

Betonun Dürabilitesi * (Dayanıklılık, Kalıcılık)

Bülent Baradan¹

Serdar Aydın²

Özet

Beton basınç dayanımının artışı betonun birçok özelliğini olduğu gibi, dayanıklılığını da olumlu etkilemektedir. Ancak yükler açısından istenen dayanımı sağlayan kaliteli bir betonarme eleman bile tasarım aşamasında dikkate alınmamış etkiler nedeniyle kısa sürede bozularak kullanılmaz hale gelebilir ya da büyük bakım ve onarım masraflarına yol açabilir. Betonun bozulmasına yol açan bu etmenler fiziksel, kimyasal, biyolojik ve mekanik kökenli olabilir. Bu faktörler betonarme elemanlar üzerinde bazen birleşik etki yaparak birbirlerini de olumsuz yönde etkiler. Betonarme yapıların servis ömürlerinin azalmasına yol açan iç ve dış kökenli bu etmenler bu çalışmada kapsamında özet olarak sunulmuştur.

1. GİRİŞ

Yapı malzemelerinin ve yapıların işlevlerini servis ömürleri boyunca bozulmadan yerine getirmelerine durabilite, dayanıklılık veya kalıcılık adı verilir [1].

1970'li yılların ortalarına kadar betonarme yapıların çok dayanıklı, uzun ömürlü bir yapı türü olduğuna inanılmakta idi. Bu inanış betonun zamanla dayanımının artmasına ve çeliğin beton pas payı tabakası tarafından korozyona karşı korunması ile açıklanabilir. Gerçekten beton teknolojisine uygun projelendirilmiş, üretilmiş, geçirimsiz, yalıtımlı ve korunmuş yapılar için bu kavram doğrudur.

Ancak son 20-30 yıla kadar, betonarme yapıların kalıcılığı

konusunda yeterli bilgi birikimi olmadığından, yalnızca dayanım göz önüne alınarak üretilen, değişik sanat yapılarının bilgi eksikliği ve uygulama hataları nedeniyle önemli hasarlar gördüğü tespit edilmiştir. Örneğin, birçok Hollywood film sahnesinde gördüğümüz, 1932 yılında inşa edilen Los Angeles'taki Altıncı Cadde Viyadük köprüsü bugün Alkali silika Reaksiyonu nedeniyle oluşan çatlaklar sonucunda önemli ölçüde hasar görmüştür. Köprünün yapıldığı yıllarda alkali-silika reaksiyonu henüz bilinmediğinden, aktif silis içeren agrega ve yüksek oranda alkali içeren çimento bir arada kullanılmıştır. Elli yıl içerisinde ortaya çıkabilecek önemli bir depremde yıkılma olasılığı %70 olarak görülen köprünün, yerine yeni bir köprü yapılması kararlaştırılmıştır [2]. Öngörülme durabilite sorunlarından dolayı servis dışı kalma tehlikesinde olan bu ve buna benzeyen birçok yapı gerek ülkemizde gerekse gelişmiş birçok ülkede mevcuttur. Bu yapıların yıkılarak yerine yenilerinin yapılması veya onarılması gerekmektedir. Gelişmiş ülkelerdeki, inşaat faaliyetlerinin %40'ını tamir ve bakım işlerinin oluşturduğu düşünüldüğünde konunun önemi daha iyi anlaşılmaktadır [3].

Avrupa'da özellikle 2. Dünya savaşıdan sonra yapılan çok sayıda sanat yapısı, ABD'de çok sayıda köprü önemli durabilite sorunları yaşamış ve yaşamaktadır. Ülkemizde ise özellikle Marmara depreminden sonra göçen birçok binada donatılarının korozyon nedeniyle neredeyse sadece izlerinin kaldığı gözlenmiştir.

Durability of Concrete *

The increase of compressive strength positively affect the durability of concrete, like its all other properties. However, a reinforced concrete structure that is resistant to external loads may deteriorate and decrease its serviceability and needs costly major repair and maintenance due to some factors that are not taken into account during its design stage. The factors that lead to deterioration of reinforced concrete structures may be physical, chemical, biological and mechanical origin. Also they may have a combined trigger effect over the structure. External and internal factors that decrease the service life of reinforced concrete structures are summarized within the scope of this presentation.

* Beton 2013 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

⁽¹⁾ Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, bulent.baradan@deu.edu.tr

⁽²⁾ Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, serdar.aydin@deu.edu.tr

Günümüzde, bazı durabilite sorunlarının mekanizması tam olarak açığa kavuşmamakla birlikte, bu konuda gün geçtikçe ciddi ilerlemeler kaydedilmektedir. Örneğin beton üzerinde sülfatların zararlı etkisi 1877 yılından beri bilinmekte olup, ilk araştırmalar 19. yüzyılın sonunda Candlot ve Michaelis tarafından yapılmıştır [4]. Bunu karşın, sülfat etkisinin özel bir türü olan Tomasit etkisi ise ilk olarak 1962 yılında tespit edilmiş olup, 1965 yılında ABD’de diğer birkaç tomasit oluşumu vakasıyla birlikte yayınlanmıştır. Aynı şekilde, ülkemizde özellikle Ege bölgesindeki viyadük ayaklarında ciddi hasarlara neden olan alkali silika reaksiyonu ilk olarak ABD’de 1940 yılında tespit edilmiştir [5].

Yapıların bozulmasına yol açan fiziksel, kimyasal, biyolojik ve mekanik kökenli etmenler Şekil 1’de görülmektedir. Mekanik yolla oluşan hasarlar arasında, darbe, aşınma, erozyon ve oyulma (kavitasyon) etkileri sayılabilir. Kimyasal etkenler dışarıdan beton içine sızan zararlı maddelerden kaynaklanabileceği gibi, beton bileşimini oluşturan malzemelerden de kaynaklanabilir. Bunlar arasında alkali-agrega reaksiyonları, sülfat etkisi, karbonatlaşma, korozyon, bazı asit ve tuz etkileri sayılabilir. Bozulmanın fiziksel nedenleri; donma-çözülme, buz çözücü tuzlar, yüksek sıcaklıklar vb. etkilere [1].

Betonarme yapıların, çeşitli bozulma süreçleri nedeniyle kısa sürelerde işlevselliğini yitirmeleri sadece ekonomik ve teknik bir problem olarak düşünülmemelidir. Bu durum kıt kaynakların verimsiz olarak kullanımı anlamına da gelmektedir. Doğal kaynakların verimsiz kullanımı, çevresel-ekolojik problemlere yol açar. En az bakım ve onarım gerektiren uzun ömürlü yapılar, başlangıç giderleri nispeten az olan fakat sık bakım gerektiren yapılara kıyasla daha ekonomiktirler.

Betonarme yapıların kalıcılığını etkileyen kimyasal ve fiziksel işlemlerin hemen hepsinde ana faktör, su ve beton bünyesindeki boşluklar ile çatlaklar içindeki taşınımıdır. Gazların, suyun ve zararlı maddelerin beton içine taşınımı ve bunların beton ile etkileşimi, bozulma sürecinin gelişimi açısından çok önemlidir. Taşınımın boyutu, hızı ve etkisi büyük ölçüde beton bünyesindeki boşluk ve çatlakların çapı ve dağılımına ayrıca beton yüzeyindeki “mikroklima” bağlıdır. Agregata beton içinde çimento hamuru ile kaplanmış olduğundan ve normalde az boşluk içermesi nedeniyle, betonun geçirimsizliği büyük ölçüde çimento hamurunun ve agregata-hamur arayüzünün geçirimsizliğine bağlıdır. Çimento hamuru ve betondaki çatlak ve boşluklar; çoğunlukla beton teknolojisi kurallarına uyulmaması sonucu, yetersiz sıkıştırma, yetersiz kür, kimyasal reaksiyona girmeyen fazla suyun terleme, buharlaşma olayları veya hava sürükleyici katkı maddeleri eklenmesi gibi nedenlerle oluşur. Çimento hamurundaki ve betondaki boşluk-

lar mikro, kapiler ve makro olarak gruplandırılabilir. Kalıcılığı büyük ölçüde etkileyenler kılcal (kapiler) ve makro boyutta olanlardır.

Günümüzde Üniversiteler ve değişik araştırma kurumlarınca bu konuda çok sayıda araştırma yapılmaktadır. Web of Science [6] verilerine göre, 1980 yılından sonra günümüze kadar yapılan çalışmalar anahtar sözcük olarak “Beton” ve “Durabilite” kullanılarak değerlendirildiğinde beton konusunda yapılan araştırmaların %5’lik bir kısmının durabilite ile ilgili olduğu görülmüştür. Durabilite ile ilgili yapılan çalışmalar 1980’li yıllarda oldukça düşük düzeyde iken, eksponansiyel bir artış göstererek günümüze ulaştığı görülmektedir. Birçok değişik kaynaklı kalıcılık sorunu laboratuvarlarda kapsamlı programlarla irdelenmektedir. Buna rağmen bazı konularda çelişik sonuçlara rastlanmaktadır. Bu farklılıkların değişik nedenleri vardır. Bunları aşağıdaki şekilde özetlemek mümkündür:

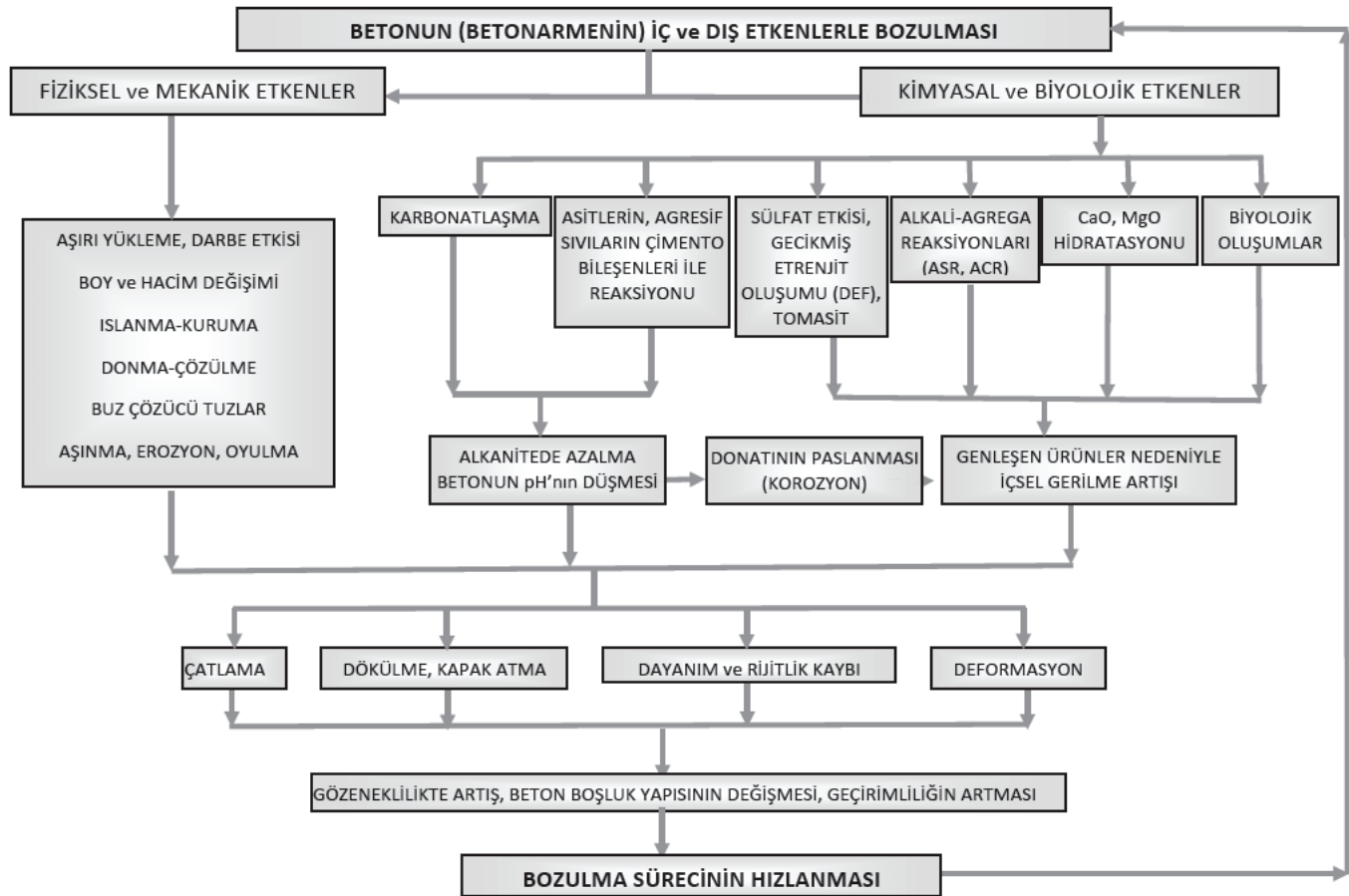
- 1) Doğada uzun yıllarda (10-20 yıl) gerçekleşen olayları, laboratuvar ortamında kısa sürede benzeştirme çabaları. Örneğin, betonun asitlere dayanıklılığını incelerken, asit konsantrasyonu ve etki süresi iyi ayarlanmazsa, deney örneğine ya hiçbir şey olmaz ya da örnek tamamen dağılır.
- 2) Betona etki eden iç ve dış faktörler çok sayıdadır. (Malzeme cinsleri, oranları, kür koşulları, iç ve dış saldırı türleri, vb.)
- 3) Deney sonuçlarının istatistiksel açıdan anlamlı sayıda (örneğin, en az 30) olması ve tekrarlanabilir olması gerekir. Oysa ki, birçok çalışmada üç örneğin ortalaması yeterli görülür ve deneyler tekrarlanmaz.
- 4) Bazı deneylerin uluslararası kabul görmüş, revizyonları tamamlanmış standartları yoktur veya yeterli kapsamda değildir.
- 5) Birçok laboratuvarın özellikle ortam koşulları sabit tutulmamaktadır. Bazı hassas deneylerde, insan hatalarına rastlanmaktadır.

Ancak tüm bu sorunlara rağmen, günümüzde durabilite konusunda önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Artık yeni beton standardı TS EN206-1 [7] ve bu standardın uygulanmasına yönelik tamamlayıcı standard TS13515 [8]’de dayanımın yanı sıra çevresel etki sınıfları da devreye girmiştir. Esasen bir yapının farklı elemanları farklı çevresel etkilere maruzdur. Yapının iç kısımlarındaki betonarme elemanlar genellikle kuru ortam koşullarına maruz olup, dışarıdan fiziksel ve kimyasal bir etkiye açık değildir. Bununla birlikte, yapının dış kısmındaki betonarme elemanlar bu tür etkilere her zaman maruz kalabilir. Ancak, bir yapının ortam koşullarına açık betonarme elemanlarını farklı bir betonla üretmek pratik olarak mümkün

olmamakla birlikte, böyle bir uygulama anlamlı da değildir. Bu nedenle, söz konusu standartlara göre, ülkemizde inşa edilecek bir yapıda kullanılacak en düşük beton sınıfı dolaylı olarak C30/37 olmaktadır. Bu beton sınıfı, Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkındaki Yönetmeliğe göre en düşük beton sınıfı olan C20/25 sınıfından daha yüksektir. Bir başka deyişle, ülkemizde yapılacak yapılarda kullanılacak en düşük beton sınıfının C30/37 olması gerektiği söylenebilir. Betonarme ve Beton standartlarındaki bu ve benzeri karışıklıkların düzeltilmesi ve özellikle proje yapan meslektaşlarımızın bu konuda aydınlatılması gerekir. Son yıllarda, beton üreticisi ve kullanıcılarının bilinçlenmesinin ve kalite artışının bir sonucu olarak C30/37 sınıfındaki betonların kullanımının arttığı

görülmektedir. 2012 yılı verileri İzmir bölgesinde KGS denetimi altındaki Hazır Beton firmalarınca dökülen C30/37 sınıfı beton miktarının C20/25 sınıfında dökülen betonlardan çok daha fazla olduğunu göstermektedir.

Özellikle denetimli hazır beton şirketleri sayesinde artık yüksek kaliteli beton üretimi sorun olmaktan çıkmıştır. Söz konusu çevresel etki sınıfına uygun seçilmiş kaliteli taze beton karışımlarının, beton teknolojisine uygun şekilde kalıbına yerleştirilmesi, sıkıştırılması, bakımı ve korunması sağlandığı takdirde, betonarme projenin de doğru yapılması halinde yapıların servis ömürleri boyunca herhangi bir sorun çıkartmayacaktır.



Şekil 1. Beton veya betonarme yapıların iç ve dış etmenlerle bozulması

2. BETONUN FİZİKSEL ETKENLERLE BOZULMASI

Betonun bozulmasına neden olan fiziksel ve mekanik etkenler iki ana grupta toplanabilir; yüzey aşınması nedeniyle betonda kütle kaybına sebep olanlar ve betonda çatlama gibi hasarlara yol açanlar. Aşınma, erozyon ve oyulma olayları ilk grupta incelenirken, ıslanma-kuruma, boy ve hacim değişimleri, donma-çözülme, aşırı yüklenme, yüksek sıcaklıkların ve sıcaklık değişimlerinin etkileri ikinci grupta yer alır. Uygulamada beton, fiziksel ve kimyasal birçok etkiye tekrarlı olarak maruz kalabilmekte ve bu etkiler bir diğerinin gelişimini hızlandırabilmektedir. Örneğin, fiziksel etkilerle betonun çatlaması geçirimsizliğinin artmasına yol açarak betonun kimyasal nedenlerle bozulmasını kolaylaştırabilmektedir. Benzer şekilde betonun kimyasal süreçlerle bozulması sonucu gözenekliliğinin artması, aşınma gibi fiziksel etkilere dayanıklılığını büyük ölçüde azaltabilmektedir [9-11].

2.1 Aşınma, Erozyon ve Kaviteasyon

Abrasif aşınma beton yüzeylerin (döşeme, zemin betonu, basamak, yol betonu, vb.) kuru sürtünme etkisi ile zamanla artan kütle kaybıdır. Aşındırıcı etki; yaya trafiğinden, araç tekerleklerinden, iş makinesi paletlerinden veya ağır cisimlerin sürüklenmesi gibi etkenlerden kaynaklanır. Şekil 2a'da bir otoyol rampasındaki aşınma görülmektedir. Erozyon ise içinde askı halinde parçacıklar bulunan sıvıların özellikle yüksek hızlarda beton yüzeyini çizerek yine abrasif yolla aşındırmasıdır. Bu olaya daha çok su yapılarında ve beton borularda rastlanır [12]. Şekil 2b'de Swaziland'da aşırı dercede zarar görmüş bir kanal yapısının üzerine kaplama uygulanarak tamiri işlemi görülmektedir [13].

Kaviteasyon, su yapılarında rastlanan oyulma olayıdır (Şekil 2c). Suyun hızla aktığı su yapılarında yüzey geometrisinde herhangi bir değişiklik akımın sürekliliğini bozup, düşük basınç bölgeleri oluşmasına yol açar. Akan suyun statik basıncı, sudaki buhar basıncından daha düşükse bu bölgede içi hava dolu kabarcıklar oluşur. Oluşan kabarcıklar suyun statik basıncının yüksek olduğu bölgelere taşındığında buhar su damlacıkları şeklinde yoğunlaşıp aniden dibe çöker. Böylece beton yüzeyinde patlama etkisine benzer şekilde, su darbeleri ve basınç dalgaları meydana gelir. Bu olayın sürekliliği beton yüzeyinde oyulmalara yol açar, özellikle dik açılı yüzeylerde bozulmalar görülür.

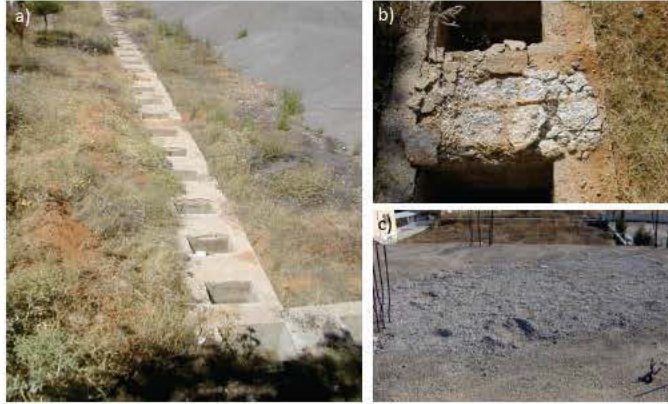


Şekil 2. Aşınma, Erozyon ve Kaviteasyon hasarları
a) Otoyol rampasında aşınma b) Erozyona uğramış kanal
c) Baraj dolusavağında kaviteasyon

Betonun aşınma dayanıklılığı, beton yüzeyinin birkaç mm derinliğindeki çimento matrisinin boşluk yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Bu bağlamda, düşük S/Ç oranı ile çalışılması, taze betonda ayrışma ve aşırı terlemenin önlenmesi ve betonun bakımının (kür) eksiksiz ve zamanında yapılması gereklidir. Özellikle su yapılarının projelendirilmesinde alınacak önlemlerle oyulma ve aşınma olaylarını azaltmak olanaklıdır. Suyun akış düzgünlüğünü bozacak ve hızının aniden değişmesine yol açacak uygulamalardan kaçınılmalıdır. Genelde basınç dayanımı yüksek olan betonun aşınmaya karşı da dayanıklılığı yüksektir. Ancak beton sınıfı tek parametre olmayıp, yüzeyin aşınmaya karşı dayanıklılığı bazı önlemlerin (yüzey sertleştirilmesi vb.) alınması ile artırılabilir. TS EN 206/1'e göre C30/C37 ve üzerindeki bir beton sınıfının tercih edilmesi, çok şiddetli etki durumunda ise beton sınıfının C35/45 ve üzerinde olması tavsiye edilir [12].

2.2. Sertleşmiş Betonda Donma-Çözülme Olayı

Suya doygun haldeki sertleşmiş beton don etkisinde kalınca, beton içindeki kapiler boşluklardaki su donar ve genişir. Çözülme takip eden yeniden donma olayı sonunda bu genişleme miktarı kümülatif olarak artar. Genleşme sonucu oluşan gerilmelerin mertebesi betonun çekme dayanımını aştığı takdirde betonda kabuk atma, çatlama, ufalanma şeklinde bozulmalar görülür. Yollarda kullanılan buz çözücü tuzlar ise donatıyı paslandırmasının yanı sıra, oluşan hidrolik basınç nedeniyle özellikle sanat yapılarındaki betonarme elemanlarda hasarın şiddetini artırır [14-16]. Şekil 3a ve 3b'de donma-çözülme nedeniyle hasar görmüş bir yapının temel ve soket betonu, Şekil 3c'de ise taze halde donma etkisine maruz kalmış bir yapının döşeme betonu görülmektedir [17].



Şekil 3. a ve b) Uşak Eşme’de donma-çözülme hasarına uğramış betonarme temel c) Denizli’de bir betonarme döşemede oluşan taze beton don hasarı

Sertleşmiş betonun donma olayına karşı dayanıklılığını etkileyen en önemli iki etken, betonun doygunluk derecesi ve boşluk yapısıdır. Kritik doygunluk değeri altında betonun dona dayanıklılığı oldukça iyidir. Kuru betonun ise don nedeniyle zarar görmeyeceği söylenebilir. Bu nedenle beton elemanları şiddetli iklim koşullarında su emmeyecek şekilde korumak, beton dökümünü yapının kurumasına izin verecek şekilde kış mevsiminden önce yapmak gibi basit önlemler olarak düşünülebilir.

Kritik doygunluk değeri beton gibi gözenekli bir yapıda, kapalı bir kaptakinden farklıdır ve birçok faktöre bağlıdır. Hava sürükleyici katkı maddesi kullanılmasıyla, beton içinde çok küçük çaplı (ortalama 50 μm) ve sık aralıklı (200-250 μm) hava baloncukları oluşturularak, buzun beton içinde patlama basıncına ulaştığı kritik doygunluk değerini etkisiz kılmak mümkündür [15]. Böylelikle, donmaya başlayan buzun genişlemesine izin veren alan yaratarak hasar oluşumunu engeller. Hava sürükleyici katkı maddesi kullanımının yanı sıra, betonda kapiler boşlukları en alt düzeye indirecek önlemler de alınmalıdır. ACI 201R [10]’de, beton kritik doygunluk derecesindeyken uzun süreli donma etkisine maruz kalmadan önce 28 MPa (orta şiddette etki durumunda 21 MPa) basınç dayanımına ulaşması ve donma etkilerine dayanıklılık açısından S/Ç oranının 0.5’i aşmaması önerilmektedir. Hava kabarcıkları arasındaki uzaklık (önerilen mesafe 200-250 μm) don etkisinden zararı önleyecek şekilde ayarlanmalıdır. Donma-çözülme etkisinin şiddetini göz önüne alarak ACI 201R tarafından beton içinde oluşturulması önerilen hava içerikleri, agrega en büyük tane çapına bağlı olarak %5-7.5’dir.

Aydın vd. [18] tarafından yapılan çalışmada hava sürükleyici katkıların betonun donma-çözülme dayanıklılığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Şekil 4’de 350 kg/m³ çimento dozajlı hava katkısız ve çimento ağırlığının %0.025’i oranında hava sürükleyici katkı içeren (%4.6 oranında hava içeren) beton örneklerinin (S/Ç oranı 0.60, 28 günlük küp basınç dayanımı 30 MPa) 140 kez donma-çözölmeye maruz kaldıktan sonraki durumlarını göstermektedir. Görüldüğü gibi, hava sürükleyici katkı kullanılmayan beton elle ufalanacak düzeyde dayanım kaybederken, hava sürükleyici katkı kullanılan betonda çatlak dahi oluşmamış ve herhangi bir dayanım kaybı göstermemiştir.



Şekil 4. 140 donma-çözölme devrine maruz kalmış beton örnekler

Geçirimsizliği azaltan tüm faktörler, dona dayanıklılığı da artırmaktadır. Yüksek çimento dozajlı, düşük su/çimento oranlı karışımların dona dayanıklılığı belirgin bir şekilde artmaktadır.

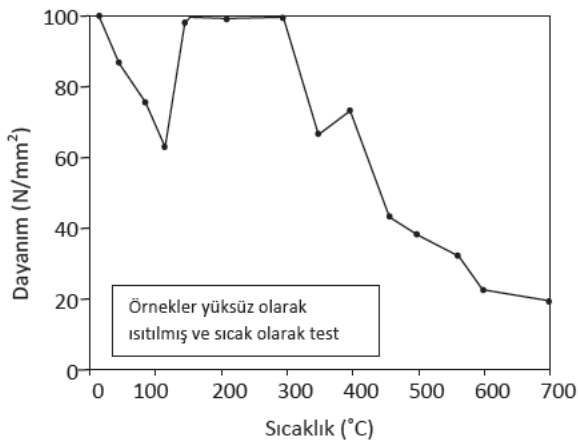
TS EN 206-1 standardı [7], donma-çözölme tehlikesinin bulunduğu ortamda buz çözücü tuzlara ve deniz dalgalarına maruz betonarme yapılarda kullanılması gerekli en küçük beton dayanım sınıfını C30/37, en büyük S/Ç oranını 0.45, en az çimento dozajını 340 kg/m³ ve en az hava içeriğini ise %4 ile sınırlamaktadır. Ayrıca agreganın da donma-çözölmeye dayanıklı olması istenmektedir.

2.3 Yüksek Sıcaklığın Betona Etkisi

Beton birçok yapı malzemesine kıyasla yüksek sıcaklık ve yangın etkisine karşı daha dayanıklı bir malzemedir. Yüksek sıcaklık altındaki beton belirli bir süre için önemli bir zarar görmez ve zehirleyici gaz veya duman çıkarmaz. Termik iletkenlik katsayısının nispeten düşük olması nedeniyle betonarme yapılar da beton, donatı çeliğini yüksek sıcaklığa karşı korur. Ancak bu dayanıklılık sınırlı süreler ve belirli sıcaklık dereceleri içindir [19-21]. Yüksek sıcaklıklar betonda, dış yüzeylerde ayrılmaya,

kabuk halinde dökülmeye neden olmaktadır. Betonarme elemanlarda çatlakların oluşumu daha çok ek yerlerinde, betonun iyi sıkıştırılmamış bölgelerinde ve donatıların bulunduğu bölgelerde görülür. Özellikle paspayının az tutulduğu, donatının açıkta olduğu durumlarda, çelik ısıyı çok iyi iletir, zararın mertebesini artırır.

Yüksek sıcaklıkların çimento hamurunun mekanik özelliklerine etkisi Şekil 5'de verilmiştir [22]. 50-120 °C sıcaklık aralığında dayanımdaki düşüş, hamurdaki su tabakalarının şişmesi nedeniyle bağların zayıflamasına bağlanmaktadır. Dayanımların bu sıcaklıktan sonra tekrar kazanılması termal kurumanın yararlı etkisinden kaynaklanmaktadır. Termal dehidratasyonun bu yararlı etkisi, mekanik özelliklerin bozulmasına neden olan jelin dehidratasyonu ve mikro çatlakların oluştuğu 300 °C'nin üzerinde sona erer. Bu sıcaklığın üzerinde mekanik özelliklerin bozulması üzerinde porozite artışının başlaması da etkin rol oynamaktadır. Sıcaklık 300 °C'ye ulaştığında C-S-H arayüzeylerindeki su, C-S-H ve sülfat alüminattan gelen kimyasal bağ suyunun bir bölümünün kaybedilmesi mikro çatlaklara yol açmaktadır. Mikro çatlaklar önce (yaklaşık 300 °C'de) Ca(OH)_2 'nin toplandığı bölgelerde ve daha sonra hidrate olmamış tanelerin bulunduğu bölgede (yaklaşık 400 °C'de) görülür. 400 ile 600 °C arasındaki yüksek sıcaklıklar sertleşmiş çimento hamurunda boşluk sisteminin tamamen kurumasına, hidratasyon ürünlerinin ayrışmasına ve C-S-H jellerinin parçalanmasına yol açar. 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda soğutulma sonrası örneklerin parçalanması, o sıcaklıkta kalsiyum hidroksitinin ayrışması ve bu sıcaklıktan soğuma sonunda tekrar hidrate olarak genleşmesi ile açıklanmaktadır [15, 23, 24]. Yangın söndürme çalışmaları sırasında püskürtülen su CaO 'i tekrar Ca(OH)_2 'e dönüştürür ve hacimde genleşme görülür. Kısa sürede büzülen ve genleşen beton içinde oluşan parazit gerilmeler hasarın büyümesine neden olur [19].



Şekil 5. Çimento hamurunun basınç dayanımının sıcaklıkla değişimi

Agrega porozitesi ve mineralojisi yüksek sıcaklığa maruz kalan betonun davranışı üzerinde önemli bir etki yapar. Yaygın olarak kullanılan agregaların birçoğu belli sıcaklıklara kadar ısıtıldığında fiziksel olarak bozulur. Kireçtaşı ve bazalt agregaları 650 °C'ye kadar ısıtıldığında kalıcı termal genleşmeler gösterir. Karbonat kökenli agregalar 700 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kimyasal olarak CaO ve CO_2 'ye ayrışır. Bu nedenle üretilen betonun yüksek sıcaklıklarda iyi performans göstermesi için kullanılan agreganın hem fiziksel hem de kimyasal olarak termal stabilitesi yüksek olmalıdır [25].

Yüksek dayanımlı betonlar geçirimsizliklerinin yüksek olmasından dolayı yüksek sıcaklık etkisinden daha fazla hasar görmektedir. Betonun bu geçirimsiz yapısı suyun buharlaşarak dışarı çıkmasına engel olmakta, oluşan hidrostatik basınç betonun patlayarak parçalanmasına yol açmaktadır. Düşük dozajlarda polipropilen türü liflerin (hacimce %0.1-0.2) kullanımı bu tür hasarların oluşumunu önler [26].

Paspayı tabakası yeterli kalınlıkta, çatlaksız ve iyi kalitede olmalıdır. Donatı tipi de yangın etkisindeki betonarme binalarda önemli olmaktadır. Donatı "kritik sıcaklık" denilen bir sıcaklığın üzerine çıkınca, belirli süre içinde çekme dayanımında azalmalar görülür. Özellikle sert ve öngerilme donatılarında çok yüksek olmayan sıcaklık derecelerinde (300-400 °C) %50'ye varan dayanım kayıpları görülmektedir. Bu nedenle beton paspayı tabakası, sıva, izolasyon maddeleri, vb. maddelerin kalınlığı, çeliği yeterli süre yüksek sıcaklık etkisinden koruyacak şekilde seçilmelidir. TS4065'e göre [27], betonarme veya betonarme-çelik kompozit elemanların yangına karşı 2 saat dayanıklı olabilmesi için, içindeki çelik profil veya donatının en dışta kalan kısımlarının (paspayı) en az 4 cm kalınlığında beton ile kaplanmış olması gerekmektedir. Bu şartın yangın riski fazla olan yapılar için sağlanması daha doğru olur. Ayrıca, yüksek sıcaklığa dayanıklı özel sıvaların kullanımı çok yararlı olacaktır.

3. BETONUN KİMYASAL ETKİLENME SONUCU BOZULMASI

Betonda ortaya çıkan zararlı kimyasal reaksiyonlar kendini, betonun gözenekliliğinin ve geçirimsizliğinin artması, çatlaklar, dökülmeler, kapak atmalar ve betonun yumuşaması, dayanımını ve rijitliğini kaybetmesi şeklinde gösterir. Kimyasal reaksiyonların gelişimi, büyük ölçüde zararlı maddelerin beton bünyesine taşınım hızına dolayısıyla betonun geçirimsizliğine bağlıdır. Tüm kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi, sıcaklık reaksiyon hızını arttıran bir faktördür. Bunun nedeni sıcaklığın iyon veya moleküllerin hareketliliğini arttırmasıdır. Kimyasal reaksiyonlar değişik tiplerde oluşabilir ve çoğunlukla fiziksel ve biyolojik etkenlerle bir arada ve peş peşe gelişip betonun bozulmasına neden olurlar. En çok karşılaşılan kimyasal saldırılar sülfat, asit ve alkali saldırılarıdır. Deniz

suyu ve tuz etkileri de önemli kimyasal ve fiziksel etkileri olan saldırı kaynaklarıdır [1, 15, 28].

I. Grup Reaksiyonlar düşük sertlikteki suların çimento hidrate bileşenlerini çözmesi ve yıkayarak beton bünyesinden uzaklaştırması şeklinde gelişir.

II. Grup Reaksiyonlar agresif sıvıların hidrate çimento bileşenlerini çözmesidir. Reaksiyon ürünleri ya yıkanarak uzaklaşır veya suda çözünmeyen yeni bir yapı oluşturur. Asitlerin ve Mg^{2+} iyonu içeren suların oluşturdukları hasarlar bu tür reaksiyonlara örnektir.

III. Grup Reaksiyonlar genleşen ürünler oluşturarak betonda hasara yol açarlar. Sülfat etkisi, MgO ve CaO gibi çimento bileşenlerinin gecikmiş hidratasyonları, alkali agrega reaksiyonları (ASR, ACR), beton içine gömülü çelik donatının korozyonu bu tür bozulmaların en tipik örnekleridir.

3.1 Sertleşmiş Çimento Bileşenlerinin Hidrolizi ve Yıkınması

Hidrate çimentonun katı fazını göreceli olarak çözünmeyen kalsiyum hidratlar ($C-S-H$, $Ca(OH)_2$ ve CAH) oluşturmaktadır. Bu bileşenler pH'ı oldukça yüksek olan gözenek suyu içinde kararlı durumdadır. Gözenek suyu içindeki Na^+ , K^+ ve $(OH)^-$ iyonları betonun pH değerini 12.5-13.5 aralığında tutmaktadır. Beton asidik ortamla karşılaştığında kimyasal kararlılığını kaybeder. Teorik olarak pH'ı düşük sular çimento hidrate bileşenlerinin çözülmesine yol açar. Bu nedenle birçok endüstriyel atık ve doğal su beton açısından zararlıdır. Ancak, kimyasal saldırının şiddeti sıvının pH değeri ve betonun geçirimsizliğinin fonksiyonudur. Sıvının pH değerinin 6.5'in üzerinde olması ve betonun geçirimsizliğinin çok az olması halinde kimyasal saldırı çok yavaş gelişir ve sonucu ihmal edilebilir mertebelerde kalabilir. Özellikle sülfat ve klor iyonları içeren yeraltı suları, deniz suyu, serbest CO_2 veya H^+ iyonu içeren sular, endüstriyel atıkların, kanalizasyonların karıştığı sular zararlı reaksiyonlara neden olabilir. pH 5.5 ve altındaysa saldırı şiddetli, 4.5 ve altındaysa çok şiddetli gerçekleşir. Ancak belirtildiği gibi sıvının beton içinde taşınım hızı da önemli bir faktördür [1, 12].

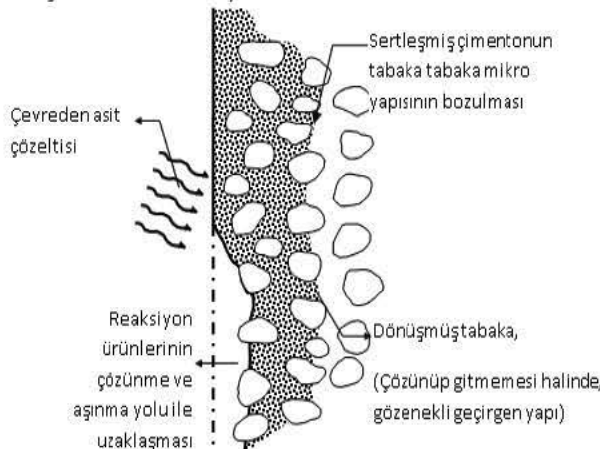
Doğada rastlanan yeraltı, nehir ve göl suları sertliklerine bağlı olarak bir miktar kalsiyum ve magnezyum iyonları içerirler ve genellikle çimento hamuru bileşenlerinde hidrolize yol açmazlar. Diğer taraftan, sertlik derecesi çok düşük olan erimiş kar suyu, yağmur suyu gibi saf sular çimento hamuru içindeki kalsiyumlu bileşenlerin çözünmesine neden olurlar. Kalsiyum hidroksit saf su ile en fazla hidrolize uğrayan bileşendir. Çimento hamuru ile temas halinde olan su kirece doyduğunda hidroliz sona erer. Suyun sürekli akması veya yenilenmesi durumunda ise kalsiyum hidroksit tamamen çözünüp yıkanarak hamur dışına atılabilir ve bu kez çözünme bağlayıcı özellikteki C-S-H jellerinde başlar. Kireç içeriğinin azalması sonucu betonda dayanım kaybı ve geçirimsizlikte artış ortaya çıkar. Ayrıca betondan çıkan kalsiyum hidroksit havadaki CO_2 ile reaksiyona girip $CaCO_3$ oluşturarak beton yüzeyinde beyaz kabuk veya toz şeklinde -çiçeklenme adı verilen- olumsuz bir görünüş meydana getirir.

3.2 Betona Asitlerin Etkisi

Portland çimentosu yüksek dereceden alkali olduğu için, beton güçlü asitlerin ya da asit oluşturan maddelerin saldırısına dayanıksızdır. Kimyasal saldırı, çimento hidratasyon ürünlerinin ayrışması ve oluşan yeni ürünlerden eriyebilir olanların betondan ayrılması, erimez olanların betonu parçalaması şeklinde görülür [9]. Asit saldırısına en hassas bileşen $Ca(OH)_2$ 'dir. C-S-H'lar da saldırıya uğrayıp zarar görebilir (Şekil 6).

Asit reaksiyonlarının hızı ve şiddeti; asit tipine, etkilenme süresine ve asit yoğunluğuna göre değişir. Ancak en önemli etken oluşan kalsiyum tuzunun çözünürlüğüdür. Çözünürlük arttıkça, su ile taşınan maddeler zararı arttırmaktadır. Reaksiyonların gelişimine bağlı olarak sertleşmiş betonun yüzeyinden başlamak suretiyle bünyesinde yumuşama ve gözenekler oluşur. Ayrıca, biyolojik oluşumlar sonucu, kanalizasyon borularında olduğu gibi, zayıf asitler de kuvvetli asit haline dönüşebilir.

Şekil 6. Asit etkisiyle betonun bozulma mekanizması ve asit etkisiyle bozulmuş bir kanalizasyon tüneli



Asit etkisi yüzeyden içeriye doğru olduğundan, dış yüzeyin izolasyonu zorunludur. Geçirimsiz beton üretmek yeterli değildir. Bu amaçla bitümlü malzemeler, poliüretan, sentetik reçineler, özel yağlar, boya ve vernikler, sentetik lastik gibi maddeler kullanılabilir. Ayrıca cam suyu adı verilen sodyum silikat kullanımı; $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'i bağlaması ve kalsiyum silikatların oluşumu ile boşlukların dolması sonucu yararlı olmaktadır.

3.3 Magnezyum İyonu İçeren Çözeltilerin Kimyasal Saldırıları

Magnezyum klorür, magnezyum bikarbonat veya magnezyum sülfata yeraltı sularında, deniz suyunda veya endüstriyel atık sularda rastlanmaktadır. Magnezyum klorür (MgCl_2) sertleşmiş çimento hamurundaki kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek çözünen CaCl_2 ve çözünmeyen $\text{Mg}(\text{OH})_2$ (brusit) meydana getirir. Betonun Mg tuzlarıyla uzun süreli teması halinde ise C-S-H içindeki kalsiyumun Mg iyonlarıyla yer değiştirdiği görülür ki oluşan magnezyum silikat hidratın (MSH) bağlayıcılık özelliği yoktur, kolayca parçalanabilir. Bu durum betonda rijitlik ve dayanım kaybına yol açar. Magnezyum sülfat aynı zamanda betonda sülfat etkisine yol açtığı için magnezyum tuzları içinde en zararlısı olarak kabul edilir.

3.4 Sülfatların Betona Etkisi

Sülfat çimentonun bazı bileşenleri ile reaksiyona girerek betonun zamanla bozulmasına neden olur. Bu saldırı sülfat iyonlarının, sertleşmiş betondaki alüminli ve kalsiyumlu bileşenlerle kimyasal reaksiyona girmesi etrenjit ve alçı taşı oluşturmaları ile gerçekleşir. Reaksiyon ürünleri betonda genleşme yaratarak çatlaklara ve dağılmaya yol açar, agrega-çimento hamuru aderansının etkilenmesiyle betonun mukavemeti düşer. Sülfat saldırısına uğramış betonun karakteristik görünümü, özellikle köşe ve kenarlardan başlayarak tüm kütleye yayılan beyaz lekeler, çatlaklar ve dökülmelerdir [9]. Betonun kolayca ufalanabildiği ve yumuşadığı görülür. Etkilenme koşulları (SO_4^{2-} içeriği, ortam koşulları), betonun geçiririliği (zararlı madde taşınımı), betonun yapısı (çimentonun kimyasal yapısı) ve suyun varlığı sülfat etkisinin gelişimini doğrudan etkileyen parametrelerdir.

Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine girebilir. Bazı tür çalılık dışında, bitki, ağaç yetişmeyen, yüzeyinde beyaz lekeler, tuz birikintileri görülen çorak topraklarda, sülfat etkisinden şüphe edilmelidir. Bu tip zeminlerde yapılacak inşaatlarda, zemin etüdünün yanı sıra, yeraltı suyu ve topraktan örnek alınarak betona zarar verebilecek maddelerin varlığı araştırılmalıdır. Özellikle deniz yapılarında, deniz suyundaki sülfatlar, ıslanma-kuruma bölgesinde buharlaşma nedeniyle betonun sülfat yoğunluğunun artmasına yol açabilirler. Bir diğer kaynak çimentodur. Çimentonun C_3A bileşenin ani prizini önlemek için üretim aşamasında çimentoya az miktarda alçıtaşı (kalsiyum sülfat) katılır. Zamana bağlı genleşmeyi ve betonun mukavemetinin etkilenmesini önlemek

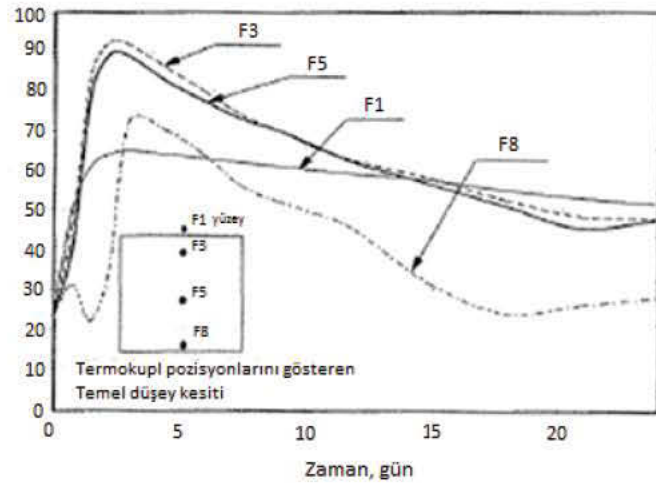
için çimento standartları katılan alçıtaşının oluşturacağı SO_3 miktarını çimento ağırlığının %3'ü ile sınırlamıştır.

Prefabrik yapı elemanı üretiminde, dayanımın hızlı gelişmesi amacıyla betona buhar kürü sıkça uygulanır. Ancak uygulanan yüksek sıcaklıklarda (70-80 °C) alçıtaşının çözünürlüğünün düşmesiyle C_3A ile erken yaşlarda reaksiyona girememesi ve bu reaksiyonun beton sertleştikten sonra, zamanla nem varlığında gerçekleşmesi halinde gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) adı verilen ve betonda sülfat saldırısının bir diğer türü olan problem ortaya çıkabilmektedir. Sülfat etkisiyle genleşen tuz sertleşmiş betonu çatlatıp, parçalamaktadır (Şekil 7a). Ancak burada oluşan etrenjit normal hidratasyon sonucu oluşan etrenjit ile karıştırılmamalıdır. Beton taze iken, kristalleşen tuzun genleşmesine izin verecek ortam mevcuttur. 60-70 °C kür sıcaklıklarının bile DEF'e yol açabildiği bilinmektedir. Bu sıcaklıklarda etrenjitin ($\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) normalde hidratasyonun ilk dakikalarında görülen oluşumu engellenir. Etrenjit oluşumunun stabilitesinin bozulması, çimentodaki alkali oksit içeriğine de bağlıdır. Bu nedenle, yüksek alkalili çimentolarda bu sıcaklık dereceleri daha düşüktür. Ardından yıllar sonra nem etkisinde kalan elemanlarda etrenjit yeniden oluşur, ancak bu sefer ortam katı olduğundan betonda hasar görülür. Ayrıca, buhar kürü görmeyen sadece iç ısı artan (kütle betonu, köprü ayakları, gökdelen temelleri...) veya dıştan ısınan (beton bacaların dış çeperlerinde, sıcak iklimlerde kullanılan selülozik lifli çatı örtü malzemelerinde, beton yol kaplamalarında...) beton ve betonarme yapı elemanlarında da DEF kaynaklı hasarlar oluşabilmektedir. Örneğin, Çin'in Şangay kentinde yer alan Çin Halk Cumhuriyeti'nin en yüksek, dünyanın ise 4. en yüksek binası olan Jin Mao Kulesinin temel betonlarında 3 saat sonra ölçülen sıcaklık 90 °C'ye kadar ulaşmış olup, kesit içerisinde sıcaklık farklılıkları Şekil 8'de görüldüğü gibi oldukça yüksektir [29].





Şekil 7. Değişik sülfat etkisi oluşumları, a) Prefabrike bir giriş elemanda DEF oluşumu (ABD-Texas) b) Macaristan Ferenc Puskas Stadi yapı elemanlarında Tomasit oluşumu



Şekil 8. Jin Mao Kulesinin temel betonunda ölçülen beton sıcaklıkları

Temel olarak sülfat saldırısı sonucu ortaya çıkan reaksiyon ürünleri; alçıtaşı, etrenjit ve tomasit olarak sıralanabilir. Tomasit etrenjit kristaline çok benzeyen bir kafes yapısına sahip olmasına karşın Al_2O_3 içermemekte, bu bileşen yerine SiO_2 bulunmaktadır. Genleştirici etkisi etrenjite kıyasla daha az olup, yaklaşık %45'i kadardır. Tomasit normal ortam koşullarında ender görülen bir sülfat etkisi ürünüdür. Özellikle kalker katkılı çimentolarla üretilen ve soğuk iklim koşullarına maruz kalan betonarme yapılarda tomasit oluşumuyla hasarlar ortaya çıkmıştır. Kuzey Avrupa ve İngiltere'de sülfat içeren zeminlerde inşa edilmiş pek çok köprü ayağında, Çin'de soğuk iklimin hüküm sürdüğü pek çok baraj yapısında tomasit kaynaklı hasarlar rapor edilmiştir. Şekil 7b'de Macaristan Ferenc Puskas Stadi yapı elemanlarında Tomasit oluşumu

nun neden olduğu hasarlar görülmektedir. Yapılan deneysel çalışmalar ve saha bulguları çimentoda kalker kullanım oranının %10 ile sınırlandırılmasına dikkat çekmektedir.

Diğer birçok dayanıklılık probleminde olduğu gibi, sülfat etkisinde de önlem olarak, üretilen betonun mümkün olduğunca yoğun ve geçirimsiz olması, çimento dozajının çok düşük olmaması ve düşük su/çimento oranına sahip olması gerekir. Sülfat etkisinin şiddeti arttıkça geçirimsizliği arttırmanın yanı sıra, C_3A oranı düşük çimento kullanmak ve/veya puzolanik katkılı beton üretmek gibi ek önlemler alınması zorunludur. ASTM standartları C_3A içeriği $\leq$ %8 olan çimentoları sülfata orta seviyede dayanıklı, $\leq$ %5 olan çimentoları ise sülfata yüksek seviyede dayanıklı olarak tanımlamaktadır. Normal Portland Çimentolarında C_3A oranı %8-11 arasında değiştiğinden, bu tip çimentoları sülfat etkisinde kalan yapılarda kullanmak doğru değildir.

Puzolanların, düzgün kür edilmiş betonda geçirimsizliği arttırmalarının yanı sıra, betonun içindeki $Ca(OH)_2$ 'i bağlayarak sülfatlarla reaksiyona girecek öğelerden birini azaltmaları olumlu olmaktadır. Ancak kullanılacak puzolan rastgele seçilmemelidir. Örneğin, C sınıfı uçucu külün bazı durumlarda sülfat dayanıklılığını arttırmak yerine azaltabildiği dikkate alınmalıdır. Çok şiddetli etki durumunda, $Ca(OH)_2$ ve C-S-H'nin de sülfat hassasiyetini de dikkate alarak, iki önlemin C_3A miktarını düşürmek ve puzolan kullanmak bir arada uygulanması önerilir.

3.5 Alkali-Silika Reaksiyonu (ASR) ve Alkali-Karbonat Reaksiyonu (ACR)

Alkali-silika reaksiyonu (ASR) oldukça kompleks kimyasal bir reaksiyondur. Bazı çimentoların içinde fazla miktarda bulunan sodyum oksit (Na_2O) ve potasyum oksit (K_2O) gibi alkali oksitler, aktif silis içeren agregalarla reaksiyona girerek, jel oluşumuna sebep olurlar. Nemin varlığında bu jel zamanla şişerek betonda hasar oluşumuna yol açar.

Çimentoda bulunan sodyum ve potasyum oksitler çimentonun hammaddelerinden (kil, kireçtaşı, şeyl) kaynaklanır. Çimento dışında alkaliler, agregat, karışım suyu, beton katkı maddeleri, buz çözücü tuzlar, zemin suyu, deniz suyu, beton kür suyu ve endüstriyel atık suları aracılığıyla da beton bünyesine girebilirler. Çimento fabrikalarında kullanılan ön ısıtma sistemi de çimentonun alkali içeriğinin artmasına yol açmaktadır.

Agregayı oluşturan bileşenlerin türü ve formu agreganın reaktifliğini belirler. Silika mineralleri reaktiflikleri açısından opal, kalsedon, kristobalit, tridimit, kriptokristal kuvars olarak sıralanabilir. Bu minerallerden bir veya birkaçının bir arada bulunduğu kayalar arasında, opal, kalsedon, kuvars çörtleri, silisli kireçtaşları, silisli dolomitler, riyolit ve tüfleri, dazit ve tüfleri, andezit ve tüfleri, silisli şeyller, filitler, opalli oluşumlar, çatlamış ve boşlukları dolmuş kuvars sayılabilir [30].

ASR yalnızca nem varlığında gerçekleşir. Nem oranı, bozulmanın ve hacim değişikliğinin şiddeti üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. ASR üzerinde beton karışım oranları, agrega boyutu, hava katkısı, mineral ve kimyasal katkıların, ortam sıcaklığının da etkisi vardır.

İzmir’de son 15-20 yılda inşa edilmiş bazı betonarme köprü ve viyadüklerde ASR sonucu oluşan tipik harita şeklindeki çatlaklara benzer hasarlar tespit edilmiştir [31]. Şekil 9a’da İzmir ve yöresinde ASR sonucu hasar görmüş bazı betonarme elemanlar gösterilmiştir.



Şekil 9. ASR ve ACR hasarı a) ASR hasarına uğramış köprü ayağı (İzmir) b) Yaya yolu kaplamasında ACR çatlağı (Ontario, Kanada)

Puzolanlar çimento harcının kirecini tutarak, ortamın pH derecesini indirger ve silisin çözünürlüğünü azaltarak ASR’yi ve jel oluşumunu önlerler. Silika tozu yüksek yüzey alanına sahiptir ve henüz beton taze iken ASR’yi hızlandırır. Yeterince kullanıldığında silika tozu, Na^+ ve K^+ ile reaksiyona girerek, bu alkalileri tüketir. Bu durumda agregadaki reaktif silika

ya reaksiyona girmez ya da genişlemeye neden olamayacak kadar az reaksiyon ürünü oluşur. Yapılan bazı çalışmalarda çimento yerine minimum %5 silika tozu ve %30 uçucu külün (C sınıfı) kullanımının genişlemeyi azaltıcı yönde etkisi olduğu belirtilmektedir [32-34]. Yüksek fırın cürufu kullanımı da genişlemelerin tehlikesiz boyutlara indirilebilmesi bakımından yararlıdır.

Uçucu külün ASR hasarlarını kontrol etmedeki yararlı etkisi ilk olarak 1949 yılında Robert Blanks tarafından rapor edilmiştir. İlerleyen yıllarda, reaktif agrega, alkali içeriği yüksek çimento ve uçucu kül kullanılarak üretilen önemli yapılar üzerinde yapılan incelemeler de uçucu külün yararlı etkisini ortaya koymuştur. Galler’de Cwm Rheidol hidroelektrik sistemi üzerinde kurulu olan Nant-y-Moch ve Dinas barajları reaktif agrega kullanılarak üretilmiş olup, Nant-y-Moch barajının yapımında çimento yerine %25 oranında F sınıfı uçucu kül kullanılmıştır. 1957-1962 yılları arasında inşa edilen barajlar üzerinde 2010 yapılan incelemeler, Nant-y-Moch barajında herhangi bir hasar oluşmadığını, Dinas barajında ise kalınlığı 5 mm’yi geçen rasgele harita çatlakları oluştuğunu göstermiştir. Dinas barajında oluşan stabilite sorunlarına karşı art-germe çubukları kullanılarak önlem alınmıştır [35].

Alkali-karbonat reaksiyonu (ACR) ise, ilk olarak Swensson tarafından Kanada’da 1957 yılında gözlemlenmiş ve araştırılmıştır. Şekil 9b’de bir yaya yolu kaplamasında ACR nedeniyle oluşan harita çatlakları görülmektedir. Fakat günümüzde, ACR’nin mekanizması ve zararları halen tam olarak anlaşılmamıştır. Örneğin, ACR’nin tek başına genişleme ve böylece hasar oluşturmadağını, oluşan hasara sadece ACR ile birlikte gerçekleşebilen ve dolomit taneleri içindeki killerin sebep olduğu ASR’nin yol açtığını öne sürülmüştür. Karbonat kayalarındaki mikro- ve kriptokristalin kuvars gibi silika içeriği, karbonatlarda ASR için oldukça önemli bir kriter sayılmaktadır. Bu reaksiyonda dolomit veya magnezyum içeren kireçtaşları reaksiyon sonucu magnezyum hidroksite dönüşürler. Dedolomitasyon adı verilen bu olay sırasında dolomit ve kireç, kendilerinden daha büyük hacimli olan kalsite ve brusite dönüşerek, harita şeklinde çatlaklara ve betonun tamamen parçalanmasına yol açabilir. Dolomitin esas maddesi MgCO_3 su etkisiyle $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ’e dönüşmekte, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ise suda çözünerek suyun taşın içine sızmasını sağlamaktadır. Taşın iç kısımlarında jeolojik devirlerden kalma kil damarları varsa bunlar su ile temas edip şişmekte ve agregaları patlatmaktadır. Alkali-karbonat jeli miktarca az olup genişlemeye daha ziyade dolomitin boşalması ile suya maruz kalıp şişen kil bileşenleri neden olmaktadır [1].

Alptuna ve Yazıcı [36] iyi bir şans eseri Türkiye’deki dolomit kökenli birçok agreganın ACR’ye yol açmadığını, ACR olayının tespit edildiği agregalarda ise aynı zamanda ASR’nin oluştuğunu bildirmiştir. Ayrıca, Zonguldak yöresinden temin edilen

bir agregada ve Kanada'dan temin edilen referans agregada uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin gibi mineral katkıların genleşmeleri belli oranda azalttığı, silis dumanının ise tersine genleşmeleri arttırdığı belirlenmiştir.

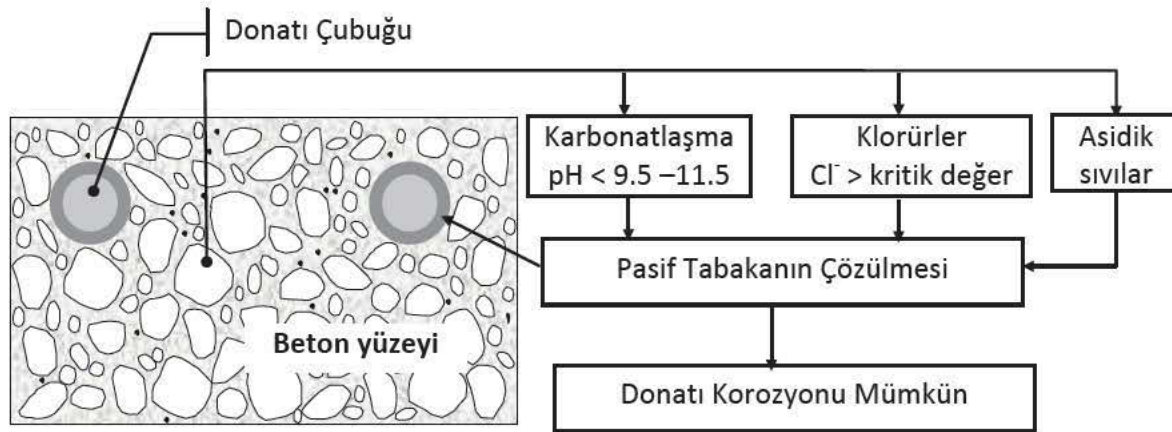
3.6 Kalsiyum ve Magnezyum Oksidin (CaO, MgO) Gecikmiş Hidratasyonu

Çimento içinde bulunabilen CaO ve MgO'un gecikmiş hidratasyonları da betonda genleşmelere ve çatlamalara yol açabilmektedir. Döner fırında yüksek sıcaklıklarda pişerek kristal yapıya sahip olan bu bileşenler diğer çimento bileşenlerinden daha geç reaksiyon gösterirler. Bu nedenle çimento içindeki miktarlarının sınırlı olması istenir. Günümüzde çimento üretimindeki sıkı kalite kontrolü nedeni ile bu bileşenlerin çimentodaki serbest miktarları çok düşük mertebelere düşürülmüştür.

ve aynı zamanda maksimum oranları için standartlarda genellikle sınırlamalar mevcuttur. Örneğin, MgO için genellikle getirilen üst limit %5 tir.

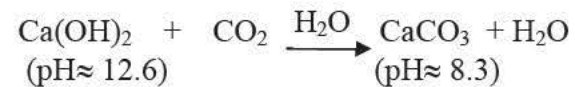
3.7 Betonda Karbonatlaşma ve Çelik Donatının Korozyonu

Doğru dizayn edilmiş, geçirimsiz, kaliteli bir beton, çeliği korozyondan koruyarak yapının dayanımını ve dayanıklılığını istenen düzeyde sağlar. Kimyasal koruma betonun alkalinitesi sayesinde, fiziksel koruma ise ortamda bulunan ve korozyona yol açan maddelerin yapı elemanı içine difüzyonunun önlenmesi ile gerçekleşir. Betonun bu olumlu özelliğine rağmen uygulamada yapılan hatalar nedeniyle korozyon günümüzde betonarme yapıların servis ömürlerini belirleyen en önemli faktör olarak kabul edilmektedir. Şekil 10'da betonun çeliği korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması şematik olarak gösterilmiştir [9].



Şekil 10. Karbonatlaşma veya klorür iyonları nedeniyle betonun donatıyı korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması

Beton yüksek dereceden alkali bir malzemedir. Alkalinitenin ana kaynağı gözenek suyu içinde çözülmüş kireçtir. Çimento alkali oksitlerinin su ile reaksiyonundan oluşan alkali hidroksitler de bir diğer alkali kaynağıdır. Böylece betonun pH değeri 13 mertebesine kadar çıkar. Fakat, donatıların korozyondan korunması için çok önemli ve gerekli olan betonun alkali ortamı zamanla karbonatlaşma adı verilen kimyasal bir reaksiyon nedeniyle kaybolabilir. Özellikle, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ortamda bulunan karbondioksit (CO_2)'in betonun gözenek sistemine işlemesiyle kalsiyum karbonat (CaCO_3)'a dönüşür. Oluşan kalsiyum karbonatın pH değeri sadece 8.3'tür. pH değerinin 9.5'in altına düşmesi halinde beton, betonarme çeliğini koruma etkinliğini kaybeder [37-42]. Aslında daha karmaşık olan en önemli reaksiyon formülü basitleştirilmiş olarak aşağıda görülmektedir.



Karbonatlaşma hızını S/Ç oranı, kür koşulları, çimento tipi, kimyasal bileşimi ve miktarı gibi birçok faktör etkiler. Temiz havada yaklaşık %0.03 CO_2 bulunur. Büyük şehirlerde bu oran %0.3 civarındadır. Ancak, çok ender durumlarda %1 CO_2 konsantrasyonlarına da rastlanır. Ortamın CO_2 konsantrasyonu yükseldikçe karbonatlaşma doğal olarak daha hızlı meydana gelir. Yapılan ölçümler, basınç dayanımı 30 MPa'nın altındaki betonlarda büyük olasılıkla olumsuz koşullarda 15 mm'lik karbonatlaşma miktarına birkaç yılda ulaşılacağını ortaya koymaktadır.

Karbonatlaşmış beton içindeki donatının korozyonu elektrokimyasal reaksiyonla gelişir. Korozyon elemanı elektron ve iyon akışını sağlayan beton boşluk suyunun oluşturduğu elektrolitik ortamla birbirine bağlı anot ve katot elemanlarından oluşur [43-44]. Anodik işlem demirin çözülmesi olayıdır ($\text{Fe} \Rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$). Pozitif yüklü iyonlar çözeltiye karışırlar. Katodik işlemde ise çelik vasıtasıyla katoda geçen elektronlar su ve oksijenle birleşip hidroksil iyonlarını oluştururlar ($2\text{e}^- + 1/2 \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2(\text{OH})^-$). Anottan çözeltiye geçen demir iyonları hidroksil iyonlarıyla reaksiyona girerek demir hidroksiti oluştururlar ($\text{Fe}^{++} + 2(\text{OH})^- \Rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$). Demir hidroksit oksidasyonla demiroksite (pas) dönüşür. Korozyon hızı büyük ölçüde, beton içine O_2 ve H_2O difüzyonu hızına bağlıdır. Bu nedenle betonun boşluk yapısını etkileyen tüm faktörler korozyon hızını da etkilerler. Bunlar arasında betonun S/Ç oranı ilk sırada yer alır. Korozyon maksimum hızına %70-80 bağıl hava nemi değerlerinde ulaşır. Kuru betonda elektrolitik ortam mevcut olmadığından, suya doymuş betona ise oksijen difüzyonu ihmal edilebilir mertebelerde olduğundan beton karbonatlaşmış olsa bile korozyon gerçekleşmez. En çok zararı ise ıslanma-kuruma etkisine maruz yapılar görür. Yarı-ıslak periyotta karbonatlaşma gelişirken, daha doymuş ortamda korozyon hızla gelişir.

3.7.1 Klorür Korozyonu

Klorür iyonları beton içine çeşitli yollardan girebilir. Bunlar arasında, yüksek miktarda klorür içeren agregaların, CaCl_2 içeren priz hızlandırıcı veya deniz suyunun beton üretiminde kullanılması sayılabilir. Ancak en yaygın kaynak çevrede bulunan klorürlerin beton içine taşınımıdır. Özellikle betonla temas halindeki deniz suyu ya da tuzlu yeraltı suları, buz çözücü tuzlar, tuz üreten veya işleyen sanayi tesisleri önemli birer klorid kaynağıdır.

Tekrarlı ıslanma-kuruma etkisine maruz deniz yapılarında deniz suyu ile beton içine sızan klorürler, suyun buharlaşması sonucu beton içinde kalmakta, tekrar sayısı arttıkça klorür yoğunluğu da artmaktadır. Ayrıca, denizden yükselen çok ince deniz suyu damlacıkları dolayısıyla klorürler rüzgarlarla önemli mesafelerde taşınarak beton yüzeyine yerleşebilir [1].

Korozyon durumunda ise klorür iyonları katalizör görevi görür ve reaksiyonu çarpıcı biçimde hızlandırırlar. Bu durumda küçük yüzey anot oldukça büyük yüzey katod makro elemanı oluşur, donatının hep aynı bölgesi hasar görüp oyulur, kısa sürede donatıda büyük kesit kaybına neden olan korozyon işlemi meydana gelir. Reaksiyon sonucu Cl iyonu kendini sürekli yenilediğinden, donatıda tahribat devamlı olur ve sonuçta donatı kopar. Bu olay düşük klor konsantrasyonlarında bile gerçekleşebilir.

Düşük S/Ç oranına sahip yoğun, geçirimsiz ve yeterli kalınlıkta imal edilecek pas payı tabakası ile karbonatlaşma reaksiyonuna ve klorür difüzyonuna büyük ölçüde engel olmak mümkündür. Buna karşılık boşluklu, geçirimli ve yeterli kalınlıkta imal edilmemiş pas payı tabakasına sahip betonarme elemanların servis ömürlerinin çok kısa olması beklenir. Yüzeyi kaplanmamış, brüt beton uygulamalarından mümkün olduğunca kaçınmak gerekir. Yüzeyin çimento-kireç esaslı sıva ile kaplanması, geçirimsiz izolasyon maddelerinin kullanılması, özel boyaların uygulanması yarar sağlamaktadır.

Deniz ortamında bulunan betonarme elemanlar değişik fiziksel ve kimyasal etkilere maruzdur. Klorür korozyonun yanı sıra, sülfat etkisi, donma-çözülme, tuz kristalizasyonu, aşınma etkisi, magnezyum iyonlarının etkisi ve karbonik asit etkisi mevcuttur. Genel olarak en çok hasar ıslanma-kuruma bölgesinde oluşur. Fiziksel etkiyi, dalgaların aşındırıcı etkilerinin yanı sıra, deniz suyu ile beton içine sızan tuzların, kuruma esnasında suyun buharlaşmasıyla betonda kalması, ıslanma-kuruma tekrar sayısı arttıkça betondaki tuz yoğunluğunun artması, tekrar ıslanma periyodunda kuru tuzların suyla temas edince hacimlerinin artarak betonda genleşme yaratmaları ve hasar oluşturulmaları olarak özetlemek mümkündür. Ayrıca tuzların kristalleşirken de büyük basınçlar oluşturduğu bilinmektedir. Kimyasal etki deniz suyundaki tuzlardan kaynaklanır. Deniz suyundaki sülfat iyonları betonda sülfat etkisi yaratırlar. Ancak oluşan etrenjit ve alçıtaşının deniz suyunda çözülmesi nedeniyle betonda hasar oluşturan genleşme etkisi ortaya çıkmaz. Yüksek C_3A içerikli çimento kullanıldığında hasar genleşme ile değil katı bileşenlerin erozyona uğrayarak kütleden ayrılmasıyla kendini göstermektedir. Betonun magnezyum tuzlarıyla uzun süreli teması halinde C-S-H içindeki kalsiyumun da Mg iyonlarıyla yer değiştirdiği görülür ki oluşan magnezyum silikat hidratın (M-S-H) bağlayıcılık özelliği yoktur, kolayca parçalanabilir. Bu durum betonda rijitlik ve dayanım kaybına yol açar. Deniz suyunun beton karma suyu olarak kullanılması da sakıncalıdır. Deniz suyundaki klorürler betonarme elemanlarda korozyona yol açmaları sebebiyle oldukça önemlidirler (Şekil 11).

Deniz suyu etkisine dayanıklılığı arttırmak için alınacak en önemli önlem betonun geçirimsizliğinin sağlanmasıdır. Çimento dozajının artırılması ve uygun çimento türünün kullanılması önerilir. Cüruflu çimento ile üretilen betonlar klorür girişini engelleme ve dayanım bakımından deniz suyunda ıslanma-kuruma etkilerine karşı normal Portland çimentosuyla üretilen betonlara kıyasla daha iyidir [45]. Puzolanik katkı çimentoların veya puzolanların betonda kullanımı genellikle olumlu sonuçlar doğurmaktadır. Ancak bu tür betonların kür hassasiyetleri dikkate alınmalıdır. Pas payı tabakası kalınlığına ve kalitesine önem verilmelidir.

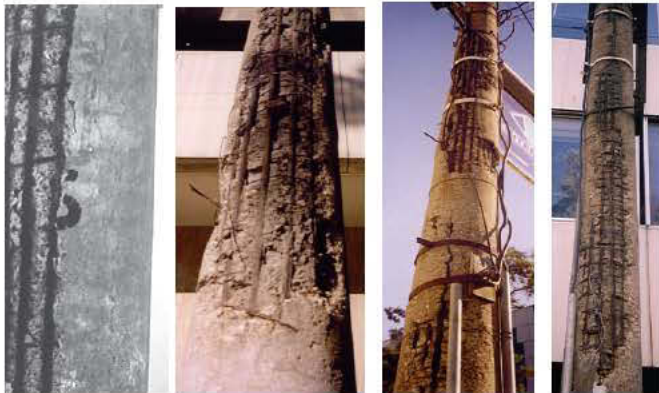


Şekil 11. Güllük iskelesinde korozyon hasarı

3.7.2 Korozyonun Betonarme Yapılarda Oluşturduğu Hasarlar

Korozyon, çelikte en kesit kaybına, beton-çelik aderansının azalmasına, betonarme elemanın taşıma gücünün azalmasına, dolayısıyla yapının deprem güvenliğinin kaybolmasına, zamanla yapının kullanılamaz hale gelerek servis ömrünü tamamlamasına neden olabilmektedir. Küçük en kesit kayıplarında bile çeliğin deformasyon karakteristikleri ve kopma yükü önemli ölçüde azalabilir. Ayrıca betonarme yapılarda arzu edilen düktil davranış yerine yapılar gevrek (ani) göçme davranışı gösterirler.

Şekil 12 İzmir'de Konak-Alsancak hattında ve sahil kasabası Mordoğan'da bulunan, sargı donatısı yer yer tamamen kaybolmuş, boyuna donatısı paslanmış, beton örtü tabakası dökülmüş elektrik direkleri görülmektedir. Direklerin denize bakan yüzlerinin ağır hasar görmüş olması, prefabrik olarak imal edilmiş betonarme direklerde, karbonatlaşma cephesinin çelik donatıya ulaştığı, deniz ortamından kaynaklanan klorür iyonlarının ise korozyonun gelişimini hızlandırdığı izlenimini doğurmaktadır.



Şekil 12. İzmir'de korozyon hasarına uğramış elektrik direkleri

4. BETONUN BİYOLOJİK ETKİLENME SONUCU BOZULMASI

Beton yapılar, üzerlerindeki veya yakınlarındaki biyolojik oluşumlardan etkilenebilirler. Bitki ve ağaç kökleri çatlaklı veya boşluklu bölgelerden betonun içine sızarak, büyüyüp genişlerler. Oluşan genişleme etkisi sonucu betonarme elemanların çatlayıp, hasar görmeleri mümkündür. Suya doğru ilerleyen köklerin, özellikle beton künklerin içine sızıp boruları tıkadığı da görülmüştür (Şekil 13).

Uygulamada en çok rastlanan sorunlardan biri, kanalizasyon sistemlerinde görülen ve asit etkisine yol açan biyolojik oluşumlardır. Genelde evsel atıklar alkalın karakterde olup betona zarar vermezler. Ancak bu tip atıklar kükürtlü bileşenler içerirler. Anaerobik (oksijensiz) ortamda, kanalizasyon atıklarındaki sülfat ve bazı proteinlerden beton için fazla zararlı olmayan hidrojen sülfid (H_2S) gelişir. Anaerobik bakteriler havaya gereksinme duymayan, sülfatların oksijenini alarak yaşayan canlılardır. H_2S fermantasyonun göstergesi olup çürük yumurta kokusu yayar. Yüksek sıcaklıklar reaksiyonun hızını artırır. Ortamın kimyasal dengesi, hareketi, türbülansı gibi etkenlerle H_2S kanalizasyon suyundan ayrılır ve kanalizasyon cidarlarındaki nem içinde erir. Ardından aerobik bakteriler tarafından okside edilerek, sonuçta sülfürik aside ve/veya çimentonun kireci ile birleşip alçıtaşına dönüşür. Bu yüzden asit etkisi atık su seviyesinin üstünde görülür.



Şekil 13. Betonda oluşan biyolojik hasarlara örnekler

Deniz yapılarında ise, yosun türü bazı deniz canlılarının beton yüzeyinde büyümeleri, bazı olumlu veya olumsuz fiziksel ve kimyasal etkilere yol açabilir. Örneğin, beton elemanlar üzerinde büyüyen deniz canlıları oksijen tüketirler. Böylece beton içine difüze olacak oksijen miktarı azalır ve donatının korozyonu engellenir. Ayrıca, açıkta kalan yüzeylerde oluşan bozulma, devamlı su altında kalan, yosun tutmuş beton elemanlarda görülmemektedir. Ancak bazı deniz canlıları ve biyolojik oluşumlar ise asit içeren salgıları nedeniyle betonda hasar oluşturabilirler. Bazı deniz canlıları ise beton içindeki kireci tüketerek betona zarar verirler.

5. SONUÇ

Yapının servis ömrü boyunca işlevselliğini koruyabilmesi, maruz kalacağı yıpratıcı etkilerin türünün ve şiddetinin tasarım aşamasında belirlenmesi ve gerekli önlemlerin alınmasıyla mümkündür. Yapının birden fazla etkiye aynı anda ve tekrarlı olarak maruz kalmasının olası olduğu ve tüm bu etkilerin bir arada değerlendirilmesinin gerektiği gözden kaçırılmamalıdır. Alınacak önlemler yıpratıcı etkinin türüne ve şiddetine göre farklılık gösterebilir. Örneğin sülfat etkisinde kalacak bir yapı için çimento seçiminin önemi büyüktür. Ancak, genel olarak, betonun veya betonarmenin dayanıklılığının sağlanmasında temel felsefe, kaliteli ve geçirimsiz beton kullanılmasıdır. Bu nedenle yıpratıcı etkinin kaynağı her ne olursa olsun, alınması gerekli genel önlemleri şu şekilde özetlenebilir:

Çevresel etkinin şiddeti dikkate alınarak uygun beton sınıfı seçilmeli, yapısal dizayn açısından ihtiyaç olmasa bile gerektiğinde beton kalitesi arttırılmalıdır. Bir yapının bazı kısımları herhangi bir çevresel etkiye maruz kalmayabilmektedir. Ancak, yapının dış kısımlarına bakan betonarme elemanlarında karbonatlaşma tehlikesi her zaman mevcuttur. Pratik olarak, aynı yapının değişik kısımlarında farklı beton sınıflarının kullanılması mümkün olmadığından, beton sınıfının seçilmesinde çevresel etkinin olmadığı durum (X0) söz konusu değildir. Nemin ortamdan uzaklaştırılması çok ender bir durum olduğundan çevresel etki açısından C30/37 ve üstündeki beton sınıflarının kullanılması önerilmektedir.

Hemen hemen tüm dayanıklılık problemlerinde belirleyici faktör suyun, su içinde taşınan zararlı maddelerin ve gazların beton bünyesine sızmasıdır. Dolayısıyla kaliteli, geçirimsiz beton üretmek ilk ve en önemli önlem olarak düşünülür. Geçirimsizliğin sağlanabilmesi için; düşük S/Ç oranlarıyla çalışılması, gerektiğinde betonun işlenebilirliğinin su miktarının arttırılması ile değil, akışkanlaştırıcı vb. kimyasal katkı maddeleri kullanılarak arttırılması, puzolanlarla (uçucu kül, silika tozu, yüksek fırın cürufu vb.) beton içindeki kirecin tespit edilmesi, granülometrisi düzgün agregası kullanılması, betonun vibratör kullanılarak iyi sıkıştırılması, bakımının iyi yapılması ve çatlamasının önlenmesi, esasen beton teknolojinin gerektirdiği etkili önlemlerdir.

Normal koşullarda çimento dozajının alt sınırının 300 kg/m³, deniz yapılarında ise 350 kg/m³ alınması tavsiye edilir. Ancak TS EN 206-1 ve bu standardın uygulanmasına yönelik tamamlayıcı standard TS 13515'de bu değerler bazı hafif çevresel koşullar için 240 kg/m³ ve 300 kg/m³'e kadar düşmektedir. Mineral katkı kullanılması durumunda ise, mineral katkının cinsine göre çimento dozajı bir miktar daha azaltılabilmektedir.

Yeterli kalınlıkta pas payı tabakası kullanılmalıdır. Bina içleri gibi korunmuş kısımlarda pas payı tabakası kalınlığının 15-20 mm civarında alınması mümkünken, korozyon riskinin yüksek olduğu ortamlarda, örneğin deniz yapılarında, bu değer 50-60 mm ve üzerinde olması önerilir. Ayrıca pas payı tabakası gerekli kalınlığının beton kalitesine ve geçirimsizliğine bağlı olduğu, standartlarda beton kalitesi ve pas payı kalınlığı için önerilen değerlerin genellikle yapının servis ömrünün 50 yıl olacağı kabulüne dayandığı dikkate alınmalıdır. Anıtsal yapılar, sanat yapıları için bu süre 100 yıldır. Ona göre ek önlemler gerekir (pas payının, çimento dozajının arttırılması vb.).

Klasik çimento-kireç esaslı sıvanın betonarme yapıların kalıcılığının sağlanmasında -özellikle karbonatlaşma ve korozyon durumunda- en basit fakat en etkili önlemlerden biri olduğu söylenebilir. Sıvasız (Brüt) beton uygulamalarından kaçınılmalı, yapılar iyi yalıtılmalıdır.

Yapı elemanlarının detayları tasarlanırken suyun yapı elemanı üzerinden ve çevresinden bir an önce uzaklaşmasını sağlayacak tedbirler alınmalıdır. Suyun üzerinde birikebileceği yatay yüzeylerden mümkün olduğunca kaçınılmalı, bu yüzeylere eğim verilerek veya başka çözümler üretilerek suyun uzaklaşması sağlanmalıdır. Derzler iyi düzenlenmeli, kür ihmal edilmemeli, soğuk derz oluşumuna izin verilmemelidir.

Bazı durumlarda ise bu önlemlerin yanı sıra yapının karşılaşması muhtemel olan dayanıklılık problemlerine ve etkinin şiddetine bağlı olarak ihtiyaca uygun özel çimento kullanılması, kimyasal veya mineral katkı maddesi kullanılması gibi özel önlemler alınması gerekebilir. Çok şiddetli çevre etkisi durumunda ise betonun dıştan izole edilerek korunması bir zorunluluk haline gelebilir.

Kaynaklar

1. Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., **Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durability)**, Türkiye Hazır Beton Birliği Yayınları, İstanbul, 2010.
2. Silver, E., Cho, A., Movie Star Bridge's Days Numbered. ENR.com Engineering News-Record, Issue: 03.12.2012.
3. <http://www.penetron.com>, Erişim Tarihi (11.10.2012).
4. Brueckner, R. **Accelerating the Thaumassite Form of Sulfate Attack and an Investigation of Its Effects on Skin Friction**, Ph.D. Thesis, Birmingham University, 2007.

5. Ferraris, C.F., **Alkali-Silica Reaction and High Performance Concrete**, Building and Fire Research Laboratory, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, 1995.
6. <http://apps.webofknowledge.com>, Erişim Tarihi (10.10.2012).
7. TS EN206-1, **Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk**, TSE, Ankara, 2002.
8. TS 13515, **TS EN 206-1'in Uygulamasına Yönelik Tamamlayıcı Standard**, TSE, Ankara, 2012.
9. CEB (Comite Euro-International du Beton), **Durable Concrete Structures**, Lausanne: Thomas Telford Ltd, 1992.
10. ACI 201.2R-92, **Guide to Durable Concrete**, Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Detroit, 1992.
11. ACI 318, **Building Code**, American Concrete Institute, Detroit, 2000.
12. Yeğinobalı, A., **Betonun Dayanıklılığı I, Fiziksel Etkenler**, T.Ç.M.B. Çimento ve Araştırma Enstitüsü Seminer Notları, Ankara, 1999.
13. <http://kanvasbeton.com>, Erişim Tarihi (11.10.2012).
14. Rostam, S., **Durability of Concrete Structures Workshop Report**, CEB & RILEM International Workshop, Department of Structural Engineering Technical, Copenhagen, 1983.
15. Mehta P.K., Monteiro J.M.P. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. Indian Concrete Institute, Indian Edition, 1997.
16. Neville, A.M. **Properties of Concrete**. Longman, England, 1997.
17. Baradan, B., Aydın, S. "TS EN 206-1 Standardının Prefabrike Betonarme Elemanlar Açısından Önemi", **Beton Prefabrikasyon**, No. 19 (77-78), pp. 5-16, 2006.
18. Aydın, S., Türkel, S., Baradan, B., "Basınç Dayanımı ve Donma-Çözülme Dayanıklılığı Açısından Beton İçin Optimum Hava İçeriğinin Belirlenmesi", **Hazır Beton Dergisi**, No. 83(14), pp. 70-76, 2007.
19. Akman, M.S., "Betonarme Yapılarda Yangın Hasarı ve Yangın Sonunda Taşıyıcılığın Belirlenmesi", **Sika Teknik Bülten**, Yıl 4, Sayı 3, İstanbul, 2001.
20. Petzold, A., Röhrs, M., **Concrete for High Temperatures**, MacLaren and Sons, London, 1970.
21. Yazıcı, H., Türkel, S., Baradan, B., "High Temperature Resistance of Pumice Mortar", **II. International Symposium Cement and Concrete Technology in the 2000s**, İstanbul, 2000.
22. Dias, W.P.S., Khoury, G.A., Sullivan, P.J.E., "Mechanical Properties of Hardened Cement Paste Exposed to Temperature up to 700 °C", **ACI Materials Journal**, No. 87, pp. 160-166, 1990.
23. Piasta, J. "Heat Deformations of Cement Paste Phases and the Microstructure of Cement Paste", **Materials and Structures**, No. 17, pp. 415-420, 1984.
24. Lin, W.M., Lin, T.D., Powers-Couche, L.J., "Microstructures of Fire-Damaged Concrete", **American Concrete Institute Materials Journal**, No. 93, pp. 199-205, 1996.
25. Khoury, G.A., "Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: a Reassessment", **Magazine of Concrete Research**, No. 44 (161), pp. 291-309, 1992.
26. Aydın, S., Yazıcı, H., Baradan, B. "High Temperature Resistance of Normal Strength and Autoclaved High Strength Mortars Incorporated Polypropylene and Steel Fibers", **Construction and Building Materials**, No. 22(4), pp. 504-512, 2008.
27. TS 4065, **Yapı Bileşenlerinin Yanmaya Dayanıklılık Sınıfları (Sınır Dakika Değerleri) - Betonarme ve Öngerilmeli Beton Kirişler**. TSE, Ankara, 1984.
28. TS 3440, **Zararlı Kimyasal Etkileri Olan Su, Zemin ve Gazların Etkisinde Kalacak Betonlar İçin Yapım Kuralları**, TSE, Ankara, 1982.
29. Korista, D.S., Sarkisian, M.P., Abdelrazaq, A.K., "Design and Construction of China's Tallest Building: The Jin Mao Tower, Shanghai", **Structural Engineering World Congress (SEWC)**, San Francisco, CA, 1998.
30. Hobbs, D.W., **Alkali-Silica Reaction in Concrete**. Thomas Telford Ltd, London, 1988.
31. Japan International Cooperation Agency. **The Study on the Maintenance and Rehabilitation of Highway Bridges in the Republic of Turkey**, Final Report, 1996.
32. Shehata, M.H., Shashiprakash, S.G., Thomas, M.D.A., "Alkali Aggregate Reaction and Fly Ash", **Sixth NCB International Seminar on Cement and Building Materials**, 1999.
33. Swamy, R.N., **The Alkali-Silica Reaction in Concrete**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992.
34. Tosun, K., Yazıcı, H., Baradan, B., "Uçucu Kül ve Silika Tozunun Alkali Silika Reaksiyonuna Etkisinin İncelenmesi", **Türkiye İnşaat Mühendisliği 16. Teknik Kongresi**, Ankara, 2001.
35. Thomas, M., Hooton, R.D., Rogers, C., Fournier, B., "50 Years Old and Still Going Strong: Fly Ash Puts Paid to ASR", **Concrete International**, January, 2012.
36. Alptuna, G., **Dolomit Kökenli Agregaların Alkali-Karbonat Reaktivitesinin Araştırılması**, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 2009.
37. Akman, M.S., "Betonlarda Karbonatlaşma ve Yeniden Alkalizasyon Süreçleri", **Türkiye İnşaat Mühendisliği 14. Teknik Kongresi**, İzmir, 1997.
38. Houst, Y.F. "Diffusion de Gaz, Carbonation et Retrait de la Pate de Ciment Durcie", Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, No. 1108, 1993.
39. Kavalalı, M.S., **Betonarmenin Kalıcılığı Konusunda Temel Bilgiler**, İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No. 242, 1994.
40. Otsuki, N., Hisada, M., "Betonarme Yapılarda Elektro Kimyasal Rehabilitasyon Metodları", **Sika Teknik Bülten**, No. 4, Sayı 1, İstanbul, 2001.
41. Suryavanshi, A.K., Swamy, R.N., "Stability of Friedel's Salt in Carbonated Concrete Structural Elements", **Cement and Concrete Research**, No. 26, 729-741, 1996.
42. Yazıcı, H., **Accelerated Carbonation Test of Concrete**, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, 1998.
43. Akman, M.S. "Betona Gömülü Çeliğin Korozyonu, Riskin Saptanması, Önlemler", **Sika Teknik Bülten**, Yıl 3, Sayı 4, İstanbul, 2002.
44. Rosenberg, A., Hansson, C., Andrade, C., "Mechanisms of Corrosion in Concrete", **Materials Science of Concrete I, Ed. By Skalny, P.J., The American Ceramic Society**, 1989.
45. Yiğiter, H., Yazıcı, H., Aydın, S., "Effects of Cement Type, W/C Ratio and Cement Dosage on Sea Water Resistance of Concrete", **Building and Environment**, No. 42, pp. 1770-1776, 2005.