

Betonarme Korozyonu*

Fevziye Aköz¹,
Özgür Çakır²

Özet

Betonarme, 19. yüzyılın ikinci yarısında icat edilmiş olmasına rağmen betonun çeliği koruyucu özelliği ve inşaat teknolojisine getirdiği yeni olanaklar nedeni ile günümüzde yapı üretim teknolojisinin esas taşıyıcı malzemesi haline gelmiştir. Beton ile çeliğin birbirine yapışmasının/aderansının iyi, termik genişleme katsayılarının birbirine yakın ve her ikisinin de yük taşıyor olması nedeni ile bu iki malzeme kullanılarak monolitik yapı sistemleri üretilebilmektedir. Beton, bazik özelliği ile çeliğin korozyona karşı çok iyi korur. Ancak, çeşitli çevresel etkilerle meydana gelen donatı korozyonu sonucu beton-çelik arayüzünde aderans kaybı olur; beton ile çelik birlikte çalışamaz hale gelir, yapı güvenliği zaafa uğrar. Hasarların en aza indirilmesi için betonun basınç dayanımı yüksek, geçirimsizliği düşük, örtü betonu kalınlığı yeterli ve sürekli olmalı, tasarım ve uygulamanın en az hata ile gerçekleştirilmesine azami özen gösterilmeli, gerekli bakım ve onarım zamanında ve eksiksiz olarak yapılmalıdır. Bu öneriler konu ile ilgili kaynaklardan yararlanılarak irdelenmiştir.

1. GİRİŞ

Beton ve çelik çubuklardan oluşan kompozit yapı malzemesine donatılmış beton anlamına betonarme denir. Betonarme, matris fazı beton, lif fazı çelik çubuklar olan kompozit bir malzemedir; ancak içine çelik konulan her beton, betonarme değildir. Örneğin çelik konstrüksiyonda yükleri taşıyan çelik profillerin dış etkilerden ve yangından korunması amacı ile betonla kaplanarak üretilen ferbeton elemanlar, ya da rötreyi kısıtlamak amacı ile ince tellerle takviye edilen kütle betonları ve ferrosement elemanlar betonarme kapsamına girmez [1]. Beton ve çelik çubuklardan oluşan bir yapı elemanının, betonarme olarak davranabilmesi için; bu iki malzemenin birbirine iyice bağlanarak dış kuvvetlere karşı ortak çalışmalarının sağlanmış olması, çubukların betona kenetlenmesi gerekir; kenetlenmeyi sağlayan kayma gerilmelerine aderans denir; elemanlardaki kesit zorlarının beton ile çelik arasındaki geçişi aderans sayesinde gerçekleşir. Aderans gerilmesine, donatı ile beton arasındaki düz yüzeyli çubuklarda donatı ile çubuk arasındaki adezyon (yapışma) ve sürtünme kuvvetleri, nervürlü çubuklarda ise buna ilave olarak çubuk üzerindeki çıkıntıların betona yaslanması ile sağlanan dış kuvvetleri etki eder [2]. Aderans gerilmesi, donatıda gerilme ve moment nedeni ile

Corrosion of Reinforced Concrete*

Although reinforced concrete has invented in the second half of the 19th century, due to the steel protective properties of concrete and getting new facilities in construction technologies make reinforced concrete the main structural material in construction manufacturing technology. Monolithic structural systems can be produced by using both of these materials due to the well adhesion similar thermal expansion coefficient and load carrying properties of concrete and steel. Although concrete ensures well protection on steel against corrosion due to the basic properties, however, various environmental impacts; loss of adhesion between the concrete-steel interface as a result of reinforcement corrosion causes concrete and steel work separately and construction safety suffers from weakness. In order to minimize the damage; corrosion mechanism must be known, concretes having high compressive strength and low permeability must be produced, design and application with a minimum error should be given at least the required maintenance and repair works must be made completely in time. These suggestions considered by using the related literature.

* Beton 2013 Hazır Beton Kongresi'nde sunulmuştur.

⁽¹⁾ Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, fevziyeakoz@gmail.com

⁽²⁾ Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, cozgur@yildiz.edu.tr

oluşan deformasyonlardan, rötre ve sünmeden etkilenir. Aderans, çatlama durumunu belirleyen ve betonun çatlama-sından sonraki durumlarda da donatı ile birlikte çalışmasını sağlayan bir öge olması nedeni ile limit durum için önemli faktörlerden biridir ve betonarme elemanların servis ömrünü doğrudan etkiler.

Betonarmenin önemli bileşeni olan beton, dağınık fazı mineral kökenli agrega, matris fazı çimento hamuru olan daneli kompozit malzemedir; çeliği sıcaklık değişimlerine, su ve suyun taşıdığı zararlı iyonların etkilerine ve bazik özelliği ile de korozyona karşı çok iyi korur. Beton, basınç dayanımı ile denetlenen, çekme dayanımı çok düşük olan gevrek bir malzemedir. Diğer bileşeni olan çelik ise mühendislik alanında çok yaygın kullanılan çekme dayanımı yüksek sünek bir metaldir. Betonarme elemanda, beton basınç kuvvetlerini, çelik ise çoğunlukla çekme kuvvetlerini karşılar. Beton ile çeliğin birbirine yapışmasının/aderansının iyi, termik genleşme katsayılarının birbirine yakın ve her ikisinin de yük taşıyor olması nedeni ile bu iki malzeme kullanılarak monolitik yapı sistemleri üretilebilmektedir [2,3]. Çok farklı yapıların üretimine olanak vermesine, üretiminin diğer malzemelere ve yapı sistemlerine göre kolay ve ucuz olmasına karşın sudan, zararlı çözültülerden etkilenmesi, korozyona uğraması nedeni ile hasar oluşması, güçlendirme gerektiğinde bu işlemin çok zor olması gibi olumsuzlukları vardır. Bu üstün özelliklerine rağmen betonarme elemanlar çeşitli etkilerle meydana gelen donatı korozyonu nedeni ile hasara uğrar [4]. Korozyon hasarları, başta deniz yapıları ve karayolları olmak üzere ulaştırma sektörünün önemli sorunudur. Hasarların en aza indirilmesi için betonun basınç dayanımı yüksek, geçirimsiz bir başka deyişle yüksek performanslı olması, örtü betonu kalınlığının yeterli ve sürekli olması çok önemlidir.

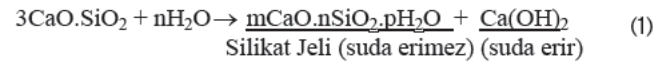
Bu çalışmada, betonarmenin ve kullanılan malzemelerin genel özellikleri, betonarmenin korozyonu, korozyona etki eden faktörler, korozyonun engellenmesi için alınması gereken önlemler, korozyon ile ilgili çalışmalardan örnekler konu ile ilgili kaynaklardan yararlanılarak özetlenmiştir.

2. BETONARME KOROZYONU ve ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Betonun ve/veya beton içinde gömülü çelik donatının çevresel dış etkiler ile meydana gelen fiziko-kimyasal olaylar sonucunda kütle ve nitelik kaybına uğramasına neden olan olaylara da korozyon denir. Hava ile temas halinde olan bir betonarme yapıda, beton içindeki su ve O₂ miktarı, korozyonun oluşmasına neden olabilecek seviyededir [5].

Gözenekliliği (porozitesi) düşük, yoğunluğu yeterli beton ile üretilen betonarme elemanın örtü betonu kalınlığı (pas payı) yeterli ve sürekli ise betondaki su miktarı fazla olsa bile O₂ difüzyonu azaldığı için korozyon tehlikeli sınırlara ulaşmayacaktır. Ancak Ca(OH)₂'nin karbonatlaşması veya betona puzolan malzeme katılması nedeni ile pH'sının düşmesi ve ortamda belirli sınırı aşmış serbest Cl⁻ iyonunun varlığı donatı korozyonuna yol açacaktır. Bu nedenle betonarmede donatının korozyonunu beton özellikleri belirleyecektir. Burada pH'ı düşürdüğü ifade edilen doğal puzolanların (tras), kalsine edilmiş kil ve yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi endüstri atığı puzolanların betonun porozitesini ve geçirimsizliğini azaltarak ve serbest kirecin erimesini engelleyerek betonun performansını artırdığını belirtmek gerekir.

Çimentonun ana bileşenlerinden olan trikalsiyumsilikat (C₃S: 3CaOSiO₂) ve dikalsiyumsilikatın (C₂S: 2CaOSiO₂) hidratasyonundan (1) bağıntısında görüldüğü gibi suda erimeyen silikat jeli ve suda eriyen serbest kireç çıkar. Serbest kireç (CH₂: Ca(OH)₂), alkalitesi yüksek (pH~13) ortam oluşturur ve çelik yüzeyinde kararlı, koruyucu bir oksit tabakası oluşturur; dolayısı ile çimento ortamın pH'nı artıran ve donatıyı korozyona karşı koruyan esas unsurdur. Ancak serbest kireç, dış ortamdan gelen su ve suyun taşıdığı sülfatlı nitratlı, klorürlü bileşiklerin etkisine maruz kalan ve değişime uğrayan bir maddedir [6,7].



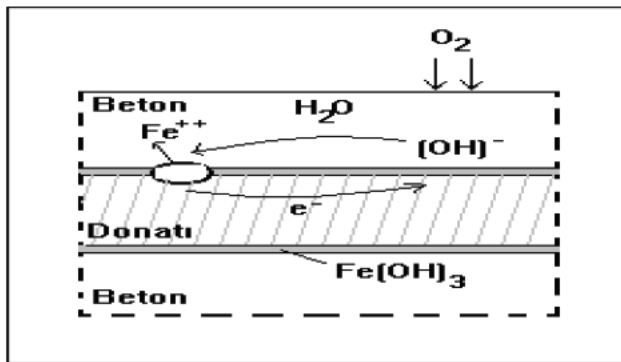
Serbest kireç, korozyona karşı dayanıklılığı son derece düşük olan çelikte anodik akım yoğunluğunun kısıtlanmasına yardımcı olur; bu olaya alkali pasivasyonu adı verilir [8]. Ancak betonun geçirimli olması, ortamda su ve oksijen bulunması, beton üretiminde Cl⁻ iyonu içeren agregaların ve/veya katkıların kullanılması, karbonatlaşma nedeni ile ortamın pH'ının 11'in altına düşmesi gibi nedenlerle donatı yüzeyindeki pasif demiroksit tabakası tahrip olur, donatı korozyonu süreklilik kazanır [9]. Betonarme, öngerilmeli beton, çelik lifli beton veya donatısız beton elemanlarda meydana gelen çatlama, kırılma gibi hasarların araştırılması için öncelikle betonda ve çelikte hasara neden olan korozyon mekanizmalarının incelenmesi gerekir.

2.1 Donatının Korozyonu

Çevrenin elektrokimyasal etkisi ile oluşan malzeme tahribatı korozyon olarak adlandırılır. Korozyon, kimyasal eriyiklerin oluşturduğu doğrudan korozyon, çevre koşullarının oluşturduğu elektrokimyasal korozyon olarak tanımlanmaktadır [8]. Korozyon yavaş seyreden bir olaydır; bu nedenle zararlı so-

nuçlarının ortaya çıkması uzun zaman alır. Bu olgu, metalik yapıların tasarımında korozyonun gözardı edilmesinin başlıca nedenidir.

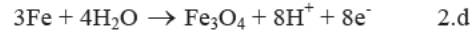
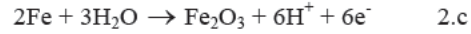
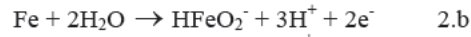
Doğada altın ve platin dışındaki metallerin tamamı oksitler, karbonatlar, sülfatlar ve silikatlar olarak bileşikler halinde bulunur, enerjileri düşük olduğundan kararlı yapıya sahiptirler. Metalleri oksitlerinden ayırmak zorlu bir süreçtir ve bu süreç, büyük miktarlarda hammadde, enerji ve insan gücünün harcanması ile gerçekleşir. Süreç sonunda metaller, termodinamik anlamda, daha yüksek bir enerji düzeyine taşınırken enerjileri düşer. Metallerin doğadaki asıl durumlarına dönme eğilimi korozyon olayının gerçek nedenidir. Her yıl üretilen metalik malzemelerin yaklaşık 1/3' ü korozyon nedeni ile kullanılmaz hale gelir; devre dışı kalan metalik malzemeler hurda olarak kısmen değerlendirilse de 1/3'ü bir daha geri kazanılamamak üzere kaybedilir, yani tabiata geri döner. Bu, yıllık metalik malzeme üretiminin yaklaşık 1/10'unun, korozyon nedeni ile bir daha geri kazanılamamak üzere kaybı demektir. Metalik malzemelerin tabiata geri dönen kısmı çevre kirliliğine neden olur; kirli ortam da korozyonu hızlandırır. Görüldüğü gibi korozyon dünyadaki sınırlı metal ve enerji kaynaklarının en önemli israf nedenidir ve korozyon, sanayide yatırım ve üretim maliyetlerini belirleyen başlıca faktörlerden biridir. Bazı tahminlere göre, korozyonun bir ulusa maliyeti gayri safi milli hasılanın % 3,5-5,0'ine ulaşmaktadır. Türkiye için bu değer % 4,5'dan daha az olmadığına ilişkin tahminler vardır [10]. 2010 yılı Gayri Safi Yurtiçi Hasılda (GSYH) tarım sektörünün %5,9, inşaat sektörünün %5,6 olduğu dikkate alınırsa, korozyonun etkin kontrolünü sağlayacak tekniklerin geliştirip uygulanmasının önemi açıkça görülür. Hava ile temas halinde olan bir betonarme yapıda, beton içindeki su ve O₂ miktarı, donatı korozyonunun oluşmasına neden olabilecek seviyededir. Çeliğin korozyonu, Şekil 1'de görüldüğü gibi elektro-kimyasal süreç ile açıklanabilir.



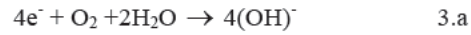
Şekil 1: Beton içindeki donatının korozyonu ve pasivasyonu tabakası [11]

Çelik yüzeyinde oluşan farklı elektro-kimyasal potansiyele sahip anodik ve katodik bölgeler, çimento hidratlarındaki tuz çözeltilerinin oluşturduğu elektrolit ile birleşir, donatının kendisi de elektronları ileten elektriksel iletken görevini görür. Dış kaynaklı akımın olmadığı durumda elektrokimyasal reaksiyon için, elektronların açığa çıktığı anodik reaksiyon ve korozyonun sürekliliği için açığa çıkan elektronların tüketildiği katodik reaksiyonun olması gerekir [11]. Aşağıda beton içinde bulunan donatı için önemli anodik reaksiyonlar 2.a-d, katodik reaksiyonlar 3.a-b bağıntıları ile gösterilmiştir; 4.a-b ile gösterilen olası katodik reaksiyonlar, donatı yüzeyinin etrafındaki ortamın pH'sına ve O₂'nin varlığına bağlıdır [12].

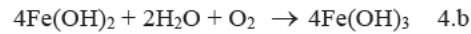
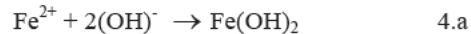
Anot reaksiyonları



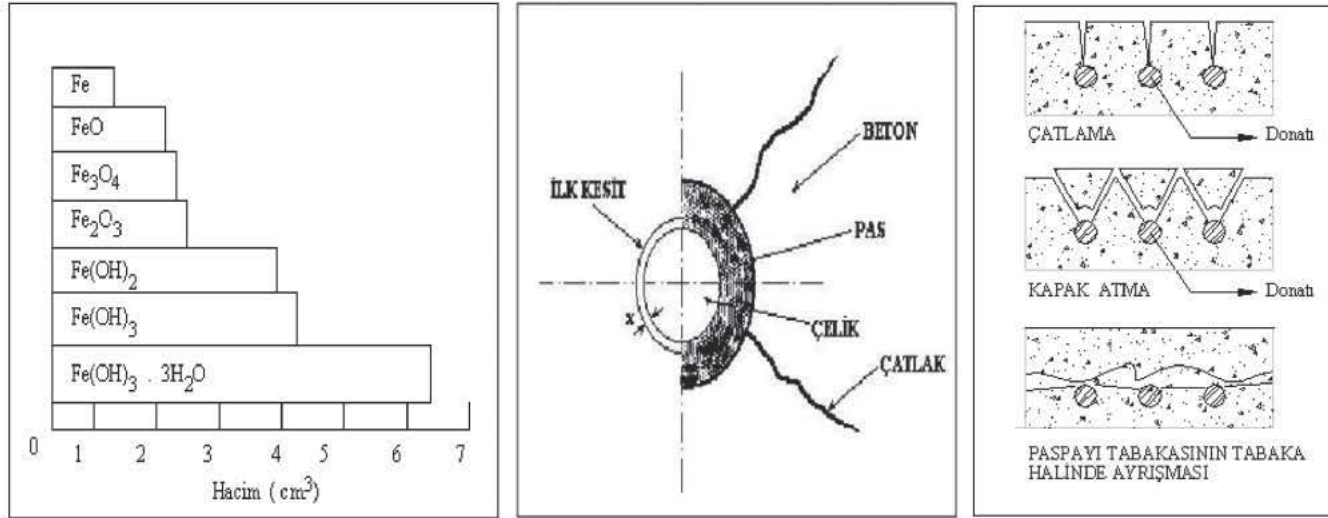
Katot reaksiyonları



Katotta açığa çıkan hidroksil, anotta açığa çıkan demir iyonları ile birleşerek reaksiyonu ile gösterilen ferrohidroksite, sonra daha kararlı haldeki ferrihidroksite dönüşür.

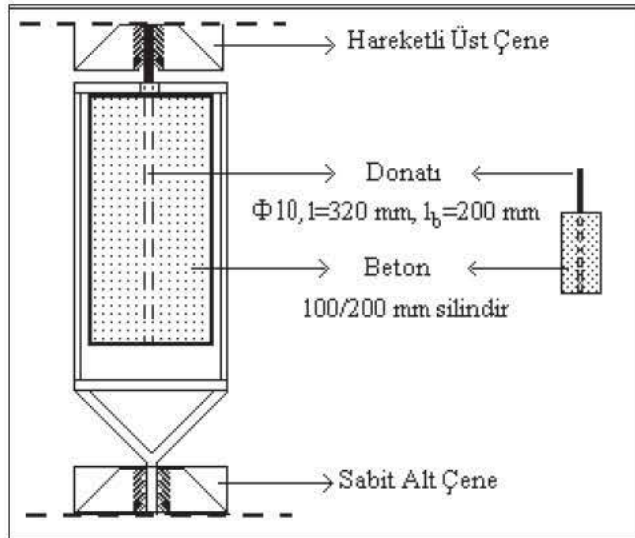


Donatıyı kaplayan pas tabakası (Fe(OH)₃), pasivasyonu sağlayan ve donatıyı korozyona karşı koruyan tabakadır [12]. Donatının yüzeyinde oluşan korozyon ürünü, kütlede çok az kayba neden olmasına rağmen oluşan bileşiğe bağlı olarak demir hacminin 1-6 katı kadar hacim artışına neden olur [13]. Hacim artışı başlangıçta boşlukları doldurarak aderansı artırır ancak ilerleyen dönemde betonda çatlaklar oluşturur, kapak atmalar görülür ve olayın devamında örtü betonu kütleden ayrılır, donatı açığa çıkar (Şekil 2). Betondaki çatlak oluşumu, donatının korozyonunu, korozyon da betonun hasarını hızlandıran girişimli olaylardır; betonarme elemanın ömrünü ve yapı güvenliğini azaltır [4].



Şekil 2: Demiroksitlerde meydana gelen hacim artışları ve etkileri [13,14,15,].

Parça atmaların ve hasarların nedeni, donatıdaki hacim artışı ve betonda çekme gerilmeleri doğurmasıdır. Bu gerilmeler, çekme dayanımı ve çekmede uzama oranı çok düşük ve gevrek bir malzeme olan betonda donatıya paralel çatlaklar oluşur [16].



$$f_{scb} = \frac{F_{scb}}{\pi \cdot \phi \cdot l_b}$$

F_{sc} : Maksimum aderans kuvveti (N)

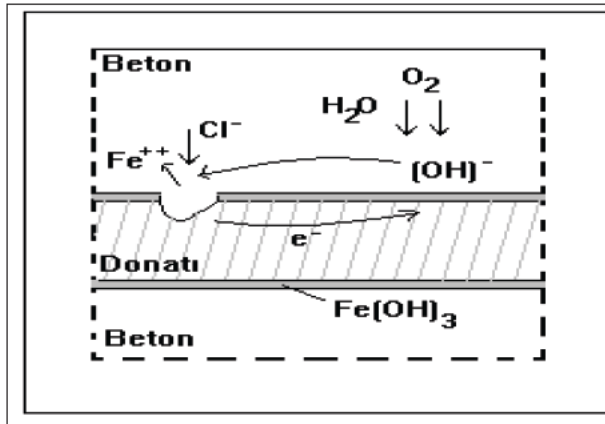
ϕ : Donatı çapı (10 mm)

l_b : Aderans boyu (200 mm)

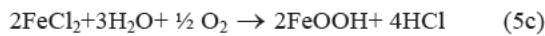
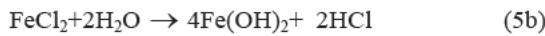
Şekil 3: Betonarme numunede çekip-çıkarma (pull-out) deneyi

Yukarıda da ifade edildiği gibi donatıdaki oksitlerin neden olduğu hacim artışı, başlangıçta donatı ile beton arayüzündeki boşlukları doldurmak sureti ile aderans dayanımında bir miktar artışı; ancak olayın devamında betonda meydana gelen kılcal çatlaklar nedeni ile arayüz bölgesinde aderans kayıplarına neden olur. Donatı korozyonu nedeni ile aderans dayanımında zamanla meydana gelen değişimler, Şekil 3'de şematik olarak gösterilen düzende çekip-çıkarma (pull-out) deneyleri ile araştırılır [17].

Betonarme donatısının korozyonunu hızlandıran en önemli faktörlerden biri, betonarme elemanda klorür penetrasyonudur. Beton karışımına giren veya dışarıdan nüfuz eden klorür iyonlarının tamamı boşluk suyunda serbest halde değildir; bir kısmı çimento hidratasyonu ürünleri ile bağlanarak Friedel Tuzu'na ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) kalsiyumkloroalüminathidrat'a dönüşür [18], bir kısmı da çimento hidratları tarafından adsorbe edilir. Bağlanmayan veya adsorbe edilmeyen Cl^- iyonları serbest halde kalır. Beton üretiminde kullanılan anionik türdeki süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri, çimento hamurunun Cl^- iyonlarını adsorbe etmesini engeller, bu iyonlar da boşluk suyu içinde kalır. İşte bu serbest haldeki klorür iyonları betonarme yapılarda ciddi hasarlara yol açar. Çünkü beton içindeki Cl^- iyonları anodik bölgede, çelik üzerindeki koruyucu pasif tabakayı tahrip eden hidroklorik aside dönüşür, Şekil 4'de görüldüğü gibi oyuklanma (çukurcuk) türü korozyona neden olur. Oluşan çukurlardaki asidik ortam nedeni ile olay hızlanır (5a-5c), derinlik artar.



Şekil 4: Klorürün varlığında elektro-kimyasal korozyon [11].

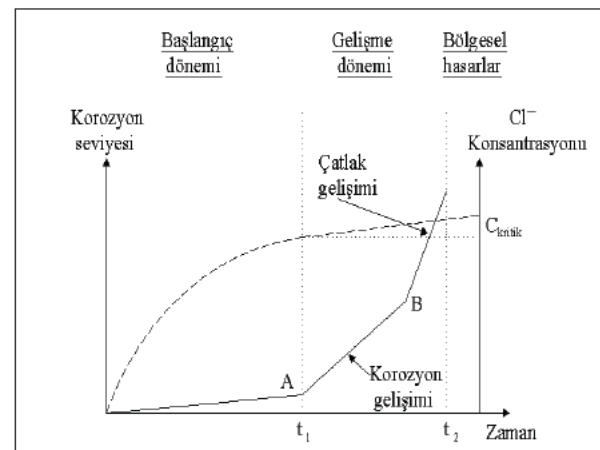
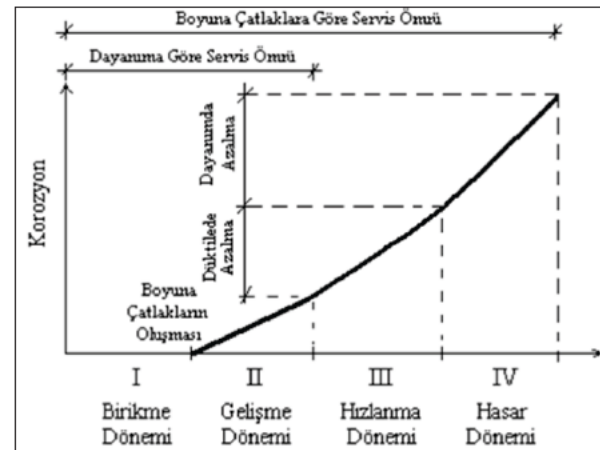


Çizelge 1'de görüldüğü gibi beton içinde Cl⁻ iyonu oranının artması ile (çimento ağırlığının) korozyon şiddeti artmaktadır. Standartlarda donatının korozyonuna neden olan Cl⁻ miktarı çimento veya agrega ağırlığının yüzdesi ya da bir m³ betonda kg (0,6-0,9 kg/m³) olarak verilmektedir [13].

Çizelge 1: Korozyon aktivitesinin Cl^- iyonu oranına göre değerlendirilmesi [21].

Çimento ağırlığının %’si olarak eşik değeri	Korozyon durumu	Korozyon aktivite seviyesi
$Cl < \%0,3$	Düşük korozyon durumu	A
$\%0,3 \leq Cl < \%1,0$	Orta derece korozyon durumu	B
$Cl \geq \%1,0$	Yüksek korozyon durumu	C

Bu miktarın artması durumunda higroskopik özelliği olan klorür tuzları havadan daha fazla nem alması sonucu betonun iletkenliğini artıracak ve korozyonu hızlandıracaktır. Ancak donatı korozyonunun belirlenmesinde serbest klorür miktarının belirlenmesi tek başına yeterli değildir; çünkü donatı-beton arayüzündeki boşluk suyunda Cl^-/OH^- molar oranının kritik bir (0,6) değeri aşması durumunda koruyucu film tabakasının kararsız ve geçirimli hale gelmesi nedeni ile donatı korozyona karşı korumasız hale gelmektedir[17].



Şekil 5: Klorürlerin neden olduğu korozyonunun aşamaları [19,20].

Betonarme elemanların donatı korozyonuna bağlı olarak servis ömrünün belirlenmesinde dayanımın esas alındığı yöntemde; Şekil 5'de [19] görüldüğü gibi ilk dönem, Cl⁻ iyonlarının beton örtüye difüzyonu ve donatı etrafında birikmesi aşamasıdır ve bu dönem, "Birikme Dönemi" olarak adlandırılır, eğer Cl⁻ betona karışım aşamasında katılırsa, bu aşama ortadan kalkar. İkinci dönemde; donatı, Cl⁻ iyonları nedeni ile korozyona uğramaya başlar, beton örtüde çatlaklar oluşur, bu döneme, "Gelişme Aşaması" denir. Dayanıma göre servis ömrü sona ermiştir. Üçüncü dönem; gelişme aşamasında oluşan boyuna çatlaklar nedeni ile Cl⁻ difüzyonu artar ve korozyon hızlanır, beton örtüde parça atmalar başlar, beton dayanımında azalma görülür, bu "Hızlanma Aşaması"dır. "Hasar Dönemi" olarak adlandırılan dördüncü dönemde; donatı korozyonunun ilerlemesi ile kesit alanında azalma olmuş, boyuna çatlaklar artmış, beton dayanımında azalmalar belirgin hale gelmiş, boyuna çatlaklar bakımından servis ömrü sona ermiştir. Yapı tekrarlı yüklerin etkisinde ise dayanımdan başka ve düktilité de azalmıştır.

Betonarme yapının servis ömrünün korozyon seviyesi ve Cl^- konsantrasyonu bakımından değerlendirildiği Şekil 5'de [20] görüldüğü üzere çatlağın oluştuğu başlangıç dönemi (t_1) ve çatlağın arttığı gelişme dönemi (t_2) olmak üzere iki ana dönemde ele alınabilir. Başlangıç dönemi (t_1), boşluklu malzemeye klorür penetrasyonuna ve klorür iyonlarının donatı etrafında birikimine karşılık gelir ve bu süreç, örtü betonunun geçirimsizliğine, sürekliliğine ve kalınlığına bağlı olarak korozyonu başlatmak için gerekli klorür konsantrasyonundan etkilenmektedir. Gelişme dönemi (t_2) ise, klorür iyonlarının donatının yüzeyine ulaşmasına, Cl^- konsantrasyonunun kritik düzeye ulaşması ve çelik yüzeyinin depasivasyona uğratması anlamına gelmektedir. Gelişme dönemini takiben korozyonun geliştiği ve yapıda bölgesel hasarların oluştuğu görülmektedir.

Yukarıda da belirtildiği gibi betonarme elemanlarda donatı korozyonunun gözlenen en belirgin göstergesi, beton örtünün çatlamasıdır ve bu olay, korozyon başlangıç süresi için esas alınan önemli parametrelerden biridir. Örneğin deniz yapılarında beton yüzeyinde ilk çatlağın oluştuğu an kritiktir ve onarım kaçınılmazdır [4]. Bu amaçla, (5) bağıntısında görüldüğü gibi ilk çatlağın süresi (t) esas alınarak, betonda 0,3-0,4 mm'lik çatlağa neden olan donatı çapındaki azalma-ya ilişkin basit nümerik modeller geliştirilmektedir [22].

$$t = \frac{\text{Donatı çapındaki kayıp (mm)}}{\text{Korozyon hızı (mm/yıl)}} \quad (6)$$

Donatı korozyonu ile ilgili bağıntıların çıkarılmasında, (7) bağıntısındaki Faraday kanunundan [23] yararlanılarak donatı çapında meydana gelen kayıp ile elektrokimyasal akım verileri arasında matematiksel ilişkiler kurulmaktadır. Bu bağıntıda W_L : ağırlık kaybı (g), i : akım şiddeti, zaman (C:Coulomb), M_w : elektroaktif metalin molekül ağırlığı, n : elektrokimyasal reaksiyonda alınıp verilen elektron sayısı, F (96487 C/g-eşdeğer ağırlık); Faraday sabitidir.

$$W_L = \frac{itM_w}{nF} \quad (7)$$

Andrade ve arkadaşları tarafından, donatı çapındaki kaybın belirlenmesi için Faraday Kanununu esas alan (7) bağıntısı önerilmiştir [24]. Bağıntıda, Δ_{ϕ_s} (mm); donatı çapındaki kayıp, i_{corr} ($\mu A/cm^2$); korozyon akım yoğunluğu, t (yıl); zaman, a ((mm/yıl)*(cm²/ μA)) birim dönüştürme çarpanıdır. Betonda kritik çatlama süresinin (t_{cr}) önceden tahmini için laboratuvar hızlandırılmış deneylere gereksinim vardır.

$$\Delta_{\phi_s} = a \cdot i_{corr} \cdot t \quad (8)$$

2.2 Betonun Korozyonu

Betonun korozyonuna başta; tasarım ve yapım sırasındaki konstrüksiyon hataları ve beton özellikleri olmak üzere pek çok faktör etki eder. Korozyon olayına alkali-agrega reaktivitesi (AAR) gibi iç korozyon olayları dışında çoğunlukla dış ortamdaki su ve zararlı sular neden olur [3]. Zararlı suların veya havanın betonda oluşturduğu kimyasal nedenlere dayanan korozyon hasarı, ıslanma-kuruma, donma-çözülme, erozyon, kavitasyon gibi fiziksel faktörlerin etkisi ile daha büyük boyutlara ulaşır.

2.2.1 Beton Özellikleri

Betonun dayanımını ve dayanıklılığını betonun bileşenleri, çimentonun türü ve dozajı, porozitesi, permeabilitesi, boşlukların boyutu ve dağılımı, yaşı, olgunluğu, betonun nem oranı, ortamın sıcaklığı ve nemi, tras, uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi puzolan malzemeler ve kimyasal katkıların kullanımı ve kuru etkiler [25]. Ayrıca su ve çözeltilerin etkisi, karbonatlaşma ve puzolan malzeme kullanımı ile serbest kirecin bağlanması sonucu ortamın pH'sının düşmesi, oksijen difüzyonu gibi çok fazla etken betonun ve donatının korozyonuna neden olur ve olayı hızlandırır.

a) Çimentonun türü ve dozajı

Çimento, mineral kökenli hidrolik bir bağlayıcıdır ve özellikleri çimentonun inceliğine ve bileşenlerinin oranına göre değişir [26]. Ayrıca içine farklı oranlarda, farklı puzolanlar katılması ile farklı özellikte çimentolar üretilmektedir. Örneğin sülfatlara dayanıklı çimento üretiminde trikalsiyumalüminat ($3CaO \cdot Al_2O_3 = C_3A$) oranına sınırlama getirilir ve puzolan katılarak bu oranın düşmesi sağlanır. Betonun dayanımı ve dayanıklılığı çimento dozajı ile doğru orantılıdır; bu nedenle standartta (TS-EN206-1) beton sınıfına göre minimum değerler verilmiştir.

b) Beton içindeki boşluklar [27]

Agrega tanelerinin bünyesi içindeki boşluklar, bu boşluklar, agreganın mensubu olduğu doğal taşın özelliklerine bağlıdır ve beton geçirimsizliğindeki etkisi ihmal edilebilir düzeydedir.

Agrega taneleri arasında kalan boşluklar; betonun iyi yerleştirilememesi nedeni ile çimento hamurunun agreg taneleri arasına giremediği durumda, agreg taneleri arasında meydana gelen bu boşluklar taze beton özelliklerine ve iççiliğe bağlı denetlenabilir boşluklardır.

Betonun farklı oturmasının yol açtığı boşluklar; taze betonun oturmasının herhangi bir nedenle engellenmesi ve özellikle iri agreg tanelerinin donatıya veya kalıba sürtünmesi nedeniyle ile askıda kalması sonucu, iri agreg tanelerinin altında meydana gelen bu boşluklar, betondaki çeper etkisi dikkate alınarak azaltılabilir.

Agrega-çimento arayüzünde oluşan boşluklar; taze betonda agrega-çimento arayüzünde ve agrega taneleri arasında 10^{-4} cm'den büyük boyutta küresel makro boşluklar veya kılcal boşluklar vardır.

Sertleşmiş çimento hamuru içindeki boşluklar; çimento hidratasyonu sonucu çok küçük boyutta boşluklar oluşur. Bunlar, çimento pastası hacminin yaklaşık %12'si oranında ve 0.5×10^{-8} ile 3×10^{-7} cm boyutunda jel boşlukları, 3×10^{-7} ile 5×10^{-3} cm boyutunda ve su/çimento oranının bir fonksiyonu olan kılcal boşluklar ve hacmin %7'sini oluşturan 10^{-2} ile 10^{-1} cm boyutlu makro boşluklardır. Hidratasyonun ilerlemesi ile bu boşlukların oranında bir azalma olur. Ayrıca ilk günlerde birbiriyle bağlantılı olan boşluklar ve kılcal borular zamanla jel hacminde meydana gelen artış nedeni ile tıkanarak sürekliliğini kaybeder geçirimsizlik azalır. Nemli ortamda ve uygun sıcaklıkta kür edilen betonun yaşı arttıkça olgunluğu dolayısı ile dayanımı ve dayanıklılığı artar.

c) Betonun bünyesindeki suyun miktarı

Beton içindeki suyun miktarını ve betonun geçirimsizliğini ortamın bağıl nemi de etkiler. Örneğin beton yüzeyinin yağmur suyu ile doğrudan teması halinde, sertleşmiş çimento pastası içindeki boşlukların suyu absorpsiyonu nedeni ile su miktarı artar. Ortamın bağıl nemi düşük ise su buharlaşarak beton- dan uzaklaşır ve çatlak oluşmasına neden olabilir

2.2.2 Zararlı Suların Etkisi

Zararlı sular, sertliği düşük sular, magnezyum, sodyum, amonyum gibi tuzlar içeren sular betonda farklı reaksiyonlara ve hasarlara neden olurlar. Bu suların etkileri aşağıdaki gibi özetlenebilir [3].

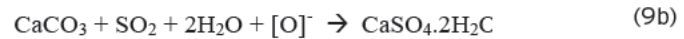
a) Sertliği düşük suların etkisi

Başta çimentonun hidratasyon ürünlerinden serbest kireci ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) olmak üzere beton bileşenlerini çözmesi, kütleden uzaklaştırması bir başka deyişle betonun yıkanması şeklinde olur. Çözülme-yıkanma sonucu betonda boşluk oranı artar ve zararlı etkilere daha açık hale gelir; suyun çözme özelliği yüksek ise olay hızlanır. Bu tip korozyona haliç gibi tatlı su oranı nispeten yüksek olan deniz yapılarında rastlanır.

b) Asitli suların etkisi

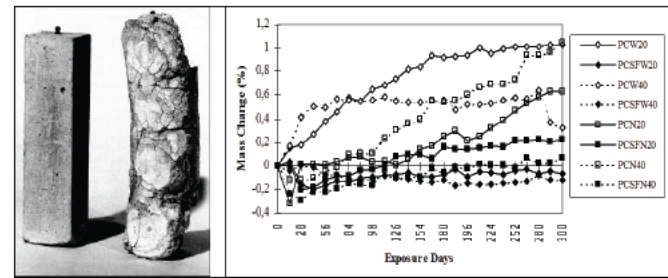
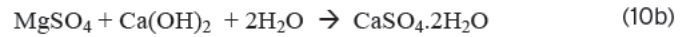
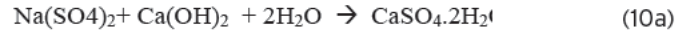
Asitli suların etkisi, sertliği düşük sular gibi betonun çözülmesi ve yıkanması ile açıklanabilir. Asitli sulara en iyi örnek, özellikle endüstri bölgelerindeki atmosferde rastlanan iki temel kirletici gaz CO_2 ve SO_2 'dir. Bu gazların hava içindeki subuharı ile tepkimeleri sonucu, sırasıyla karbonik asit (H_2CO_3) ve sülfirik asit (H_2SO_4) ortaya çıkar. Bunlarda CO_2 , CaCO_3 ile tepkimesi 9a-9c bağıntılarında görüldüğü gibidir. Karbonik asitli suların etkisi ile çimentonun hid-

ratasyon ürünleri çözünür ve suyun taşınması ile yıkanır. Serbest kirecin bulunduğu ortamda bikarbonat tekrar kalsiyumkarbonata dönüşmekte, suyun bulunduğu ortamda yüzeye taşınmakta; taşınan kalsiyumkarbonat, suyun buharlaşması sonucu yüzeyde birikerek, beyaz lekeler oluşturmaktadır. Bu olaya "çiçeklenme" denir. Asitli suların neden olduğu bu tür hasarlar, sadece betonda değil, tarihi yapılarıdaki kalsiyum karbonat esaslı doğal taşlarda da sıklıkla görülmektedir.



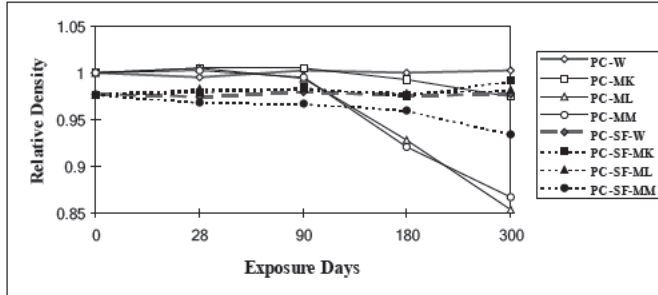
c) Sülfatlı suların etkisi

Beton boşlukları içine süzülen SO_4^{2-} anyonları serbest kireçle birleşerek alçıtaşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) dönüşür, sülfat tuzunun katyonuna bağlı olarak alçı taşı ile birlikte NaOH gibi suda eriyen (10a) veya $\text{Mg}(\text{OH})_2$ gibi suda erimeyen (10b) reaksiyon ürünleri oluşur.



Şekil 6. Sodyum sülfat etkisi hasar etkisi ve kütlenin zamanla değişimi [28].

Oluşan kristal yapıları katı cisim, kütlenin ve hacminin artmasına neden olur, çeperlere basınç yapar ve tahribata yol açar (Şekil 6). Ancak magnezyum sülfat çözeltisinin hacim artışından başka eritme özelliği de vardır. Erimenin nedeni, Mg^{2+} iyonunun yarıçapının, Ca^{2+} iyonunun yarıçapına çok yakın ve değerliklerinin aynı olması nedeni ile Mg^{2+} iyonu Ca^{2+} iyonu ile yer değiştirebilme özelliğine sahip olmasıdır. Bunun için Mg^{2+} iyonu içeren sular çimentonun esas öğeleri ile kimyasal tepkimeler sonucunda betonun erimesine-çözülmesine neden olur.



Şekil 7: Magnezyum sülfat etkisindeki harçların birim ağırlığının zaman içinde değişimi

Puzolan olarak silis dumanı katılmamış harçlarda birim ağırlık, Şekil 7'de görüldüğü gibi 90. Günden başlayarak hızla azalmış, 300. Günde kayıplar %15'e ulaşmıştır [29].

d) Klorürlü suların etkisi

Klorürler betona agregalarla, karma suyu ile, priz hızlandırıcı kimyasal katkıları ile, deniz suyu veya atmosfer etkisi ile, yol ve köprülerde kullanılan buz çözücü tuzlar ile, bazı kaplıca suları ile, endüstride üretimin bileşenleri veya atıkları ile karışır ve/veya bulaşır. Beton karışımına giren veya dışarıdan nüfuz eden klorür iyonlarının tamamı boşluk suyunda serbest halde değildir; bir kısmı çimento hidratasyonu ürünleri ile bağlanarak, kalsiyumkloroalüminat hidrat'a ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) Friedel Tuzu'na dönüşür, bir kısmı da çimento hidratları tarafından adsorbe edilir. Özellikle Mg^{2+} içeren çözeltilerin daha agresif olduğu Cl^- iyonlarının bulunması durumunda $\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl}_4\text{H}_2\text{O}$ (magnezyumoksikloride) formuna dönüştüğü ve CSH'da yavaş yavaş erimeler olduğu, betonun toplam porozitesinin arttığı ifade edilmektedir [30]. Bağlanmayan veya adsorbe edilmeyen Cl^- iyonları serbest halde kalır, işte bu serbest haldeki klorür iyonları betonarme yapılarda ciddi hasarlara yol açar.

Standartlarda donatının korozyonuna neden olan Cl^- miktarı çimento veya agrega ağırlığının yüzdesi ya da bir m^3 beton da kg (0,6-0,9 kg/m^3) olarak verilmektedir. Bu miktarın artması durumunda higroskopik özelliği olan klorür tuzlarının havadan daha fazla nem alması sonucu betonun iletkenliğini artırarak korozyonu hızlandıracaktır. Ancak donatı korozyonunun tahmininde serbest klorür miktarının belirlenmesi tek başına yeterli değildir; çünkü donatı-beton arayüzündeki boşluk suyunda Cl^-/OH^- molar oranının kritik bir (0,6) değeri aşması durumunda donatı yüzeyindeki koruyucu film tabakasının geçirirli ve kararsız hale gelmesi sonucu donatı korozyona karşı korumasız hale gelmektedir [13]. Betondan daha çok donatının korozyonuna neden olan klorür geçirirliliğinin ölçülmesi ve değerlendirilmesi için klorür difüzyonunu ve elektriksel geçirgenliği ölçmeye dayanan deney yöntemlerinden yararlanılmaktadır [31,32,33].

e) Diğerler zararlı sular

Sülfatlı, karbonik asitli, klorürlü sulardan başka yapının işlevine ve bulunduğu ortamın durumuna göre örneğin endüstri yapılarında çeşitli yağlar, nitratlar, ağır metaller gibi zararlı çözeltiler de betona ve betonarmeye etki eder, korozyona neden olur; yapının servis ömrünü doğrudan veya dolaylı olarak etkiler. Bilinen veya tahmin edilen bu suların betona ve/veya betonarmenin korozyonuna etkileri de deneysel olarak araştırılmalıdır.

3. BETONARMEDE KOROZYONUN ARAŞTIRILMASI

Korozyondan kaynaklanan hasarlar için ayrılması gereken mali kaynakların büyüklüğü nedeni ile korozyonun erken teşhisi önem kazanmaktadır. Yapıda kullanılacak malzemelerin dayanımdan başka dayanıklılık bakımından yeterliliğinin önceden yapılacak deneyler ile araştırılması, yapının servis ömrünün uzamasını sağlayacak, sonradan yapılması gereken pahalı onarımlara ihtiyacı azaltacaktır. Betonarme yapılarda olası hasarların teşhis ve kontrolü için, gözle görülen belirtiler yardımı ile korozyonun kalitatif olarak belirlenmesine, korozyon hızının sistematik olarak ölçülmesine ve korozyon ile ilgili bazı parametrelerin tespit edilmesine ihtiyaç vardır.

Donatı korozyonunun araştırılmasında arazide veya laboratuvar da uygulanan farklı tespit, ölçüm ve deney yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Korozyon ile ilgili deneyler, doğrudan agresif ortamın bulunduğu doğal çevrede veya laboratuvar da yapılır. Arazide veya denizde yapılan deneylerde yapı elemanının kendisi, bir diğer deyişle prototipi deney numunesi olur. Korozyon hasarı, gözlem sonucu nitelik olarak araştırılır. Ayrıca potansiyel ölçümü veya paslanma miktarı yani penetrasyon derinliği ölçülerek değerlendirilir veya uzaktan sürekli ölçümler yapılarak korozyonun başlangıcı ve gelişimi hakkında veri elde edilir [34]. Laboratuvar deneylerinde amaç, genellikle koruma için alınan önlemlerin yeterliliğinin, örneğin Cl^- difüzyonunun önlenip önlenmediğinin incelenmesidir.

3.1 Gözlemsel Metotlar

Gözlemsel metotlar, özel koşullarda tahribatsız ve pratik olmalarına karşın önemli sonuçların elde edilmesi için uzun zamana ihtiyaç vardır. Özellikle korozyon direnci yüksek betonarme elemanlarda korozyon nedeni ile meydana gelen değişikliklerin ortaya çıkması çok zaman alır. Bu yöntemde gözlemler hızla yorumlanabilir ancak tahribatsız yöntem olduğu için donatıdaki değişimler doğrudan belirlenemez; sonuç, hasar oluşması şeklindedir ve hasarlar gözlemlendiğinde genellikle korozyon önemli derecede ilerlemiştir.

3.2 Deneysel Yöntemler

Korozyon kontrolü için, özellikle duyarlı noktalarda korozyon hızının sürekli ölçülerek kaydedilmesi gerekir. Donatı korozyonu nedeni ile betonda ilk çatlağın meydana gelmesi için geçen süre, kritik çatlama süresi (t_{cr} , gün) olarak adlandırılır. Bu sürenin önceden tahmini için laboratuvar hızlandırılmış ve şiddetlendirilmiş deneylerin yapılması gerekir. Donatı korozyonunun araştırıldığı laboratuvar çalışmalarında çoğunlukla elektropotansiyel fark (Volt) ve akım şiddeti (Amper) ölçülür; ölçülen bir diğer büyüklük de ortamın elektriksel direncidir (Ohm). Betonarme elemanlarda korozyon akımının çok küçük, elektriksel direncin çok büyük olduğu dikkate alınır, ölçümlerde duyarlılığın önem kazandığı açıktır, bu bakımdan korozyon deneyleri için özel voltmetre ve ohmmetre cihazları geliştirilmiştir. Bu amaçla kullanılan cihaz ve donanımlar çoğunlukla doğrusal korozyon kinetiği olarak adlandırılan yaklaşım üzerine kuruludur. Geleneksel elektrokimyasal tekniklere uygun olan bu donanımların tümünde korozyona uğrayan metale dışarıdan akım uygulanması gerekir. Ancak dışarıdan akım uygulanması, doğal korozyon potansiyelinden sapma gibi önemli bir sakıncayı da beraberinde getirmektedir [34].

3.2.1 Ağırlık Kaybı

Korozyon nedeni ile metal yüzeyinde meydana gelen malzeme kaybı tespit edilerek malzemenin ortalama yıllık penetrasyon derinliği 11 bağıntısı ile belirlenebilir.

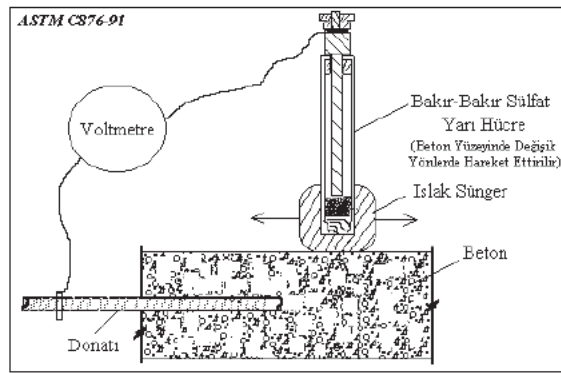
$$P = W_k \cdot (S \cdot t \cdot \beta)^{-1} \cdot 24.365 \quad (11)$$

Bağıntıda; p (cm/yıl), penetrasyonu, W_k (g), metalin korozyon nedeni ile ağırlık kaybını, S (cm²), korozyona maruz metalin yüzey alanını, t (saat), deney süresini ve β (g/cm³), metalin yoğunluğunu göstermektedir [35]. Korozyon nedeni ile birim zamanda, yüzeyden taşınan tabakanın kalınlığı, korozyon hızı olarak tanımlanmakta; mpy (mil/yıl) standartlarda da yer almaktadır.

Deneysel çalışmalarda korozyon nedeni ile oluşan ağırlık kaybı, pas tabakasının Clarke Çözeltisi olarak bilinen kimyasal sıvı ile temizlendikten sonra belirlenir [36]. Aköz vd. [30] tarafından yapılan çalışmada, farklı konsantrasyonlarda Cl⁻ içeren çözeltilerde 300 gün süre ile tutulan harç numunelerin içindeki donatıların ağırlık kaybının ihmal edilebilir düzeyde olduğu belirtilmiştir. Ancak donatıda mikron mertebesindeki kayıpların oluşan üründeki hacim artışları nedeni ile betonda çatlamalara neden olduğu bilinmektedir. Bu nedenle ağırlık kaybı deneylerinin daha uzun sürede ve/veya daha korozif ortamda sürdürülmesi gerekir.

3.2.2 Potansiyel Haritaları

Korozyon hasarının tespitinde, yapının korozyona uğrama ihtimalinin çok arttığı aktif bölgelerin gösterildiği potansiyel haritalarından çok sık yararlanılır. Beton içine gömülü donatıların yarı-hücre potansiyelinin belirlenmesi amacı ile ASTM C876 (1991)'de açıklandığı gibi referans elektrotu beton yüzeyine değdirilir (Şekil 8), betona gömülü çelik çubuk ile referans elektrot arasında meydana gelen potansiyel farkı (E , volt), yüksek empedanslı bir voltmetre ile ölçülür [37].



Şekil 8: Yarı-hücre potansiyelinin ölçümü

Korozyon potansiyelinin (E_{corr}) ölçülmesine dayanan bu yöntemde elektrokimyasal korozyon kolay ve hızlı bir şekilde izlenir. Yarı-hücre potansiyeli değerine göre olası korozyon durumunu veren değerlendirmeler yapılır. Ölçümde genellikle Cu/CuSO₄ (bakır/bakır sülfat, CSE), Ag/AgCl (gümüş/gümüş klorür) veya kalomel (Hg-Hg₂Cl₂) elektrodu kullanılır. Bunlardan doymuş kalomel elektrotun, betonarme yapılarda iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir [37]. Betonun elektriksel direnci yüksek olduğundan ölçüm bölgesinin deney sırasında ıslak olması zorunludur. Ölçüm değerleri, Çizelge 2'de verilen yarı-hücre potansiyel değerleri ile karşılaştırılarak yapıdaki korozyon durumu belirlenir.

Çizelge 2. ASTM C 876'ya göre potansiyel kriterleri

Yarı-hücre Potansiyel Değerleri CSE (SCE)*	Korozyon olasılığı
$E < -0.350 \text{ mV } (-270 \text{ mV})$	%90 güvenirlikle donatının korozyona uğrama olasılığı korozyon vardır
$-0.350 \text{ mV} < E < -0.200 \text{ mV } (-0.120 \text{ mV})$	Belirsizlik vardır, kesin bir şey söylenemez
$-200 \text{ mV} < E$	%90 güvenirlikle korozyon yoktur

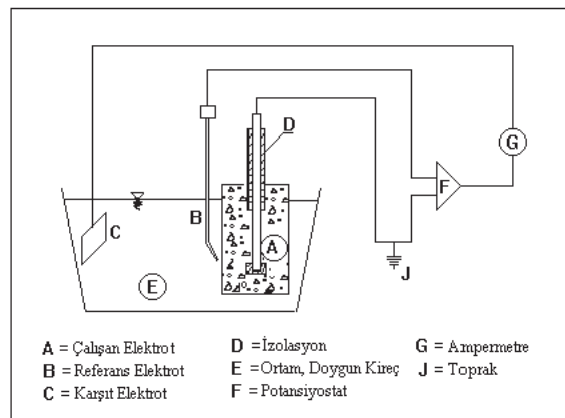
* Standart kalomel elektrodu

ASTM C 876'da verilen daha yüksek negatif potansiyel değeri, her zaman daha hızlı korozyon olduğu anlamına gelmez, örneğin potansiyelin negatif yönde artışı, gerçekte Fe iyon konsantrasyonundaki azalmanın göstergesi olabilir. Haque ve Kawamura (1992) tarafından yapılan bir deneysel çalışmada, bağlayıcı madenin ağırlıkça %0, % 0.5 ve %2'si oranında katılan klorür ile üretilen betonlarda, yapılan yarı-hücre potansiyeli ölçümlerinden alınan sonuçlardan referans CSE'ye göre, ileri derecedeki korozyon hasarının tespitinde bu yöntemin güvenilir olmadığı ve ciddi şekilde çatlamış numunelerde bile yarı-hücre potansiyel değerinin sadece -230mV değerinde olduğu ifade edilmiştir [38]. Bu nedenle korozyon hızının, yarı-hücre potansiyeli yerine diğer elektro-kimyasal tekniklerle elde edilmesi daha doğrudur. Çünkü korozyon hızı, anot potansiyelinin büyüklüğünden çok, anot ile katot arasındaki potansiyel farkın büyüklüğüne bağlıdır [15].

3.2.3 Polarizasyon Teknikler

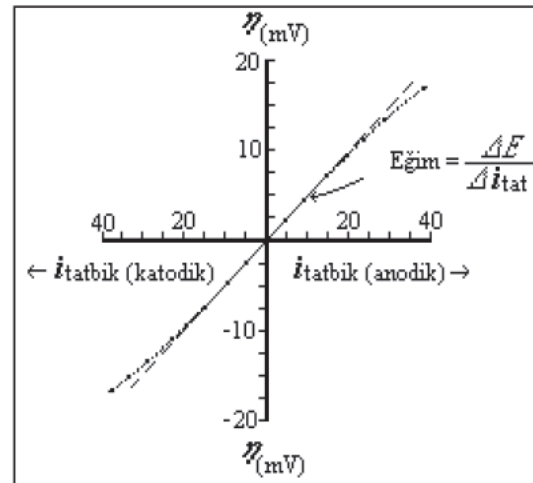
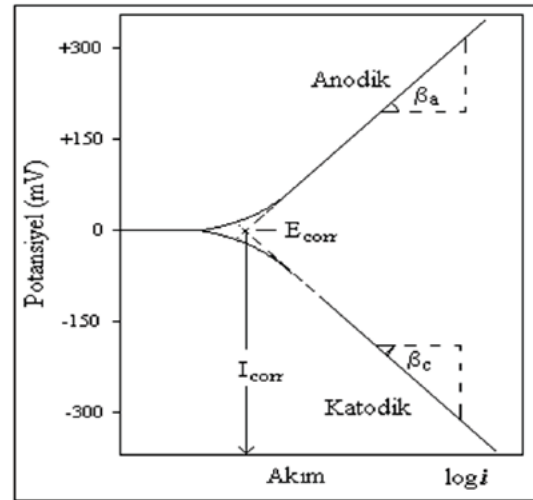
Betonarme korozyon deneylerindeki ikinci yaklaşımda, polarizasyon eğrilerinin çizilmesi, korozyon akım şiddetinin ve Tafel eğimlerinin hesaplanması amaçlanır. Bu durumda; sistemin sabit bir gerilim ile beslemesi, sistemdeki gerilim düşmelerinin ve akım şiddetlerinin potansiyostat ile ölçülmesi gerekir. Ölçü sisteminde (Şekil 9) beton içindeki çelik, çalışan elektrot adını alır; verilen akımın şiddetine ve gerilime bağlı olarak anottan katoda doğru değişik davranışlar gösterir. Hücreyi tamamlamak üzere agresif ortam içine bir karşıt elektrot daldırılır. Eğer çalışan elektrot anot konumunda ise karşıt elektrot katot fonksiyonu görür. Karşıt elektrot camsi karbon, platin veya oksit kaplı titan olabilir. Bu arada çalışan elektrotun potansiyeli, beton yüzeyine yakın bir yerde tutulan referans elektroda göre belirlenir. Potansiyostat içinde bulunan bir ampermetre yardımı ile akım şiddeti ölçülür [3].

Polarizasyon eğrilerinin çizimi için yapılan ölçümlerde, daldırıldığı sıvı ortam içinde çözünmekte olan bir metalin ölçülen potansiyeli korozyon potansiyelidir (E_{corr}). Sistemde numuneye bir potansiyostat yardımı ile E_{corr} 'dan başlayarak yaklaşık 250 mV'a kadar potansiyel, anodik ve katodik doğrultularda yavaş yavaş uygulanır.



Şekil 9: Potansiyostatlı korozyon ölçüm sistemi [3].

Ölçülen dış akımlar ile uygulanan potansiyeller arasında deneysel polarizasyon eğrileri çizilir. Şekil 10'da Tafel eğrilerinin (E - i ilişkisinin) idealize edilmiş hali ve bu ilişkinin lineer hali görülmektedir



Şekil 10: İdealize edilmiş Tafel Eğrisi ve Lineer Polarizasyon eğrileri [39,40]

İdealize edilmiş Tafel eğrilerindeki (Şekil 10a) doğrusal kısımların kesiştiği noktanın apsis değerinden E_{corr} Faraday kanunundan çıkarılan bağıntıdan (12) da korozyon hızı (μ /yıl) belirlenebilir [39]. Bağıntıda, W_E çeliğin eşdeğer ağırlığı (g), Δ yoğunluğudur (gr/cm^3).

$$\text{Korozyon hızı } (\mu/yıl) = 3,27 \times E_{corr} \times W_E \times \Delta^{-1} \quad (12)$$

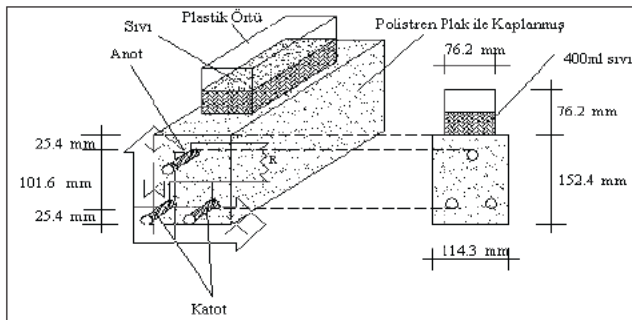
Lineer polarizasyon tekniğinde, E_{corr} 'dan itibaren -25mV ile +25 mV arasında kalmak üzere Tafel tekniğinde kullanılandan daha küçük değerlerde potansiyel uygulanır. Elde edilen verilerden lineer polarizasyon eğrileri çizilir; eğrilerin eğiminden ve Tafel eğimlerinden yararlanılarak I_{corr} belirlenebilir [40].

3.2.4 Diğer Metotlar

Açıklanmaya çalışıldığı gibi polarizasyon eğrileri elektro-kimyasal hücre içinde anot ve katodun polarizasyonu sonucu gelişen, akımın şiddeti ile potansiyeli arasındaki bağıntıyı gösteren eğrilerdir. Daha güvenilir sonuçlar elde etmek üzere, betonarme elemanlar için farklı yöntemler geliştirilmiştir. Rodriguez ve arkadaşlarına göre [41], en çok kullanılan yöntemlerden bazıları, Koruma Çemberi, Coulostatik, Elektro-kimyasal Güçlü ve Elektro-kimyasal Impedans Spektroskopisi'dir. Ancak bütün bu elektro-kimyasal izleme yöntemleri, bir dereceye kadar lineer polarizasyon metoduna yardımcı olur.

Betonarme elemanlarda korozyon ölçümünün bir diğer yönteminde de sistemin potansiyel farkı, ASTM G109 (1992)'da [42] açıklanan ve Şekil 11'de görülen deney düzeneğinde, betonarme donatılarında anot ile katot bölgeleri arasına kurulan sabit direnç yardımı ile ölçülür ve direnç üzerinden geçen akım belirlenir. Bu ölçüm yöntemi, esas olarak betondaki metallerin korozyonuna kimyasal katkıların etkisinin belirlenmesi için kullanılmaktadır. Örneğin Vedalakshmi vd. [43], tarafından yapılan deneysel çalışmada; ortalama basınç dayanımı 20 MPa olan betonlar ile üretilen betonarme numuneler, %3'lük NaCl çözeltisi ile ıslanma-kuruma etkisine maruz bırakılmış. Numunelerde makro hücre korozyon ölçümleri ve donatı civarında suda çözünmüş klorür tayini deneyleri yapılmış; anot civarındaki klorür içeriğinin 2260-4500 ppm civarında iken katot civarındaki klorür içeriğinin 160-200 ppm civarında olduğu belirtilmiştir.

Standartta, ölçülen makro-hücre potansiyel (E ,mV) değerinden hesaplanan akım (i) değerinin $10\mu A$ 'e eşit veya fazla olması durumunda korozyonun başladığına işaret edilmektedir. Ayrıca hesaplanan akım değerleri yardımı ile sistemde oluşan toplam korozyon (TC, coulomb) kümülatif olarak hesaplanabilmektedir.



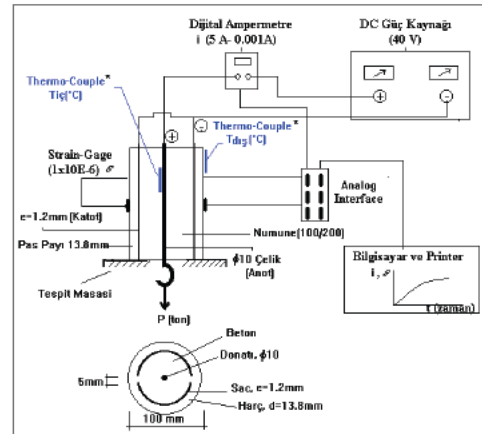
Şekil 11: Betonarme numunelerde makro-hücre potansiyel ölçümü [42]

Günümüzde beton içindeki çeliğin korozyon akım yoğunluğunun lineer polarizasyon metodu esasına göre ölçülüp değerlendirildiği aletler de mevcuttur; ayrıca son yıllarda, beton içerisindeki donatının korozyon sürecini takip etmek üzere mini sensörler geliştirilmiştir. Bu mini sensörler yardımı ile inşaatın yapım aşamasından itibaren yapılan ölçümler sürekli olarak kaydedilmekte, donatının korozyonu hakkında fikir sahibi olunmaktadır [42].

4. ÇALIŞMALARA ÖRNEKLER

Dayanıklılığın, servis ömrünün araştırıldığı çalışmalarda; gerçeği temsil etmek üzere ayrıştırılmış, şiddetlendirilmiş ve hızlandırılmış simülasyon deneyleri yapılır. Bu amaçla yapının işlevine göre bulunduğu/bulunacağı gerçek ortamda maruz kalacağı etkiler belirlenir veya tahmin edilir. Gerçekte girişimli ve yavaş gelişen bu olayların hasar etkeni olarak değerlendirilmesi ve bu etkenlerin laboratuvar ortamında oluşturulması için bazı ön kabuller yapılır. Örneğin doğal ortamdaki sıcaklık değişimleri ve ıslanma etkileri, ısınma-soğuma, donma-çözülme, ıslanma-kuruma, tekrarlı yüklemeler, sürtünmeler gibi mekanik etkiler, yükleme-boşalma, aşınma, gibi benzeşim yapılarak deneyler planlanır. Genelde ayrıştırılmış olarak uygulanan deneylerden hızlı sonuç alınması için de hızlandırma ve şiddetlendirme uygulanır [45].

Betonarme elemanlarda donatı korozyonunun araştırılması amacı ile yapılan korozyon deneylerinde de benzer anlayış ile hızlandırılma şiddetlendirme uygulanır; sisteme ya sabit gerilim uygulanarak, beton içinden geçen akım şiddeti ölçülür ya da akım şiddeti sabit tutularak gerilim ölçülür. Bu tür çalışmalarda ayrıca donatıda ağırlık kaybı, yarı hücre potansiyelinin değişimi ve betonda çatlak oluşumu gibi ölçüm ve gözlemler değerlendirilir. Betonarme elemanın yapıdaki gerçek durumuna uygun olarak, sisteme 40 mV'luk sabit gerilimin yanı sıra, donatı ile beton arayüzüne 0,5 MPa'lık aderans gerilmesi oluşturulmak üzere Şekil 12'deki deney düzeneğinde donatıya sabit aderans gerilmesi uygulanan bir deney seti geliştirilmiştir [46].



Şekil 12: Betonarme numunede hızlandırılmış korozyon deney düzeneği

Bu çalışmada; beton içinden geçen akım şiddeti, 1 mA, ve donatının korozyonu nedeni ile meydana gelen hacim artışının betonda oluşturduğu deformasyonlar, silindir numunenin yanal yüzeyine yerleştirilen strain-gauge ile $2,25 \times 10^{-6}$ duyarlılıkla başlangıçtan itibaren 1'er dakika ara ile ölçülmüş, yedinci güne kadar bilgisayara kaydedilmiş ve betonda çatlağın oluştuğu an tespit edilmiştir. Başlangıçtan çatlağın tespit

edildiği ana kadar geçen süre kritik süre (t_{cr}) olarak adlandırılmış, kritik çatlama süresi Çizelge 3'de verilmiştir. Malzeme özellikleri farklı betonların elektriksel direnci, 40 V'luk sabit gerilim altında zamana bağlı olarak ölçülen akım şiddeti ile karşılaştırılmıştır. Silis dumanı katkılı beton ile üretilmiş betonarme elemanlara klorürün etkisi, hızlandırılmış donatı korozyon deneyi sonuçları ile irdelenmiştir.

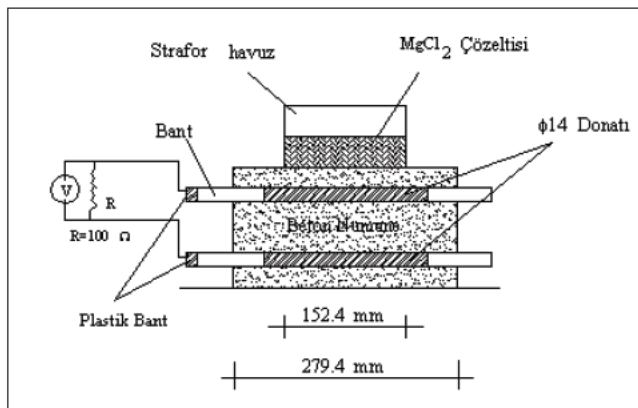
Çizelge 3: Kritik çatlama süreleri(t_{cr}) ve serbest Cl⁻ miktarı [46]

Num. Kodu	SFOW0	SFOW1	SFOW2	SFOW3	SFIW0	SFIW1	SFIW2	SFIW3	SF2W0	SF2W1	SF2W2	SF2W3
t_{cr} (dak.)	780	1260	780	480	*	**	5400	1140	*	*	*	3000
Cl ⁻ (mg/L)	0	0	112	850	0	0	0	0	0	0	0	0

* Çatlak yok. ** Çatlak var ancak strain-gauge'ye ulaşmamış

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, silis dumanı betonun geçirimsizliğini önemli ölçüde azaltmış, elektriksel direncini artırmıştır. Klorür geçirimsizliği son derece düşük ve elektriksel direnci çok yüksek olan silis dumanı, donatıda makro ve/veya mikro korozyon hücrelerinin oluşmasını önleyerek elemanın dayanıklılığını artırmıştır.

ASTM G109'da (1992), belirtilen sistemden yararlanılarak betonarme korozyonunun araştırılması amacı ile planlanan deneysel çalışmada [47]; betonarme numunelerin üretiminde, çimento dozajı 350 kg/m^3 olan betona, çimento ağırlığının %0 (katkısız), %30 ve %60 oranlarında yüksek fırın cürufu (YFC), çimento ile yer değiştirmeli olarak katılmıştır. Bu beton ile prizma biçiminde betonarme numuneler üretilmiş, her bir numuneye 3 adet $\phi 14$ düz donatı yerleştirilmiştir (Şekil 14). Numunelerin hazırlanmasında anot ile katot arasında elektropotansiyel ölçümünün yapılabilmesi için altta bulunan iki donatı, katot kabul edilmiş ve iletken tel ile birleştirilmiştir. Bu katot donatı üstte bulunan anot donatıya 100 f'luk direnci sabit olan iletken ile bağlanmıştır.



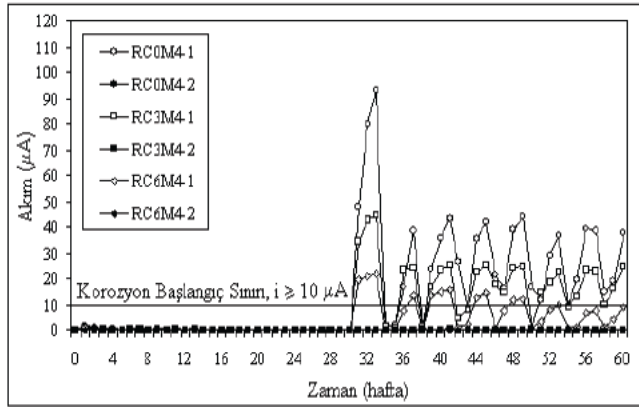
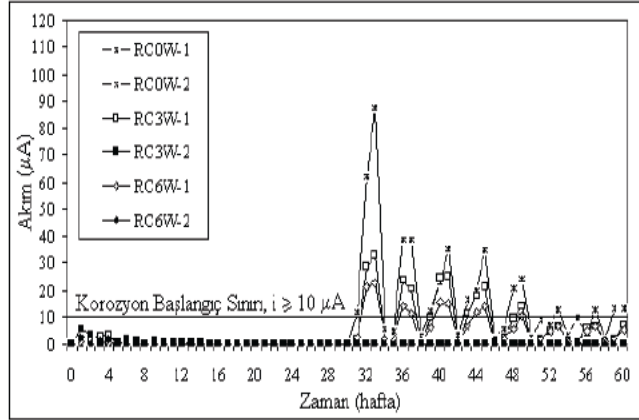
Şekil 13: Betonarme numunelerin şematik gösterimi [47]

Eskitme süreci, numune üzerine yerleştirilen havuzcuklara ıslanma sürecinde belirli seviyeye kadar sıvı (su ve Cl⁻ iyon konsantrasyonu 40000 mg/L olan MgCl_2 çözeltisi) doldurulması, kuruma sürecinde ise sıvının boşaltılması ile gerçekleştirilmiştir. Betonarme numunelerde 28. gün başlangıç kabul edilerek 1, 3, 6, 9, 12 ve 15 çevrimlik ıslanma-kurumaya maruz bırakılmak üzere toplam 6 gruba ayrılmıştır. Bu numunelerde çevrim süresinden bağımsız olarak 60 haftalık deney süresince bir hafta ara ile makro-hücre potansiyelleri, 100 f' luk sabit dirençte oluşan elektro-potansiyel fark (E, mV), 0.01 mV duyarlıklı yüksek empedanslı multimetre ile ölçülmüştür. Anot ile katot arasına yerleştirilmiş olan 100 f'luk sabit dirençten geçen akım, i (μA), (13) bağıntısından belirlenmiştir.

$$i = \frac{E}{R} \quad (13)$$

Bağıntıda i (amper), akımı; E (volt), elektropotansiyel farkı, R (Ohm), direnci ifade etmektedir. Ölçümlerden hesaplanan akım değerleri, ASTM G109-92'de korozyon başlangıcı için verilen $10 \mu\text{A}$ 'lık değer ile karşılaştırılmış, akımın zamanla değişimi Şekil 15'de verilmiştir; görüldüğü gibi hasarsız tüm numunelerde akım değerleri korozyon başlangıç değeri olarak kabul edilen $10 \mu\text{A}$ 'lık sınır değerinin altında kalmıştır.

Hasarlı yapıyı temsil etmek üzere betonarme numunelerin bir tanesinde 30. haftada, çözeltilerin konulduğu havuzcukların içine matkap kullanılarak delik açmak sureti ile hasar oluşturulmuştur. Bu numunelerde akım değerleri korozyon başlangıç sınır değerini aşmıştır. MgCl_2 çözeltisi ile ıslanma-kuruma etkisi uygulanan grupların akım değeri su ile ıslanma-kuruma etkisinde kalan gruptan daha yüksek değerler almıştır.

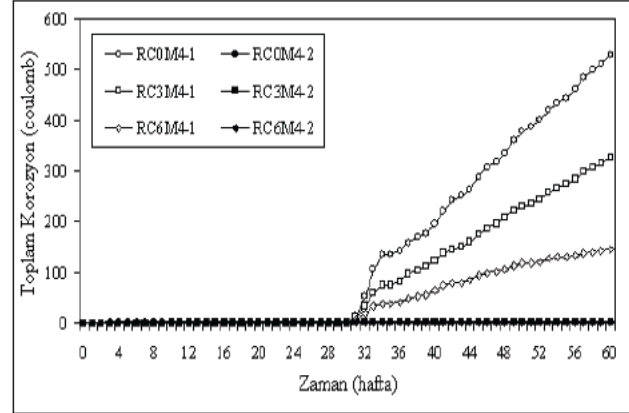
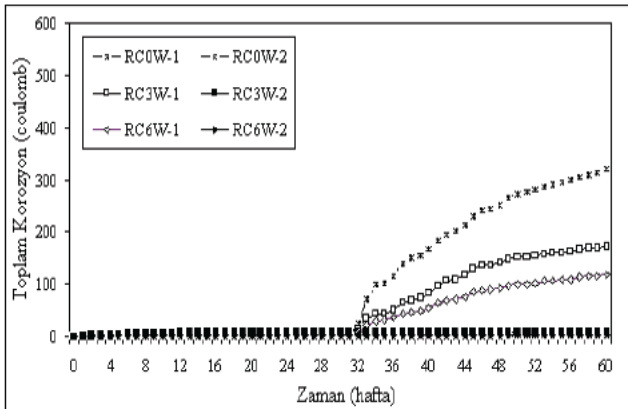


Şekil 14: Su ve $MgCl_2$ ile çevrim uygulanan numunelerde akım-zaman ilişkisi [47]

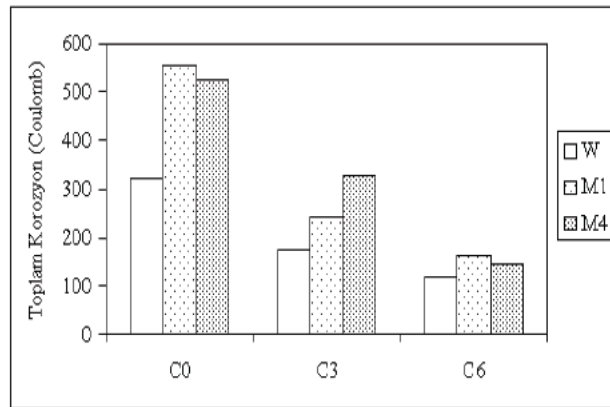
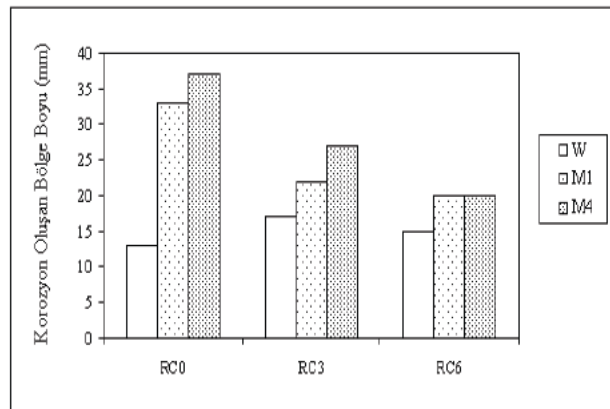
Sistemden belirli zaman aralığında geçen akımın ardışık olarak toplanması ile elde edilen ve toplam korozyon olarak adlandırılan akımın toplam değeri (coulomb), her ölçüm aralığı için (14) bağıntısından kümülatif olarak hesaplanmıştır. Hesaplanan toplam korozyonun zamanla değişimi Şekil 15'de verilmiştir.

$$TC_i = TC_{i-1} + [(t_i - t_{i-1}) * (i_i + i_{i-1}) / 2] \quad (14)$$

Bağıntıda TC (coulomb), toplam korozyonu; t_i (sn), ölçüm yapılan zamanı ve i_i (amper), geçen akımı ifade etmektedir.



Şekil 15: Su ve $MgCl_2$ ile çevrim uygulanan numunelerde toplam korozyon-zaman ilişkisi



Şekil 16: Korozyon oluşan bölge boyunun ve toplam korozyonun YFC oranı ile değişimi

Numunelerin tümü, 60. haftanın sonunda; 15. ıslanma-kuruma çevrimin tamamlanmasından sonra kırılmış, içerisindeki donatılar çıkarılmıştır. Yapılan incelemelerde, hasarsız numunelere ait hiçbir donatıda, paslanma ve/veya korozyon ürünü gözlenmemiş, hasarlı numunelerde ise anot konumundaki

donatılarda hasarlı bölge etrafında korozyon oluşmuştur. Korozyon oluşan bölgelerin boyu ölçülmüş, donatı korozyonuna cüruf katılmasının, oranının ve Cl⁻ konsantrasyonunun etkisi çok açık görülmüştür (Şekil 16).

5. BETONARME KOROZYONUNA KARŞI ALINACAK ÖNLEMLER

Korozyon, elektrolit denen sıvı içindeki potansiyeli farklı iki metalin/elektrotun bir iletken ile birleştirilmesi sonucu anottan katoda kütle taşınması; kimyasal yolla kütle kaybıdır. Anot ile katot arasındaki uzaklık atom boyutunda ise üniform korozyon, uzak ise ve ortam asidik ise oyuklanma türü korozyon oluşur. Korozyonun engellenmesi için elektrot ile elektrolitin ayrılması, metaller arasındaki potansiyel farkın sıfırlanması yani farklı iki metalin bir arada kullanılmaması, metaller arasında bir iletkenin bulunmaması, elektrolit oluşmasının engellenmesi, bunun için ortamın sıcaklığının ve bağıl neminin düşük olması temel prensiptir. Betonarmenin korozyonunun önlenmesinde de bu temel prensiplerden yararlanılır.

Betonarmede korozyon oluşumu bazı farklarla metallerdeki galvanî pili oluşumuna benzer. Betonun homojen olmadığı durumlarda donatı üzerinde kendiliğinden anot ve katot bölgeleri oluşmakta, donatının kendisi elektronları ileten iletken, beton da iyonları taşıyan elektrolit görevini görmektedir. Betonarmede bir katoda karşılık gelen birden çok anot bölgesi bulunabilir, anot ile katot aynı donatı üzerinde ve birbirinden atom boyutu kadar uzaklıkta olabileceği gibi farklı donatılar üzerinde ve birbirinden metrelerce uzakta da bulunabilir. Beton elektrolit ortamı oluşturmaya rağmen bazik özelliği ile donatıyı korozyona karşı çok iyi koruyan bir malzemedir. Bu nedenle beton içine gömülü çeliğin (donatının) korozyonunda alınacak ilk önlem, kaliteli bir beton üretmektir; kaliteli betonun göstergesi de dayanıklılıktır. Dayanıklı beton, tasarım dayanımını güvenle sağlayan, minimum boşluklu, akışkan geçirimsizliği düşük, kimyasal etkilerle kolayca çözülmeyen ve aşınmayan bir betondur. Geçirimsizlik, betonun dış etkilere karşı dayanıklılığında en önemli özelliktir. Ayrıca serbest kirecin (Ca(OH)₂) karbonatlaşması ve/veya betona puzolan malzeme katılması nedeni ile ortamın pH'sının düşmesi ve/veya ortamda belirli sınırı aşmış serbest Cl⁻'nin varlığı donatı korozyonuna yol açan ve hızlandıran olaylardır. Bu nedenle betonarmede donatının korozyonunu beton özellikleri ve ortam koşulları belirlemektedir.

- 5.1. Betonarmenin korozyonunu geciktirmek için yapı, permeabilitesi düşük, yoğunluğu yeterli beton ile üretilmelidir. Yapılan deneysel çalışmalarda potansiyel ölçümlerinden ve hesaplanan akım değerlerinden; uygun malzeme ve iyi işçilik ile üretilmiş betonun, konsantrasyonu yüksek klorür çözeltileri ile uygulanan ıslanma-kuruma etkisinde bile donatıyı korozyondan koruduğu görülmüştür.
- 5.2. Betonun pH'ı düşürmesine rağmen doğal puzolanlar (tras), kalsine edilmiş kil, yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silis dumanı gibi endüstri atığı puzolanlar betonun porozitesini ve geçirimsizliğini azalttığı, serbest kirecin erimesini engellediği ve betonun performansını artırdığı için donatı korozyonunu sınırlandırmaktadır.
- 5.3. Yüksek performanslı beton ve iyi işçilik ile üretilen betonarme elemanda örtü betonu kalınlığı yeterli ve sürekli ise O₂ difüzyonu azalacağı için betondaki su miktarı fazla olsa bile korozyonun tehlikeli sınırlara ulaşması engellenecaktır. Yapılan deneysel çalışmalarda; örtü betonunda herhangi bir nedenle çatlak veya hasar oluşması durumunda beklendiği gibi; korozyonun başladığı ve hızlandığı görülmüştür. Bu durum, zamanında ve eksiksiz yapılacak bakım ve onarımın önemini açıkça göstermektedir.
- 5.4. Liman, iskele, açık deniz petrol platformları gibi deniz yapılarında, köprülerde, viyadüklerde, tünellerde, petrol boru hatlarında, çok katlı binaların yeraltı suyunu maruz kalan derin temelleri gibi yapılarda yüksek performanslı beton ve iyi işçilik ile üretilmesi yeterli değildir; korozyon inhibitörlerinin kullanılmasına, katodik koruma gibi ilave önlemlere ihtiyaç vardır. Hasar gören ve/veya anot durumuna gelmesi muhtemel donatıya doğru akım uygulanarak katoda dönüştürülür ve anodun potansiyeli katodik bölgeye kaydırılarak korozyonun tamamen durdurulması amaçlanır. Bu uygulamada, beton yüzeyini örten elektriksel iletkenliğe sahip iletken örtü malzemelerinden yararlanılır, bu uygulama ile başlamış korozyonun da kontrol altına alınabilmesi mümkün olmaktadır.

Sonuç olarak, yapının korozyondan korunması ve sonradan yapılacak pahalı onarımların önüne geçilmesi için ulusal ve uluslararası standart ve şartnamelerden yararlanılmalı, ancak bunların her koşul için yeterli olamayacağı dikkate alınarak tasarım aşamasından başlayarak korozyon olasılığı dikkate alınmalıdır. Üretimde kullanılacak malzemelerin yeterliliği yapının yer alacağı ortamın koşulları dikkate alınarak araştırılmış olmalıdır.

Kaynaklar

1. Akman, M.S., Yapı Malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 1987.
2. Karakoç, C., Aderansta Mekanik Etkileşim Olayı, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 1985
3. Akman, M.S., Deniz Yapılarında Beton Teknolojisi, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1992.
4. Aköz, F., Zorbozan, M., Yüzer, N., "Betonarme Yapılarda Korozyon Hasarının Tespiti, Onarım İçin Öneriler", Metal Dünyası, Sayı 89, s.25-28, Ekim 2000.
5. Aköz, F., "Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonuna Neden Olan Faktörler ve Alınacak Önlemler ", Korozyon, Cilt 19. Sayı 1-3, s.23-28, 2011-2012.
6. Aköz, F., Yüzer, N., Koral, S., " Silis Dumanı Katkılı ve Katkısız Harç İçindeki Çeliğe Farklı Konsantrasyonlardaki Sodyum Klörürün Etkisi" Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara, Kasım, 1995.
7. Uyan, M., Özcan, M. ve Yıldırım, H., "Tunçbilek ve Seyitömer Uçucu Küllerinin Betonun Kılcallık ve Su Emme Özelliklerine Etkisi", D.S.İ. Beton-Çimento ve Boya Semineri, 24-26 Haziran, Ankara, s. 1-13, 1998.
8. Onaran, K., "Malzeme Bilimi", İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul, 237-243, 1991,
9. Çakır, A.F., "İnşaat Endüstrisinde Korozyon ve Katodik Koruma Yöntemi ile Korunma", İTÜ İnşaat Fakültesi Malzeme Semineri, 1984.
10. Türkiye Korozyon Derneği "Korozyon ve Önemi" <http://www.korozyondernegi.org.tr>, Erişim tarihi (24.01.2013).
11. Neville, A.M. and Brooks, J.J., Concrete Technology, Longman Scientific and Technical, New York, pp. 275-282, 1987
12. Hansson, C.M., Comments on Electrochemical Measurements of the Rate of Corrosion of Steel in Concrete, Cement and Concrete Research, V: 14, No. 4, pp.574-584, 1984.
13. Mehta, P.K., Concrete, Structure Properties and Materials, Printice-Hall, USA, pp: 152-158. 1986,
14. Andrade, C., Alonso, C. and Molina, F.J., "Cover Cracking as a Function of Bar Rebar Corrosion : Part I-Experimental Test", Materials and Structures, V:26, pp.453-464, 1993.
15. Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H., Betonarme Yapılarda Kalıcılık, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, Yayın No:298, ISBN: 975-441-189-1, İzmir, 2002.
16. ACI 222R-01, Protection of Metals in Concrete Against Corrosion, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2001.
17. Yüzer, N., "Betonarme yapılarda korozyon ölçüm yöntemleri ve hasar tespiti", Türkiye Mühendislik Haberleri, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, 48/2003-4, s.134-138, 2004
18. Hoffman, D.W., "Changes in Structure and Chemistry of Cement Mortars stressed by Sodium Chloride Solution" Cement and Concrete Research, 1481:49-54, 1994.
19. Soleymani, H. R. ve Ismail, M. E., "Comparing Corrosion Measurement Methods to Assess the Corrosion Activity of Laboratory OPC and HPC Concrete Specimens", Cement and Concrete Research 34, pp.2037-2044, 2004.
20. Poupard, O, Mokhtar, A. A. ve Dumargue, P., "Corrosion by Chlorides in Reinforced Concrete: Determination of Chloride Concentration Threshold by Impedance Spectroscopy", Cement and Concrete Research, 34, pp. 991-1000, 2004.
21. Miyagawa, T., " Durability Design and Repair of Concrete Structure: Chloride Corrosion of Reinforcing Steel and Alkali-Aggregate Reaction", Magazine of Concrete Research , 43(156):155-170, 1991.
22. Alonso, C., Andrade, C., ve Gonzalez, J.A, " Relation Between Resistivity and Corrosion Rate of Reinforcements in Carbonated Mortar Made with Several Cement Types" Cement and Concrete Research 18(5), 2037-2044, 2004.
23. ASM Handbook, Volume 13, Corrosion, 4. Edition, ASM International, 1992.
24. Andrade, C., Alonso, C. Rodriguez, J. ve Garcia, M., "Cover Cracking and amount of Rebar Corrosion : Importance of the Current Applied Accelerated Tests" Concrete Repair, Rehabilitation and Protection E and FN Spon, London, 263-273, 1996.

25. Neville, A.M., Properties of Concrete, Third Edition, Longman Scientific and Technical, New York, pp. 433-529, 1992.
26. Postacıoğlu, B., Beton, Cilt 1, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 1986.
27. Uyan, M., Beton ve Harçlarda Kılcallık Olayı, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, Şubat, İstanbul, 1975.
28. Aköz, F., Türker, F., Koral, S. and Yüzer, N., "Effects of Sodium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars with and without Silica Fume" Cement and Concrete Research, 25(6) 1360-1368, 1995.
29. Türker, F., Aköz, F., Koral, S. and Yüzer, N., "Effects of Magnesium Sulfate Concentration on the Sulfate Resistance of Mortars with and without Silica Fume" Cement and Concrete Research, 27(2) 205-214, 1997.
30. Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral, S., "Silis Sumanı Katkılı ve Katkısız Harç İçindeki Çeliğe Farklı Konsantrasyonlardaki Magnezyum Klorürün Etkisi", TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 4. Ulusal Beton Kongresi, 317-326, İstanbul, 1996.
31. Shamsad A., "Reinforcement Corrosion in Concrete Structures, Its Monitoring and Service Life Prediction- a Review, Cement and Concrete composite 25, 459-471, 2003.
32. Jinxia, X., Linhua, J., Jingxiang, W., "Influence of Detection Methods on Chloride Threshold Value for the Corrosion of Steel Reinforcement" Construction and Building Materials, 23, 1902-1908, 2009.
33. Hui, Y., Xianming, S., William, H.H., Baotong L., "Laboratory Investigation of Reinforcement Corrosion Initiation and Chloride Threshold Content for Self-Compacting Concrete" Cement and Concrete Research 40, 1507-1516, 2010.
34. Doruk, M., "Korozyonun Temel İlkeleri Üzerine", V. Korozyon Sempozyumu Bildirileri, Çukurova Üniversitesi, 1996.
35. Saraylı, M.A., Yapı Malzemeleri Bilimi, Kutulmuş Matbaası, İstanbul, 1978.
36. Parkins, R.N., "Intergranular Corrosion and Stress Corrosion and Stress Corrosion Cracking of Mild Steel in Clark's Solution" Corrosion Science, 36(12):2097-2110, 1994.
37. ASTM C-876-91, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Half-Cell Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete, 1991.
38. Haque, M. N. ve Kawamura, M., "Carbonation and Chloride-Induced Corrosion of Reinforcement in Fly Ash Concretes", ACI Materials Journal, Title no: 82-M5, pp. 41-48, 1992.
39. Al-Tayyib, A.J., Khan, M.S., "Corrosion rate Measurements of Reinforcing Steel in Concrete by Electrochemical Techniques", ACI Material Journal, May-June, 172-177, 1988.
40. Şengil, İ.A., Korozyon, İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi Matbaası, 1992.
41. Rodriguez, P., Ramirez, E. and Gonzalez, J.A., "Methods for Studying Corrosion in Reinforced Concrete", Magazine of Concrete Research, 46, 81-90, 1994.
42. Vedalakshmi, R., Kumar, K., Raju, V. ve Rengaswamy, N. S., "Effect of Prior Damage On The Performance of Cement Based Coatings on Rebar: Macrocell Corrosion Studies", Cement and Concrete Composites, 22, pp. 417-421, 2000.
43. ASTM G 109-92, American Society for Testing and Materials, Standard Test Method for Determining the Effects of Chemical Admixtures on the Corrosion of Embedded Steel Reinforcement in Concrete Exposed to Chloride Environments, 1992.
44. Andrade, C. ve Martinez, I., (2003), "Advances in the Corrosion Rate Monitoring in Real Structures", 5. Ulusal Beton Kongresi, s:215-226, İstanbul, 2003.
45. Aköz, F., Akman, M.S., Service Life Estimation For Multi-Ply Flat Roof Membranes, Durability of Building Materials and Components, Proceedings of the Fifth International Conference held in Brighton, UK, 353-358, 1990.
46. Yüzer, N., "Silis Dumanı Katkılı Betonarme Elemanlara Klorür Etkisinin Hızlandırılmış Korozyon Deneyi ile Araştırılması", Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1998.
47. Çakır, Ö., "Yüksek Fırın Cürufunun Betonun ve Betonarmenin Kalıcılığına Etkisi", Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.