



BETONARME YAPILARDA
GALVANİZ KAPLI ÇELİK DONATI
KULLANIMININ AVANTAJLARI

Dr. Müh. Kahraman Şirin
Doç.Dr. Şule Yıldız Şirin

kahramansirin@kfsmetalinc.com

Ülkemiz, dünyanın önemli deprem kuşaklarından biri olan Alp-Himalaya kuşağı üzerinde yer almakta olup, ülkeyi boydan boya kat eden Kuzey Anadolu Fayı ve Doğu Anadolu Fayı nedeni ile ciddi bir deprem riskine maruzdur. Son 100 yıl içinde ülkemizde Mw6.5 ve üstündeki büyüklüğe sahip 35 farklı deprem yaşanmış olup, resmi kayıtlara göre yaklaşık 700.000'in üzerinde yapı hasar görürken, 124.000 kişi ölmüştür [1]. Yıkıcı depremler neticesinde alt yapının zarar görmesi, günlük hayatın ve ekonomik işleyişin uzunca bir süre kesintiye uğraması, kamu hizmetlerinin aksaması, yaşam alanlarının yeniden inşa edilmesi çok büyük ekonomik ve sosyal kayıplara yol açmaktadır. Dünyada her yıl Richter ölçeğine göre Mw7.0 ve üzeri yaklaşık olarak 19 deprem yaşanmakta olup, bunlardan sadece bir kısmının yıkıcı etkisi olmaktadır. Ortalama olarak her 1,5 yılda bir yıkıcı sonuçları olan depremleri yaşayan ülkemiz ise maalesef yaşam alanlarının kırılganlığı açısından en olumsuz örneklerden birini oluşturmaktadır [2].

Betonarme yapının servis ömrü boyunca fiziksel, mekanik, kimyasal ve biyolojik etkiler karşısında özelliklerini kaybetmeden direnç göstermesi, işlevini yerine getirmesi beklenirken, bazen dış etkenlerden dolayı erken bozulmaya uğrayarak dayanıklılığını yitirebilir. Donatı korozyonu da betonarme yapılarda karşılaşılan en önemli dayanıklılık sorunlarından biridir (Şekil 1). Teknik literatürlerde, agresif ortamlarda normal Portland çimento betonlarının, yapının makul bir servis ömrü boyunca donatı korozyonunu başlatmaya yetecek klorür girişini önlemede yeterli olmadığı belirtilmiştir. Bu durum özellikle 8300 km uzunluğunda sahil şeridi boyunca çok sayıda kıyı, liman, köprü, yüksek katlı yapı bulunan ve buz çözücü tuzların yaygın olarak kullanıldığı soğuk iklim bölgelerine sahip olan ülkemiz için risk oluşturmaktadır.

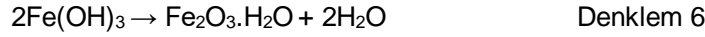
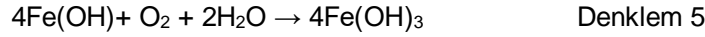
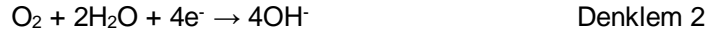
1999-Gölcük depremi sonrası resmi makamlarca, hasar gören ve yıkılan binalarda yapılan incelemeler sonucunda %49 oranında donatı korozyonu tespit edilmiş olup [3], benzer durum Şubat-2023 Kahramanmaraş merkezli depremler sonrası da gözlenmiştir [4]. Düşük beton kalitesi, yetersiz pas payı ve çevre koşulları (Cl, O₂, CO₂, H₂O) donatı korozyonuna neden olur. Korozyon ürünlerinin oluşturduğu hacim artışı iç gerilmelere, donatı-beton arayüzey bölgesinde aderans kayıplarına, betonda çatlamalara ve tabakalar halinde ayrılmasına neden olur. Korozyondan zarar görmüş betonarme yapıların onarımı yüksek maliyetli olup, verimli bir şekilde yapabilmek oldukça zordur.



Şekil 1. Betonarme İçindeki Donatı Korozyonu

Betonarme Yapılarda Donatı Korozyonu

Betona gömülü olan çeliğin korozyonu elektrokimyasal olarak anodik ve katodik tepkimeler üzerinden gerçekleşir. Anodik tepkimede demir yükseltgenerek Fe^{+2} iyonları oluşur (Denklem 1) Betonarme korozyonunda ortamın alkali olması, beton içerisindeki gözeneklerde su ve oksijenin bulunması nedeniyle anodik tepkimede açığa çıkan elektronlar su ve oksijen ile katotta indirgenerek OH^- iyonlarını oluşturur (Denklem 2,3). OH^- iyonları elektrolitik iletkenlik nedeniyle anoda ilerleyerek, burada açığa çıkan Fe^{+2} iyonları ile birleşerek, suda kısmen çözünebilir demir (II) hidroksit $Fe(OH)_2$ (Denklem 4) oluşur. Daha sonra, $Fe(OH)_2$ çevresinde oksijen ve su varsa daha kararlı ve çözünmeyen demir (III) hidroksit $Fe(OH)_3$ ve hidratlı demir (III) oksit ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) (Denklem 5, 6) meydana gelir.

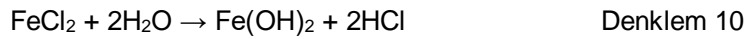
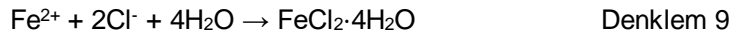


Beton; kalsiyum silikat ve kalsiyum alümina içeren çimento, agregalar ve çeşitli katkılardan oluşan bir kompozit yapı olup, çimento içerisindeki klinker bileşiklerinin su ile reaksiyonu sonucu kuvvetli bazik karakterde (pH=12-13) olan kalsiyum hidroksit $Ca(OH)_2$ meydana gelir. Hidratasyon devam ettiğinden ve çimentonun alkali içeriğine bağlı olarak diğer alkali hidroksitlerin (NaOH, KOH gibi) oluşmasıyla pH değeri yaklaşık 14'e yükselir. Betonun yüksek alkali ortamı, donatı çeliği yüzeyinde kararlı ve koruyucu pasif bir demir (III) hidroksit tabakası $Fe(OH)_3$ ya da hidratlı demir (III) oksit (Pas) $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ oluşturur (Denklem 5,6). Normal koşullar altında bu oksit film tabakası bozulmadan uzun süre çeliğin korozyona uğramasını önler. Pasif tabakanın yok olması ya da kısmen hasarlanması durumunda beton içindeki donatının korozyonu başlar.

Betonun alkalitesi (pH değeri) azaldığında ve/veya betondaki klorür içeriği belli bir eşik değerine ulaştığında pasif tabaka bozulur. Beton pH değerinin düşmesi donatı yüzeyindeki koruyucu pasif tabakayı tahrip ederek betonun içindeki donatıyı korozyona karşı hassas hale getirir [5]. Atmosferdeki karbondioksit (CO_2) betona yayılarak boşluk sıvısı ile reaksiyona girer ve zayıf bir asit olan karbonik asit (H_2CO_3) oluşturur (Denklem 7). Karbonik asit betona zarar vermez ancak beton boşluk sıvısındaki alkalileri nötrleştirerek betonun pH değerinin 7 - 8 civarına düşmesine neden olur. Benzer şekilde kirliliği bulunan SO_x ve NO_x gibi asit anhidriti olan gazlarda kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek pH derecesini düşürebilir.

Beton alkalitesini düşüren diğer bir etken ise “**karbonatlaşma**” dır. Karbonatlaşma olayında, beton bünyesindeki CaO önce su ile birleşip Ca(OH)₂'i (kalsiyum hidroksit) oluşturur ve daha sonra CO₂ gazı ile reaksiyona girerek CaCO₃ (kalsiyum karbonat) oluşturur, bu olaya “karbonatlaşma” adı verilir (Denklem 8) [6]. Karbonatlaşma, beton boşluk sıvısının pH değerinin 8,5'un altına düşmesine neden olarak donatının pasif film tabakasının stabilizasyonu bozar ve korozyon başlar [7]. Su oranı yüksek, çimento içeriği düşük, kür süresi kısa, dayanımı düşük, geçirimsizliği-gözenekliliği yüksek olan betonlarda karbonatlaşma miktarı önemli ölçüde artar. Yağmura maruz kalan, güneş görmeyen gölgede kalan bina cephelerinde karbonatlaşma kaynaklı korozyon meydana gelir.

Beton içine yerleştirilen çelik donatı daima korozyon riski altında olup, korozyona karşı uzun süreli korunmayı sağlamak için beton kütesinin, su, klorür iyonları, oksijen, karbon dioksit ve diğer gazların beton yoluyla donatı derinliğine taşınmasını sınırlayacak şekilde yeterince geçirimsiz olması gerekmektedir. Çoğunlukla suda ki çözelti halinde betona taşınan bu maddelerin kritik veya eşik olarak adlandırılan seviyelere ulaşması durumunda betonda bozulma ve donatı korozyonu başlayabilir. Örneğin, eşik konsantrasyonlarının üzerindeki klorür iyonlarının varlığı, bitişikteki betonun pH'ı yüksek kalsa bile çeliğin pasifliğini bozabilir. Katodik reaksiyon denklemleri, klorür iyonlarının korozyon reaksiyonunu hızlandırdığını ve korozyon ürününü yüzeyden taşıyarak korozyonu sürdürdüğünü gösterir (Denklem 9-10).



Deniz ortamına veya buz çözücü tuza maruz kalan, klorla kirlenmiş agregalar, katkı maddeleri içeren betonarme yapılarda klorür kaynaklı korozyon oluşur. Korozyonun başlamasına kadar geçen süre, klorürlerin betona yayılma hızı ve klor eşik konsantrasyonunun fonksiyonu olup bu değer betondaki kaplamasız donatılarda, çimento kütesinin %0,2'si kadardır. Klorürler betona yayıldığında bir kısmı betonda "bağlı" olarak tutulurken, “serbest” klorürler ise yayılarak donatıya kadar ulaşır ve eşik değerini aştığında korozyona neden olurlar [6]. Klorür iyonları nedeniyle oluşan korozyon, karbonatlaşma ile oluşan korozyonun aksine, çok dar bölgelerde yoğunlaşarak çukurcuk korozyonu şeklinde düşük malzeme kaybı ile gerçekleşmesine rağmen delinmelere neden olur. Nemli ortamlarda, korozyon hücresindeki katodik bölgelerdeki oksijenin indirgenmesi, korozyon sürecinin önemli bir bileşenidir ve bu nedenle oksijen ilerleme hızı da önemlidir. Betona gömülü çelik donatıda korozyon meydana geldiğinde, bunu beton kütesindeki fiziksel hasar takip eder.

Çelik korozyon ürünlerinin hacmi çeliğin hacminden yaklaşık 7 kat büyük olup bu hacim artışının neden olduğu çekme iç gerilmeleri, betonun çekme dayanımından büyük olduğu için betonda çatlamalar başlar. Oluşan bu çatlaklar genellikle donatıdan en yakın bitişik yüzeye doğru olup donatı çeliğinin korozyonunu hızlandırır [5-7,9,10].

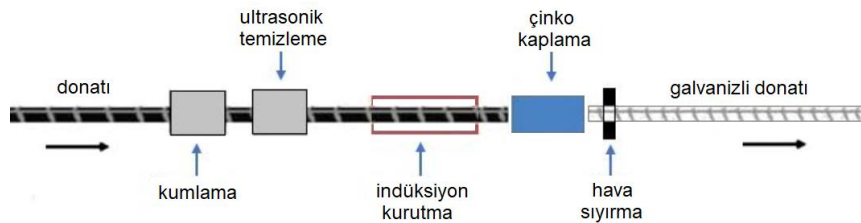
Bu çatlaklar, agresif korozif ajanların betona hızlı ve yoğun bir şekilde girmesine yol açarak çeliğin korozyon sürecini hızlandırır. Böylece betonun katmanlarına ayrılmasına veya beton parçalarının yüzeyden dökülmesine neden olur. Korozyona maruz kalmış betonarme yapının ömrünü uzatmak için onarım ve güçlendirme yapılsa da korozyon nedeninin ortadan kaldırılmasının güç, işlem maliyetinin yüksek, verimliliğinin düşük ve korozyon sorununun ilerleyen zamanlarda tekrarının söz konusu olması tamir ve onarım işlemin etkinliğini azaltmaktadır. Günümüzde, çinko kaplama, donatı çeliğinin korozyon dayanımını arttıran en uygun çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Galvanizleme olarak adlandırılan çinko kaplama, donatıya hem bariyer koruma hem de kaplamanın hasar görmesi durumunda katodik koruma sağlar. Ayrıca, çinko yüzeyinde oluşan ve karmaşık yapıya sahip olan katı çinko korozyon ürünleri de metali betonun karbonatlaşma etkisine karşı dirençli ve kaplamasız çeliğe göre klorürlere karşı daha yüksek toleranslı yapar [6,9,12,13]. Donatıların galvanizlemesi, betonun içindeki çelik donatıya korozyon açısından önemli bir koruma sağlamaktadır. Galvanizleme korozyon başlangıcı geciktirdiği gibi korozyon hızını da yavaşlatarak, yapıların ömrünü 4-5 kat artırır.

Donatıların Galvanizlemesi

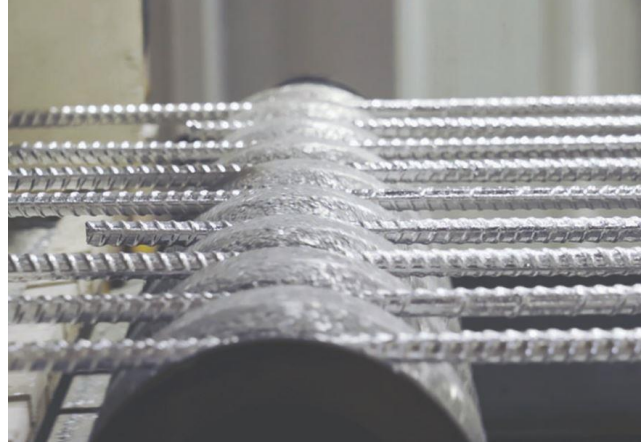
Donatı yüzeyine çinko kaplama işleminde, sıcak daldırma galvanizleme veya sürekli galvanizleme yöntemleri kullanılmakta olup kaplamanın karakteristik özellikleri ve morfolojisi birbirinden oldukça farklıdır.

Sürekli Galvanizleme

Donatıların yüksek üretim kapasitesinde sürekli galvanizlemesi, çelik sacın sürekli galvanizlemesine benzer şekilde yapılmaktadır (Şekil 2,3). Prosesin ilk adımı olan yüzey temizleme işlemi koruyucu bir ortamda kumlama ve ardından ultrasonik temizleme ile yapılır [14]. Yüzey temizleme sonrası hat üstünde yüzeylerine flux uygulanan donatı indüksiyon ısıtma sistemi ile ~450 °C'ye kadar ısıtılır. ~465 °C sıcaklığındaki ergimiş çinko banyosuna birkaç saniye gibi çok kısa süre ile daldırılma sonrası hava sıyırma uygulanarak işlem tamamlanır. Sürekli Galvanizleme tesisleri paralel dizili 5-6 tane donatının aynı anda yüksek üretim hızıyla galvaniz kaplama yapılabildiği tesislerdir. Sürekli galvanizleme yönteminde elde edilen kaplama herhangi bir çatlama, soyulma ya da pullanma olmaksızın kolaylıkla şekillendirilebilmesine rağmen, kaplamanın sadece ince saf çinko tabakasından (~50 µm) oluşması ve altlık malzeme ile metalürjik bir bağa sahip olmaması nedeniyle, korozif ortama maruz, uzun servis ömrü istenen yapılardaki korozyon dayanımı yetersizdir.



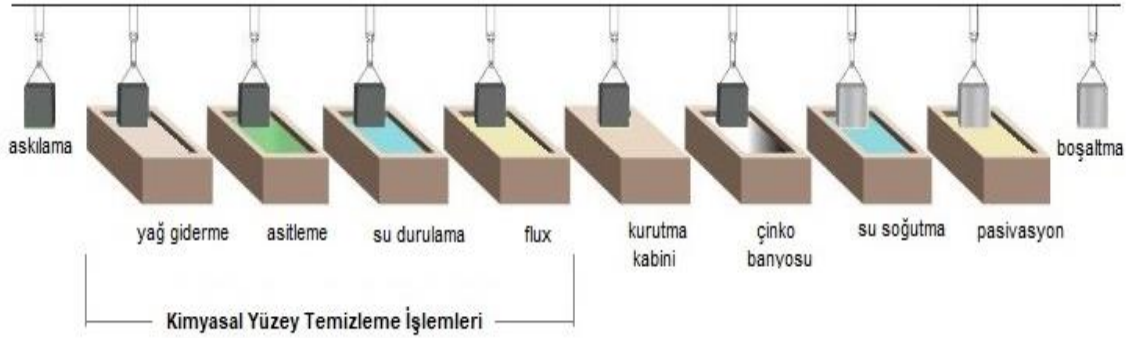
Şekil 2. Donatı çubuğunun sürekli galvanizlemesinin şematik gösterimi [14].



Şekil 3. Donatı çubuğunun sürekli galvanizlemesinin şematik gösterimi

Sıcak Daldırma Parça Galvanizleme

Sıcak daldırma galvanizleme yöntemi ile yapılan parça galvanizleme işlemi bir dizi ardışık proses adımlarını içermekte olup ilk adım askılama işlemidir (Şekil 4).



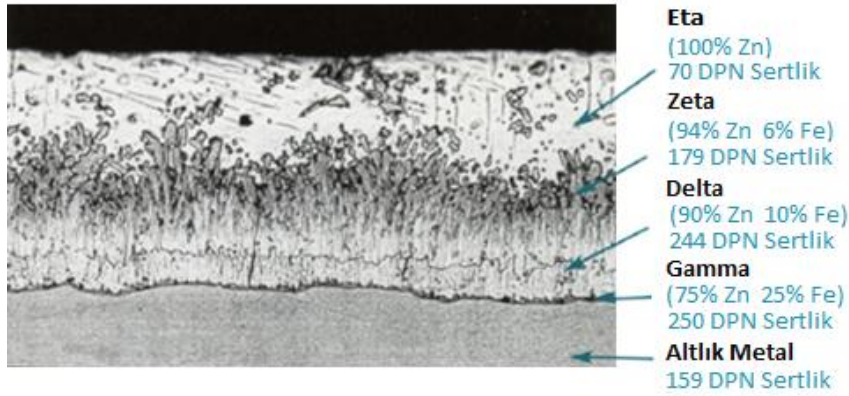
Şekil 4. Sıcak daldırma parça galvanizleme proses adımları.

Üzerlerine delik açılan veya mapa kaynatılan parçalar işlem görmek üzere, geometrilerine uygun bir şekilde kanca veya tel ile askı mekanizmasına asılırlar. Parçaların galvanizleme öncesi askıya alınma ve galvanizleme sonrası askıdan çıkarılma işlemleri emek yoğun olup tesisin üretim verimliliğini, kapasitesini ve işletme maliyetini olumsuz yönde etkilemektedir.

Sıcak daldırma galvanizleme işleminde kullanılan kimyasal yüzey temizleme işlemi; yağ giderme, asitleme, su durulama ve flux adımlarından oluşup her birinin galvaniz yüzey kaplama kalitesi üzerinde etkisi vardır [8,13]. Malzeme yüzeyindeki organik kalıntılar yağ giderme ile temizlendikten sonra, asitleme işleminde H_2SO_4 ya da HCl kullanılarak pas ve tufal gibi oksitler metal yüzeyinden uzaklaştırılır. Asitleme sonrası metal yüzeylerinde oluşan demir tuzları ise su durulama banyolarında temizlenir. Bu yüzey temizleme işlemlerine rağmen metal yüzeyindeki kalması muhtemel oksit, klorür, sülfat kalıntıları flux banyosunda giderilir. Flux banyo sonrası, çelik yüzeyinde ince kristalli bir çinko tabakası oluşur [15].

Kimyasal yüzey temizleme işlemleri sonrası, parçalar kurutma fırınında $\sim 90^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtılarak kurutulur. Kurutma fırını, bir kabin içinde malzemenin hareketini sağlayan konveyörlerin bulunduğu ve sıcak hava dolaşımının olduğu bir sistemdir. Büyük hacimli bu tip kurutma fırınlarında homojen sıcaklık dağılımının elde edilemediği ve ısıtma verimliliğinin çok düşük olduğu bilinmektedir. Bu nedenle, son yıllarda çelik boru galvanizleme prosesinde, daha efektif ve homojen ısıtma sağlayan ve de sürekli hat şeklindeki üretime uygun olan indüksiyon ısıtma kullanımı kendisine yer bulmaya başlamıştır [16].

Kurutma işleminin ardından, galvaniz kaplamanın oluşması için parçalar $\sim 445-465^{\circ}\text{C}$ sıcaklığındaki ergimiş çinko banyosuna daldırılarak bir süre bekletilir. Banyodaki bekleme süresince, ergimiş çinko ile çelik yüzey arasında gerçekleşen difüzyon reaksiyonuyla, kaplama yüzeyinden altlık malzemeye doğru Fe açısından zenginleşen, çeşitli kalınlık ve özelliklere sahip olan bir dizi Fe-Zn intermetalik fazlar ve saf çinko tabakası oluşur [5,13,17]. Altlık malzeme ile metalürjik bağa sahip olan çinko kaplama, en dış yüzeyde saf çinko olarak adlandırılan eta (η -%0,03 Fe) ve intermetalik Fe-Zn bileşikleri olarak zeta (ξ -6-7 %Fe), delta (δ - 8-13 Fe) ve gamma (Γ -18-31 % Fe)'dan oluşmakta olup yapısal heterojenliklerinden dolayı mekanik özellikleri de birbirinden farklıdır [18]. Fe-Zn intermetalik fazlarından ilk önce zeta (ζ) oluşurken bunu delta (δ) fazı takip eder (Şekil 5). Zeta (ζ) ve delta(δ) fazlarının oluşumu 5 saniyede gerçekleşirken, gama (Γ) fazlarının oluşumu 30 saniyelik bir sürede gerçekleşir [12,13].



Şekil 5. Sıcak daldırma galvanizlenmiş donatının mikro yapısı [5].

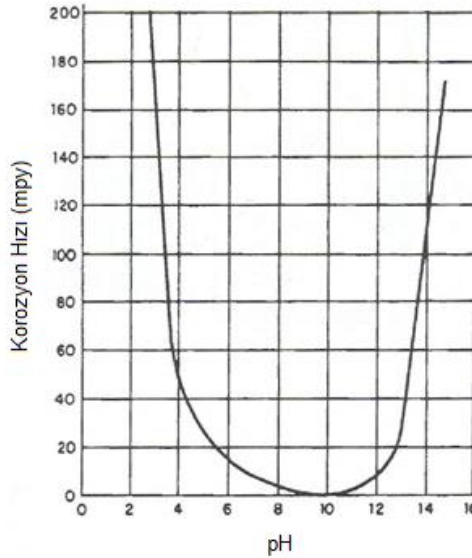
Kaplama sonrası, çinko katılaşması tamamlanmış olsa bile artık ısı nedeni ile Fe-Zn reaksiyonu devam eder ve saf çinko tabakası devam eden bu reaksiyon nedeni ile alaşım tabakası haline dönüşür ki bu da kaplamanın şekil alma kabiliyetini azaltır. Bunu engellemek için malzemeler $\sim 90^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki bir su banyosunda soğutularak reaksiyon sonlandırılır. Soğutma işlemi sonrası, çinkonun oksitlenmeye karşı direncini arttırmak için galvanizli parçalara sodyum dikromat ($\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) çözeltisi ile pasivasyon işlemi uygulanır.

Sıcak daldırma galvanizlemenin sürekli galvanizleme yönteminden en önemli farkı, galvaniz kaplama ile çelik yüzey arasında oluşan metalürjik bağ nedeniyle hem mekanik zorlanmalara hem de korozyona karşı yüksek dirence sahip olmasıdır.

Galvaniz kaplama kalınlığı; kaplanan çeliğin kütlesine ve öncelikle kalınlığına, kullanım yerine göre değişmekte olup uluslararası standartlarla belirlenmiştir. ASTM-A767, EN10348-2 ve ISO14657 standartları galvanizli donatılar için çinko tabaka kalınlığını en az 610 g/m^2 ($85 \text{ }\mu\text{m}$) olarak belirlemiştir. Kaplama dış yüzeyinde bulunan ve saf çinko olarak adlandırılan eta tabakası yaklaşık olarak $40\text{-}50 \text{ }\mu\text{m}$ kalınlığında olup donatının ıslak çimento ile teması halinde davranışını belirlemektedir. Dayanıklı, sağlam ve uzun ömürlü bir kaplamanın gerekli olduğu ürünlerde sıcak daldırma galvanizleme tercih edilen ve en yaygın olarak kullanılan yöntemdir [11].

Galvanizli Donatının Betondaki Davranışı

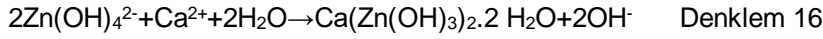
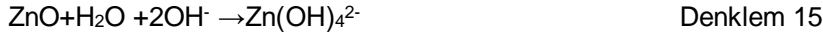
Betona gömülü galvanizli donatılarla ilgili yapılan çalışmalarda bazı çelişkili sonuçlar yayınlanmış olsa da çalışmaların büyük çoğunluğu, kaplamasız donatıya kıyasla galvanizli donatının daha yüksek klorür toleransına sahip olması ve karbonatlaşmaya karşı daha dirençli olması nedeniyle uzun vadede daha iyi korozyon koruması sağladığını ortaya koymuştur [11]. Çinko kaplamadan dolayı galvanizli donatıların beton içindeki davranışı kaplamasız donatılara göre farklılık gösterir. Amfoterik bir metal olarak hem asitlerle hem de bazlarla reaksiyona giren çinko, pH 6-12,5 aralığında stabil olup bu değerlerin altında ve üstünde korozyon hızı katlanarak artar (Şekil 6) [12]. Beton boşluk sıvısı kalsiyum hidroksit, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit varlığından dolayı oldukça alkali olup minimum 12,6 pH değerindedir [5,12]. pH, ilk birkaç saat içinde 13'ün üzerine, hidrasyon devam ettikçe 13,7 civarında bir değere çıkar. Bu koşullar altında çinko termodinamik olarak kararsız olup kuvvetli bir şekilde korozyona uğrar.



Şekil 6. pH değerinin saf çinkonun korozyon hızına etkisi [12].

Galvanizli donatının taze betona ilk temasında, pasifleşme davranışı siyah donatıya göre oldukça farklıdır. Kaplamasız siyah donatı birkaç nanometre kalınlığında çok ince oksit film oluşumuyla hızlı bir şekilde pasifleşirken, galvanizli donatıda ise kaplamanın dış kısmındaki saf çinko tabakasının maksimum $10 \text{ }\mu\text{m}$ civarında tükenmesi ile pasifleşme gerçekleşir. Kalınlığı $85 \text{ }\mu\text{m}$ ve üzerinde olan galvaniz kaplamada, saf çinko tabakası $10 \text{ }\mu\text{m}$ civarında tükense de Fe-Zn intermetalik fazları donatıya koruma sağlar.

Çinko ile boşluk sıvısı arasındaki ilk reaksiyon oldukça kuvvetli olup, pasif film oluşumu betonun priz sürecinin başında (~1-2 saat) hızla gerçekleşirken, betonun sertleşip karışım içindeki hareketliliğin kısıtlanması ve pasif filmin oluşup çinko yüzeyini kaplaması ile yüzeydeki reaksiyon hızı azalır. Pasif film oluşuktan sonra, pH yaklaşık 13,6'ya yükselse bile bozulmadan kalır [5]. Beton boşluk sıvısında, çinko korozyon ürünleri kalsiyum ile reaksiyona girerek çinkonun pasivasyonunu sağlayan ve kristalli bir yapıya sahip olan kalsiyum hidroksizinkat (CHZ) $\text{Ca}(\text{Zn}(\text{OH})_3)_2$ tabakasını oluşturur. CHZ oluşumuna yol açan kimyasal reaksiyonlar karmaşık ve iyi anlaşılmamış olmakla birlikte, süreç Denklem (11-16) reaksiyon dizini yardımıyla tanımlanmıştır [11].



Çinkonun pasifleşmesini sağlayan ve bir korozyon ürünü olan kalsiyum hidroksizinkatın morfolojisi ve etkinliği büyük ölçüde temas ettiği çözeltisinin pH'ına bağlıdır. $12,5 \pm 0,1$ ile $13,3 \pm 0,1$ pH aralığında kristallerin boyutu, çinkoyu daha fazla çözünmeye karşı koruyan sürekli ve kompakt bir tabakanın oluşmasını sağlayacak inceliktedir [12]. pH değeri arttıkça kristallerin boyutu artar ve pH $13,3 \pm 0,1$ 'in üzerinde olması durumunda kristallerin boyutu çinko yüzeyini tamamen kaplayamayacak kadar büyüyerek, koruyucu olmayan bir CHZ tabakası oluşmasına ve çinkonun çözünmesi neden olur [12]. CHZ tabakası tamamıyla oluşuktan sonra, KOH ve NaOH etkisiyle pH değerinin 13,6 seviyelerine kadar artmasının stabilitesini etkilemediği, sadece hafif bir kimyasal çözünme ile korozyon yoğunluğunda geçici bir artış gözlemlendiği, fakat değişmeden kaldığı belirtilmiştir [20,21]. pH 12,2'nin altındaki değerlerinde ise ZnO ve $\text{Zn}(\text{OH})_2$ gibi daha az koruyucu ürünlerin oluştuğu gözlemlenmiştir [22]. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bazlı farklı sulu çözeltiler yardımıyla farklı pH beton ortamları simüle edilerek galvanizli donatıda oluşan pasif tabakanın gelişimi incelenmiş, bileşim ve yapısının alkali ortamın pH'ına ve Ca^{2+} iyonlarının konsantrasyonuna bağlı olduğu gözlemlenmiştir [23,24].

Sıcak daldırma galvaniz kaplama pH 6-12,5 aralığında stabil olup, karbonatlaşma nedeniyle betonun düşen pH seviyesi bu kararlı bölgeye denk geldiği için galvanizli donatının korozyonu çok yavaş ilerler. Karbonatlaşmanın betona gömülü galvanizli donatının korozyon davranışına etkisini gösteren az sayıdaki çalışmada; karbonatlaşmanın kürlenme sırasında galvanizli çelik yüzeyinde oluşan CHZ katmanını tahrip ettiği, bu bozulmaya rağmen çinko korozyon oranının düşük kaldığı gözlemlenmiştir [25,26]. Betona gömülü donatıların korozyon potansiyelini tanımlayan klor eşliği değeri galvanizli donatılarda, kaplamasız donatılara göre ~5 katın üzerinde daha yüksek bir değere sahiptir.

Kesin değer konusunda bazı görüş ayrılıkları olsa da galvanizli donatılardaki kritik klor eşiği imento kütlesinin %1'i olarak tanımlanmıştır [27-29]. Galvanizli donatının klorür içermeyen betona gömülmesi durumunda kaplamanın mikro yapısında önemli bir değişiklik olmazken, klorürlerin varlığında kaplamanın betonla temas eden kısmı bozulur ve oluşan çinko açısından zengin korozyon ürünleri bitişik beton ara yüzey bölgesine dağıtılırken alttaki çinko alaşım katmanları varlığını sürdürür [30,31]. CHZ koruyucu katmanının yoğun, kalın ve sürekli olması durumunda galvanizli çeliğin klor korozyonuna karşı direnci yüksektir [22]. Galvanizli donatının klor eşiği, kaplamasız donatının klor eşiğinden çok daha yüksek olduğu için korozyonun başlaması için geçen srenin 2 kat artığı belirtilmiştir [27].

Beton içindeki galvanizli donatıda korozyonun başlamasıyla, öncelikle saf çinko tabakası ve ardından kademeli olarak Fe-Zn faz tabakalarının korozyona uğrayarak tüketilmesi söz konusudur. Bu da elik donatıdaki korozyon başlangıcının geciktirilmesi anlamına gelmektedir [29]. şebeke suyu ile ıslak-kuru döngüsüne maruz bırakılan karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış betonlardaki galvanizli donatıların korozyon hızlarında önemli bir değişiklik görülmemiştir [32]. Karbonatlaşma ve klor etkisinin beraber incelendiği çalışmalarda ise, betonun karbonatlaşmasından sonra NaCl çözeltisinde ıslak-kuru döngüsü uygulandığında galvanizli donatının çinko hidroksi klorür oluşumuyla hızla korozyona uğradığı ve kritik klorür eşiği değerinin düştüğü görülmüştür [32-34].

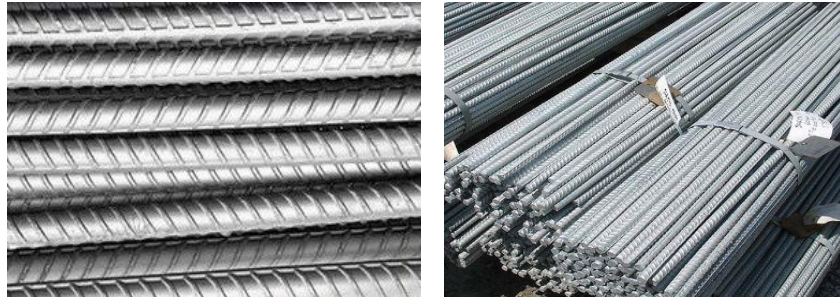
Galvaniz kaplama morfolojisi, beton içindeki donatının korozyon davranışını etkilemekte olup, sadece Fe-Zn intermetalik fazları içeren galvaniz kaplamanın pasifleşmesi için gereken süre saf çinko yüzey katmanına sahip galvaniz kaplama için gereken sreden daha uzundur [5,12,19]. Zira saf çinko katmanı, donatı ile alkali beton arasındaki ilk reaksiyonu azaltarak daha kısa sürede pasifleşmeyi sağlamaktadır [12,19]. Kaplama morfolojisi dışında, galvanizli donatıların yüzey koşullarının korozyon davranışına etkisi araştırılmış olup; betona gömülmeden önce yüzeyinde hafif çinko oksit ve çinko karbonat korozyon ürünleri bulunan donatı ile korozyona uğramamış donatı karşılaştırıldığında, yüzeyinden korozyon ürünleri olan donatının ilk korozyon hızının ve pasifleşme sresinin arttığı gözlenmiştir [12,19].

Betonarme elamanın performansına etki eden önemli parametrelerden biri de beton ile donatı arasındaki aderans olarak adlandırılan bağ kuvveti olup başlıca nervürlerin varlığı-özellikleri, donatı ile beton arasında oluşan kimyasal yapışma ve sürtünme direnci olmak üzere pas payı, iç gerilmeler, donatının çapı, konumu ve kaplama türü gibi faktörlerden etkilenmektedir. Donatı-beton geçiş bölgesi ve çevresinde oluşan hidrojenin galvanizli donatıların beton bağ mukavemetine etkilerini incelemek için yapılan ilk çalışmalarının aksine, sonrasında yapılan çalışmalarda kaplamasız donatı ile karşılaştırıldığında galvanizli donatıların bağ mukavemetinde ve aderans değerinde önemli bir fark olmadığı belirtilmiştir [11,35,36]. Nervürlü ve nervürsüz, kaplamasız ve galvanizli donatıların beton ile aralarındaki bağ kuvvetleri değerlendirildiğinde, bağ kuvvetleri başlangıçta benzer iken daha uzun periyotlarda galvanizli donatının beton ile oluşturduğu bağ kuvvetinin önemli miktarda arttığı [37] gözlenmiş olup bunun da galvanizli donatı-beton ara yüzeyinde oluşan CHZ kristalinin köprü görevi görüp, yapışmayı ve bağı arttırdığına inanılmaktadır [38].

GALVANİZ KAPLI DONATI ÇELİKLERİNİN GENEL ÖZELLİKLERİ

Galvaniz kaplı donatı çeliklerinin (Şekil 7) genel özellik ve avantajları aşağıda verilmiştir:

1. Tipik olarak galvanizli takviye çeliği, kaplanmamış takviye çeliğine kıyasla betonarme yapının hizmet ömrünü 4 ila 5 kat artırır.
2. Galvaniz kaplı takviye çelik çubukları üzerindeki çinko kaplama kalınlığı minimum 610 gr/m^2 yani $85 \text{ } \mu\text{m}$ 'dur. Galvanizleme sonrası, ürün üzerinde kaplamasız bölge, kabarcık, cüruf kalıntısı ve kullanım amacına engel olacak çinko birikintileri içermez.
3. Şantiye sahasındaki depolama süresi boyunca UV ışınlarından etkilenmez,
4. Galvanizli çelik donatı, kaplama işleminden hemen sonra sodyum dikromat çözeltisine daldırılır. Bu işlem, şantiyede yığın halinde stoklanan inşaat demirinde beyaz pas oluşumu engeller.
5. Galvanizli inşaat demiri bükme ya da eğme gibi çeşitli işlemlere maruz kaldığında, büküm bölgelerinde galvaniz kaplama tabakasının çatlaması ve pullanması ret sebebi değildir. Çünkü hasar gören katman en dış yüzeydeki saf çinko tabakasıdır. Kaplamanın hasar görmeyen Zn-Fe alaşım katmanları uzun yıllar korozyon koruması sağlayacaktır. Ancak, yine de istenirse bu bölgeler, kabul edilebilir bir yöntemle onarılabilir. Yaygın olarak kullanılan üç farklı onarım yöntemi vardır: çinko bakımından zengin boya, çinko esaslı lehim ve çinko alev spreyi.
6. Galvanizli çelik donatıların uygulama alanları; köprü tabliyeleri, dış yüzeye maruz kalan kiriş ve kolonlar, yüksek yapı ve gökdelenler, kıyı ve deniz yapıları, kule ve hava alanları.
7. İlgili Standartlar; ASTM A 767, EN 10348-2, ISO 14657,



Şekil 7. Galvaniz kaplı donatı çelikleri

Günümüzde inşaat demirlerinin çinko kaplanması için "Sıcak Daldırma Parça Galvanizleme" ve "Çinko Püskürtme-Metalizasyon" yaygın olarak kullanılan iki yöntemdir. Ancak bahse konu bu yöntemlerin bazı dezavantaj ve kısıtları vardır. Parça galvanizleme yönteminde üretim tonajının çok düşük olması işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Bu yöntemde, çelik donatı şantiyede projeye uygun olarak işlendikten sonra galvaniz kaplama işleminin yapılacağı tesise gönderilir. Bu da hem zaman kaybına hem de nakliye maliyetlerinin artmasına yol açmaktadır. Çinko püskürtme yönteminin de ise ana metal ile çinko kaplama tabakası arasında herhangi bir metalurjik bir bağ oluşmaz. Bu nedenle elde edilen galvaniz kaplamanın korozyon koruması çok düşüktür.

YENİ NESİL SICAK SERİ AKIŞLI DALDIRMA DONATI GALVANİZLEME TESİSLERİ

KFS METAL, önceden bahsi geçen yöntemlerden farklı olarak yüksek üretim kapasitesi ve yüksek çinko kaplama kalitesine olanak sağlayan "Seri Akışlı Rebar Sıcak Daldırma Galvanizleme Tesisleri"ni başarıyla üretmektedir. Parça galvanizlemede seri üretim akışını bozan, işletme maliyetini arttıran, verimliliği düşüren, çevre sorunları ve kirliliğine yol açan işlem adımları değiştirilerek, seri üretime uygun yeni bir tesis tasarımı geliştirilmiştir. Bu amaçla, askılama işlemi ile vinç kullanımının tamamen iptal edilmesi, kimyasal yüzey işlemleri yerine lazer temizleme, kurutma kabini yerine indüksiyon ısıtma sistemi, ürün hareketlerinde makaralı konveyör, çinko banyosuna daldırma işleminde yıldız çark mekanizma kullanımı öngörülmüştür. KFS METAL tarafından geliştirilen yeni nesil "**Seri Akışlı Sıcak Daldırma Donatı Galvanizleme Tesisleri**" ile parça galvanizleme yönteminde 2,0 t/h olan üretim kapasitesinin 3 kat artacağı, çinko kaplama kalınlığının ise ASTM A 767, ISO 14657 ve EN 10348-2 standartlarına uygun şekilde minimum 610 g/m² (85 µm) olacağı öngörülmektedir.



Şekil 8. Seri Akışlı Rebar Sıcak Daldırma Galvanizleme Tesisleri

KAYNAKLAR

- [1] https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/deprem_potansiyeli
- [2] <https://www.tmmob.org.tr/icerik/imo-bir-daha-yasanmasin-diye-6-subattan-ders-alinsin-bilime-ve-muhendislige-kulak-verilsin>
- [3] Çoşgun T, İstanbul'da Deprem Sonrası Yapılan İncelemelerde Karşılaşılan Korozyon Hasarı Üzerine Bir İnceleme, 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, Türkiye, 01- 03 Ekim 2003, ss.269-277
- [4] N.Çağlar, B.Bayhan, E.Avcı, S.Kocakaplan, S.Özen, E.Yıldırım, G.B.Sakcalı, Kahramanmaraş depremi inceleme ve değerlendirme raporu, Şubat 2023, Bursa Teknik Üniversitesi Uygulama ve Araştırma Merkezi, Bursa Teknik Üniversitesi.
- [5] Corrosion of Steel in Concrete Structures, A. Poursaei (Editor), 2023, United States, Elsevier. ISBN: 978-0-12-821840-2
- [6] Mühendisler İçin Korozyon, Hayri YALÇIN, Timur KOÇ, Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği, Kimya Mühendisleri Odası, 1997, Ankara.
- [7] L.J.Parrott, A study of carbonation-induced corrosion, Mag. Concr. Res. 46 (1994) 23–28.
- [8] Pourbaix M.J.N., Pourbaix A.J.E.,2001, Thermodynamics: Corrosion, Encyclopedia of Materials: Science and Technology, (Second Edition), Pages 9174-9178.
- [9] Özlem AYDIN, Beton Yapılarda Donatı Korozyonunun Önlenmesine Yönelik Tedbirlerin Araştırılması, 2012. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Üretim Programı, Doktora tezi.
- [10] S.Dong, B.Zhao, C.Lin, R.Du, R.Hu, G.X.Zhang: Corrosion behavior of epoxy/zinc duplex coated rebar embedded in concrete in ocean environment, Construction and Building Materials 28 (2012), pp.72–78.
- [11] Galvanized Steel Reinforcement in Concrete S.R.Yeomans, 2004, Elsevier, Australia.
- [12] Zuo Quan Tan, The Effect of Galvanized Steel Corrosion on the Integrity of Concrete, 2007. University of Waterloo, Applied Science in Civil Engineering, Ontario, Canada, Master thesis.
- [13] R.Marder: Metallurgy of zinc coated steel, Progress in Materials Science 45 (2000), No. 3, pp. 191-271. DOI:10.1016/S0079-6425(98)00006-1
- [14] G.Dallin, M.Gagné, F.Goodwin, S.Pole, Continuously Galvanized Reinforcing Steel, Conference Paper December 2015, International Zinc Association
- [15] T.H.Cook: Composition, testing, and control of hot dip galvanizing flux, Metal Finishing 101 (2003), No. 7-8, pp. 22-35.
- [16] Ş.Şirin, Drying of steel pipes at a hot-dip galvanizing plant by induction heating, Materials Testing, 62 (2020) No.3, pp.291-298.
- [17] J.Carpio, J.A.Casado, J.A.Alvarez, F.Gutierrez-Solana: Environmental factors in failure during structural steel hot-dip galvanizing, Engineering Failure Analysis 16 (2009), No. 2, pp. 585-595. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2008.02.006
- [18] J.D.Culcasi, P.R.Sere, C.I.Elsner, A.R.Di Sarli: Control of the growth of zinc-iron phases in the hot-dip galvanizing processes, Surface and Coating Technology 122 (1999), No. 1, pp. 21-23. DOI:10.1016/S0257-8972(99)00404-1
- [19] Z.Q.Tan, C.M.Hansson: Effect of surface condition on the initial corrosion of galvanized reinforcing steel embedded in concrete, Corrosion Science 50 (2008) pp.2512–2522. DOI: 10.1016/j.corsci. 2008.06.035

- [20] A.Macias, , C.Andrade: Stability of the calcium hydroxizincate protective layer developed on galvanized reinforcement after a further increase of the pH value, *Materials de Construccion* 36 (1986), No.204, pp.19-27.
- [21] M.Maeda, X. Li, A.Ooi, E.Tada, A.Nishikata: Passivation Mechanism of Galvanized Steel Rebar in Fresh Concrete, *ISIJ International* 60 (2020), No. 2, pp.337–345.
- [22] M.C.Andrade, E.A.Macias, Galvanized reinforcements in concrete, in: A.D.Wilson, J.W. Nichols, H.J.Prosser (Eds.), *Surface Coatings*, Elsevier Applied Science, New York, USA, 1988.
- [23] A.Macias, C.Andrade, Corrosion rate of galvanized steel immersed in saturated solutions of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in the pH range 12–13.8, *Br. Corros. J.* 18 (1983) 82–87.
- [24] A.Macias e, C.Andrade, Corrosion of galvanized steel in diluted $\text{Ca}(\text{OH})_2$ solutions (pH 11.1–12.6), *Br.Corros. J.* 22 (1987) 162–171.
- [25] T.Bellezze, G.Roventi, E. Barbaresi, N. Ruffini, R. Fratesi, Effect of concrete carbonation process on the passivating products of galvanized steel reinforcements, *Mater. Corros.* 62 (2011).
- [26] J.A.Gonzales, C.Andrade, Effect of carbonation, chlorides and relative ambient humidity on the corrosion of galvanized rebars embedded in concrete, *Br.Corros. J.* 17 (1982) 21–28.
- [27] D.Darwin, J.Browning, M.O'Reilly, L.Xing, J.Ji: Critical Chloride Corrosion Threshold of Galvanized Reinforcing Bars, *ACI Materials Journal*, April 2009 pp.176-183.
- [28] A.Cheng, R.Huang, J.K.Wu, C.H.Chen: Effect of Rebar Coating on Corrosion Resistance and Bond Strength of Reinforced Concrete, *Construction and Building Materials* 19 (2005).
- [29] S.Yeomans: Corrosion of the Zinc Alloy Coating in Galvanized Reinforced Concrete, *Corrosion98*, Paper No.653 (1998) pp.653/1-10.
- [30] M.Jasniok, M.Dudek, J.Kolodziej: Assessing effects of chloride-induced corrosion of galvanized reinforcing steel in cement mortar, using impedance spectroscopy and scanning microscopy, *Ochrona Przed Korozją* 61 (2018) 7, pp.176-181. DOI: 10.15199/41.2018.7.1
- [31] M.Jasniok, M.Sozanska, J.Kołodziej, B.Chmiela: A two-year evaluation of corrosion-induced damage to hot galvanized reinforcing steel B500SP in chloride contaminated concrete, *Materials* 13 (2020) pp.3315-3340. DOI:10.3390/ma13153315
- [32] G.Roventi, T.Bellezze, G.Giuliani, C.Conti, Corrosion resistance of galvanized steel reinforcements in carbonated concrete: effect of wet–dry cycles in tap water and in chloride solution on the passivating layer, *Cement and Concrete Research* 65 (2014) 76–84.
- [33] E.Ramirez, J.A.Gonzales, A.Bautista, The protective efficiency of galvanizing against corrosion of steel in mortar and in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturated solutions containing chlorides, *Cem. Concr. Res.* 26 (1996) 1525–1536.
- [34] G.Roventi, T.Bellezze, E.Barbaresi, R.Fratesi, Effect of carbonation process on the passivating products of zinc in $\text{Ca}(\text{OH})_2$ saturated solution, *Mater. Corros.* 64 (2013) 1007–1014.
- [35] B.Hamad, J.Mike, Bond strength of hot-dip galvanized reinforcement in normal strength concrete structures, *Construction and Building Materials*, 19 (2005), pp. 275-283.
- [36] L.Maldonado, Chloride threshold for corrosion of galvanized reinforcement in concrete exposed in the Mexican Caribbean, *Materials and Corrosion*, 60 (2009), pp. 536-539.
- [37] F.Belaïd, G.Arliguie, R.Fançois: *Effect of bar properties on bond strength of galvanized reinforcement*, *Journal of Materials in Civil Engineering* 16 (2001), No. 6, pp:454-458.
- [38] R.Fratesi, G.Moriconi, L.Coppola: *The influence of steel galvanisation on rebar behaviour in concrete*, *Corrosion of reinforcement in concrete construction*, 1996, C. L. Page, P.B.Bamforth, J. W. Figg (Editor). The Royal Society of Chemistry: UK. pp. 631-641.