



Betonun Dayanıklılığı ve Kimyasal Katkılarının Etkisi Rehberi



KATKI ÜRETİCİLERİ BİRLİĞİ

BETONUN DAYANIKLILIĞI VE KİMYASAL KATKILARIN ETKİSİ REHBERİ

HAZIRLAYAN

Katkı Üreticileri Birliği Teknik Komitesi

EDİTÖR

Yasin Engin

KATKIDA BULUNANLAR

Devrim Nazlıkol
Doç.Dr. Hüseyin Yiğiter
Osman Onur Tezel

Özgür Mutlu
Sera Set
Uęur Semih Aytaç

İLETİŞİM BİLGİLERİ

Bağlarbaşı Mah. Atatürk Cd. Sakarya Sk. No: 35 D:18, 34844 Malte Plaza, Maltepe /
İstanbul

Tel: +90 216 456 43 24

www.kub.org.tr / info@kub.org.tr

© Mart 2024

Katkı Üreticileri Birliği (KÜB) yayınıdır.

Tüm yayın hakkı KÜB' e aittir.

Kaynak gösterilerek alıntı yapılabilir.

İzinsiz çoğaltılamaz ve basılamaz.



İÇERİK

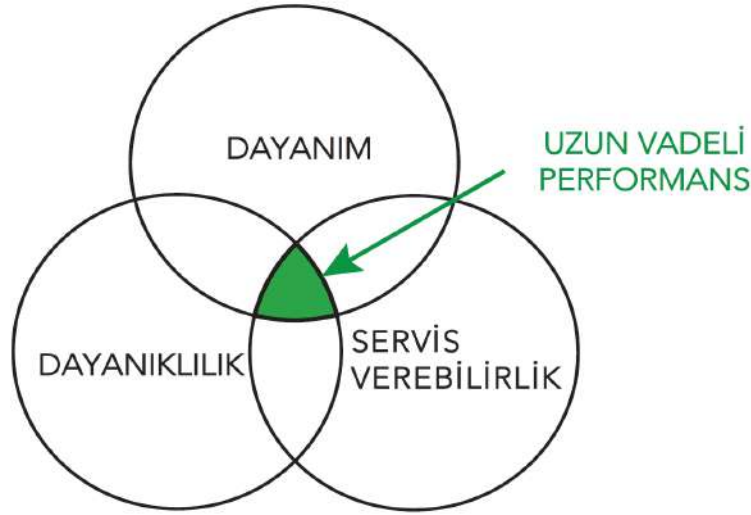
1. DAYANIKLILIK VE SERVİS ÖMRÜ.....	1
2. BETON GEÇİRİMLİLİĞİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER.....	8
3. BETON ÇATLAKLARI.....	11
4. TS EN 206'YA GÖRE ÇEVRESEL ETKİ SINIFLARI.....	14
5. KARBONATLAŞMA ETKİSİ.....	16
6. KLORÜR ATAĞI.....	19
7. DONMA-ÇÖZÜLME ETKİSİ.....	23
8. SÜLFAT ATAĞI.....	26
9. ALKALİ-AGREGA REAKSİYONU.....	30
10. YANGIN.....	32
11. BETON BİLEŞENLERİNİN DAYANIKLILIĞA ETKİSİ.....	35
11.1. Çimento.....	35
11.2. Mineral Katkılar.....	36
11.3. Agregas.....	38
11.4. Kimyasal Katkılar.....	40
11.5. Su.....	46
11.6. Fiberler.....	47
KAYNAKLAR.....	49



1. DAYANIKLILIK VE SERVİS ÖMRÜ

Beton dünya çapında en çok kullanılan inşaat malzemesidir. Standartlara ve şartnamelere göre uygun bir şekilde üretilmiş ve uygulanmış beton; emniyetli, iyi bir ekonomik değere sahip, uzun ömürlü, kullanışlı ve estetik yapılar için son derece önemli bir unsurdur.

Çoğu yapı geçici olacak şekilde inşa edilmez ve onlarca yıl hizmet vermesi beklenmektedir. Uzun vadeli performans, projenin tasarım ve inşaat aşamasında başlar ve bir yapının belirli bir sıklıkta ve planlanan zaman diliminde belirli düzeyde bakım ve onarımın gerekli olacağı hizmet ömrünü kapsar. Şekil 1'de uzun vadeli performansı oluşturan temel özellikler görülmektedir. Bunlar; dayanım, servis verebilirlik ve dayanıklılıktır.



Şekil 1. Dayanım, dayanıklılık ve servis verebilirliğin uzun vadeli performans ile ilişkisi

Dayanım

Dayanım ya da mukavemet, cisimlerin çeşitli dış etkiler ve bu dış etkilerin neden olduğu iç kuvvetler karşısında gösterdikleri dirençtir. Dayanım, malzemenin özelliklerine bağlıdır. Bir malzemenin dayanımı; onun aksenal gerilmeye, kayma gerilmesine, bükülmeye ve burulmaya dayanma kapasitesine ve ayrıca bu etkilere karşı şekil değiştirme kapasitesine bağlıdır.

Yapılar kendilerini ve maruz kalınan yükleri destekleyecek şekilde tasarlanır ve inşa edilir. Yeterli dayanıma sahip olmayan bir yapı, uzun vadeli performans bir yana, hiçbir zaman hizmet verme yeteneğine sahip olamaz. Çoğu yapısal tasarımda dayanım öncelikli husustur ve birçok standart ve kodun içeriği çoğunlukla dayanıma ayrılmıştır. Ancak, dayanım tek başına uzun vadeli performans için yeterli değildir.



Dayanım, servis verebilirlik ve dayanıklılık birbiriyle ilişkilidir. Yeterli dayanıma sahip olacak şekilde tasarlanan bir yapı, tasarım servis ömrüne ulaşmak için yeterli dayanıklılığa veya kullanılabilirliğe sahip olmayabilir. Yapısal tasarım ve detaylandırmadaki çok sayıda husus, dayanıklılığı ve servis verebilirliği etkiler. Bunlar arasında elemanların sürekliliği, birleşim yerleri, birleşim yeri aralığı, donatı detayları vb. faktörler yer almaktadır. Bu detaylar çoğu zaman bozulmanın ilk görüldüğü yerlerdir.

Bu bilgiler ışığında yapısal dayanımın sadece malzeme dayanımına bağlı olmadığı; ayrıca donatı işçiliği, betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması, bakımı ve kürü gibi uygulama aşamalarından da etkilendiği net olarak söylenebilir. İlave olarak korozyon, sülfat saldırısı ve alkali-silika reaksiyonu gibi dayanıklılıkla ilgili mekanizmalar betonarme yapıların dayanımını ve dayanıklılığını, dolayısıyla yapısal bütünlüğünü olumsuz etkiler.

Servis Verebilirlik

İnşaat mühendisliği ve yapı mühendisliğinde servis (hizmet) verebilirlik, bir yapının hala kullanışlı kabul edildiği koşulları ifade eder. Yani servis verebilirlik; bir yapının verimli kullanımını etkileyen performansın, kullanıcı bakış açısından değerlendirilmesi olarak tanımlanır. Estetik, deformasyon, aşırı titreşim, yangına dayanıklılık, su geçirmezlik gibi durumları içeren servis verebilirlik; geçici veya kalıcı olabilir. Bu sınır durumların aşılması halinde, yapısal olarak sağlam olabilen bir yapının yine de uygun olmadığı değerlendirilebilir. Yapıları kullanılamaz hale getiren, dayanım dışındaki koşulları ifade eder. Örneğin, bir gökdelen şiddetli bir şekilde sallanabilir ve içinde bulunan insanların bundan rahatsız olmasına neden olabilir (tıpkı deniz tutması gibi). Yapısal olarak sağlam olan bu yapı, insan yerleşimine uygun olmadığından dolayı servis verebilirlik sınırını aşmış olarak değerlendirilir. Daha yaygın bir örnek ise yüksek rutubete maruz kalan bodrum katlarıdır. Yapısal olarak dayanım açısından sorun yaşanmasa dahi bu tür ortamlar konforsuz ve sağlık açısından riskli değerlendirilebilir.

Yapısal çatlaklar gibi çok sayıda hizmet verebilirlik sorunu, dayanıklılık kaybına da neden olabilmektedir. Donma-çözülme nedeniyle tabaka atma/pullanma/dökülme (örneğin beton yolların dökülen yüzeyleri sürüş konforunu olumsuz etkiler) veya alkali-silika reaksiyonu nedeniyle oluşan çatlaklar, yapının artık işlevsel olmamasına veya sızıntılara (örneğin su tutma havuzları, savak kapakları, dolu savaklar) yol açabilmektedir. Bir dayanıklılık problemi nedeni ile hasar oluştuğunda başka hasar mekanizmaları da devreye girip yapının hasar görme hızı artabilir. Örneğin sülfat etkisi nedeni ile oluşan çatlama, donatı korozyonunun başlamasına dolayısıyla daha hızlı bir bozulma sürecine dönüşebilir. Uygunsuz drenaj gibi sorunlar hem dayanıklılığı hem de servis verebilirliği etkilemektedir.



Dayanıklılık

Şekil 2'de görülen MS 72 civarında inşa edilmiş Roma Kolezyumu yaklaşık iki bin yıllıktır. Bu yapının dayanıklılığı, yapısal tasarıma ve Roma çimentosu ile üretilen donatı içermeyen betona dayanmaktadır. Tasarımcıların ve inşaatçıların bu ikonik eseri bu kadar uzun süre dayanacak şekilde inşa etmeyi amaçlamış olmaları pek olası değil, ancak modern tasarım profesyonelleri ve inşaatçılar eski yapılardan neyin işe yarayıp neyin yaramadığını öğrenebilme imkanına sahiptir.



Şekil 2. Roma Kolezyumu

Günümüzde dayanıklılık, bir malzemenin veya yapının büyük bir onarım veya rehabilitasyona gerek kalmadan belirli bir süre boyunca hizmet ortamında servis verebilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Daha teknik bir ifade ile dayanıklılık; yapısal bir tasarımın korozyon, yorulma, sünme, çatlama, yangın, kimyasal bileşenler ve hava koşulları gibi çevresel faktörlerden kaynaklanan bozulmaya ve hasara karşı direnç gösterme yeteneğidir.

Dayanıklılık için zaman dilimini tanımlamak, yapıların bütçe veya çevre üzerindeki etkisini en aza indirecek şekilde başarıyla yönetilmeleri açısından kritik öneme sahiptir. Buna ek olarak, dayanıklılıkla ilgili tanımlar sıklıkla hem dayanımdan hem de servis verebilirlikten de bahseder. Çoğu zaman, birindeki eksiklik diğer ikisinde de eksikliğe yol açabilmektedir. Örneğin drenajı uygun olmayan bir saha zemininde:

1. Başlangıçta, bir saha betonu üzerindeki göllenme öncelikle bir hizmet verebilirlik sorunudur.
2. Bununla birlikte zamanla bu göllenme korozyona neden olabilir, derz dolgularının bozulmasını hızlandırabilir veya genişleme derzlerinde suyun birikmesine neden olabilir. Bunlar dayanıklılıkla ilgili sorunlardır.



3. Hızlandırılmış korozyon hem dayanıklılık hem de servis verebilirlik açısından endişe verici olan çatlamanın artmasına ve sonuçta dayanım kaybına neden olabilir.

Betonun dayanıklılığı; fiziksel ve kimyasal özellikler, servis ortamı ve tasarım ömrü gibi birçok faktöre bağlıdır. Şiddetli bir spesifik ortamda tatmin edici performans gösteren bir beton, başka bir çevresel etki ortamında düşük ya da orta dereceli olarak kabul edilen bir durumda zamanından önce bozulabilir. Örneğin yüksek derecede zararlı kimyasal ortama (XA3) maruz kalan bir yapının klorür etkisine ya da donma-çözülme etkisine de dirençli olması beklenmemelidir. Bu esas olarak çeşitli maruz kalma koşullarına betonun göstereceği direnç farkından kaynaklanmaktadır.

Fiziksel özellikler genelde agresif maddelerin betonun içine ve dışına hareketi açısından tartışılmaktadır. Kimyasal özellikler, hidrate olmuş çimentonun esas olarak kalsiyum silikat hidrat (C-S-H), kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) ve kalsiyum hidroksit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) olmak üzere hidratasyon ürünlerinin miktarına ve niteliğine atıfta bulunur. Nüfuz eden maddelerin bu hidratlarla reaksiyonları inert, yüksek oranda çözünür veya genleşebilen ürünler oluşturmaktadır. Kimyasal saldırının şiddetini belirleyen ise bu reaksiyon ürünlerinin doğasıdır. Betonda fiziksel hasar, kısıtlama altında genleşme veya büzülme nedeniyle (örneğin kuruma büzülme çatlama, donma-çözülme etkisi, döngüsel ıslanma ve kuruma) veya servis sırasında aşınma, erozyon veya yangına maruz kalma sonucu meydana gelebilir. Yüzey katmanı ve örtü bölgesi (pas payı) çevreden gelebilecek fiziksel ve kimyasal saldırılara karşı ilk savunma hattı görevi görmesi nedeniyle dayanıklılıkta çok önemli bir rol oynamaktadır.

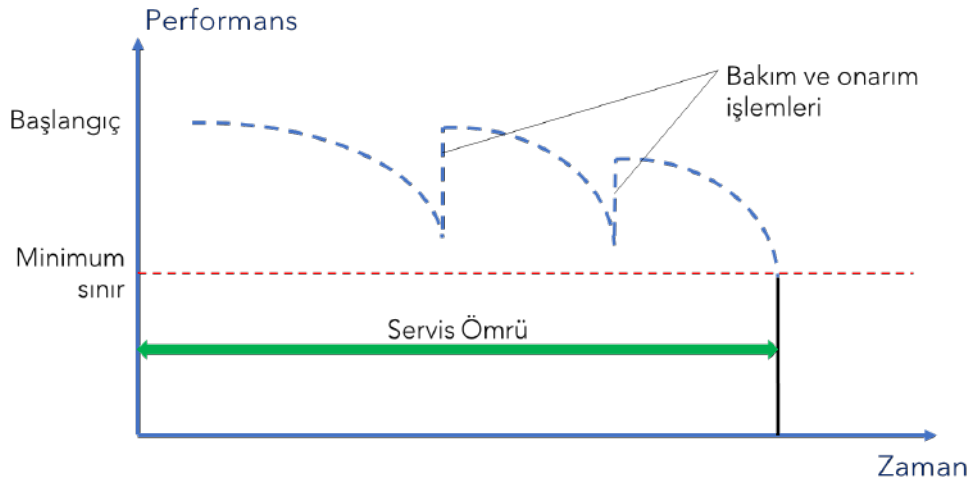
Yüksek dayanıklılık performansının ancak tasarım kriterleri, inşaat süreçleri ve bakımın birbiriyle bağlantılı olması durumunda elde edilebileceği yaygın bir kanıdır. Beton örtüsü, betonarme bir yapı içindeki çelik donatıları çevreleyen ve koruyan beton katmanının kalınlığını ve niteliğini ifade eder. Bu bağlamda beton örtüsü, donatı çeliğinin korozyona karşı korunmasında önemli bir rol oynamaktadır. Rutubet, yangın, kimyasallar ve diğer çevresel faktörler gibi dış etkenlere karşı bariyer görevi görerek çelik donatıyı korozyondan korur ve tüm sistemin yapısal bütünlüğünü sağlar. Bu nedenle bir betonarme yapının dayanıklılığı, uygun bir inşaat süreci ile garanti edilmesi gereken, çelik donatıları örten ve koruyan beton kalınlığı (pas payı) ile doğrudan ilişkilidir.

Dayanıklılık olmadan bir yapı, beklenen servis ömrü için dayanım ve hizmet verebilirlik gereksinimlerini asla karşılayamaz. Bu karşılıklı ilişkiler nedeniyle dayanıklılık bazen anlaşılması zor bir kavram olarak kabul edilir. Özet olarak "bir malzemenin veya yapının hava koşullarına, kimyasal saldırıya, aşınmaya ve diğer çevre koşullarına direnme ve belirli bir süre boyunca hizmet verilebilirliğini sürdürme yeteneği" olarak tanımlanır. Tanımlar belirli bir süre için minimum performans gerektirir ve bu da "tasarım servis ömrüne" eşdeğerdir.



Servis Ömrü Sonu

Yukarıda belirtilen uzun vadeli performans çerçevesi bağlamında servis ömrünün sonu, performansın bazı yönlerinin (örneğin dayanım, dayanıklılık, fonksiyonellik/estetik) bozulması ve azalması nedeniyle kabul edilebilir bir eşiğin altına düştüğü zaman olarak düşünülebilir. Bu durumda onarım maliyetleri çok yüksek kabul edilir. Basitçe söylemek gerekirse, servis ömrünün sonu, bir yapının artık istenen işlevi yerine getiremeyeceği ve müdahale önlemlerinin artık maliyet etkin olmayacağı zamandır. Şekil 3'te görüldüğü gibi yapıda zamanla performans azalmakta ve onarımlarla performans iyileştirilebilmektedir, ancak belli bir minimum performans değerinin altında teknik ve ekonomik olarak yapının servis ömrü sonuna gelmektedir.



Şekil 3. Servis ömrü ve yapı veya beton performansı ilişkisi

Dayanıklılık için servis ömrünün tanımlanması bağlamında, yeni yapılarla mevcut yapıların değerlendirilmesindeki farklılıktan kaynaklanan zorluklar bulunmaktadır. Genel görüş ister yeni ister mevcut olsun, tasarımda muhafazakâr bir yaklaşım benimseyerek servis ömrünü; hasarın veya kabul edilemez durumun ortaya çıkmasından önceki süre olarak tanımlamaktır. Ancak, durum değerlendirmesi yapılırken ve müdahale edilip edilmeyeceği belirlenirken, servis ömrünün tanımlandığı şey genellikle dayanıklılık performansının kendisinden ziyade dayanıklılık performansının dayanım ve servis veresibilirlik üzerindeki sonuçlarıdır. Bu durumlarda servis ömrünün sonunun belirlenmesi, tasarım sınır durumlarından ziyade kullanıcı tanımlı sınır durumlarına dayanır.

Servis ömrünün sonunu tanımlama zorluğunun belki de en iyi örneği, klorür tuzlarından ya da karbonatlaşmadan kaynaklanan korozyondur. Tasarımda hizmet ömrünün sonu, tasarım uzmanları tarafından, klorür konsantrasyonunun başlangıç eşiğini aştığı ve korozyonun başladığı nokta olarak kabul edilir ancak bu korozyon başlangıcının fiziksel hasar olarak kendisini göstermesi yıllar alabilmektedir. Ayrıca korozyonun, yapının artık yeterli dayanıklılığa sahip olmadığı veya servis veresibilirliğinin etkileneceği noktaya kadar



yayılmaması da yıllar sürebilir. Gerçekçi olmak gerekirse, hiçbir tasarım profesyoneli veya yapı sahibi, özellikle onarım önlemlerinin mümkün olduğu durumlarda, çelik arayüzüne kritik düzeyde klorür ulaştığında yapının servis ömrü sonuna geldiğini kesin olarak kabul etmez. Bu genellikle yeni yapıların ilk tasarımı sırasında benimsenen bir yaklaşımdır.

Servis ömrü sonunun doğrudan ele alınmasındaki diğer bir zorluk da kabul edilebilir eşik performansın öznel doğasından kaynaklanmaktadır. Klorür kaynaklı korozyona duyarlı betonarme eleman örneğine dönecek olursa, eğer korozyon başlangıcı servis ömrünün kesin olarak sonu değilse; kabul edilemez performans için birden fazla seçenek mevcut olmalıdır. Korozyona bağlı çatlama, potansiyel eşik sınır durumlarından biridir; ufalanmanın ortaya çıkışı ise alternatif bir sınır durumu olabilir çünkü dökülme potansiyel olarak güvensiz bir durum oluşturur. Sayısız seçenek ve bunların farklı yapılar üzerindeki etkileri nedeniyle limit durumu tanımlamak zordur.

Bakım ve onarımın servis ömrü süresine etkisi de yüksektir. Düzenli bakım, dayanıklılık kaybına bağlı bozulma oranını ve erken hasar veya hızlı bozulma riskini azaltır.

Tasarım Servis Ömrü

Servis ömrü sonu konseptleri, bir yapının artık kullanışlı olmadığı süreye veya yapının kritik bir eşığa ulaşana kadar geçen süreye odaklanır ancak iyi zamanlanmış beton bakım ve onarımları hizmet ömrünü uzatabileceğinden, bu kavramlar hizmet halindeki yapıların yönetilmesi açısından pratik olmayabilir. Bu nedenle "tasarım servis ömrü", "hedef tasarım servis ömrü" veya "çalışma servis ömrü" kavramı ortaya çıkmıştır. Bu kavram; AASHTO, ISO, EN, fib, ACI gibi küresel standartların da tercih ettiği bir terminolojidir. Kısaca "tasarım servis ömrü", ISO 16311-1'e göre "bir yapının veya elemanlarının, büyük bir onarım gerektirmeden, belirlenen amaç için kullanılacağı, yapının tasarımında belirtilen süre"dir. Tablo 1'de EN 1990 -Eurocode Yapı Tasarım Esasları Standardına göre çeşitli yapı tiplerinin en az tasarım servis ömrü belirtilmektedir.

Tablo 1. Tasarım kategorisine göre belirlenen tasarım servis ömrü ve örnekleri

Tasarım Kategorisi	En az tasarım servis ömrü (yıl)	Örnekler
1	10	Geçici yapılar
2	10-25	Değiştirilebilir yapı kısımları, örnek olarak; kren kirişleri, mesnetler
3	15-30	Zirai yapılar ve benzerleri
4	50	Binalar ve diğer yaygın yapılar
5	100	Anıt yapılar, köprüler ve inşaat mühendisliği alanına giren diğer yapılar



Tasarım uzmanları için daha önemli olan husus; yapının dayanıklılığını, ilk onarımların ne zaman yapılması gerektiğini ve tasarımın servis ömrüne ulaşmak için hangi bakımların gerekli olduğunu açıklayan bir öngörüye sahip olmaktır. Tasarım servis ömrü kavramı aynı zamanda bir tasarım profesyonelinin, tasarım servis ömrü karşılandığında veya önceden tanımlanmış diğer kriterler karşılandığında sorumluluğunu potansiyel olarak sınırlamasına da olanak tanır.

Betonda ve betonarme yapılarda bozulmanın iki aşaması aşağıdaki gibidir:

1. Başlangıç aşaması: Bu aşamada malzemede gözle görülür bir zayıflama veya yapının işlevinde bir azalma meydana gelmez ancak koruyucu bariyerin bir kısmı agresif ortam tarafından kırılır veya aşılır. Karbonatlaşma, klorür migrasyonu ve sülfat atağı başlangıç periyodunun süresini belirleyen mekanizmalara örnektir.

2. Yayılma aşaması. Bu aşamada aktif bir bozulma meydana gelir ve fonksiyon kaybı oluşur. Zamanla artan oranda bir takım bozulma mekanizmaları gelişir. Donatı korozyonu, bozulmanın yayılmasına önemli bir örnektir.

Betonarme yapılar; beton ve çelik donatı olmak üzere iki malzemeden oluştuğundan, betonun bozulması ile donatının korozyonu arasında ayırım yapmak gerekmektedir. Betonarme yapıların bozulması; mekanik, kimyasal, fiziksel ve elektrokimyasal mekanizmaları içermektedir. Tablo 2’de TS EN 1504-9’a göre beton ve donatıda yaygın olarak görülen bozulmaların nedenleri gösterilmektedir.

Tablo 2. Yaygın olarak bilinen bozulma nedenleri

Beton	Donatı Korozyonu
<p>1. Mekanik</p> <ul style="list-style-type: none">○ Aşınma○ Yorulma○ Darbe○ Aşırı yükleme○ Hareket (oturma gibi)○ Patlama○ Titreşim <p>2. Kimyasal</p> <ul style="list-style-type: none">○ Alkali-agrega reaksiyonu (ASR ve ACR)○ Zararlı maddeler (sülfatlar, GEO, tuzlar, yumuşak su gibi)○ Biyolojik etki <p>3. Fiziksel</p> <ul style="list-style-type: none">○ Donma-çözülme○ Isıl tesirler○ Tuz kristalleşmesi○ Büzülme○ Malzeme kaybı○ Yangın	<p>1. Karbonatlaşma</p> <p>2. Korozif kirleticiler</p> <ul style="list-style-type: none">○ Deniz suyu○ Yollara serpilen tuz○ Beton bileşenlerinden gelen tuz○ Diğer kirleticiler <p>3. Kaçak akımlar</p>

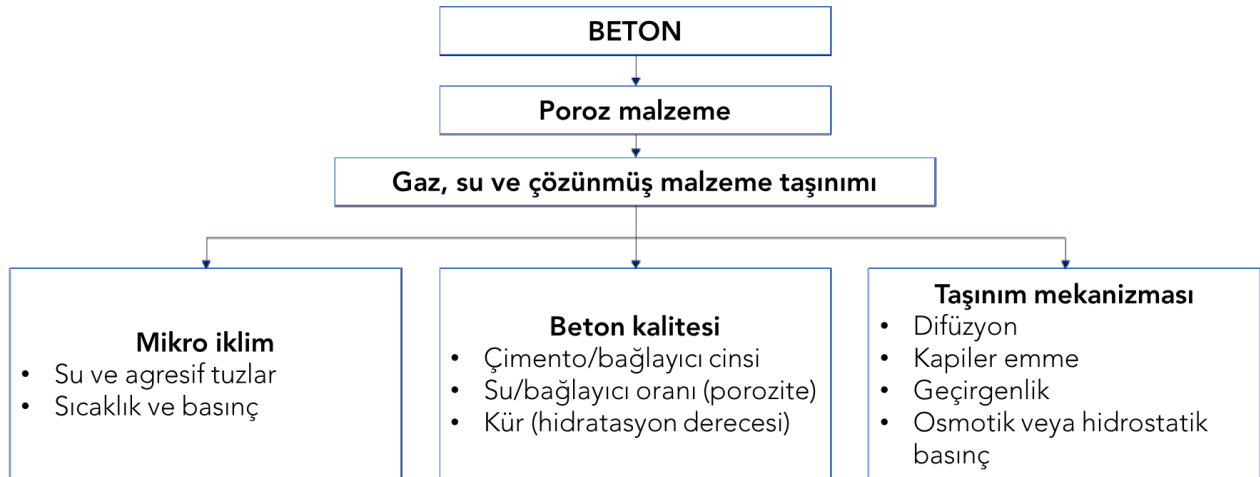


Betonarme bir yapının dayanıklılığını belirleyen, çevre ile etkileşime girdiğinde her malzemenin bozulma mekanizmaları arasındaki olası etkileşimdir. Önemli olan her bir malzemenin potansiyel dayanıklılığından ziyade yapının bulunduğu ortamdaki performansı ve dayanıklılığıdır.

2. BETON GEÇİRİMLİLİĞİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Beton doğası gereği poroz yani gözenekli bir yapıdadır. Betonun dayanıklılığının bazı yönleri, agresif maddelerin belirli formlarının nüfuz etmesini içermektedir. Dolayısıyla betonun dayanıklılığı çoğunlukla geçirgenliği ve/veya ajan difüzyonuyla ilişkilidir. Şekil 4'te beton dayanıklılığının genel çerçevesi görülmektedir. Yetersiz dayanıklılık, dış ve/veya iç etkenlerden kaynaklanabilmektedir. Sıvıların ve gazların gözenekli ortamda hareket etme kabiliyeti öncelikle mikro iklim parametreleri (agresif maddeler, sıcaklık ve basınç vb.), beton kalitesi ve taşınım mekanizmaları tarafından yönetilmektedir.

Betonun geçirgenliğini etkileyen kendine özgü özellikleri; sertleşmiş çimento harcının gözenekliliği, gözeneklerin göreceli boyutu ve süreklilik derecesidir. Daha yüksek su/çimento oranı; gözenek hacminde, dolayısıyla geçirgenlikte bir artışa neden olmaktadır.



Şekil 4. Beton dayanıklılığının genel çerçevesi

Geçirimlilik

Geçirimlilik ya da geçirgenlik hem sıvı hem de gaz akışkanların betonun içine girme veya beton içerisinde hareket etme kolaylığını tanımlar. Betonun dayanıklılığı ile ilgili üç akışkan vardır. Bunlar su, karbondioksit ve oksijendir. Su hem saf (kirlenmemiş) haliyle hem de klorürler ve sülfatlar gibi agresif iyonlarla kirlenmişse bile zararlı olabilir.



Beton, sertleşmiş çimento hamurunun mikro yapısı tarafından kontrol edilen geçirgenlik özelliklerine sahip gözenekli bir ortamdır. Bu da kullanılan bağlayıcı malzemeler (çimento ve mineral katkıları), su/bağlayıcı oranı, çimento hamuru hacmi, kür ve sıkıştırma derecesi tarafından belirlenir. Çimento hamuru içindeki geçiş bölgesinin, yani çimento hamuru ile agrega arasındaki ara yüzeyin, çimento hamurunun kütlesinden daha gözenekli olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla bu geçiş bölgesinin mikro yapısı betonun geçirimsizliğinde oldukça kritiktir. Akışkanların beton içerisinde hareket kolaylığı söz konusu olduğunda üç taşıma mekanizması anlaşılmalıdır. Bunlar 1) geçirgenlik, 2) difüzyon ve 3) sorpsiyondur.

Geçirimsizlik, suyun beton içinden basınç farkı altında akışını ifade eder. Akış hızı, gözenekli bir ortamda laminer akış için Darcy yasasını takip eder. Çimento hamurundaki basınç gradyanına ve birbirine bağlı gözeneklerin boyutuna bağlıdır. Akışın gerçekleşmesi için betonun, ilgili gözeneklerin sürekli ve 120 nm'den büyük olduğu doymuş koşullarda olması gerekmektedir. Niceliksel olarak bu özellik, genellikle saniyede metre (m/s) cinsinden ifade edilen geçirimsizlik katsayısı ile gösterilmektedir. Geçirimsizlik; su ile sürekli temas halinde olan barajlar, temeller ve yeraltı yapıları gibi yapıların dayanıklılığının ve servis verilebilirliğinin değerlendirilmesinde ölçülmesi gereken önemli bir özelliktir.

Difüzyon, gazların (örneğin karbondioksit veya oksijen) veya çözültideki iyonların (örneğin klorürler) konsantrasyon farkı altında betona nüfuz ettiği süreçtir. Bu süreç, Fick yasasıyla açıklanmaktadır. Difüzyon ve difüzyon katsayısı (m^2/s) genellikle akışkanların betona nüfuz etme hızını belirtmek için kullanılmaktadır. Konsantrasyon gradyanı ve kılcal gözeneklerin boyutlarına ek olarak difüzyon hızı, nüfuz eden akışkanların türünden ve betonun kimyasal özelliklerinden etkilenmektedir. Doymuş betonda gazların difüzyonu çok yavaştır ve bu nedenle betonun kısmen kuru olduğu binalar ve köprüler gibi yer üstü yapılarda betonla ilgili bir özelliktir. Batık veya yeraltı yapılarının dayanıklılığı için klorür ve sülfat iyonlarının difüzyonu dikkate alınmalıdır.

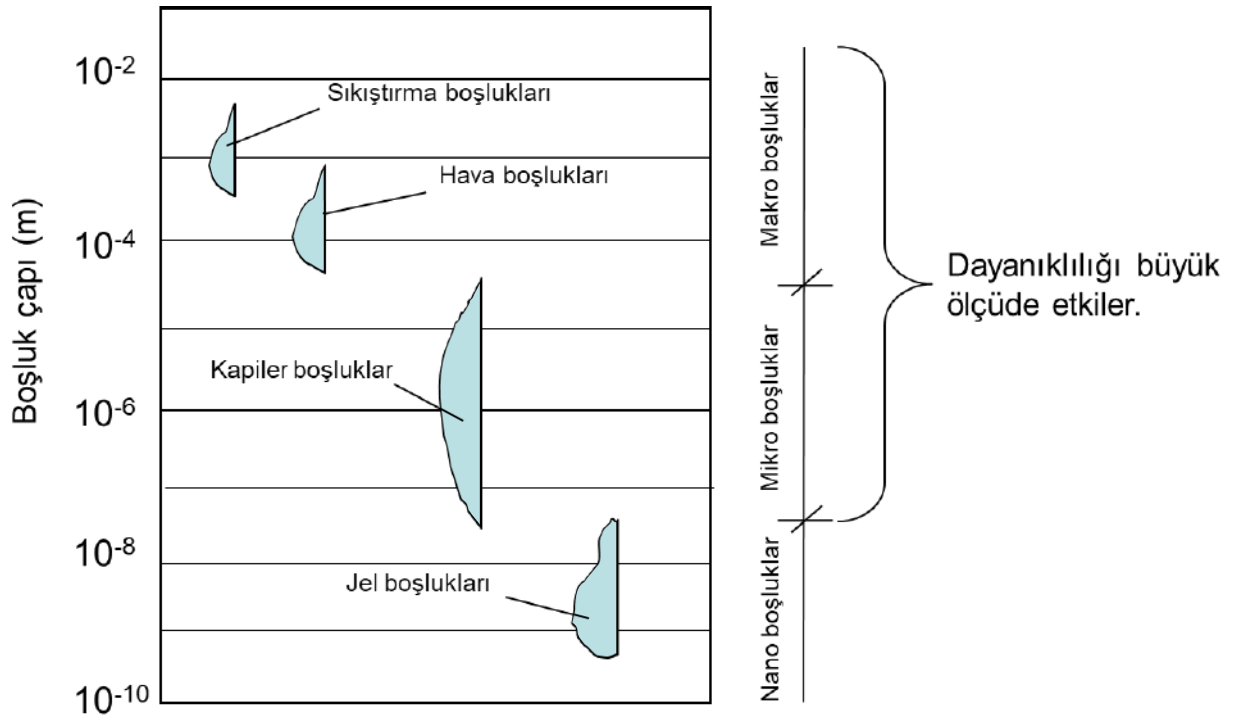
Sorpsiyon (emme), ortam koşulları altında sertleşmiş çimento hamurunun gözeneklerindeki sıvıların kılcal hareketinin bir sonucudur. Kılcal emmenin kuru veya kısmen kuru betonda meydana geldiği unutulmamalıdır. Bu durum, pratikte yer üstü yapılarında sıklıkla karşılaşılan bir durumdur. Sorpsiyon, özellikle rüzgarla taşınan klorür tuzlarının beton yüzeylerde çöklediği kıyı yapılarında görülmektedir. Yağmurla ıslandığında, klorür iyonlarını taşıyan su beton tarafından emilir. Sıvıların, özellikle suyun beton tarafından emilme hızı genellikle $m/s^{0.5}$ cinsinden ifade edilir. Bu parametre büyük ölçüde betonun başlangıç nem içeriğine ve kullanılan test yöntemine bağlıdır. Uygulamada düşük geçirgenlik özelliklerine sahip iyi kalitede beton elde etmek için düşük su/bağlayıcı oranına sahip, yeterli kürleme ve uygun sıkıştırmaya sahip beton tercih edilmelidir.



Geçirgenlik özelliklerini test ederken, söz konusu yapının tipini ve hizmet ortamını tanımak veya ileride karşılaşılabilecek olası durumları öngörmek önemlidir. Bu, taşınım mekanizmasının ve ölçülecek uygun geçirgenlik özelliğinin tanımlanmasına yardımcı olmaktadır.

Daha önce değinildiği gibi, betonarme yapıların dayanıklılığını etkileyen bozulma eylemlerinin çoğu (içsel etkiler hariç karbonatlaşma, klorür ve sülfat girişi, kimyasal saldırı ve hatta donma), agresif maddelerin çevreden betona nüfuz etmesiyle ilgilidir. Bu nüfuziyetin gerçekleştiği mekanizmalar geçirgenlik (kılcal emmeyi içerir) ve difüzyondur. Mekanizma ne olursa olsun açık ve bağlantılı gözenek yapısına sahip (yani daha fazla ve daha büyük gözeneklere sahip) veya mikro çatlaklara sahip bir beton, daha sıkı gözenek yapısına sahip bir betona göre daha yüksek oranda bozulmaktadır.

Şekil 5'te çimento hamurunda (matris) bulunan boşluklar türleri ve büyüklükleri belirtilmektedir. Kapiler boşluklar ve hava/sıkıştırma boşlukları betonun dayanıklılığını önemli ölçüde etkilemektedir.

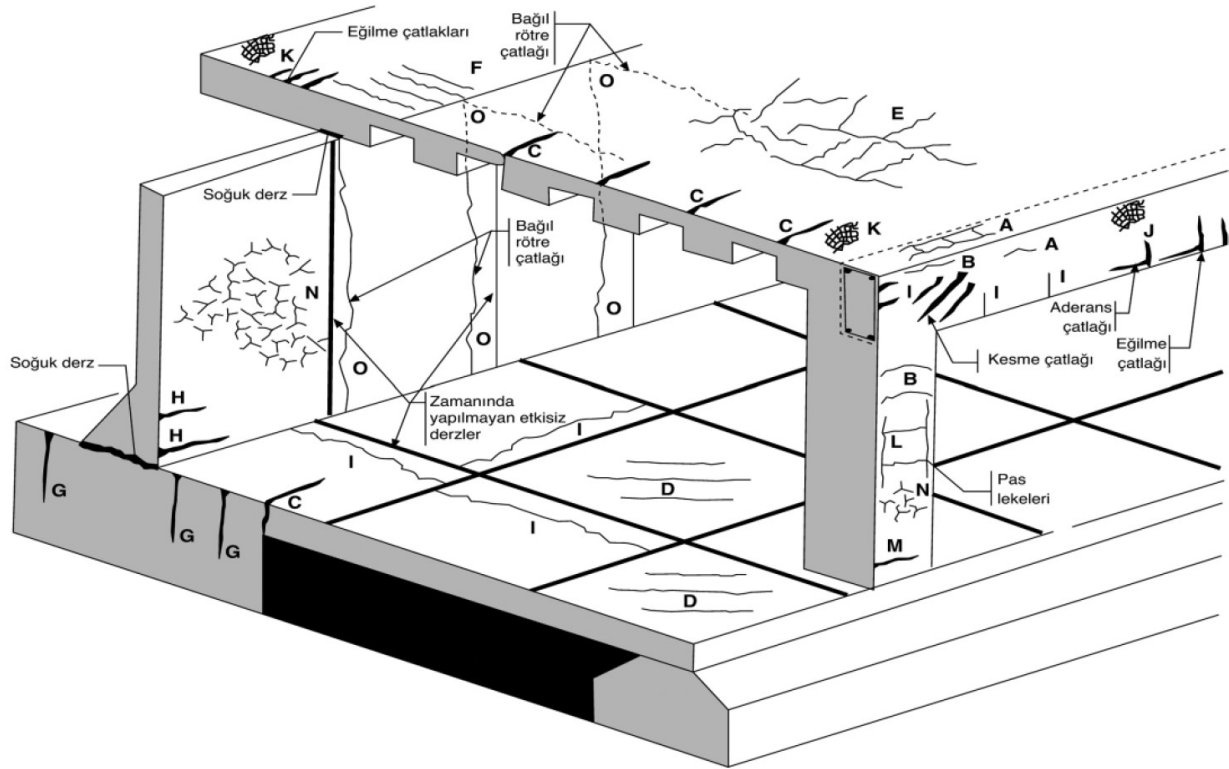


Şekil 5. Çimento hamuru harç ve betondaki boşlukların türleri ve büyüklükleri



3. BETON ÇATLAKLARI

Beton çatlakları; dayanım, servis veresibilirlik ve dayanıklılık ile doğrudan ilişkilidir. Bu ilişki neden – sonuç olarak çift taraflıdır. Örneğin yeterli kür işlemine tabi tutulmayan ve uygun malzeme tasarımına sahip olmayan bir saha betonunda oluşan erken yaş çatlakları ya da daha sonra meydana gelen rötre çatlakları yapının çevresel etkilere karşı dayanıklılığını azaltır ve bunun sonucunda daha şiddetli yapısal hasarlar meydana gelebilir ve farklı çatlaklar oluşabilir. Bu durumda hem dayanım hem dayanıklılık hem de servis veresibilirlik olumsuz etkilenir. Bu nedenle çatlak oluşumunu engelleyecek önlemler proje ve uygulama aşamasında dikkate alınmalıdır. Çatlak oluşumu beton ve beton bileşenlerinin özelliklerine, uygulamaya, yapının servis ortamına ve yapının maruz kalacağı çevresel koşullara bağlıdır. Şekil 6’da bir yapıda görülebilecek çatlak türleri belirtilmektedir.



Şekil 6. Yapıda görülebilecek çatlak türleri

Şekil 6’da belirtilen çatlak türlerinin nedenleri, görülme zamanları, en sık görüldüğü bölgeler ve alınacak önlemler Tablo 3 ve Tablo 4’te detaylıca belirtilmektedir.



Tablo 3. Taze veya sertleşmiş betonda görülen çatlak tiplerinin sınıflandırılması

Çatlak Tipi	Şekil konumu	Alt grupları	En sık rastlanan bölgeler	Ana neden (kısıtlamalar dışında)	İkincil nedenler / faktörler	Önlemler
Plastik Oturma	A	Donatı üstü	Derin kesitler	Aşırı terleme	Erken yaşlarda hızlı kuruma koşulları	Terlemenin azaltılması veya yeniden sıkıştırma
	B	Üst bölgeler (Kemer)	Kolon üstleri			
	C	Farklı derinlikteki kesitler	Asmolen, Mantar döşemeler			
Plastik Rötne (büzülme)	D	Diagonal	Yollar, döşemeler	Erken yaşlarda hızlı kuruma	Düşük miktarda terleme	Erken kür koşullarının iyileştirilmesi
	E	Rastgele	Betonarme döşemeler			
	F	Donatı üstü	Betonarme döşemeler	Erken yaşlarda hızlı kuruma, yüzeye yakın donatı		
Erken Termal Büzülme	G	Dış kısıtlama	Kalın duvarlar	Aşırı ısı oluşumu	Hızlı soğuma	Sıcaklık kontrolü yapılması Düşük hidratasyon ısısı Yalıtım yapılması
	H	İç kısıtlama	Kalın döşemeler	Aşırı sıcaklık farklılıkları		
Uzun Dönemli Kuruma Büzülmesi	I		İnce döşeme veya duvarlar	Yetersiz derzler	Aşırı büzülme, yetersiz kür	Su miktarının azaltılması Kür koşullarının düzeltilmesi
Kabuk Şeklinde Soyulma	J	Kalıp yüzeyi	Pürüzsüz görümlü beton	Geçirgen olmayan kalıp	Zengin karışımlar (yüksek çimento dozajı), kötü kür	Kür koşulları ve perdah işlemlerinin düzeltilmesi
	K	Akışkan beton	Döşemeler	Aşırı perdah		
Donatı Korozyonu	L	Doğal	Kolon ve kirişler	Pas payı yetersizliği	Düşük kaliteli beton	Nedenlerin oradan kaldırılması Aktif ve pasif önlemler alınması
	M	Kalsiyum klorür	Prefabrik beton	Aşırı kalsiyum klorür		
Alkali-Agrega Reaksiyonu	N		Nemli bölgeler	Reaktif agrega ve yüksek alkali içeren çimento kullanımı		Nedenlerin oradan kaldırılması

Tablo 4. Beton çatlaklarının görülme zamanı

ÇATLAK TÜRLERİ	ZAMAN						
	dakika	saatler	günler	haftalar	aylar	yıllar	
Plastik oturma çatlakları							
Plastik rötne çatlakları							
Termal çatlaklar							
Kuruma rötresi çatlakları							
Aşırı yükleme kaynaklı							
Korozyon çatlakları							
ASR ve ACR çatlakları							

Şekil 7'de betonun sertleşmesinden önce ve sonra meydana gelen çatlakların ana nedenleri ve mikro-makro düzeyleri detaylı bir şekilde izah edilmektedir.



Şekil 7. Beton çatlaklarının türü ve nedenleri



4. TS EN 206'YA GÖRE ÇEVRESEL ETKİ SINIFLARI

Bir yapının imalatından sonra servis ömrü boyunca beton performansını etkileyecek en önemli parametre çevresel etkilerdir. Bu nedenle tasarımcı ve şartname hazırlayıcı, yapıya tesir eden çevresel etki sınıfını/sınıflarını tespit etmek ve tasarımını bu kapsamda yapmak zorundadır.

2018 yılında Resmî Gazetede yayımlanan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, betonarme projelerinde (çizim paftalarında) beton dayanım sınıfı ve donatı sınıfı ile birlikte TS EN 206'ya uygun çevresel etki sınıfının belirtilmesini zorunlu hâle getirmiştir. TS EN 206 ve bu standardın ulusal eki olan TS 13515, betonun çevresel etki sınıflarını ve bu sınıflara göre betonun gerekliliklerini belirtmektedir. Yapının türü, işlevi, servis ömrü, maruz kalacağı çevresel koşullar beton tasarımını belirlemektedir.

Bir yapı birden fazla çevresel etkiye maruz kalabilir. Literatürde bu duruma kombine etki denilmektedir. Örneğin hem sülfat hem de klorür tuzlarına maruz kalacak bir yapıda kombine etkiye göre beton tasarımı yapılmalıdır. Bazı durumlarda etkilere ait ayrı çözümler birbiri ile uyumsuz olabilmektedir. Bu nedenle her kriteri sağlayacak bütüncül bir tasarım ilkesi benimsenmelidir.

Birçok ulusal ve uluslararası standart betonun farklı çevresel koşullara direnci için çeşitli tasarım parametrelerini sınırlamaktadır. Genel olarak bunlar:

- En az çimento (bağlayıcı) içeriği,
- En büyük su/bağlayıcı oranı,
- En düşük basınç dayanım sınıfıdır.

Ayrıca yapı ve servis koşullarına göre pas payı kalınlığı, bazı durumlarda en düşük hava içeriği ve kullanılacak özel çimento türü de kritik parametreler olarak belirlenebilmektedir.

Tablo 5'te TS EN 206 ve TS 13515 Standartlarında yer alan beton bileşimi ve özellikleri için tavsiye edilen sınır değerler görülmektedir. Farklı çevresel etki kategorileri için en yüksek su/çimento oranı, en düşük dayanım sınıfı, en düşük çimento içeriği, en düşük hava içeriği ve diğer gerekler belirtilmiştir. Burada dikkat edilmesi gereken bir husus en düşük su/çimento oranı ve çimento içeriği hesaplamasında çimento ile birlikte uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi mineral katkıların da hesaba katılmasıdır. Bu malzemeler standartta belirtilen eş değerlik katsayıları ile çimento eş değerine dönüştürülmekte ve Portland çimentosu miktarına ilave edilmektedir.



Tablo 5. TS EN 206 - Beton bileşimi ve özellikleri için tavsiye edilen sınır değerler

Çevresel Etki Sınıfları		En yüksek su/çimento oranı ^c	En düşük dayanım sınıfı	En düşük çimento içeriği ^c (kg/m ³)	En düşük hava içeriği (%)	Diğer Gerekliler
Korozyon veya zararlı etki tehlikesi yok	X0	-	C12/15	-	-	-
Karbonatlaşma nedeniyle korozyon	XC1	0,65	C20/25	260	-	-
	XC2	0,60	C25/30	280	-	-
	XC3	0,55	C30/37	280	-	-
	XC4	0,50	C30/37	300	-	-
Klorürün sebep olduğu korozyon (deniz suyu)	XS1	0,50	C30/37	300	-	-
	XS2	0,45	C35/45	320	-	-
	XS3	0,45	C35/45	340	-	-
Klorürün sebep olduğu korozyon (deniz suyu dışında klorür etkisi)	XD1	0,55	C30/37	300	-	-
	XD2	0,55	C30/37	300	-	-
	XD3	0,45	C35/45	320	-	-
Donma/çözülme etkisi	XF1	0,55	C30/37	300	-	EN 12620'ye uygun, yeterli donma/çözülme dayanıklılığına sahip agrega
	XF2	0,55	C25/30	300	4 ^a	
	XF3	0,50	C30/37	320	4 ^a	
	XF4	0,45	C30/37	340	4 ^a	
Zararlı kimyasal ortamlar	XA1	0,55	C30/37	300	-	Sülfata dayanıklı çimento ^b
	XA2	0,50	C30/37	320	-	
	XA3	0,45	C35/45	360	-	
Aşınma	XM1	0,55	C30/37	300	-	-
	XM2	0,55	C30/37	300	-	Beton yüzeyine İşlem uygulanır ^d
	XM3	0,45	C35/45	320	-	Sert agrega kullanılır

a) Hava sürüklenmemiş betonun performansı, ilgili etki sınıfı için donma/çözülme etkisine dayanıklılığı kanıtlanmış betonla karşılaştırılarak, uygun deney yöntemine göre yapılacak deneyle belirlenmelidir.

b) Ortamda bulunan sülfat miktarının XA2 ve XA3 çevre etki sınıfına işaret etmesi durumunda, EN 197-1'e veya tamamlayıcı ulusal standartlara uygun sülfata dayanıklı çimento kullanılması gereklidir.

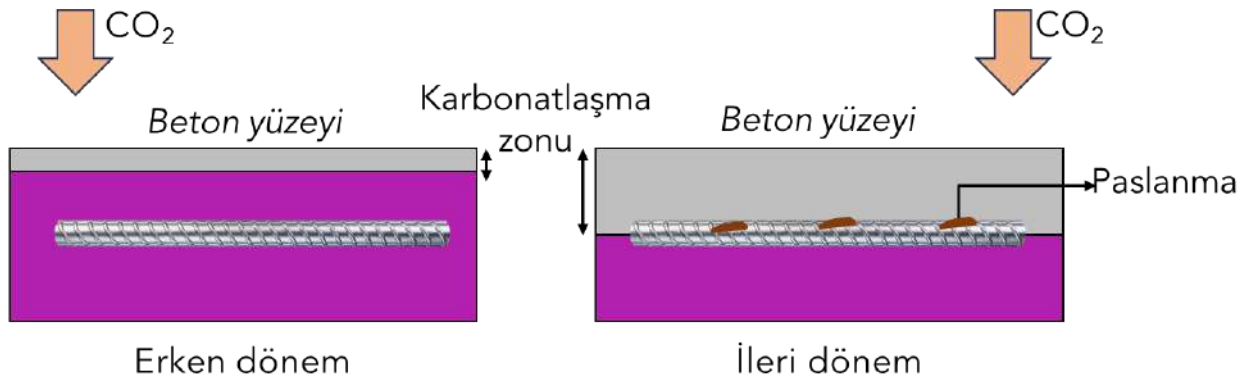
c) k-değeri kavramının uygulanması durumunda, en yüksek su/çimento (w/c) oranı ve en düşük çimento içeriği Madde 5.2.5.2'ye uygun olarak değiştirilir. En düşük çimento içeriği, çimento ve standartta belirtilen k-değeri ile eşdeğer çimentoya dönüştürülmüş mineral katkıların toplam miktarını ifade etmektedir. Örneğin, 280 kg CEM I 42.5 çimentosu ve 50 kg uçucu kül içeren karışımın eş değer çimento içeriği 300 kg'dır. İlgili çevresel etki sınıfına ait en düşük çimento içeriği kontrol edilirken 300 kg'a göre değerlendirme yapılır.

d) Yüzeydeki terleme suyunun vakumla çekilmesi ve yüzeyin helikopterle sıkıştırılarak düzeltilmesi gibi



5. KARBONATLAŞMA ETKİSİ

Karbonatlaşma, havadaki karbondioksit gazının (CO₂) betona nüfuz ederek gözenek çözeltisinde çözüldüğü ve daha sonra hidroksitlerle reaksiyona girerek bunları karbonatlara dönüştürdüğü bir mekanizmadır. Bu mekanizma sonucunda betonun pH değeri 9'dan daha düşük bir değere kadar düşebilmektedir. Bilindiği üzere herhangi bir etkiye maruz kalmamış betonun pH değeri yaklaşık 12-13'tür ve bu değer çelik donatının korunmasında (pasivasyon) kritik bir rol taşımaktadır. Gözenek çözeltisinin pH değerinin 11'e düşmesi çelikte pasivasyonun bozulmasına neden olabilmektedir. Bunun sonucunda da Şekil 8'de görüldüğü gibi çelik donatıda zamanla paslanma (korozyon) meydana gelmektedir.



Şekil 8. Betonda karbonatlaşma

Karbonatlaşma beton yüzeyinden başlayarak aşağıdaki denklemde görüleceği gibi zamanın (t) karekökü ile orantılı derinliğe kadar devam eder.

$$d = C\sqrt{t}$$

Burada, mm/ $\sqrt{\text{yıl}}$ birimi ile kullanılan C karbonatlaşma katsayısı veya karbonatlaşma hızı olarak anılmaktadır. Örneğin, C= 3 mm/ $\sqrt{\text{yıl}}$ ve t = 25 yıl ise karbonatlaşma derinliği 15 mm olmaktadır.

Uygulamada karbonatlaşma derinliği, fenolftalein indikatör çözeltisinin yeni kırılmış beton numunesine püskürtülmesiyle belirlenmektedir. Bu renksiz çözelti, yaklaşık 8,5'in üzerindeki pH değerlerinde pembemsi mora dönmekte (timolftalein kullanılması durumunda pH>9,5 ise renk değişimi), bu da betonun karbonatlaşmamış olduğunu göstermektedir.

Karbonatlaşma oranı büyük ölçüde neme, yani açıkta kalan beton elemanın makro ve mikro iklim koşullarına bağlıdır. Betonun karbonatlaşmasının %40 ila %70 arasındaki bağıl nemde en yüksek olduğu bilinmektedir ancak kuru koşullarda (<%25 bağıl nem), reaksiyonu teşvik edecek suyun yetersiz olması nedeniyle ihmal edilebilir düzeydedir.



Çimento hamurunun gözeneklerindeki su; difüzyonu engellediğinden, yüksek nemde (>%90 bağıl nem) karbonatlaşma ihmal edilebilir düzeydedir. Tropikal ortamlarla karşılaştırıldığında, ılıman iklime maruz kalan betonun karbonatlaşma oranının daha yüksek olması beklenmektedir. Uygulamada, bina cepheleri gibi dikey yüzeyler, çatı döşemelerinin ve balkonların üst yüzeyleri gibi yatay olarak açıkta kalan yüzeylere göre daha hızlı karbonatlaşır, çünkü yatay yüzeyler daha yüksek frekansa ve daha uzun ıslanma süresine sahiptir.

Yüksek sıcaklık karbonatlaşma hızını ve oranını artırmaktadır, ancak bu etki betonun nem içeriğiyle karşılaştırıldığında daha az önemlidir. Karbondioksit içeriği başka bir etkileyici faktördür. Kırsal alanlarda havadaki karbondioksit içeriği hacimce yaklaşık %0,03'tür, ancak şehirlerde konsantrasyon çok daha yüksektir ve yoğun nüfuslu bölgelerde %0,3 mertebesinde olabilmektedir. Araçlara yönelik tünellerde konsantrasyon %1'e ulaşabilmekte ve çok hızlı bir karbonatlaşma oranı elde edilebilmektedir.

Tablo 6. Karbonatlaşma hızını etkileyen faktörler

Faktör	Karbonatlaşma Hızı
S/Ç oranı ↑ (boşluk miktarı ↑)	↑
Kür süresi ↑	↓
Çimento miktarı ↑	↓
Betonun kuruması ↑	↓
Suya doygunluk ↑	↓
Bağıl nem ↑	↓↑
CO ₂ konsantrasyonu ↑	↑
Alkali içeriği ↑	↑
Yüksek sıcaklık ↑	↑
Aşırı yüksek sıcaklık ↑	↓

Karbonatlaşmanın tek başına betonun bozulmasına neden olmadığı unutulmamalıdır. Aslında orijinal yani karbonatlaşmaya maruz kalmamış betonla karşılaştırıldığında; karbonatlı elemanlar, kalsiyum karbonat oluşumu ve bunun sonucunda betonun gözenekliliğinde azalma nedeniyle bir miktar daha yüksek basınç dayanımına ve gelişmiş geçirgenlik geçirimsizlik özelliklerine sahip olma eğilimindedir. Bu reaksiyon ürünü sızıntı yapmadığı ve genleşmediği için betonun dayanıklılığına zarar vermez. Karbonatlaşma, çatı kiremitleri ve duvar blokları gibi takviyesiz donatısız beton elemanlar için sorun teşkil etmez.



Karbonatlaşma sadece korozyon başlangıç aşamasının süresini etkiler. İç yapı elemanlarında korozyonu başlatacak yeterli nemin bulunmaması nedeniyle, karbonatlaşma önemli düzeyde olsa bile beton dayanıklı kalır. Hava koşullarına maruz kalan dış elemanlar da ise karbonatlaşma korozyonu tetiklemektedir. Bu nedenle betonun kalitesi yani geçirimsizliği ve pas payı kalınlığı korozyonun başlama süresini kontrol etmekte önemlidir. Normal uygulamada ve tipik sıradan beton için, beton kaplamanın karbonatlaşması yaklaşık 20 yıl veya daha fazla sürebilmektedir. Yüksek çimentolu malzeme içeriğine sahip, düşük su/bağlayıcı oranında (<0,4) ve düşük geçirgenlik özelliklerine sahip beton için karbonatlaşmanın kritik olmadığı söylenebilir; çünkü yüksek kalitedeki betonda karbonatlaşma son derece yavaştır.

KARBONATLAŞMA ÖZET BİLGİ	
Karbonatlaşmanın nedenleri	Karbonatlaşma doğal bir süreçtir ve yapılar proje aşamasında hizmet verdikleri ortamdaki karbonatlaşma koşullarına göre tasarlanır. Orta düzeyde rutubet, betonun geçirimli olması, yüksek alkali içeriği karbonatlaşmayı hızlandırır.
Karbonatlaşmanın zararları	Betonun pH değerini düşürerek donatı pasivasyonunu bozması ve sonucunda çelik donatının korozyona uğrayarak yapısal bütünlüğün bozulması
Beton tasarımında dikkat edilmesi gerekenler	TS EN 206 ve TS 13515'teki çevresel etki koşulları dikkate alınarak uygun çevresel etki sınıfı belirlenmelidir. Betonun su/bağlayıcı oranı düşük olmalıdır. Bu sayede betonun geçirimsizliği artar. Fazla miktarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları kullanılmamalıdır.
Uygulama esnasında dikkat edilmesi gerekenler	Karbonatlaşma derinliği, zamana ve karbonatlaşma katsayısına bağlı bir prosestir. Karbonatlaşma esas olarak beton için değil, çelik donatı için olumsuz bir durumdur. Bu nedenle çelik donatıyı koruyan beton örtüsü (pas payı) kalınlığı doğru bir şekilde belirlenmeli ve uygulamada buna dikkat edilmelidir. Beton örtüsünün kalınlığı kadar bu örtüyü oluşturan betonun homojen ve ayrışmamış bir şekilde yerleştirilmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle uygulama esnasında betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve kürüne son derece dikkat edilmelidir.
Kimyasal katkıların etkisi	Süperakışkanlaştırıcı beton kimyasal katkıları betonun su/bağlayıcı oranını azaltarak daha geçirimsiz bir yapı oluşmasını sağlar. Ayrıca betonun işlenebilirliğini artırarak daha kolay yerleşmesine ve sıkışmasına neden olurlar. Kimyasal kür malzemeleri ise betonun rötre çatlaklarını engelleyerek/azaltarak betona çatlaklardan sıvı ve gaz akışını azaltır. Kalıp ayırıcı yağlar da daha iyi ve gözeneksiz beton yüzeylerinin elde edilmesine katkı sağlar. Su yalıtım (geçirimsizlik) katkıları ile de betonun geçirimsizlik özelliği iyileştirilebilir.



6. KLORÜR ATAĞI

Deniz suyunda, yer altı suyunda veya buz çözücü tuzlarda bulunan çözünebilir klorür iyonları; kılcal emilim veya difüzyon yoluyla betona nüfuz edebilmektedir. Klorürler ayrıca çimento, kimyasal katkı, agregata, mineral katkı veya karışım suyu gibi beton bileşenlerinde de mevcut olabilmektedir. Donatısız yalın beton için zararsız olsa da betonarmede klorür varlığı çok önemli bir durumdur ve betonun kalitesine ve maruz kaldığı ortama bağlı olarak çelik donatı korozyonunun başlama süresini doğrudan etkilemektedir.

Korozyondan, doğrudan toplam klorür içeriği sorumlu değildir. Klorürlerin bir kısmı, genellikle Friedel tuzu olarak adlandırılan kalsiyum kloroalüminatı ($C_3A \cdot CaCl_2 \cdot H_{10}$) oluşturmak üzere C_3A ile reaksiyona girerek hidrate çimento hamuruna kimyasal olarak bağlanabilmektedir. Klorürlerin başka bir kısmı ise fiziksel olarak bağlanarak jel gözeneklerinin yüzeyinde adsorbe edilir. Geriye kalan kısım ise çelik korozyonunun başlamasından sorumlu olan serbest klorürlerdir. Klorürün bu üç formunun dağılımı kalıcı değildir ve özel koşullar altında (örneğin karbonatlaşma veya sülfat atağı), bağlı klorürlerin bazıları serbest klorür olarak salınabilir. Çeşitli faktörlere bağlı olarak, betondaki serbest klorür iyonlarının oranı, toplam klorür içeriğinin %20'sinden %50'sine kadar değişebilmektedir.



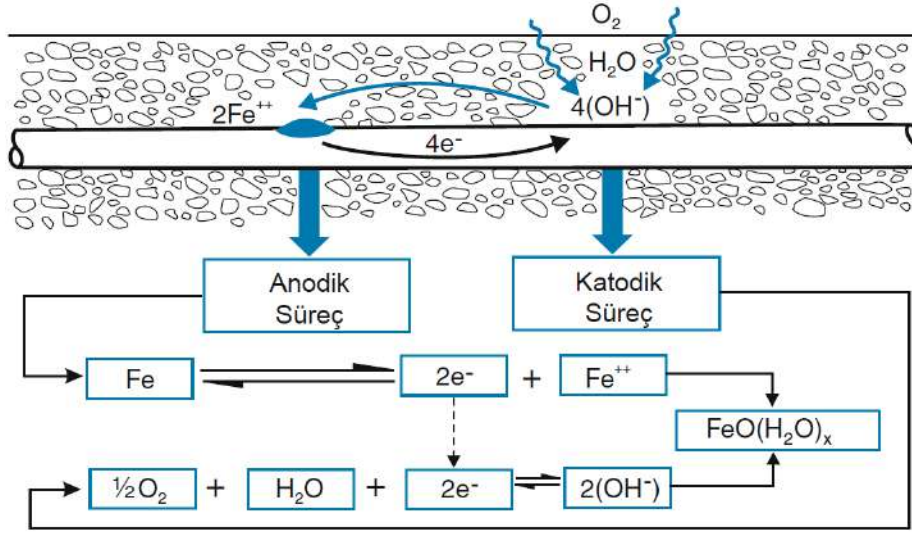
Şekil 9. Donatı korozyonu

Klorür kaynaklı donatı korozyonunun başlayabilmesi için çelik yüzeyinde minimum düzeyde serbest klorür konsantrasyonunun bulunması gerekmektedir. Bununla birlikte, pasivasyona yönelik eşik değerleri belirsizdir. Yaygın olarak belirtilen değerler Portland çimentosunun kütlesine göre %0,1 ile %0,4 arasında serbest klorür iyonlarıdır. Bağlı klorürlerin serbest klorürler olarak salınma olasılığına ilişkin endişe nedeniyle, korozyon olasılığı bazen toplam klorür iyonu içeriği cinsinden ifade edilmektedir. Kıyıya yakın binalar



ve köprüler hem karbonatlaşmanın hem de klorür nüfuzunun bir arada bulunması nedeniyle sıklıkla ciddi korozyon sorunlarına maruz kalmaktadır.

Gömülü çeliğin pasifliği giderildikten sonra korozyon, çelik yüzeyinde anodik ve katodik bölgeleri içeren elektrokimyasal hücrelerin oluşumuyla ilerler ve elektrik akımı ikisi arasında bir döngü içinde akar. Metalik demirin Fe^{++} şeklinde iyonlaşması ve çözünmesinin olduğu anotta korozyon meydana gelir. Katotta oksijen azalır ve katodik reaksiyon elektronları tüketir. Bu da OH^- iyonlarının oluşumuna yol açar.



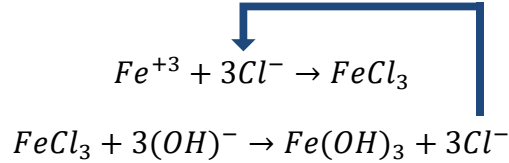
Şekil 10. Çelik donatıda korozyon oluşumu

Katot ve anotta oluşan iyonlar, beton hamurunun gözenek çözeltisi içinde hareket eder ve anot yakınında genel olarak pas olarak bilinen demir oksit oluşturmak üzere kimyasal olarak reaksiyona girer. Katodik reaksiyonun ve dolayısıyla korozyonun meydana gelmesi için hem oksijene hem de suya ihtiyaç olduğu açıktır. İç mekâna açık veya yağmurdan korunan betonda olduğu gibi bağıl nem oranı %60'ın altında olan kuru betonda, karbonatlaşma önemli düzeyde olsa bile donatı korozyonunun ihmal edilebilir olduğu düşünülebilir. Oksijen kaynağındaki kısıtlama nedeniyle suya doymuş betonda korozyon da ihmal edilebilir düzeyde olabilir. Tipik örnekler, betonun şiddetli klorür saldırısına maruz kaldığı ve sınırlı oksijen kaynağı nedeniyle korozyon hızının çok yavaş olabileceği açık deniz yapılarının sürekli su altında kalan elemanlarıdır. Aksine, betonun periyodik ıslanma ve kuruma döngüleri yaşadığı sıçrama veya gelgit bölgelerinde bulunan beton elemanlarda yüksek korozyon oranı meydana gelecektir.

Aslında Şekil 10'da verilen mekanizma bünyesinde nem ve oksijen barındıran her betonarme eleman için geçerli olmakla birlikte elektrolitik korozyon olarak adlandırılabilir. Eleman bünyesindeki mikro iklim koşullarına göre donatı korozyonunun hızı değişiklik gösterecektir.

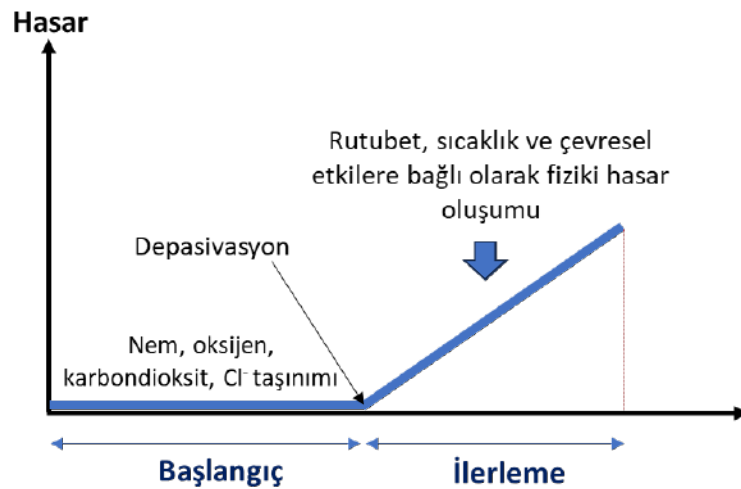


Diğer yandan klorürlerin varlığı pasivasyonu çok hızlı bir şekilde bozulmasını ve katalizör etkisi ile donatının çözülmesini kolaylaştırır. Cl^- iyonları demiri çözerek reaksiyona girer ve demir klorür oluşturur. Demir klorür ise katodik reaksiyonlarda oluşmuş OH^- ile reaksiyona girerek pas oluşturur ve Cl^- iyonları hiçbir şekilde tüketilmeden yine ortama salıverilir. Boşa salınan Cl^- iyonları aynı mekanizmayı yeniden başlatır ve donatı korozyonunu oldukça hızlandırır.



Dolayısıyla belirli bir seviyenin üzerindeki klorür içeriği donatı korozyonunun devam etmesi için yeterli olup betonarme eleman bünyesine yeni klorür girişine gerek yoktur. Bu sebeple en tehlikeli korozyon mekanizması olarak bilinir.

Betonun korozyon nedeniyle bozulması, korozyon ürünü pasın, yerini aldığı orijinal çelikten iki ila altı kat daha büyük bir hacim kaplaması nedeniyle ortaya çıkar. Hacimdeki bu artış, çevredeki beton üzerinde önemli bir baskı gerilme uygulayarak beton kaplamanın çatlamasına, kapak atarak dökülmesine veya katmanlarının ayrılmasına neden olur. Uygulamada ilk endişeler beton yüzeyindeki çatlama ve pas lekeleridir. Çelik çubuğun dış kısmındaki 0,1 ila 0,5 mm'lik pas, çatlama neden olmak için yeterlidir. Bununla birlikte, bu çaptaki azalmanın genellikle betonarme elemanın yük taşıma kapasitesi üzerinde pratik bir öneme sahip olamayacak kadar küçük olduğu düşünülmektedir. Bozulmuş üst geçitler ve binaların altından geçen yayalar ve araçlar için güvenlik tehlikesi oluşturabilecek beton düşmesi ciddi bir endişe kaynağıdır. Korozyon ilerledikçe çelik kesitindeki azalma elemanın yük taşıma kapasitesinin azalmasına yol açacaktır. Şekil 11'de korozyon nedeniyle zamanla oluşan hasar aşamaları görülmektedir.



Şekil 11. Beton içindeki donatının korozyonu durumunda yapı elemanında oluşan hasar modeli



Betonarme yapıların servis ömrünü uzatmak için yüksek kaliteli, düşük geçirimli ve yeterli pas payı bırakılmış betona sahip olmak önemlidir. Diğer stratejiler daha karmaşık olabilir ve uzman tavsiyesi gerektirebilir. Bunlar, sodyum ve kalsiyum nitritleri gibi korozyon önleyicilerin kullanımını ve galvanizli veya epoksi kaplı takviye çubuklarının spesifikasyonunu içerir. Prestijli veya yüksek dayanıklılık gerektiren yapılar için bazen katodik koruma gibi pahalı elektro-kimyasal koruyucu sistemler kullanılır. Bu, çelik takviyenin korozyona uğradığında yaptığı gibi bir anot yerine bir katot gibi davranmasına neden olarak korozyonu önlemek için bir anot sistemi yoluyla düşük voltajlı bir doğru akımın uygulanmasını içerir. Bazı uygulamalarda çelik donatı ile elektriksel olarak temas ettirilen korozyona daha eğilimli metalden yapılmış kurban anotlar donatı koruması olarak seçilebilir. Yeniden alkalileştirme ve klorür ekstraksiyonu gibi diğer elektrokimyasal işlemler bazen bozulan yapılar için rehabilitasyon stratejileri olarak kullanılır.

Tablo 7. Klorür geçirimliliğini etkileyen beton ve beton bileşen özellikleri

Porozite	Bağlayıcı tipi	Agrega tipi	Olgunluk
<ul style="list-style-type: none">- Su/bağlayıcı oranı- Agregabağlayıcı oranı- Çok ince malzeme miktarı	<ul style="list-style-type: none">- Çimento cinsi- Mineral katkı cinsi- Mineral katkı oranı	<ul style="list-style-type: none">- Agregaya yapısı- Agregabağlayıcı hamuru aderansı- Agregabağlayıcı gradasyonu	<ul style="list-style-type: none">- Yaş- Sıcaklık

TS EN 206 Standardında betonun klorür sınıfları Tablo 8’de belirtilmiştir. Örneğin 300 kg/m³ çimento içeriğine sahip hazır betonda olması gereken en yüksek klorür içeriği Cl 0,4 sınıfı için 1,2 kg/m³’tür.

Tablo 8. TS EN 206’ya göre betonun klorür içeriği sınıfları

Beton kullanım yeri	Klorür içeriği sınıfı	Çimento kütlesine göre en fazla Cl- %
Korozyona dayanıklı kaldırma elemanları hariç olmak üzere, çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva etmeyen beton	Cl 1,0	1,0
Çelik donatı veya diğer gömülü metal ihtiva eden beton	Cl 0,2	0,2
	Cl 0,4	0,4
Betona doğrudan temas edecek şekilde ön germe çeliği ihtiva eden beton	Cl 0,1	0,1
	Cl 0,2	0,2



TS 197-1 Standardında Portland çimentosu (CEM III hariç) için en yüksek klorür içeriği %0,1 olarak belirtilmiştir. Betondaki toplam klorür hesaplamasında tüm bileşenlerin miktarları ve klorür içeriği oranları hesaba katılarak ortalama değer bulunmaktadır.

KLORÜR ATAĞI ÖZET BİLGİ	
Klorür atağının nedenleri	Betonun geçirimli olması, uygun olmayan beton tasarımı ve beton hammaddelerinin kullanılması, yüksek klorür içeren ortamlar ve beton örtüsünün kalınlığı reaksiyon şiddetini etkiler.
Klorür atağının zararları	Su içinde çözülmüş klorür tuzlarının betona nüfuz etmesi sonucunda çelik donatının elektrokimyasal bir reaksiyonla korozyona uğramasına neden olur. Paslanan çelikteki hacim artışı betonarme elemanda çatlama veya tabaka atma şeklinde hızla artan bir hasara neden olur.
Beton tasarımında dikkat edilmesi gerekenler	TS EN 206 ve TS 13515'teki çevresel etki koşulları dikkate alınarak uygun çevresel etki sınıfı belirlenmelidir. Betonun su/bağlayıcı oranı düşük olmalıdır. Bu sayede betonun geçirimsizliği artar. Uygun dozajda mineral katkı kullanımı ve uygun çimento tipleri tercih edilmelidir. C ₃ A oranı %4 altında çimento tercih edilmemelidir. Çimento hamuru-agrega ara yüzeyinin aderansı kritik olduğu için kaliteli ve temiz agrega kullanılmalıdır.
Uygulama esnasında dikkat edilmesi gerekenler	Beton içerisindeki çelik donatıyı koruyan beton örtüsü (pas payı) kalınlığı doğru bir şekilde belirlenmeli ve uygulamada buna dikkat edilmelidir. Beton örtüsünün kalınlığı kadar bu örtüyü oluşturan betonun homojen ve ayrışmamış bir şekilde yerleştirilmesi önem arz etmektedir. Bu nedenle uygulama esnasında betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve kürüne son derece dikkat edilmelidir.
Kimyasal katkıların etkisi	Süperakışkanlaştırıcı beton kimyasal katkıları betonun su/bağlayıcı oranını azaltarak daha geçirimsiz bir yapı oluşmasını sağlar. Ayrıca betonun işlenebilirliğini artırarak daha kolay yerleşmesine ve sıkışmasına neden olurlar. Korozyon önleyici katkıları ile çelik donatının paslanması engellenir veya minimize edilir. Kimyasal kür malzemeleri ise betonun rötre çatlaklarını engelleyerek/azaltarak betona çatlaklardan sıvı ve gaz akışını azaltır. Kalıp ayırıcı yağlar da daha iyi ve gözeneksiz beton yüzeylerinin elde edilmesine katkı sağlar. Su yalıtım (geçirimsizlik) katkıları ile de betonun geçirimsizlik özelliği iyileştirilebilir.

7. DONMA-ÇÖZÜLME ETKİSİ

Donma-çözülme hasarını henüz plastik kıvamdaki taze betonda ve ayrıca sertleşmiş betonda ayrı incelemek gerekir. Ancak her iki durumda da asıl neden aynı olup, suyun donarak buza dönüştüğünde yaşanan yaklaşık %9'luk hacim artışıdır.

Donma ve çözülme döngülerinden dolayı genelde iki tür bozulma olduğu kabul edilmektedir. Bunlar iç yapıda çatlama ve yüzeyde pullanmadır. Çimento hamurundaki donma hasarını gözeneklerdeki hidrolik basıncın neden olduğu gerilmelere bağlayan hidrolik basınç teorisi geliştirmiştir. Kılcal gözeneklerdeki su dondukça hacimsel artış

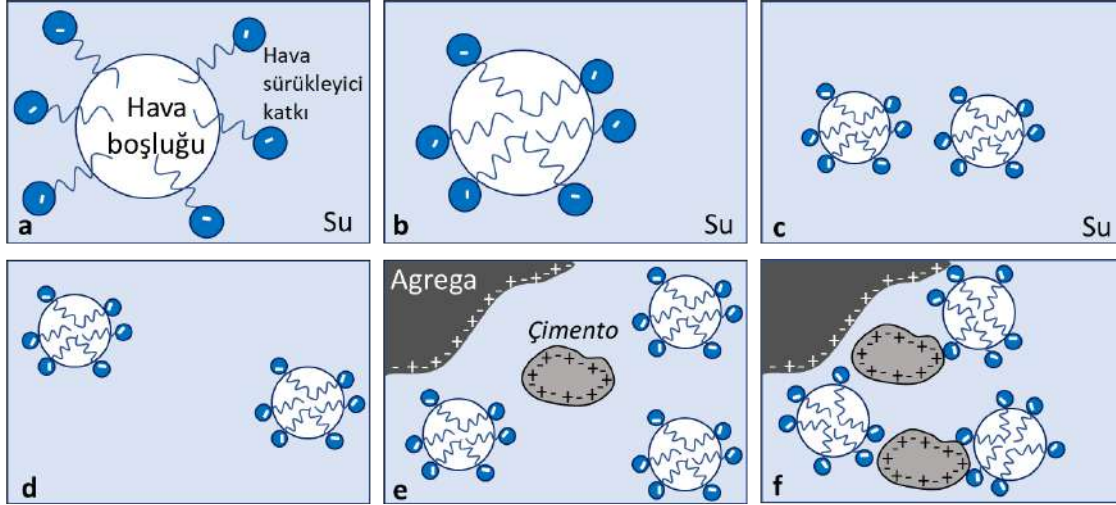


meydana gelir. Gözenekler suyla dolu olduğu için buzun genişleyeceği yer yoksa, genişleme kaynaklı kuvvetler gözeneklerin bozulmasına neden olmaktadır. Gözeneklerin içindeki su, değişen konsantrasyonlarda çözünmüş tuzlar içerdiği durumda ise suyun tamamı aynı anda donmamaktadır. İyonik konsantrasyonlardaki bu farklılıklar ozmotik basınçların oluşmasıyla sonuçlanmaktadır.

Donma-çözülme döngüleri nedeniyle oluşabilecek iç çatlak ve bozulmaları önlemenin yolu, betona hava sürükleyici katkıları ekleyerek kılcal ağ içerisinde küçük ayrık hava boşluklarının oluşmasını sağlamaktır. Hava boşlukları, kılcal boşlukların bozulmasına neden olmadan buzun içine doğru genişleyebileceği hava rezervuarları görevi görmektedir. Bunun, don saldırısından kaynaklanan hasarı en aza indirmenin en etkili yolu olduğu laboratuvar verileri ve saha deneyimiyle doğrulanmıştır. Uygun hacim ve aralık faktörleriyle birlikte uygun hava sürüklenmesi, donma ve çözülme döngüleri sırasında neme maruz kalan betonun dayanıklılığını önemli ölçüde artırmaktadır. Sürüklenen hava aynı zamanda betonun kimyasal buz çözücülerin neden olduğu yüzey hasarlarına karşı direncini de artırmaktadır.

Referans geleneksel bir betona göre hava sürüklenmiş beton bir miktar dayanım kaybına maruz kalsa da hava katkılarının betonun işlenebilirliğine olumlu etkisi ve akışkanlaştırıcı katkıların kullanımı ile su/çimento oranı bir miktar düşürülerek dayanım kaybı rahatlıkla telafi edilebilir.

Hava sürükleyici katkıları, karıştırma sırasında taze betona kontrollü miktarda küçük, düzgün dağılmış ve sertleşme sonrasında da kalıcı olan hava kabarcığı sürükleyen kimyasal katkılarıdır. Hava sürükleyici katkıları, hava-su arayüzünde etki eder. Hava sürükleyici katkıları tipik olarak hidrofilik olan ve suyu çeken negatif yüklü bir başlığa ve suyu iten hidrofobik bir kuyruğa sahiptir. Şekil 12'de gösterildiği gibi; hidrofobik uç, karıştırma işlemi sırasında oluşan kabarcıklar içindeki havaya çekilir. Hidrofilik olan kutup ucu, kendisini suya doğru yönlendirir (a). Hava sürükleyici katkı, hava kabarcıklarını tutmak ve stabilize etmek için yeterli dayanım ve esnekliğe sahip, sabun filmine benzer, sert, su itici bir film oluşturur. Hidrofobik film ayrıca suyu kabarcıklardan uzak tutar (b). Mekanik karıştırma hava kabarcıklarını dağıtır. Her kabarcığın etrafındaki yük, kabarcığın birleşmesini önleyen itici kuvvetlere yol açar (c&d). Yüzey yükü, hava kabarcığının çimento ve agrega parçacıklarının yüklü yüzeylerine yapışmasına neden olur. İnce agrega parçacıkları ayrıca karışımdaki kabarcıkları tutmaya yardımcı olmak için üç boyutlu bir ızgara görevi görür (e). Bu, karışımın kohezyonunu geliştirir ve hava kabarcıklarını daha da stabilize eder (f).



Şekil 12. Hava sürükleyici katkıların çalışma mekanizması

DONMA-ÇÖZÜLMELME ÖZET BİLGİ	
Donma-çözülmenin nedenleri	Donma-çözülme döngüsünün sıklığı ve şiddeti, buz çözücü maddelerin betona nüfuzu, betonun geçirimli ve suya doymun olması, beton dayanımının yetersiz olması
Donma-çözülmenin zararları	Donma-çözülme sonucunda beton yüzeyinde tabaka atma, pullanma ve dökülme; iç yapıda ise çatlak oluşumuna bağlı hasar meydana gelir.
Beton tasarımında dikkat edilmesi gerekenler	TS EN 206 ve TS 13515'teki çevresel etki koşulları dikkate alınarak uygun çevresel etki sınıfı belirlenmelidir. TS EN 206 Standardına göre donma-çözülme etkisinin baskın olduğu XF koşullarında TS 706 EN 12620'ye uygun, yeterli donma-çözülme dayanıklılığına sahip agrega kullanılmalıdır. XF2, XF3 ve XF4 sınıflarında betonun hava içeriği en düşük %4 olmalıdır. Betonun su/bağlayıcı oranı düşük olmalıdır. Bu sayede betonun geçirimsizliği artar. Mineral katkı kullanımı ve uygun çimento tipleri tercih edilmelidir. Donma-çözölmeye dirençli agrega kullanılmalıdır.
Uygulama esnasında dikkat edilmesi gerekenler	Beton içerisindeki çelik donatıyı koruyan beton örtüsü (pas payı) kalınlığı doğru bir şekilde belirlenmeli ve uygulamada buna dikkat edilmelidir. Uygulama esnasında betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve kürüne son derece dikkat edilmelidir. Beton erken yaşta donmaya karşı korunmalıdır. Hava sürüklenmiş betonun sıkıştırılmasında aşırıya kaçılmamalıdır. Donma-çözölme etkisi beton yüzeyini daha hızlı etkilediği için yüzey işlemlerine dikkat edilmelidir.
Kimyasal katkıların etkisi	Süperakışkanlaştırıcı beton kimyasal katkıları betonun su/bağlayıcı oranını azaltarak daha geçirimsiz bir yapı oluşmasını sağlar. Ayrıca betonun işlenebilirliğini artırarak daha kolay yerleşmesine ve sıkışmasına neden olurlar. Hava sürükleyici katkıları ile beton içerisinde kontrollü hava boşlukları oluşturulur. Bu sayede donma-çözölmenin beton içerisinde iç gerilmelere neden olması engellenir/azaltılır. Su tutucu ve su geçirimsizlik katkıları kullanılabilir. Kimyasal kür malzemeleri betonun rötre çatlaklarını engelleyerek/azaltarak betona çatlaklardan su, sıvı ve gaz akışını azaltır.



8. SÜLFAT ATAĞI

Doğal yollarla oluşan sodyum, potasyum, kalsiyum veya magnezyum sülfatları toprakta, deniz suyunda veya yer altı suyunda bulunabilmektedir. Sülfatlar ayrıca sanayide ve gübre yapımında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Sülfat tuzları toprağın ve yer altı suyunun kirlenmesine neden olmaktadır. Çimento bünyesinde de sülfat bulunmaktadır.

Sülfat saldırısı aşağıdaki biçimlerde gerçekleşebilmektedir:

1. Tuz kristalleşmesine bağlı fiziksel saldırı
2. Dış kaynaklardan gelen sülfat iyonları ile sertleşmiş çimentodaki bileşenler arasındaki reaksiyonları içeren dış kimyasal sülfat saldırısı
3. Beton içinde sülfatın geç salımından dolayı iç kimyasal sülfat saldırısı

Fiziksel Saldırı

Bu tür bir saldırının, üst yüzeyi kuru ortama maruz kalan ve alt yüzeyi ise tuz içeren çözeltilerle temas halinde olan geçirgenliği yüksek betonda meydana gelmesi muhtemeldir. Bu koşullar altında çözeltiler kılcal etkiyle yüzeye çıkmaktadır. Yüzey buharlaşması nedeniyle ve eğer buharlaşma hızı tuz çözeltisinin yüzeye göçünden daha hızlıysa üst yüzeyin altında tuz kristalleşmesi meydana gelmektedir. Bu durum; gözeneklerde pullanma, dökülme ve çatlamaya neden olan gerilmeler oluşturmaktadır. Hasar genellikle yüzeyin bozulması şeklindedir ve yüzeyden kütle kaybı ciddi seviyeye ulaşabilmektedir. Bu hasar, elemanın kesitinde önemli bir azalma olmadığı sürece genel olarak yapısal hasara yol açmamaktadır.

Bu tür hasarlar çatlak bölgelerinde beyaz kristal birikintilere neden olur ve beton yüzeyinde tuz kristalleşmesinin meydana geldiği çiçeklenme ile karıştırılmamalıdır. Fiziksel sülfat saldırısı sonucu hasarlı numunelerin mineralojik analizinde etrenjit ve alçıtaşı bulunmaz.

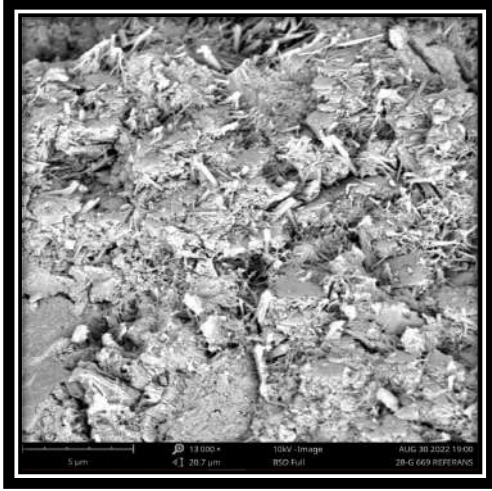
Dış Sülfat Saldırısı

Normal Portland çimentosu genel olarak kimyasal sülfat saldırısına karşı savunmasızdır. Hasarın boyutu betonun kalitesine, ilgili sülfat bileşiklerinin türüne ve bunların konsantrasyonlarına bağlıdır. Geçirimsizliği yüksek betonda, sülfat iyonları dış kaynaklardan betona nüfuz eder ve çimento hidrasyon ürünleriyle reaksiyona girer. Düşük geçirgenlik özelliklerine sahip betonun kullanılması, sülfat iyonlarının betona nüfuz etmesinin sınırlandırılmasında oldukça önemlidir.

Sodyum sülfat, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ile tepkimeye girerek alçıtaşı ve NaOH oluşturur. Alçı daha sonra kalsiyum alüminat hidrat (C-A-H) ile reaksiyona girerek etrenjit ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) oluşturur. NaOH oluşumu çimento sisteminde yüksek alkalinite sağlar ve C-S-H stabil kalır.



Şekil 13'te aynı su/çimento oranına (0,5) sahip beton numunelerinin 28 günlük SEM fotoğrafları görülmektedir. %5 Na₂SO₄ içeren suda kür edilen numunedeki yoğun etrenjit oluşumu net bir şekilde gözükmemektedir.



a) %100 suda kür



b) %5 Na₂SO₄ içeren suda kür

Şekil 13. %100 suda ve %5 Na₂SO₄ içeren suda kür edilen aynı su/çimento oranındaki beton numunelerinin 28 günlük SEM görüntüleri

Kalsiyum sülfat ise etrenjit oluşturmak için yalnızca kalsiyum alüminat hidrata saldırır. Etrenjit oluşumuna hacim genişmesi eşlik eder, bu da iç gerilimlere ve çatlama neden olur. Magnezyum sülfatla temas eden betonda bozulma, diğer sülfatların neden olduğu hasardan daha ciddi olabilmektedir. Magnezyum sülfat, Ca(OH)₂ ve kalsiyum alüminat hidratin yanı sıra C-S-H'ye de saldırır. Magnezyum sülfat saldırısının kritik sonucu, C-S-H'nin tahrip olması ve bunun sonucunda aderans kaybı ve dayanımın azalmasıdır.

Kireç tüketen puzolanik reaksiyon nedeniyle mineral katkıların kullanılması, kalsiyum hidroksit miktarının azaltılmasında ve alçı oluşumunun baskılanmasında faydalı olmaktadır. Düşük C₃A içeriğine sahip, sülfata dayanıklı çimentonun kullanılması, etrenjitin zarar verici oluşumunu en aza indirmektedir.

Yeraltı yapıları veya tüneller, temeller, borular ve kazıklar gibi elemanlar sülfat saldırısına karşı hassastır. Hasarlı betonun yüzeyi genellikle beyazımsı bir görünüme sahiptir. Hasar genellikle kenarlarda ve köşelerde başlar ve sonunda kırılabilir ve hatta yumuşak bir duruma düşer. Etrenjit ve alçıtaşının her ikisi de hasarlı numunelerin mineralojik analizinde mevcuttur.



Şekil 14. Beton yüzeyinde sülfat etkisi sonucu hasar oluşumu

İç Sülfat Saldırısı

İç sülfat saldırısı, sülfat kaynağının dahili olduğu bir kimyasal saldırı durumudur. Geç sülfat salımı nedeniyle sertleşmiş betonda etrenjit oluşarak genişleme ve çatlamaya neden olur. Bu olaya gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO) adı verilmektedir. Bu olgu, yüksek sülfat içeriğine sahip çimentoların kullanıldığı buharla kürlenmiş ürünlerde rapor edilmiştir. Etrenjit 70°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda stabil değildir. Bu nedenle, çimentonun erken hidrasyonu sırasında oluşan etrenjit, kür sıcaklığı 70°C'yi aştığında ayrışır. Açığa çıkan sülfat iyonları C-S-H tarafından emilir. Hizmet sırasında bu iyonlar, etrenjitin yeniden oluşmasıyla ortam koşulları altında desorbe edilir.

Bütünsel bir yaklaşım mekanizmasında, GEO'nun oluşması için üç koşulun karşılanması gerekmektedir. Bunlar (a) mikro çatlakların varlığı, (b) geç sülfat salımı ve (c) suya maruz kalmadır. Betonda mikro çatlaklar, üretim sırasında buhar kürü işlemiyle veya öngerilmeli elemanlarda bölgesel yüksek gerilmelerle oluşabilir.

Alçı taşıyla karışmış agregalar veya kükürt bakımından zengin klinker, erken hidrasyonda hemen bulunmayan ancak daha sonra GEO'yu besleyebilen sülfat kaynakları olabilir. Aşırı ısıtılmış betonda etrenjitin erken hidrasyonundan kaynaklanan termal bozunması nedeniyle sülfatlar da mevcut olabilir. Suya maruz kalma, bu sülfat ve diğer reaktif iyonların göçünü ve ardından mevcut mikro çatlakların içinde etrenjitin birikmesini sağlar. Hasar, etrenjit şişmesi veya kristal büyümesinden kaynaklanır.

Sülfat bakımından zengin topraklara veya yeraltı suyuna maruz kalan yüksek geçirgenliğe sahip beton, fiziksel ve kimyasal etkilerden dolayı bozulabilir. Bu nedenle sülfat atağının kontrolünde yüksek kaliteli, düşük geçirimli betonun kullanılması önemlidir. Sülfat dirençli veya katkı çimentonun kullanılması ek bir avantaj sağlar. Buhar kürlenme işlemiyle üretilen öngerilmeli ürünler GEO ile ilgili sorunlara daha yatkındır. Sülfat kaynağına bakılmaksızın,



birbirine bağlı mikro çatlakların ve suyun varlığı, sülfatla ilgili herhangi bir beton için gerekli bir durumdur. Yukarıdakilerin ışığında, mikro çatlakların gelişimini en aza indirmek için prefabrik ürünlerin üretim sürecinde dikkatli olunmalıdır. Servis sırasında betonu nispeten kuru bir durumda tutmak için iyi bir drenaj veya su yalıtım sistemi gerekli olabilir.

TS EN 206 Standardına göre zeminden alınacak su veya toprak numunelerinin sülfat içeriği analiz edildikten sonra sülfat etkisinin şiddetine göre çevresel etki sınıfını belirlenmeli ve beton tasarımı bu etkiye göre yapılmalıdır. Özellikle XA2 ve XA3 sınıfları için sülfata dayanıklı çimento içeren veya belirli koşulları karşılamak koşuluyla uçucu kül ve yüksek fırın cürufu içeren beton karışımları kullanılmalıdır. TS EN 197-1 Standardı kapsamında CEM I SR, CEM IV SR ve CEM III ana sınıfları olmak üzere toplam 7 adet sülfata dayanıklı çimento cinsi bulunmaktadır.

SÜLFAT ATAĞI ÖZET BİLGİ	
Sülfat atağının nedenleri	<ul style="list-style-type: none">• Tuz kristalleşmesine bağlı fiziksel saldırı• Dış kaynaklardan gelen sülfat iyonları ile sertleşmiş çimentodaki bileşenler arasındaki reaksiyonları içeren dış kimyasal sülfat saldırısı• Beton içinde sülfatın geç salımından dolayı iç kimyasal sülfat saldırısı
Sülfat atağının zararları	Etrenjit oluşumuna neden olarak hacim genişlemesi meydana gelir ve bu da iç gerilimlere ve çatlama neden olur.
Beton tasarımında dikkat edilmesi gerekenler	TS EN 206 ve TS 13515'teki çevresel etki koşulları dikkate alınarak uygun çevresel etki sınıfı belirlenmelidir. Betonun su/bağlayıcı oranı düşük olmalıdır. Bu sayede betonun geçirimsizliği artar. Mineral katkı kullanımı ve sülfata dayanıklı çimento tipleri tercih edilmelidir.
Uygulama esnasında dikkat edilmesi gerekenler	Uygulama esnasında betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve kürüne son derece dikkat edilmelidir. Prefabrik elemanlarda ve kütle betonlarda maksimum beton sıcaklığının 70°C üzerine çıkmasına izin verilmemelidir.
Kimyasal katkıların etkisi	Süperakışkanlaştırıcı beton kimyasal katkıları betonun su/bağlayıcı oranını azaltarak daha geçirimsiz bir yapı oluşmasını sağlar. Ayrıca betonun işlenebilirliğini artırarak daha kolay yerleşmesine ve sıkışmasına neden olurlar. Su tutucu ve su geçirimsizlik katkıları kullanılabilir. Kimyasal kür malzemeleri ise betonun rötre çatlaklarını engelleyerek/azaltarak betona çatlaklardan sıvı ve gaz akışını azaltır.

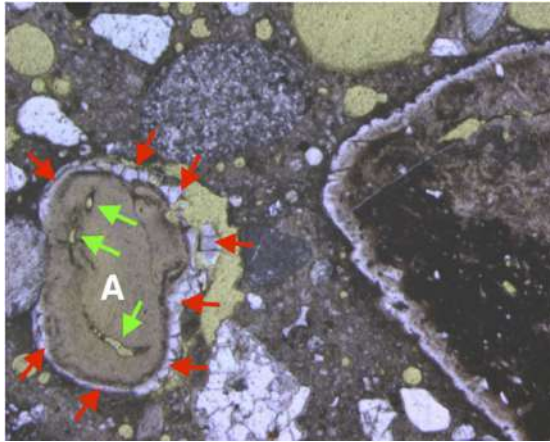


9. ALKALİ-AGREGA REAKSİYONU

Bazı kayaç türleri, çimentodaki alkalilerden (Na_2O , K_2O) türetilen gözenek suyundaki hidroksitlerle reaksiyona girerek betona zarar verebilen reaktif silika içermektedir. Bu reaksiyona alkali-silika reaksiyonu denilmektedir. Alkali-silika reaksiyonu (ASR) hasarının görsel işaretleri, beton yüzeyindeki çatlaklardan gelen jellerle birlikte ortaya çıkan çıkıntılar veya Şekil 15'te görülen "harita" çatlaklarıdır.



Şekil 15. Alkali-silika reaksiyonu sonucu oluşan harita çatlakları



Şekil 16. Agregada etrafında ASR jeli oluşumu (kırmızı oklar)

ASR, çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan alkali iyonların agregadaki reaktif silis içeren minerallere saldırmasıyla başlar ve agregaların yüzeyinde veya gözeneklerinde alkali-silis jeli oluşumuna neden olur. Oluşan jel; suyu emerek şişer ve bölgesel genişlemeye ve çatlamaya neden olur. Bu da agreganın bütünlüğünü veya agreganın çimento hamuru arasındaki bağı (aderansı) bozar. Su, betonun içine nüfuz ettikçe jel katı fazdan sıvı faza geçer. Sıvı jelin bir kısmı daha sonra su ile süzülür ve çatlaklarda birikir.

ASR nedeniyle oluşan hasar; yapı sahiplerinde ve özellikle de birçok inşaat mühendisliği yapısının (barajlar, iskeleler ve köprüler) yapısal bütünlüğünden sorumlu olan yetkililerde büyük endişeye neden olabilmektedir. Bununla birlikte, ASR'nin ne ölçüde zararlı olabileceği; agregaların doğası ve boyutu, reaktif silika miktarı, alkali konsantrasyonu ve nemin mevcudiyeti gibi belirli kritik koşullara bağlıdır.



Alkali-karbonat reaksiyonu olarak bilinen bazı dolomitik kireç taşları ile çimentodaki alkaliler arasındaki reaksiyon da betona zarar verebilmektedir. Ancak reaktif karbonat kayaçları çok yaygın değildir.

ASR yalnızca yüksek pH'ta gerçekleşmektedir çünkü silisli minerallerin çözünürlüğü pH arttıkça artmaktadır. Düşük alkali içeren çimento kullanımı alkali içeriğini ve dolayısıyla gözenek çözeltisinin pH'ını kontrol etmektedir. Reaktif alkali içeriği genellikle alkali eşdeğeri ($\text{Na}_2\text{O} + 0,65 \text{K}_2\text{O}$) cinsinden ifade edilir ve maksimum seviye genellikle çimento kütlelerinin %0,6'sı veya $3,0 \text{ kg/m}^3$ beton olarak kabul edilir. Puzolanik malzemeler içeren katkı çimento kullanımı ya da beton üretiminde doğrudan bu mineral katkıların kullanımı çeşitli nedenlerden dolayı ASR açısından faydalıdır. Bunlardan en önemlileri puzolanik reaksiyonla oluşan C-S-H oluşumu, geçirgenliğin azalması ve pH'ın düşmesidir.

Silika jelinin şişmesi yalnızca suyun varlığında meydana gelmektedir ancak pratikte, özellikle su tutan yapılarda, suyu açtıktan betondan uzak tutmak neredeyse imkansızdır. Servis koşullarında suyun varlığı nedeniyle baraj, iskele ve rıhtım gibi yapılar ASR saldırılarına karşı diğer yapılara göre daha savunmasızdır.

ALKALİ – SİLİKA REAKSİYONU (ASR) ÖZET BİLGİ	
ASR'nin nedenleri	Reaktif silis içeren agrega ve yüksek alkali içeren çimento kullanımı ve ortam rutubeti
ASR'nin zararları	ASR, çimento hidratasyonu sonucu açığa çıkan alkali iyonların agregadaki reaktif silis içeren minerallere saldırmasıyla başlar ve agregaların yüzeyinde veya gözeneklerinde alkali-silis jeli oluşumuna neden olur. Oluşan jel; suyu emerek şişer ve bölgesel genleşmeye ve çatlamaya neden olur. Zamanla yapısal bütünlük kaybolur.
Beton tasarımında dikkat edilmesi gerekenler	TS 13515'teki çevresel etki koşulları dikkate alınarak uygun çevresel etki sınıfı belirlenmelidir. Düşük alkali içeren çimentolar ve uçucu kül, yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıları tercih edilmelidir. Reaktif silis içeren agrega kaynakları tercih edilmemelidir. Betonun su/bağlayıcı oranı düşük olmalıdır.
Uygulama esnasında dikkat edilmesi gerekenler	Uygulama esnasında betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve kürüne son derece dikkat edilmelidir. Su yalıtımı uygulaması dikkatli yapılmalıdır.
Kimyasal katkıların etkisi	Süperakışkanlaştırıcı beton kimyasal katkıları betonun su/bağlayıcı oranını azaltarak daha geçirimsiz bir yapı oluşmasını sağlar. Lityum tuzları ve bazı metal oksitler gibi alkali-silika reaksiyonu azaltıcılar kullanılarak etki azaltılabilir.



10. YANGIN

Betonun yangına karşı dayanımı yüksektir. Aşırı yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında bile beton yanmaz, duman veya zehirli gaz yaymaz. Aksine beton yangının yayılmasını önler. Yangın esnasında betonun sıcaklığı ısı iletkenliğinin yüksek olmaması nedeniyle yavaş bir şekilde artar. Bu nedenle beton, yangının yayılmasına karşı oldukça iyi bir koruma sağlar. Ancak uzun süre ve yoğun bir şekilde yangına maruz kaldıktan sonra betonda kademeli olarak hasarlar oluşmaya başlar.

Donatılı veya donatısız beton, 300°C'ye kadar sıcaklıklara önemli bir hasar görmeden dayanabilmektedir. Beton yangın esnasında bu kritik sıcaklığa çok yavaş ulaşılır. Bazı çalışmalar, beton yüzeyinin 1000°C sıcaklığa maruz kalması durumunda 300°C kritik sıcaklığın betona 2 cm kadar nüfuz etmesinin bir saat sürdüğünü göstermektedir. Bu sıcaklık kabaca yanan bir odun ateşinin veya gaz alevinin sıcaklığına karşılık gelmektedir.

Beton, yangına ve yüksek sıcaklıklara karşı mükemmel içsel koruma sağlar. Çoğu binada yangına karşı dayanıklılık için herhangi bir ek önlem veya kaplamaya gerek yoktur. Belirli durumlarda, pas payının artırılmasıyla koruma artırılabilir. Yüksek dayanımlı betonlarda aşırı dökülmeyi önlemek amacıyla polipropilen fiberlerin eklenmesi oldukça faydalıdır. Bunun ana nedeni su/çimento oranı ve dolayısıyla geçirimsizliği düşük olan betonlar, özellikle tüneller gibi kapalı mekanlarda, yangın nedeniyle oluşan yüksek sıcaklığa maruz kaldığında bünyesindeki suyun gaz fazına geçebileceği yeterli boşluk yapısına sahip değildir. Bu nedenle hareket edecek yeterli boşluk bulamayan su, yüksek bir enerji seviyesine ulaşarak genişlemeye uğrar ve betonun bir nevi içerinden patlamasına neden olur. Sentetik fiber içeren betonda ise fiberler yaklaşık 160°C'de eridiği için suyun hareket edebileceği kanalların oluşmasını sağlar.



Şekil 17. Yüksek sıcaklıkta test edilen betonarme elemanda meydana gelen dökülme

Mesken amaçlı binaların ve kamu tesislerinin tasarımında insan güvenliği en önemli hususlardan biridir. Genel olarak betonun yangın güvenliği açısından iyi özelliklere sahip



olduğu kabul edilir. Ahşabın aksine beton yanıcı değildir ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında zehirli duman çıkarmaz. Uygulamada, yapısal bileşenlerin belirli bir süre boyunca bütünlüklerini korumaları gerekir. Çeliğin aksine beton, 700 ila 800°C arasındaki sıcaklıklarda birkaç saat boyunca yeterli dayanımı koruyabilir. Bu güvenlik açısından önemlidir çünkü yüksek yangın direncine sahip malzemeler, kurtarma operasyonlarının yapısal çökme riskini azaltarak ilerlemesine olanak tanır.

Yangın, yüksek sıcaklık değişimleri yaratır ve bu nedenle sıcak yüzey katmanı çatlama eğilimi gösterir ve ardından beton elemanın daha soğuk olan iç kısmından dağılır.

Hasarın boyutu; ulaşılan sıcaklığa, yangın sırasındaki yükleme koşullarına ve betonun kalitesi ve kullanılan agrega türü de dahil olmak üzere betonun özelliklerine bağlıdır. Genel olarak yük altında ısıtılan beton, yüksüz betona kıyasla orijinal dayanımını daha yüksek bir oranda korur. Düşük geçirgenliğe sahip beton ciddi dökülmelere maruz kalabilir. Bu; betonun içindeki buhar basıncının, buharın atmosfere salınmasıyla oluşan basınç tahliyesinden daha hızlı artması durumunda meydana gelir.

Agrega seçimi, betonarme yapıda yangın esnasında oluşan ısıl gerilmeleri büyük ölçüde etkilemektedir. Kireçtaşı ve dolomit gibi karbonat tipi agregalar, ısıtıldıklarında kalsine olup CO₂ açığa çıkardıkları için yangında daha iyi performans gösterme eğilimindedir. Kalsinasyon işlemi ısı gerektirdiği için reaksiyon yangının ekzotermik enerjisinin bir kısmını emer. Isı performansı betonun ısıl iletkenliği ile ilişkili olduğundan, hafif agregaların kullanımı belirli koşullar altında betonun yangın performansını artırabilmektedir.

Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığında, kireçtaşı veya hafif agregalarla yapılan beton, silisli agregalarla yapılan betondan daha iyi performans gösterir. Bunun nedeni, silisli agregalara kıyasla çimento hamuru ile bu agregalar arasındaki termal genleşme katsayısı farkının daha az olması ve bunun sonucunda daha güçlü bir geçiş bölgesi oluşmasıdır. Yaklaşık 570°C'de kuvars içeren silisli agregalar, faz dönüşümü nedeniyle hasar verici genleşmeye maruz kalır.

Silisli veya kireçtaşı agregalarından yapılan beton, sıcaklıkla renk değişimi gösterir. Bu, bir yangında ulaşılan maksimum sıcaklığın tahmin edilmesinde faydalı bilgiler sağlayabilmektedir. Betonun rengi yaklaşık 300°C'ye kadar değişmeden kalır. 300 ile 600°C arasında pembeden kırmızıya, 600°C ile 900°C arasında griye döner. 900°C'nin üzerinde ise açık sarı-kahverengi (devetüyü) olur.

Çimento hamurunda ise sıcaklık yaklaşık 300°C'ye ulaştığında, ara katman suyu ve çimento hidratlarından kimyasal olarak bağlı suyun bir kısmı kaybolur. Yaklaşık 500°C'de kalsiyum hidroksitin ayrışması başlar. C-S-H'nin tamamen ayrışması 900°C civarındaki sıcaklıklarda meydana gelir. Pratik amaçlar için, yaklaşık 600°C, yapısal beton için sınırlayıcı sıcaklık olarak kabul edilebilir.



YANGIN ÖZET BİLGİ	
Yangının betona zararları	Donatılı veya donatısız betonda 300°C üzerindeki sıcaklıklarda beton özellikleri olumsuz etkilenmeye başlar, 600°C üzerinde ise önemli yapısal hasarlar oluşmaya başlar. Betonun yapısal bütünlüğünün bozulmasıyla birlikte betonun çelik donatıyı yangından koruması da olumsuz etkilenir.
Beton tasarımında dikkat edilmesi gerekenler	Maksimum yangın direncinin elde edilmesi, kullanılan agregaların bileşimine bağlıdır. Özel agregaları ve sentetik fiber donatıların kullanılması yangın direncini önemli ölçüde artırır. Beton elemanların kalın olması yangına direnci arttırır.
Uygulama esnasında dikkat edilmesi gerekenler	Uygulama esnasında betonun yerleştirilmesi, sıkıştırılması ve kürüne son derece dikkat edilmelidir. Yangına direnç kapsamında yeterli kalınlıkta beton örtüsü (pas payı) hesaplanmalı ve doğru bir şekilde uygulanmalıdır.
Fiber donatıların etkisi	Sentetik fiber içeren betonda fiberler yaklaşık 160°C'de eridiği için düşük geçirimli (özellikle tünel segmentleri) betonlarda dökülme/patlama riskini azaltır.



11. BETON BİLEŞENLERİNİN DAYANIKLILIĞA ETKİSİ

11.1. Çimento

Beton yapımında kullanılan tüm malzemelerin oluşturduğu sistemin en kararsız kısmı Portland çimentosuna aittir. Hem kimyasal hem de fiziksel saldırıya maruz kalabile çimento, betonda oluşabilecek dayanıklılık sorunlarının çoğundan sorumludur. Bu dayanıklılık sorunları Portland çimentolarının fiziksel ve kimyasal yapısının doğasında vardır. Neyse ki, bu sorunların çoğuyla nasıl başa çıkılacağı oldukça iyi bilinmektedir.

TS EN 197-1 Standardı çimento açısından çok sayıda olasılık sunmaktadır. Standartta 27 genel çimento, 7 adet sülfata dayanıklı çimento cinsi yer almaktadır. TS EN 197-5 Standardı ile 5 adet çimento cinsi ilave olmuştur. Tüm bu çimentoların uzun vadeli dayanıklılıkları açısından bazı belirsizlikler bulunmaktadır. Bu nedenle proje özelinde çimento cinsini belirleme yapı performansı açısından oldukça kritik bir karardır.

Dayanıklılık söz konusu olduğunda elbette ilk savunma hattı su/çimento, daha doğru bir ifade ile su/bağlayıcı oranıdır. Su/bağlayıcı oranını mümkün olduğunca düşük tutmak dayanıklılık açısından gereklidir. Bu durum, betonun geçirgenliğini büyük ölçüde azaltarak zararlı kimyasalların betonun içine girmesini önlemektedir. Betonda uçucu kül, yüksek fırın cürufu veya silis dumanı kullanılarak geçirgenlik daha da iyileştirilebilmektedir. Burada su azaltıcı kimyasal katkıların rolü oldukça yüksektir. Alınan bu önlemler kimyasal saldırıyı ortadan kaldıramasa da önemli ölçüde yavaşlatabilir ve böylece betonun etkin ömrünü uzatabilir.

Yukarıda belirtildiği gibi bazı zararlı reaksiyonlar yalnızca düşük su/bağlayıcı oranı ve belirli mineral katkıları kullanılarak geciktirilebilir. Ancak çimento (veya bağlayıcı) kimyasını değiştirmenin oldukça faydalı olabileceği bazı durumlar vardır.

Örneğin, alkali-silika reaksiyonunun (ASR) meydana gelmesinin muhtemel olduğu durumlarda, çimentonun alkali eşdeğerinin %0,6'nın altına düşürülmesi, betonun toplam alkali içeriğinin sınırlandırılması ve düşük su/bağlayıcı oranının kullanılması genel olarak sorunu önleyecektir.

Sülfat saldırısında yer alan mekanizmalar oldukça karmaşıktır ancak bu saldırıyı hafifletmenin gereksinimleri oldukça basittir. Temel olarak sülfat saldırısının beklendiği durumlarda düşük C₃A içeren çimentonun kullanılması etkilidir. Ancak bu etki yine de düşük su/bağlayıcı oranıyla birlikte anlamlı olmaktadır. C₃A içeriğinin azaltılmasının bir diğer yöntemi de katkı çimento ya da mineral katkı kullanılarak betondaki klinker miktarını azaltmaktır. C₃A, betonun reolojisi ve dayanıklılığı üzerindeki olumsuz etkilerinden dolayı oldukça istenmeyen bir maddedir. C₃A, çimento mineralleri arasında en reaktif olanıdır ve alçı (CaSO₄.2H₂O) ile birleşerek çoğunlukla iğne şeklinde etrenjit



($6\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) oluşturur. Etrenjitler işlenebilirliği azaltabilir. C_3A içeriği ve incelik ne kadar yüksek olursa işlenebilirlik kaybı da o kadar büyük olur. C_3A ayrıca düşük su/bağlayıcı oranlı betonlarda çimento-süper akışkanlaştırıcı uyumsuzluğuna da yol açabilir. Son olarak, yüksek C_3A içeriği dayanıklılık sorunlarına yol açabilir çünkü etrenjit, kılcal gözeneklerdeki ara suyun yüksek pH'ında stabil değildir. Birkaç saatlik hidrasyondan sonra etrenjitin bir kısmı monosülfoalüminata ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) dönüşmektedir. Beton daha sonra sülfat tuzlarına maruz kaldığında hem etrenjit hem de monosülfoalüminat kararsız olur. Bu durum, gecikmiş etrenjit oluşumu (GEO), sülfat saldırısı ve donma-çözülme döngülerine karşı direncin azalması gibi dayanıklılık sorunlarına neden olur.

Beton bazı koşullarda çeşitli asitlerin saldırısına maruz kalabilmektedir. Genelde bu saldırıların şiddeti asidin türüne ve konsantrasyonuna bağlıdır. Hidrate olmuş çimentodaki $\text{Ca}(\text{OH})_2$, asit saldırısına karşı oldukça hassastır ancak C-S-H ve bazı durumlarda agrega da saldırıya uğrayabilmektedir. Asit etkisi, beton yüzeyinden temas ile başlayarak asit-baz reaksiyonları ile yüzeyden itibaren adeta betonu kemirmeye başlar. Bu saldırıda beton geçirimsizliğinin pek de bir önemi kalmaz, çünkü tahribat yüzeyden başlar. Asidin pH derecesi düştükçe saldırının şiddeti de artmaktadır. Asit saldırısına karşı en doğru çözüm beton yüzeyinin yalıtımı olsa da bazı hafif etki durumlarında, yüksek oranda katkı içeren çimento ya da mineral katkı kullanılması çözüm sağlayabilir.

İnşaat sektöründeki genel talep ve öğütme teknolojilerindeki gelişmeler sonucunda son yıllarda çimentoların daha yüksek erken dayanım performansına ulaştığıdır. Bunun içinde çimento üreticileri inceliği daha yüksek çimento arz etmeye başlamıştır. Çimento inceliğinin artması sonucunda hidrasyon süreci hızlanır, hidrasyon ısı artar, erken dayanım yükselir ve betonda su ihtiyacı artabilir. Yüksek reaksiyon hızı sonucu oluşan hidrasyon ısı özellikle kütle betonlarında termal çatlama olasılığına yol açabilir. Daha yüksek çimento inceliği aynı zamanda daha fazla rötre çatlamasına neden olabilir. Bu etkiler bir araya geldiğinde, potansiyel olarak beton dayanıklılığı olumsuz etkilenebilmektedir.

11.2. Mineral Katkılar

Uçucu Kül

Termik santrallerde toz haline getirilmiş kömürün yakılması sürecinde oluşan uçucu kül, 60 yılı aşkın bir süredir tamamlayıcı çimentolu malzeme olarak kullanılmaktadır. İkincil hidrasyon ürünleri, uçucu kül bazlı betonlara dayanıklılık (düşük su geçirgenliği) kazandırır. Külün parçacık boyutu ne kadar küçük olursa, kalsiyum hidroksite maruz kalan yüzey alanı da o kadar büyük olur ve reaksiyon hızı da artar. Kirecin uçucu kül ile puzolanik reaksiyonu genellikle yavaş bir reaksiyondur. Ancak kür sıcaklığı arttırılırsa puzolanik



reaksiyon hızı da artmaktadır. Uçucu külün betonda kullanılmasının bir diğer faydası da üretilen betonun su ihtiyacını azaltarak su/bağlayıcı oranını ve geçirgenliği azaltarak dayanımı göreceli olarak arttırmasıdır. Kızdırma kaybı (KK) genellikle uçucu küle ilgili önemli bir sorun olarak öne çıkmaktadır. KK, puzolanik özelliği azaltan yanmamış karbon ile ilişkilidir. TS 13515'e göre betonda kullanılacak uçucu külün KK değeri maksimum %5 ile sınırlandırılmıştır.

Uçucu kül içeren betonun gözenekliliği ve geçirgenliği, puzolanik hidratasyon ürünleri oluştuğunda azalır. Gözeneklerin azalması nedeniyle, potansiyel olarak zararlı bileşiklerin beton kütlesine erişimi engellenir.

Alkali-silika reaksiyonu (ASR), bazı silisli agregaların Portland çimentosunda bulunan alkalilerle reaksiyona girmesiyle ortaya çıkan genişleyen bir reaksiyondur. Uçucu kül betona eklendiğinde, beton içinde herhangi bir önemli sertleşme ve dayanım kazanımı meydana gelmeden önce tercihen sodyum veya potasyum alkalileri bağlar. Uçucu külün eklenmesi, gözenek çözeltisinin pH'ını 13'ün altına düşürür; bu durumda ASR potansiyeli önemli ölçüde azalır. Bazen uçucu kül, teorik olarak ASR'ye katılma kapasitesine sahip olan yüksek oranda sodyum veya potasyum oksit içerebilir. Neyse ki, bu alkaliler uçucu kül partikülünün camsı fazında tutulur ve Portland çimentosu ile birlikte yeterli kül kullanıldığında zararlı bir şekilde reaksiyona giremez. Bu arada, silisli uçucu kül kalkerli uçucu küle oranla ASR'yi önlemede çok daha etkilidir.

Klorür, betonda bulunan donatı çubuklarının en büyük düşmanlarından biridir. Portland çimentosundaki C_3A , klorür iyonlarını bağlayarak kalsiyum kloroalüminat oluşturmaktadır. Benzer şekilde C_4AF , klorür iyonlarının hareketliliğini azaltmaktadır. Uçucu kül ayrıca klorür iyonlarını bağlayabilen alümina oksitleri de içermektedir. Klorür girişini azaltmanın etkili bir yolu betonun klorür geçirgenliğini azaltmaktır.

Uçucu küllü betonun karbonatlaşma direnci biraz karışık bir durumdur. Puzolanik reaksiyon, alkali ortamın korunmasından sorumlu olan ve çelik donatının korozyonunu önleyen $Ca(OH)_2$ miktarını azaltır. Bununla birlikte, büyük oranda uçucu kül kullanılsa bile mevcut kireç hiçbir zaman tamamen tükenmez. Ayrıca yeterli ve etkin bir kür yapılması durumunda puzolanik reaksiyon daha fazla hidrasyon ürünü üreterek CO_2 , oksijen ve su girişini önemli ölçüde azaltır. Bu nedenle uçucu kül içeren betonların karbonatlaşma direnci birçok farklı mekanizmanın sonucunda ortaya çıkmaktadır.

Öğütülmüş Granüle Yüksek Fırın Cürufu

Demir-çelik üretiminden çıkan yüksek fırın cürufu (YFC), literatürdeki net ifadeyle öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu hem hidrolik hem de puzolanik özelliklere sahip bir mineral katkıdır. YFC'nin kalite gereklilikleri TS EN 15167-1 kapsamındadır. YFC, Portland çimentosuna benzer şekilde 300-500 m^2/kg inceliğinde öğütülmektedir. YFC daha ince



öğütüldükçe, reaktivitesi ve su ihtiyacı artar. İnceliğin reaktivite üzerindeki bu etkisi, kimyasal bileşimin etkisinden daha az önemlidir. Daha yüksek miktarda YFC içeren beton daha uzun süre işlenebilir kalmaktadır. Bu durum özellikle kütle beton uygulamalarında ve sıcak havada koşullarında oldukça avantaj sağlamaktadır. YFC'nin hidrasyon reaksiyonu Portland çimentosundan daha yavaştır ve bu da betonun erken dayanımını azaltabilmektedir ancak dayanım gelişimi daha istikrarlı ve yüksek olmaktadır.

YFC içeren betonunun sülfat direnci, YFC oranı ve aktivitesi, çimentonun C_3A içeriği, cürufun alümina içeriği ve su/bağlayıcı oranı olmak üzere çeşitli parametrelere bağlıdır. YFC içeriği %50'nin üzerinde olduğunda, sülfata dirençli çimentoya eşit veya daha iyi sülfat direnci sağlanabilmektedir. YFC'nin sülfat koşullarında performansı arttırdığı temel süreç, Portland çimentosu tarafından üretilen C_3A gibi hassas hidratların seyreltilmesidir. Ayrıca, puzolanik etki sonucunda oluşan daha az geçirgen gözenek yapısı sülfat tuzlarının nüfuzunu yavaşlatmaktadır.

Genel olarak yeterli miktarda YFC içeren betonlar asitlere karşı da dayanıklıdır. Bunun başlıca nedeni $Ca(OH)_2$ 'deki azalma ve betonunun daha az geçirgen olmasıdır. Ancak hiçbir betonun asit saldırısına karşı mükemmel derecede dayanıklı olmadığını unutmamak gerekir. YFC içeren beton, klorürlerin nüfuz etmesine karşı çok iyi direnç gösterir ancak karbonatlaşmaya karşı benzer performansı sergilemez. Uçucu kül kullanımına benzer şekilde kür koşullarına ve kullanım miktarına bağlı bir performans gösterir.

YFC'nin betona dahil edilmesi, alkali-silika reaksiyonundan kaynaklanan hasar riskini azaltmanın bir yolu olarak dünya çapında kabul edilmektedir. %50 oranında YFC içeren betonda bu etki çok net görülebilmektedir. YFC'de bulunan alkaliler ağırlıklı olarak asitte çözünür, çok küçük bir kısmı ise suda çözünür. Ancak Portland çimentosundaki alkalilerin çoğu suda çözünür ve dolayısıyla bu alkaliler hidrasyon başlar başlamaz mevcut olmaktadır. YFC'nin alkaliler tarafından aktive edilebildiği iyi bilinmektedir ve açığa çıkan alkalinin bir kısmının YFC tarafından tüketilmesi söz konusudur. Hidrasyon ilerledikçe gözenek yapısı giderek küçülür ve difüzyon katsayısı önemli ölçüde azalır. Bunun sonucunda alkali ve suyun hareket etme yeteneği azalır.

11.3. Agregalar

Agregalar hem kütle hem de hacim olarak betonun büyük bir kısmını kapladığından, agreganın dayanıklılığının azalması betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkilemektedir. Sağlık ve aşınma direnci agregaların önemli fiziksel dayanıklılık özellikleridir. Çevresel faktörlere eşlik eden hacim değişiklikleri betonun bozulmasına yol açıyorsa agregaların dayanıklılığından bahsedilemez. Hacim değişiklikleri, dönüşümlü donma ve çözülme veya tekrarlanan ıslanma ve kuruma nedeniyle ortaya çıkabilmektedir. İyi bir agregalar sert, yoğun, güçlü olmalı ve yumuşak, gözenekli veya ufalanabilir parçacıklardan arındırılmış olmalıdır.



Betonda önemli bir dayanıklılık problemi, agregalardaki reaktif silis ile çimentoda bulunan alkaliler arasındaki reaksiyondan kaynaklanmaktadır. En bilineni alkali agregat reaksiyonudur (temel olarak alkali-silika reaksiyonu), ancak son yıllarda başka olağandışı reaksiyonlar da tanımlanmıştır. Demir piritler (FeS_2), kalsiyum hidroksit varlığında geniş bir şekilde reaksiyona girerek demir sülfat ve sonucunda ferrik hidroksit oluşturmaktadır. Bu reaksiyon dökümelere ve lekelenmeye neden olmaktadır. Doğal alçı, agregat içerisinde önemli miktarda bulunması durumunda sülfat atağına neden olabilmektedir. Agregalarda zaman zaman küçük miktarlarda çinko veya kurşun bulunabilmekte ve priz süresini ve betonun erken sertleşmesini büyük ölçüde geciktirebilmektedir.

ASR'yi kontrol eden ana faktörler aşağıda belirtilmiştir:

- (i) Reaktif silikanın doğası
- (ii) Reaktif silika miktarı
- (iii) Reaktif malzemenin parçacık boyutu
- (iv) Mevcut alkali miktarı ve
- (v) Rutubet oranı

Saha performansının gözlemlenmesi, bir agreganın potansiyel reaktivitesini değerlendirmenin en iyi yöntemidir. Bir agreganın potansiyel reaktivitesini belirtmek için kısa süreli laboratuvar testleri de kullanılabilir. ASTM C 289, toz halindeki agreganın sodyum hidroksit ile işlenmesi durumunda silikanın çözünürlüğünü ölçen hızlı bir kimyasal testtir. Bazı mineraller testi etkileyebilir ve sonuçların değerlendirilmesi için petrografik inceleme yapılmalıdır. Kimyasal yöntemin genellikle yavaş reaksiyona giren agregalar veya karbonat veya magnezyum silikat içeren agregalar için uygun olmadığı görülmektedir. ASTM C1293 ve ASTM C1567 ise harç çubuklarının genişlemesine dayalı bir şekilde potansiyel riski belirleyen yöntemleri içermektedir.

Çimentodaki alkaliler agregada bulunan dolomit kristalleriyle reaksiyona girerek brusit ($Mg(OH)_2$) ve kalsit ($CaCO_3$) üretimini tetikleyebilmektedir. Brusit, suyun emilmesinden dolayı hacimsel genişmeden sorumludur. Karbonat içeren kayaçların alkali-agregat reaksiyonu üç kategoriye ayrılabilir:

- (i) Dolomitleşmenin giderilmesiyle sonuçlanan dolomitik kireçtaşının reaksiyonu
- (ii) Reaksiyon bölgeleri oluşturan dolomitik olmayan kireçtaşının reaksiyonu
- (iii) Karbonat içeren çeşitli kayaların alkali-silika reaksiyonu

Çoğunlukla doğal agregalarda bulunabilen organik maddeler (bitki kalıntıları vb.) çimentonun hidratasyonunu olumsuz yönde etkileyerek dayanım ve dayanıklılık kaybına neden olabilir.



Diğer yandan kırma kum gibi ince agregalarda bulunabilen kil içeriğinin çok yüksek olması betonun su ihtiyacının artmasına, arayüzey bölgesinin daha zayıflamasına, geçirimsizliğin artmasına ve bunlara bağlı dayanıklılık problemlerine yol açabilir.

11.4. Kimyasal Katkılar

Beton üretiminde kullanılan kimyasal katkıların özellikleri ve gereklilikleri TS EN 934-2 Standardında belirlenmiştir. Tablo 9'da görüleceği üzere TS EN 934-2 kapsamında 12 çeşit katkı yer almaktadır. Püskürtme beton katkıları ise TS EN 934-5 kapsamındadır.

Tablo 9. TS EN 934-2'de yer alan beton kimyasal katkıları

Standart	Katkı Türleri
TS EN 934-2	Beton Kimyasal Katkıları <ol style="list-style-type: none">1. Su azaltıcı / akışkanlaştırıcı kimyasal katkı2. Yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı3. Su tutucu kimyasal katkı4. Hava sürükleyici kimyasal katkı5. Priz hızlandırıcı kimyasal katkı6. Sertleşmeyi hızlandırıcı kimyasal katkı7. Priz geciktirici kimyasal katkı8. Su geçirimsizlik kimyasal katkısı9. Priz geciktirici / su azaltıcı / akışkanlaştırıcı kimyasal katkı10. Priz geciktirici / yüksek oranda su azaltıcı / süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı11. Priz hızlandırıcı / su azaltıcı / akışkanlaştırıcı kimyasal katkı12. Viskozite iyileştirici kimyasal katkı
TS EN 934-5	Püskürtme beton katkıları

Henüz standardı olmayan diğer beton katkıları:

- Yüzey geciktiriciler
- Alkali-silika reaksiyonu azaltıcılar
- Korozyon azaltıcılar
- Renkli beton pigmentleri
- Rötne azaltıcı katkıları
- Ayrışma azaltıcı katkıları
- Köpük beton katkıları
- Antibakteriyel katkıları



Kimyasal katkılar, betonun veya harcın plastik ve sertleşmiş hallerinde istenilen özelliklerini geliştirmek için tek başına veya kombinasyon halinde kullanılır. İstenilen özel veya geleneksel beton türüne göre Tipler ve dozajlar, işlenebilirlik ve pompalanabilirlik, mukavemet seviyesi, su/çimento oranı, hava içeriği, priz süresi, erken ve nihai mukavemetlerin korunması için iklim koşullarına uygun olarak seçilir. Önerilen karışımlar ve katkı seçenekleri genellikle sahada yapılan başarılı testlerle doğrulanır.

Taze betonun modifikasyonu: Katkılar, taze betonun, harcın ve derz dolgusunun özelliklerini değiştirmek ve geliştirmek için kullanılır. Örnekler:

- Su içeriği arttırılmadan işlenebilirliğin artırılması;
- İşlenebilirlik değiştirilmeden su içeriğinin azaltılması;
- Su/çimento oranı, dayanım ve işlenebilirlik değiştirilmeden çimentonun azaltılması;
- Su içeriği arttırılmadan çökme veya çökme akışının artırılması;
- İlk priz alma süresinin geciktirilmesi veya hızlandırılması;
- Oturmanın azaltılması veya önlenmesi veya hafif bir genişleme yaratılması;
- Kanama özelliklerinin değiştirilmesi;
- Ayırışmanın azaltılması;
- Bitirilebilirliğin iyileştirilmesi;
- Pompalanabilirliğin arttırılması;
- Reolojik özelliklerin değiştirilmesi;
- Çökme kaybı oranının azaltılması;
- Yerleştirme oranının arttırılması.

Sertleşmiş betonun modifikasyonu: Katkılar sertleşmiş betonun ve harcın özelliklerini değiştirmek için kullanılır. Örnekler:

- Çimentonun erken hidrasyonu sırasında ısı oluşumunun azaltılması;
- Erken yaşlarda mukavemet gelişiminin hızlandırılması;
- Mukavemetin artırılması (basınç, çekme veya eğilme);
- Donma ve çözülmeye karşı direncin arttırılması;
- Buz çözücü tuzların neden olduğu kireçlenmeyi azaltılması;
- Geçirgenliğin azaltılması;
- Alkali-agrega reaksiyonunun neden olduğu genişlemenin azaltılması;
- Çelik donatı veya mevcut beton ile yeni beton arasındaki bağın arttırılması;
- Darbe direncinin ve aşınma direncinin arttırılması;
- Gömülü metalin korozyonunun engellenmesi;
- Renkli beton veya harç üretilmesi;
- Kuruma büzülmesinin ve kıvrılmanın azaltılması.



Akışkanlaştırıcı ve Süperakışkanlaştırıcılar

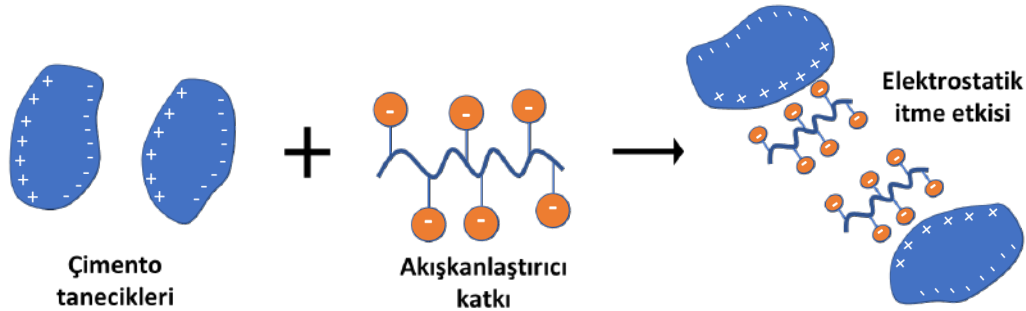
Betonun genel dayanıklılık performansı hem tasarım hem de malzeme parametrelerine bağlıdır. Akışkanlaştırıcılar betondaki su ihtiyacını azaltmaya yardımcı olarak beton kalitesinin önemli bir belirleyicisi olan su/bağlayıcı oranını düşürürler.

Ortaya çıkan ilk formlar 1930'ların başından beri mevcut olan lignosülfonatın sodyum ve kalsiyum tuzlarıdır. 1960'lı ve 1970'li yıllardan itibaren sülfonatlı naftalin formaldehit kondensatları (SNF'ler) ve sülfonatlı melamin formaldehit kondensatları (SMF'ler) yaygınlaşmaya başladı. Her ikisine de yüksek su azaltma kabiliyetine sahip oldukları için süperakışkanlaştırıcılar denilmektedir. Bu tür çözeltilerin organik kısmı negatif yüklüdür ve genel denge çözeltideki katyon (genellikle sodyum ve kalsiyum) tarafından korunmaktadır. Dispersiyonun elektrostatik itme yoluyla meydana geldiği kabul edilmektedir. SMF'ler ve SNF'ler benzer potansiyel su azaltma kapasitesine sahiptirler (gerekli çökme ve çimento içeriğine bağlı olarak %10-25) ancak betona sürüklenen hava içeriği farklılık gösterebilmektedir.

1980'li yıllardan itibaren ortaya çıkan yeni nesil tasarım moleküllerinin en yaygın kullanılan türevleri polikarboksilik eterler (PCE) olarak bilinir. Daha düşük su/bağlayıcı oranı, su içeriğinin azaltılmasını sağlar. Bunun sonucunda dayanım ve dayanıklılıkta önemli bir artış meydana gelir. Bu katkıların kullanımı aynı zamanda çimento kullanımını azaltmakta ve sürdürülebilir beton uygulamalarını teşvik etmektedir. Ayrıca bu katkılar betonun daha yüksek ve uzun mesafelere pompalanmasına da yardımcı olmaktadır.

Özet olarak süperakışkanlaştırıcı katkılar 2 farklı mekanizmada çalışmaktadır:

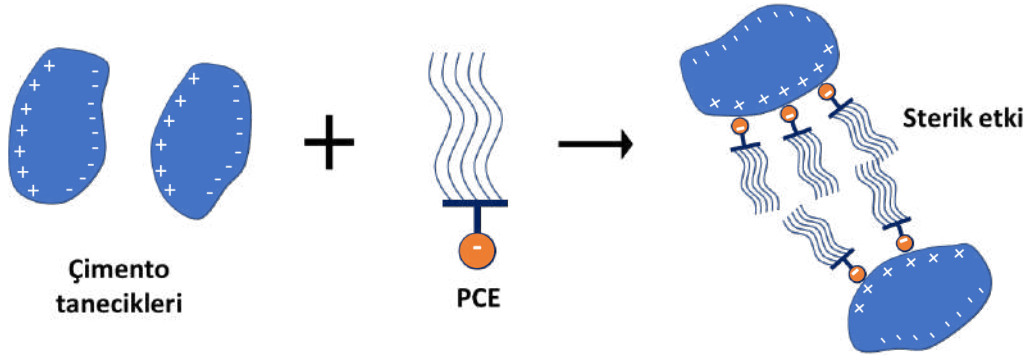
- 1. Elektrostatik Etki:** Melamin, naftalin veya PCE bazlı süperakışkanlaştırıcılar; elektrostatik itme ile çalışır. Şekil 18'de görüldüğü gibi anyonik polimerler, çimento taneciklerinin yüzeyine adsorbe olur ve taneciklerin karşılıklı olarak itici olmasına neden olan negatif yük yoğunluğunu artırır.



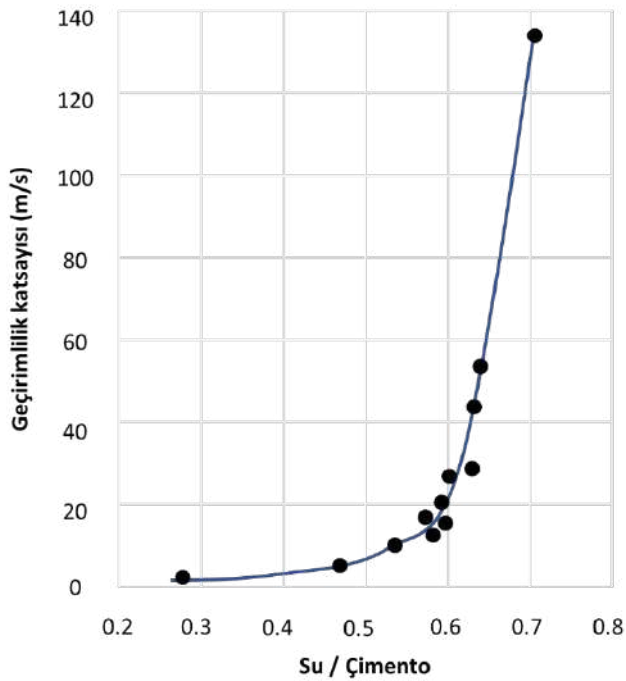
Şekil 18. Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkılarda elektrostatik itme etkisi



2. **Sterik Etki:** Sterik dispersiyon (dağılma); melamin, naftalin ve PCE dayalı süperakışkanlaştırıcılarda meydana gelir. İyonik olmayan polimerler, çimento taneciklerinin yüzeyine adsorbe olur ve yüzeyden dışarı doğru uzanır. Tanecikler birbirine yaklaşırsa zincirlerin serbest dönüşü azalır. Bu da entropinin azalmasına neden olur.



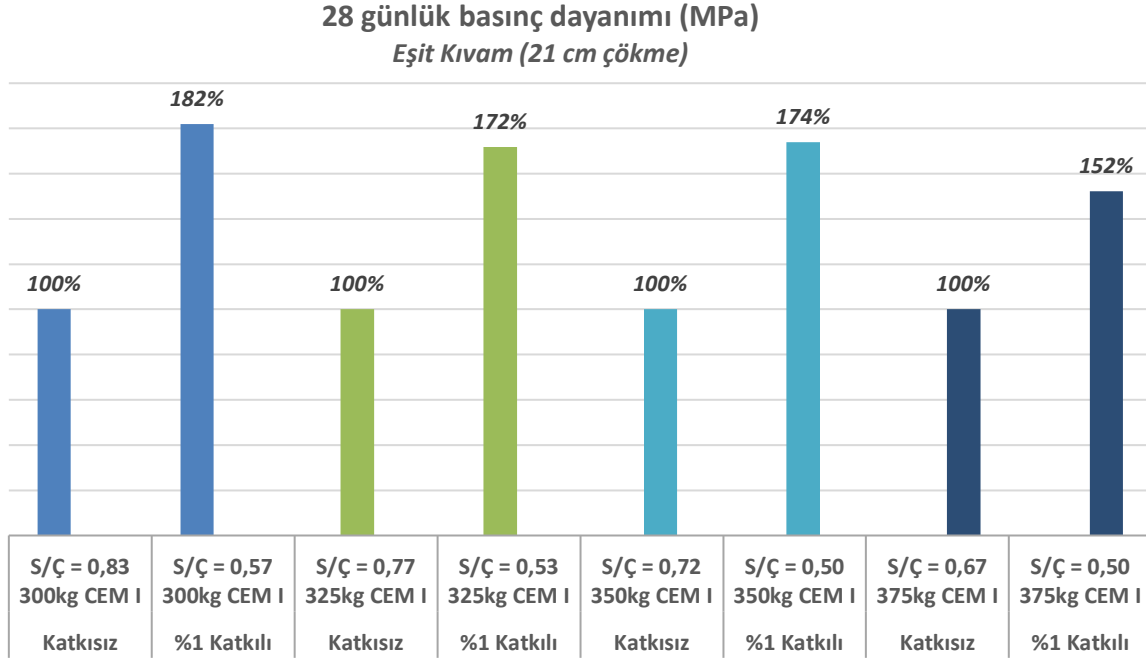
Şekil 19. Süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkılarda sterik etki



Şekil 20. Su/çimento oranı ve geçirimsizlik ilişkisi

Su/çimento oranı daha doğru bir ifade ile su/bağlayıcı oranı betonun dayanım ve dayanıklılık performansı için en önemli parametredir. Şekil 20'de görüldüğü üzere su/çimento oranının artması ile betonun geçirimsizlik katsayısı da artış göstermektedir. Özellikle 0,55 su/bağlayıcı oranına kadar lineer bir ilişki varken, bu değerden sonra eksponansiyel bir artış meydana gelmektedir. Su/bağlayıcı oranının düşürülmesi, betonun geçirimsizliğini azaltmakta ve çevresel etkilere karşı direncini arttırmaktadır. Bu da yapının servis ömrü boyunca beklenen yüksek performansı göstermesini, daha az bakım ve onarıma ihtiyaç duymasını ve daha sürdürülebilir olmasını sağlamaktadır.

KÜB Teknik Komitesi üyeleri tarafından yapılan çalışmada Şekil 21'de görüleceği üzere eşit kıvamda (21 cm çökme) farklı çimento dozajlarında katkısız ve %1 katkılı beton tasarımlarının dayanımları incelenmiştir. Tüm farklı dozajlarda eşit kıvamda katkılı beton karışımları %50 ila %80 arasında daha yüksek basınç dayanımı vermiştir. Bu durum doğrudan su/çimento oranından kaynaklanmaktadır.



Şekil 21. Beton kimyasal katkısının eşit kıvamda su/çimento oranına etkisi

Su yalıtım katkıları

Beton gibi gözenekli bir yapı tam olarak “su geçirmez” olarak tanımlanamaz ancak su/bağlayıcı oranını azaltmak dışında daha düşük geçirgenliğe, su emilimine ve agresif maddelerin daha yavaş girişine katkıda bulunabilecek katkı türleri vardır:

- Hidroskopik veya su itici kimyasallar en büyük grubu oluşturmaktadır. Bu kimyasallar; sabunlar, uzun zincirli yağ asidi türevleri, bitkisel yağlar ve petrol bazlı kimyasallardan oluşmaktadır. Yüzeyle uygulanan bu malzemeler betondaki gözenekler boyunca su itici bir tabaka oluşturmakta, ancak gözenekler fiziksel olarak açık kalmaktadır.
- İnce tanecikli inert malzemeler (talk, bentonit, silisli tozlar, kil, hidrokarbon reçineleri ve kömür katranları) ve kimyasal olarak aktif malzemeler (kireç, silikatlar ve koloidal silika) kullanılabilir. İnce tanecikli inert malzemeler, boşlukları doldurarak gözenekler boyunca suyun geçişini fiziksel olarak kısıtlar.
- Kristalize geçirimsizlik katkıları, beton içerisindeki kılcal kanallar ve çatlaklarda su ile kimyasal bir reaksiyona girerek suda çözünmeyen kristaller oluşturur. Bu malzemelerin hidrofilik yapısı kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) yoğunluğunu arttırmak için ve/veya su penetrasyonuna karşı direnç gösteren gözenek tıkama birikintileri oluşturulmasına neden olmaktadır.



Rötre azaltıcı katkılar

Rötre (büzülme) olgusu betonun çeşitli özelliklerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmaktadır. Betonda su kaybı plastik aşamada meydana gelirse buna plastik büzülme denilmektedir. Çatlamanın meydana gelmesi için çekme gerilmelerinin çekme dayanımını aşması yeterlidir. Hidrate olmuş çimento hamuru hacminin, henüz reaksiyona girmemiş çimento ve ilave edilen suya göre daha az olması durumuna ise kimyasal (otojen) büzülme oluşmaktadır. Bu büzülme çeşidi öncelikle kılcal gözenek yapısının oluşmasından sorumludur. Büzülmeyi gidermeye yönelik katkılar arasında, yüzey gerilimi kuvvetini azaltan polihidroksi bileşikler bulunmaktadır. Bu tür katkılar, yüksek performanslı betondaki yüksek büzülmeyle dengelemek veya basitçe derzleri azaltmak için kullanılmaktadır. En iyi kontrol, dereceli kalsiyum oksit ve kalsiyum sülfat veya kalsiyum alüminat içeren özel bileşikler içeren genleşen maddeler kullanılmaktadır.

Korozyon önleyici katkılar

Korozyon önleyiciler (inhibitörler), klorür saldırısı için konsantrasyon eşikini yükseltir ve korozyon riskini azaltır. ACI 222.3R Design and Construction Practices to Mitigate Corrosion of Reinforcement in Concrete Structures rehber dokümanına göre, korozyon inhibitörleri, uygun bir konsantrasyonda mevcut olduğunda, başka herhangi bir korozyon maddesinin konsantrasyonunu önemli ölçüde değiştirmeden korozyon oranını azaltan kimyasal maddeler olarak tanımlanmaktadır.

Bu katkılar çelik yüzey üzerinde elektrokimyasal olarak (anodik, katodik, karışık inhibitör) veya kimyasal olarak (kimyasal bariyer) etki ederek klorür kaynaklı korozyonu klorür-korozyon eşik seviyesinin üzerinde engeller. Bu katkılar kalsiyum nitrit içeren inorganik bir karışımı ve/veya çeşitli organik karışımları (alkanolaminler; aminler ve esterler; alkanolaminler ve aminler ve bunların organik/inorganik asitlerle olan tuzları; alkanolaminler, etanolamin ve fosfat) içermektedir. Amin türevleri ve sodyum nitrit içeren kombine organik/inorganik beton katkıları da mevcuttur.

Priz geciktirici katkılar

Prizi geciktirmek, daha iyi sıkıştırma ve daha yoğun yapıyla sonuçlanmaktadır. Bunların her ikisi de dayanıklılığı artırmaktadır.

Tablo 10'da betonun dayanıklılığını doğrudan veya dolaylı olarak geliştirmek için farklı çevresel koşullarda kullanılması faydalı olan kimyasal katkıları belirtilmektedir. Bu tabloda genel bir değerlendirme yapılmaktadır. Daha detaylı ve net bilgi için katkı üreticilerinden ürünler özelinde bilgi alınması gerekmektedir.



Tablo 10. Kimyasal katkı – çevresel etkiler matrisi

Katkı türleri	Karbonatlaşma	Klorür Atağı	Sülfat Atağı	Donma-Çözülme	Alkali-Silika Reaksiyonu
Akışkanlaştırıcı katkılar	✓	✓	✓	✓	✓
Süperakışkanlaştırıcı katkılar	✓	✓	✓	✓	✓
Su tutucu katkılar	✓	✓	✓	✓	✓
Hava sürükleyici katkılar				✓	
Su geçirimsizlik katkılar	✓	✓	✓	✓	✓
Alkali-silika reaksiyonu azaltıcılar					✓
Korozyon azaltıcılar	✓	✓			
Rötre azaltıcı katkılar	✓	✓	✓	✓	✓
Kimyasal kür malzemeleri	✓	✓	✓	✓	✓

11.5. Su

Betonun kıvamı beton içindeki su miktarına bağlıdır. Beton dayanımını ve dayanıklılığını belirleyen en önemli parametre, su/çimento (su/bağlayıcı) oranıdır. İşte bu sebeple şantiyeye teslim edilen taze betona daha fazla kıvam kazandırmak amacıyla fazladan su katmak betonun dayanımını son derece olumsuz etkilemektedir. Çimentonun hidratasyonu için gerekli su miktarı çimento miktarının yaklaşık %25'i civarındadır. Oysa, betonda kullanılan karışım suyu miktarı yeterli işlenebilme için çoğunlukla bu oranın oldukça üzerindedir. Betonda kullanılacak su miktarı arzu edilen işlenebilmeyi sağlamak için gerekli olan en düşük miktarda olmalıdır. Aksi halde, betonun dayanım ve dayanıklılık performansı olumsuz etkilenmektedir.

Betonun bünyesinde çimento ile reaksiyona girmeyen fazla suyun bıraktığı boşluklar yalnız dayanımı düşürmekle kalmamakta, boşluklardan içeri giren zararlı unsurlar (klorür, sülfat vb. zararlı etkenler) beton ve donatıya zarar vermekte ve betonun hizmet ömrünü kısaltmaktadır.



Genel olarak içilebilir nitelik taşıyan bütün sular betonda kullanıma uygundur. Ancak, betonda kullanılacak suyun içilebilir özellikte olması şart değildir. Betondan geri kazanılmış sular, kaynak suları, doğal yüzey suları ve endüstriyel atık sular bir takım ön deneyler yapılarak standart gerekliliklerini karşılamak kaydıyla beton üretiminde kullanılabilir. Deniz suyu ve acı göl suları, içerisinde donatı bulunmayan betonlarda kullanılabilir. Kanalizasyon (lağım) suları ise beton yapımı için uygun değildir. Betonda kullanılacak karışım suyu, TS EN 1008'e uygun olmak zorundadır.

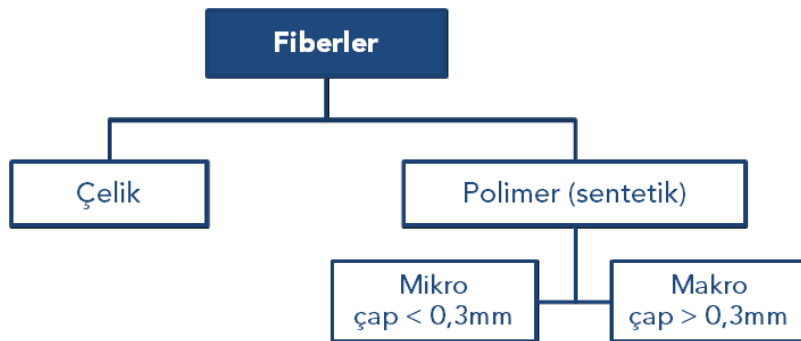
Karışım suyu içinde bulunabilecek tuz, asit, yağ, şeker, lağım ve endüstriyel atıklar gibi bazı maddeler betonda istenmeyen etkiler yaratabilmektedir. Karışım suyunun özelliklerinin testlerle analiz edilmesi ve kalitesinin belli aralıklarla denetlenmesi şarttır. Beton üretiminde kullanılan karışım suyunun kalitesi; betonun priz süresi, dayanım kazanma hızı ve donatının korozyona karşı korunmasını etkilemektedir.

11.6. Fiberler

Fiberlerin beton, harç ve sıva gibi çimentolu malzemelere dahil edilmesi aşağıda belirtilen malzeme özelliklerini iyileştirmektedir:

- ⇒ Süneklik
- ⇒ Tokluk
- ⇒ Çatlak direnci
- ⇒ Çekme dayanımı
- ⇒ Geçirimsizlik
- ⇒ Yangın direnci
- ⇒ Darbe / kırılma direnci
- ⇒ Yorulma direnci
- ⇒ Aşınma dayanımı

Betonda kullanılan çelik ve polimerik (sentetik) fiberlerin özellikleri TS EN 14889 Standartlarında belirtilmektedir. Şekil 22'de belirtildiği gibi sentetik fiberler çaplarına göre mikro ve makro olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır.



Şekil 22. Betonda kullanılan fiberlerin sınıflandırılması



Beton teknolojisindeki gelişmelerin bir örneği olan sentetik fiber donatılar projelere sunduğu çeşitli avantajlar sebebiyle farklı mühendislik uygulamalarında tercih edilmektedir. En yaygın kullanım alanları endüstriyel zemin betonları, püskürtme betonlar, beton yollar, tünel betonları, slab-track ray altı betonları ve prekast segmentler olan sentetik fiber donatılar gerek yapısal üstün özellikleri gerekse maliyet ve uygulama avantajları nedeniyle geleneksel çelik donatıya güçlü bir alternatif olarak var olmaktadır.

Sentetik fiber donatılar; makro ve mikro sentetik fiber donatılar olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Makro sentetik fiberler, zemin betonları gibi belirli uygulama alanlarında geleneksel donatı ihtiyacını tamamen ya da kısmen ortadan kaldıran fiber çeşitleridir. Mikro sentetik fiber donatılar ise ana amacı rötre çatlaklarını engellemek olan ve beton içerisinde ikincil donatı olarak kullanılan fiber çeşitleridir. Ayrıca, tamir harçları ve sıva işlerinde de kullanılmaktadır.

Mikro sentetik fiberler aşağıdaki özellikleri sayesinde betonun dayanıklılığına katkıda bulunmaktadır:

- Beton içerisinde 3 boyutlu dağılarak, erken yaşta beton yüzeyinde su kaybı nedeniyle oluşabilecek büzülme çatlaklarının oluşumunu engeller.
- Yapısı gereği korozif ortamlardan olumsuz etkilenmez.
- Alkalilere karşı dirençlidir.
- Darbe direnci yüksektir.
- Beton yüzeyinde tozuma oluşmasını engeller.
- Donma-çözülme etkisine karşı dayanıklıdır.
- Yangın direnci yüksektir.
- Çatlak oluşumunun minimize edilmesiyle betona dışardan zararlı madde girişi engellenir. Bu sayede betonun dayanıklılığı artar.

Makro sentetik fiberler aşağıdaki özellikleri sayesinde betonun dayanıklılığına katkıda bulunmaktadır:

- Beton içerisinde 3 boyutlu çalışarak yüzeyde oluşan negatif momentlere karşı basınç donatısı görevini üstlenir.
- Yapısı gereği korozif ortamlardan olumsuz etkilenmez.
- Alkalilere karşı dirençlidir.
- Yüksek eğilme, çekme ve kesme dayanımı ile darbe ve aşınmalara karşı dirençlidir.
- Uzun dönem dayanıklılık performansı sağlar.
- Büzülme çatlaklarını ve ısı genleşme etkilerini engeller.



KAYNAKLAR

1. C. W. Yu, John W. Bull, Durability of Materials and Structures in Building and Civil Engineering, Whittles, 2006.
2. J. Bai, 10 - Durability of sustainable concrete materials, Editor(s): Jamal M. Khatib, In Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, Sustainability of Construction Materials, Woodhead Publishing, 2009.
3. Handbook on Concrete Durability, Indian Concrete Institute Technical Committee (ICI-TC/08), 2019.
4. S., Marios, Concrete durability A practical guide to the design of durable concrete structures, Thomas Telford, 2010.
5. Chloride Resistance of Concrete, Cement Concrete & Aggregates Australia, 2009.
6. Chen, W.F., & Liew, J.Y.R. (Eds.). (2002). The Civil Engineering Handbook (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420041217>
7. Alexander, M., Bentur, A., & Mindess, S. (2017). Durability of Concrete: Design and Construction (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315118413>
8. Page, C.L., Page, M.M., Durability of Concrete and Cement Composites, CRC, 2007.
9. Torrent, R.J., Neves, R.D., & Imamoto, K.-I. (2021). Concrete Permeability and Durability Performance: From Theory to Field Applications (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429505652>
10. Literature Review of Concrete Durability & Service Life Requirements in Global Codes And Standards, Pivot Engineers, 2020.
11. Türkel, S., Yazıcı H., Ün H., Yiğiter H., Felekoğlu B., Felekoğlu T. K., Aydın, S., Yardımcı, M. Y., Topal, A., Öztürk, U. A. (2012). BETON. Bülent Baradan (Ed.). İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları.



TÜRKİYE PAZARINI %90 ORANINDA TEMSİL EDİYORUZ.



Akkim

CHRYSO
SAINT-GOBAIN

EGECRETE
A licensee of EUCLID CHEMICAL

FOSROC

KORDSA

LYKSOR
Innovation & Trust

MAPEI
YAPIŞTIRICILAR - MASTİKLER - İNŞAAT KİMYASALLARI

onbironendüstriyel

Polisan
YAPIKİM

Sika®
BUILDING TRUST

YAPICHEM

kub.org.tr