

Makalenin Geliş Tarihi : 12.01.2009
Makalenin Kabul Tarihi : 02.02.2009

BETONARME YAPILARDAKİ DEPREM HASARLARINA KOROZYONUN ETKİSİ

Mizam DOĞAN¹

ÖZET: Günümüz betonarme ve çelik yapılar, kendi zati ağırlıkları, servis ve sismik yüklere göre boyutlandırılır. Ancak yapılardaki deprem hasarları incelendiğinde, boyutlandırmada belirgin bir şekilde dikkate alınmayan korozyonun yapıların deprem hareketinden hasar görmesini önemli ölçüde artırdığı gözlenmiştir. Betonarme yapıları içindeki donatıyı servis ömürleri boyunca tehdit eden korozyon, metalin içinde bulunduğu ortam ile kimyasal veya elektrokimyasal reaksiyona girerek metalik özelliklerini kaybetmesidir. Metallerin büyük bir kısmı su ve atmosfer etkisine dayanıklı olmayıp, normal şartlar altında bile korozyona uğrarlar. Korozyon oluşması için oksijen, nem ve elektrolit parametrelerin olması gerekir. Bu çalışmada, betonarme donatılarda korozyonun oluşum nedenleri ve aşaması incelenmektedir. Ayrıca korozyonun yapılardaki deprem hasarlarına etkisi ve oluşmaması için mevcut ve planlanan yapılarda alınması gereken önlemler irdelenmektedir.

Anahtar kelimeler: Korozyon, Sismik yük, Kimyasal reaksiyon, Betonarme donatı, Karbonasyon

EFFECT OF CORROSION TO RC BUILDING EARTHQUAKE DAMAGE

ABSTRACT: Reinforced concrete and steel structures are designed by considering dead, live and seismic loads. But when earthquake damages are examined, it's observed that; corrosion, which is not considered during design, increases the earthquake damage ratio of structural elements. Corrosion, which is a serious threat for structures in their service life, is a chemical and electrochemical reaction of metals and their environments. Corrosion causes the loss of metallic properties of metals. Most of the metals are not durable to water and atmospheric effects. For corrosion, there must be oxygen, humidity and electrolyte. In this paper; reasons and steps of corrosion and reinforcement steels, effects of corrosion to earthquake damage of structures and precautions for existing and planning structures are studied.

Keywords: Corrosion, Seismic load, Chemical reaction, reinforcement steel

¹ Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi,
İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batı Meşelik Kampüsü, ESKİŞEHİR

I. GİRİŞ

Korozyon, metallerin temel ve sürekli problemidir. Korozyonu önlemek ülkeler büyük bütçeler ayırmaktadır. Bu incelemede korozyonun beton içindeki donatılara olan etkisi ele alınmaktadır. İnşaat malzemelerinin başında gelen ve her çeşit yapıda kolaylıkla kullanılabilen beton, dış etkilere karşı fiziksel ve kimyasal olarak oldukça dayanıklıdır. Basınca karşı dayanımı çok yüksek olan betonun, çekmeye karşı düşük olan dayanımını artırmak için korozyona karşı dayanıksız bir metal olan betonarme demiri kullanılmaktadır. Yumuşak çelik olan betonarme demirleri beton tarafından etkin bir şekilde sarılarak paslanmaya karşı korunur. Betonarme demirleri betonun yüksek alkali özellikte olmasından dolayı beton içinde korozyona uğramadan uzun süre dayanır. Alkali ortamlarda demir yüzeyinde pasif bir oksit filmi oluşarak korozyon hızını azaltır. Diğer taraftan beton boşluklu yapıda olmasına rağmen geçirgenliği düşük bir malzemedir. Bu nedenle betonarme demirlerinin korozyonuna neden olan bileşiklerin (oksijen, su ve klorür) çevreden beton içine girmesi ve demire kadar ulaşması güçleşir. Betonun özellikle kuru halde iken elektriksel iletkenliği de oldukça düşüktür. Bunun sonucu olarak betonarme demirlerinin pratik olarak korozyona uğramayacağı söylenebilir.

Betonarme donatının korozyonu ya betonarmenin yapım aşamasında beton içindeki birimlerden ya da betonarmenin servis aşamasındaki etkilerden veya birlikteki davranışlarından oluşur. Betonun porozitesi ve permeabilitesi ne derece az ise, beton içine penetre olabilen klorür miktarı da o derece az dolayısı ile de korozyon oluşum hızı azalır. Betonun bu özellikleri başta su/çimento oranı olmak üzere, beton yapımında kullanılan agrega granülometrisine, çimento dozajına, betonun kalıp içinde sıkıştırılmasına ve dökümden sonraki ilk günlerde uygulanan kür koşullarına bağlıdır [1]. Betonarmenin servis ömrü içinde titreşim, sarsıntı, büyük ve küçük depremler, mekanik yorgunluk ve dış ortamdaki çeşitli nedenlerden dolayı betonda önce mikroskopik sonrada daha büyük gözenek ve çatlaklar oluşur. Bu gözenek ve çatlaklardan beton içine sızan rutubet, dış ortamdaki korrozif gazlar, deniz kumu kullanımından kaynaklanan tuz, havadaki egzoz gazları, sanayi kirlilik, CO₂, havadaki kükürt, nitrojen oksit ve karayollarında buzla mücadelede kullanılan tuzlar betonarme demirinin korozyona uğramasına neden olur. Yani korozyon hem betonarme yapılırken hem de kullanılırken dikkate alınması gereken bir olaydır. Bu aşamalardan birinde dikkate alınmaz ise korozyon dolayısı ile betonarmenin hasar

görmesi önlenemez. Yapının maruz kaldığı suların sıva, boya, kaplama ve oluklarla yapıdan uzaklaştırmak korozyonu önleyecek veya azaltacaktır.

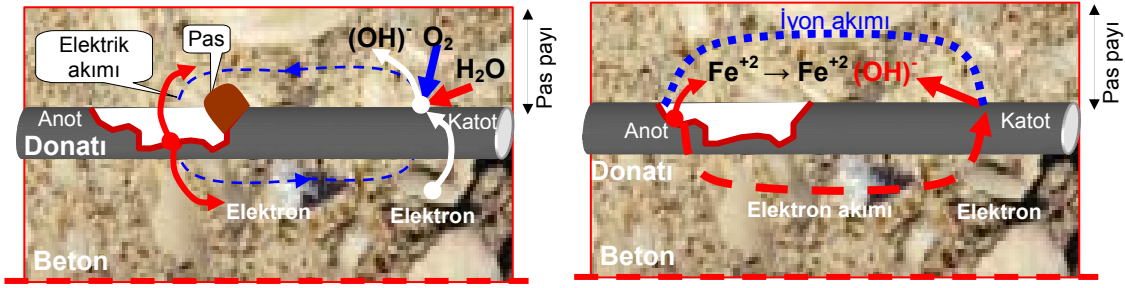
Beton içindeki demir aynı sulu çözeltiler içindekine benzer şekilde korozyona uğrar. Anot bölgesinde demir iyon haline geçer. Demir iyonları alkali ortamda demir hidroksit halinde çöker.



Beton pH değeri yüksek olduğu için beton içinde katotta hidrojen çıkışı olmaz. Katot reaksiyonu ancak oksijen redüksiyonu şeklinde yürüebilir.



Metal atomları sulu ortamda elektron kaybederek, yani okside olarak iyon haline geçer ve erişe karışır [1]. Bu reaksiyona anot reaksiyonu denir. Eriyik içine başka bir metal daldırılırsa bir tam hücre oluşur. Anot reaksiyonunda ortaya çıkan elektronların sarf edilerek birikmesini önleyen reaksiyona da katot reaksiyonu denir. Korozyon olayının sürekliliği için anot reaksiyonunun katot reaksiyonu ile tamamlanması gerekir. Anot ve katot reaksiyonları birlikte bir korozyon pili oluşturur. Bu korozyon pilinin sürekli çalışabilmesi, ancak anot ve katotun elektron akışını sağlayan bir iletkenle bağlanması ve elektrolitik bir ortam oluşturulması ile mümkündür. Akım devresi OH⁻ iyonlarının anoda iletilmesi ile kapanmaktadır. Anot reaksiyonunda meydana gelen metal iyonu, bulunduğu sulu ortam içinde çözülür ve bir korozyon ürünü meydana getirir. Böylece anot olan metalde, bir malzeme kaybı, yani bir hasar oluşur. Katottan gelen iyonları anottaki iyonları ile birleşerek anot çevresinde kısmen suda çözünebilen Fe(OH)₂ demir hidroksite dönüşür. Daha sonra Fe(OH)₂ çevresinde oksijen veya su varsa, kararlı ve çözünemeyen bir oksit olan Fe(OH)₃ pasa dönüşür (Şekil 1) [2].



Şekil 1: Betonarme donatısı üzerinde korozyon oluşum aşamaları.

Deprem, yapıda korozyon oluşumuna iki aşamada devreye girmektedir. Birincisi magnitudü küçük olan depremlerde yapıda bulunan malzeme ve düzensizlikler sonucu oluşan kılcal çatlaklardan donatıya çeşitli elementlerin difüzyonunu kolaylaştırması sonucu korozyon oluşumuna sebep olmasıdır. Birde bu etkinin yapı ömrü boyunca defalarca olması yapıyı büyüklüğü küçük olan bir depremde bile yıkıma sebep olabilir. İkincisi daha önce herhangi bir şekilde donatısı korozyona uğramış yapılar olabilecek orta büyüklükteki bir depremde kullanılmayacak derecede hasar görebilmektedir. Deprem riski olan bölgelerdeki korozyon oluşumu yapının deprem bölgesinden dolayı göreceği sismik kuvveti artırmaktadır. Bu çalışmada korozyonun deprem hasarını artırma aşamaları ve alınması gereken önlemler incelenmektedir.

II. KOROZYONUN HACİMSEL ETKİSİ

Korozyonun hacimsel değişimi, oluşum yoğunluğu ve kalınlık kaybı aşağıdaki Çizelgede verilmektedir (Çizelge 1) [3]. Çizelgenin incelenmesinden de görülebileceği gibi korozyon her haliyle metaller dolayısı ile de betonarme donatılar için çok değişik etki yaratmaktadır. Yine korozyonun çok değişik etkilerine dikkati çeken “Gerekli standartları taşımayan beton içindeki demirin 62 ayrı kimyasal reaksiyon tehlikesiyle karşı karşıyadır. Depremde hasar gören binaların yüzde 67’sinde korozyon görüldüğünü ileri sürülmektedir. Türkiye’de şu an bir tane bile korozyona karşı korumalı köprü ya da bina yoktur [4]. “Beton mukavemetleri çok zayıftır. Zayıf betonlar korozyon (paslanma) problemi yaratmış. Korozyon İstanbul’u depremden daha fazla tehdit eden bir konudur. Binalarda kullanılan demirler neredeyse erimiş bir iz halinde kalmış. İstanbul’da binaların en büyük sorunu deprem değil korozyondur” [5].

Çizelge 1. Korozyonun çeşitli özellikleri

Korozyon elementi	Renk	Hacmi (cm ³)	Korozyon Sınırı	Korozyon oluşum yoğunluğu (µA/cm ²)	Kalınlık kaybı (µm/yıl)	Oksit kalınlığı (µm/yıl)
Fe ₃ O ₄	Siyah	2,1	Pasif	<0,1	<1,1	<3
Fe(OH) ₂	Beyaz	3,8	Zayıf	0,1á0,5	1,1á5,7	3á17,3
Fe(OH) ₃	Kahverengi	4,2	Orta	0,5á1	5,7á11,5	17,3á34
Fe(OH) ₃ , 3H ₂ O	Sarı	6,4	Güçlü	>1	>11,5	>34
			Yüksek	10	115	345

Oluşan demir oksit büyük hacim genişmesi meydana getiren (hacim artışı %500'lere kadar ulaşabilir) sarı/kahve renkli içi boşluklu bir maddedir [2]. Korozyona uğrayan bu donatı yüzeyinde meydana gelen hacim artışı (pas), çekme dayanımı düşük ve gevrek bir malzeme olan betonun çatlamasının ve parça atmasının önemli nedenlerinden biridir (Şekil 2). Atmosfer etkisinde kalan demir yüzeyinde oluşan demir oksit veya demir hidroksit tabakasının bünyeden ayrılması, kütlede ihmal edilebilecek düzeyde ağırlık kaybına neden olur. Bu olay ile meydana gelen hasarlar hafif şekilde olmayabilir, yapının göçmesi şeklinde ortaya çıkabilir.



Şekil 2. Korozyon sonuç pas payı betonu dökülmüş örnekler.

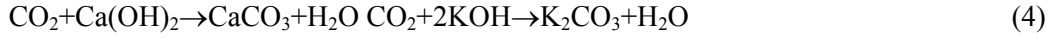
Reaksiyonlarda betonarme demirlerinin korozyonu için oksijene ve suya mutlaka ihtiyaç vardır. Kuru haldeki beton içinde yeterli oksijen bulunmadığı için betonarme demirleri korozyona uğramaz. Ancak poroz bir malzeme olan beton içine oksijen kolaylıkla girebilir. Beton içine oksijen girişi iki yolla olabilir. Birincisi oksijen ile doymuş haldeki su beton içine penetre

olurken oksijeni betonarme demirlerine kadar beraberinde taşır. Bu olay periyodik olarak ıslanan ve kuruyan deniz kenarında dalgalara maruz betonlarda etkili olarak yürür (Şekil 3). İkincisi hava doğrudan beton çatlak ve boşlukları içine dolarak oksijeni taşır. Eğer beton boşlukları su ile dolu değilse bu olay çok hızlı olarak gerçekleşir. Aksi halde oksijenin beton boşlukları içindeki suda çözünerek oradan betonarme demirlerine kadar çözelti içinde difüzyonu gerekir. Betonarme demirlerinin korozyonu beton boşluklarının yarıya kadar su ile dolu olması halinde ya da zaman zaman ıslanıp kuruyan betonlarda maksimum değere ulaşır [6]. Beton içine oksijen difüzyon hızı su/çimento oranı yanında betonun rutubet derecesine (beton boşluklarının su ile doluluk derecesine) de bağlıdır. Beton kuru halde iken beton içindeki boşluklar hava ile doludur. Bu durumda atmosferden katot yüzeyine oksijen transferi son derece kolaydır. Beton boşlukları su ile dolu olursa, bu durumda oksijen önce boşluk suyu içinde çözünecek ve daha sonra difüzyonla betonarme demirlerine ulaşacaktır. Beton rutubet derecesinden kaynaklanan bu olay pratikte büyük önem taşır. Beton kuru halde iken su eksikliğinden, beton su ile tam doymuş halde iken de oksijen eksikliğinden betonarme demirlerinin korozyonu son derece yavaştır. En şiddetli korozyon olayı, periyodik olarak ıslanan ve kuruyan betonlarda görülür (Şekil 3). Diğer taraftan köprü ayakları gibi sürekli su altında kalan betonlarda da korozyon hızı son derece düşüktür. Bu durum su içinde çözülmüş halde olan oksijenin beton içinden difüzyonla demir yüzeyine kadar taşınmasının güçlüğünden ileri gelir.



Şekil 3. Deniz kenarında korozyona uğramış yapı örnekleri.

Su içinde bulunan çözülmüş oksijen konsantrasyonu korozyon açısından büyük önem taşır. Oksijenin sudaki çözünürlüğü oldukça küçüktür ve sıcaklık arttıkça azalır. Oksijenin tuzlu sular içindeki çözünürlüğü de saf suya göre daha azdır. Tuz konsantrasyonu arttıkça su içinde çözülmüş haldeki oksijen konsantrasyonu gittikçe azalır. Bu nedenle yüksek konsantrasyondaki tuzlu sular içinde korozyon hızının artık artmadığı görülür. Seyreltik halde tuz konsantrasyonu arttıkça klorür iyonu etkisi ile korozyon hızında da artış olmaktadır. Ancak tuz konsantrasyonu belli bir değere eriştikten sonra (75 g tuz/kg çözelti) korozyon hızında azalma görülmektedir. Bu durum tuz konsantrasyonunun artışı ile birlikte su içinde çözülmüş olarak bulunan oksijen konsantrasyonunun azalmasından ileri gelmektedir. Yüksek alkali özelliği nedeniyle normal betonlar içinde betonarme demirleri pasif halde bulunur. Fakat herhangi bir nedenle beton pH derecesi düşerse pasiflik bozulur. Beton pH derecesinin düşmesine neden olan en önemli olay karbonasyon olayıdır. Karbonasyon, çevre atmosferden beton içine giren karbon dioksitin (veya SO_x, NO_x gibi diğer asit gazların) beton boşluklarında bulunan serbest kireç ile reaksiyona girmesi ile oluşur. Bu reaksiyon sonucu beton pH derecesi 9'a kadar düşebilir ve betonun pasifleştirme özelliği kaybolur [1]. Atmosferdeki CO₂, kalsiyum ve alkalın hidroksitleri ve çimento hamuru ile aşağıdaki reaksiyonlara girer (Denk. 3);

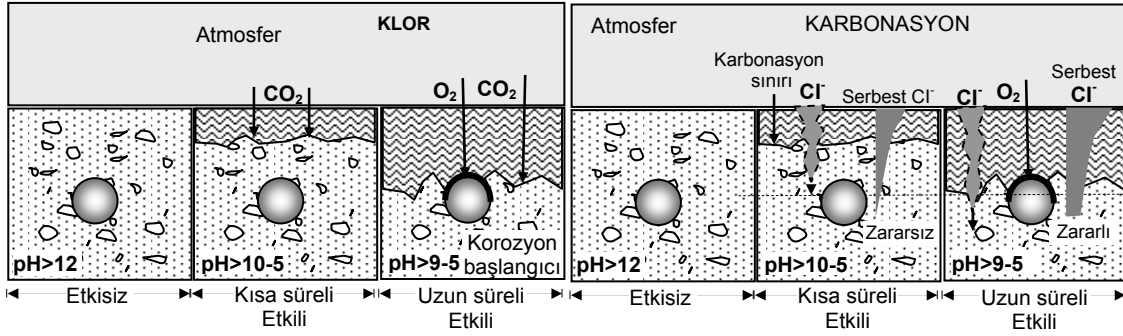


Bu çözeltinin pH değeri yaklaşık 9'a indirgenmiştir. Karbonasyon donatıya ulaştığında, çelik deparafize (korozyon başlangıcı) olur (Şekil 4) [6]. Ca(OH)₂ nin çözünürlüğü artar ve karbonasyon mekanizması aşağıdaki reaksiyonlarla devam eder;



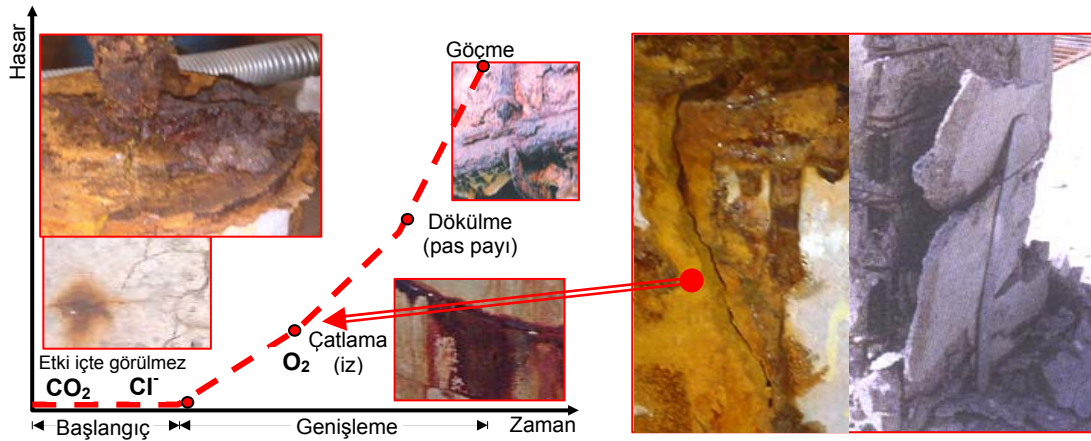
Karbonasyon olayı beton yüzeylerinde başlar ve zamanla parabolik olarak azalan bir hızla beton derinliklerine doğru ilerler. Penetrasyon hızı her şeyden önce betonun fiziksel özelliklerine bağlıdır. Yüksek kaliteli ve düşük poroziteli betonlarda karbonasyon etkisi çok azdır. Sıcak ve kuru (düşük relatif rutubetli) ortamlarda bulunan betonlarda karbonasyon olayı daha etkilidir.

Ancak penetrasyon hızı en kötü koşullarda bile ortalama 1 mm/yıl'dan daha azdır. Difüzyonla karbonasyon çok uzun bir işlemdir. 1 mm. beton kaplaması yaklaşık 1 yılda karbonatlaşır ve bunun hızı, karbonasyon madde miktarı, CO₂ difüzyon hızı, relatif nem oranı ve havadaki CO₂ oranı gibi birkaç parametre tarafından belirlenir. Beton üzerindeki çatlaklar karbondioksitin hızla ilerlemesine izin verir. [7].



Şekil 4. Korozyon oluşumunda karbonasyon.

Bir korozyonun hasar yapıcı düzeye gelmesi için zaman içinde izlediği yol aşağıdaki şekilde görülmektedir (Şekil 5) [8]. Diğer bazı hasarlarda olduğu gibi korozyonda çeşitli aşamalarında haber vermektedir. Bunun için önemli yapı ve kesitlerde gözlemler yapılması sonucu hasarı önceden önlemek mümkün olabilir. Özellikle çelik köprü, yakıt tankları, silolar ve baraj yapıları gibi yapılar gözetim altında tutularak hasarın önüne geçilebilir.

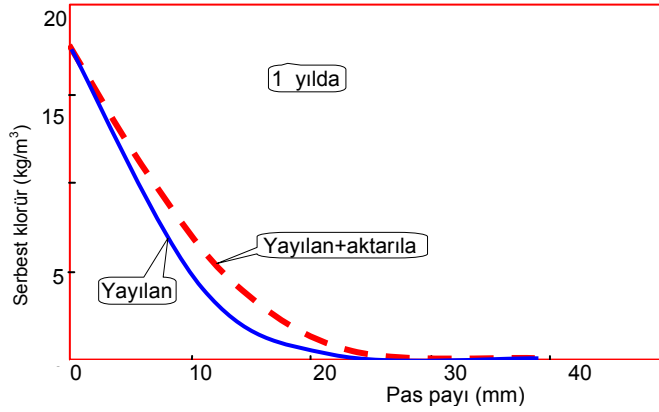


Şekil 5. Korozyonun zaman yolculuğundaki etkisi.

Betonun alkalinitesi, hidrate olmuş çimentonun içerdiği Ca(OH)_2 ile sağlanır ve pH değerini 12 civarında sabitler. Ancak Ca(OH)_2 zamanla havadaki CO_2 ile reaksiyona girerek CaCO_3 'e dönüşür ve pH 8'in altına düşebilir. Dış ortamdaki CO_2 konsantrasyonu, baca ve eksoz gazları ve endüstriyel kirlilik arttıkça karbonasyon oranı artar. Karbonasyon, beton içinde yüzeyden 10 cm'den derinlere kadar ulaşabilen bir bozulmadır [2].

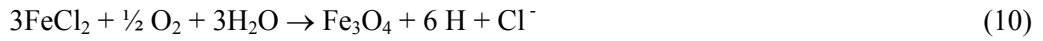
III. KOROZYONDA KLORÜR İYONU

Beton karışımında bulunan doğal kum, çakıl, karışım suyu ve çeşitli katkı maddeleri gibi bileşenler normal halde çok küçük konsantrasyonlarda klorür içerirler. Bu klorür betonarme demirlerinin korozyonuna neden olmaz. Klorür iyonunun zararlı etkisi ancak beton içinde % 0,2 den fazla ($4,5 \text{ kg Cl-/m}^3$) veya 1 m^3 de yaklaşık olarak 0,7-1,2 kg dan fazla klorür bulunması halinde söz konusu olabilir. İkincisi ve pratikte daha sık rastlanani beton sertleştikten sonra çevreden beton içine difüzlenen klorür iyonlarıdır (Şekil 6). Betonarme demirlerinin korozyonu üzerine başlangıçta ve sonradan giren bu klorürlerin etkisi farklıdır. Başlangıçta beton içine giren klorür iyonlarının bir kısmı, çimento hidratasyon reaksiyonu sırasında çimento klinker bileşiklerinden trikalsiyum alüminat ile reaksiyona girerek suda çözünmeyen bir bileşik olan Friedel tuzunu ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCl}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) oluşturur [9]. Böylece klorür iyonunun bir kısmı bağlanmış olur. Bu bağlı klorürün pasifliği bozucu etkisi yoktur. Korozyon üzerinde beton boşluk suyu içinde çözülmüş halde bulunan klorür iyonları etkili olur.



Şekil 6. Klorürün 1 yıl içindeki beton içine difüzyonu grafiği.

Klorür iyonu elektronegativitesi yüksek bir iyondur. Bu nedenle metal yüzeyinde oksijen ve hidroksit iyonlarından daha sağlam şekilde adsorbe edilir. Adsorbe olan bu klorür iyonları korozyon sonucu oluşan demir iyonları ile birleşerek demir klorür halinde çözeltiliye geçer. Böylece metal yüzeyinde $\text{Fe}(\text{OH})_2$ çökmesi ve pasif filmin oluşması önlenmiş olur. Bu bölgede korozyon olayı artık oto katalitik olarak devam eder. Çünkü çözeltili içine giren demir klorür su ve oksijenle birleşerek pası oluştururken, klorür iyonu yeniden çözeltili içine karışır. Aşağıda verilen reaksiyonlardan açıkça görüldüğü üzere klorür iyonu doğrudan korozyon yaratmaz.



Klorür iyonunun çukur korozyonu oluşturması yukarıdaki zincirleme reaksiyonların dar bir bölgede yürümesi sonucu ortaya çıkar. Klorür iyonu ile kirlenmiş betonlar içinde çukur korozyonu olayına sıkça rastlanır. Çevreden beton içine difüzlendi klorür iyonlarının pasif halde bulunan betonarme demirleri üzerindeki pasif tabakayı bozarak korozyona neden olur.

VI. KOROZYON ÇEŞİTLERİ

Oluşum şekli, zamanı ve özelliği bakımından korozyonları aşağıdaki şekildeki gibi sınıflandırmak mümkündür. *Üniform korozyon* (genel korozyon); metal yüzeyinin her noktasında aynı hızla yürüyen korozyon çeşididir. Normal olarak korozyon olayının bu şekilde yürümesi beklenir. Üniform korozyon sonucu metal kalınlığı her noktada aynı derecede incelir. *Çukur korozyonu*; metal yüzeyinin bazı noktalarında çukur oluşturarak meydana gelen korozyon türüdür. Bu tip korozyon olayında anot ve katot bölgeleri birbirinden kesin şekilde ayrılmıştır. Anot, yüzeyin herhangi bir noktasında açılan çukurun içindeki dar bir bölge, katot ise çukurun çevresindeki çok geniş bir alandır. Korozyon sonucu çukur gittikçe büyüyerek metalin o noktadan kısa sürede delinmesine neden olur. Çukur tipi korozyon çok tehlikeli bir korozyondur. *Çatlak korozyonu*; metal yüzeyinde bulunan çatlak, aralık veya cep gibi

çözeltinin durgun halde kaldığı bölgelere oksijen transferi güçleşir. Bunun sonucu olarak bu bölgeler anot, çatlağın çevresindeki metal yüzeyleri katot olur. Çatlak korozyonu yalnız metal yüzeyinde bulunan bir çatlakta değil, metal olmayan bir malzeme ile metal yüzeyi arasında da meydana gelebilir. *Kabuk altı korozyonu*; metal yüzeyinde korozyon türlerinin oluşturduğu veya başka bir nedenle oluşan bir kabuk (birikinti) altında meydana gelen korozyona kabuk altı korozyonu denir [10].

V. KOROZYON HIZINA ETKİ YAPAN FAKTÖRLER

Korozyona etki eden faktörler sayılamayacak kadar çoktur. Çimentonun ham maddesi bile korozyonda etkili parametrelerdendir. Bunlar kısaca aşağıda maddeler halinde açıklanmaktadır.

V. 1. Beton Kalitesi

Beton kalitesi artırılarak betonun içindeki boşluklar azaltılır dolaysı ile de betonarme demirlerinin korozyon hızı azaltır. Betonun permeabilitesi ve porozitesini azaltmak üzere her şeyden önce iyi bir agrega ve uygun bir granülometri seçilmelidir. Bunun dışında aşağıdaki önlemlerin de alınması gerekir.

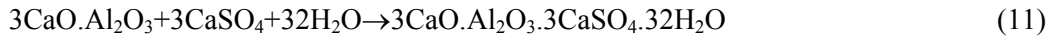
Çimento dozajı: Çimento dozajı artırıldığında beton yoğunluğu artar ve porozitesi azalır. Kullanılan çimento cinsi de önemlidir. Puzolanlı çimentolar, beton boşluklarında bulunan serbest kireci silikat bileşikleri halinde bağliyerek beton boşluklarını doldurur. Böylece beton permeabilitesinde azalma meydana gelir. Ancak puzolanların bu etkisi uzun süre içinde ortaya çıkar. Diğer taraftan puzolanlar serbest kireci bağliyerek beton pH derecesinin düşmesine neden olur. Bu ise, korozyon hızını artırıcı yönde etki gösterir [11].

Su/çimento oranı: Beton karışımı içine bazı özel katkı maddeleri katılarak su/çimento oranı düşük beton yapılabilir. Böylece beton içindeki boşluklar minimuma indirilmiş olur. Çimentonun hidratasyonu için kimyasal olarak gerekli su miktarı % 30 dan daha azdır. Pratikte bu oran genellikle % 40-50 arasında alınır. Fazla su betonun boşluklu olmasına neden olur. Ayrıca beton karışımı içine hava katkı maddesi katılarak beton içindeki boşlukların kapalı hücreler halinde oluşması sağlanabilir. Böylece beton porozitesinin zararlı etkileri azaltılmış olur. Su/çimento oranı 0,40 ve 0,70 olan betonların su ile doygunluk derecesi arttıkça rezistivitelerinin büyük ölçülerde azalmakta olduğu görülmektedir.

“**ACI-2005-R4.1** - Donma - çözünme etkisinde kalan betonlar için gerekli maksimum su-çimento olan 0.40-0.50 aralığını sağlamak, sülfatlı zeminler veya sular, veya donatının korozyonunu önlemek tipik olarak, 35 ile 28 MPa arasında bir f_c' dayanımı gerekmesi durumuna eşdeğerdir. [12].”

V.2. Çimento Cinsi

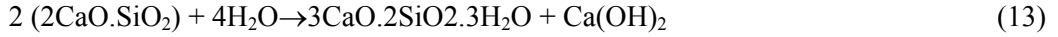
Portland çimento klinkeri içinde ham madde cinsine bağlı olarak değişik oranlarda trikalsiyum alüminat (C3A) bulunur. Bu bileşenin hidrasyon reaksiyonu hızı diğer klinker bileşiklerine göre çok yüksektir. Bu nedenle eğer klinker içine hiç alçı taşı katılmaz ise çimento piriz süresi çok kısaldır. Alçı taşı ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ile klinker içinde bulunan trikalsiyum alüminat arasında aşağıdaki kimyasal reaksiyon olur [1].



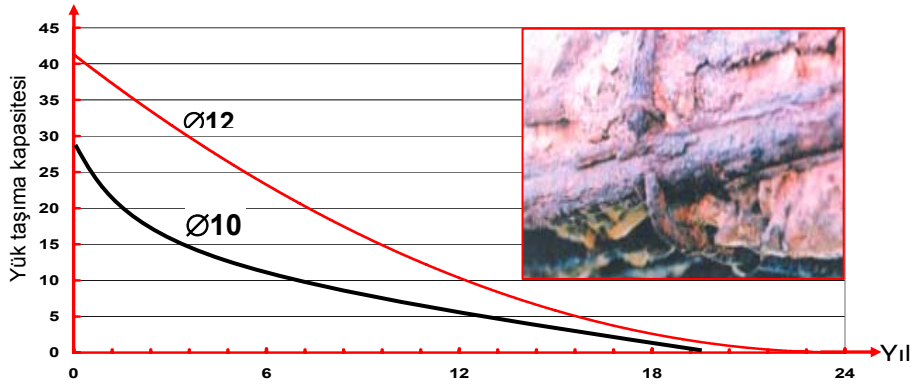
Denk. 7 ile oluşan trikalsiyum sülfalüminat bileşiği (Candlot tuzu) az çözünen bir tuzdur. Bu tuz çimentonun hidrolizi sırasında klinker partiküllerinin yüzeyinde çökerek geçirimsiz bir kabuk oluşturur ve böylece çimento hidrasyon reaksiyonunun yavaşlamasına neden olur.

V.3. Betonun pH

Portland çimentosu ile yapılmış bir betonun boşluklarında bulunan su doygun kireç çözültisi halinde olup, içinde bulunan az miktardaki sodyum ve potasyum hidroksitlerinin de etkisi ile yüksek alkali özelliktedir. Taze betonun pH derecesi 12,5-13,2 arasındadır. Eğer yüksek fırın cürufu veya uçucu kül gibi puzolan katkılı çimentolar kullanılmış ise, beton pH değeri 12 ye kadar düşer. Her iki halde de, eğer klorür iyonu yoksa beton içindeki çelik pasif halde bulunur. Beton pH derecesi ile korozyon arasındaki ilişkide pH derecesinin $10 < \text{pH} < 13$ olduğu bölgelerde betonarme demirlerinin potansiyel değerine bağlı olarak ya bağımsızlık, ya da pasifleşme bölgesinde olduğu görülmektedir. Portland çimentosu ile yapılan betonlarda, çimento içine su katılınca klinker mineralojik bileşikleri su ile reaksiyona girerek kısa sürede hidroliz olurlar. Portland çimentosu klinkerinin temel bileşenleri olan trikalsiyum silikat (Ca_3S) ve dikalsiyum silikatın (Ca_2S) su içindeki hidrasyon reaksiyonları şöyledir:



Bu reaksiyonlar sonucu açığa çıkan kalsiyum hidroksit beton boşluk suyu içinde çözünerek doygun çözelti haline gelir ve taze betonun pH derecesini 12 ye kadar çıkarır. Betonun pH değeri 12'den büyüktür ve bu değer korozyonun oluşmaması için yeterlidir. Ancak, diğer çevresel faktörlerin etkisiyle ortam pH değeri düşmekte ve donatı çeliğinde korozyon oluşmasına neden olabilmektedir. Buna göre, ortam pH değerinin 10 ile 4 arası olması durumunda, korozyon nedeniyle donatı kesit kaybı 0,25 mm/yıl olmaktadır. Örnek olarak, hesap dayanımı 365 MPa olan BÇ IIIb sınıfı Ø10'luk bir donatı çeliği alındığında bu çubuk 28,6 kN (2922 kg) yük taşıyabilmektedir. Bu donatı çubuğu 0,25 mm/yıl oranında korozyona uğradığında kesit azalması nedeniyle taşıyabileceği yük birinci yılda 2,8 kN (285 kg) azalmaktadır. Aynı oranla 10 yıl sonunda taşıyabileceği yük ilk duruma göre 21,5 kN (2190 kg) azalmakta, bu süre sonunda 7,1 kN (723 kg) taşıyabilir hale gelmektedir. 20 yılsonunda ise çelik tamamen çürüyeceği için hiç yük taşıyamaz durumda olacaktır. Benzer şekilde Ø12'luk bir donatı çeliğinin yük taşıma kapasitesinin yıllara göre değişimi Şekil 7 de verilen biçimde gerçekleşebilmektedir. Donatı başlangıçta 41,3 kN yük taşıma kapasitesine sahip iken 5 yıl sonra bu değer 25,9 kN, 15 yıl sonra ise 5,8 kN olabilmektedir. Yapılan kabuller çerçevesinde korozyona uğrayan donatı 24 yıl sonra taşıma kapasitesini tamamen yitirebilecektir [13].



Şekil 7. Korozyon nedeni ile Ø10-12'nin yıllara göre taşıma kapasitesinin.

VI. DEPREM HASARLARINDA KOROZYON TESPİTİ

Deprem Bölgeleri Haritası'na göre, yurdumuzun %92'sinin deprem bölgeleri içerisinde olduğu, nüfusumuzun %95'inin deprem tehlikesi altında yaşadığı ve ayrıca büyük sanayi merkezlerinin %98'i ve barajlarımızın %93'ünün deprem bölgesinde bulunduğu bilinmektedir. Son 58 yıl içerisinde depremlerden, 58,202 vatandaşımız hayatını kaybetmiş, 122,096 kişi yaralanmış ve yaklaşık olarak 411,465 bina yıkılmış veya ağır hasar görmüştür. Bu depremin etkilediği İstanbul'un ilçelerinde korozyon ve beton dayanımı üzerine yapılan incelemelerde Çizelge 2'deki değerler bulunmuştur [13].

Çizelge 2. İncelenen Binalarda belirlenen korozyon hasarı ve beton dayanımı

İlçe	Bina Sayısı	Korozyon Tespit Edilen Bina Sayısı	(%)	Ort. Basınç Dayanımı (N/mm ²)
Avcılar	32	15	47	9.55
Bahçelievler	24	13	54	10.6
Bakırköy	14	6	43	13.8
Büyükçekmece	6	2	33	9.2
Küçükçekmece	10	5	50	8.8
Kadıköy	14	8	57	11.3

Donatıda meydana gelen korozyon sonucu önemli kesit kayıplarının yanında donatı-beton aderansı da zamanla yok olmaktadır. Bunun sonucu bir bütün olarak çalışması gereken donatı ve beton birbirinden farklı davranmaya başlayarak önemli ölçüde taşıma gücü kaybına uğramaktadır. Etriye çapı boyuna donatı çapından küçük olmasından dolayı korozyon sonucu özelliğini kaybederek sargılı olarak boyutlandırılan bir kesit korozyon sonucu kesiti küçülmüş donatısız salt beton davranışı gösterecektir (Şekil 8) [14]. Korozyona uğrayan donatı demirlerinin kesitleri azalır ve mukavemetleri düşer.



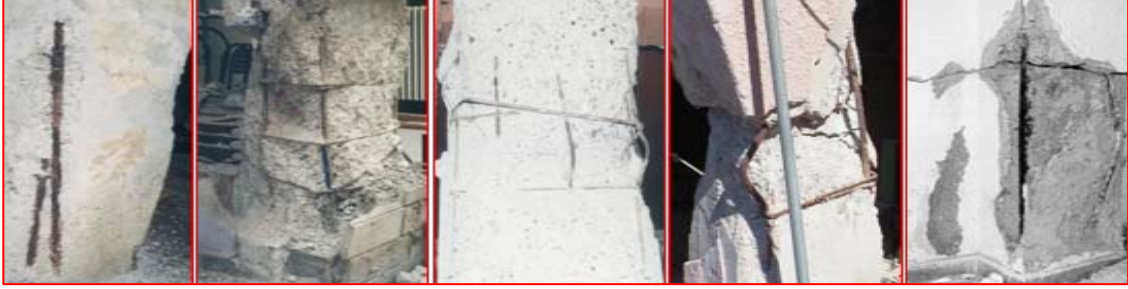
Şekil 8. Korozyona uğramış yapı elemanları

Eskişehir bilinen tarihinde 1956 yılında 6.4 büyüklüğünde bir deprem olmuş ve bir kişi hayatını kaybetmiş ve 2819 bina hasar görmüştür. İzmit depreminden sonra yine merkezi Eskişehir olan büyüklüğü 3-3,2 olan iki deprem olmuştur. Yine 1970 yılında Gediz’de 7,2 ve 5,8 büyüklüğünde olan depremlerden de etkilenmiştir. 17 Ağustos 1999 depreminin Eskişehir’de bir apartman deprem esnasında bir apartmanda depremden sonra kendiliğinden yıkılmıştır. Daha sonra yapılan incelemelerden de 3 apartman valilik tarafından yıkılmıştır (Şekil 9).



Şekil 9. Eskişehir’de yıkılan yapıların dağılımı.

Eskişehir’de 17 Ağustos 1999 deprem hasarlarının incelenmesinde deprem hasarlarında korozyonun etkili olduğu görülmektedir (Şekil 10) [15].



Şekil 10. 1999 İzmit depreminde Eskişehir’de hasar gören yapılardaki korozyonlar.

Mevcut yapı stoku içinde yaygın olarak bulunan ve yapının depreme karşı dayanımı artıran bodrum katta rutubetin yüksek olması, sıva yapılmaması ve bu katın kullanılmaması sonucu korozyon etkisinin büyük olduğu görülmektedir. Bu olumsuzluklar bodrum katı yapı için olumsuz hale getirmektedir. Yönetmelikte (TS500-2000) toprakla temasta olan betonlarda pas payının 50 mm olması temel gibi büyük kesitler için uygun olabilirken kolon gibi küçük kesitli elemanlar için yeterli olamayacağı birçok yapıda açık olarak görülmektedir [16]. Korozyonla ilgili yönetmelik kriterleri aşağıda açıklanmaktadır.

DY (2007) “7.2.4.3 – Bu incelemede, donatısında korozyon gözlenen elemanlar planda işaretlenecek ve bu durum eleman kapasite hesaplarında dikkate alınacaktır” [17]. TS500 (2000). “13.3.1 - Yapıların görünüşünü bozacak veya donatının korozyonuna neden olabilecek genişlikte çatlakların oluşmasına izin verilmemelidir. 4.3 - Donatı çeliği, kullanılmadan önce kir, yağ ve yüzeyden ayrılabilen paslanma temizlenmelidir. 9.5.1 - Donatıya gerekli aderansı sağlamak ve donatıyı dış etkilerden korumak için gerekli net beton örtüsü Çizelge 3 te verilmiştir (en dış donatının dış yüzünden ölçülür). Yangının, paslanmanın ve diğer zararlı dış etkenlerin söz konusu olduğu durumlarda, beton örtüsü gerekli görüldüğü kadar artırılmalıdır”.

Çizelge 3. En Dış Donatının Dış Yüzünden Ölçülen Gerekli Beton Örtüsü [18]

Zeminle doğrudan ilişkide olan elemanlarda	$c_c \geq 50$ mm
Hava koşullarına açık kolon ve kirişlerde	$c_c \geq 25$ mm
Yapı içinde, dış etkilere açık olmayan kolon ve kirişlerde	$c_c \geq 20$ mm
Perde duvar ve döşemelerde	$c_c \geq 15$ mm
Kabuk ve katlanmış plaklarda	$c_c \geq 15$ mm

“**ACI-R7.7.5** - Bunlar; minimum hava miktarı, maksimum su-çimento oranı, normal ve hafif betonlar için minimum dayanımı, betonun içinde maksimum klorür iyonu miktarını ve çimento tipini içerir. Ek olarak, korozyon koruması için, duvarlar ve döşemeler için 50 mm ve diğer elemanlar için 65 mm pas payı önerilir. Fabrika koşulları altında üretilen prefabrik beton elemanlar için sırasıyla minimum 40 ve 50 mm. pas payı önerilir.”

Çizelge 4. EC2 dayanaklılık ile ilgili olarak gereken minimum pas payı, c_{min} , değerleri [19]

	Korozyonun sebebi	Risk Yok	Karbonatlaşma			Klorür	Deniz Suyu
	XC1: Kuru ya da geçici ıslak	XO	XC1	XC2/XC2	XC4	XD1-2-3	XS1-2-3
Pas payı c_{min}	Donatılı Çelik	10	15	25	30	45	45
	Öngermeli çelik	20	25	35	40	55	55

Demirler beton içinde mümkün olduğunca derine (en az 5 cm) konularak korozyonun etkisi azaltılmaya çalışılır. Klorür iyonu üstel bir fonksiyonla gittikçe azalan bir şekilde beton içine penetre olmaktadır. Örneğin su/çimento oranı 0,60 olan bir beton tuzlu su içinde bekletildiğinde, korozyon olayı 50 mm derinlikte yaklaşık olarak 80 günde başladığı halde, 75 mm derinlikteki betonarme demirlerinde korozyon olayının başlaması için en az 380 gün geçmesi gerekmektedir. Bu süreler betonun sürekli olarak su altında bulunması hali içindir. Zaman zaman ıslanan ve kuruyan betonlarda korozyon olayı çok kısa süre içinde başlayabilir (Şekil 11).



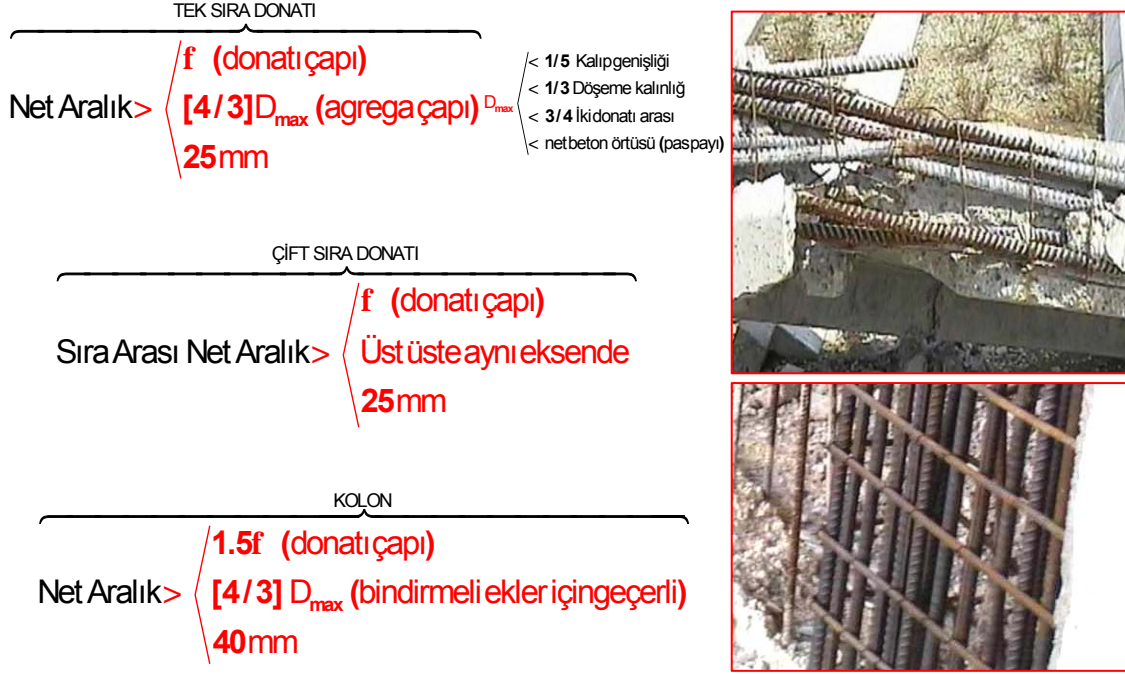
Şekil 11. Pas payı uygulama hataları.

Yapılarda bulunan düzensizliklerden dolayı yapı bir deprem esnasında çeşitli nokta veya bölgelerinde kılcalda olsa kalıcı hasarlar oluşturarak depremi atlattır. Bu çatlaklardan çeşitli birleşenlerin difüzyonu sonucu donatı korozyonu artırmaktadır. Böylece sismik etkinin yüksek olduğu bölgelerin korozyon etkisi de yüksektir. Bu duruma bir de yapının rutubeti yüksek olan deniz kenarında olması, pas payının yetersizliği ve diğer olumsuzluklar eklenirse korozyonun tehlikesi daha da artmaktadır. Özellikle deprem etkisinin yoğun olduğu bölgelerdeki yapılarda düzensizliklerden uzak durmak hem yapıların dayanımına hem de donatının korozyonuna olumlu katkı yapması bakımından önemlidir. Şekil 13'deki yapılar incelendiğinde sismik etkiye gerek kalmadan korozyon etkisi oluşmuştur.

“ACI-R10.6.5 - Belirli bir sayıda çalışmanın yürütülmüş olmasına rağmen, korozyon tehlikesi bulunan durumlar için çatlak genişliğinin ötesinde açık deneysel kanıt bulunmamaktadır. Deneyler; korozyonu önlemekte beton kalitesinin, yeterli sıkışmanın ve yeterli pas payının beton yüzeyindeki çatlakların genişliğinin etkisinden daha fazla önem taşıdığını göstermektedir.” [12].

Dayanımı yüksek bir betonun donatıyı sararak korozyonu önleyen en uygun yöntem olduğu açıktır. Bu nedenle hem korozyon için hem de donatı ile betonun bir aderans oluşturarak yüksek bir taşıma gücü elde etmek için her bir donatının ayrı ayrı betonla kaplanması en uygun çözümdür. Bir bitki kökü için toprak ne ise donatı için de beton odur. Beton yapısındaki farklılıklar ve düzenlemelerden nedeniyle klorür konsantrasyonu da yer yer farklılık gösterir. Bu farklılık iki betonarme demiri arasında konsantrasyon pili oluşmasına ve bunun sonucu olarak korozyon hızının artmasına neden olur. Bu artış aralarında boşluk bulunan yani beton

olmayan donatılarda çok daha hızlı olacağından iki donatı arası kesinlikle belli kalınlıkta beton ile iki donatı arasındaki temas kesilmelidir. TS500’de bu durum için gerekli olan kriterler aşağıdaki gibidir (Şekil 12).



Şekil 12. Donatılar arası mesafe kriterleri.

Yönetmeliklere ve denetlenmelere rağmen bu durum uygulamada yerine getirilmemektedir. Hatta bazı donatılar arasına içinde agrega bulunan beton değil su bile giremez. Vibratörün girmesi ise mümkün gözükmemektedir (Şekil 13).



Şekil 13. Donatılar arası aralık kriterlerinin uygulanmadığı uygulamalar [20]

VII. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan incelemelerden ve literatür çalışmalarından betonarme demirlerinin korozyonunu önlemek için,

- | | | |
|--------------------|---|---|
| BETONARME DONATIDA | { | <ol style="list-style-type: none"> 1.Su (miktarı – kimyası) 2.Çimento (miktarı – kimyası) 3. Agreg (miktarı – boyutu) 4.Su / Çimento oranı 5.Beton ve çelik sınıfı 6. Katkı maddesi (miktarı ve özelliği) 7. Pas payı ve kalıp 8.Donatı düzenleme şekli 9.Aderansı etkilemeyecek şekilde donatı kaplaması 10.Kalıp alma ve kür süresi 11.Yapının bulunduğu deprem, iklim ve sanayi bölgesi 12.Yapıda bulunan düzensizlikler 13.Yapıdaki izolasyon (ısı, su) 14.Yapının kullanım amacı (konut, fabrika, yol) 15.Beton uygulanmasında vibratör kullanımı |
|--------------------|---|---|

aşamalarının her birini bir zincir kabul ederek ayrı ayrı korozyonunun dikkate alınmasıyla mümkün olabileceği görülmektedir. Bu aşamalar takip edildiğinde korozyona dayanıklı yapı depreme dayanıklı yapıya götürmektedir. Unutulmamalıdır ki yapım aşamasında korozyonu önlemek yapının diğer yüklerle dayanımı da beraberinde getirecektir. Beton kalitesinin yüksek

olması (C30-40) hem betonun geçirimsiz olmasını sağlayacak hem de yapının çeşitli yükler altında yapının hasarsız olarak atlatılmasını sağlayacaktır. Ayrıca yönetmeliklerde,

1. Sismik etkinin yüksek olduğu bölgelerde (1. ve 2. derece)
2. Rutubetin yüksek olduğu denizden 0-20-50-100 km iç kısımlarda (tespit sonucu)
3. Deniz seviyesinden belli değerden yüksek olan belli dereceden soğuk bölgelerde
4. Tüm yapıların bodrum kat/katlarında
5. Bunların birkaçının birlikte bulunduğu durumlarda

pas payı, sıva, kaplama, beton ve çelik sınıfına göre bir düzenleme yapılmasının uygun olacağı görülmektedir. Özellikle rutubet dolaysı ile bir pas payı haritası hazırlamak mı gerekir? Antalya ile Eskişehir arasındaki ve bir yüksek katlı yapının bodrum katı ile n. katında rutubetin oldukça farklı olmasına rağmen aynı pas payı kullanılmaktadır. Mevcut yapılarda çevre suları ve bodrum kat rutubeti kalıcı bir şekilde önlenmelidir. Acil sağlık (hastane), haberleşme (PTT), ulaşım (köprü) ve savunma (depo) yapıları özellikle yapımında ve kullanımında periyodik olarak korozyona karşı korunmalıdır.

VIII. KAYNAKLAR

- [1] T. Koç, “*Deprem Bir Başka Boyutu*”, Gazi Üni.Mühendislik Mimarlık Fakültesi,
- [2] <http://www.teknointel.com/makaleler/elektrorestorasyon/betonkorozyon.htm>
- [3] G. Taché, “Application de l’électrochimie à la caractérisation de la corrosion des aciers dans le béton – Généralités. Séminaire Electrochimie et béton armé”, (2001).
- [4] T. Koç, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi.
- [5] A. Sağlamer, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi.
- [6] H. Ün, “Malzeme Bilgisi”, Pamukkale Üniversitesi, Denizli.
- [7] K. Ait Mokhtar, J-M. Loche, H. Friedmann, O. Amiri, A. Ammar, “*Steel corrosion in Reinforced Concrete Report n°2-2 Concrete in marine environment*”, LEPTAB. Université La Rochelle, Av. Michel Crépeau, F 17042 La Rochelle cedex 1 – France.
- [8] N. Han, “Role of NDE in quality control during construction of Concrete infrastructures on the basis of service life design”, *Construction and Building Materials*, 18, 163-172, 2004.

- [9] B. Martin-Pérez, “Service Life Modelling Or R.C. Highway Structures Exposed To Chlorides”, *Thesis, Graduate Department of Civil Engineering*, Un. Toronto, (1999).
- [10] <http://www.angelfire.com/mt/mehmettamirci/korozyon>.
- [11] S. Yıldız, O. Keleştemur, “Farklı Bölgelerde Üretilen PKÇ/B 32,5 R Çimentosunun Betonarme Yapılardaki Donatı Korozyon Potansiyeline Etkisi”, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi.
- [12] Building Code Requirements For Structural Concrete And Commentary (ACI 318m-05), ACI Committee 318, Structural Building Code.
- [13] T. Çoşgun, “İstanbulda Deprem Sonrası Yapılan İncelemelerde Karşılaşılan Korozyon Hasarı Üzerine Bir İnceleme”, İÜ M.F, İnşaat Mühendisliği Bölümü.
- [14] <http://www.kiptas.com.tr/TR/SEHIR/11.asp>.
- [15] M. Doğan, “Effects Of İzmit And Düzce Earthquakes İn Eskişehir”, İTÜ, 2000.
- [16] N. Uğur, “Eskişehir’deki Mevcut Yapıların Depremselliği”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [17] Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik, T.C.B.İ.B, 2007.
- [18] TS500 (2000). Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, TSE, Ankara.
- [19] European Standard, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1: General rules and rules for buildings, October 2001.
- [20] Doğan M., Yapıların Deprem Analizi, ESOGÜ, Y.No:143, ISBN 978-975-7936-52-7.