

Klor İyonu Etkisindeki Betonarme Yapı Elemanlarının Dayanıklılığı İçin Olasılığa Dayalı Tasarım

Özkan ŞENGÜL*

ÖZ

Klor etkisinde kalacak betonarme bir yapının uzun servis ömrüne sahip olması ve bu ömrün belirlenebilmesi için dayanıklılığa göre tasarım gereklidir. Böyle bir tasarımda klor iyonu yayılımı matematiksel bir model ile ifade edilmeli ve parametreler gerçekçi bir şekilde belirlenerek bu modele eklenmelidir. Olasılığa dayalı bir yöntem kullanılarak hem yapının maruz kaldığı çevresel etkiler, hem de yapı özelliklerindeki dağılımlar dikkate alınmalıdır. Bu çalışmanın temel amacı klor iyonu bulunan ortamlarda kalacak yapıların dayanıklılığa (dürabiliteye) göre tasarımıdır. Çalışmada, klor iyonlarının beton içine girişi ve taşınımı Fick'in 2. yasası ile modellendi ve yapı özelliklerindeki ve çevresel etkilerdeki dağılımları Monte Carlo analizi ile dikkate alan basit bir yazılım hazırlandı. Ayrıca, korozyonu önemli oranda etkileyen yapısal parametrelerin dürabiliteye etkileri irdelendi.

Anahtar Kelimeler: Dayanıklılığa dayalı tasarım, Monte Carlo analizi, klor etkisi, korozyon, olasılık.

ABSTRACT

Probabilistic Design for the Durability of Reinforced Concrete Structural Elements Exposed to Chloride Containing Environments

Durability design methods should be carried out in order to obtain long service lives for the structures in chloride containing environments. In such a design, chloride diffusion must be expressed as a mathematical model. The parameters should be determined in a realistic manner and included in this model. The scatter both in the environmental exposure conditions and structural properties should be considered with a probabilistic design. The main objective of this study is the durability design of concrete structures in chloride containing environments. The transport of chlorides into concrete was modeled using Fick's second law of diffusion and a simple software based on Monte Carlo simulation was developed to consider the scatter in the environmental exposure conditions and structural properties. The effects of some important structural parameters affecting durability were investigated.

Keywords: Durability based design, Monte-Carlo analysis, chloride effect, corrosion, probability.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 23.03.2009 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2011 gününe kadar tartışmaya açıktır.

* İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İstanbul - sengulozk@itu.edu.tr

1. GİRİŞ

Oldukça yüksek yatırımlar gerektiren kıyı ve liman yapıları, köprüler ile diğer yapıların servis ömürleri süresince belirli bir güvenlik içerisinde işlevlerini yerine getirmeleri beklenir, ancak dayanıklılığa (dürabiliteye) bağlı sorunlar sonucu yapı performansı zamanla azalabilir. Yapılar servis ömürleri boyunca çeşitli çevresel etkiler altındadır ve yapı tasarımında bunlar gözönüne alınmalıdır. Yurdumuzun 8300 km'lik uzun sahil şeridi boyunca çok sayıda kıyı ve liman yapısı bulunmaktadır. Bunların dışında, deniz suyu etkisinde kalan köprü ayağı gibi çeşitli yapılar da mevcuttur. Sahil şeridine yakın başka yapılar da deniz suyu etkisinde kalmaktadır. Rüzgarlı günlerde deniz suyu damlacıklarının sahilinden 2 km içeriye kadar rüzgarla birlikte taşınabildiği ifade edilmektedir [1]. Kışın kullanılmakta olan buz çözücü tuzlar da yurdumuzdaki köprü veya viyadük gibi yapıların önemli bir bölümünü etkilemektedir. Klor etkisine bağlı olarak başlayan donatı korozyonu betonarme yapılarda karşılaşılan en önemli dürabilite sorunlarından biridir. Korozyon sonucu donatı çaplarında azalma olurken, oluşan korozyon ürünleri beton paspaylarında çatlamaya yol açarak zararlı maddelerin beton içine girişini ve taşınımını artırır [2]. Bunların sonucu olarak yapı güvenliği azalır ve istenilen servis ömrü sağlanamaz. Yaşanan Marmara Depremi yapılarımızdaki dürabilite sorunlarını açıkça ortaya koymuş, depremle birlikte betonarme yapılardaki korozyon çatlakları belirginleşmiştir [3].

Betonarme yapılarda dürabiliteyi etkileyen nedenlerden bir tanesi de yapı özelliklerindeki dağılımdır [4]. Aynı yapı elemanında bile bir noktadan diğer noktaya özellikler farklılık gösterebilir. Kalite kontrol yöntemlerinin yetersiz olması durumunda yapı elemanlarının özelliklerindeki farklılıklar çoğu zaman belirlenemediği için gerekli önlemler de alınmaz [5]. Yapılarda dürabilite sorunlarıyla karşılaşılmamasının temel nedeni yapı tasarımında beton dayanımlarının esas alınması, yeterli basınç dayanımının sağlanması durumunda dürabilitenin de sağlanacağı varsayılmıştır.

Sunulan bu çalışmanın temel amacı klor etkisinde kalacak betonarme yapıların dürabiliteye göre tasarımıdır. Çalışmada, yapı özelliklerindeki ve çevresel etkilerdeki dağılımları da dikkate alan olasılığa dayalı bir yöntem uygulanmıştır. Klor iyonlarının beton içinde taşınımı 2. Fick yasasına göre modellenerek Monte Carlo simülasyonu gerçekleştiren basit bir yazılım da hazırlanmıştır. Ayrıca, çeşitli malzeme ve konstrüktif parametrelerin beton içindeki çelik donatının korozyon olasılığına etkileri değerlendirilmiştir.

2. DÜRABİLİTEYE GÖRE TASARIM

2.1 Mevcut Tasarım Yöntemleri

Ülkemizde yürürlükte olan TS EN 206 [6] standardında veya Amerikan ACI 318 [7] ile İngiliz BS 8500-2 [8] standartlarında yapılarda yeterli dürabilitenin sağlanabilmesi amacıyla yapının içinde bulunduğu çevresel şartlar gözönüne alınarak bazı kriterler verilmektedir. Bunlar; en büyük su/çimento oranı, en düşük çimento dozajı, en düşük beton basınç dayanımı koşullarıdır. Ancak, TS EN 206 veya diğer standartlarda verilen beton bileşim kriterleri minimum değerlerdir ve sadece bu şartları sağlayan bir yapının uzun servis ömrüne sahip olacağını söylemek aşırı iyimserliktir.

Yapılarda dürabilite sorunları yaşanmasının nedenlerinden bir tanesi beton bileşimleri ile ilgili faktörler iken diğer bir neden ise yapı kalitesindeki yetersizliklerdir. Örneğin, yapıda uygulanan paspayı projede öngörülen paspayından daha ince olabilir veya betonun klor geçirimsizliği şartnamede talep edilen değerden daha yüksek olabilir. Yapı özellikleri ve beton karakteristikleri aynı yapıda elemandan elemana, hatta aynı yapı elemanında bile büyük farklılık gösterebilir [4]. TS EN 206 [6] standardında yapı özelliklerindeki bu dağılımlar dikkate alınmamakta, sadece maksimum su/çimento oranı ve minimum çimento dozajı gibi beton bileşimleri yeterli görülmektedir. TS EN 1992-1'de [9] ise bazı paspayı kalınlıkları önerilmekte ve bunların sağlanması durumunda yapının 50 yıllık bir servis ömrüne sahip olacağı belirtilmektedir. Standartlardaki bu tür önceden tanımlanmış bazı kriterler ile uzun servis ömrünün sürekli sağlanacağını kabul etmek her zaman doğru değildir ve mevcut yapılarda karşılaşılan dürabilite sorunları da bunu desteklemektedir [5]. Bu nedenle, yapıların uzun dönemdeki performanslarını belirlemek için kullanılacak başka yöntemlere ihtiyaç vardır [10, 11]. Yapıların dürabiliteye göre tasarımında su/çimento oranı, çimento dozajı gibi beton bileşimlerinin yanında beton paspayı, çeşitli iyonların beton içinde taşınım özellikleri, dürabiliteye bağlı hasar oluşum hızı gibi etkiler ile bunların dağılımlarının da dikkate alınması ve belirlenen sınır durumlarla birlikte değerlendirilmesi gereklidir [12].

2.2 Olasılığa Dayalı Tasarım Yöntemi

Yapı elemanlarının tasarımında, eleman dayanımının (R), yükten (S) daha büyük olması temel şart olarak alınır [13]. Bu ilke dürabilite analizi için de benzer tarzda uygulanabilir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$R(t) > S(t) \quad \text{veya} \quad g = R(t) - S(t) > 0 \quad (1)$$

burada $R(t)$ dayanım değişkenini, $S(t)$ yükleme değişkenini, g ise limit durum fonksiyonunu ifade etmektedir. Yapının dayanım ve dayanıklılık bakımından özellikleri zamanla değiştiği için $R(t)$ ve $S(t)$ zamana bağlı parametreler olarak alınır. Bunlara bağlı olarak göçme olasılığı (P_f) zamanın fonksiyonu olarak şu şekilde hesaplanabilir.

$$P_f = P[R - S < 0] \quad \text{veya} \quad P_f(t) = P[R(t) < S(t)] \quad (2)$$

Betonarme yapıların dürabilitesi bakımından ele alındığında $R(t)$ dayanım değişkeni zamanla azalabilir. Örneğin, beton içindeki donatıda korozyon başlayıp ilerledikçe, donatı çapında azalma meydana gelir, oluşan korozyon ürünlerinin hacmi daha fazla olduğu için paspayında çatlamlar oluşur, ayrıca beton ile donatı arasındaki aderans da azalır. Bunların sonucunda yapı elemanının yük taşıma kapasitesinde zamanla azalma meydana gelir [14]. $S(t)$ yükleme değişkeni ise sabit kalabilir veya zamanla bir miktar artabilir. $R(t)$ dayanım değişkeninin zamanla azaldığı, ancak $S(t)$ yükleme değişkeni değişmediği için $P_f(t)$ göçme olasılığı zamanla artacaktır [12].

Yapıların güvenilirliğini belirlemek için olasılığa dayalı çeşitli yöntemler mevcuttur [15-17]. Bu yöntemlerden Monte Carlo analizi birçok parametreyi birlikte değerlendirmeye imkan verdiğinden dürabiliteye göre tasarım için kolaylıkla uygulanabilir. Monte Carlo Analizi

istatistiksel bir simülasyon yöntemi olarak tanımlanabilir ve rastgele sayı üretimi esasına dayanır. Bu analizde, rastgele seçilen değerler g limit durum fonksiyonuna yerleştirilerek bu eşitliğin sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir [16]. Ancak limit fonksiyonda kullanılan bu rastgele değerler birer olasılık dağılım fonksiyonu olarak tanımlı olmalıdır. Monte Carlo analizinde, bu olasılık fonksiyonlarına bağlı olarak rastgele seçilen değerler kullanılarak limit fonksiyonu çözülür. Olasılık değeri elde edebilmek için ise yeterli sayıda iterasyon gereklidir. Bir iterasyonda her bir parametre için; ortalama ve standart sapma ile belirlenmiş olan olasılık dağılım fonksiyonlarına bağlı olarak rastgele birer değer seçilir ve limit fonksiyonda yerine konular. Yani iterasyon, aynı denklemin farklı değerler kullanılarak tekrarlı olarak çözülmesidir.

Monte Carlo analizine göre elde edilen $P_f(t)$ göçme olasılığı, g limit durum fonksiyonunu sağlamayan iterasyonların sayısının, yani göçme durumu ile sonuçlanan iterasyonların sayısının, yürütülen toplam iterasyon sayısına oranıdır. Bu olasılık aşağıdaki gibi ifade edilebilir [17].

$$P_f = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N I[g(r_i, s_i)] \quad (3)$$

Burada N yürütülen toplam iterasyon sayısını, $I[g(r_i, s_i)]$ ise göçme ($r < s$ durumu) ile sonuçlanan iterasyonların toplam sayısını ifade etmektedir. Monte Carlo yöntemiyle güvenilir sonuç elde edebilmek için çok sayıda iterasyon, yani aynı denklemin tekrarlı hesabı gerektiği için bu işlemi bilgisayar yazılımıyla yapmak gereklidir. Betonda klor etkisi durumu için parametreler ve limit durum fonksiyonu ise aşağıda açıklanmaktadır.

3. BETONDA KLOR ETKİSİ

Betona etkiyen klorun çeşitli kaynakları olabilir. Örneğin agrega, çimento veya katkı maddeleri gibi betonda kullanılan malzemelerde klor bulunabilir. İlgili standart ve şartnamelerde beton bileşen malzemelerinde bulunabilecek klor miktarları için sınırlamalar bulunmaktadır. Deniz suyu etkisinde kalan yapılarda veya buz çözücü tuzların kullanıldığı bölgelerde ise dış kaynaklı klor etkisi mevcuttur. Dışarıdan betona etki eden klorun konsantrasyonu, kullanılan malzemelerden dolayı betonda mevcut klor miktarından genellikle çok daha yüksektir, bu nedenle korozyona çoğunlukla bu serbest klor yol açar. Klor iyonlarının beton içinde taşınımı farklı mekanizmalarla oluşur. Örneğin bir liman yapısında, deniz suyu altında kalan kısımlarda klorun beton içinde taşınmasında difüzyon etkili olurken, tekrarlı ıslanma – kurumanın olduğu dalga veya çarpıntı bölgesinde kılcallık mekanizması da söz konusudur [14]. Beton içindeki klor iyonu yayılımının (difüzyonunun) belirlenmesi için konsantrasyon-mesafe ilişkisi elde edilmelidir. Bu amaçla yüzeyden farklı derinliklerde elde edilen numunelerde klor iyonu konsantrasyonları belirlenerek klor profilleri çıkartılır. Betondaki klor konsantrasyonu beton kalitesine ve çevresel şartlara bağlıdır. Klor iyonu konsantrasyonu yüzeyde en yüksektir, ancak yüzeyden itibaren artan derinlikle birlikte bu konsantrasyon azalır [18].

3.1 Klor Difüzyonunun Modellenmesi

Betonda klor iyonu yayılımını modellemek için çeşitli modeller bulunmaktadır [19]. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan 2. Fick yasası aşağıda verilmektedir [20].

$$C(x,t) = C_S \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_C t}} \right) \right] \quad (4)$$

burada, $C_{(x,t)}$ belirli bir zaman ve derinlik için betondaki klor konsantrasyonunu, C_S yüzeydeki klor konsantrasyonunu, erf hata fonksiyonunu, x betonun yüzeyden içeri doğru derinliği, D_C klor yayılım katsayısını, ve t ise zamanı ifade etmektedir.

Klor yayılım katsayısı D_C zamana bağlı bir parametredir ve aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

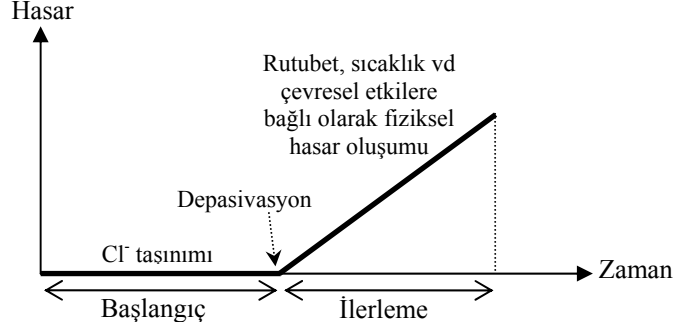
$$D_C = D_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^\alpha \quad (5)$$

Bu bağıntıda D_0 değeri t_0 anındaki klor iyonu yayılım katsayısı, α ise bu katsayının zamanla değişimini belirlemek üzere kabul edilen bir sayıdır.

3.2 Sınır Durumları

Dürabilite analizinde servis ömrünün sona ermesine yol açan bir sınır durum kabul edilmeli ve tanımlanmalıdır. Kullanılabilirlik sınır durumu veya taşıma gücü sınır durumu gibi farklı sınır durumları olabilir. Kullanılabilirlik sınır durumu, korozyon başlangıcı veya paspayının çatlamaya başlaması gibi ekonomik kayıpların başladığı durum olarak kabul edilir. Taşıma gücü sınır durumu ise yapı elemanının göçtüğü veya taşıma kapasitesinin büyük oranda kayb olduğu aşamadır [21]. Korozyona uğrayan betonarme bir yapı elemanındaki hasarın zamanla değişimi şematik olarak Şekil 1'de gösterilmektedir [22]. Korozyon hasarı iki aşamalı olarak kabul edilebilir. İlk aşamada yapı elemanında fiziksel bir hasar yoktur. Ancak, bu evrede klor betonun yüzeyinden içeriye doğru yayılır. Başlangıç evresi olarak isimlendirilen bu aşamanın sonunda donatının bulunduğu derinlikte klor iyonu konsantrasyonu kritik değere erişir ve pasivasyon sona erer (depasivasyon). Bu noktadan itibaren donatıda korozyon başladığı kabul edilebilir, yapı elemanında çatlama ve diğer fiziksel hasarlar görülmeye başlanır ve bu hasarların miktarı zamanla artar. Şekil 1'deki eğrinin eğiminin artması hasar hızının arttığını gösterir. İlerleme aşaması olarak bilinen bu aşamada hasarın derecesi belli bir seviyeye ulaştığında yapı elemanının taşıma gücünü kaybettiği kabul edilebilir. Ancak, söz konusu kritik hasar derecesini tüm yapılar veya yapı elemanları için genellemek mümkün değildir, örneğin kiriş, kolon veya perde gibi yapı elemanları için farklı oranlar söz konusudur. Sadece bir tür yapı elemanı dikkate alınsa, örneğin sadece kolonlar gözönüne alınsa bile, bunların donatı oranları ve yerleşimleri, üzerindeki yükler önemli değişiklikler gösterir. Bu nedenlerle, hangi donatı kesit kaybında

taşıma gücünün sona erdiği, yapının taşıyıcı sistemine ve yükleme koşullarına göre değişir ve ancak yapı taşıyıcı sisteminin bir bütün olarak modellenmesiyle belirlenebilir.



Şekil 1. Beton içindeki donatının korozyonu durumunda yapı elemanında oluşan hasar

Yeni inşa edilen bir yapı için; donatının bulunduğu derinlikteki klor iyonu konsantrasyonu kritik klor konsantrasyona ulaştığında kullanılabilirlik sınır durumuna erişildiği kabul etmek mümkündür [4, 19]. Çünkü, bu noktadan sonra bakım ve onarım maliyetleri önemli derecede artar, yapı güvenliği azalmaya başlar. Ayrıca bu noktanın belirlenmesi nispeten kolaydır, klor iyonu derinliklerinin donatıya ulaşip ulaşmadığı kontrol edilerek ve elektrokimyasal yöntemlerle yapı elemanının korozyon bakımından mevcut durumu açıkça ortaya çıkartılabilir [23].

3.3 Korozyon Olasılığının Belirlenmesi

Bu çalışmada dürabilite analizi için iki kabul yapılmıştır; i) yeni inşa edilecek bir yapı için korozyon başlangıcı kullanılabilirlik sınır durumudur, ii) bu sınır durumuna ulaşma olasılığı ise servis ömrünü tanımlar. Klor etkisine bağlı olarak pasivasyon tabakası hasar gördükten sonra korozyonun başlaması çeşitli faktörlere bağlı olarak birkaç yıl veya daha kısa bir süre gerekir. Bu çalışmada ise donatının bulunduğu derinlikte kritik klor iyonu konsantrasyonuna ulaşıldığında depasivasyonun meydana geldiği ve korozyonun başladığı kabulü yapılmıştır. Bu durumda klor etkisi altında hasar olasılığı, yani donatının korozyona başlaması olasılığı için limit durum fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir:

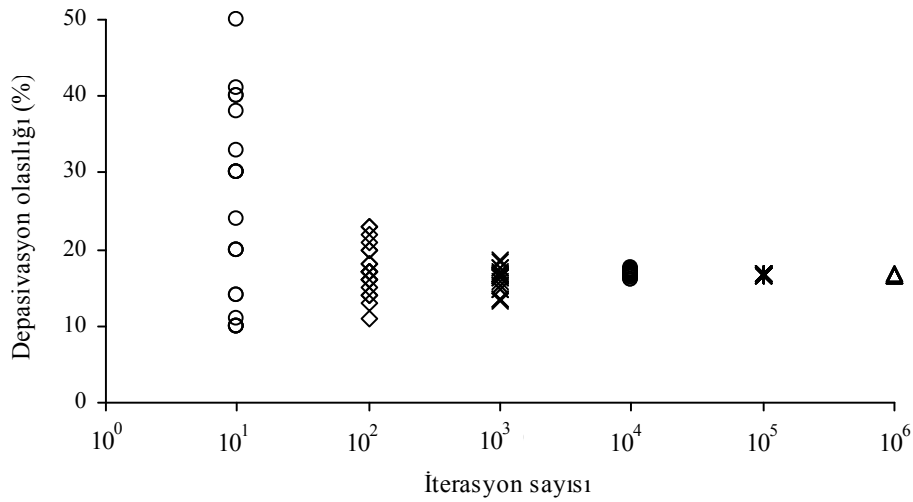
$$P_f = P(C(x,t) \geq C_{cr}) \quad (6)$$

Bu denklemde, P_f korozyon olasılığı, $C(x,t)$ donatı derinliğindeki ve t zamanındaki klor iyonu konsantrasyonu, ve C_{cr} depasivasyona yol açan kritik klor iyonu konsantrasyonudur.

Bu çalışmada korozyon olasılığını (P_f) belirlemek için Monte Carlo yöntemi kullanıldı. Monte Carlo yöntemin aynı denklemin tekrarlı olarak çözülmesi ve sonuçların bir sınır değerle karşılaştırılması esasına dayanır. Bu amaçla, önce Denklem 4'deki parametreler (C_s yüzeydeki klor konsantrasyonu, x betonun yüzeyden içeri doğru derinliği, D_c klor yayılım

katsayısı) için, ayrı ayrı belirlenmiş olasılık dağılım fonksiyonları temel alınarak, hazırlanan yazılım ile rastgele değerler olarak belirlendi. Ardından bu rastgele değerler kullanılarak hesaplanan klor konsantrasyonu ile kritik klor konsantrasyonu karşılaştırıldı (Denklem 6). Çok sayıda yapılan iterasyonlar ile elde edilen sonuçlar ile Denklem 3'e göre depasivasyon olasılığı elde edildi.

Monte Carlo yönteminde güvenilir sonuçlar alabilmek için yeterli sayıda iterasyon gereklidir. Bu amaçla; iterasyon sayısının depasivasyon olasılığına etkisini belirlemek için analizler yapılmış ve elde edilen sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu simülasyonlarda tüm parametreler aynı tutularak sadece iterasyon sayısı değiştirilmiştir. Her bir iterasyon sayısı için 20'şer adet simülasyon yapılarak elde edilen sonuçların dağılımı değerlendirilmiştir.



Şekil 2. İterasyon sayısının depasivasyon olasılığına etkisi

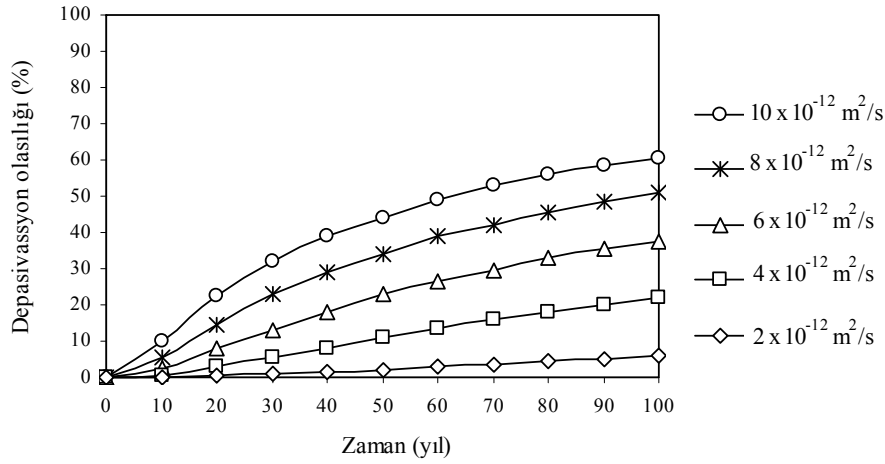
Şekil 2'de gösterildiği gibi iterasyon sayısı arttıkça sonuçların dağılımı azalmaktadır. Örneğin, iterasyonun sayısının 10 olarak alınması durumunda elde edilen varyasyon katsayısı % 52 iken bu sayı 1000, 10,000 ve 100,000 olduğunda varyasyon katsayıları sırası ile %10, % 2,4 ve % 0,6 olmaktadır. İterasyon sayısı arttıkça sonuçlardaki dağılımın azalarak sabit bir değere yaklaşması, elde edilen sonucun çok daha güvenilir olduğunu göstermektedir. Örneğin 1 milyon adet iterasyon yapıldığında varyasyon katsayısı % 0,2 gibi çok düşük bir değer olmaktadır. İterasyon sayısının artırılması sonuçlardaki dağılımı azaltmakla birlikte sonuçların elde edilmesi süresini de uzatmaktadır. Elde edilen sonuçlardan, iterasyon sayısının en az 10,000 olması gerektiği sonucuna varılabilir. Bu çalışmada ise %0,6 varyasyon katsayısı ile hem güvenilir sonuç verdiği, hem de işlem süresi nispeten çok uzun olmadığı için iterasyon sayısı 100,000 adet olarak seçilmiş ve aşağıda verilen tüm sonuçlar bu iterasyon sayısı kullanılarak elde edilmiştir.

Ele alınan bazı örnek durumlar için çeşitli parametrelerin donatı depasivasyon olasılıklarına etkileri aşağıda verilmektedir. Çalışmada ele alınan tüm parametrelerin olasılık dağılım fonksiyonlarının normal dağılıma uyduğu, ortalama ve standart sapma ile ifade edilebildikleri kabul edilmiştir. Söz konusu parametrelere ait deneysel sonuçların bulunması ve bunların gerçek olasılık dağılım fonksiyonlarının bilinmesi durumunda yukarıda belirtilen tasarım yönteminde bu gerçek dağılım değerleri kullanılabilir. Ancak bu parametreler konusunda yeterli veri yoksa bunların normal dağılıma uyduğunun kabul edilmesi yeni inşa edilecek bir yapı için yeterli bir yaklaşım sağlar.

4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1 Klor Yayınım Katsayısının Etkisi

Klor yayılım katsayısının depasivasyon olasılığına etkisi Şekil 3'de verilmektedir. Bu simülasyonlarda ortalama paspayı 50 mm, beton yüzeyindeki ortalama klor konsantrasyonu % 4 ve kritik klor konsantrasyonu ortalama % 1 olarak sabit alınmış ancak klor yayılım katsayısı olarak $2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ile $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ arasında değişen farklı değerler seçilmiştir. Tüm bu parametrelerin standart sapmaları ise % 10 olarak alınmıştır.



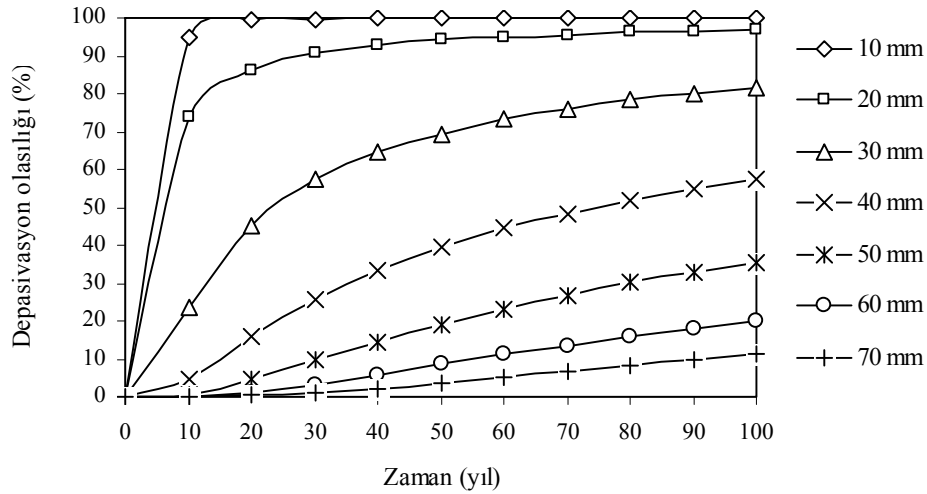
Şekil 3. Klor yayılım katsayısının depasivasyon olasılığına etkisi

Şekil 3'de gösterildiği gibi klor yayılım katsayısı arttıkça, seçilen belirli bir zaman için depasivasyon olasılığı da artmaktadır. Betonda klor iyonu taşınımını ifade eden yayılım katsayısı klor etkisindeki yapının servis ömrünü belirleyen etkenlerin başında gelmektedir [24]. Şekil 3'den görüldüğü gibi diğer tüm parametreler aynı olduğu halde yayılım katsayısındaki artışlar depasivasyon olasılığını önemli derecede arttırmakta, yani belirli bir süre zarfında donatının korozyona uğramasını hızlandırmakta ve hasar oluşma süresini kısaltarak yapının servis ömrünü kısaltmaktadır. Yayılım katsayısının yüksek olması, klor iyonlarının beton içinde daha hızlı ilerlediklerini ifade eder [19]. Aynı bir paspayı kalınlığı için beton kalitesi arttıkça klorun donatıya ulaşması için geçecek süre artacaktır. Uzun

servis ömrüne sahip bir yapı elde edebilmek için klor yayılım katsayısı mümkün olduğunca düşük, yani kalitesi yüksek bir beton kullanılması gerektiği yukarıdaki simülasyon sonuçlarıyla bir kere daha ortaya konulmaktadır. Su/çimento oranı, çimento türü, puzolan kullanımı, hidrasyon derecesi gibi etkenler klor yayılım katsayısını etkiler [25-27]. Paspayının kalitesinin artırılması, yani yayılım katsayısının azaltılması için betonun kürüne de gerekli özen gösterilmelidir.

4.2 Paspayının Etkisi

Betonarme bir yapıdaki paspayı kalınlığının donatıdaki depasivasyon olasılığına etkisini incelemek amacıyla yapılan simülasyonda, klor yayılım katsayısı ortalama $6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, diğer parametreler ise 4.1'deki gibi seçilmiş, sadece paspayı kalınlığı için farklı değerler kullanılmıştır. Bu değerlerle elde edilen sonuçlar Şekil 4'de verilmektedir.



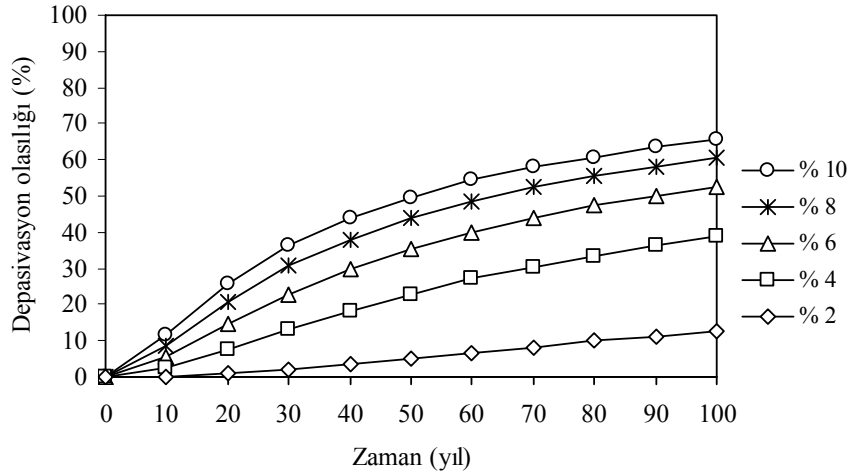
Şekil 4. Paspayı kalınlığının depasivasyon olasılığına etkisi

Donatıyı örten paspayının kalınlığı arttıkça, seçilen bir depasivasyon olasılığına ulaşma süresi de beklendiği gibi uzamaktadır. Örneğin depasivasyon olasılığı için üst sınırın % 10 olarak kabul edilmesi halinde, paspayı 10 mm ila 30 mm arasında iken bu olasılığa ilk birkaç yıl içinde ulaşılmaktadır. Ancak paspayı 50 mm olarak seçildiğinde bu süre yaklaşık 30 yıl olarak, 70 mm seçildiğinde ise yaklaşık 90 yıl gibi bir süre gerekmektedir. Klor etkisine bağlı olarak korozyonun başlayabilmesi için çevresel etkilerden kaynaklanan klorun yüzeyden içeri doğru taşınımı ve beton paspayını geçerek donatıya ulaşması gereklidir [18, 24]. Bu nedenle paspayı özellikleri yapı servis ömrünü doğrudan etkileyen faktörlerden bir tanesidir [28]. Şekil 4'den de görüldüğü gibi paspayı arttıkça klorun donatıya ulaşması için gerekli süre uzar, buna bağlı olarak da yapının servis ömrü artar. Ancak, uzun servis ömrüne sahip yapılar elde edebilmek için paspayı kalınlığının

arttırılmasının yanında paspayının kalitesi, yani Şekil 3’de gösterildiği gibi geçirimsizliği de dikkate alınmalı ve düşük geçirimsizliğe sahip, çatlak içermeyen bir paspayı elde edebilmek için kür koşulları gibi çeşitli etkenlere de özen gösterilmez. Paspayında çatlak bulunması halinde klorun beton yüzeyinden içeriye taşınımı çok hızlı bir şekilde meydana gelir, böylece herhangi bir zamanda, çatlağın olduğu kısımdaki klor konsantrasyonu, çatlak olmayan diğer bölgelere göre çok daha yüksek olur. Çatlaklı kısımdaki bu yüksek klor konsantrasyonu sonucu ise buralarda korozyon çok daha kısa sürede meydana gelir. Ayrıca, bu çatlaklardan başka zararlı etkilerin ve suyun taşınımı da hızla gerçekleştiğinden bu etkiler betona çok daha kolay bir şekilde zarar verebilir.

4.3 Yüzey Klor Konsantrasyonunun Etkisi

Beton yüzeyindeki klor konsantrasyonunun depasivasyon olasılığına etkisini incelemek amacıyla beton özellikleri yukarıdakilerle aynı alınmış ancak yüzey klor konsantrasyonuna %2 ila %10 arasında değerler verilerek depasivasyon olasılıkları belirlenmiştir. Sonuçlar Şekil 5’de gösterilmektedir.



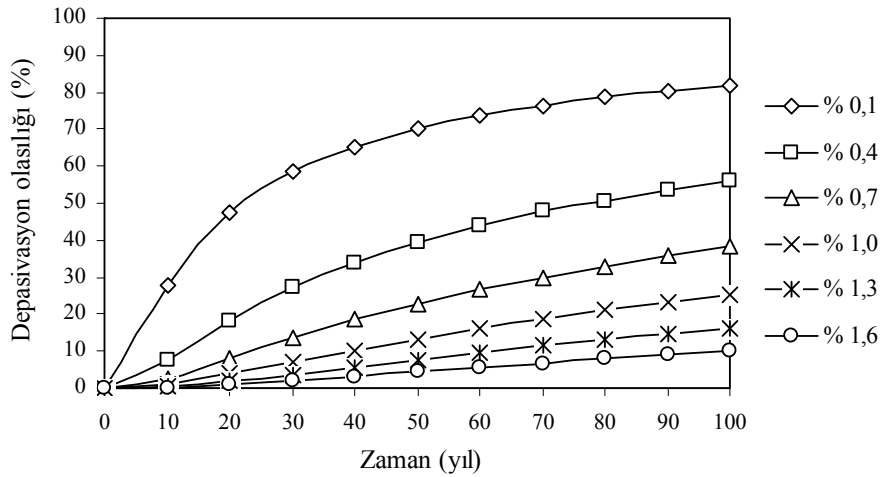
Şekil 5. Yüzey klor konsantrasyonunun depasivasyon olasılığına etkisi

Yukarıdaki şekilden görüldüğü gibi beton yüzeyindeki klor konsantrasyonu yükseldikçe belirli bir zaman için depasivasyon olasılığı da artmaktadır. Örneğin, yüzey klor konsantrasyonu % 2 iken 50 yıldaki depasivasyon olasılığı % 5, konsantrasyon % 6'ya yükseldiğinde ise bu olasılık yaklaşık %35'e ulaşmaktadır. Yüzeydeki konsantrasyonun yükselmesi betonun dış kısmı ile daha iç kısımlardaki konsantrasyon farkını arttırdığı için klorun beton içinde yayılımını artacaktır [24]. Böylece kritik klor konsantrasyonunun aşılması da daha kolay gerçekleşir. Yüzey klor konsantrasyonu betonun klor etkisinde kaldığı sürenin bir göstergesidir. Bu değer zamana bağlı bir parametredir ve suyun tuzluluk oranı, beton yüzeyinin boşluk oranı ile ıslanma – kuruma çevrimlerinin süreleri gibi çeşitli

etkenlere bağlıdır [29]. Yüzey klor konsantrasyonu yapı elemanın içinde bulunduğu yerel koşullara göre de önemli farklılıklar gösterebilir. Örneğin deniz suyu etkisindeki köprü ve viyadük ayaklarında, beton yüzeyindeki klor konsantrasyonu deniz suyu seviyesinde en yüksek iken, köprü ayağının daha yüksek noktalarındaki yüzey klor konsantrasyonları azalmaktadır. Sürekli deniz suyuyla ıslanma – kuruma etkisinde kalan yapı bölümlerinde de klorun birikmesine bağlı olarak yüzey klor konsantrasyonu daha yüksektir [30]. Yeni inşa edilecek yapılarda yüzey klor konsantrasyonu olarak komşu yapılardan elde edilen konsantrasyonlar kullanılabilir. Eğer böyle bir bilgi mevcut değilse benzer iklim ve çevresel koşullara sahip yapılardan elde edilen sonuçları kullanmak da mümkündür.

4.4 Kritik Klor Konsantrasyonunun Etkisi

Şekil 6 kritik klor iyonu konsantrasyonunun depasivasyon olasılığına etkisini göstermektedir. Bu sonuçlar yukarıda özellikleri verilen beton kullanılarak elde edilmiş ancak farklı kritik klor iyonu konsantrasyonları kullanılmıştır.



Şekil 6. Kritik klor konsantrasyonunun depasivasyon olasılığına etkisi

Yukarıdaki şekilden de görüldüğü gibi kritik klor konsantrasyonu arttıkça depasivasyon olasılığı azalmaktadır. Bu çalışmada depasivasyon olasılıkları donatı derinliğindeki klor konsantrasyonunun kritik klor konsantrasyonu ile karşılaştırılarak belirlenmiştir. Kritik konsantrasyon azaldıkça, hesapla belirlenen klor konsantrasyonların bu kritik değerden yüksek olması olasılığı da artar. Kritik klor konsantrasyonu su/çimento oranı, çimento türü, puzolanik malzemeler, kullanılan donatı çeliğinin türü gibi çeşitli etkenlere bağlıdır [31-34]. Korozyon için ortamda su ve oksijen olması gereklidir ve bunlardan bir tanesi eksik olduğunda korozyon meydana gelmez. Eğer betondaki rutubet çok düşük veya çok yüksek ise korozyonu başlatmak için gerekli kritik klor konsantrasyonu çok daha yüksek olacaktır [35].

5. GENEL SONUÇLAR

Yapıların dürabiliteye göre tasarımında yapı özellikleri ile yapının içinde bulunduğu çevresel koşullar ayrıntılı olarak irdelenmelidir. Bu bilgilerin kullanılmasıyla yapıda oluşacak hasarın modellenmesi ve yapı servis ömrünün tahmin edilmesi mümkün olur. Yapı özelliklerinde ve çevresel etkilerde bazı dağılımlar görüldüğü için dürabiliteye göre tasarımda bu dağılımları da dikkate alan olasılığa dayalı bir yöntem uygulanmalıdır. Böyle bir dürabilite tasarımı, istenilen performansın elde edilmesi için kullanılan yapısal tasarım metodları ile aynı temel ilkelere dayanır. Bu çalışmada 2.Fick yasası kullanılarak klor iyonlarının beton içinde yayılımı modellenmiştir. Yapı özelliklerindeki ve çevresel etkilerdeki dağılımları dikkate almak için olasılığa dayalı bir yöntem olan Monte Carlo analizi kullanılmış ve bu amaçla bir yazılım da hazırlanmıştır. Sunulan bu çalışmada çeşitli kabuller yapılmıştır. Örneğin, donatının bulunduğu derinlikte kritik klor konsantrasyonuna ulaşıldığında korozyonun başladığı ve klor taşınımının sadece yayılım yoluyla gerçekleştiği kabul edilmiştir. Çalışmada, klor iyonu yayılımını etkileyen parametrelerin depasivasyon olasılıklarına etkileri bazı örnek durumlar için incelenmiştir.

Elde edilen sonuçlar klor yayılım modelindeki parametrelerin önemini ortaya koymaktadır. Monte Carlo yöntemiyle güvenilir sonuçlar alabilmek için iterasyon sayısı yeterince yüksek olmalıdır ve bu çalışmada iterasyon sayısı en az 10,000 olarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar betonun klor yayılım katsayısının önemini açıkça göstermektedir. Simülasyon sonuçlarından görüldüğü gibi paspayının kalitesi ve kalınlığı donatının depasivasyon olasılığını önemli derecede etkilemektedir. Beton yüzeyindeki klor konsantrasyonunun artması depasivasyon olasılığını arttıran bir faktördür. Kritik klor konsantrasyonunun azalması ise depasivasyonu kolaylaştırmaktadır. Elde edilen sonuçlardan görüldüğü gibi zamanın artmasıyla birlikte depasivasyon olasılıkları beklendiği gibi artmaktadır. Klor beton yüzeyinden içeriye doğru zamanla yayılır ve donatı derinliğindeki klor konsantrasyonu kritik bir değeri aştığında depasivasyonun oluştuğu kabul edilebilir. Yüzeyden belirli bir derinlikteki klor konsantrasyonu zamanla arttığı için depasivasyon olasılığı da zamanla artar. Bu çalışma aynı bir beton ve aynı çevresel etkiler temel alınarak yapılmıştır. Ancak, farklı beton özelliklerinin seçilmesi durumunda da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Özellikleri farklı betonlar kullanıldığında, yani klor geçirimsizlikleri düşük ve yüksek betonlar karşılaştırıldığında, aynı bir zaman için, geçirimsizliği düşük olan betonun korozyon olasılığı daha düşük olmaktadır. Söz konusu betonun daha zararlı bir ortamda olduğu, yani içinde bulunduğu ortamdaki klor konsantrasyonunun daha yüksek olduğu durumda ise korozyon olasılığı artmaktadır.

Bir yapının servis ömrü yapı özelliklerinin veya taşıma gücünün belirlenmiş bir sınır durumuna ulaşma süresi olarak tarif edilebilir [36]. Örneğin, bir endüstriyel zemin betonundaki aşınma veya bir döşemedeki aşırı sehim servis ömrünün sona ermesine neden olur. Yukarıda da belirtildiği gibi yeni inşa edilen bir yapı için depasivasyon olasılığının kullanılabilirlik sınır durumuna eşit olduğu kabul edilebilir. Bu yöntem mevcut yapıların dürabilite performanslarını değerlendirmek amacıyla da kullanılabilir [37]. Mevcut yapıdan elde edilecek klor yayılım katsayısı, paspayı, yüzey klor konsantrasyonu gibi özellikler kullanılarak donatının korozyon olasılığı elde edilerek yarı hücre potansiyeli ve elektriksel direnç gibi elektrokimyasal yöntemlerle birlikte yapının durumu değerlendirilebilir.

Yeni inşa edilecek bir yapının dürabiliteye göre tasarımında bu parametrelerin gerçekçi bir şekilde seçilmesi güvenilir sonuçlar elde edebilmek için oldukça önemlidir. Dürabiliteye

göre tasarımda temel olarak ele alınan uygun bir beton bileşimi ile paspayı kalınlığının belirlenmesidir. Ancak, seçilen beton özellikleri istenen servis ömrünü sağlayamadığı takdirde bazı ilave koruyucu önlemlere gidilebilir. Düşük yayılım katsayısına sahip, istenilen özelliklerde bir beton için kür koşullarına gerekli önem verilmeli ve çatlak içermeyen bir paspayı elde edilmelidir. Yapım sürecinde ise yapıdan elde edilen beton özellikleri kullanılarak yapının tasarım aşamasında belirlenen durumuna göre farklılıklar da belirlenebilir. Olasılığa dayalı dürabilite tasarımı için kullanılan parametreler hakkındaki bilgiler henüz yeterli değildir ve çeşitli kabüller yapılmaktadır ancak uzun süreli deneylerle elde edilen bilgiler arttıkça dürabiliteye göre tasarım yöntemi yaygınlaşacaktır.

Semboller

C	: betondaki klor konsantrasyonu
C_S	: yüzeydeki klor konsantrasyonu
C_{cr}	: kritik klor konsantrasyonu
D_C	: klor yayılım katsayısı
D_0	: t_0 anındaki klor yayılım katsayısı
erf	: hata fonksiyonu
g	: limit durum fonksiyonu
$I[g(r_i, s_i)]$: gösterge fonksiyonu
N	: toplam simülasyon sayısı
P_f	: göçme olasılığı
R	: dayanım
$R(t)$: dayanım değişkeni
S	: yük
$S(t)$: yük değişkeni
t	: zaman
x	: beton paspayı
α	: yayılım katsayısının zamanla değişim katsayısı

Kaynaklar

- [1] Neville, A.M., Properties of Concrete, Pearson Prentice Hall, Essex, 2004.
- [2] Broomfield, J.P., Corrosion of Steel in Concrete, E & FN Spon, London, 1997.
- [3] Taşdemir, M.A., Özkul, M.H. ve Atahan, H.N. Türkiye'deki Son Depremler ve Beton, II. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu, Adana, 9-20, 1999.
- [4] Gjörv, O.E., Durability Design and Construction Quality of Concrete Structures, Fourth International Conference on Concrete Under Severe Conditions – Environment and Loading, Seoul, Korea, 44-55, 2004.

- [5] Gjörv, O.E., Durability of Concrete Structures and Performance-Based Quality Control, International Conference on Performance of Construction Materials in the New Millennium, Cairo, 10 s, 2003.
- [6] TS EN 206, Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, 2004.
- [7] ACI Committee 318, ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2008.
- [8] BS 8500-2, Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1 – Part 2: Specification for Constituent Materials and Concrete, 2006.
- [9] TS EN 1992-1-1, Eurocode 2: Beton Yapıların Projelendirilmesi: Bölüm 1-1: Genel Kurallar ve Bina Kuralları. Türk Standartları Enstitüsü, 2005.
- [10] Cather, B. and Marsh, B., Service Life of Concrete Structures – Current and Emerging Approaches, International Seminar on the Management of Concrete Structures for Long Term Serviceability, Sheffield, 21-32, 1997.
- [11] ACI Committee 365, ACI 365 Service Life Prediction - State of the Art Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2000.
- [12] ISO 13823, General Principles on the Design of Structures for Durability, International Organization for Standardization, 2008.
- [13] TS 500, Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, 2000 (Tadil 2002).
- [14] Mehta, P.K., Concrete in the Marine Environment, Elsevier Applied Science, Essex, 1991.
- [15] ISO 2394, General Principles on Reliability for Structures, International Organization for Standardization, 1998.
- [16] Hammersley, J.M. and Handscomb, D.C., Monte Carlo Methods, Methuen & Co Ltd, London, 1975.
- [17] Haugen, E.B., Probabilistic Mechanical Design, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1980.
- [18] Neville, A.M., Chloride Attack of Reinforced Concrete: An Overview, Materials and Structures, 28, 63 – 70, 1995.
- [19] Poulsen, E. and Mejlbro, L., Diffusion of Chloride in Concrete. Taylor and Francis, London, 2006.
- [20] Collepardi, M., Marcialis, A. and Turriziani, R., Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes. Journal of American Ceramic Society, 55, 534-535, 1972.
- [21] Melchers, R.E., Structural Reliability – Analysis and Prediction. Ellis Horwood Limited, West Sussex, 1987.
- [22] Tuutti, K., Corrosion of Steel in Concrete. Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982.

- [23] Mays, G., *Durability of Concrete Structures – Investigation, Repair, Protection*. E&FN Spon, 1992.
- [24] Bamforth, P.B. and Price, W.F., *Factors Influencing Chloride Ingress into Marine Concretes*, International Conference - Concrete 2000, University of Dundee, Scotland, 1105 – 1118, 1993.
- [25] Thomas M.D.A. and Bamforth, P.B., *Modelling Chloride Diffusion in Concrete – Effect of Fly Ash and Slag*. *Cement and Concrete Research*, 29, 487-495, 1999.
- [26] Zhang, M.H., Bilodeau, A., Malhotra, V.M., Kim, K.S., and Kim, J.C., *Concrete Incorporating Supplementary Cementing Materials: Effect on Compressive Strength and Resistance to Chloride Ion Penetration*. *ACI Materials Journal*, 96, 181-189, 1999.
- [27] Sengul, O. and Gjörv, O.E. *Effect of Binder System on the Resistance of Concrete against Chloride Penetration*. 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete, Tokyo, 330-335, 2008.
- [28] Song, Y.P., Song, L.Y. and Zhao, G.F., *Factors Affecting Corrosion and Approaches for Improving Durability of Ocean Reinforced Concrete Structures*. *Ocean Engineering*, 31, 779–789, 2004.
- [29] Ann, K.Y., Ahn, J.H. and Ryou, J.S., *The Importance of Chloride Content at the Concrete Surface in Assessing the Time to Corrosion of Steel in Concrete Structures*. *Construction and Building Materials*, 23, 239–245, 2009.
- [30] Fluge, F., *Marine chlorides – A Probabilistic Approach to Derive Provisions to EN 206-1*. Workshop on Service Life Design of Concrete Structures, Tromso, 48-68, 2001.
- [31] Glass, G.K. and Buenfeld, N.R. *The Presentation of the Chloride Threshold Level for Corrosion of Steel in Concrete*. *Corrosion Science*, 39, 1001 – 1013, 1997.
- [32] Polder, R.B. and Rooij, M.R. *Durability of Marine Concrete Structures – Field Investigations and Modelling*. *Heron*, 50, 133-153, 2005.
- [33] Bamforth, P.B., *The Derivation of Input Data for Modelling Chloride Ingress from Eight-Year Coastal Exposure Trials*. *Magazine of Concrete Research*, 51, 87-96, 1999.
- [34] Mangat, P.S. and Molloy, B.T., *Prediction of Long-Term Chloride Concentration in Concrete*. *Materials and Structures*, 27, 338-346, 1994.
- [35] Page, C.L. and Page, M.M., *Durability of Concrete and Cement Composites*. Woodhead Publishing, Cambridge, 2007.
- [36] Helland, S., *Service Life of Concrete Offshore Structures*. *Structural Concrete*, 2, 121–125, 2001.
- [37] Stewart, M.G. and Rosowsky, D.V., *Time-Dependent Reliability of Deteriorating Reinforced Concrete Bridge Decks*. *Structural Safety*, 20, 91-109, 1998.