

PORTLAND
ÇİMENTOSU ESASLI
MALZEMELERDE
KARBONATLAŞMA



TÜRKÇİMENTO



TÜRKÇİMENTO

PORTLAND ÇİMENTOSU ESASLI MALZEMELERDE KARBONATLAŞMA

Hazırlayanlar:

Serkan Türk, TÜRKÇİMENTO AR-GE Enstitüsü Müdürü
Yasin Engin, TÜRKÇİMENTO Danışmanı

Bu raporun yayın ve dağıtım hakkı TÜRKÇİMENTO'ya aittir. Tamamı veya herhangi bir bölümü TÜRKÇİMENTO'nun yazılı izni olmadan fotokopi dahil mekanik ve elektronik ortamda transfer edilemez, çoğaltılamaz ve dağıtılamaz.

TÜRKÇİMENTO
2026

İÇİNDEKİLER

1. KARBONATLAŞMA.....	2
2. KARBONATLAŞMA MEKANİZMALARI	3
3. KARBONATLAŞMA REAKSİYONU	4
4. KARBONATLAŞMA HIZINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER	6
5. FİZİKSEL ÖZELLİKLERDEKİ DEĞİŞİKLİKLER	12
6. KARBONATLAŞMANIN ÖNLENMESİ	14
7. KARBONATLAŞMANIN TAYİNİ İÇİN TEST YÖNTEMLERİ	17
8. KAYNAKLAR	18

1. KARBONATLAŞMA

Karbonatlaşma, çimento hidratasyon ürünleri ile atmosferik karbondioksit (CO_2) arasında gerçekleşen bir reaksiyondur ve bu durum çelik donatıyı, korozyona karşı savunmasız bırakmaktadır. Bu nedenle karbonatlaşma, özellikle beton gibi çelik donatı ile birlikte kullanılan çimento esaslı malzemelerde önemli bir çevresel etki olarak değerlendirilmektedir.

Betonun gözenek yapısı, karbonatlaşmanın hızını ve derinliğini büyük ölçüde belirlemektedir [1]. Karbonatlaşma, betonun açıkta kalan yüzeyinde başlamakta ve karbonat içeren bileşiklerden oluşan dış bir tabaka meydana getirerek yüzeyin gözenekliliğini azaltmaktadır [2]. Gözenekliliğin azalması, kalsiyum hidroksitin ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) kalsiyum karbonata (CaCO_3) dönüşmesiyle doğrudan ilişkilidir ve yüzeydeki başlangıç $\text{Ca}(\text{OH})_2$ hacmine kıyasla katı hacminde %11 oranında bir artışa neden olmaktadır [1].

Karbonatlaşma, betonun yaşına ve çevresine bağlı olarak faydalı veya zararlı olabilmektedir. Karbonatlaşma betonun dayanımını artırabilmekte ve geçirgenliğini azaltabilmekte, ancak aynı zamanda donatının korozyon hızını da artırmaktadır.



Şekil 1. Karbonatlaşma nedeniyle çelik donatıda korozyon oluşumu

Karbonatlaşmanın meydana gelme şekilleri aşağıda belirtilmektedir:

- 1. Taze Betonun Karbonatlaşması:** Taze betonun karbonatlaşması genellikle sertleşme aşamasında atmosferik karbondioksitle maruz kalmasıyla meydana gelmektedir. Karbonatlaşma ayrıca betonun kürü esnasında ısıtıcıların kullanımı veya ekipman egzoz dumanları nedeniyle de oluşabilmektedir. Bunun sonucunda beton yüzeyinde çatlaklar oluşabilmekte ve yüzeyde zayıf, tozlu bir kalıntı meydana gelebilmektedir. Nihai prizden önce şiddetli karbonatlaşma, aşınmaya karşı daha az dayanıklı bir yüzey oluşturabilmektedir.
- 2. Betonun Erken Yaşta Karbonatlaşması:** Tam olarak hidrate olmamış betonun hamur fazının geçirgenliği yüksek olduğu için olgun betona (hidrate olmuş) kıyasla karbonatlaşmaya daha duyarlıdır. Bu nedenle, belirli bir beton elemanının erken yaşlarında karbonatlaşma daha hızlı ilerlemektedir. Başlangıçta $\text{Ca}(\text{OH})_2$, karbondioksitle reaksiyona girerek CaCO_3 ; trikalsiyum alüminat hidrat (C_3A) ise

karbondioksitle reaksiyona girerek monokarboalüminat hidrat $[3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{CaCO}_3\cdot 11\text{H}_2\text{O} (\text{C}_4\text{A}\bar{\text{C}}\text{H}_{11})]$ oluşturur [3]

- 3. Olgun Betonun Karbonatlaşması:** Hidrate olmuş beton, belirli bir düzeyde karbonatlaşmıştır. Betonun karbonatlaşması açıkta kalan yüzeylerde meydana gelmektedir ancak daha geçirgen, kaba ve açık yüzeyli beton ile belirli çevresel koşullar karbonatlaşma hızını ve derinliğini artırabilmektedir. Sürekli karbonatlaşma, çimento hamurunun pH'ını düşürerek donatının korozyon hızını artırmaktadır.

2. KARBONATLAŞMA MEKANİZMALARI

Atmosferik Karbonatlaşma

Hidrate olmuş Portland çimentosunun atmosferik CO_2 ile reaksiyonu genellikle yavaş hızda gerçekleşmektedir. Reaksiyon hızı, ortamın bağıl nemine, sıcaklığına, betonun geçirgenliğine ve CO_2 konsantrasyonuna bağlıdır. Diğer tüm faktörler eşit olduğunda, karbonatlaşma en hızlı şekilde betonun bağıl neminin %50 ila %75 arasında olduğu durumlarda gerçekleşmektedir. %25'in altındaki bağıl nem seviyelerinde karbonatlaşma önemsiz hale gelirken, %75'in üzerindeki bağıl nem seviyelerinde gözeneklerdeki nem CO_2 'nin beton içine nüfuz etmesini kısıtlamaktadır [4].

Suda Bulunan Karbon Türleri ile Karbonatlaşma

Karbonatlaşma, beton yeterli konsantrasyonda karbonat veya bikarbonat iyonları içeren suya maruz kaldığında da meydana gelebilmektedir. Karbon türleri, atmosferdeki karbondioksitin yağmur suyunda çözünmesiyle, topraktaki organik maddelerin bozunmasıyla veya karbonat içeren belirli minerallerin ayrışmasıyla suya girmektedir. Doğal sularda en çok bulunan karbon türleri genellikle karbonat (CO_3^{2-}) ve bikarbonat (HCO_3^-) iyonlarıdır.

Suyun Alkaliliği

Karbonat alkaliliği, betonun hizmet ömründe kritik bir rol oynayabilmektedir. Genel olarak, karbonat alkaliliği, yani karbonat ve bikarbonat iyonlarının konsantrasyonu, suyun asidik bileşenini nötralize etmek veya tamponlamak için yeterli olduğunda hem asit saldırısı hem de çözünme önlenmektedir. Karbonat alkaliliği düşük olduğunda, yani su sürekli olarak düşük karbonat alkaliliğine sahip olduğunda, çimentonun karbonat içeren bileşiklerinin seçici olarak çözünmesiyle sızma (leaching) saldırısı meydana gelebilmektedir. Bu sızma saldırısı, literatürde "agresif CO_2 saldırısı" olarak adlandırılmaktadır [5,6,7], ancak "daha düşük karbonat alkaliliği saldırısı" olarak tanımlanması daha doğrudur.

Serbest CO_2 saldırısı veya çözelti içindeki karbonik asit, betonu yüzeyden içe doğru çözen asidik saldırıyla ilişkilendirirken, düşük karbonat alkaliliği saldırısı beton içinden başlayan sızma saldırısı ile ilişkilidir. Basitçe ifade etmek gerekirse, düşük karbonat alkaliliği, suyun asidik bileşeni nötralize etmek veya tamponlamak için yeterli karbonat alkaliliğine sahip olmaması durumudur. Düşük karbonat alkaliliği saldırısı veya agresif CO_2 saldırısı terimi, çimentonun karbonat içeren bileşiklerinin çözünmesiyle yeniden bir denge oluşana kadar devam eden bir süreci tanımlamaktadır.

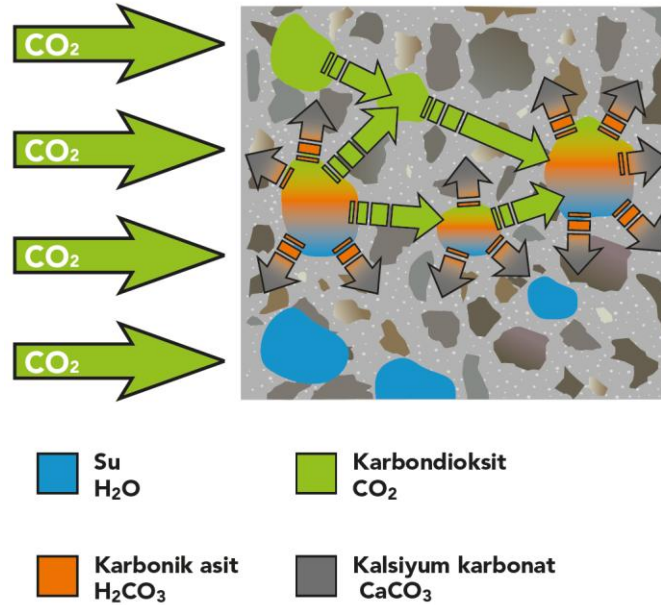
3. KARBONATLAŞMA REAKSİYONU

Karbonatlaşma sırasında meydana gelen kimyasal reaksiyonlar iki aşamada incelenebilmektedir. Bunlar CO₂'nin suda çözünmesi ve çözünme ürününün betonun çimento fazındaki hidratasyon ürünleriyle reaksiyona girmesidir.

Şekil 2'de görüldüğü üzere CO₂, su (H₂O) ile temas ettiğinde karbonik asit (H₂CO₃) oluşmaktadır. Bu reaksiyon aşağıdaki şekilde gerçekleşmektedir:



Betonun gözeneklerindeki sıvı söz konusu olduğunda, oluşan karbonik asit portlandit (Ca(OH)₂) ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat oluşturmaktadır:



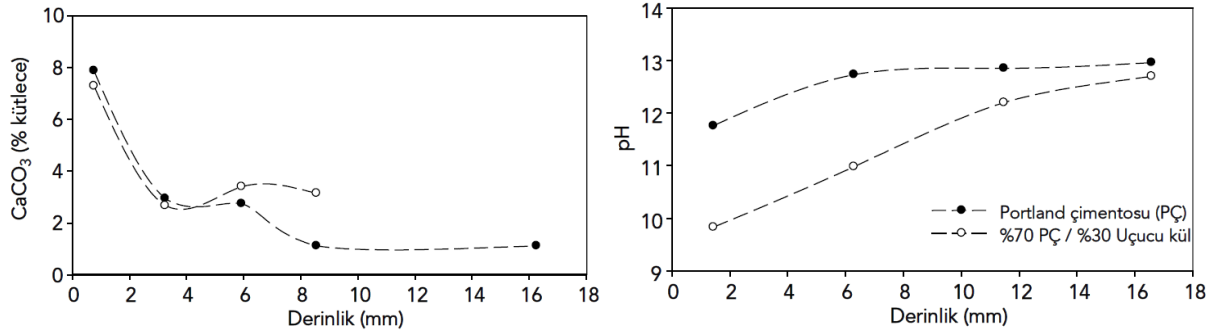
Şekil 2. Karbonatlaşma mekanizması

C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) jeli de karbonatlaşmaya uğramaktadır. Bu, başlangıçta jel içindeki Ca/Si oranının azalmasına neden olmaktadır çünkü daha fazla kalsiyum CaCO₃'e dönüşmektedir, ancak belirli bir noktadan sonra C-S-H jeli azalmakta ve yerini silika jeli almaktadır [8]. C-S-H jelinin karbonatlaşması sonucunda CaCO₃ (kalsit, vaterit, aragonit), amorf silika jeli ve bazı alüminat fazları gibi daha yoğun ürünler oluşmaktadır. Ancak bu ürünlerin düzensiz dağılımı, faz dönüşümleri, Ca²⁺ kaybı ve hacim değişiklikleri nedeniyle mikro çatlaklar ve yeni gözenekler açığa çıkmaktadır. Böylece betonun karbonatlaşma direnci düşerken, uzun vadede iç yapısındaki boşlukların artmasıyla geçirgenlik de artabilmektedir.

CaCO₃ çeşitli yapısal formlarda bulunabilmektedir ve en yaygınları kalsit, vaterit ve aragonittir. Karbonatlaşma sırasında oluşan CaCO₃ türü, reaksiyonun gerçekleştiği koşullara bağlıdır. Düşük CO₂ konsantrasyonlarında (mevcut atmosfer seviyelerine benzer), vaterit ve aragonit oluşumunun daha yaygın olduğu görülmektedir [9]. Vaterit ve aragonit metastabildir (yarı kararlı) ve eninde sonunda kalsite dönüşmektedir. Bu dönüşüm daha

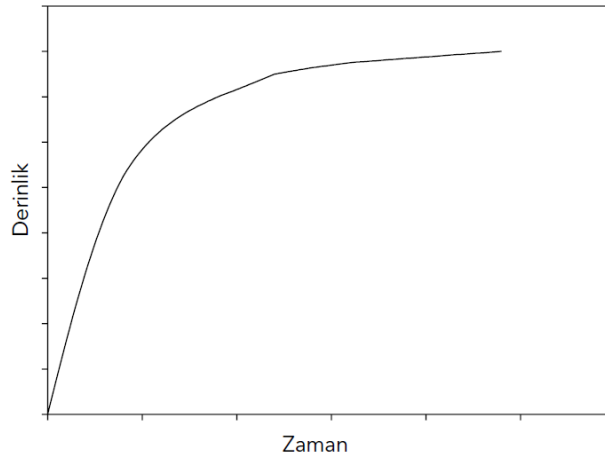
yüksek CO_2 konsantrasyonlarıyla hızlanmaktadır [8]. Daha yüksek CO_2 konsantrasyonlarında, kalsit ve daha küçük miktarlarda vaterit gözlemlenmektedir. Bu da büyük olasılıkla hızlandırılmış dönüştürme sürecini yansıtmaktadır.

Karbonatlaşma süreci pH düşüşüne neden olmaktadır ve pH değeri yaklaşık 11,5'in altına düştüğünde çeliğin etrafındaki pasif koruyucu tabaka bozulmaktadır. Ancak, pH düşüşü zamanla beton örtüsü içinde ilerleyen bir cephe olarak gelişmektedir. Şekil 3, belirli bir karbonatlaşma sürecinin ardından kalsiyum karbonat miktarının derinlik boyunca değişimini ve bunun gözenek çözeltisi pH'ına olan etkisini göstermektedir.



Şekil 3. Portland çimentosu ve Portland çimentosu ile birlikte uçucu kül kombinasyonu içeren çimento hamurunda CaCO_3 konsantrasyonu profili ve pH değişimi [10]

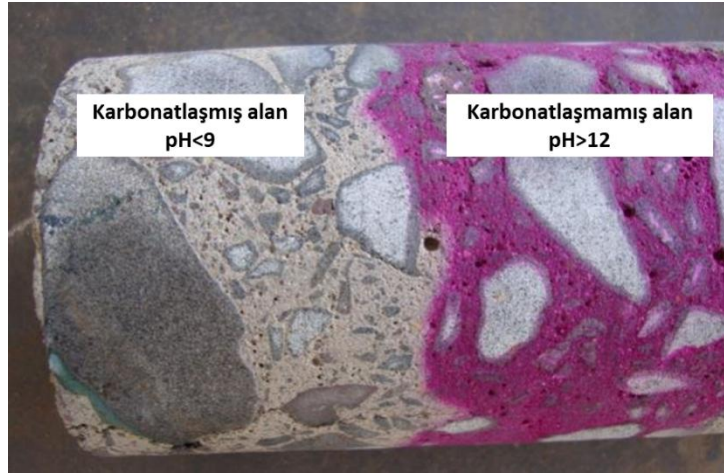
Şekil 4, karbonatlaşma derinliğinin zamanla olan ilişkisini tipik olarak göstermektedir. Karbonatlaşmanın ne ölçüde meydana geldiğini ifade etmenin en yaygın yolu, karbonatlaşmanın ilerleme derecesini belirlemektir. Bunun başlıca nedeni, karbonatlaşmanın donatı derinliği açısından değerlendirilmesinde en anlamlı ölçüm yöntemi olmasıdır.



Şekil 4. Zamanla karbonatlaşma derinliği değişimi [11]

Karbonatlaşmayı izlemenin en basit yöntemi, yeni kırılmış bir beton yüzeyine timolftalein veya fenolftalein çözeltisi püskürtmektir. Bu maddeler, pH değişiminde renk değiştiren indikatörlerdir ve çeliğin pasif tabakasının bozulduğu pH aralığında renk değiştirmektedir. Timolftalein için renk değişimi (renksizden maviye) pH 9,3 ile 10,5 arasında gerçekleşirken, fenolftalein pH 8,2 ile 10,0 arasında renksizden pembeye dönmektedir. Bu nedenle, karbonatlaşmanın meydana geldiği bölgede, karbonatlaşmış betonun doğal rengi ile

karbonatlaşmamış betonun renk değiştirmiş hali arasında keskin bir geçiş Şekil 5'te görüldüğü gibi tespit edilebilmektedir.



Şekil 5. Fenolftalein çözeltisi ile karbonatlaşma derinliğinin tespiti edilmesi

Donatı korozyonu açısından pH düşüşü iki nedenden dolayı önemlidir. Birincisi, çelik yüzeyindeki pasif tabakanın kararlılığı yüksek pH seviyesine bağlıdır ve karbonatlaşma bu bölgeye ulaştığında pasiflik kaybolmaya başlamaktadır. İkincisi, Friedel tuzunun çözünürlüğü pH'a bağlıdır ve pH düştükçe çözünürlüğü artmaktadır [12]. Bu nedenle, karbonatlaşma sırasında aynı anda klorür iyonları da betona nüfuz ediyorsa, karbonatlaşmanın arkasında gözenek sıvısındaki klorür iyonu konsantrasyonunun arttığı gözlemlenmektedir [13]. Bu durum, klorürlerin varlığında karbonatlaşmanın $[Cl^-]/[OH^-]$ oranının artmasına neden olduğu anlamına gelmektedir.

Karbonatlaşmanın ilerleme hızını ifade edebilmek oldukça faydalıdır, ancak derinlik ve zaman arasındaki ilişkinin doğrusal olmaması nedeniyle, bu hızı mesafe başına zaman cinsinden ifade etmek mümkün değildir. Bununla birlikte, karbonatlaşma hızı, CO_2 'nin betona difüzyon hızına bağlı olduğundan ve tüm difüzyon temelli süreçlerde olduğu gibi, derinlik-zamanın karekökü grafiği doğrusal bir çizgi oluşturduğundan, bu çizginin eğimi bir hız ölçüsü sağlamaktadır. Bu ölçünün birimi genellikle milimetre/yıl^{0.5} veya benzeri bir şekilde ifade edilmektedir. Bu terim genellikle "karbonatlaşma katsayısı" olarak anılmaktadır.

4. KARBONATLAŞMA HIZINI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Karbonatlaşma hızını en çok etkileyen üç çevresel faktör bulunmaktadır. Bunlar; CO_2 konsantrasyonu, bağıl nem ve sıcaklıktır. Çevresel faktörlerin karbonatlaşma üzerindeki etkisini anlamak için öncelikle gerçekleşen süreçleri incelemek faydalıdır. Bu süreçler, CO_2 moleküllerinin betonun gözenek ağına girmesi ve bu moleküllerin $Ca(OH)_2$ ve diğer hidratasyon ürünleri ile reaksiyona girmesi olarak ikiye ayrılmaktadır.

CO_2 'nin betona kütle taşınımı difüzyon yoluyla gerçekleşmektedir ve bu nedenle büyük ölçüde betonun gözenekliliği tarafından belirlenmektedir. Betona giren bir CO_2 molekülü, ilk olarak karbonatlaşmaya uğrayabilecek hidratasyon ürünlerinin bulunmadığı bir bölgeye ulaşmaktadır. Bu bölgedeki gözeneklerde bulunan su, CO_3^{2-} iyonları açısından doygun hale gelmiş olduğundan, havadaki CO_2 'yi uzaklaştırabilecek bir mekanizma bulunmaz ve CO_2 molekülü difüzyon sürecine devam eder.

Difüzyon süreci devam ettikçe ve bu CO₂ molekülü betonda daha derinlere ilerledikçe, suyun CO₃⁻² iyonları açısından doymun olmadığı bir bölgeye ulaşmaktadır. Bu, karbonatlaşma cephesidir ve bu bölgede su, Ca(OH)₂ ve C-S-H jeli bulunduğu için CO₃⁻² iyonları karbonatlaşma reaksiyonu tarafından çözeltiden uzaklaştırılmaktadır. Eğer CO₂ molekülü bu noktada bir gözenek içindeki su damlacığı veya su filmi yüzeyi ile temas ederse, çözünerek H₂CO₃ (karbonik asit) oluşturmaktadır. Karbonik asit, 2H⁺ ve CO₃⁻² iyonlarına ayrışır ve karbonat iyonu, hidrasyon ürünlerinden çözünmüş bir kalsiyum iyonu ile karşılaşana kadar su içinde difüze olur ve CaCO₃ (kalsiyum karbonat) oluşturur. Katı halde çökelek oluşturan CaCO₃, suyun kalsiyum açısından doymun olmamasına neden olur ve daha fazla hidrasyon ürününün çözünmesine olanak tanır.

Karbonatlaşmanın betonda ilerleme hızı aşağıda belirtilen üç faktörden etkilenmektedir:

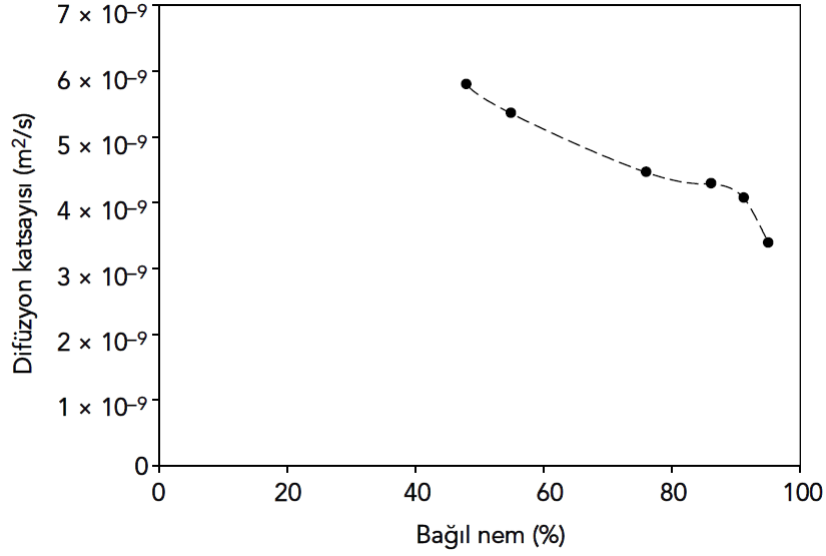
1. CO₂'nin gözenek ağı içinde difüzyon hızı
2. CO₃⁻² iyonlarının su içindeki difüzyon hızı
3. Reaksiyon hızı

CO₂'nin beton içindeki difüzyon katsayısı genellikle 1×10^{-9} ile 1×10^{-7} m²/s arasında değişirken, 25°C'de CO₃⁻² iyonlarının sudaki difüzyon katsayısı yaklaşık $9,5 \times 10^{-9}$ m²/s'dir. Bununla birlikte, beton gözenekleri içindeki su damlacıkları veya su filmlerinin yüzeyi ile hidrasyon ürünlerinin bulunduğu gözenek duvarları arasındaki mesafenin, karbonatlaşmanın beton yüzeyinden olan mesafesine kıyasla çok küçük olduğu düşünüldüğünde, belirli bir ortam koşulu altında karbonatlaşma hızını esas belirleyen faktör, CO₂'nin gözenek sistemindeki difüzyonudur.

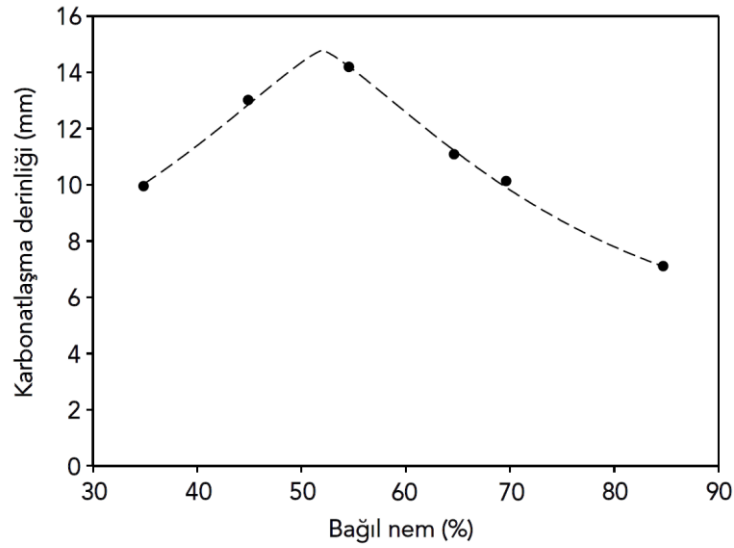
Betonla temas halindeki havanın CO₂ konsantrasyonu karbonatlaşmayı iki şekilde etkilemektedir:

1. CO₂'nin betondaki hareketi difüzyonun bir sonucudur. Bu nedenle betonun dışı ve içi arasındaki konsantrasyon gradyanının yüksek olması daha büyük bir difüzyon hızına yol açmaktadır.
2. Daha yüksek bir konsantrasyon daha yüksek bir reaksiyon hızına neden olmaktadır. CO₂ konsantrasyonu aynı zamanda vaterit ve kalsit oluşum oranlarını belirlemektedir, ancak bunun karbonatlaşmanın ilerleme hızını önemli ölçüde etkilediğine dair çok az kanıt vardır.

Çimento ile temas halindeki havanın bağıl nemi, beton gözeneklerindeki nem miktarını belirlemektedir. Bu durum iki açıdan önemlidir. Birincisi, karbonatlaşma reaksiyonu suya ihtiyaç duymaktadır. Su olmadan karbonik asit oluşamaz. Bu nedenle, düşük bağıl nem seviyelerinde, gözeneklerdeki nem eksikliği karbonatlaşma reaksiyonunun gerçekleşme derecesini sınırlamaktadır. İkincisi, bağıl nem arttıkça beton gözeneklerindeki yoğunlaşmış su miktarı da artmaktadır. Bu su, gözeneklerin hava dolu hacmini sınırlandırarak CO₂ moleküllerinin difüzyon katsayısını düşürmektedir (Şekil 6). Sonuç olarak, yüksek bağıl nem de karbonatlaşma hızını sınırlamaktadır. Genel etki, en uygun karbonatlaşma hızının yaklaşık %55 bağıl nemde gözlemlenmesidir (Şekil 7).



Şekil 6. Çeşitli bağıl nem oranlarında 0,4 su/çimento (s/ç) oranına sahip betonda CO₂ difüzyon katsayısı [14]



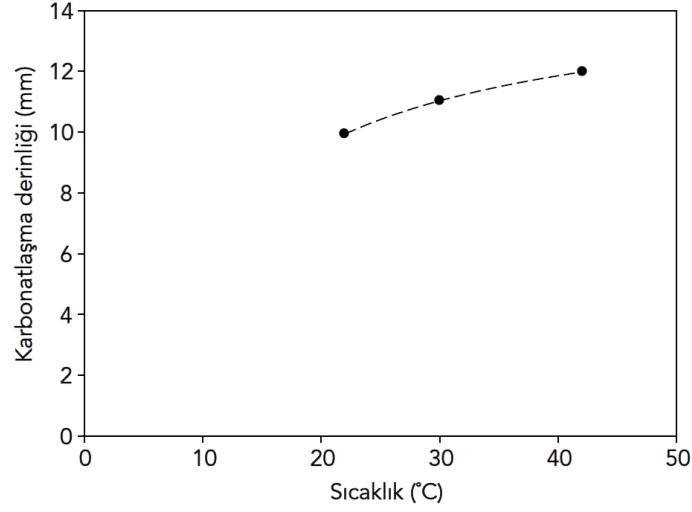
Şekil 7. Bağıl nemin bir fonksiyonu olarak %50 CO₂ atmosferine 5 gün maruz kaldıktan sonra betonunun karbonatlaşma derinliği [15]

Difüzyon katsayılarının sıcaklığa bağımlılığı genellikle Arrhenius tipi bir yaklaşımla açıklanabilir. Bu yaklaşım CO₂ taşınımı ve reaksiyon kinetiğinin yorumlanmasında da yararlıdır. Bu kimyasal reaksiyonun hız sabiti, Arrhenius denkleminin başka bir formu ile verilmektedir:

$$k = A e^{-E_a/RT} \quad (3)$$

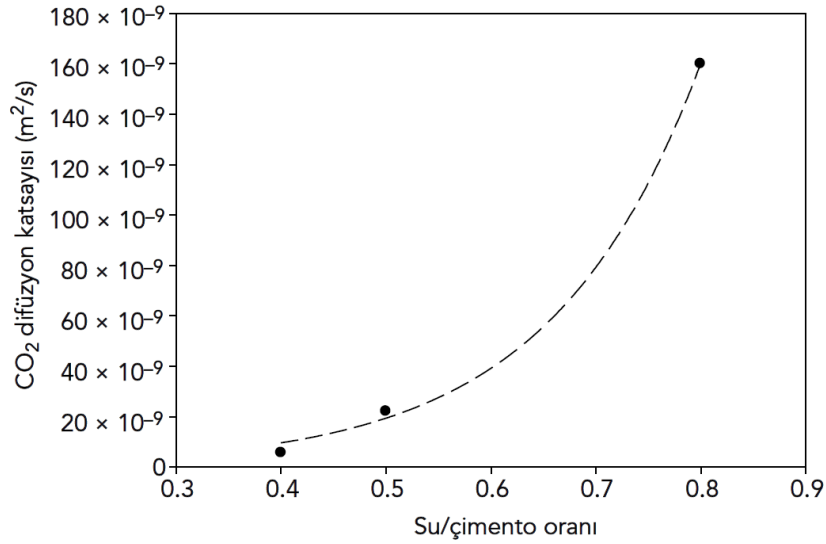
Burada A bir sabittir. Dolayısıyla sıcaklık arttıkça reaksiyon hızının da artması beklenmektedir, ancak CO₃⁻² ve Ca(OH)₂'nin (ve diğer hidratasyon ürünlerinin) çözünürlüğü sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu durum, karbonatlaşma hızının CO₃⁻² ve Ca⁺² konsantrasyonlarına bağlı olması nedeniyle reaksiyon hızını düşürmektedir. Sonuç olarak, sıcaklığın 60°C'nin üzerine çıkması karbonatlaşma hızında bir düşüşe neden olmaktadır [16].

Ancak, difüzyonun doğası ve sıcaklığın difüzyon katsayısına olan etkisinin niteliği nedeniyle, sıcaklığın karbonatlaşma hızına genel etkisi nispeten küçüktür (Şekil 8).

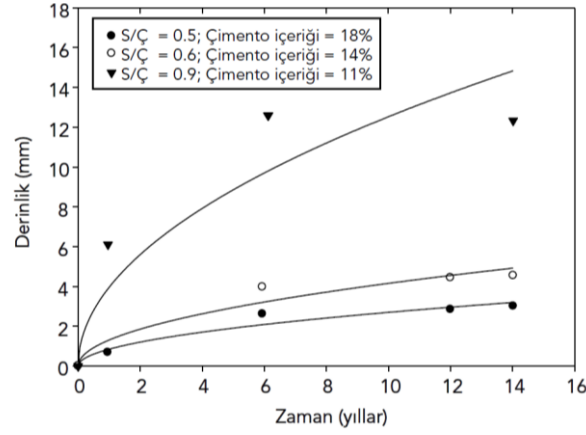


Şekil 8. Sıcaklığın bir fonksiyonu olarak %65 bağıl nem ve %50 CO₂ atmosferine 5 gün maruz bırakılan betonun karbonatlaşma derinliği [15]

Karbonatlaşma sürecinde difüzyonun önemi göz önüne alındığında, gözenekliliğin doğası karbonatlaşma hızını belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Toplam gözeneklilik, dolambaçlılık (tortuosity) ve kısıtlayıcılık (constrictivity) klorür difüzyonunda olduğu gibi benzer etkilere sahiptir. Toplam gözeneklilik hacminin etkisi en iyi şekilde, s/ç oranının CO₂'nin difüzyon katsayısına olan etkisine (Şekil 9) ve karbonatlaşma cephesinin ilerleme hızına (Şekil 10) bakarak anlaşılabilir.

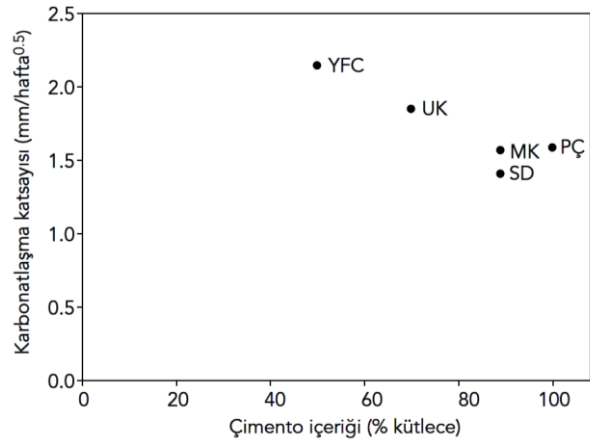


Şekil 9. s/ç oranının bir fonksiyonu olarak çimento hamurunda CO₂ difüzyon katsayısı [14]



Şekil 10. Zaman, s/ç oranı ve çimento içeriğinin bir fonksiyonu olarak beton için karbonatlaşma derinliği [17]

Klorür giriş hızını azaltmak amacıyla, dolambaçlılık ve kısıtlayıcılığı değiştirmek için yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemelerin kullanılması, betonun gözenek yapısını iyileştirmek için etkili olabilmektedir. Aynı durum karbonatlaşma için de geçerlidir, ancak burada önemli bir ödün söz konusudur. Bu da azalan Ca(OH)_2 içeriğidir. Betonda bulunan Ca(OH)_2 miktarı, karbonatlaşmanın ilerleme hızını kontrol etmede önemli bir rol oynamaktadır. Bunun nedeni, daha yüksek seviyelerde Ca(OH)_2 'nin daha fazla miktarda CO_2 ile reaksiyona girebilmesi ve dolayısıyla yeterli gaz moleküllerinin difüzyonla taşınması için daha uzun bir süreye ihtiyaç duyulmasıdır. Portland çimentosu dışındaki bileşenlerin (mineral katkıları) varlığı nedeniyle Ca(OH)_2 seviyesinin azalması, karbonatlaşmanın belirli bir mesafeye ilerlemesi için gereken CO_2 miktarının azalmasına neden olmaktadır. Daha yüksek dolambaçlılık, daha düşük kısıtlayıcılık ve muhtemelen daha düşük toplam gözeneklilik gibi etkiler bu durumu bir miktar dengeleyebilmektedir. Ancak genel etki, bazı durumlarda daha düşük karbonatlaşma direncine yol açabilmektedir. Şekil 11'de karbonatlaşma hızı, beton karışımlarındaki çimento fraksiyonundaki Portland çimento yüzdesine karşı gösterilmektedir. Grafik, her katkı maddesinin etkin difüzyon katsayısını azaltmaya olan katkısını doğrudan göstermese de aynı seviyelerde kullanılan iki farklı malzemeyi (silis dumanı ve metakaolin) içermektedir. Buradan, daha ince olan silis dumanının daha düşük bir karbonatlaşma hızı sağladığı görülmektedir.



Şekil 11. Portland çimentosu (PÇ), yüksek fırın cürufu (YFC), uçucu kül (UK), silis dumanı (SD) ve metakaolin (MK) kombinasyonlarını içeren ve 0,42 su/bağlayıcı oranına sahip harç karışımlarında PÇ içeriğine bağlı olarak karbonatlaşma katsayısı [10]

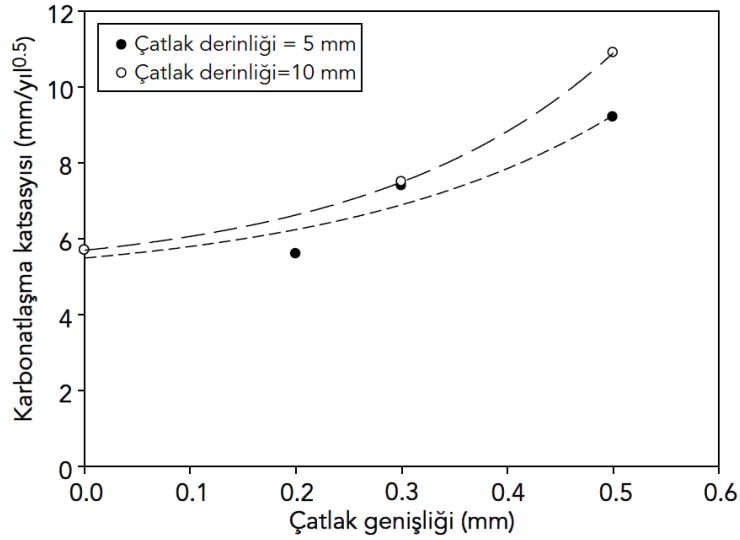
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ içeriği ile gözenek iyileştirme arasındaki bu denge kısmen kullanılan malzemenin özel doğasına bağlı olsa da tipik olarak mineral katkıların toplam çimento fraksiyonu kütlelerinin yaklaşık %15 ila %20'sinden az olması durumunda, düşen difüzyon katsayısı ile azalan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ seviyesi arasındaki denge korunmakta ve yalnızca Portland çimentosu içeren bir karışımla kıyaslanabilmekte veya daha iyi bir performans sağlanabilmektedir [18]. Kısacası, bir beton karışımının Portland çimentosu içeriği karbonatlaşma hızı açısından da etkilidir. Daha yüksek Portland çimentosu içeriği, karbonatlaşmanın ilerleme hızını yavaşlatmaktadır. Karışım tasarımında, belirli bir işlenebilirliği korumak için s/ç oranının azaltılması, beton dayanıklılığını artırmak amacıyla genellikle Portland çimentosu içeriğinin artırılmasına neden olmaktadır.

Mineral katkı içeren betonların karbonatlaşma direncinin daha düşük olmasının başlıca nedenleri aşağıda belirtilmektedir:

- **$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin Azalması:** Mineral katkılar, özellikle uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı, puzolanik reaksiyona girerek $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketmektedir. Portland çimentosu içeren betonlarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$, karbonatlaşma sırasında CO_2 ile reaksiyona girerek kalsiyum karbonat (CaCO_3) oluşturmaktadır ancak mineral katkı içeren betonlarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı daha düşük olduğu için bu tampon etkisi azalmakta ve C-S-H jeli doğrudan karbonatlaşabilmektedir.
- **C-S-H Jelinin Karbonatlaşması ve Gözeneklilik Artışı:** Portland çimentosu içeren betonlarda karbonatlaşma genellikle $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin CaCO_3 'e dönüşmesiyle sınırlı kalırken, mineral katkılı betonlarda C-S-H jelinin karbonatlaşması da gerçekleşebilmektedir. C-S-H jelinin karbonatlaşması sonucunda yoğun ürünler oluşmakta, ancak bu aynı zamanda betonun iç yapısını değiştirerek gözenekliliği artırabilmekte ve karbonatlaşma ilerlemesini hızlandırabilmektedir.
- **Bağlayıcı İçeriğinin ve Mikroyapının Değişmesi:** Mineral katkılar genellikle betonun gözenek yapısını daha ince ve daha bağlantılı hale getirmektedir. Bu, bazı durumlarda geçirgenliği azaltabilmektedir, ancak karbonatlaşma açısından ters bir etkiye neden olmaktadır. Karbonatlaşma öncelikle betona difüzyonla giren CO_2 ile gerçekleştiğinden, yüksek gözeneklilik ve bağlantılı boşluk yapısı karbonatlaşma hızını artırabilmektedir.
- **Düşük pH ve Korozyon Riski:** Portland çimentolu betonlarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin varlığı pH'ı yüksek ($\approx 12-13$) tutarak donatı çeliğini pasif hale getirmektedir. Mineral katkı içeren betonlarda karbonatlaşma daha hızlı ilerlediği için pH daha hızlı düşebilmektedir. Bu da çeliğin korozyona karşı korunmasını zayıflatabilmektedir.
- **Bağlayıcı Türüne Bağlı Karbonatlaşma Derinliği:** Araştırmalar, uçucu kül içeren betonların karbonatlaşma derinliğinin genellikle daha fazla olduğunu, cüruf içeren betonların ise nispeten daha az karbonatlaşmaya maruz kaldığını göstermektedir. Bunun temel nedeni, uçucu kül içeren betonların erken yaşta daha düşük hidratasyon derecesine sahip olması ve başlangıçta daha geçirgen bir yapı sergilemesidir.

Genel olarak, mineral katkılar, betonun uzun vadeli dayanıklılığı açısından son derece faydalı olsa da karbonatlaşma direncini azaltabilen yönleri tasarım aşamasında dikkatli bir değerlendirmeyi gerektirmektedir. Örneğin, düşük s/ç oranı ve uygun kütleme uygulamalarıyla karbonatlaşma hızı azaltılabilmektedir.

Klorür difüzyonunda olduğu gibi, çatlakların varlığı CO₂ difüzyon hızını önemli ölçüde artırabilmektedir. Şekil 12, çatlak genişliği ve derinliğinin karbonatlaşma hızına etkisini göstermektedir. Çatlak genişliği, çatlak derinliğine kıyasla çok daha büyük bir etkiye sahiptir.



Şekil 12. Yapay çatlaklar içeren ve %10 CO₂ atmosferine maruz kalan çimento harcının karbonatlaşma hızına çatlak genişliği ve çatlak derinliğinin etkisi [19]

Tablo 1'de s/ç oranı, su/CaO oranı, agrega/çimento oranı, kür süresi ve sıcaklığı, bağıl nem ve ortam sıcaklığı gibi parametrelerin karbonatlaşma katsayısına etkileri belirtilmektedir.

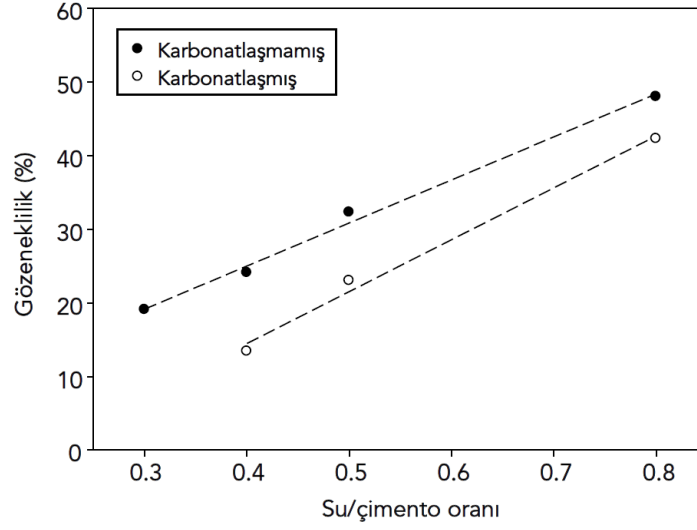
Tablo 1. Çeşitli parametrelerin karbonatlaşma katsayısına etkisi [20]

Parametre	Aralık	Karbonatlaşma Katsayısı Değişimi
s/ç oranı	0,4 → 0,65	↑
Reaktif CaO'ya göre su oranı	0,4 → 0,9	↑
Agrega/çimento oranı	1,7 → 2,3	↑
Kür süresi	1 gün → 28 gün	↓
Kür sıcaklığı	20 °C → 60 °C	↓
	60 °C → 80 °C	↑
Sabit bağıl nem (20 °C'de)	%50-55 → %90	↓
	%50-55 → %10	↓
Sıcaklık	20 °C → 40 °C	↑

5. FİZİKSEL ÖZELLİKLERDEKİ DEĞİŞİKLİKLER

Karbonatlaşma, gerçekleştiği betonun doğasını değiştirme etkisine sahiptir. Özellikle, hidrasyon ürünlerinin CO₂ ile reaksiyona girmesi sonucunda, gözeneklerin içinde CaCO₃ kristallerinin çökmesi nedeniyle toplam gözeneklilik ve ortalama gözenek boyutu

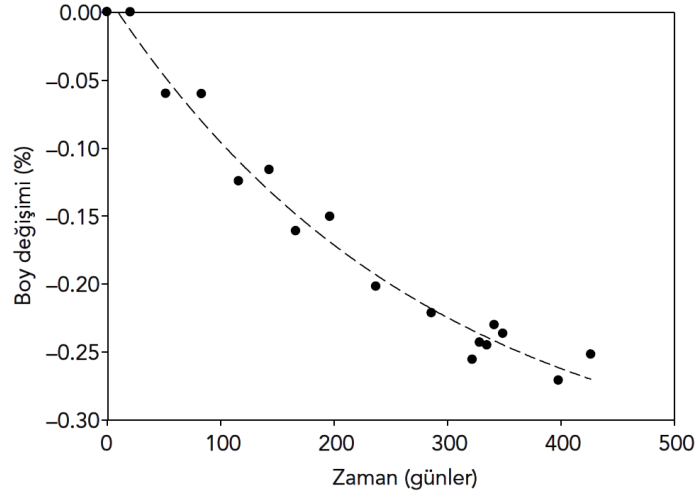
azalmaktadır [21]. Şekil 13'te toplam gözenekliliğin azalması görülmektedir. Karbonatlaşma reaksiyonu sonucu su açığa çıkmaktadır ve bu da betonun gözeneklerindeki CO_2 hareketliliğini sınırlandırmaktadır, ancak bu etki yalnızca gözeneklerdeki nemin dış ortamın bağıl nemiyle dengeye ulaşmasına kadar sürmektedir.



Şekil 13. Çeşitli s/ç oranlarına sahip Portland çimento hamurlarında gözeneklilik [14]

Karbonatlaşma sırasında CaCO_3 oluşumu genellikle beton dayanımında hafif bir artışa neden olmaktadır, ancak dayanıklılık açısından daha önemli olan karbonatlaşma büzülmesidir. Karbonatlaşma büzülmesinin mekanizması tam olarak çözülememiştir. Bunun, reaksiyon ürünlerinin reaktanlara göre farklı hacimde olmasından kaynaklanmadığı kesindir, çünkü karbonatlaşma sonucu oluşan CaCO_3 , onu oluşturan Ca(OH)_2 'den daha büyük bir hacme sahiptir. En yaygın açıklamalardan biri, beton içindeki Ca(OH)_2 kristallerinin, kuruma büzülmesi nedeniyle sıkışma altında olduğu yönündedir [22]. Karbonatlaşma sırasında Ca(OH)_2 çözüldüğünde, geride boş bir alan kalmaktadır ve bu, kristalleri çevreleyen malzemenin bu boşluğa doğru büzülmesine neden olmaktadır. Öne sürülen bir diğer mekanizma ise C-S-H jelinin karbonatlaşması sonucu su kaybetmesi ve yapısal değişikliklere uğraması nedeniyle meydana gelen büzülmedir [23].

Şekil 14, karbonatlaşmaya maruz kalan beton için bir büzülme eğrisini göstermektedir. Karbonatlaşma sonucu oluşan boyutsal değişimin büyüklüğü önemli olabilir. Betonun çekme gerilimi dayanımı – yani çatlamaya neden olabilecek gerinim seviyesi – yaklaşık %0,015 veya daha azdır ve karbonatlaşma bu seviyede gerinimler oluşturabilir. Karbonatlaşma dış yüzeyden içeri doğru ilerlediği için, karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış beton bölümleri arasındaki hacim farkından kaynaklanan gerilmeler nedeniyle çatlama meydana gelir. Çatlamalar yüzeyde ince çatlaklar şeklinde ortaya çıkar.



Şekil 14. %15 CO₂ atmosferine maruz kalan beton prizmalarında karbonatlaşma büzülmesi [24]

Karbonatlaşmanın betonun geçirimsizlik özellikleri üzerindeki genel etkisi karmaşıktır. Gözenekliliğin azalması, CO₂ ve diğer maddelerin daha fazla girmesine karşı direncin artmasına neden olmaktadır. Ancak, çatlakların olduğu durumlarda, karbonatlaşmış tabaka içindeki CO₂ difüzyon katsayısı artmaktadır. Genel olarak, düşük bir s/ç oranı yalnızca karbonatlaşma hızını sınırlamakla kalmaz, aynı zamanda çatlakların oluşumunu da azaltabilir.

6. KARBONATLAŞMANIN ÖNLENMESİ

Klorür iyonlarının ve CO₂'nin beton içindeki difüzyon katsayıları genellikle benzer mertebelere sahiptir, ancak karbonatlaşma genellikle daha az tehdit olarak kabul edilmektedir. Bunun ana nedeni, atmosferde karşılaşılan CO₂ konsantrasyonlarının, klorür içeren ortamlarda karşılaşılabilecek seviyelerden önemli ölçüde daha düşük olmasıdır.

Ca(OH)₂ ve C-S-H jelinin karbonatlaşmanın ilerleme hızını sınırlamadaki rolü göz önüne alındığında, Fick'in ikinci difüzyon yasası aşağıdaki şekilde değiştirilerek karbonatlaşma derinliği (d) için teorik bir denklem türetilebilmektedir:

$$d = \sqrt{2Dt\left(\frac{C_1}{C_0}\right)} \quad (4)$$

Burada:

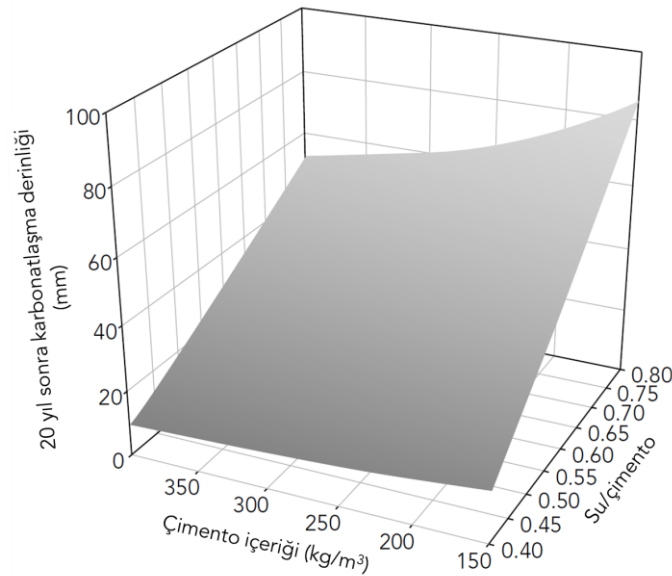
- D, karbonatlaşmış tabakanın difüzyon katsayısını (m²/s) temsil eder.
- C₁, dış ortamdaki CO₂ konsantrasyonunu (m³ CO₂/m³ hava) gösterir.
- C₀, incelenen beton hacminin tamamen karbonatlaşması için gereken CO₂ miktarını (m³ CO₂/m³ beton) ifade eder [25].

Daha önce açıklandığı gibi, D'nin değeri karbonatlaşmış tabakanın gözenek özelliklerine, bağıl neme ve sıcaklığa bağlıdır. C₀ ise betonun Ca(OH)₂ ve C-S-H jeli içeriği tarafından belirlenir ve dolayısıyla çimento içeriği, bileşimi ve hidratasyon derecesine bağlıdır. D, atmosferik koşullardaki değişimler ve zaman içinde oluşabilecek çatlaklar nedeniyle önemli ölçüde dalgalanabilmektedir.

Yalnızca $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin karbonatlaşmaya uğradığı varsayılarak 350 kg/m^3 Portland çimentosu içeren bir beton karışımı örnek alındığında, bu çimento kütle bazında %22 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ içerecek şekilde hidrate olduğu durumda, 20°C sıcaklık ve atmosferik basınç altında yaklaşık $25 \text{ m}^3 \text{ CO}_2$ ile reaksiyona girmesi gerekmektedir. D değeri $5,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ olarak kabul edilirse, 20 yıl sonra karbonatlaşma derinliği yaklaşık 10 mm olur. Bu durumda karbonatlaşma katsayısı yaklaşık $2,2 \text{ mm/yıl}^{0,5}$ olur. Yapılan saha araştırmalarına göre karbonatlaşma katsayısı genellikle 0,1 ile $15 \text{ mm/yıl}^{0,5}$ arasında değişmektedir. Daha yüksek değerler genellikle zayıf veya düşük kaliteli beton içeren yapılar için rapor edilmiştir [17].

Karbonatlaşmanın ilerleme hızını etkileyen birçok parametre bulunmasına rağmen, bazıları diğerlerinden daha etkilidir. Bu parametrelerden en etkili olanları belirlenerek, donatının karbonatlaşma kaynaklı korozyondan korunması için en iyi yöntemler ortaya konulabilir.

Betonda CO_2 difüzyon katsayısını azaltmak ve karbonatlaşma için gerekli hidrasyon ürünlerinin seviyesini artırmak amacıyla s/ç oranının düşürülmesi ve Portland çimento içeriğinin artırılması gerekmektedir, ancak D değerinin bu parametrelere olan duyarlılığı açısından, s/ç oranı çok daha büyük bir etkiye sahiptir. Bu durum, Şekil 15'te gösterilmektedir. Bu grafik, 20 yıl boyunca farklı çimento içerikleri ve s/ç oranları için hesaplanan karbonatlaşma derinliğini göstermektedir. Difüzyon katsayısı ile s/ç oranı arasındaki ilişki Şekil 9'dan alınarak kullanılmıştır.

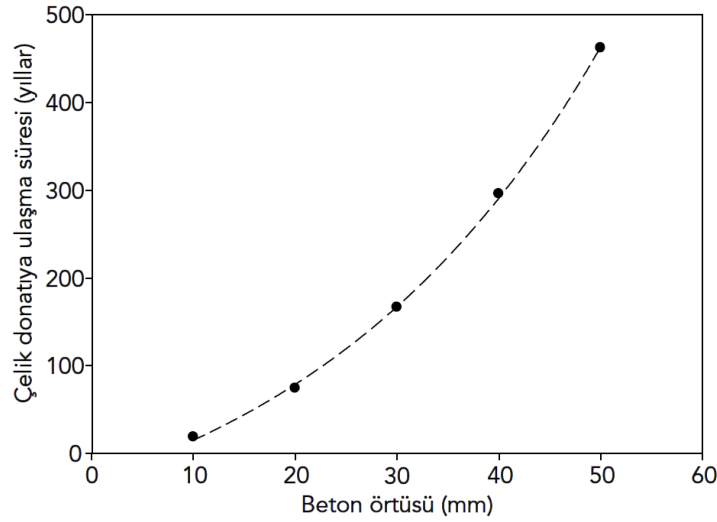


Şekil 15. 20 yıllık bir süre sonunda çimento içeriğinin ve s/ç oranının karbonatlaşma derinliğine teorik etkisi [11]

Beton örtü kalınlığının (paspayı) etkisi, Denklem 4'ün yeniden düzenlenmesiyle şu şekilde gösterilebilir:

$$t = \frac{d^2}{2D\left(\frac{C_1}{C_0}\right)} \quad (5)$$

Bu denklem, betonun belirli bir derinliğe kadar karbonatlaşması için geçen süreyi vermektedir. Şekil 16, sabit s/ç oranı ve Portland çimento içeriği için belirli bir derinliğe ulaşmak için gereken süreyi göstermektedir.



Şekil 16. 0,4 s/ç oranına sahip 350 kg/m³ çimento içeren beton için karbonatlaşmanın donatıya ulaşma süresi üzerinde örtü derinliğinin teorik etkisi [11]

Sonuç olarak, mühendislerin kontrol edebildiği ve karbonatlaşmaya bağlı korozyona karşı en etkili olan parametreler s/ç oranı ve beton örtü derinliğidir. Bu durum, standartlardaki karbonatlaşma koruma yöntemlerinde de yansıtılmaktadır.

TS EN 206 ve ulusal eki olan TS 13515 standartları, betonun hava ile temas ettiği ve karbonatlaşmaya bağlı korozyonun olası olduğu dört çevresel maruziyet sınıfı tanımlamaktadır. Bunlar:

1. XC1: Kuru veya sürekli ıslak
2. XC2: Islak, nadiren kuru
3. XC3: Orta derecede nemli
4. XC4: Döngüsel olarak ıslak ve kuru

XC3 ve XC4, bağıl nemin oynadığı önemli rol nedeniyle daha agresif maruziyet koşullarıdır. Bu tür maruziyetlerle karşılaşan beton için TS EN 206'da EK bir rehberlik sağlanmamaktadır. Ancak, TS 13515, uygun çimento türleri, maksimum s/ç oranları ve minimum örtü derinlikleri, çimento içerikleri ve dayanımları ile ilgili gereksinimleri belirlemektedir. Bu gereksinimler, klorür maruziyet sınıflarına kıyasla daha az katıdır. Örneğin, bir yapının 100 yıllık hizmet ömrü gereksinimi ile en agresif karbonatlaşma koşulları için en düşük örtü derinliği 25 mm olarak belirlenmiştir. Bu durum için diğer bir gereksinim de beton basınç dayanımının en düşük C50/60 sınıfında olmasıdır.

Karbonatlaşma ve klorür geçişi aynı anda meydana gelebilir. Bu durum en çok XD1, XD3, XS1 ve XS3 maruziyet sınıflarında görülmektedir, çünkü bu koşullar betondaki nem seviyelerinin karbonatlaşmanın en belirgin olduğu aralıkta olmasına neden olabilmektedir. Ancak, klorür geçişine karşı direnç için gereken daha yüksek beton kalitesi ve daha büyük örtü derinlikleri nedeniyle karbonatlaşma bu tür koşullarda büyük bir sorun teşkil etmemektedir.

Karbonatlaşmaya karşı koruma için diğer seçenekler, klorür kaynaklı korozyona karşı detaylandırılan birçok önlemi içermektedir. Bunlar; korozyon önleyici katkıları, korozyona dayanıklı donatılar, lifler ve yüzey kaplamalarıdır. Ancak, hidrofobik emprenye malzemeleri klorür içeren ortamlar için tercih edilirken, bu tür kaplamalar karbonatlaşma koşullarında pek faydalı değildir. Karbonatlaşma için gereken kaplamalar, beton yüzeyindeki gözenekleri bloke edebilen ve CO₂ moleküllerinin içeriye hareketini engelleyebilen türde olmalıdır. Birçok kaplama ve boya, özel olarak "karbonatlaşmaya karşı" olarak pazarlanmakta olup, genellikle betonun altında oluşan çatlaklara rağmen bütünlüğünü koruyabilen elastomerler temelinde üretilmektedir.

En yaygın olarak karşılaşılan karbonatlaşma önleyici kaplamalar, su buharının geçmesine izin verme ek faydasına sahip olan akrilat elastomerler içermektedir [26]. Betonun bu şekilde nefes almasına izin vermek, potansiyel olarak donma-çözülme hasarlarını azaltabilmektedir.

7. KARBONATLAŞMA TAYİNİ İÇİN TEST YÖNTEMLERİ

Karbonatlaşma testi, beton içindeki Ca(OH)₂'in, CO₂ ile reaksiyona girerek CaCO₃'a dönüşmesini ve bunun sonucunda pH seviyesinin düşmesini belirlemek için yapılmaktadır. Kullanılan temel test yöntemleri şunlardır:

1. Fenolftalein Testi (İndikatör Sprey Testi)

- En yaygın testtir. Betonun kırılmış veya kesilmiş yüzeyine, %1 fenolftalein çözeltisi püskürtülerek karbonatlaşmış bölge belirlenir.
- Karbonatlaşmamış alanlar pembe renkte kalırken, karbonatlaşmış alanlar renksiz olur.
- Genellikle saha ve laboratuvar testleri için kullanılır.

2. Hızlandırılmış Karbonatlaşma Testi

- Beton numuneleri belirli sıcaklık, nem ve CO₂ konsantrasyonu altında bekletilerek karbonatlaşma derinliği hızlandırılmış şekilde belirlenir.
- Kontrollü ortamda laboratuvar testleri için uygundur.

3. pH Testi

- Betonun farklı derinliklerinden alınan numunelerin pH değeri ölçülerek karbonatlaşma derecesi belirlenir.
- Beton içindeki kalsiyum hidroksit tüketimi ve karbonatlaşmanın ilerleme durumu anlaşılır.

4. Termogravimetrik Analiz (TGA) ve X-Işını Difraksiyonu (XRD)

- Çimento hidrasyon ürünlerinin mineralojik değişimlerini belirlemek için kullanılır.
- Daha detaylı ve hassas laboratuvar analizleri gerektirir.

8. KAYNAKLAR

1. Bier, T. H. A. (1986). Influence of type of cement and curing on carbonation progress and pore structure of hydrated cement pastes. *MRS Online Proceedings Library*, 85, 123–134. <https://doi.org/10.1557/PROC-85-123>
2. Parrott, L. J. (1986). Measurement and modeling of porosity in drying cement paste. *MRS Online Proceedings Library*, 85, 91–104. <https://doi.org/10.1557/PROC-85-91>
3. Bier, T. A., Ludirdja, D., Young, J. F., & Berger, R. L. (1988). The effect of pore structure and cracking on the permeability of concrete. *MRS Online Proceedings Library*, 137, 235–241. <https://doi.org/10.1557/PROC-137-235>
4. Verbeck, G. J. (1958). Carbonation of hydrated Portland cement. In *Cement and concrete (ASTM STP 205)*, pp. 17–36. ASTM International.
5. Biczok, I. (1967). *Concrete corrosion and concrete protection*. Chemical Publishing.
6. Lea, F. M. (1971). *The chemistry of cement and concrete (3rd ed.)*. Chemical Publishing.
7. Ibrahim, A. A., Abuazza, O. A., & Tarrani, F. A. (1997). Prestressed concrete cylinder pipes exposed internally to aggressive water. In V. M. Malhotra (Ed.), *Durability of concrete (SP-170)*, pp. 437–439. American Concrete Institute.
8. Šauman, Z. (1971). Carbonization of porous concrete and its main binding components. *Cement and Concrete Research*, 1(6), 645–662. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(71\)90019-6](https://doi.org/10.1016/0008-8846(71)90019-6)
9. Anstice, D. J., Page, C. L., & Page, M. M. (2005). The pore solution phase of carbonated cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 35(2), 377–383. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.041>
10. McPolin, D. O., Basheer, P. A. M., & Long, A. E. (2009). Carbonation and pH in mortars manufactured with supplementary cementitious materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21(5), 217–225. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2009\)21:5\(217\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:5(217))
11. Dyer, T. (2014). *Concrete durability (1st ed.)*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b16793>
12. Suryavanshi, A. K., & Swamy, R. N. (1996). Stability of Friedel's salt in carbonated concrete structural elements. *Cement and Concrete Research*, 26(5), 729–741. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(96\)85010-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(96)85010-1)
13. Kayyali, O. A., & Haque, M. N. (1988). Effect of carbonation on the chloride concentration in pore solution of mortars with and without fly ash. *Cement and Concrete Research*, 18(4), 636–648. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(88\)90056-7](https://doi.org/10.1016/0008-8846(88)90056-7)
14. Houst, Y. F., & Wittmann, F. H. (1994). Influence of porosity and water content on the diffusivity of CO₂ and O₂ through hydrated cement paste. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1165–1176. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90040-X)
15. Papadakis, V. G., Vayenas, C. G., & Fardis, M. N. (1991). Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation. *ACI Materials Journal*, 88(4), 363–373. <https://doi.org/10.14359/1863>
16. Liu, L., Ha, J., Hashida, T., & Teramura, S. (2001). Development of a CO₂ solidification method for recycling autoclaved lightweight concrete waste. *Journal of Materials Science Letters*, 20(19), 1791–1794. <https://doi.org/10.1023/A:1012591318077>
17. Currie, R. J. (1986). Carbonation depths in structural-quality concrete: An assessment of evidence from investigations of structures and from other sources (BRE Report No. L52). Building Research Establishment.

18. Malami, C., Kaloidas, V., Batis, G., & Kouloumbi, N. (1994). Carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures. *Cement and Concrete Research*, 24(8), 1444–1454. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90158-9](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90158-9)
19. De Schutter, G. (1999). Quantification of the influence of cracks in concrete structures on carbonation and chloride penetration. *Magazine of Concrete Research*, 51(6), 427–435. <https://doi.org/10.1680/mac.1999.51.6.427>
20. von Greve-Dierfeld, S., Lothenbach, B., Vollpracht, A., Wu, B., Huet, B., Andrade, C., Medina, C., Thiel, C., Gruyaert, E., Vanoutrive, H., Sáez del Bosque, I. F., Ignjatovic, I., Elsen, J., Provis, J. L., Scrivener, K., Thienel, K.-C., Sideris, K., Zajac, M., Alderete, N., ... De Belie, N. (2020). Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: A critical review by RILEM TC 281-CCC. *Materials and Structures*, 53(6), Article 136. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>
21. Dewaele, P. J., Reardon, E. J., & Dayal, R. (1991). Permeability and porosity changes associated with cement grout carbonation. *Cement and Concrete Research*, 21(4), 441–454. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(91\)90092-V](https://doi.org/10.1016/0008-8846(91)90092-V)
22. Powers, T. C. (1962). A hypothesis on carbonation shrinkage. *Journal of the Portland Cement Association Research and Development Laboratories*, 4(2), 40–50.
23. Swenson, E. G., & Sereda, P. J. (1968). Mechanism of the carbonation shrinkage of lime and hydrated cement. *Journal of Applied Chemistry*, 18(4), 111–117. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010180404>
24. Jerga, J. (2004). Physico-mechanical properties of carbonated concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 645–652. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.029>
25. De Ceukelaire, L., & van Nieuwenburg, D. (1993). Accelerated carbonation of a blast-furnace cement concrete. *Cement and Concrete Research*, 23(2), 442–452. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(93\)90109-M](https://doi.org/10.1016/0008-8846(93)90109-M)
26. Zafeiropoulou, T., Rakanta, E., & Batis, G. (2011). Performance evaluation of organic coatings against corrosion in reinforced cement mortars. *Progress in Organic Coatings*, 72(1–2), 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2011.04.005>