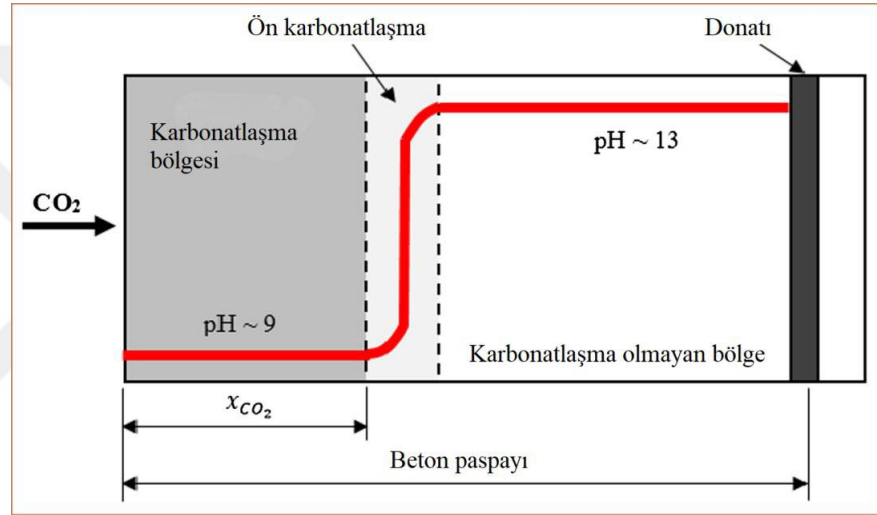
Karbonatlaşma yalnızca karbondioksitin varlığında oluşmaz. Öncelikle suyun, çimentonun ana kompozisyonlarından olan C₃S (trikalsiyum silikat) ve C₂S (dikalsiyum silikat) ile tepkimeye girerek bunların hidratasyon ürünü olan Ca(OH)₂'nin oluşması ve dışarıdan gelen CO₂'nin numune içerisine difüzyonunun gerçekleşerek tepkimeye girmesiyle karbonatlaşma gerçekleşir (Malami, 2014). Gerçekleşen bu reaksiyonlar denklem 3.4, 3.5 ve 3.6 'da verilmiştir.



Bu açıdan karbonatlaşmanın en temel reaksiyonu aşağıdaki gibi gösterilebilir;

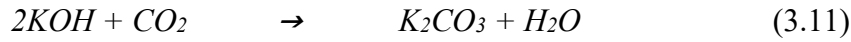
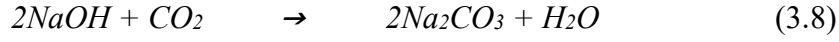
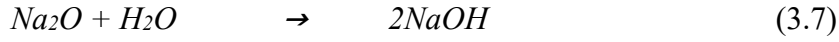


Reaksiyon sonucunda hidroksit iyonları nötralleşirken, ürün olarak CaCO_3 oluşmaktadır. Şekil 3.2 'de karbonatlaşma reaksiyonunun etkisiyle örnek betonarme yapıdaki pH değerlerindeki değişim gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Karbonatlaşma etkisiyle betonarme içerisinde pH değişimi
(Ta vd., 2016)

Ek olarak çimentonun kompozisyonunda bulunan MgO , K_2O , CaO , Na_2O ve SO_3 gibi bileşenler, CO_2 ile reaksiyona girerek karbonatlaşma olayını gerçekleştirirler. Örneğin sodyum oksitler ve potasyum oksitler, su ile hidrate olarak sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit iyonlarını oluştururlar ve devamında atmosferdeki CO_2 ile tepkimeye girerek sodyum karbonat ve potasyum karbonat ortaya çıkmaktadır. Daha sonra meydana gelen bu ürünlerin, serbest kireç ile tepkimesiyle CaCO_3 oluşumu gerçekleşmektedir (Morendeau vd., 2014). Denklem 3.7 – 3.12 'de gerçekleşen reaksiyonlar gösterilmektedir.



Bu reaksiyonun sürekliliği için CO₂'nin beton tabakasının daha derinlerine ilerlemesi gerekmektedir (Yazıcı, 1998). Dış yüzeylerde CaCO₃ tabakasının oluşumu, bu süreci oldukça yavaşlatmaktadır (Akman, 1997). Bunun sebebi oluşan karbonatların, yerini aldığı hidroksitlere göre daha fazla hacim kapladığından, karbonatlı betonun gözenekliliğinin azalmasıdır. Ayrıca karbonatlaşma sırasında hidroksitler tarafından açığa çıkan su, hidrate olmayan çimentonun hidratasyonuna yardımcı olabilir. Bu değişiklikler, yüzey sertliğinin artmasına, yüzeyde mukavemetin artmasına (Baba ve Senbu, 1987), yüzey geçirgenliğinin azalmasına, nem hareketinin azalmasına (Papadakis vd, 1991) ve kontrol edilen betonun durabilitesinin düşmesine neden olan diğer maruziyet biçimlerine karşı da direncin artmasına neden olur (Burkan Isgor ve Razaqpur, 2004). Karbonatlaşmanın betonun mukavemet, elastisite modülü ve betonun büzülmesi gibi tüm mekanik özelliklerinde de artışına neden olduğu iyi bilinmektedir (Chang vd., 2003).

Karbonatlaşma ile ilgili yapılan çalışmalar iki farklı şekilde yapılabilmektedir. Bunlardan birisi şuan çevremizde gördüğümüz tüm beton binalarda da mevcutta gerçekleşen ve uzun bir süreç alan normal karbonatlaşma; diğeri ise laboratuvar ortamında yapay olarak atmosfere kıyasla çok daha yüksek konsantrasyonda karbondioksitli bir ortam oluşturarak numunelerin maruz kalması şeklindedir. Yapılan araştırma çalışmalarının büyük bir kısmı hızlandırılmış karbonatlaşma testi ile gerçekleştirilmektedir. Yapılan literatür çalışmalarının bir kısmı aşağıda verilirken bir kısmı da ileriki bölümlerde konuyla alakasından dolayı ilgili bölümlerde verilmiştir;

Yılmaz (1994); betonun k rleme ve karma suyu içerisindeki iyonların, betonun durabilitesi üzerindeki etkisini araştırmıştır. Çalışmada su/ imento oranı 0,55 alınırken; eklenen karma suyu ve k rleme suyunun pH değerleri sırasıyla 8 - 8 (A), 8 - 7 (saf su) (B), 5 - 5 (C), 5 - 5 (saf su) (D) almıştır. Numunelerin 90 günlük basınç dayanımları sırasıyla 41,5 MPa, 43,3 MPa, 40,5 MPa, 45,1 MPa, şeklinde bulunmuştur. A ve C ortamlarındaki sularda bazı iyonlar (magnezyum, klorür, amonyum, sülfat, sülfür,) sebebiyle basınç dayanımı düşüşü gözlemlense de genel anlayış pH değerindeki d ş ş le dayanımın artması şeklindeydir. K rleme suyunun, pH değerinde düşüşü oldukça karbonatlaşma hızı ve aynı zamanda derinliği artacaktır. Yukarıdaki çıktılardan şu sonuca varılmaktadır, karbonatlaşma arttıkça betonun basınç dayanımı da artacaktır.

Parott ve Killoh (1989); yaptıkları saha çalışmasında 36 yaşındaki betonların karbonatlaşmasının çevresel faktörlere göre değişimini incelemişlerdir. Karbonatlaşmanın saptanmasında fenolfitalein alkol çözeltisi ile gravimetrik termal analiz tekniğinininden yararlanılmıştır. İ  ortamdaki numunelerin, dış ortam numunelerinden daha fazla karbonatlaşmaya yatkın olduklarını saptamışlardır. Aynı zamanda i  ortamdaki numunelerin analizlerinde, hali hazırda karbonatlaşmaya uğramış derinliğin 45 mm iken bile 25 mm'de yine de Ca(OH)_2 mevcudiyeti gözlemlenmiştir. Buradan; belirli bir derinlikte karbonatlaşma olayı gerçekleşmiş olsa bile o derinliğe gelene kadarki tüm bölgenin karbonatlaşması anlamına gelmediği sonucuna ulaşılabilir.

Loo vd. (1994); çalışmalarında karbonatlaşma hızına etki eden parametreleri içeren bir matematiksel model üzerine çalışmışlardır. Parametreler; ortamın sıcaklığı, CO_2 konsantrasyonu ve k rleme s residir. Yaptıkları deneysel çalışmalarla modeli desteklemişlerdir. 28 günlük basınç dayanımının daha önceden önerilen birkaç modelde beton karbonatlaşmasının etkili bir belirleyicisi olduğunu belirtmişler ve bu parametrelerin yanı sıra su/ imento oranının etkisini de modellerine ilave etmişlerdir. Sonuç olarak hızlandırılmış karbonatlaşma için Denklem 3.13'de verilen modeli önermişlerdir.

$$K_a = \alpha \cdot f_{28}^a \cdot C_0^b \cdot e^{ct} \cdot t_{wc}^d + \beta \quad (3.13)$$

f_{28} : standart 28 günlük dayanım (MPa),

C_0 : Karbondioksit konsantrasyonu(%),

t : Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$),

t_{wc} : k rleme periyodu(gün),

e : eksponansiyel sabit

K : karbonatlaşma katsayısı (mm/hafta)

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

Jiang vd. (2000); yaptıkları çalışmada çimentonun yüksek orandaki uçucu kül ile ikame edilmesiyle oluşturulan beton numunelerin karbonatlaşma özelliklerinin tahmin edilmesi üzerine matematiksel bağlantı üzerine çalışmışlardır ve bu matematiksel bağlantıyı destekleyebilmek için hızlandırılmış karbonatlaşma testleri yapmışlardır. Testte parametreler; sıcaklık 20°C , karbondioksit konsantrasyonu %20 ve bağlıl nem %70 olarak ayarlanmıştır. Uçucu kül ikamesi %55 ve %70 olarak seçilmiştir. Uçucu kül ihtiva eden betonlar, uçucu kül içermeyen kontrol karışımlarından daha yüksek seviyede karbonatlaşma göstermişlerdir. Ayrıca uçucu kül ihtiva eden bu beton numunelerinde artan k r süreleriyle birlikte karbonatlaşma derinlikleri normal betona yaklaşmıştır. Oluşturdukları matematiksel bağlantı ile deney sonuçları birbirlerine paralellik göstermiştir. Denklem 3.14'de uçucu kül ihtiva eden beton numuneleri için zamana bağlı karbonatlaşma matematiksel bağlantı verilmiştir.

$$x = 839(1 - RH)^{1.1} \sqrt{\frac{W/B^* - 0.34}{\alpha k' C}} C_0 \sqrt{t} \quad (3.14)$$

α : Çimentonun hidratasyon derecesi

k' : Karbonatlaşma reaktivitesine bağlı bir katsayı

C_0 : Karbondioksit (%)

RH : Bağlıl nem

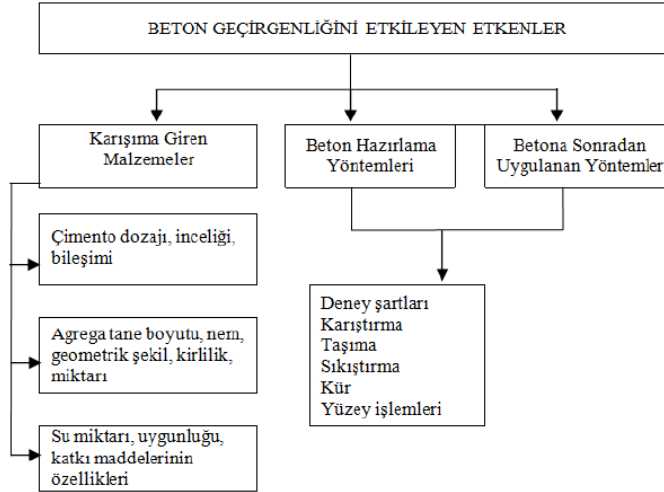
C: Çimento miktarı (kg/m^3)

n: Beton sisteminin boşluk sistemine bağlı bir katsayı olup, değeri 2,0 ile 2,1 arasında değişkenlik gösterebilir

Modelden de anlaşılacağı üzere ortamın bağıl nemi ve su/bağlayıcı oranı karbonatlaşma derinliğine etki eden ana faktörlerdendir.

3.1. Karbonatlaşma Açısından Betonda Boşluk Yapısı

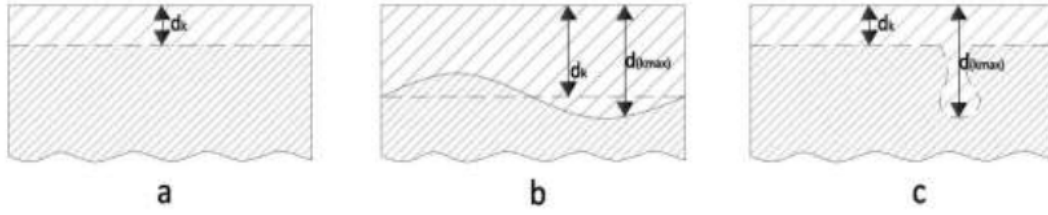
Karbonatlaşmayı kontrol eden en önemli parametrelerden birisi de harç veya betonun boşluk yapısı ve bunların miktarlarıdır. Beton dökümü sırasında mutlaka iyi bir sıkıştırma ve yerleştirme işlemine tabii tutulmalıdır çünkü bu boşluk yapısını etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Bu işlemlerin yeterince ve düzgün yapılmaması beton yapıyı tüm zararlı dış etmenlere karşı oldukça savunmasız hale gelmesine neden olacaktır (Gönen, 2003). Bu sebeple karbonatlaşmaya dirençli bir beton için doğru kompozisyonel karışımın yanında iyi sıkıştırılmış ve yerleştirilmiş şekilde imalat yapılmalıdır ki yeterince geçirimsiz bir beton elde edilebilmelidir (Erdoğan, 2003). Betonun geçirimliliğini etkileyen etmenler Şekil 3.3’de verilmiştir (Bekem vd., 2009).



Şekil 3.3. Betonun geçirimliliğini etkileyen faktörler (Bekem vd., 2009)

Karbonatlaşmanın beton içerisinde izlediği yol, boşlukların büyüklük ve yapısına bağlıdır. Bu sebeple numunenin farklı yerlerinde ve derinliklerinde Şekil

3.4'deki gibi karbonatlaşmalar gözlemlenebilir. Eğer betonun içeriği homojene oldukça yakın bir karışım ve yerleştirme işlemine tabii tutulduysa karbonatlaşma gelişimi, Şekil 3.4-a'daki gibi gözlemlenir. Şekil 3.4-b'de gerçekleşen durumda ise karbonatlaşma ilerlemesi yüzeyden farklı uzaklıklarda eğrisel bir görünümde olabilir ve bu şeklin gerçekleşebilmesi daha olağandır. Şekil 3.4-c'deki gibi karbonatlaşma ilerlemesinde ise CO_2 beton içerisine belirli noktalardan sızmıştır ve o alanda sürekli bir boşluğun veya çatlakın olduğunun habercisidir (Lindvall, 1999).



Şekil 3.4. Karbonatlaşmanın beton içerisinde ilerleme modelleri (a-yüzeye paralel b-eğrisel c-bölgesel) (Lindvall, 1999)

Beton veya harç numunelerinde yüzey geçirimsizliği, karbonatlaşma ile doğrudan ilgilidir. Aguiar ve Junior (2013); yaptıkları çalışmada, yüzey koruma işlemine tabii tutulan betonlar ve herhangi bir yüzey koruması yapılmayan betonlar karşılaştırılmıştır. Yüzeyi korumalı betonlarda, içeriye gaz girişi oldukça az gerçekleştiğinden karbonatlaşma difüzyon katsayıları, yüzey koruması uygulanmayan betonlardan daha düşük çıkmıştır. Çalışmaya göre epoksi kullanımı ile reçine, akrilik ve siloksan reçinelerin kullanılmasından daha iyi yüzey koruması sağlanmıştır. Sonuç olarak, geçirimsiz bir betonun elde edilebilmesi için yüzey korumasının oldukça önemli olduğu anlaşılmıştır. Bu sonuçlar ışığında, yapıdan talep edilen kullanım ömrünün sadece yüzey koruma işlemleri ile elde edilebileceği tavsiye edilmiştir.

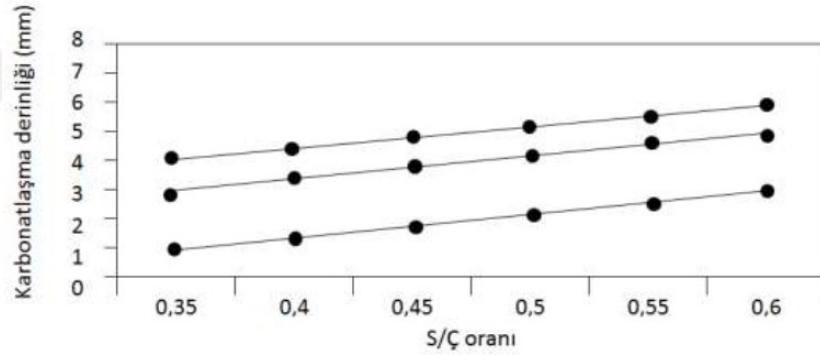
3.2. Karbonatlaşmayı Etkileyen Faktörler

Karbonatlaşmanın, beton içerisindeki ilerleyiş hızını hem yapı elemanını oluşturan bileşenler ve oranları hem de çevre koşulları etkilemektedir. Bu bileşenler ve oranlarına; çimento tipi, çimento dozajı, puzolan tipi ve bunların kompozisyon içindeki oranları, su/çimento oranı ve boşluk yapısı örnek gösterilirken; çevre koşulları için sıcaklık, karbondioksit konsantrasyonu ve bağıl nem parametreleri örnek verilebilir (Gönen ve Yazıcıoğlu, 2005).

3.2.1. Su / Çimento oranı

Beton veya harcın gözenek yapısını etkileyen faktörler aynı zamanda direkt olarak CO₂'nin difüzyonu için de önemlidir. Bu faktörler arasında su/çimento (S/Ç) oranı ilk sırada yer almaktadır. Yüksek S/Ç oranı, boşlukların artmasına, gazın daha kolay difüzyonuna ve sertleşmiş betonda daha fazla çimento hidratasyonuna neden olur. Dolayısıyla karbonatlaşma oranı, daha yüksek S/Ç oranları kullanılmasıyla ile artar. Diğer taraftan, çok düşük S/Ç oranına sahip beton ve harçlarda iyi yerleştirilmiş ve sıkıştırılmış beton elde etmenin zorluğu nedeniyle boşluklar artar (Akman, 1997). Bu gibi durumlarda süper akışkanlaştırıcı katkılara başvurulabilir.

Diğer parametreler sabit tutulduğunda S/Ç oranındaki değişimin karbonatlaşma derinliğine etkisi Şekil 3.5' de verilmiştir. Şekil 3.5' e göre S/Ç oranının artmasıyla karbonatlaşma derinliğinde aynı şekilde arttığı açıkça görülmektedir (Erdoğan, 1995; Tokyay, 1997).



Şekil 3.5. Çimento/İnce Agrega: 1/3 olan harçlarda, S/Ç oranındaki değişimin karbonatlaşma derinliğine etkisi (Tokyay, 1997)

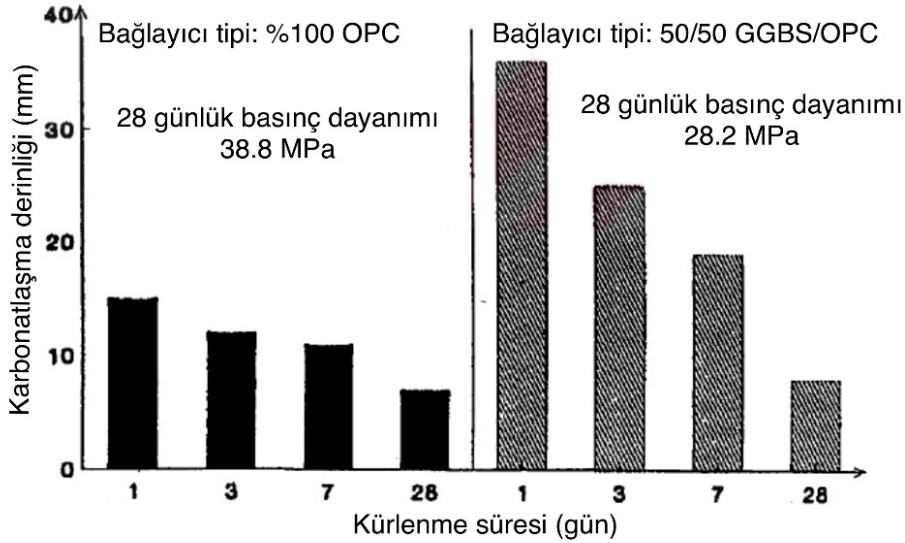
3.2.2. Kürleme Koşulları

Harç veya betonlarda boşluk yapısını dolayısıyla CO₂ difüzyonunu etkileyen bir diğer etmen kürleme koşullarıdır. Özellikle ilk zamanlarda, doğru teknikle kürleme daha fazla hidratasyon ürünlerinin oluşmasına, boşluk miktarının azalmasına bu sayede geçirimsizliğin artmasını sağlar. Bu sebeple karbonatlaşma hızı, kürleme

koşullarıyla da doğrudan ilgilidir. Doğru teknikle veya hiç yapılmayan kürlemeler, yapılardaki karbonatlaşma derinliğini doğrudan arttıracaktır (Akman, 1997).

Hava ortamında ve direkt su içerisinde kürlenmiş beton örnekleri karbonatlaşma derinliği anlamında kıyaslandığında fark açıkça görülebilir. Suda yeterince kürlenmiş örneklerde geçirimsizlik diğer örneklerle kıyasla daha fazla olduğundan karbonatlaşma derinliği de daha düşük seviyededir (Lo, Y. and Lee H.M., 2002).

Beton numunelerde erken yaşlardaki yetersiz kürlemenin, karbonatlaşma derinliği açısından negatif etkisi de Şekil 3.6' da açıkça gözlemlenebilmektedir. Aynı zamanda 28 günlük basınç dayanımı değerleri de belirtilmiştir. Bu bilgiler ışığında, betonun karbonatlaşma sebebiyle bozunma oranının yalnızca basınç dayanımı değerinden çıkarımla belirlenemeyeceği görülebilmektedir. Bu sebeple yalnızca basınç dayanımı parametresine bağlı dayanıklılık spesifikasyonlarındaki hatayı açıkça göstermektedir (Ballım, 1996).

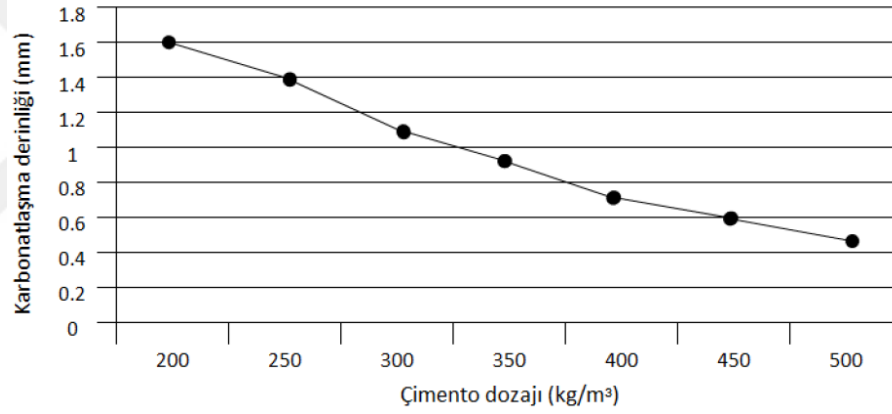


Şekil 3.6. Erken yaşlardaki kürlemenin hızlandırılmış karbonatlaşma derinliğine etkisi (Ballım, 1996)

3.2.3. Çimento Tipi ve Dozajı

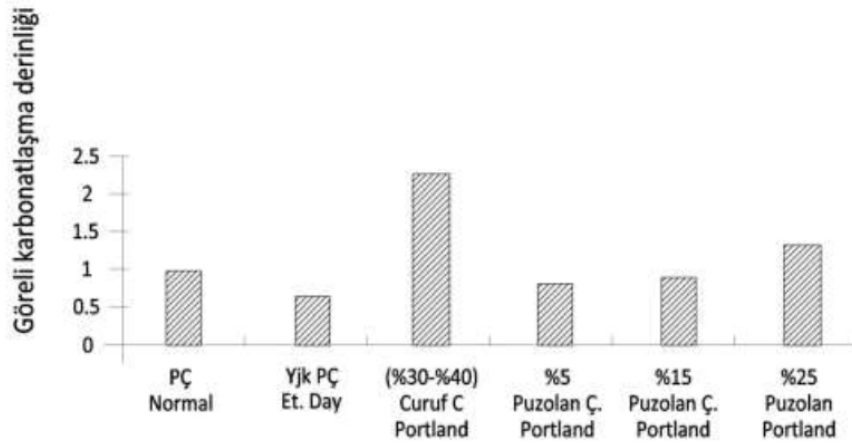
Çimento tipi ve belirli hacimdeki beton içerisindeki miktarı yani dozajı karbonatlaşma olayı için önemli bir parametredir.

Çimento dozajı yüksek olan betonlarda karbonatlaşacak hidrasyon ürünlerinin miktarı da artmakta ve CO₂ gazının difüzyonu da zorlaşmaktadır. Dolayısıyla karbonatlaşma hızında azalma gözlemlenmektedir. Çimento tanelerinin bir işlevi de agregalardan daha ince tanelere sahip olması sebebiyle agregalar arası boşlukları doldurabilmesidir. Dozajın azalması ile agregalar birbirlerine daha çok yaklaşır ve bunun sonucu olarak ara boşluklarda artışa ve dolayısıyla gazın ilerleyişi için daha uygun bir ortama zemin hazırlanır. Karbonatlaşma derinliğinin, çimento dozajına bağlı olarak değişimi Şekil 3.7 'de açıkça görülebilmektedir (Gönen, 2003).



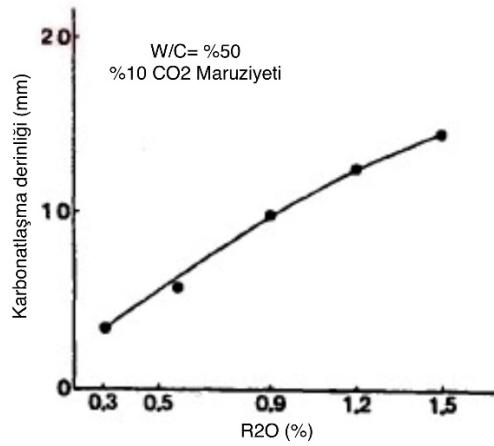
Şekil 3.7. Karbonatlaşma derinliğinin çimento dozajına göre değişimi (Gönen, 2003)

Çimentonun dozajı gibi kompozisyonu ve kullanılan katkı maddeleri de karbonatlaşma açısından oldukça etkilidir. Çimentonun içeriğinde en fazla bulunan bileşen CaO'dur ve yaklaşık olarak %65 bulunur. CaO'nun hidrasyonu sonucunda ortaya çıkan Ca(OH)₂, zamanla ortamdaki CO₂ varlığı sebebiyle uygun nem ortamlarında karbonatlaşacaktır. Değişik kompozisyona sahip çimentoların, göreceli karbonatlaşma derinlikleri Şekil 3.8'de verilmiştir (Tokyay, 1997; Erdoğan 1995).



Şekil 3.8. Çimento türündeki değişimin karbonatlaşma derinliğine etkisi (Tokyay, 1997)

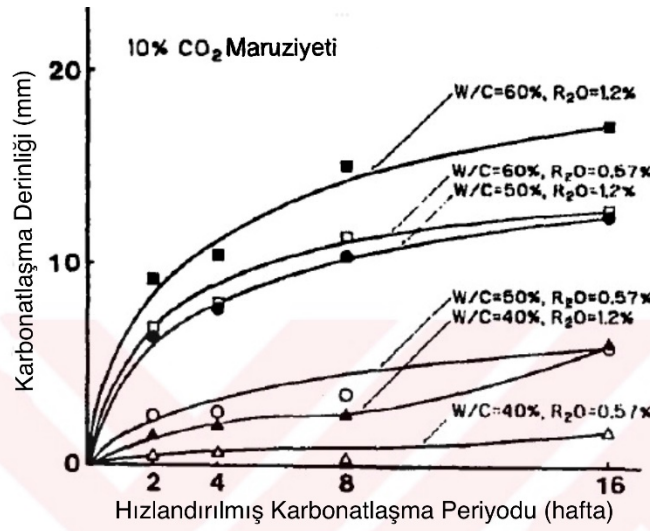
Kobayashi ve Uno (1989) tarafından yapılan hızlandırılmış karbonatlama testleri ile çimentonun kompozisyonundaki alkali miktarının da karbonatlaşma açısından önemli bir parametre olduğu doğrulanmıştır. Çimentonun alkali içeriği (R_2O) arttıkça betonun karbonatlaşma oranının da arttığına dikkat çekilmiştir. Şekil 3.9 'da bu durum açıkça görülebilmektedir.



Şekil 3.9. 16 haftalık hızlandırılmış karbonatlaşma ile çimentonun alkali içeriğinin, karbonatlaşma derinliği ile ilişkisi (Kobayashi ve Uno, 1989)

Şekil 3.10 'da su/çimento oranının ve çimentonun alkali içeriğinin karbonatlaşma hızına etkisi gösterilmektedir. Su/çimento oranı 0,5 ve R_2O içeriği

%1,2 olan betonun karbonatlaşma oranı; su/çimento oranı 0,6 ve R_2O içeriği %0,57 olan betonun karbonatlaşma oranına hemen hemen eşittir. Su/çimento oranı 0,4 ve R_2O içeriği %1,2 olan betonun karbonatlaşma oranı, yaklaşık olarak su/çimento oranı 0,5 ve R_2O içeriği %0,57 olan betonun karbonatlaşma oranına eşittir. Yani betonun karbonatlaşma olayı açısından çimentonun alkali içeriğindeki R_2O cinsinden yaklaşık olarak 0,6 puanlık artışın etkisi, su/çimento oranındaki 0,1 puanlık artışa eşdeğerdir (Kobayashi ve Uno, 1990).

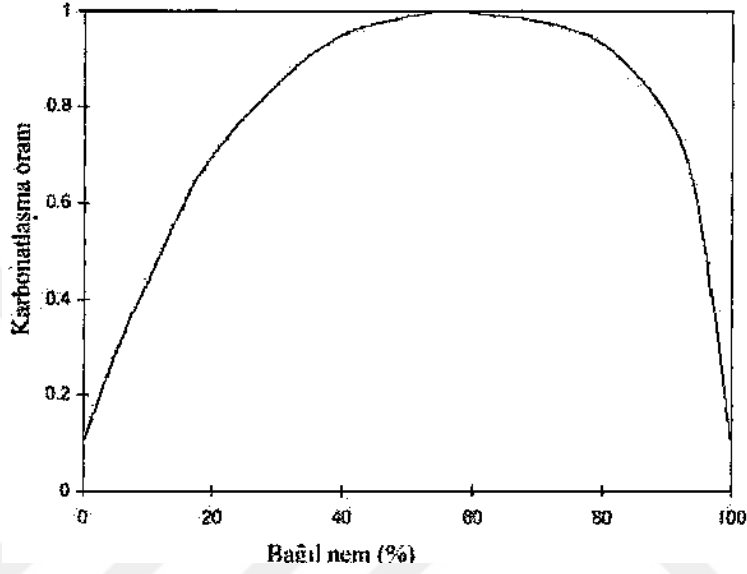


Şekil 3.10. Hızlandırılmış karbonatlaşma testi ile su/çimento oranı ve çimentonun alkali içeriğinin karbonatlaşma derinliklerine etkisi (Kobayashi ve Uno, 1990)

Yazıcıoğlu vd. (2012), yaptıkları çalışmada hiç bir kimyasal katkı maddesi içermeyen 5 farklı tip çimento ile beton numuneleri hazırlamışlar ve bunların karbonatlaşma ilişkilerini incelemişlerdir. 28 gün su içerisinde kürlenmiş numuneler daha sonra 1, 3 ve 7 gün hızlandırılmış karbonatlaşma testine tabii tutulmuştur. Deney sonucunda, beklendiği gibi yüksek karbondioksit maruziyet süresinin artmasıyla karbonatlaşma derinliği de artmıştır. Ayrıca en fazla karbonatlaşma CEM II 32,5R ve CEM IV 32,5R ihtiva eden betonlarda gerçekleşirken, en az karbonatlaşmanın görüldüğü numuneler, CEM I 42.5N ve CEM II 42.5N olmuştur.

3.2.4. Betonun Nem İçeriği ve Bağıl Nem

Karbonatlaşmayı etkileyen en önemli faktörlerden birisi ortamın ve betonun nemidir. Çünkü karbonatlaşma reaksiyonunun gerçekleşerek kalsiyum karbonatın oluşabilmesi için ortamda suyun bulunması şarttır. Karbonatlaşmanın en yüksek mertebesi ortamda %50 bağıl nem olduğu zamandır (De Ceukelaire, 1992). Karbonatlaşma oranının, bağıl neme göre değişimi Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Bağıl nem – karbonatlaşma ilişkisi (Tokyay, 1997)

Karbonatlaşma reaksiyonunun gerçekleşme hızı aynı zamanda numunenin nem içeriğine ve bulunulan ortamın bağıl nemine bağlıdır. Numunenin içi ile dış ortam arasındaki nem dengesini koruyabilmek için CO_2 'nin Ca(OH)_2 ile karbonatlaşma reaksiyonundan ortaya çıkan nemin dışarı yayılması gerekmektedir. Eğer difüzyon çok yavaş gerçekleşirse, numune içiresindeki buhar basıncı doygunluğa ulaşır ve CO_2 'nin numuneye difüzyonu teorik olarak durmuş olur (Neville, 1975).

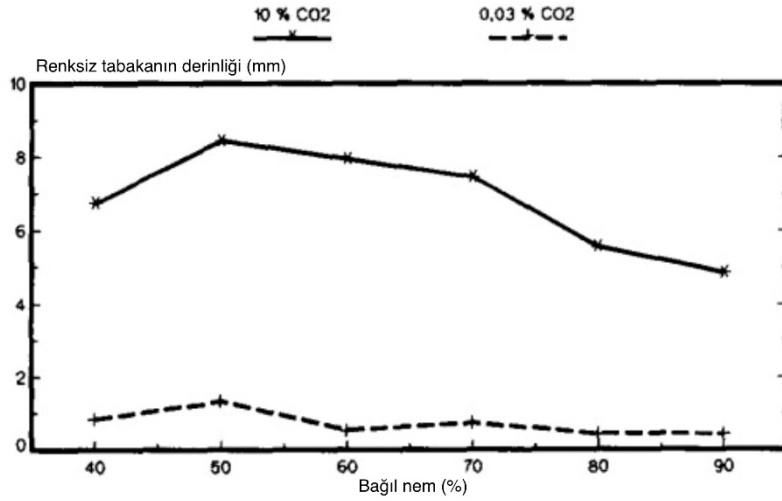
Gözenekler doygun hale geldiğinde CO_2 'nin numune içerisine difüzyonu zorlaşır. Diğer bir taraftan, çimento hamurunun içindeki gözeneklerde CO_2 'nin karbonik asit oluşturması için yeterli miktarda su veya nem bulunmadığında, kuru durumdaki betonda karbonatlaşma işlemi gelişemez (Neville, 1975; Akman, 1977).

Gönen (2003), tarafından yapılan bir deneyde farklı bağıl nem oranlarına sahip ortamlarda beton numunelerindeki karbonatlaşma gelişimi incelenmiştir. Çalışmada kısa sürede sonuç alabilmek amacıyla 6 saat, 24 saat ve 72 saatlik hızlandırılmış karbonatlaşma tekniği kullanılmıştır. Beton numuneleri, karbondioksit tankının içerisinde %40 karbondioksit ortamında; %35, %55 ve %80 bağıl nemde bekletilmiştir. Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi sonucunda tüm numuneler arasında en düşük karbonatlaşma seviyesi, oldukça kuru bir ortam olan %35 bağıl neme sahip ortamda gözlemlenmiştir. Bu nem seviyesinde, karbonatlaşma reaksiyonu için gerekli olan suyun azlığı sebebiyle bu sonuç elde edilmiştir. Oldukça nemli bir ortam denebilecek olan %80 bağıl nem seviyesinde karbonatlaşma, %55 nem seviyesine kıyasla biraz yavaş gelişmiştir. Nemin fazlalığı gözenekleri tıkadığından, karbondioksitin içeri girişini zorlaştırmaktadır. Çoğu coğrafyalarda sıklıkla karşılaşılabilen %55 nem seviyesinde ise karbonatlaşma diğer nem seviyelerine göre farkedilebilir şekilde yüksektir. Deney süresinin uzamasıyla birlikte %80 ve %55 bağıl nem seviyesine ait örneklerin karbonatlaşma derinliklerindeki artış hızı azalmıştır. Bunun sebebi, karbonatlaşmanın ilerlemesi ile $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ moleküllerinin boşlukları doldurarak difüzyonu zorlaştırmasıdır.

De Ceukelaire ve Van Nieuwenburg (1993) tarafından yapılan çalışmalarda karbonatlaşma derinliği ölçümlerinin sonuçları Tablo 1'de sunulmaktadır. Bu değerler Şekil 3.12'deki grafikte de gösterilmiştir. İki temel ortamda denemeler yapılmıştır. Bunlardan biri %10'luk konsantrasyon ile CO_2 bakımından zengin atmosfere maruz kalan numuneler için, diğeri ise normal atmosferde bulunan %0,03 konsantrasyondaki CO_2 'ye maruz kalma durumu içindir. Tablo 1 'den de anlaşılabileceği gibi karbonatlaşma derinliği %50 bağıl nemde maksimum değere ulaşmaktadır. Bu durum hem %10 CO_2 konsantrasyonlu ortam, hem de %0,03 CO_2 ortamı için geçerlidir. Bu sonuçlar, yapılan diğer çalışmalardaki maksimum karbonatlaşma hızını %50 ile %70 arasındaki bağıl nem seviyelerinde konumlandıran bulguları desteklemektedir.

Tablo 3.1 Farklı bağıl nem düzeylerinde 21 gün sonra karbonatlaşma derinlikleri (De Ceukelaire and Van Nieuwenburg, 1993)

Bağıl Nem	%10 CO ₂ maruziyeti sonrası karbonatlaşma derinliği (mm)	%0,03 CO ₂ maruziyeti sonrası karbonatlaşma derinliği (mm)
90%	4,9	0,5
80%	5,6	0,5
70%	7,5	0,8
60%	8	0,6
50%	8,5	1,4
40%	6,8	0,9



Şekil 3.12 Bağıl nemdeki değişimin karbonatlaşma derinliğine etkisi (De Ceukelaire and Van Nieuwenburg, 1993).

3.2.5. Ortamdaki CO₂ Konsantrasyonu

Karbonatlaşma süreci, CO₂ konsantrasyonunun artmasıyla hızlanır. Garaj, tünel gibi yerlerden alınan numunelerde karbonatlaşma derinliklerinin benzer yaşlardaki numunelerden daha fazla olduğu görülmüştür. Şekil 3.12’de aynı zamanda CO₂’ ce zenginleştirilmiş atmosferde bulunan numunelerin karbonatlaşma derinliğinin, normal

atmosfer konsantrasyonu olan %0,03 CO₂ ortamında bulunan numunelerden daha fazla olduğu açıkça görülebilmektedir.

Yüksek CO₂ konsantrasyonlu karbonatlaşma prosesi ile normal konsantrasyonlu karbonatlaşma prosesinin karşılaştırılabilirliği konusunda direkt bir bağlantı oluşturmak mümkün değildir. Çünkü zamana bağlı değişen bazı mikroyapısal sonuçlar arasında önemli bir fark mevcuttur. Ayrıca aşırı CO₂ konsantrasyonu daha yavaş karbonatlaşmaya da neden olabilir (De Ceukelaire and Van Nieuwenburg, 1993; Akman, 1997).

Al-Khaiat ve Haque (1997), Kuveyt gibi iklimi sıcak, kuru ve tuzlu yerlerdeki betonarme yapıların dayanıklılığını geliştirmek için çalışmalarda bulunmuşlardır. Çalışmalarındaki amaç 1991'deki petrol limanı yangını sebebiyle bu yangından kaynaklı hava kirliliğinin (çevrenin karbondioksit değeri yaklaşık %10'lara ulaşmıştır) yangına belirli uzaklıktaki binalar ile iklimsel özellikleri ve denize uzaklıkları aynı olan ama yangından etkilenmeyen binalarla karbonatlaşma derinliği açısından karşılaştırma yapmışlardır.

Çalışmalarının neticesinde; Kuveyt'deki yangın sebebiyle yüksek konsantrasyonlu karbondioksit maruz kalan kıyı binalarının karbonatlaşma derinliğinin, diğer yakın kıyı binalarından daha fazla çıktığı sonucuna ulaşılmıştır.

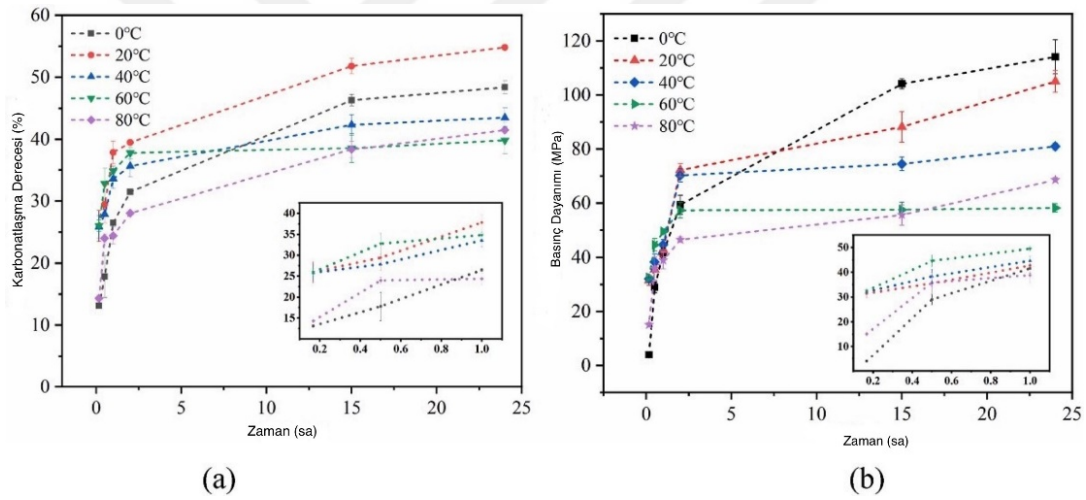
3.2.6. Ortamın Sıcaklığı

Normal sıcaklık düzeylerinde sıcaklıkların yükselmesiyle, karbonatlaşma reaksiyonunun hızı da artmaktadır. Ancak aşırı yüksek sıcaklıklar, reaksiyon için gerekli nemin azalmasına ve numunenin kurumasına; aynı zamanda fizik kanunları gereği gazların çözünürlüğünün azalmasına bağlı olarak CO₂ çözünürlüğü de azalacağından reaksiyonun yavaşlamasına neden olmaktadır (Akman, 1997).

Tan vd. (2022), karbonatlaşma gelişiminin ve basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi üzerine inceleme yapmışlardır. Daha yüksek sıcaklıklar, erken karbonatlaşma reaktivitesini ve basınç dayanımını artırırken, nispeten daha düşük bir sıcaklık, daha sürdürülebilir bir gelişmeye yol açar ve sonuçta daha yüksek sıcaklıklardakileri aşar. Bu, yüksek sıcaklıklarda aşırı ekzotermik karbonatlaşma reaksiyonu ile bağlantılı

olarak yüzey bölgesinin erken yoğunlaşması ve gözenek neminin tükenmesi ile açıklanabilir.

Şekil 3.13, zamanla karbonatlaşma derecelerinin ve basınç dayanımının farklı sıcaklıktaki numunelerde gelişimini göstermektedir. Başlangıçta karbonatlaşma derecesinde ve basınç dayanımında hızlı bir artış olur ve daha sonra bu artış hızı azalmaya başlar. Bu özellik, hareketli bir sınır süreci ile karakterize edilen karbonatlaşma reaksiyonuyla yakından bağlantılıdır. Dolayısıyla, karbonatlaşma derecesi, CO₂'nin yüzeyden iç kısmına nüfuz etmesiyle yönetilir. Bu, karbonatlaşma ilerledikçe kademeli olarak yoğunlaşan bir yüzey bölgesinin oluşmasına yol açar, bu da CO₂'nin içeriye doğru girişini kısıtlar ve daha sonraki yaşlarda karbonatlaşma derecesi kazanımını geciktirir (Şekil 3.13(a)). Bu aynı zamanda basınç dayanımının zamanla benzer evrim modelini de açıklamaktadır (Şekil 3.13(b)).



Şekil 3.13 Farklı sıcaklık değerlerinde zamanla a) karbonatlaşma derecesi
b) basınç dayanımı gelişimi (Tan vd., 2022)

3.2.7. Puzolan Kullanımı

Betonun bazı özelliklerini geliştirebilmek için endüstrinin atık yan ürünlerinden olan bazı yapay puzolanlar kullanılabilir. Bunlara yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı örnek verilebilir. Karbonatlaşma açısından bu malzemelerin

kullanımıyla ilgili sabit bir sonuç bulunmayıp farklı çalışmalarda farklı verilerin elde edildiği görülmektedir. Bunun önemli bir sebebi, kullanılan pozolanik malzemelerin kompozisyonel bileşenlerinin oranları ve reaktiviteleridir. Bu katkılar çoğu zaman betonda geçirimsizliğin azaltılmasında rol oynarken, Ca(OH)_2 'yi bağlamaları sebebiyle ortamın pH'ını düşürerek pasif tabaka için olumsuz etki oluşturmaktadır (Özer, 2012).

Özer (2012), yaptığı çalışmada, farklı çimento kompozisyonlarının karbonatlaşmaya etkisini incelemiştir. Çalışmasında uçucu kül ve silis dumanı olarak 2 farklı pozolan ve 4 farklı çimento tipi kullanarak toplam 8 farklı beton serisi hazırlamıştır. Hazırlanan numuneler, 28 günlük kür sürelerinin ardından %40 karbondioksitli ortamda 1, 3 ve 7 gün olmak üzere 3 farklı zaman periyodunda karbonatlaştırılmıştır. Daha sonra numunelere basınç dayanımı, birim ağırlık ve kapilerite deneyleri uygulanmıştır. Sonuçlara göre; CEM I 42,5N ve CEM II 42,5N tipi çimentolarda karbonatlaşma direnci en yüksek gözlemlenmiştir. %10 uçucu kül ve yine aynı oranda silis dumanı içeren numunelerin karbonatlaşma açısından CEM I 42,5N ve CEM II 42,5N ile hazırlanan numunelere benzer çıktılar verdiği görülmüştür.

Atiş (2002); çalışmasında uçucu küllerin karbonatlaşmadaki etkisini araştırmıştır. Bunun için hızlandırılmış karbonatlaşma yöntemini tercih etmiştir. Uçucu kül ihtiva eden betonlarda, karbonatlaşma üzerine yapılan denemelerin sonuçlarının çelişkili olduğunu belirtmiştir. Ağırlıkça çimentoyu %50 ve %70 oranlarında uçucu kül ile değiştirmiştir. Deneyde 5 farklı seri beton numunesi hazırlamıştır ve bunlar, katkısız portland çimentosu (M0), uçucu kül %70 (M1), uçucu kül %70 + süper akışkanlaştırıcı (M2), uçucu kül %50 (M3), uçucu kül %50 + süper akışkanlaştırıcı (M4) şeklindedir. Numuneleri 3, 7, 28 ve 90 gün kürlemenin ardından %4,7 konsantrasyonlu karbondioksit içeren ortama koymuştur. Numuneler 14 gün yoğun karbondioksit ortamında bekletildikten sonra karbonatlaşma miktarlarını ölçmüştür. Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyinden önceki kür şartları için hepsinde M1 ve M2 numunelerinde diğerlerinden daha fazla karbonatlaşma derinliği gözlemlenmiştir. M3 ve M4 betonları, M0 kodlu normal portland çimentolu katkısız betonla aynı karbonatlaşma derinliğine sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi ilavesinin karbonatlaşma açısından hiçbir şey farketmediği de vurgulanmıştır. Deneyler sonucunda Tablo 3.2 ve Tablo 3.3 'de verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 3.2. %65 nem ve 20 °C'de kürlenme ile uçucu kül ihtiva eden betonların karbonatlaşma derinlikleri (mm) (Atış, 2002)

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 3.3. %100 nem ve 20 °C'de kürlenme ile uçucu kül ihtiva eden betonların karbonatlaşma derinlikleri (mm) (Atış, 2002)

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 (1993); gerçekleştirdiği çalışmada Türkiye'nin farklı bölgelerinden temin ettiği uçucu küllerin çimento harcı büzülmesine ve karbonatlaşma olayına etkilerini incelemiştir. Numuneler için, iki bakım süresi esas alınmıştır. Birincisi 7 gün ve ikincisi de 90 gündür. Bu süre boyunca %50 $\pm$ 5 bağıl nem ve 21 $\pm$ 1 °C sıcaklıkta tutulmuştur. Uçucu kül, çimentonun yerine %10, %20 ve %40 oranında ikame edilmiş ve belirtilen süreler sonunda 4., 8. ve 20. haftalarda ölçüm yapılmak üzere %4'lük karbondioksit konsantrasyonu olan ortama bırakılmıştır. Elde edilen veriler ışığında; %10 ve %20 uçucu kül ikame eden numuneler hemen hemen kontrol numuneleri kadar veya daha az, %40 içeren numunelerde ise daha fazla karbonatlaşma gözlemlenmiştir.

3.3. Karbonatlaşmayı Engellemek İçin Gerekli Önlemler

Çimento esaslı yapı elemanlarından beton, harç veya çimento matrisinde karbonatlaşma derecesini etkileyen parametreler, önceki kısımda bilimsel olarak desteklenen çalışmalarla birlikte verilmiştir. Bu parametrelerden karbonatlaşma hızını

olumlu etkileyen optimum düzeyler dışındaki durumların bulunması karbonatlaşma için önlem durumları olarak nitelendirilebilir. Bu durumlar Tablo 3.4 'de gösterilmiştir.

Tablo 3.4 Karbonatlaşma derecesini etkileyen parametreler ve etkileri (Özgen, 2006)

Parametre	Etkisi
Su/Çimento Oranı	Yüksek oranda su/çimento oranı karbonatlaşma hızında artışa sebep olur.
Kürleme Koşulları	Erken yaşlarda kürlemenin yetersiz seviyede yapılması betonlarda karbonatlaşma hızını artırır. Bu etki özellikle puzolonik katkı takviyeli betonlarda daha belirgin hale gelmektedir.
Çimento Tipi ve Dozajı	Çimento içerisindeki alkali oranının artması, karbonatlaşma hızını da artırır. Çimento dozajının yükselmesi ise reaksiyon hızında belirgin bir düşüşe sebep olmaktadır.
Betonun Nem İçeriği ve Bağıl Nem	Çok kuru ortamlarda reaksiyon için yeterli nem bulunamayacağından; nem oranı çok yüksek ortamlarda ise gözenekler su ile dolu olacağından her iki koşulda da reaksiyon yavaşlar veya durur. Optimum nem oranı %50-%70 aralığındadır.

CO ₂ Konsantrasyonu	Yüksek konsantrasyonlu CO ₂ ile reaksiyon hızı da artış gösterir.
Ortam Sıcaklığı	Normal sıcaklık değerleri için sıcaklıktaki artış, reaksiyon gerçekleşme hızında da artışa sebep olur. Fakat çok yüksek sıcaklıklar, aşırı kuruma nedeniyle reaksiyonu oldukça yavaşlatabilir.

3.4. Karbonatlaşmanın Betona Etkileri

3.4.1. Karbonatlaşma rötresi

Rötre veya büzülme; betonun ihtiva ettiği suyun kimyasal veya fiziksel herhangi bir sebeple kaybolması olayıdır (Topçu, 2006). Beton taze haldeyken su kaybı genellikle fiziksel nedenlerle gerçekleşirken, sertleşmiş betonda hem kimyasal hem de fiziksel şekilde gerçekleşebilir (Erdoğan, 2003).

Taze veya sertleşmiş betonda meydana gelen buharlaşma, karbonatlaşma ve hidrasyon sebebiyle oluşabilen su kayıpları, harç veya beton sisteminde birim şekil değiştirmelere ve iç gerilmelere neden olmaktadır. İç gerilmelerin sistemin karşılayabileceği çekme dayanımını aşması halinde çatlakların oluşması kaçınılmaz hale gelmektedir (Holt and Leivo 2004) .

Sertleşmiş çimento hamuru, atmosferde bulunan CO₂ ile uzun bir süre boyunca kimyasal reaksiyona girebilir. Bu reaksiyon karbonatlaşma şeklinde isimlendirilen ve büzölmeye de sebep olan bir reaksiyondur. Çimento hamurunun CO₂ ile reaksiyonunun derecesi ve bu sebeple oluşan rötre bağıl nemin fonksiyonudur. Dolayısıyla büzölmenin en fazla olduğu zaman, karbonatlaşmanın da yüksek olduğu %50 bağıl nem oranında gerçekleşir (Özer, 2012).

Düşük nem düzeyi dışında, maksimum karbonatlaşma kaynaklı büzülmenin kuruma sürecinden çok hemen kuruma sonrası gerçekleştiği düşünülmektedir. Rötremiktarı su/çimento miktarının yanı sıra ortamın nemi ve kür edilme koşullarından da etkilenmektedir. Karbonatlaşma rötresinin sonlandığı an, karbonatlaşmanın da durduğu andır (Akman, 1997).

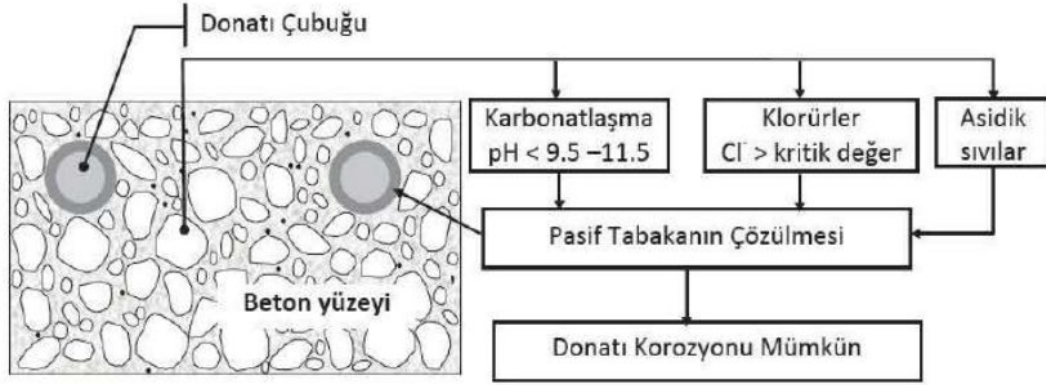
3.4.2. Beton dayanımı

Beton, dayanımını almaya döküldüğü ilk andan itibaren başlar ve 28. günde mukavemetinin büyük kısmını almış olur. Karbonatlaşmış betonda, yüzeyden derine doğru karbonatlaşma reaksiyonlarının gerçekleştiği anlaşılmaktadır. Beton dayanımının artışı ile karbonatlaşma derecesi azalırken; karbonatlaşma reaksiyonunun bir ürünü olan kalsiyum karbonatın, kalsiyum hidroksitten daha fazla hacim kaplaması sebebiyle betonun porozitesi azalmaktadır. Bu durum karbonatlaşmanın, betonun mukavemet ve elastisite modülünde artmasına, deformasyon kabiliyetinin ise azalmasına sebep olur.

3.4.3. Donatı korozyonu

Korozyon, genellikle metaller ile bulunulan ortam arasında gerçekleşen ve malzemenin bozulmasına sebep olan elektrokimyasal bir reaksiyondur (Özgen, 2006).

Beton içerisindeki donatı, betonun yüksek alkali yapısı sayesinde korozyondan korunmaktadır. Bu yüksek alkali yapı, donatı için pasif tabaka oluşturmaktadır. Fakat betonda karbonatlaşmanın gerçekleşmesi sebebiyle betonda kalsiyum hidroksit miktarının azalırken pH değeri 8.3 olan kalsiyum karbonatın oluşması ve bunun sonucunda da alkali yapının pH değerinin düşerek ortadan kalkması ve donatı üzerindeki koruyucu bu pasif tabakanın bozulması gerçekleşir. Bu şekilde donatı için de korozyon süreci başlamaktadır (Yiğitler, 2008). Şekil 3.14 'de bu durum gösterilmektedir.

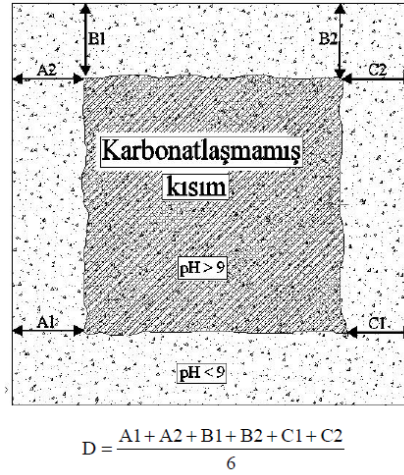


Şekil 3.14. Karbonatlaşma reaksiyonu ve klorür iyonu sebebiyle betonun donatıyı korozyona karşı koruma özelliğini kaybetmesi (CEB, 1992)

3.5. Karbonatlaşma Derinliği Tayini

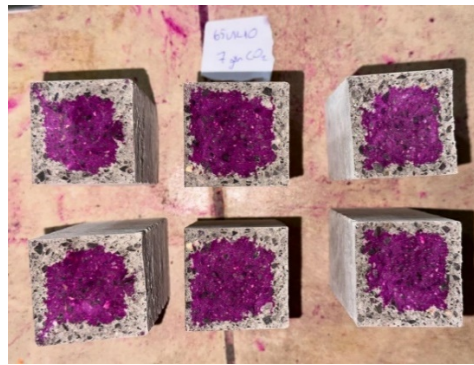
Karbonatlaşma derinliklerinin belirlenmesi için çeşitli araştırmacılar tarafından bazı matematiksel bağlantılar geliştirilmiştir. Fakat karbonatlaşma çok fazla parametreye ve numuneler çok fazla değişken kompozisyona sahip malzemelerden olduğundan tam olarak tayin edilmesi oldukça zordur.

Deneyisel teknikler kullanılarak numunede karbonatlaşmanın belirlendiği bazı yöntemler mevcuttur. Bunlardan en çok kullanılanı indikatörlerin ilgili yüzeye püskürtülerek kullanılmasıdır. Püskürtme işleminden önce yüzeyler mümkün olduğunca dik kesilmeli ve yüzey üzerindeki partiküller bir fırça yardımıyla yüzeyden uzaklaştırılmalıdır. Daha sonra taze temizlenmiş yüzeye indikatör püskürtülerek oluşan renk farklılığına göre kumpas veya benzeri bir teknikle karbonatlaşma derinliği ölçümü yapılır (Gönen, 2003). Şekil 3.15 'de numune yüzeyinden, örnek ölçüm tekniği ve hesaplama bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 3.15. Karbonatlaşma derinliği ölçüm tekniği (Gönen ve Yazıcıoğlu, 2005)

Genellikle 4 çeşit indikatör kullanılmaktadır. Bunlar ve gösterge pH değerleri şu şekildedir; nitramin - 11,5, thymolphthalein – 10,0 -9,0, in-nitrophenol – 8,0 ve en sık kullanılan fenolftalein – 9,0 ‘dur (Krajci and Janotka, 2000). %1 fenolftalein, %70 etil alkolde çözülerek çözelti hazırlanır. Bu indikatörün püskürtülmesi sonucunda pH değeri 9,0 ve altında kalan bölgeler herhangi bir renk vermez ve bu kısımların karbonatlaştığı anlamına gelmektedir. Numunenin yüzeyinin alkaline olan kısımlarında ise fenolftalein, Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek o bölgeyi mor renge boyamaktadır (Parrott and Killoh, 1989). Şekil 3.16 ‘da fenolftalein püskürtülmüş numune yüzeyleri gösterilmiştir.



Şekil 3.16 Yüksek konsantrasyonlu karbondioksit maruz kalan numunelere fenolftalein indikatörünün püskürtülmesi

4. DENEYSEL ÇALIŞMA

4.1. Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada kullanılmak üzere üretilen harç numunelerini oluşturan; çimento, ince agrega, su, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve süper akışkanlaştırıcının malzeme özellikleri bu kısımda verilmiştir.

4.1.1. Çimento

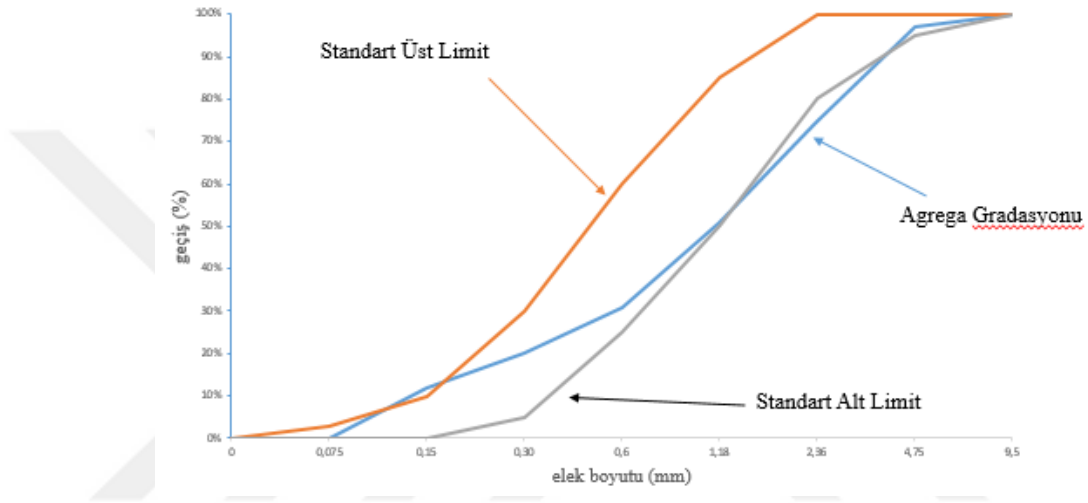
Çalışma kapsamında CEM I 42,5 R çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri ile TS EN 197-1 (2012) Standardı'na uygunluğu Tablo 4.1'de verilmektedir. Tablodaki veriler üretici beyanıdır.

Tablo 4.1. CEM I 42,5 R çimentosunun özellikleri ve ilgili standart limitleri

Kimyasal İçeriği	(%)	TS EN 197-1 Standart Limitleri
SiO ₂	20,14	-
Al ₂ O ₃	4,70	-
Fe ₂ O ₃	3,20	-
CaO	63,95	-
MgO	1,41	-
SO ₃	3,04	Max. 4%
K ₂ O	0,63	-
Na ₂ O	0,48	-
Kızdırma Kaybı	2,43	Max. 5%
Cl ⁻	0,01	Max. 0.1%
Fiziksel Özellikleri		
Özgül Ağırlık	3,11	-
Blaine Spesifik Yüzey (cm ² /g)	4044,00	-
45 µ elekte kalıntı %	2,10	-
90 µ elekte kalıntı %	0,10	-
İlk Priz Süresi (dk)	200,00	Min. 60
Son Yerleşme Süresi (dk)	265,00	-
Soundness (mm)	1,00	Max. 10
Basınç Dayanımı (MPa)		
2 gün	24,40	Min. 20
28 gün	49,20	Min. 42,5 - Max 62,5

4.1.2. Agregas

Çalışmada ince agregas olarak, 0-4 mm boyutunda kırılmış kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Agreganın doygun kuru yüzey halde yığın özgül ağırlığı 2,65, su emme kapasitesi %1 ve nem içeriği %0,9'dur. Agreganın granülometresi ve ASTM C33 (2018) Standart limitlerine uygunluğu Şekil 4.1'de sunulmaktadır.



Şekil 4.1. Kullanılan agreganın granülometresi ve standarda uygunluğu

4.1.3. Karışım suyu

Yapılan çalışmalarda TS EN 1008 (2003)'e uygun İzmir ili şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Karışım suyu şehir şebekesinden alındığı gibi bekletilmeden kullanılmıştır.

4.1.4. Uçucu kül

Uçucu kül (Fly ash) son zamanlarda ülkemizde dikkat çekmeye başlayan, özellikle gelişmiş ülkelerde beton sektöründe yaygın bir şekilde yıllardır tercih edilen puzolonik özellikte mineral beton katkısıdır.

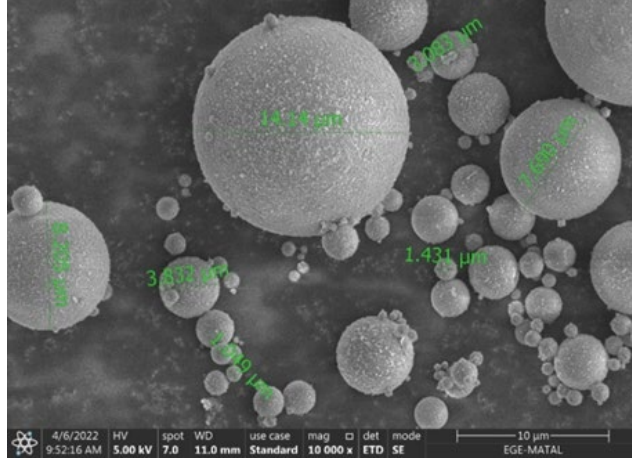
Uçucu kül, silis, aliminyum ve demir gibi elementleri içerisinde bulundurmaktadır. Betonun özelliklerinin iyileştirilmesinde ekonomik bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır.

Deneysel çalışmada ASTM C618 (2019) Standardı'na uygun C sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan uçucu külün özellikleri Tablo 4.2 'de verilmiştir.

Tablo 4.2. C sınıfı uçucu külün özellikleri ve ilgili standardın limitleri

Kimyasal İçeriği	CFA	ASTM C618 limitleri
	(%)	
SiO ₂ (S)	47,1	-
Al ₂ O ₃ (A)	11,6	-
Fe ₂ O ₃ (F)	7,2	-
S+A+F	65,9	Min. 50%
CaO	19,9	Min. 18%
MgO	7,8	Max. 4%
SO ₃	2,8	-
Na ₂ O(N)	1,6	-
K ₂ O(K)	3	-
N+0.658K	3,6	-
Kızdırma Kaybı	0,4	Max. 6%
Fiziksel Özellikleri		
Özgül Ağırlık	2,48	-
Blaine yüzey alanı (cm ² /g)	2706	-
7 günlük dayanım aktivite indeksi	77%	Min. 75%
28 günlük dayanım aktivite indeksi	95%	Min. 75%

Şekil 4.2'de uçucu külün Taramalı Elektron Mikroskobu veya diğer adıyla SEM (Scanning Electron Microscope) görüntüsü bulunmaktadır.



Şekil 4.2. C sınıfı uçucu küle ait SEM görüntüsü (Moghimi vd., 2022)

4.1.5. Silis Dumanı

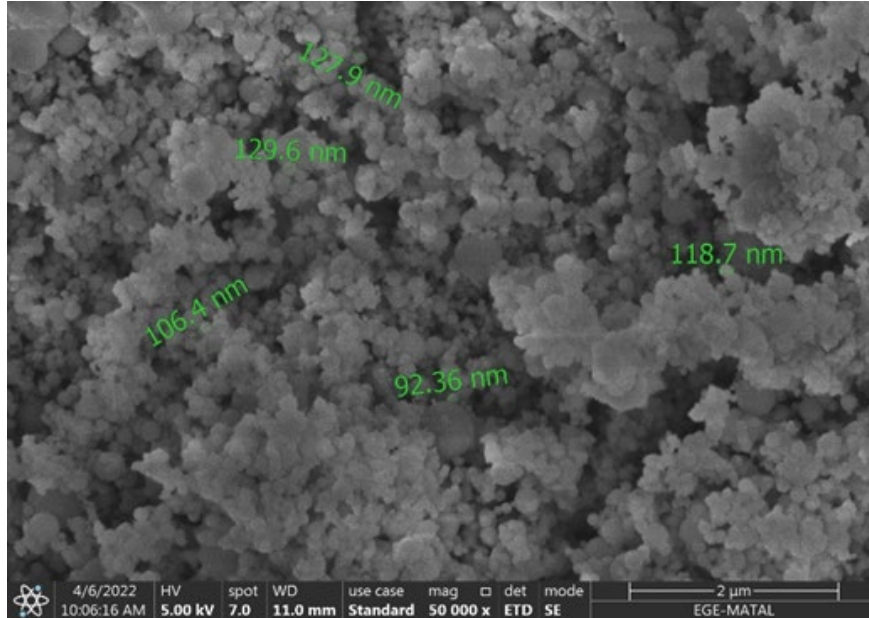
Silis dumanı; ana yapısı 1 minimikrondan daha küçük, amorf camsı silis partiküllerinden oluşan, iyi seviyede puzolanik aktiviteye sahip bir üründür. Demir, silisyum veya silisyum alaşımlarının ergime tekniği ile üretimi esnasında elde edilmektedir. Genellikle renk skalası, açık griden koyu griye değişen tonlarda olabilir. Karbon içeriğinin artmasıyla renk tonu daha koyulaşmaktadır. Su ile karıştırıldığında siyaha yakın bir renk elde edilmektedir (Erdoğan, 2007).

Silis dumanı oldukça ince öğütülmüş parçalardan oluşmaktadır. Portland çimentosu partikülleriyle kıyaslandığında yaklaşık 100 kat daha ince bir yapıya sahiptir. Bu sebeple su ihtiyacı da oldukça fazladır.

Deneyisel çalışmada ASTM C1240 Standardı'na uygun silis dumanı kullanılmıştır. Özellikleri Tablo 4.3'de ve SEM görüntüsü Şekil 4.3'de verilmiştir.

Tablo 4.3. Silis dumanının özellikleri ve ilgili standarda uygunluğu

Kimyasal İçeriği	SF	ASTM C1240 limitleri
	(%)	
SiO ₂ (S)	85,6	Min. %85
Al ₂ O ₃ (A)	0,71	-
Fe ₂ O ₃ (F)	0,92	-
S+A+F	-	-
CaO	1,29	-
MgO	4,75	-
SO ₃	0,38	-
Na ₂ O(N)	0,4	-
K ₂ O(K)	3,41	-
N+0.658K	3,81	-
Kızdırma Kaybı	2,6	Max. 6%
Fiziksel Özellikleri		
Özgül Ağırlık	2,31	-
Blaine yüzey alanı (cm ² /g)	-	-
7 günlük dayanım aktivite indeksi	124%	Min. 105%



Şekil 4.3. Silis dumanı SEM görüntüsü

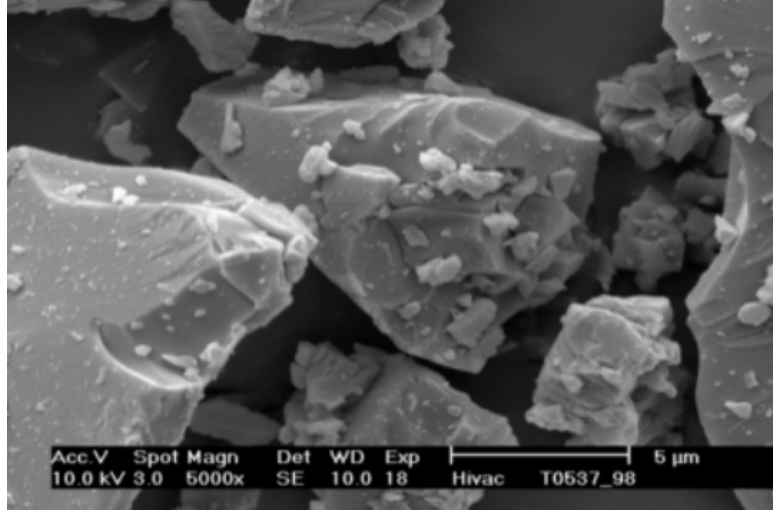
4.1.6. Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufu (YFC), yüksek fırınlardan çıkan bir yan üründür ve periyodik olarak yüksek fırından temizlenmesi gereken aluminasilikat ve erimiş kalsiyum silikatından oluşur. Bu yan ürün, demir üretimi sırasında demir cevheri, kireçtaşı ve kok kömürünün yüksek fırında 1500 °C 'ye kadar ısıtılmasıyla üretilir. Erimiş cürufun soğutulma yöntemine bağlı olarak çeşitli formlarda cüruf ürünleri üretilir. Esas olarak CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve MgO'dan oluşur. Yüksek fırın cürufu ana kimyasal bileşenler açısından, sıradan Portland çimentosuna benzemektedir ancak içeriğindeki bileşenlerin oranları farklıdır (Singh ve diğerleri, 2021). Camsı, pürüssüz ve daha az emici bir yapısı bulunur. Portland çimentosundan daha düşük bir özgül ağırlığa sahiptir. Yüksek fırın cürufu, kimyasal olarak daha stabildir ve çok düşük hidrasyon ısıyla sonuçlanır (ACI 233R-03, 2003).

Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufunun özellikleri Tablo 4.4'de verilmiştir.

Tablo 4.4. Yüksek fırın cürufunun özellikleri ve standart limitleri

Kimyasal İçeriği	YFC	ASTM C989 limitleri
	(%)	
SiO ₂ (S)	39,45	-
Al ₂ O ₃ (A)	13	-
Fe ₂ O ₃ (F)	1,03	-
CaO	31,14	-
MgO	7,67	-
SO ₃	1,35	Max. 4
Na ₂ O(N)	0,41	-
K ₂ O(K)	0,96	-
Fiziksel Özellikleri		
Özgül Ağırlık	2,79	-
Blaine yüzey alanı (cm ² /g)	2370	-



Şekil 4.4. Yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü

4.1.7. Süper Akışkanlaştırıcı

Süper akışkanlaştırıcılar; özellikle yoğun kıvamlı karışımlarda işlenebilme, sıkıştırılabilme ve pompalanabilme özelliğinin artırılması amacıyla kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkının teknik özellikleri Tablo 4.5 'de sunulmuştur.

Tablo 4.5. Süper akışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Renk ve Form	Sarımsı - sıvı
Kimyasal Köken	Polikarboksilat
Yoğunluk (kg/lt)	1,05 - 1,09 (+20 °C 'de)
Klor iyonu muhtevası	En fazla 0,1% - TS EN 934 - 2'ye göre klor içermez
Alkali içeriği	En fazla %5
pH	3 ile 7 arası
Uygunluk	TS EN 934 - 2 Uygun

4.2. Harç Karışım Oranları

Temel olarak 0,35 - 0,50 ve 0,65 su / bağlayıcı oranlarında uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu olmak üzere 3 farklı puzolanik malzeme %5, %10 ve %15 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. Ayrıca her bir su / bağlayıcı oranından karşılaştırma amacıyla puzolan ikamesiz karışımlar hazırlanmıştır. Harç numunelerinin kompozisyonları ve karışım oranları Tablo 4.6 'da verilmiştir.

Tablo 4.6. Harç numunelerinin karışım oranları

HARÇ KOMPOZİSYONLARI (g)								
S/B	Num. Kodu	CEMI-42,5R	Agrega	Su	C Sınıfı Uçucu Kül	YFC	Silis Dumanı	Akışkanlaştırıcı
0,65	65CEM	450	1350	292,5				
	65UK15	382,5	1350	292,5	67,5			
	65UK10	405	1350	292,5	45			
	65UK05	427,5	1350	292,5	22,5			
	65SF15	382,5	1350	292,5			67,5	0,2
	65SF10	450	1350	292,5			45	0,5
	65SF05	427,5	1350	292,5			22,5	0,8
	65FC15	382,5	1350	292,5		67,5		
	65FC10	405	1350	292,5		45		
	65FC05	427,5	1350	292,5		22,5		
0,5	50CEM	450	1350	225				0,2
	50UK15	382,5	1350	225	67,5			0,2
	50UK10	405	1350	225	45			0,2
	50UK05	427,5	1350	225	22,5			0,3
	50SF15	382,5	1350	225			67,5	3
	50SF10	405	1350	225			45	2,5
	50SF05	427,5	1350	225			22,5	2
	50FC15	382,5	1350	225		67,5		0,4
	50FC10	405	1350	225		45		0,2
	50FC05	427,5	1350	225		22,5		0,1
0,35	35CEM	450	1350	157,5				3,2
	35UK15	382,5	1350	157,5	67,5			3
	35UK10	405	1350	157,5	45			2,8
	35UK05	427,5	1350	157,5	22,5			2,7
	35SF15	382,5	1350	157,5			67,5	4,2
	35SF10	405	1350	157,5			45	4,1
	35SF05	427,5	1350	157,5			22,5	4
	35FC15	382,5	1350	157,5		67,5		2,9
	35FC10	405	1350	157,5		45		2,7
	35FC05	427,5	1350	157,5		22,5		2,5

Mevcut literatür çalışmalarına bakıldığında numune kompozisyonlarının büyük kısmında su / bağlayıcı oranlarının 0,35 ile 0,65 arasında değişim gösterdiği görülmüştür. Bu sebeple çalışmamızda 3 farklı su / bağlayıcı oranı olarak 0,35 - 0,50 ve 0,65 seçilmiştir. Bağlayıcı miktarı ve agrega miktarı tüm karışımlarda sabit tutulmuştur. Puzolan ilavesiz numunelere ek olarak 3 farklı oranda çimentonun yerine ikame edilen 3 farklı puzolanik malzeme ile amaçlanan, optimum özelliklere sahip olan karışımın dayanım, su emme ve karbonatlaşma açısından tespit edilmesidir. Bu sebeple Tablo 4.6 'da görüldüğü gibi toplam 30 farklı beton serisi üretilmiştir.

Çalışmadaki bir diğer değişken karbonatlaşma süreleridir. Bir seri hiç karbonatlaşmaya uğratılmadan 28 günlük kürlenmenin (bağıl nem $\%95\pm5$) ardından eğilme, basınç ve su emme testlerine tabii tutulmuştur. Diğer serilerde bu deneyler yine 28 günlük kürlenme (bağıl nem $\%95\pm5$) sonrası 1 gün, 3 gün ve 7 gün hızlandırılmış karbonatlaşma testine tabii tutulduktan sonra eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür.

4.3. Numunelerin İmalatı

Her bir seri harç numunesinden 12 adet imal edilmiştir. 30 farklı seri harç numunemiz bulunduğu standart 40 x 40 x 160 mm'lik toplam 360 numune üretilmiştir. İmalat öncesi tüm çalışma boyunca gerekecek olan malzemeler tartılarak laboratuvarında ayrı bir bölüme alınmıştır.

Harç imalatı, TS EN 196 -1 (2016) 'e göre yapılmıştır. Buna göre imalatın yapılacağı kaba önce su konulmuştur, daha sonra çimento eklenerek düşük hızda 30 saniye karıştırılmıştır. Sonraki 30 saniyelik süreçte ince agrega ilavesi yapılmış, ardından karıştırıcı 30 saniye yüksek hızda çalıştırılmış ve devamında 90 saniye karıştırılan harç; cihaz durdurularak kenarlara yapışan harçlar karışıma tekrar katılmıştır. Bu işlemin ardından karıştırma işlemine 60 saniye yüksek hızda devam edilerek süreç tamamlanmıştır. Puzolan ilaveli numuneler için ince agregadan sonra bu malzemeler karışıma dahil edilmiştir. Kıvamın oldukça yoğun olduğu ve yeterli yayılma çapı sağlayamayan özellikte su oranı 0,35 ile 0,50 olan karışımlara süper akışkanlaştırıcı ilavesi de yapılmıştır. Karıştırma işleminde kullanılan çimento mikseri Şekil 4.5(a)' da ve kullanılan kalıp sistemi Şekil 4.5(b) 'de verilmiştir.



(a)



(b)

Şekil 4.5 Harç numunelerinin hazırlanmasında kullanılan mikser (a) ve kullanılan kalıp sistemi (b)

4.4. Deneyler ve Ölçümler

4.4.1. Yayılma çaplarının ölçümü

Çalışma boyunca üretilen harçların işlenebilirlik kapasiteleri, yayılma çapı testi ile takip edilmiştir. Test koşulları ASTM C 1437 referans alınarak gerçekleştirilmiştir.

4.4.2. Su emme deneyi

Harç numunelerinin su emme değerlerinin tayininde TS 3624 (1981) 'den yararlanılmıştır. Kırılma işleminden alınan numuneler etüvde 110 ± 5 °C koşulunda 1 gün beklenmiştir. 24 saatin sonunda numunelere tartım işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu numunelere ‘‘Etüv Kuru’’ denilmektedir. Daha sonra numuneler 2 gün boyunca 21 ± 2 °C su içerisinde bekletilmiştir. Bu numunelere ‘‘Suya Doygun Numune’’ denilmektedirler, Numunelerin tartım işlemi yapılarak değerler not alınmıştır. Bu bilgiler ışığında tartım sonuçları kaydedilen suya doymuş ve etüv kuru numuneler Denklem 4.1 kullanılarak su emme oranları bulunmuştur.

Su emme değeri için her kompozisyondan 6 numune seçilerek tartımlar yapılmış ve bunların aritmetik ortalaması alınmıştır.

$$\text{Su emme oranı (\%)} = ((B-A) / A) \times 100 \quad (4.1)$$

Denklemden;

A: Etüv kurusu ağırlık (g)

B: Suyu doymun durumdaki ağırlık (g)

4.4.3. Üç noktalı eğilme dayanımı deneyi

Üç noktalı eğilme dayanımı deneyi hazırlanan tüm numunelere uygulanmıştır. Hızlandırılmış karbonatlaşma testi uygulanmayacak numuneler için 28 günlük kürlemenin ardından; hızlandırılmış karbonatlaşma testi uygulanan numuneler için ise kür süresinin ardından 1, 3 ve 7 günlük yüksek karbondioksit maruziyetleri sonrasında test yapılmıştır. TS EN 196-1 (2016) standardında belirlenen spesifikasyonlara uygun hidrolik eğilme presi kullanılmıştır. 40 x 40 x 160 mm boyutlarına sahip prizmatik harç numuneleri 100 mm açıklığa sahip iki mesnet üzerine mesafe tam olarak ortalanarak oturtulmuştur. Üstteki tek noktadan numunelere 0,2 kN/s hızı ile artan P yükü yüklenmiştir. Kırılmadaki P yükleri not alınarak Denklem 4.2 ile eğilme dayanımı değerlerine ulaşılmıştır.

$$\sigma_{\text{eğilme}} = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times d^2} \quad (4.2)$$

Bağıntıdaki;

$\sigma_{\text{eğilme}}$: Eğilme dayanımı (MPa)

P: Kırılma anında maksimum yük (N)

L: İki destek arası mesafe (mm)

b: Numunenin genişliği (mm)

d: Numunenin yüksekliği (mm)

Şekil 4.6 'de test düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Eğilme dayanımı test düzeneği

4.4.4. Tek eksenli basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı, numunenin eksenel basınç yükü altında kırılmamak için gösterdiği direnç veya yapıda oluşan en büyük gerilme olarak tanımlanabilir (Erdoğan, 2003). Betonun veya harç numunelerinin birçok özelliği basınç dayanımı ile paralel etkilendiğinden dolayı betonun veya harcın kalite ölçütü olarak değerlendirilebilir. Betonun en önemli mekanik özelliklerinden birisi basınç dayanımıdır. Genel olarak yüksek basınç dayanımına sahip bir numune; kompasitesi yüksek, geçirgenliği düşük, dış etmenlere daha dayanıklı ve aşınma direnci yüksek olmaktadır (TS EN 12390-3, 2010).

Tek eksenli basınç dayanımı deneyi, tüm harç numunelerine uygulanmıştır. TS EN 196-1 (2016) standardı parametrelerine uygun olarak otomatik hidrolik basınç test presi kullanılmıştır. Deney boyunca 2.4 kN/s yükleme hızı kullanılmıştır. Numunelerin basınç dayanımını belirlemek için 28 gün kürlenmiş harç numunelerinden hızlandırılmış karbonatlaşmaya uğramayacak olanlar 28. günde; hızlandırılmış karbonatlaşma testine uğrayanlar ise bu 28 günlük kürlemenin ardından 1, 3 ve 7 gün karbonatlaşmaya maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanımı testi gerçekleştirilmiştir. Üç noktalı eğilme dayanımı deneyinden sonra her harç numunesi, iki parçaya ayrılmıştır. Dolayısıyla 360 numunenin ikiye ayrılması neticesinde 720

adet numune tek eksenli basınç deneyine tabii tutulmuştur. Bu parçalardan her biri, tek eksenli basınç dayanımı test cihazında 40mm x 40mm boyutlarındaki yardımcı yükleme tablasına ortalanarak yerleştirilmiştir. Cihaz ayarlarından da bu ölçüler seçilerek basınç dayanımı değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlerin ortalaması alınarak sonuçlar oluşturulmuştur. Şekil 4.7 ‘de tek eksenli basınç dayanımı pres cihazı görülmektedir.



Şekil 4.7. Otomatik hidrolik basınç test presi

4.4.5. Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi

Hızlandırılmış karbonatlaşma deneyi için öncelikle hava sızdırmaz özel bir tank tasarımı yapılmıştır. Tankta 2 adet hava tahliye vanası, iç basıncı gözlemleyebilmek amacıyla manometre, güvenlik amaçlı emniyet valfi ve gaz girişi rekoru bulunmaktadır. Tankın hava sızdırmazlığı, içerisine hava basıldıktan sonra hem suya daldırılarak hem de 24 saat süre geçtikten sonra basınç düşüşü olup olmadığı üzerindeki manometreden gözlemlenerek teyit edilmiştir. Şekil 4.8 ‘de su içerisinde hava sızdırmazlık kontrolü görülmektedir.



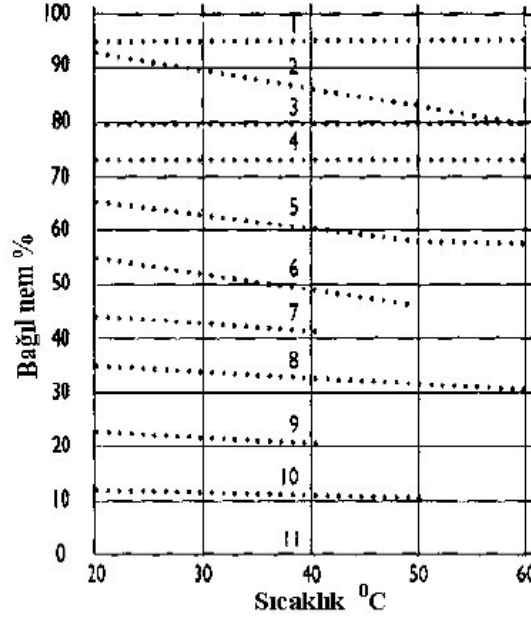
Şekil 4.8. Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı hava sızdırmazlığı kontrolü

Tank emniyet amaçlı olarak deneyde kullanılacak basıncın 3 katından biraz daha fazla basınca dayanabilecek şekilde (3 bar) tasarlanmıştır. Bunun yanında iş güvenliği açısından karbondioksit tüpünden gelen sokete ekstra bir vana konulmuş, ayrıca ani gaz basıncı yükselmesine karşı 1 bar basınca dayanıklı emniyet valfi konularak güvenli ortam sağlanmıştır.



Şekil 4.9. Hızlandırılmış karbonatlaşma test kiti

Hızlandırılmış karbonatlaşma testinde, doğru karbonatlaşma derinliklerini gözlemleyebilmek amacıyla tüm numuneler aynı nem ve sıcaklıkta teste tabii tutulmuştur. Bu amaçla tank, sıcaklığın sabit 20 °C olduğu odaya bırakılmıştır. Nem ayarı için Şekil 4.10 'daki tablodan yararlanılmıştır (Gönen ve Yazıcıoğlu, 2005). Tankın içerisinde %55 nem oluşturmak için tankın içerisine doymuş sodyum dikromat çözeltisi konulmuştur.



Şekil 4.10. Sıcaklık, tuz ve nem ilişkisi (Gönen ve Yazıcıoğlu, 2005)

Numuneler, 1 gün (24 saat), 3 gün (72 saat) ve 7 gün (168 saat) boyunca hızlandırılmış karbonatlaşma tankına bırakılmıştır. Tankın taban kısmına hava difüzyonunu maksimum seviyede tutabilmek için delikli raf sistemi konulmuştur. Tank içerisinde Şekil 4.11 'de görüldüğü gibi numuneler, düz kenarları birbirine değmeyecek şekilde özel bir açıyla tüpün içerisine yerleştirilmiş böylece karbondioksit gazının harçların içine homojen olarak difüze edilmesi amaçlanmıştır. Her bir partide toplam 30 farklı kompozisyondan 3 adet harç numunesi olmak üzere toplam 90 adet numune tank içerisine yerleştirilmiştir.



Şekil 4.11. Hızlandırılmış karbonatlaşma tankı içerisindeki harç numuneleri

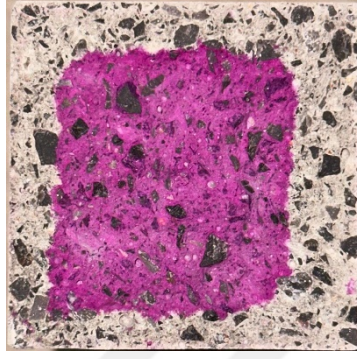
Hızlandırılmış karbonatlaşma testi için karbondioksit konsantrasyonunun tank içerisinde %40 olması için manometrenin 0,8 bar değerine gelecek şekilde karbondioksit tüpünden tanka gaz verilmiştir.



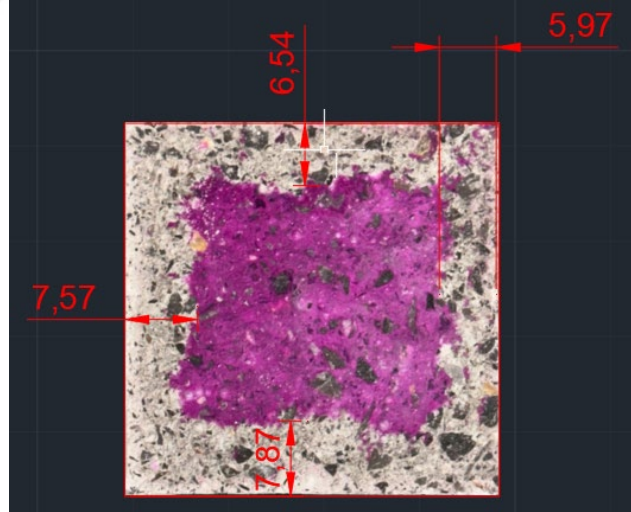
Şekil 4.12. Hızlandırılmış karbonatlaşma test kiti 0,8 bar manometre değeri

Süresini tamamlayıp tanktan çıkarılan numuneler üç noktalı eğilme testine tabi tutulmuşlardır. Bu sayede ortadan ikiye ayrılan numunelerin iç arayüzeylerine de erişim sağlanabilmiş olup bu yüzeylere fenolftalein çözeltisi spreyleme yöntemiyle püskürtülerek karbonatlaşma derinliğinin gözlemlenebilmesine olanak vermiştir. Mor renge dönen alanlar karbonatlaşmanın gerçekleşmediği ve halen alkalin durumda bulunan alanlardır. Renk değişimi gözlemlenmeyen alanlar ise karbonatlaşmanın gerçekleşerek alkalin durumun bozulmuş olduğu alanlardır. Bu ölçümlerde kumpas kullanımının yeterince hassasiyet yaratamayacağı düşünülerek Şekil 4.13 'de

görüldüğü gibi her bir numunenin arayüzü sabit bir açıyla sabit bir noktadan fotoğraflanmış ve bu fotoğraflar ölçek oranlarına dikkat edilerek AUTOCAD programına aktarılmıştır. Şekil 4.14 'deki gibi programda hassas bir şekilde her kenardan ölçümler yapılmış ve bunların ortalaması alınmıştır.



Şekil 4.13. Karbonatlaşma sonrası fenolftalein çözeltisi püskürtülen harç numunesinin arayüzey görüntüsü



Şekil 4.14. AUTOCAD uygulaması yardımıyla arayüzden karbonatlaşma derinliği ölçülmesi

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

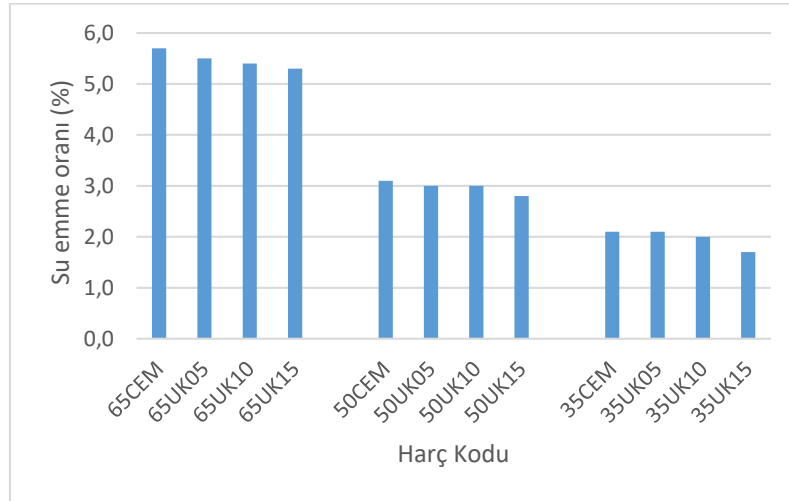
5.1. Su Emme Deneyi Sonuçları

Standart 28 günlük suyun içerisinde kürlenmiş numunelerin su emme deneyi sonucunda yüzde olarak su emme değerleri verilmiştir.

Uçucu kül ikameli harç numunelerinde, su emme deneyi sonuçları Şekil 5.1 'de sunulmuştur. Pozolanik reaksiyondan dolayı, zamanla CH tüketilerek CSH jeline dönüşmüştür. Bu da yapının daha geçirimsiz olmasını destekleyen iç yapıdaki değişimlerden birisidir. Dolayısıyla tüm su / bağlayıcı oranlarında, uçucu kül ikame oranının artışına paralel olarak su emme değerlerinde de düşüşler gözlemlenmiştir. Aynı zamanda öngörüldüğü gibi 0,35 su / bağlayıcı oranı en düşük su emme değerini verirken; 0,65 su / bağlayıcı oranı yüksek boşluk yapısı sebebiyle en yüksek değeri vermiştir.

Tablo 5.1. Uçucu kül ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları

Numune Kodu	(% Su Emme)
65CEM	5,7
65UK05	5,5
65UK10	5,4
65UK15	5,3
50CEM	3,1
50UK05	3,0
50UK10	3,0
50UK15	2,8
35CEM	2,1
35UK05	2,1
35UK10	2,0
35UK15	1,7

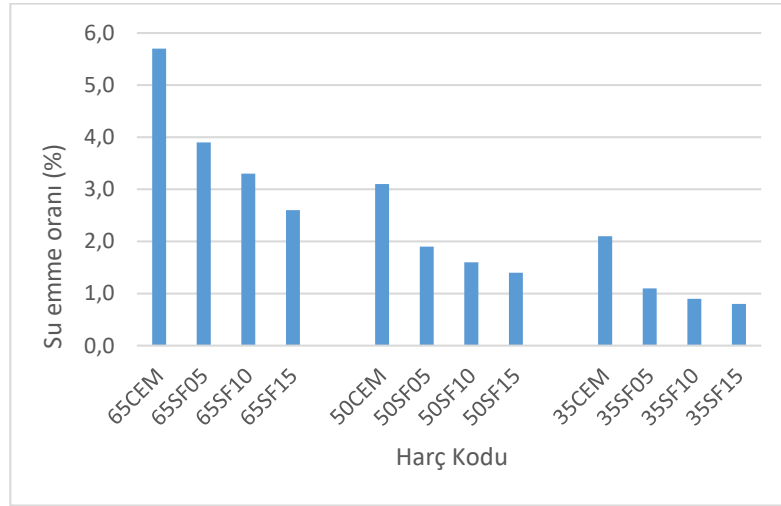


Şekil 5.1. Uçucu kül ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları

Silis dumanı ikameli harç numunelerinin yüzdesel su emme değerleri Şekil 5.2’de verilmiştir. Su / bağlayıcı oranının düşmesine bağlı olarak boşluk miktarındaki azalma neticesinde su emme değerleri düşerken; diğer taraftan çimentodan çok daha ince taneciklere sahip olan silis dumanı da boşlukların doldurulmasındaki görevi sayesinde artan ikame oranlarıyla su emme değerinde düşüşe sebep olmuştur.

Tablo 5.2. Silis dumanı ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları

Numune Kodu	(% Su Emme)
65CEM	5,7
65SF05	3,9
65SF10	3,3
65SF15	2,6
50CEM	3,1
50SF05	1,9
50SF10	1,6
50SF15	1,4
35CEM	2,1
35SF05	1,1
35SF10	0,9
35SF15	0,8

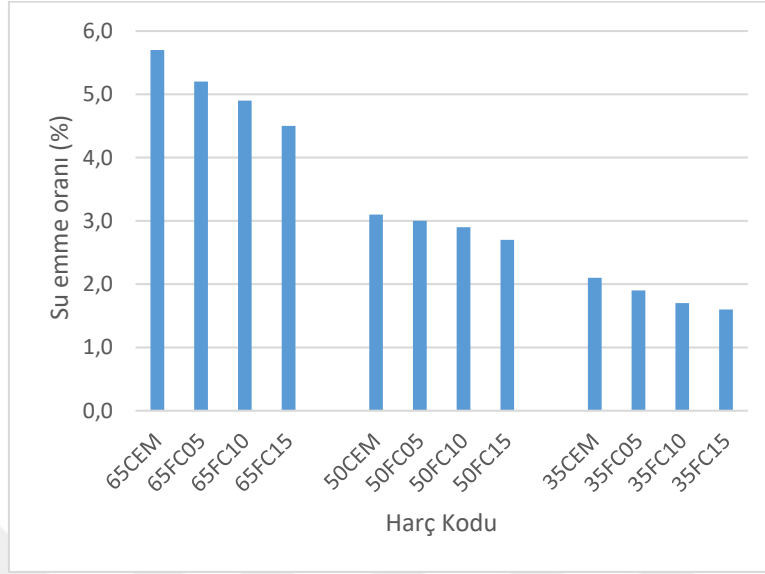


Şekil 5.2. Silis dumanı ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları

Yüksek fırın cürufunun, 3 farklı su / bağlayıcı oranında 3 farklı oranda çimento ile yer değiştirmesiyle gözlemlenen yüzdesel su emme değerleri Şekil 5.3’de verilmiştir. Yüksek fırın cürufu artışının, su emme değerlerinde azalmaya sebep olduğu açıkça görülmektedir. Çimento hamurunda serbest halde bulunan Ca(OH)_2 , yüksek fırın cürufu sayesinde CSH jel yapısına dönüşerek biraz daha sıkı bir iç yapı oluşumunu desteklemektedir.

Tablo 5.3. Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları

Numune Kodu	(% Su Emme)
65CEM	5,7
65FC05	5,2
65FC10	4,9
65FC15	4,5
50CEM	3,1
50FC05	3,0
50FC10	2,9
50FC15	2,7
35CEM	2,1
35FC05	1,9
35FC10	1,7
35FC15	1,6



Şekil 5.3. Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinde su emme sonuçları

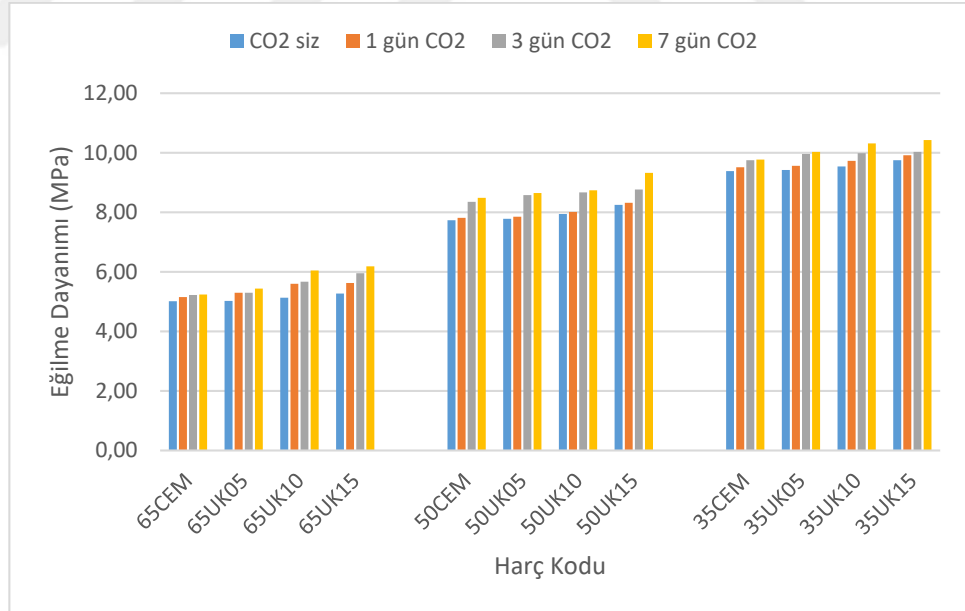
5.2. Üç Noktalı Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında yapılan üç noktalı eğilme deneyi sonucunda elde edilen veriler bu kısımda sunulacaktır.

Uçucu kül ikameli harç numunelerinin üç noktalı eğilme dayanım sonuçları incelendiğinde su / bağlayıcı oranındaki artışla birlikte eğilme dayanımının da düşüş gösterdiği açıktır. En yüksek eğilme dayanımı değerleri 0,35 oranında gözlemlenirken en düşük dayanımlar 0,65 oranında gözlemlenmiştir. Ayrıca uçucu kül ikame oranı ve karbonatlaşma süresinin artmasıyla eğilme dayanımı artmıştır.

Tablo 5.4. Uçucu kül ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları

	CO ₂ siz	1 gün CO ₂	3 gün CO ₂	7 gün CO ₂
65CEM	5,02	5,16	5,23	5,24
65UK05	5,03	5,30	5,30	5,44
65UK10	5,13	5,60	5,67	6,05
65UK15	5,27	5,63	5,95	6,19
50CEM	7,73	7,81	8,35	8,48
50UK05	7,78	7,85	8,58	8,65
50UK10	7,95	8,02	8,67	8,74
50UK15	8,25	8,32	8,77	9,33
35CEM	9,38	9,52	9,75	9,77
35UK05	9,42	9,56	9,96	10,03
35UK10	9,54	9,73	9,98	10,31
35UK15	9,75	9,91	10,03	10,43

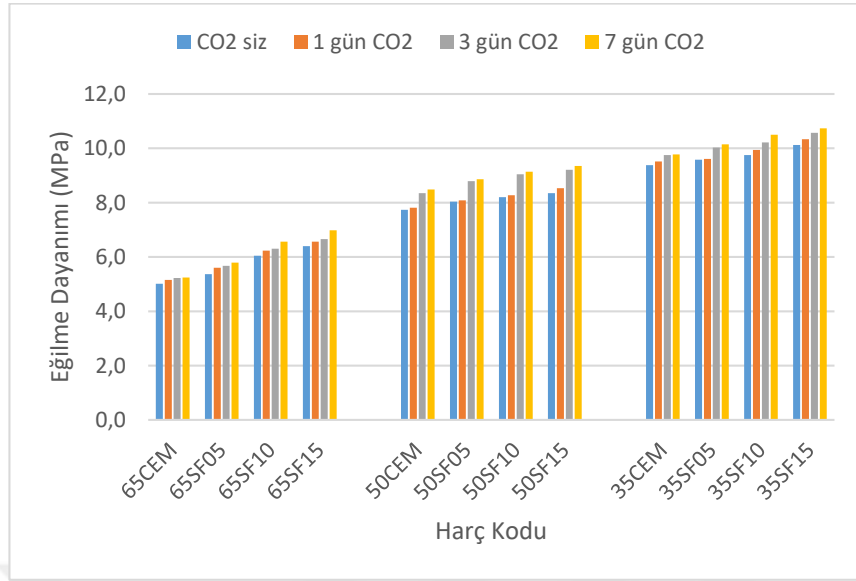


Şekil 5.4. Uçucu kül ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları

Silis dumanı ikameli çimentolarda da eğilme dayanımı açısından pozitif etkiler görülmüştür. Çok ince yapısı sayesinde mikro-boşlukları ve agrega arayüzlerini mükemmel şekilde doldurarak mekanik özelliklere katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda aktif silis ile birlikte hidrasyon ürünlerinden olan kalsiyum hidroksiti, CSH jeline dönüştürerek daha yoğun bir iç yapı oluşmasını sağlamaktadır. Su / bağlayıcı oranının artmasıyla, boşluk yapısı da artmakta, bu sebeple eğilme dayanımında düşüş gözlemlenmektedir. Şekil 5.5 silis dumanı miktarı, karbonatlaşma süresi ve su / bağlayıcı oranının değişimiyle birlikte eğilme dayanımındaki değişimi göstermektedir.

Tablo 5.5. Silis dumanı ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları

	CO ₂ siz	1 gün CO ₂	3 gün CO ₂	7 gün CO ₂
65CEM	5,02	5,16	5,23	5,24
65SF05	5,37	5,60	5,67	5,79
65SF10	6,05	6,23	6,30	6,56
65SF15	6,40	6,56	6,66	6,98
50CEM	7,73	7,81	8,35	8,48
50SF05	8,04	8,09	8,79	8,86
50SF10	8,20	8,27	9,05	9,14
50SF15	8,35	8,53	9,21	9,35
35CEM	9,38	9,52	9,75	9,77
35SF05	9,58	9,61	10,03	10,15
35SF10	9,75	9,94	10,22	10,50
35SF15	10,13	10,34	10,57	10,73

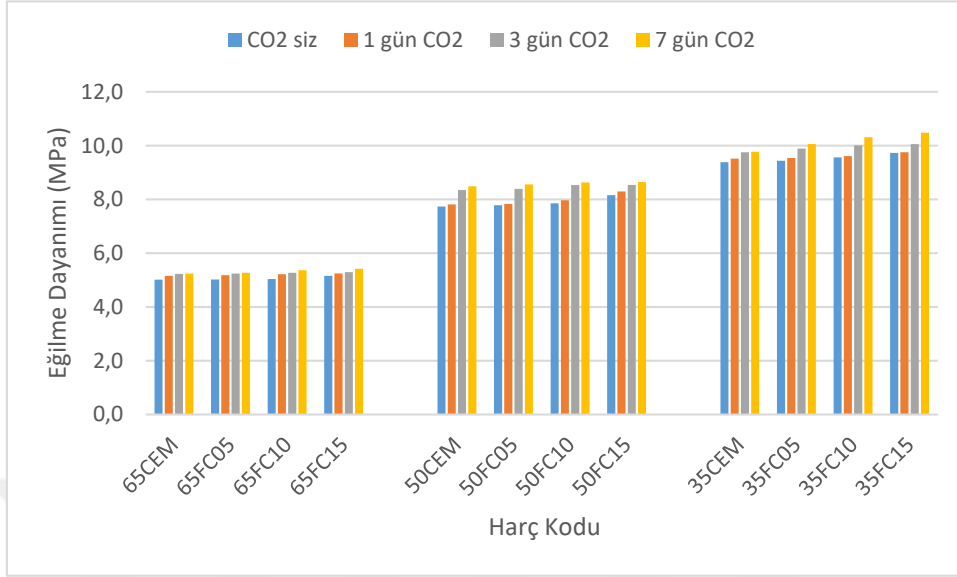


Şekil 5.5. Silis dumanı ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları

Yüksek fırın cürufunun %5 - %10 ve %15 oranında portland çimentosuna ikamesiyle birlikte eğilme dayanımındaki değişimler incelenmiştir. Pozolanik malzemelerin, çimento hamurunun iç yapısında oluşumuna sebep olduğu CSH jeli daha sıkı bir yapı oluşturarak eğilme dayanımında da artışa sebep olmuştur.

Tablo 5.6. Yüksek fırın cürufu ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları

	CO ₂ sız	1 gün CO ₂	3 gün CO ₂	7 gün CO ₂
65CEM	5,0	5,2	5,2	5,2
65FC05	5,0	5,2	5,2	5,3
65FC10	5,0	5,2	5,3	5,4
65FC15	5,2	5,2	5,3	5,4
50CEM	7,7	7,8	8,4	8,5
50FC05	7,8	7,8	8,4	8,6
50FC10	7,9	8,0	8,5	8,6
50FC15	8,2	8,3	8,5	8,6
35CEM	9,4	9,5	9,8	9,8
35FC05	9,4	9,5	9,9	10,1
35FC10	9,6	9,6	10,0	10,3
35FC15	9,7	9,8	10,1	10,5



Şekil 5.6. Yüksek fırın cürufu ikameli 0,65, 0,50, 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip harçların eğilme dayanımı sonuçları

Karbonatlaşma süresinin artışıyla birlikte test sırasında daha gevrek kırılmalar gözlemlenmiştir.

Çalışmada gözlemlenen bu sonuçlar, literatürde daha önce yapılmış çalışmaların sonuçlarını destekler niteliktedir. Çimento ile %20 oranına kadar yüksek fırın cürufu ikamesi dayanımda artışa sebep olmuştur. (Erdoğan vd., 2021).

5.3. Tek Eksenli Basınç Deneyi Sonuçları

Tek eksenli basınç deneyine tabii tutulan harç numunelerinin dayanım sonuçları bu kısımda verilmiştir.

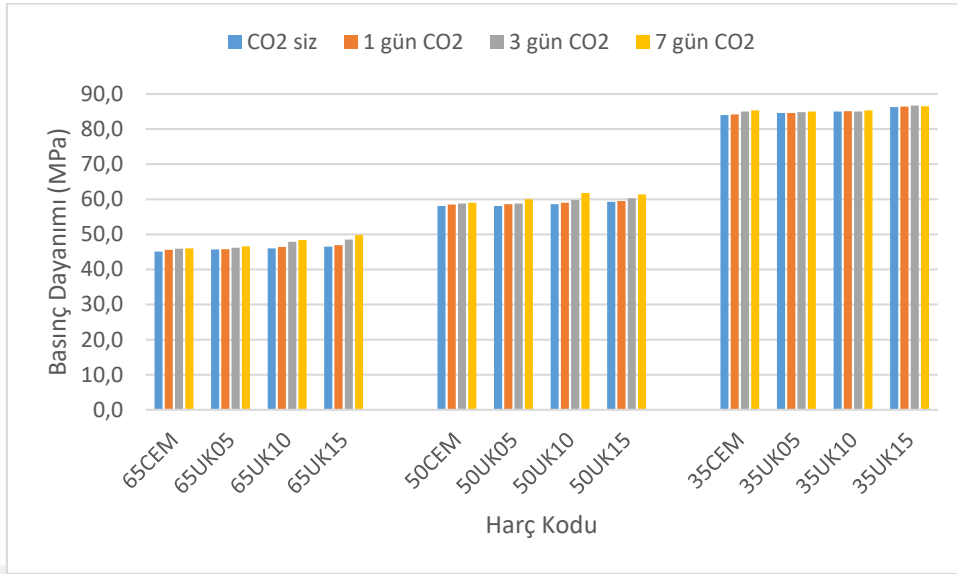
Şekil 5.7’de uçucu kül ilave edilen harç numunelerde tek eksenli basınç deneyi sonuçları verilmiştir. Uçucu kül ikame yüzdesinin artmasıyla birlikte basınç mukavemetlerinde de artış görülmüştür. Bütün su / bağlayıcı oranlarında en yüksek basınç dayanımını veren %15 uçucu kül ikameli olanlar iken, en düşük basınç

dayanımlarını veren %5 ikame edilen harç numuneleridir. Puzolan ilavesiz yalnızca Portland çimentosu içeren numunelerin basınç dayanımları, ikameli olanlardan daha düşük seviyede seyretmiştir. Bu etkinin görülmesinde, uçucu külün kimyasal olarak reaksiyon etkisi ve fiziksel olarak inceliği ön plana çıkmaktadır. Puzolanik malzemelerden olan uçucu kül, çimentonun hidratasyona uğraması ile ortaya çıkan sönmüş kireç olarak da adlandırılan kalsiyum hidroksiti, suda çözünmeyen CSH jellerinde dönüşümünü sağlayarak daha dayanımlı bir yapı oluşmasını sağlamaktadır.

Ayrıca basınç dayanımındaki artış karbonatlaşma süresinin artmasına bağlı olarak da az miktarda artış göstermiştir.

Tablo 5.7. Uçucu kül ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değerleri

	CO ₂ siz	1 gün CO ₂	3 gün CO ₂	7 gün CO ₂
65CEM	45,1	45,6	45,9	46,0
65UK05	45,7	45,8	46,2	46,6
65UK10	46,0	46,4	47,9	48,4
65UK15	46,5	46,9	48,5	49,8
50CEM	58,1	58,5	58,8	59,0
50UK05	58,1	58,6	58,8	60,0
50UK10	58,6	59,0	59,8	61,8
50UK15	59,3	59,5	60,3	61,4
35CEM	84,0	84,2	85,0	85,3
35UK05	84,6	84,6	84,8	85,0
35UK10	85,0	85,1	85,0	85,3
35UK15	86,3	86,4	86,7	86,5



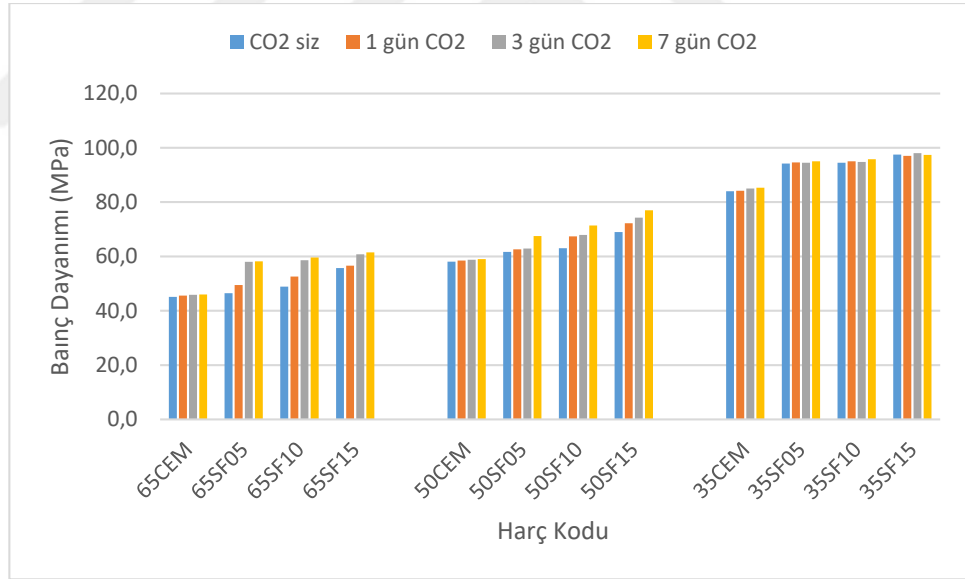
Şekil 5.7. Uçucu kül ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değişimi

Silis dumanının %5 - %10 ve %15 oranlarında portland çimentosu yerine ikamesiyle birlikte basınç dayanımında meydana gelen değişimler Şekil 5.8’de verilmiştir. Silis dumanı, ince tanecik yapısı sayesinde boşlukların doldurulmasında oldukça etkili olmuştur. Özellikle agrega ve hamur arayüzeyini boşluklara yerleşerek ve harcın en güçsüz olduğu alanlarda güçlendirme davranışında bulunarak dayanım artışına neden olmuştur. Tüm su / bağlayıcı oranlarında silis dumanı katkısız harç numuneleri, tüm silis dumanı ikame oranlarından daha düşük dayanım göstermiştir.

Karbonatlaşma gözlemlenen 0,65 su / bağlayıcı oranı haricinde; diğer su / bağlayıcı oranlarında karbonatlaşma hamur iç yapısında gözlemlenmemiş olup bu duruma bağlı olarak da çoğunlukla hızlandırılmış karbonatlaşma süresininin uzatılmasıyla diğer numunelere kıyasla basınç mukavemetinde kayda değer bir yükseliş gözlemlenmemiştir.

Tablo 5.8. Silis dumanı ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değerleri

	CO ₂ siz	1 gün CO ₂	3 gün CO ₂	7 gün CO ₂
65CEM	45,1	45,6	45,9	46,0
65SF05	46,5	49,5	58,0	58,2
65SF10	48,9	52,6	58,6	59,6
65SF15	55,7	56,6	60,8	61,5
50CEM	58,1	58,5	58,8	59,0
50SF05	61,7	62,6	62,9	67,5
50SF10	63,0	67,4	67,9	71,4
50SF15	69,0	72,2	74,3	77,0
35CEM	84,0	84,2	85,0	85,3
35SF05	94,2	94,6	94,5	95,0
35SF10	94,5	95,0	94,8	95,8
35SF15	97,5	97,0	98,0	97,4



Şekil 5.8. Silis dumanı ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değişimi

Yüksek fırın cürufu ikameli harçların basınç mukavemetleri; yüksek fırın cürufunun değişen ikame oranına, su / bağlayıcı oranına ve karbonatlaşma sürelerinin değişimine göre Şekil 5.9’ da incelenmiştir.

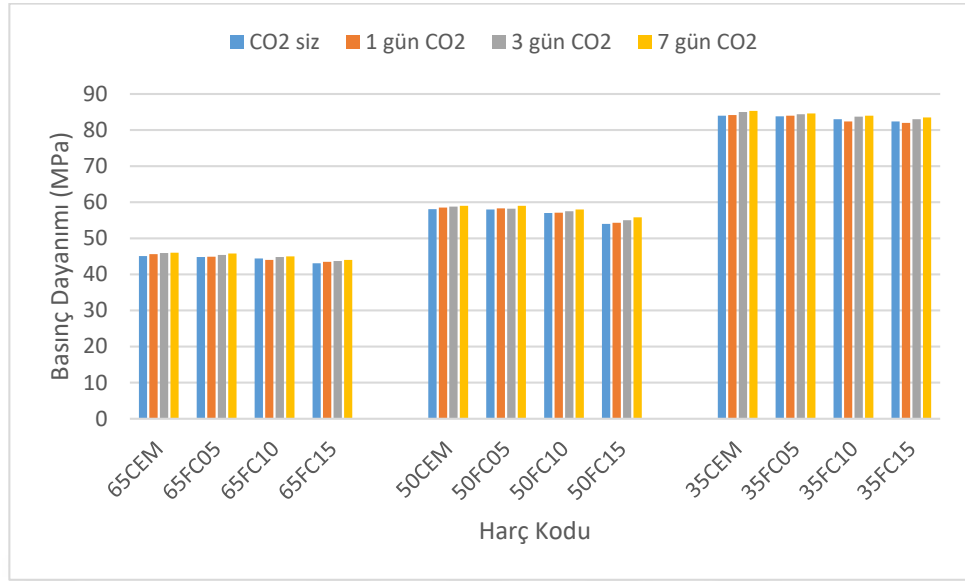
Deney sonuçlarına göre yüksek fırın cürufu ikame oranının artmasıyla birlikte basınç dayanımlarında düşme gözlemlenmiştir. Bu sonuç Bagheri vd., 2012, Zhao vd., 2015 ve Erdoğan vd., 2021 yaptıkları literatür çalışmalarıyla da desteklenmektedir.

Karbonatlaşma süresinin artmasına bağlı olarak dayanımlarda bir miktar artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeni karbonatlaşma sürecinin devam etmesi ile $\text{Ca}(\text{CO}_3)$ oluşmasıdır. Bu durum daha geniş hacim kaplayan bu yapının oluşmasına ve geçirimsizliğin bir miktar artmasına neden olmaktadır.

Su / bağlayıcı oranı, boşuk yapısını önemli ölçüde etkileyen bir parametredir. Bu sebeple artan su / bağlayıcı oranı ile boşluk oranı büyük miktarda artmakta ve basınç dayanımı ciddi oranda düşüş göstermektedir.

Tablo 5.9. Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değerleri

	CO₂ siz	1 gün CO₂	3 gün CO₂	7 gün CO₂
65CEM	45,08	45,6	45,9	46
65FC05	44,8	44,9	45,4	45,8
65FC10	44,4	44	44,8	45
65FC15	43,1	43,5	43,7	44
50CEM	58,1	58,5	58,8	59,0
50FC05	58,0	58,3	58,2	59,0
50FC10	57,0	57,1	57,5	58,0
50FC15	54,0	54,3	55,0	55,8
35CEM	84	84,2	85	85,3
35FC05	83,8	84	84,4	84,6
35FC10	83	82,4	83,7	84
35FC15	82,4	82	83	83,5



Şekil 5.9. Yüksek fırın cürufu ikameli harç numunelerinde basınç dayanımı değişimi

- Deneyisel çalışmada kullanılan puzolanlar, genel anlamda hamurdaki boşluk yapısında değişime sebep olmaktadır. Toplam boşluk oranı sabit kalsa da, kapiler boşluklarda azalmaya ve jel boşluklarında artışa sebep olmuştur. Eşik yarıçapı değeri düşüş göstererek, geçirimsizliğin artışı gerçekleşir. Agrega-çimento geçiş bölgesi denilen arayüzey, betonun dayanımı ve geçirimsizliği açısından en kritik bölgedir. Bu puzolanların kullanımı ile bu bölgelerin hem daha yoğun bir hale geçtiği hem de kalsiyum hidroksit yerine daha sağlam bir yapı olan kalsiyum silikat hidrat ile gelişim gösterdiği söylenebilir. Yapıdaki bu değişimler neticesinde sıvı ve gaz geçişi engellenerek durabilite açısından katkı da sağlanmış olur (Schiessl and Hardtl, 1994).

5.4 Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi Sonuçları

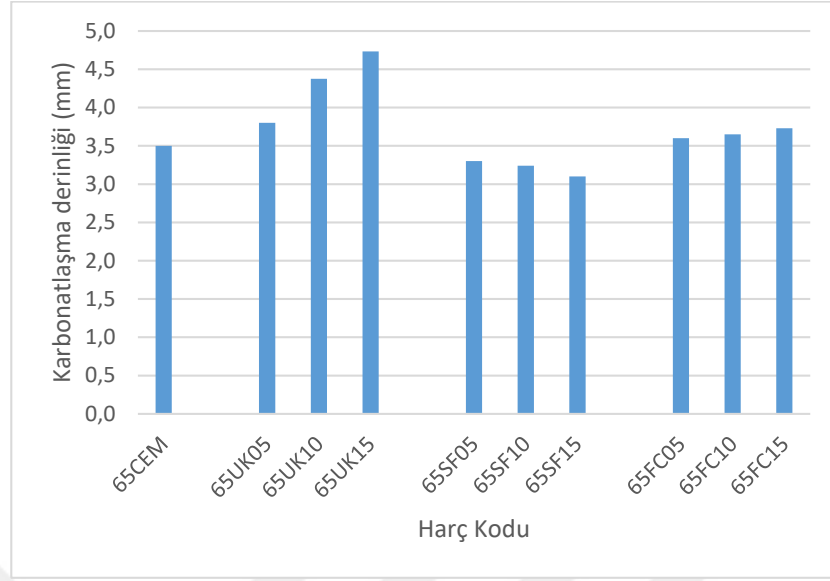
1, 3 ve 7 gün boyunca hızlandırılmış karbonatlaşma test tüpünde yüksek karbondioksit konsantrasyonuna (%40 CO₂) maruz bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri mm (milimetre) cinsinden bu kısımda verilmiştir.

Şekil 5.10 incelendiğinde 24 saat boyunca hızlandırılmış karbonatlaşma işlemine maruz kalan numunelerde yalnızca su / bağlayıcı oranı 0,65 olan numunelerde karbonatlaşma gözlemlenmiştir. Diğer numuneler, daha düşük su / bağlayıcı oranları sebebiyle daha geçirimsiz bir yapı sergilemiş ve 24 saatte karbonatlaşma reaksiyonu için yeterli difüzyon sağlanamamıştır.

Puzolanik malzemelerden uçucu kül en fazla karbonatlaşma derinliği gösterirken, en az karbonatlaşma silis dumanı ikameli harçlarda gözlemlenmiştir.

Tablo 5.10. Hızlandırılmış karbonatlaşma testine maruz bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri (mm)

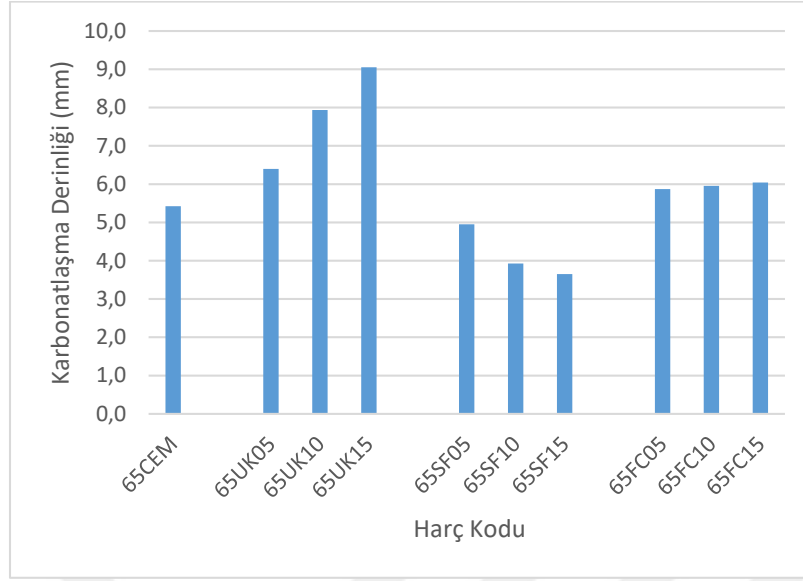
	1 gün CO ₂	3 gün CO ₂	7 gün CO ₂
65CEM	3,50	5,42	7,52
65UK05	3,80	6,40	7,88
65UK10	4,38	7,94	8,50
65UK15	4,73	9,05	9,58
65SF05	3,30	4,95	7,29
65SF10	3,24	3,95	6,74
65SF15	3,10	3,65	6,03
65FC05	3,60	5,87	7,52
65FC10	3,65	5,95	7,60
65FC15	3,73	6,04	7,78
50CEM	0	0	3,89
		0	
50UK05	0	0	3,90
50UK10	0	0	3,91
50UK15	0	0	3,95
50FC05	0	0	3,94
50FC10	0	0	4,01
50FC15	0	0	4,22



Şekil 5.10. 1 gün (24 saat) boyunca hızlandırılmış karbonatlaşma testine maruz bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri (mm)

3 gün boyunca yüksek karbondioksitli ortamda bekletilen numunelerde, karbonatlaşma derinlikleri incelendiği zaman karbonatlaşmanın aynı 1 gün hızlandırılmış karbonatlaşmaya maruz bırakılan numunelerde olduğu gibi sadece 0,65 su / bağlayıcı oranında gerçekleştiği görülmüştür. Pozolan katkısız 65 CEM kodlu numune referans alınarak kıyaslandığında uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikame oranındaki artışla karbonatlaşma derinliği de artış göstermiştir. Silis dumanı harçların geçirimsizlik davranışını pozitif etkileyerek hem 65CEM kodlu numuneden daha az karbonatlaşma göstermiş hem de artan oranı ile birlikte karbonatlaşma derinliğinde azalma gözlemlenmiştir.

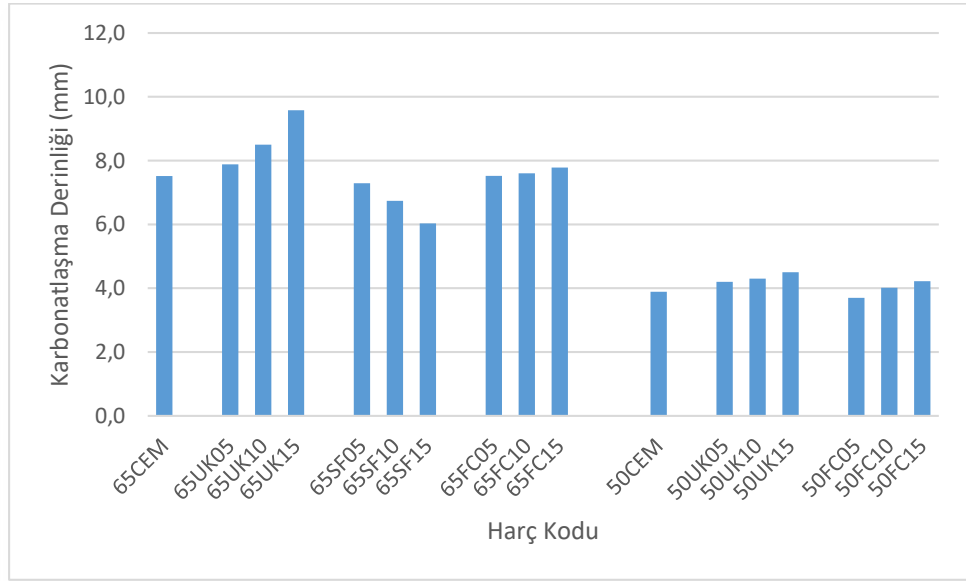
0,50 ve 0,35 su / bağlayıcı oranına sahip olan numuneler için karbonatlaşma anlamında süreç yeterli gelmemiş ve karbonatlaşma davranışı gözlemlenmemiştir. Şekil 5.11 'da 3 günlük karbonatlaşma derinlikleri verilmiştir.



Şekil 5.11. 3 gün (72 saat) boyunca hızlandırılmış karbonatlaşma testine maruz bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri (mm)

7 gün (168 saat) hızlandırılmış karbonatlaşma tankında 0,8 bar sabit basınçta (%40 CO₂) bekletilen numunelerde karbonatlaşan numuneler ve derinlikleri Şekil 5.12 'deki gibidir.

7 gün yüksek karbondioksit ortamında tutulan numunelerde, 1 gün ve 3 günlük karbonatlaşmalardan farklı olarak 0,50 su / bağlayıcı oranında da uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ikameli numunelerde karbonatlaşma olayı gözlemlenmiştir. Fakat silis dumanının oldukça ince partikül yapısının geçirimsizliği artırması sebebiyle bu uzun sürede dahi karbonatlaşmaya uğramamıştır.



Şekil 5.12. 7 gün (168 saat) boyunca hızlandırılmış karbonatlaşma testine maruz bırakılan numunelerin karbonatlaşma derinlikleri (mm)

Daha önce yapılan literatür araştırmalarına ait görüşler, hızlandırılmış karbonatlaşma ile ilgili çalışmamızdan aldığımız verileri destekler niteliktedir;

Karbonatlaşma direnciyle ilgili, puzolanların kullanımı tartışma konusudur. Bir çok çalışmada farklı sonuçlar elde edilmiştir. Donatıda korozyona sebep olan kalsiyum karbonat ve klor iyonlarının, koruyucu pas tabakasını tahrip etmesini çimento hamurunun alkali durumu yani ihtiva ettiği CH önler. CH'ın zaman geçtikçe CO₂ ile birleşerek kalsiyum karbonata dönüşümü yani karbonatlaşma olayı bu koruyucu tabakayı yok etmektedir. Puzolanlar CH'ı önceden CSH'a dönüştürdükleri için alkali durumun pasivasyon etkisi azalmaktadır ve hamur iç yapısında çok az miktarda CH kalmaktadır. Bu sebeple karbonatlaşma hızla gelişir. Bundan dolayı teorik açıdan puzolan içerikli betonlarda donatı paslanmasının daha erken başlanabileceği söylenebilir. Fakat puzolan malzemesinin, betonu daha geçirimsiz hale getirmesi durumunda CO₂ difüzyonu da zorlaşacağından kullanılacak puzolanın karbonatlaşma direnciyle ilgili; puzolanın kompozisyonel içeriğine, reaktivitesine ve inceliğine bağlı etmenlerin şartları domine edeceği göz önünde bulundurulmalı ve ona göre tercih yapılmalıdır (Schiessl and Hardtl, 1994).

Ayrıca çimento dozajı da puzolanlı betonlarda ve harçlarda oldukça önemlidir. Dozajın belirli bir değerin altına inmesi durumunda, puzolanlı betonlarda karbonatlaşma reaksiyonunun hızlı bir şekilde ilerlediği tespit edilmiştir (Baron, 1994). Çünkü düşük çimento dozajı, ortamda alkaliniteyi sağlayan kalsiyum hidroksitin hızla tüketilmesine, bunun yanında karbonatlaşma olayı ile de hızla alkalitesi düşük olan bileşenlerin ortamdaki varlığının artarak pasif tabakanın yok olmasına neden olmaktadır.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar neticesinde aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- Puzolan ikame edilmiş tüm harç numunelerinin su emme değerleri incelendiğinde, puzolan ikame oranının artmasına bağlı olarak su emme değerlerinde azalma gözlemlenmiştir. Puzolanik reaksiyonlar sonucu oluşan CSH jelinin iç yapıyı daha geçirimsiz hale getirmesi nedeniyle olmuştur. Silis dumanının çok ince yapısı nedeniyle su emme değerlerindeki düşüş hızı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufundan daha fazladır.
- Su emme değerlerindeki düşüş hızı, su / bağlayıcı oranının azalmasıyla azalma göstermiştir. Su / bağlayıcı oranının azalması, çimento hamurundaki boşuk oranının azalmasına dolayısıyla suyun emilebileceği hacmin azalmasında rol oynamıştır.
- Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı yönünden değerlendirildiğinde tüm numunelerde en yüksek dayanım değerleri 0,35 su / bağlayıcı oranında elde edilmiştir. 0,65 su / bağlayıcı oranında, diğer örneklerle kıyasla yüksek su içeriği sebebiyle daha fazla boşluk oluşumu gerçekleşmekte ve bu da direkt olarak eğilme ve basınç dayanımına olumsuz etki göstermektedir.
- Harç örneklerinde uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun verdiği puzolanik reaksiyonlar nedeniyle ikame oranı artışına bağlı olarak eğilme dayanımlarında da artış gözlemlenmiştir.
- Karbonatlaşma süresinin artışıyla birlikte eğilme dayanımı ve basınç dayanımı değerlerinde artış olmuştur. 1 günlük ve 3 günlük numuneler arasındaki dayanım artış farkı, 3 günlük ve 7 günlük numuneler arasındaki artışa kıyasla daha belirgindir. Bunun sebebi ise karbonatlaşmanın ilk günlerinde CO₂ difüzyonunun daha rahat gerçekleşerek, ilerleme hızı daha yüksekken bunun karbonatlaşma

sonucu oluşan kalsiyum karbonat sebebiyle yavaşlamasıdır. Oluşan kalsiyum karbonat, kalsiyum hidroksitten daha fazla hacim kaplayarak geçirimsizlik üzerinde olumlu etki göstermiştir.

- Silis dumanı çok ince yapısı ve puzolanik etkisi sayesinde hem eğilme dayanımı, hem basınç dayanımı hem de karbonatlaşma açısından en iyi sonuçların alındığı puzolan olarak karşımıza çıkmaktadır. Artan oranı tüm özellikleri oldukça olumlu etkilemiştir. Dezavantajı olarak tüm su / bağlayıcı oranlarında işlenebilirliği hızlı bir şekilde düşürmesi ve her oranında süper akışkanlaştırıcı gereksiniminin olduğu söylenebilir.
- Yüksek fırın cürufunun ikame oranının artmasıyla basınç dayanımı değerlerinde tüm su / bağlayıcı oranlarında düşüş görülmüştür. Yüksek fırın cürufunun tanecik boyutu ve mineral yapısı bu etkinin görülmesinde önem kazanmaktadır. Daha ileri yaşlarda bu durumun tekrar değerlendirilmesi önerilmektedir.
- Karbonatlaşma derinliği açısından değerlendirilme yapıldığında en yüksek geçirimsizlik özelliğine sahip olan 0,65 su / bağlayıcı oranının olduğu numunelerde en fazla karbonatlaşma derinliği ve 0,35 su / bağlayıcı olan numunelerde ise en düşük karbonatlaşma derinliği gözlemlenmiştir.
- 1, 3 ve 7 günlük karbonatlaşma derinliklerinin artış hızı incelendiğinde, karbonatlaşmanın ilerleme hızının süreç arttıkça yavaşladığı söylenebilir. Bunun sebebinin reaksiyon gereği zamanla oluşan kalsiyum karbonatların çimento hamurunda geçirimsizliği giderek azaltmasıdır.
- Karbonatlaşma, 0,35 su / bağlayıcı oranında hiçbir numunede gözlemlenmemiştir. Bu sebeple ileride yapılacak bu kompozisyondaki çalışmalarda daha uzun karbonatlaşma periyotları düşünülmelidir.
- 0,50 su / bağlayıcı oranında silis dumanı haricindeki tüm numunelerde karbonatlaşma gözlemlenmiş olup uçucu kül ikamesi, puzolan ilavesi

karışıma göre daha fazla karbonatlaşma derinliği göstermiştir. Uçucu kül hızla kalsiyum hidroksitin, kalsiyum silikat hidrata dönüşümünü gerçekleştirdiğinden hamurun alkali özelliği zayıflamaktadır. Yüksek fırın cürufunun ikamesi, karbonatlaşma derinliğini azaltıcı yönde etki göstermiştir.

- 0,65 su / bağlayıcı oranında, tüm kompozisyonlarda karbonatlaşma gözlemlenmiştir. Ortalama karbonatlaşma derinliği açısından en az karbonatlaşandan en fazla karbonatlaşana göre sırasıyla; silis dumanı ikameli, yüksek fırın cürufu ikameli, puzolan katkısız ve uçucu kül ikameli şeklindedir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

ASTM C1437-20, 2020, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, ASTM, USA.

ACI 233R-03, 2003, Slag Cement in Concrete and Mortar

Aguiar, J. B. and Júnior, C., 2013, Carbonation of surface protected concrete, Construction and Building Materials, 49, 478-483.

Ai Z., Sun W., Jiang J., Song D., Ma H., Zhang J., 2016, Passivation characteristics of alloy corrosion-resistant steel Cr10Mo1 in simulating concrete pore solutions: Combination effects of pH and chloride. Materials (Basel); 13–17.

Akman, M.S., 1997, Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri, Türkiye İnşaat Mühendisliği, *14. Teknik Kongresi*, İnşaat Mühendisleri Odası İzmir Şubesi, Yayın No: 26.

Al-Khaiat, H. and Haque, M. N., 1997, Carbonation of Some Coastal Concrete Structures in Kuwait, ACI Materials Journal, Vol. 94-6, pp 602-607

ASTM C33-18., 2018, Standard specification for concrete aggregates

ASTM C618-19., 2019, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.

ASTM C642-21, 2021, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM, USA

Atış, CD., 2002, Accelerated Carbonation and Testing of Concrete Made with Fly Àsh, Construction and Building Materials (yayında), kabul tarihi 25 ekim 2002.

Baba, A., Senbu, O., 1987, A predictive procedure for carbonation depth of concrete with various types of surface layers, In: Proceedings of Fourth International Conference on Durability of Building Materials and Components. Singapore, pp 679–685

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Bagheri, A.R, Zanganeh, H., Moalemi, M.M., 2012, “Mechanical and Durability Properties of Ternary Concretes Containing Silica Fume and Low Reactivity Blast Furnace Slag”, Cement & Concrete Composites, No. 34, pp. 663-670.

Ballım, Y., 1996, Low-cost laboratory test methods for demonstrating the relationship between concrete practice and durability to undergraduate students, Concrete Technology for Developing Countries, 4th International Conference, Eastern Mediterranean University, Gazimağusa, Kuzey Kıbrıs.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S., 2022, Beton, DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 825s.

Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2002, Betonarme Yapılarda Kalıcılık Durabilite, DEÜ Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın no:298.

Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2010, Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul.

Baron, J., 1994, Fly Ash Replacement of Cement: Threshold Values of Cement Content in Relation to Concrete Durability, P.K. Mehta Symp. on Durability of Concrete, p. 21-34.

Bekem, İ., Gultekin, A. B., Dikmen, C. B., 2009, Yapı Ürünlerinin Hizmet Ömrü Açısından İrdelenmesi: Betonarme Örneği, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.

Burkan Isgor, O., Razaqpur, A. G., 2004, Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures, Cem. Concr. Compos. 26(1), 57–73.

CEB (Comite Euro-International du Beton) 1992, Design Guide, Durable Concrete Structures, Thomas Telford Ltd, Lausanne, Switzerland

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

De Ceukelaire, L, and Van Nieuwenburg, D. 1993, "Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete". United States.

De Ceukelaire, L., 1992, Van Nieuwenburg, D. Accelerated Carbonation of A. Blast Furnace Cement Concrete, Cement and Concrete Research, 23,444,452.

Erdoğan T.Y., 2007, "BETON". ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık Ve İletişim A.Ş. Genişletilmiş 2. Baskı. Ankara.

Erdoğan, T.,Y., , 1995, Betonu Oluşturan Malzemeler; Karışım ve Bakım Suları T.H.B.B, Ankara.

Erdoğan, T.Y., (2003). Beton, ODTU Geliştirme Vakfı Yayını, Ankara.

Erdoğdu Ş., Kurbetci Ş., Kandil U., Nayır S., Nas M., 2021, Yüksek Fırın Cürüflü Betonların Bazı Mekanik ve Durabilite Özellikleri, Hazır Beton Dergisi, s. 65-71.

Gönen T., 2003, Betonda Şıkışma Faktörünün Karbonatlaşmaya Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gönen, T., Yazıcıoğlu, S., ,2005, Betonda Hızlandırılmış Karbonatlaşma Deneyi ve Aparatları, Politeknik Dergisi, Cilt: 8 Sayı: 2 s. 233-237.

Gönen, T., Yazıcıoğlu, S., 2003, Betonlarda Karbonatlaşma ve Etkinlik Dereceleri, Standart Ekonomik ve Teknik Dergi, 497, ss.8488

Hobbs, D. W., 1988, Carbonation of concrete containing pfa, Mag. Concr. Res. 40(143), 69–78 (1988). doi: 10.1680/mac.1988.40.143.69

Holt, E., Leivo, M., 2004, Cracking risk associated with early age shrinkage, Cement and Concrete Composites, 26, 521-530.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Jackson, N. and Dhir R. K., 1988, Structural Engineering Materials 4th Edition, Hemisphere Publishing Corporation, New York

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.

Kara, C., 2013, Mermer tozu atığının betonun karbonatlaşmasına etkisinin araştırılması, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara

Kobayashi, K., and Uno, Y., 1989, Influence of alkali on carbonation of concrete, part 1, preliminary tests with mortar specimens, Cement and Concrete Research, 19, s 821-826.

Kobayashi, K., and 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, s 619-622.

Koç, T., 2002, Depremde Binaların Çoğu Korozyondan Yıkılmış, Arkitera Haber Bülteni, sayı 60.

Krajci, L., Janotka, I., 2000, Measurement Techniques For Rapid Assessment of Carbonation in Concrete, ACI Mateial Journal, 97, pp.168-171.

Lindvall, A., 1999, Enviromental Actions and Response Survey, Inspection and Measurement, The European Community Brite Euram Project BE95-1347 Working Report, 9-13.

Lo, Y. and Lee, H. M., 2002, ‘Curing Effects On Carbonation Of Concrete Using A Phenolphthalein İndicator And Fourier-Transform İnfrared Spectroscopy, Building and Environment 37, 507-514.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

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.

Malami, S. I., 2014, Experimental investigations on the extent of carbonation problem in reinforced concrete buildings of north cyprus, Near East University.

Moghimi S., Keser H.E., Ramyar K., 2022, Effect of Binary And Ternary Binders on Flow and Strenght of Cement Mortar, Journal of Cement Based Composites 1, Department of Civil Engineering, Eng. Faculty, Ege University, Izmir.

Neville A. M., 1972, Properties of concrete, New York: Longman Scientific and Technical , Pitman Publishing, London.

Nordström, E., 2000, Steel Fibre Corrosion in Cracks Durability of Sprayed Concrete, Licantiate Thesis, Lulea University of Technology, Department of Civil and Mining Enginnering, Sweeden.

Özgen, M.M., ,2006, Betonarme Yapılarda Bozulma Süreçleri Ve Beton Sınıfının Yapının Durabilitesine Ve Maliyetine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., Fardis, M. N., 1991 Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem, Chem. Eng. Sci. 46(5), 1333–1338.

Park, D., 2008, Carbonation of concrete in relation to CO₂ permeability and degradation of coatings, Construction and Building Materials, 22 (11), 2260-2268.

Parrott, L.J. and Killoh, DC, 1989, Carbonation in a 36 Year Old, İn-Situ Concrete, Cement and Concrete Research, 19,649-656.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Ramyar, K., 1993, Uçucu Küllerin Çimento Harcının Büzülmesine ve Betonun Karbonatlaşmasında Olan Etkileri, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, TMMOB Ankara Şubesi, 133-147.

Revert, A. B., De Weerd, K., Hornbostel, K. ve Geiker, M. R., 2018, Carbonation-induced corrosion: Investigation of the corrosion onset, Construction and Building Materials, 162, 847-856.

Schiessl, P. and Hardtl, R., 1994, Relationship between Durability and Pore Structure Properties of Concrete Containing Fly Ash, Ibid Ref. 7, pp. 99-118.

Singh, N., Nassar, R.-U.-D., Shehnazdeep, K., Anjani, B., 2021. Microstructural characteristics and carbonation resistance of coal bottom ash based concrete mixtures. Mag. Concr. Res. 1-15.

Ta, V.-L., Bonnet, S., Kiese, T. S. ve Ventura, A., 2016, A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures, Construction and Building Materials, 129, 172-181.

Tan Y., Liu Z., Wang F., 2022, Effect of temperature on the carbonation behavior of γ -C2S compacts, Cement and Concrete Composites, Wuhan, China Volume 133.

Taşdemir, M.A., 2002, Betonun Dayanım ve Durabiliteye Göre Tasarımı ve Üretimi, İMO İstanbul Şubesi Sürekli Eğitim Seminerleri, Harbiye-İstanbul.

Tokyay, M., 1997, Agresif Ortamlarda Çimentolu Sistemler, Çimento ve Beton Dünyası, Ankara, sayı:8 13-19s.

Topcu, İ.B., 2006, Yapı malzemeleri ve beton, 502s.

TS 4834, 1986 Beton ile İlgili Terimler, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

TS EN 1008, 2003, Beton Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, TSE, Ankara.

TS EN 12390-3, 2010, Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 6: Deney Numunelerinin Basınç Dayanımı Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 196-1, 2016, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, TSE, Ankara

TS EN 197-1, 2012, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, TSE, Ankara.

Yazıcı, H., 1998, Accelerated Carbonation Test of Concrete, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

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.

Yiğiter, H., 2008 Betonarme Donatısında Klorid Korozyonu Gelişiminin Elektrokimyasal Yöntemlerle Belirlenmesi, Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Zhao, H., Sun, W., Wu, X., Gao, B., 2015, The properties of Selfcompacting Concrete with Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag Mineral Admixtures, Journal of Cleaner Production, No. 95, pp. 66-74.

TEŞEKKÜR

Akademik merdivenlerin bir adımı olan yüksek lisans dönemim boyunca bana tüm tecrübelerini ve bilgi birikimini aktarmak için çaba gösteren ve desteklerini esirgemeyen değerli danışman hocam Prof. Dr. Şemsi YAZICI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Süreç boyunca malzeme temini ve teknik destek anlamında yardımcı olan Kulsan İlaç Tohumculuk Ziraat Sanayi ve Ticaret Ltd Sti'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemedi bana inanan sevgili aileme teşekkür ederim.

...../...../2024

Ahmet Berk KULA

ÖZGEÇMİŞ

Ahmet Berk KULA, ilk, orta ve lise öğrenimini İSTANBUL’da tamamlamıştır. Kocaeli Üniversitesi İnşaat Mühendisliği lisans programını 2020’de, Anadolu Üniversitesi Dış Ticaret önlisans programını 2021’de ve Ege Üniversitesi Kimya Teknolojisi önlisans programını 2022’de tamamlamıştır. Ege Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda güncel olarak yüksek lisans eğitimi devam etmektedir.

