

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEN ÇİMENTOLU MALZEMELERDE  
LİF İLAVESİ VE TUZLU SU KÜRÜ ETKİSİ**

**BURAK BULUT**

**KOCAELİ 2025**

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEN ÇİMENTOLU MALZEMELERDE  
LİF İLAVESİ VE TUZLU SU KÜRÜ ETKİSİ**

**BURAK BULUT**

**Prof.Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ**  
Danışman, Kocaeli Üniv.

.....

**Doç.Dr. Fatih ÖZALP**  
Jüri Üyesi, İstanbul Medeniyet Üniv.

.....

**Dr. Öğr. Üyesi Adnan ÖNER**  
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

.....

**Tezin Savunulduğu Tarih: 30.01.2025**

## ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ

Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez/proje çalışmada,

- Bu tezin/projenin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu,
- Çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı,
- Bu çalışma kapsamında elde edilen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi,
- Bu çalışmanın Kocaeli Üniversitesi'nin abone olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun olduğunu,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Tezin/Projenin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez/proje çalışması olarak sunmadığımı,

beyan ederim.

Bu tez/proje çalışmasının herhangi bir aşaması hiçbir kurum/kuruluş tarafından maddî/alt yapı desteği ile desteklenmemiştir.

Bu tez/proje çalışması kapsamında üretilen veri ve bilgiler ..... tarafından ..... no'lu proje kapsamında maddî/altyapı desteği alınarak gerçekleştirilmiştir.

Burak BULUT

## YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI

Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından onaylanan lisansüstü tezimin/projemin tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullarla kullanıma açma izninin Kocaeli Üniversitesi'ne verdiğimi beyan ederim. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak, tezimin/projemin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanımı bana ait olacaktır.

Tezin/projenin kendi özgün çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin/projenin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Tezimde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim kurulu tarafından yayınlanan “*Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge*” kapsamında tezim aşağıda belirtilen koşullar haricinde YÖK Ulusal Tez Merkezi/ Kocaeli Üniversitesi Kütüphaneleri Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

- Enstitü yönetim kurulu kararı ile tezimin/projemin erişime açılması mezuniyet tarihinden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.
- Enstitü yönetim kurulugerekçelikerarıiletezimin/projeminerişimeaçılması mezuniyet tarihinden itibaren 6 ay ertelenmiştir.
- Tezim/projem ile ilgili gizlilik kararı verilmemiştir.

Burak BULUT

## ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemeleri Bilim Dalı'nda, tez süresince bana çalışma olanağı sağlayan ve her türlü desteğiyle yanımda olan, değerli bilgi ve tecrübelerini paylaşan tez danışmanım Prof. Dr. Burcu AKÇAY ALDANMAZ'a, Tez sırasında yardımını esirgemeyen tezimin sonuca ulaşmasında büyük desteğini gördüğüm deney arkadaşım İnşaat Mühendisi Simge TÜRKMEN'e ve deney sırasında yaptığı yardımlardan dolayı Hasan Can KAYIKÇI'ya, Sevgi, destek ve fedakârlık ile bana her zaman kuvvet veren eşim Ebru BULUT'a Amacım doğrultusunda beni her zaman destekleyen, yetiştiren ve güvenen, çok değerli annem ve babama, Malzeme temini için Xypex Topsit A.Ş., Nuh Çimento A.Ş.ve Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'ye teşekkürü bir borç bilirim. Tezimi 2024 yılı içerisinde dünyaya gelen canım oğlum Kutay BULUT'a adıyorum. Saygılarımla.

Ocak-2025

Burak BULUT

## İÇİNDEKİLER

ETİK BEYAN VE ARAŞTIRMA FONU DESTEĞİ.....	i
YAYIMLAMA VE FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI.....	ii
ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
TABLolar DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT.....	ix
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Beton.....	3
1.2. Betonun Tarihçesi.....	4
1.3. Betonun Dayanımı.....	5
1.4. Betonun Geçirimsizliği.....	7
1.5. Betonda Çatlak Oluşumu.....	9
1.5.1. Oturma Çatlakları.....	10
1.5.2. Plastik Rötne Çatlakları.....	12
1.5.3. Kısıtlanmış Rötne.....	13
1.5.4. Kuruma Rötresi Çatlakları ve Beton Yüzeyindeki Suyun Buharlaşması.....	15
1.6. Deniz Suyu ve Tuzlu Sudaki Betonların Davranışları.....	16
1.7. Betonda Çatlakların Kendiliğinden İyileştirilmesi.....	17
2. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER.....	22
2.1. Çimento.....	22
2.2. Agrega.....	22
2.3. Akışkanlaştırıcı Katkı.....	22
2.4. Kristal Oluşturan Katkı.....	23
2.5. Sentetik Mikro Lif.....	23
3. DENEYSEL YÖNTEMLER.....	24
3.1. Karışımın Özellikleri.....	24
3.2. Yayılma Tablası Deneyi.....	24
3.3. Çatlak Kapanma Kabiliyeti.....	26
3.4. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri.....	27
3.5. Kılcal Su Geçirimsizliği Deneyi.....	28
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	29
4.1. Yayılma Tablası Deneyi.....	29
4.2. Çatlak Kapanma Kabiliyeti.....	29
4.3. Basınç ve Eğilme Dayanımı.....	35
4.4. Kılcal Su Geçirimsizliği Deneyi.....	35
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	37
KAYNAKLAR.....	39
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	43
ÖZGEÇMİŞ.....	44

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 3.1.	Standart RILEM Karıştırıcısı .....	26
Şekil 3.2.	Yayıma Tablası Görüntüsü .....	26
Şekil 3.3.	Karışımların Kalıplara Yerleştirilmesi .....	27
Şekil 4.1.	Tuzlu Suda Kristal Oluşturan Katkı İçeren ve İçermeyen Harçların Kılcal Yolla Su Emme Derinlikleri .....	37
Şekil 4.2.	Kristal Oluşturan Katkı, İçeren ve İçermeyen Harçların Kılcal Yolla Su Emme Derinlikleri .....	37



## TABLolar DİZİNİ

Tablo 1.1.	Çatlakların Zamana Göre Oluşumu.....	9
Tablo 2.1.	Kullanılan Çimentonun Özellikleri.....	22
Tablo 2.2.	Kullanılan Agreganın Özellikleri.....	22
Tablo 2.3.	Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesinin Özellikleri .....	23
Tablo 2.4.	Kullanılan Kristal Oluşturan Katkının Kimyasal İçeriği.....	23
Tablo 2.5.	Kullanılan Mikro Lifin Teknik Özellikleri.....	24
Tablo 3.1.	Harç Karışımında Kullanılan Malzemenin Miktarları.....	25
Tablo 3.2.	Farklı Özelliklerde Oluşturulan Çatlak Serilerinin İsmlendirilmesi ve Çatlak Özellikleri.....	28
Tablo 4.1.	Kristal Oluşturan Katkı İçeren ve İçermeyen Dar-Geniş Çatlaklı Örnekler .....	32
Tablo 4.2.	Tuzlu Suda Kristal Oluşturan Katkı İçeren ve İçermeyen Dar-Geniş Çatlaklı Örnekler.....	34
Tablo 4.3.	Mikro Lifli Kristal Oluşturan Katkı İçeren ve İçermeyen Dar-Geniş Çatlaklı Örnekler.....	35
Tablo 4.4.	Çatlak Genişliği ile Çatlak Kapanma Oranı Arasındaki İlişki .....	36
Tablo 4.5.	Basınç ve Eğilme Değerleri.....	38

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

°C	: Santigrat
µm	: Mikrometre

### Kısaltmalar

ACI	: American Concrete Institute (Amerikan Beton Enstitüsü)
ASTM	: American Society, for Testing and Materials, (Amerikan Deney ve Materyaller, Birliği)
CH	: Kalsiyum Hidroksit
C-S-H	: Kalsiyum Silikat Hidrate
EN	: European Norm (Avrupa Standartları)
RILEM	: Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages (Uluslararası Laboratuvarlar ve Yapı Malzemeleri Sistem ve Yapı Uzmanları Birliği)
S/Ç	: Beton su/çimento oranı
TS	: Türk Standartları

# KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞEN ÇİMENTOLU MALZEMELERDE LİF İLAVESİ VE TUZLU SU KÜRÜ ETKİSİ

## ÖZET

Betonun çekme dayanımı ve çekme birim deformasyon kapasitesi oldukça düşüktür. Betonun çatlak oluşmasına ve dayanım kaybına neden olan bu zayıf özelliğini iyileştirmek için içerisine çeşitli malzemelerden üretilmiş lifler katılmaktadır. Betonda lif kullanımı, betonun çekme dayanımının yanı sıra enerji emme kapasitesini ve tokluğunu da artırır. Liflerin betondaki yük taşıma kapasitesi çatlak sonrası davranışta başlar. İlk çatlak oluşuktan sonra beton matrisinde rastgele dağılmış olan lifler köprülenme mekanizması ile çatlağın ilerlemesini önler. Bu durumda ilk çatlağın oluşmasına lifin etkisi olmaması nedeniyle betonun dayanım ve dayanıklılık parametrelerinde farklılıklar olabilir. Oluşabilecek mikro çatlaklar dayanım kaybına neden oldukları gibi beton geçirimsizliğine olan olumsuz etkileri sonucu durabilite problemleri ile de betona zarar vermektedir. Bu olumsuz etkileri sınırlandırmak veya ortadan kaldırmak için beton içerisine üretim esnasında veya üretim sonrasında kendiliğinden iyileşme olarak adlandırılan çatlak kapatma kapasitesine sahip katkı maddeleri eklenebilmektedir. Ayrıca tuzlu su ortamlarında bulunan betonarme yapılarda korozyon riski bulunmaktadır. Oluşacak bu korozyon, betonun dayanımını ve yapının servis ömrünü azaltabilir. Uygun beton karışım tasarımı, kaliteli malzeme seçimi ve katkı maddeleri ile tuzlu su ortamlarında bulunan betonarme yapıların korozyonları engellenebilir. Katkı maddeleri kullanılırken çatlak kapatma kapasitesi, dayanım geri kazandırma yeteneği, geçirimsizlik sağlama kapasitesi gibi parametreler göz önünde bulundurulmaktadır. Bu tezde çimentolu malzemelerin kendiliğinden iyileşme özelliğine lif ilavesinin ve tuzlu suda kür edilmenin etkileri incelenmesi ile dayanım ve dayanıklılık açısından tercih edilebilir bir karışım belirlenmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Dayanım, Kendiliğinden İyileşme, Kristal Oluşturan Katkı, Lif, Tuzlu Su.

## **EFFECT OF FIBER ADDITION AND SALINE WATER CURING IN SELF-HEALING CEMENTITIOUS MATERIALS**

### **ABSTRACT**

The tensile strength and tensile strain capacity of concrete are quite low. In order to improve this weak feature of concrete, which causes crack formation and loss of strength, fibers made of various materials are added to it. The use of fibers in concrete increases the energy absorption capacity and toughness of concrete as well as the tensile strength. The load-carrying capacity of fibers in concrete starts with the post-crack behavior. After the first crack occurs, the fibers randomly distributed in the concrete matrix prevent the crack from progressing with the bridging mechanism. In this case, since not every type of fiber has an effect on the formation of the first crack, there may be differences in the strength and durability parameters of the concrete. The microcracks that may occur cause loss of strength and damage the concrete with durability problems because of their negative effects on the impermeability of the concrete. In order to limit or eliminate these negative effects, it is possible to use additives with crack-closing capacity which are identified as self-healing to the concrete during or after production. In addition, there is a risk of corrosion in reinforced concrete structures located in saltwater environments. This corrosion that will occur can reduce the strength of the concrete also service life of the buildings. Corrosion of reinforced concrete structures located in saltwater environments can be prevented with appropriate concrete mixture design, quality material selection and additives. When using additives, parameters such as crack-closing capacity, strength-restoring ability, and impermeability capacity are taken into consideration. In this thesis, the effects of fiber addition and curing in saline water on self-healing capacity of cementitious materials were investigated and preferable mixture was tried to be determined in terms of strength and durability.

**Keywords:** Strength, Self-healing, Crystal Forming Admixture, Fiber, Saltwater.

## 1. GİRİŞ

Beton, modern inşaat sektörünün vazgeçilmez bir yapı malzemesi olarak, yüksek basınç dayanımı, kolay şekillendirilebilirlik ve ekonomik olma gibi özellikleriyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Hearn, 1998; Mehta ve Monteiro, 2014). Bununla birlikte, betonun gevrek yapısı ve düşük çekme dayanımı, çatlak oluşumuna zemin hazırlamaktadır. Çatlak oluşumu, yalnızca mekanik performansı olumsuz etkilemekle kalmaz, aynı zamanda betonun geçirgenliğini artırarak su, klorür iyonları ve diğer zararlı maddelerin beton içerisine nüfuz etmesine neden olur. Bu durum, çeliğin korozyonunu hızlandırır, dayanıklılığı azaltır ve yapıların ömrünü kısaltır (Wang ve diğ., 2014a; De Belie, 2016). Özellikle çevresel koşullara maruz kalan betonarme yapılarda çatlakların giderilmesi, zaman ve maliyet açısından büyük zorluklar doğurmaktadır. Bu bağlamda, son yıllarda betonun kendiliğinden iyileşme potansiyeli üzerine yapılan araştırmalar artış göstermiştir. Kendi kendini iyileştirme teknolojileri, çatlakların beton tarafından doğal olarak kapatılmasını sağlayarak hem çevresel hem de ekonomik faydalar sunmaktadır (Jonkers, 2007; Rathore, 2021). Bu iyileşme mekanizmaları genellikle otojen iyileşme, ek çimentolu malzemelerle iyileştirme ve kristal katkı maddelerinin kullanımı olmak üzere üç ana kategoriye ayrılmaktadır (Cuenca ve diğ., 2021; Huang ve diğ., 2022). Betonun kendi kendini iyileştirme kapasitesinin temel kaynağı, çimento hidrasyon reaksiyonlarının tamamlanmamış olmasıdır. Hidrate olmamış çimento partikülleri, su ile reaksiyona girerek çatlakların kademeli olarak kapanmasını sağlayabilir (Hearn, 1998; Huang ve diğ., 2022). Bunun yanı sıra, ortamdan alınan karbondioksitin kalsiyum hidroksit (CH) ile reaksiyona girmesi sonucu kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) oluşumu da çatlakların doldurulmasına katkıda bulunur (Wang ve diğ., 2014a). Bu doğal süreçler, betonun mikro çatlaklarını kısmen kapatarak geçirgenliği azaltır ve dayanıklılığı artırır. Ancak otojen iyileşme genellikle yalnızca 0.2-0.3 mm genişliğindeki çatlaklar üzerinde etkili olabilmektedir (Huang ve diğ., 2022).

Kristalize katkı maddeleri, çimento esaslı malzemelerde çatlak kapanma potansiyelini artırmak için kullanılan en etkili yöntemlerden biridir (Almusallam, 2003). Bu katkılar, beton içerisindeki su ve serbest kalsiyum iyonları ile reaksiyona girerek mikro çatlaklar ve kılcal kanallar üzerinde çözünmeyen kristaller oluşturur (De Belie, 2016).

Kristalize katkılar, özellikle suya maruz kalan ortamlarda betonun kendiliğinden iyileşme kapasitesini önemli ölçüde artırır (Zhang ve diğ., 2020).

Araştırmalar, kristal katkıların çatlak genişliği 0.5 mm'ye kadar olan çatlakları etkin bir şekilde kapatabildiğini göstermiştir (Huang ve diğ., 2022; Cuenca ve diğ., 2021). Kristal katkı maddeleri aynı zamanda betonun kılcal su emme oranını düşürerek betonun su geçirimsizliğini artırır. Bu durum, betonun hem donma-çözülme döngülerine karşı dayanıklılığını hem de klorür iyonlarının penetrasyonuna karşı direncini artırmaktadır (Wang ve diğ., 2014b; Jonkers, 2007). Örneğin, Almusallam, (2003), tarafından yapılan çalışmalarda, kristal katkı içeren betonların tuzlu su ortamlarında daha iyi performans gösterdiği ve korozyona karşı direncinin arttığı rapor edilmiştir.

Mikro lif katkılarının kullanımı, betonun mekanik özelliklerini artırmanın yanı sıra çatlakların oluşumunu sınırlamak için de etkili bir yöntemdir (Rathore, 2021). Lif katkıları, betonun çatlak genişliğini sınırlayarak kendiliğinden iyileşme mekanizmalarının daha etkili bir şekilde çalışmasına olanak sağlar. Özellikle polipropilen ve çelik liflerin kullanımı, çatlak genişliğini 0.1-0.2 mm ile sınırlandırarak kristal katkıları ve otojen iyileşme süreçleri ile sinerjik bir etki oluşturur (De Belie, 2016; Cuenca ve diğ., 2021).

Huang ve diğerleri (2022) tarafından yapılan bir çalışmada, mikro lif katkılı betonların kristal katkılarıyla modifiye edilmesi durumunda çatlak kapanma oranının %30 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Özellikle tuzlu su ortamlarında kür edilen lif katkılı betonlarda dayanım ve çatlak kapanma performansı daha belirgin bir şekilde artmıştır. Bu, çevresel etkilere maruz kalan yapıların servis ömrünü uzatmak için önemli bir avantaj sağlamaktadır (Zhang ve diğ., 2020). Çevresel koşullar, betonun kendiliğinden iyileşme mekanizmaları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Örneğin, yüksek nem oranı ve sürekli su teması hem otojen iyileşme hem de kristal katkı maddelerinin etkinliğini artırmaktadır (Jonkers, 2007; Rathore, 2021). Tuzlu su ortamlarında ise klorür iyonlarının varlığı, iyileşme süreçlerini hem olumlu hem de olumsuz etkileyebilir. Cuenca ve diğerleri (2021) tuzlu su kür havuzlarında kristal katkılı betonların iyileşme performansının normal su ortamlarına göre daha iyi olduğunu ancak korozyon riskinin artırılabilirliğini belirtmiştir. Kristal katkıları ve lif katkıları, betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmenin yanı sıra çatlakların kendiliğinden iyileştirilmesi konusunda önemli bir potansiyele sahiptir.

Bu teknolojiler, yalnızca betonun servis ömrünü uzatmakla kalmaz, aynı zamanda bakım maliyetlerini azaltarak çevresel ve ekonomik faydalar sunar. Gelecekte, bu malzemelerin maliyet etkinliği ve performanslarının daha fazla araştırılması, beton teknolojisindeki yeniliklerin uygulanabilirliğini artıracaktır.

### **1.1. Beton**

Beton; su, çimento ve agreganın belirli oranlarda birleştirilmesiyle elde edilen, başlangıçta şekillendirilebilen ve zamanla sertleşerek yüksek dayanım ve taşıma kapasitesine ulaşan bir kompozit malzemedir. Diğer bir ifadeyle, beton, yapay bir taş olarak tanımlanabilir ve modern yapı malzemeleri arasında en yaygın kullanılanıdır (Akman, 1997). Betonun temel işlevi, yapıların ana taşıyıcı elemanı olarak görev yapmaktır. Bu nedenle, betonun sadece dayanım özellikleri değil, aynı zamanda işlenebilirlik, dayanıklılık ve uzun ömürlülük gibi performans kriterleri de büyük öneme sahiptir (Mehta ve Monteiro, 2014). Betonun ana bileşenleri olan çimento, su, agrega ve isteğe bağlı olarak eklenen katkı maddeleri, malzemenin özelliklerini belirleyen temel unsurlardır. Çimento ve suyun birleşimiyle oluşan çimento hamuru, betondaki bağlayıcı fazı oluşturur ve kum-çakıl gibi agrega tanelerinin yüzeylerini kaplayarak bunları birbirine bağlayan bir yapı sağlar (Bazant, 1994). Çimento hamuru ayrıca, agrega taneleri arasındaki boşlukları doldurarak betonun homojen ve sıkışık bir yapı kazanmasına olanak tanır. Bu süreç, çimento hamurunun hem bağlayıcılık hem de boşluk doldurucu olarak işlev görmesi sayesinde gerçekleşir (Neville, 2022).

Beton, çimento ile suyun reaksiyona girmesi sonucu hidrasyon adı verilen bir kimyasal sürece dayanır. Bu süreçte, çimento hidrasyon ürünleri olarak bilinen kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidroksit (CH) oluşur. Bu ürünler, betonun dayanımını ve dayanıklılığını artırarak onu monolitik bir malzeme haline getirir (Ersoy, 2001). Hidrasyon reaksiyonu, betonun dayanım kazanması açısından kritik öneme sahiptir ve bu süreç, genellikle çevresel faktörlere, özellikle sıcaklık ve nem oranına bağlıdır (Hearn, 1998).

Betonun dayanım özellikleri, kullanılan agreganın tipi ve boyutuna, çimento hamurunun kalitesine ve su/çimento oranına doğrudan bağlıdır. Düşük su/çimento oranı, betonun mekanik özelliklerini artırırken, işlenebilirliği düşürür (Mehta ve Monteiro, 2014).

Öte yandan, uygun oranlarda katkı maddeleri kullanılarak hem işlenebilirlik hem de dayanım özellikleri optimize edilebilir (Neville, 2022). Özellikle süper akışkanlaştırıcılar ve mikrosilika gibi katkı maddeleri, yüksek performanslı betonların geliştirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bazant ve Planas, 2019).

Betonun avantajları arasında ekonomik oluşu, yerinde üretilebilmesi ve yüksek basınç dayanımına sahip olması sayılabilir. Bununla birlikte, betonun çekme dayanımının düşük olması ve çatlak oluşumuna yatkınlığı, bu malzemenin en önemli dezavantajlarından biridir (Huang ve diğ., 2022). Bu nedenle, çatlak oluşumunu minimize etmek ve betonun uzun vadeli performansını artırmak amacıyla lif katkıları, polimer modifikasyonları ve kristal katkıları gibi yenilikçi teknolojiler giderek artan bir şekilde kullanılmaktadır (Rathore, 2021).

## **1.2. Betonun Tarihçesi**

Betonun kökeni, insanlık tarihinin eski çağlarına kadar uzanmaktadır. İlk olarak MÖ 3000’lerde kireç bazlı bağlayıcılar, eski Mısırlılar tarafından yapı inşasında kullanılmıştır. Bu dönemde kireç ve alçı esaslı harçlar, piramitlerin yapımında kullanılan taş blokların birleştirilmesinde önemli bir rol oynamıştır. Daha sonra Yunanlılar ve Romalılar, bağlayıcı malzemelerin özelliklerini geliştirmiş ve özellikle Romalılar, volkanik kül (pozzolan) ile kireç karışımını kullanarak hidrolik bağlayıcılar elde etmiştir. Bu karışım, Roma betonunun temelini oluşturmuş ve su kemerleri, Pantheon gibi anıtsal yapılar ve liman projelerinde başarıyla uygulanmıştır. Roma betonu, dayanıklılığı ve su altı yapılarda bile sağlam performans göstermesiyle beton teknolojisinin ilk başarılı örneklerinden biri olmuştur (Neville, 2022; Mehta ve Monteiro, 2014). Modern betonun gelişimi, 19. yüzyılda İngiliz inşaat ustası Joseph Aspdin’in 1824 yılında Portland çimentosunu icat etmesiyle başlamıştır. Aspdin, kireçtaşı ve kili yüksek sıcaklıklarda pişirerek ince bir toz haline getirmiş ve bu yeni bağlayıcıyı “Portland çimentosu” olarak adlandırmıştır. Adı, İngiltere’nin Portland adasındaki doğal taşlara olan benzerliğinden gelmektedir. Aspdin’in bu buluşu, modern beton üretiminin temel taşlarından biri olmuş ve çimento esaslı bağlayıcıların geniş çapta kullanılmasını sağlamıştır (Eriç, 1994).

Betonarme teknolojisi ise 19. yüzyılın ortalarında geliştirilmeye başlanmıştır. 1852 yılında Fransız bahçıvan Joseph Monier, betonarme uygulamalarının ilk örneğini sergilemiştir.

Monier, betonun içine demir ağlar yerleştirerek çiçek saksıları üretmiş ve beton ile çeliğin birleşimiyle oluşturulan bu kompozit malzemenin hem çekme hem de basınç dayanımını artırdığını göstermiştir. Betonarmenin bu şekilde geliştirilmesi, inşaat mühendisliğinde devrim yaratmış ve yapıların daha dayanıklı ve uzun ömürlü hale gelmesine olanak sağlamıştır (Neville, 2022). 20. yüzyıl, betonun büyük ölçekli mühendislik projelerinde kullanılmaya başladığı bir dönem olmuştur. Özellikle barajlar, köprüler, gökdelenler ve otoyollar gibi büyük altyapı projelerinde betonun dayanım, işlenebilirlik ve uzun ömürlülük özellikleri nedeniyle tercih edilmiştir. Aynı dönemde beton katkı maddelerinin geliştirilmesi, betonun özelliklerinin iyileştirilmesine önemli katkılar sağlamıştır. Süper akışkanlaştırıcılar, mikrosilika ve uçucu kül gibi katkı maddeleri, betonun işlenebilirlik ve dayanım özelliklerini optimize ederek daha yüksek performanslı beton türlerinin geliştirilmesine olanak tanımıştır (Bazant ve Planas, 2019).

Bugün, betonun yaklaşık 150 yıllık modern geçmişine rağmen, inşaat sektöründe en yaygın kullanılan yapı malzemesi olduğu görülmektedir. Beton hem ekonomik oluşu hem de çeşitli uygulama alanlarına uyum sağlaması nedeniyle modern yapı teknolojilerinin temel unsurlarından biri haline gelmiştir. Aynı zamanda sürdürülebilir yapı teknolojileri kapsamında, betonun çevresel etkilerinin azaltılmasına yönelik araştırmalar da devam etmektedir (Mehta ve Monteiro, 2014).

### **1.3. Betonun Dayanımı**

Betonun dayanımı, özellikle basınç dayanımı, betonun yapı mühendisliğinde kullanımı açısından en önemli mekanik özelliktir. Betonun doğası gereği, basınç dayanımı çekme dayanımından oldukça yüksektir ve bu durum, betonun çoğunlukla basınç altında çalışacak şekilde tasarlanmasına yol açmıştır (Neville, 2022). Ancak, beton çekme stresine maruz kaldığında mikro çatlaklar oluşur ve bu çatlaklar malzemenin performansını olumsuz etkiler. Çelik donatıların betonla birlikte kullanılması, bu zayıf yönü telafi ederek çekme dayanımını artırır ve betonun daha geniş bir kullanım alanına sahip olmasını sağlar (Mehta ve Monteiro, 2014).

Betonun dayanımı, bileşenlerinin özelliklerinden, karışım oranlarından ve sertleşme sırasında maruz kaldığı çevresel koşullardan etkilenir. Bunlardan en önemlisi, beton karışımındaki su/çimento oranıdır.

Düşük su/çimento oranı, çimento matrisinin daha yoğun bir yapıya kavuşmasını sağlayarak dayanımı artırır. Ancak, bu durum işlenebilirliği olumsuz etkileyebilir. Yüksek su/çimento oranı ise betonun dayanımını azaltır, çünkü fazla su, betonun sertleşme sürecinde buharlaşarak mikro boşluklar oluşturur ve geçirgenliği artırır. Abrams'ın (1919), ortaya koyduğu su/çimento oranı teorisi, bu ilişkiyi net bir şekilde açıklamış ve beton karışımlarının tasarımında temel bir referans olmuştur (Kosmatka ve diğ., 2011).

Betonun dayanımı aynı zamanda yaşına ve hidratasyon sürecine bağlıdır. Beton, çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyon olan hidratasyon sayesinde sertleşir ve dayanım kazanır. Bu süreç genellikle ilk 28 gün içinde büyük ölçüde tamamlanır, ancak düşük su/çimento oranına sahip betonlarda hidratasyon reaksiyonları yıllarca devam edebilir. Bununla birlikte, hidratasyon reaksiyonlarının etkili bir şekilde gerçekleşmesi için betonun uygun şekilde kürlenmesi gereklidir. Kürleme işlemi sırasında nem kaybının önlenmesi, çimento hidratasyonunun devam etmesi açısından kritik öneme sahiptir. Uygun şekilde kürlenmeyen betonun dayanımı %30'a kadar azalabilirken, geçirgenliği on kat artarak korozyon riskini ciddi ölçüde artırabilir (Neville, 2022; Taylor, 1997).

Betonun dayanımını etkileyen bir diğer önemli faktör, agregaların kalitesi ve özellikleridir. Agreganın mineralojik yapısı, boyut dağılımı ve temizliği, betonun mekanik ve dayanıklılık performansını doğrudan etkiler. Uygun granülometriye sahip ve temiz agregalar, betonun dayanımını artırırken, kirli veya reaktif agregalar dayanımı düşürebilir. Özellikle klorür veya sülfat iyonları içeren kirli agregalar, kimyasal reaksiyonlara neden olarak betonun uzun vadeli dayanıklılığını olumsuz etkiler (Ghorbani ve diğ., 2016).

Beton, uygun şekilde kür edilmediğinde mukavemeti yaklaşık %30 oranında azalabilir, ancak durabilitesi daha fazla olumsuz yönde etkilenir. Kür edilmemiş betonun geçirimsizliği yaklaşık on kat artarak korozyon riskini artırır ve bu durum betonun durabilitesini önemli ölçüde düşürür. Betonun yeterli durabilitesini sağlamak için, amaca uygun malzeme seçimi yapılmalı, su dâhil tüm bileşenler standartlara uygun olmalıdır. Ayrıca, karışımın doğru bir şekilde tasarlanması, taze betonun uygun şekilde yerleştirilmesi ve özellikle ilk sertleşme sürecinde yüksek sıcaklık farklarından kaçınılması gerekmektedir.

Betonun iyi korunması ve gerekli kür işlemlerinin aksatılmadan yapılması da durabilitesini doğrudan etkileyen faktörlerdir (Çorbacıoğlu, 2008).

Betonun dayanımı ve durabilitesi birbirleriyle yakından ilişkilidir. Yüksek dayanımlı beton, genellikle düşük geçirgenlik ve daha yoğun bir yapı sunduğundan, durabilite açısından da avantajlıdır. Ancak, dayanımın tek başına yüksek olması, betonun uzun vadeli performansı için yeterli değildir. Örneğin, yeterince kürlenmemiş veya çevresel etkilerden korunmamış beton, dayanımı yüksek olsa bile mikro çatlaklar ve yüksek geçirgenlik nedeniyle çevresel etkilere karşı duyarlı hale gelir (Mindess ve diğ., 2003). Bu nedenle, dayanımı artırmaya yönelik önlemler alınırken durabiliteyi de gözetmek gereklidir.

Betonun dayanımını artırmak için su/çimento oranının optimize edilmesi, kaliteli malzeme kullanımı ve uygun kürlenme yöntemleri hayati öneme sahiptir. Su/çimento oranını düşürmek, dayanımı artırmanın etkili bir yoludur; ancak bu, süper akışkanlaştırıcı gibi katkı maddeleri ile desteklenmelidir. Çimentonun tazeliği ve bileşimi de dayanım açısından önemli faktörlerdir. Ayrıca, mineral katkıları (örneğin, uçucu kül, silis dumanı) ve kimyasal katkıları (örneğin, akışkanlaştırıcılar) betonun mekanik özelliklerini ve durabilitesini optimize etmek için kullanılabilir. İlk sertleşme sürecinde sıcaklık kontrolü ve nem kaybının önlenmesi de dayanım gelişimi açısından kritik öneme sahiptir (Kosmatka ve diğ., 2011; Mehta ve Monteiro, 2014).

#### **1.4. Betonun Geçirimsizliği**

Betonun geçirimsizliği, dayanıklılık açısından en kritik özelliklerden biridir. Geçirimsizlik, betonun yapısına suyun ve sudaki zararlı kimyasalların girmesine olanak tanıyan bir özelliktir. Eğer beton geçirgen ise, dayanıklılığında söz etmek mümkün değildir, çünkü zararlı maddelerin betonun iç yapısına nüfuz etmesi hem beton matrisini hem de içindeki çelik donatıyı zayıflatır (Page ve Page, 2007). Özellikle klorür ve sülfat iyonları gibi zararlı maddeler geçirgen betonun içine kolayca girebilir ve bu durum korozyon, donma-çözülme döngüleri, alkali-silika reaksiyonu ve sülfat etkisi gibi ciddi sorunlara yol açabilir (Mays, 1991). Bu nedenle, geçirimsizliği azaltmak betonun uzun ömürlü ve dayanıklı bir yapı malzemesi olarak kullanılabilmesi için büyük önem taşır. Betonun geçirimsizliği gözenekli yapısı ile doğrudan ilişkilidir. Betonun gözenek yapısı mikro çatlakların, porozitenin ve gözeneklerin büyüklüğü ile şekillenir.

Gözeneklerin boyutları, dağılımı ve bağlantılı olup olmaması, suyun beton içinde hareketini belirleyen en önemli unsurlardır. Bergin ve diğerleri (2014) gözeneklerin hem büyüklüğünün hem de bağlantılı yapısının, betonun su geçirgenliği üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Gözeneklerin bağlantılı olması durumunda su ve diğer zararlı maddeler beton içinde daha kolay hareket edebilir ve bu da betonun dayanıklılığını ciddi şekilde zayıflatabilir.

Su/çimento oranı betonun gözenekli yapısını ve dolayısıyla geçirgenliğini belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Düşük bir su/çimento oranı daha sıkı bir matris yapısı oluşturarak gözeneklerin azalmasını sağlar ve betonun geçirgenliğini düşürür. Ancak, yüksek su/çimento oranı beton sertleşirken suyun buharlaşması nedeniyle mikro çatlakların ve boşlukların oluşmasına yol açar. Bu durum zararlı maddelerin beton içine daha kolay nüfuz etmesine olanak sağlar (Neville, 2022).

Betonun kürlenme süreci de geçirimsizlik üzerinde önemli bir rol oynar. Kim ve diğerleri (2015) yeterli kürlenme yapılmayan betonun, hidrasyon sürecinin tamamlanamaması nedeniyle daha fazla gözeneklilik gösterdiğini ve geçirgenliğinin arttığını belirtmiştir. Kürlenme sırasında nemin korunması çimento hidrasyonunun devam etmesini sağlayarak daha yoğun bir yapı oluşturur ve betonun su geçirgenliğini önemli ölçüde azaltır. Yetersiz kürlenme betonun geçirgenliğini artırarak suyun ve zararlı iyonların beton içinde daha hızlı hareket etmesine neden olabilir. Su/çimento oranının düşürülmesi betonun gözenekliliğini azaltarak geçirgenliğini kontrol altına alır.

Betonun geçirgenliği çevresel etkilere karşı dayanıklılığı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Geçirgenliği yüksek beton dış ortamdan su ve zararlı maddeleri daha kolay bünyesine alır. Özellikle klorür iyonlarının beton içine girmesi çelik donatının korozyon riskini artırır. Bu durum betonarme yapılar için büyük bir sorun teşkil eder, çünkü korozyon donatı çeliğinin genleşmesine ve betonun çatlamasına yol açarak yapının bütünlüğünü zayıflatır (Mehta ve Monteiro, 2014).

Ayrıca, geçirgenliği yüksek betonlar donma-çözülme döngüleri sırasında suyun genleşmesi nedeniyle ciddi hasarlara maruz kalabilir. Betonun geçirgenliğini azaltmak için kullanılan en etkili yöntemlerden biri karışım tasarımının optimize edilmesidir.

Ancak düşük su/çimento oranı betonun işlenebilirliğini zorlaştırabilir; bu nedenle süper akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılarak hem düşük geçirgenlik hem de işlenebilirlik sağlanabilir (Kosmatka ve diğ., 2011). Mineral katkıları, özellikle silis dumanı ve uçucu kül gibi malzemeler, betonun mikro yapısını sıkılaştırarak suyun ve zararlı maddelerin hareketini sınırlar. Kürleme sürecinde betonun nem kaybının önlenmesi ve ilk sertleşme sırasında uygun sıcaklık koşullarının sağlanması da betonun geçirgenliğini azaltmak için önemlidir (Neville, 2022).

Betonun geçirgenliği dayanıklılık sorunlarının temel kaynağıdır ve bu sorunları en aza indirmek için gözenek yapısını optimize etmeye yönelik araştırmalar devam etmektedir. Mikro ve nano katkı maddelerinin beton üzerindeki etkilerinin daha detaylı araştırılması daha az geçirgen ve daha dayanıklı beton türlerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilir. Çevresel faktörlere karşı dirençli beton karışımları oluşturmak sürdürülebilir yapı teknolojilerinde önemli bir adım olacaktır (Page ve Page, 2007).

### 1.5. Betonda Çatlak Oluşumu

Taze beton uygulamalarında bazı önlemlerin alınmaması durumunda plastik rötre veya oturma çatlaklarının meydana gelme olasılığı bulunmaktadır. Beton kalıplarına döküldükten sonra 0,5-4 saatlik bir süre içinde, yani henüz plastik aşamadayken, özellikle geniş yüzeyler ve döşemelerde çatlaklar oluşabileceği bilinmektedir. Bu çatlakların derinliği 10 cm'ye kadar ulaşabilir. Uzunlukları ise birkaç santimetre ile 1-2 metre arasında değişebilir. Çatlakların genişliği ise 0,10 mm ile 3 mm arasında farklılık gösterebilir.

Bu çatlaklar betonun dayanıklılığını olumsuz yönde etkileyebilir, geçirgenliğini artırabilir ve yapıyı korozyona açık hale getirebilir. Taze beton çatlakları, farklı oturma hareketleri, plastik rötre veya kısıtlanmış rötre nedeniyle meydana gelebilir. Tablo 1.1'de çatlakların zamana bağlı değişimleri verilmiştir (Ravina, 1968).

Tablo 1.1. Çatlakların Zamana Göre Oluşumu (Ravina, 1968)

Çatlak Tipi	Çatlak Oluşumunun Zamanları
Plastik Oturma Çatlakları	10 Dakika-3 Saat
Plastik Rötre Çatlakları	30 Dakika-6 Saat
Harita Şeklinde Çatlaklar	1 Gün-7 Gün
Erken Isıl Büzülme Çatlaklar	1 Gün- 2 veya 3 hafta

Tablo 1.1 incelendiğinde beton ve benzeri malzemelerin çatlama tiplerinin oluşum sürelerini detaylı bir şekilde sınıflandırmakta olup, her bir çatlak tipinin oluşumunun çevresel faktörler ve betonun gelişim sürecindeki farklı aşamalara bağlı olarak nasıl değiştiğini göstermektedir. Plastik oturma çatlakları, beton dökümünden hemen sonra, özellikle betonun henüz sertleşme aşamasında olduğu ve içindeki suyun buharlaşma sürecinin etkisiyle meydana gelir. Bu çatlaklar genellikle 10 dakika ile 3 saat arasında ortaya çıkar ve su kaybının etkisiyle oluşan gerilmeler sonucu yüzeyde izler bırakır (Neville, 2022). Plastik rötre çatlakları, betonun priz alma sürecinde, yani sertleşme başlamadan önce, 30 dakika ile 6 saat arasında gözlemlenir. Bu çatlaklar betonun içindeki suyun buharlaşmasıyla oluşan hacim kaybının etkisiyle meydana gelir ve özellikle çevre koşullarındaki sıcaklık ve nem değişimleri ile daha belirgin hale gelir (Kosmatka ve diğ., 2002). Harita şeklinde çatlaklar, daha uzun bir süre zarfında, genellikle 1 gün ile 7 gün arasında, betonun sertleşme sürecinde ve içindeki suyun buharlaşması sonucu oluşur. Bu tip çatlaklar betonun yüzeyinde gerilmeler meydana getiren su kaybının etkisiyle şekillenir ve genellikle betonun erken dönemdeki fiziksel özelliklerinin göstergesidir (Mehta ve Monteiro, 2014). Son olarak, erken ısıl büzülme çatlakları, betonun sıcaklık değişimleri nedeniyle iç yapısında meydana gelen büzülme ve gerilme sonucu ortaya çıkar. Bu çatlaklar, 1 gün ile 2 veya 3 hafta arasında meydana gelir ve genellikle betonun ilk sertleşme sürecindeki sıcaklık farklarından kaynaklanır (ACI Committee 224, 2007).

Genel olarak bu tablo beton çatlaklarının oluşumunun hem çevresel faktörlere hem de betonun fiziksel-kimyasal özelliklerine bağlı olarak nasıl farklı zaman dilimlerinde meydana geldiğini vurgulamaktadır.

### **1.5.1. Oturma Çatlakları**

Oturma çatlakları taze betonun yerleşme ve oturma süreci sırasında meydana gelen ve genellikle kirişlerin üst yüzeyine yakın bölgelerde, donatılar üzerinde oluşan yaygın bir çatlak türüdür. Bu çatlakların oluşumu betonun plastik haldeki davranışı ve malzeme içindeki yerçekimi etkisiyle ilişkili süreçlerden kaynaklanır.

Taze beton döküldüğünde iri agrega taneleri ve çimento matrisindeki diğer ağır parçacıklar, yerçekimi etkisiyle alt tabakalara doğru çökerken çimento suyunun flokülasyon etkisiyle ayrılarak yüzeye doğru hareket ettiği gözlemlenir (Akman, 1997).

Bu durum beton içinde homojen olmayan bir yerleşim ve yüzeye yakın bölgelerde zayıf bölgeler oluşmasına neden olur. Yüzeye yakın bölgelerde bulunan donatılar betonun oturma hareketini fiziksel olarak sınırlandırır. Bu sınırlandırma betonun üst tabakasının oturma sürecini tamamlamasını engelleyerek düşük çekme dayanımı nedeniyle donatıların hizasında çatlakların oluşmasına yol açar (Taşdemir, 2002). Donatılar etrafındaki bu çatlaklar genellikle paralel veya donatıyı çevreleyen bir şekilde gözlemlenir ve bu durum betonun oturma hareketine karşı direncinin yeterli olmadığını gösterir (Neville, 2022).

Oturma çatlaklarının oluşumunda etkili olan bir diğer önemli faktör betonun su/çimento oranıdır. Yüksek su/çimento oranı betonun yerleşme hareketini artırarak çatlak oluşum riskini yükseltir. Su içeriğinin fazla olması çimento hamurunun kohezyonunu azaltır ve iri agregaların dibe çökmesine neden olur. Bu sırada yüzeye hareket eden su betonun alt katmanlarında hava ceplerinin oluşmasına yol açar ve bu da zayıf bölgeler oluşturur. Düşük çekme dayanımı nedeniyle bu bölgelerde çatlaklar kaçınılmaz hale gelir (Mehta ve Monteiro, 2014).

Ayrıca, betonun yerleşim ve vibrasyon teknikleri de oturma çatlaklarının oluşumunda belirleyici bir rol oynar. Yetersiz vibrasyon uygulamaları betonun içindeki hava ceplerinin yeterince giderilmesini engellerken, aşırı vibrasyon ise agrega ve çimento matrisinin ayrışmasına neden olabilir. Bu iki durum da beton içinde homojen olmayan bir yapı oluşturarak çatlak oluşumuna zemin hazırlar (Mindess ve diğ., 2003). Oturma çatlakları betonun mekanik ve dayanıklılık performansı üzerinde ciddi olumsuz etkiler yaratabilir. Bu çatlaklar betonun geçirgenliğini artırarak zararlı maddelerin beton içine daha kolay nüfuz etmesine yol açar.

Özellikle klorür iyonlarının donatılara ulaşması donatı korozyonunu hızlandırır ve betonarme yapıların uzun vadeli performansını olumsuz etkiler. Ayrıca, bu çatlaklar betonun estetik görünümünü de bozarak yapının genel kalitesini düşürebilir (Page ve Page, 2007).

Oturma çatlaklarının önlenmesi için beton karışım tasarımında düşük su/çimento oranı tercih edilmelidir. Düşük su/çimento oranı betonun kohezyonunu artırarak yerleşme hareketini sınırlar ve çatlak oluşum riskini azaltır.

Bunun yanı sıra, uygun vibrasyon tekniklerinin kullanılması betonun homojen bir şekilde yerleşmesini sağlar ve hava ceplerinin oluşmasını engeller. Yüzeğe yakın donatıların doğru yerleştirilmesi ve betonun ilk sertleşme sürecinde yüksek sıcaklık farklarından kaçınılması da çatlakların önlenmesine yardımcı olur (Kosmatka ve diğ., 2011).

### **1.5.2. Plastik Rötire Çatlakları**

Plastik rötire çatlakları, betonun taze olduğu priz süresi boyunca yüzeydeki suyun hızla buharlaşması sonucunda oluşan çatlaklardır. Bu tür çatlaklar genellikle geniş yüzey alanına sahip beton elemanlarda özellikle döşemeler, yollar, havaalanı pistleri ve otoparklar gibi uygulamalarda gözlemlenir. Betonun yüzeyindeki suyun buharlaşma hızının betonun içindeki suyun yüzeye çıkma hızını (terleme) aşması durumunda yüzeyde büzülme meydana gelir. Bu büzülme, betonun henüz yeterince dayanım kazanmadığı bir dönemde çekme gerilimlerine yol açar ve plastik rötire çatlaklarının oluşumuna neden olur (Lerch, 1957; Neville, 2022). Plastik rötire çatlaklarının oluşum mekanizması betonun yüzeyindeki su kaybı ile doğrudan ilişkilidir. Beton dökümünden sonra çimento hamurundaki serbest suyun bir kısmı yüzeye çıkararak terleme suyu oluşturur. Eğer bu terleme suyu yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem veya rüzgâr gibi çevresel faktörler nedeniyle hızla buharlaşırsa, betonun yüzeyi alttaki malzemeye göre daha hızlı bir şekilde küçülür. Bu durum yüzeyde çekme gerilimlerinin birikmesine ve çatlakların oluşmasına yol açar (Mehta ve Monteiro, 2014). Neville (2022), plastik rötire çatlaklarının genellikle yüzeyle sınırlı olduğunu ve betonun derin yapısına nüfuz etmediğini ifade etmektedir. Bu nedenle bu çatlaklar genellikle betonun mekanik dayanımını doğrudan etkilemez; ancak estetik görünümünü bozarak yapının genel kalitesini düşürebilir (Muratoğlu, 2009). Plastik rötire çatlaklarının oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerden biri hava koşullarıdır.

Yüksek sıcaklık, düşük bağıl nem oranı ve rüzgâr gibi çevresel koşullar suyun buharlaşma hızını artırarak çatlak oluşum riskini yükseltir. Özellikle sıcak ve kurak iklimlerde beton dökümü sırasında bu çatlakların oluşma olasılığı daha yüksektir. Ayrıca, betonun geniş yüzey alanına sahip olması, buharlaşma oranını artırarak çatlak oluşumuna zemin hazırlar (Lerch, 1957; Kosmatka ve diğ., 2011). Bir diğer önemli faktör ise betonun su/çimento oranıdır. Yüksek su/çimento oranına sahip karışımlarda beton yüzeyinde daha fazla terleme suyu birikir.

Ancak bu su çevresel etkiler nedeniyle hızla buharlaşırsa plastik rötre çatlakları oluşur. Düşük su/çimento oranı kullanılarak betonun daha kompakt bir yapı kazanması sağlanabilir ve bu durum, plastik rötre çatlaklarının oluşumunu sınırlar. Bunun yanı sıra, süper akışkanlaştırıcı gibi kimyasal katkıları kullanılarak betonun işlenebilirliği artırılırken, su miktarı azaltılabilir (Mehta ve Monteiro, 2014).

Plastik rötre çatlaklarını önlemenin bir diğer yolu uygun kütleme yöntemlerinin uygulanmasıdır. Beton dökümünden hemen sonra yüzeyin nem kaybını önlemek için sulama, nemli örtü veya buhar bariyerleri kullanılabilir. Erken kütleme yöntemleri betonun yüzeyindeki suyun korunmasını sağlayarak plastik rötre çatlaklarının oluşumunu engeller (Neville, 2022). Özellikle geniş yüzey alanına sahip beton elemanlarda bu önlemlerin alınması büyük önem taşır.

Plastik rötre çatlaklarının oluşumunun önlenmesinde çevresel faktörlerin göz önünde bulundurulması da kritik bir rol oynar. Sıcak ve rüzgârlı hava koşullarında beton dökümünden kaçınılmalı, betonun yüzeyine güneş ışınlarının doğrudan temas etmesi engellenmelidir. Ayrıca, geniş yüzey alanına sahip beton dökümlerinde uygun yerleşim ve vibrasyon teknikleri kullanılarak homojen bir yüzey elde edilmesi sağlanmalıdır (Mindess ve diğ., 2003).

Sonuç olarak, plastik rötre çatlakları, genellikle yüzeyle sınırlı olduklarından betonun mekanik dayanımını büyük ölçüde etkilemez. Ancak, estetik açıdan olumsuz etkiler yaratabilir ve beton yüzeyinde uzun vadede bakım gerektirebilecek kusurlar meydana getirebilir. Bu nedenle, plastik rötre çatlaklarının oluşum mekanizmalarının iyi anlaşılması ve önleyici tedbirlerin zamanında alınması beton yapıların dayanıklılığı ve görünümünü açısından büyük önem taşımaktadır (Muratoğlu, 2009).

### **1.5.3. Kısıtlanmış Rötre**

Kısıtlanmış rötre çatlakları, betonun büzülme hareketinin fiziksel bir engelle karşılaştığı durumlarda oluşan çatlaklardır. Beton dökümünden sonra hidratasyon süreciyle birlikte betonun hacmi küçülür. Ancak bu büzülme hareketi beton çevresinde yer alan diğer yapı elemanları veya donatılar nedeniyle kısıtlanırsa betonun iç yapısında çekme gerilimleri birikir. Bu gerilimler betonun çekme dayanımını aştığında çatlak oluşumu meydana gelir (Neville, 2022).

Kısıtlanmış rötre çatlakları genellikle perdelerde, duvarlarda ve büyük beton elemanlarda görülür ve bu çatlaklar betonun yüzeyinde dikey veya eğik bir şekilde ortaya çıkar. Kısıtlanmış rötre çatlaklarının oluşum mekanizmasını anlamak için çelik çember deneyi örnek olarak gösterilebilir. Bu deneyde, çelik bir halka etrafına dökülen beton priz aldıktan sonra incelendiğinde, betonun serbest bir şekilde büzülmesinin engellendiği durumlarda düşey çatlakların oluştuğu gözlemlenir. Bu çatlaklar büzülme hareketinin kısıtlanması sonucu oluşan çekme gerilimlerinin bir sonucudur (Grzybowski, 1991). Betonun kısıtlanmış büzülmesi sırasında oluşan bu çatlaklar betonun dayanıklılığını ve estetik görünümünü olumsuz etkileyebilir.

Kısıtlanmış rötre çatlaklarının oluşumunu etkileyen en önemli faktörlerden biri betonun hidratasyon sürecindeki büzülme hareketidir. Çimento hidratasyonu sırasında betonun iç yapısındaki serbest su kaybolur ve bu durum betonun hacminde bir azalmaya neden olur. Eğer betonun çevresinde bu büzülme hareketini kısıtlayan bir yapı elemanı veya donatı bulunuyorsa çekme gerilimleri birikir ve çatlak oluşumu kaçınılmaz hale gelir (Neville, 2022; Mehta ve Monteiro, 2014). Ayrıca, kullanılan çimento miktarı ve hidratasyon ısısı da bu çatlakların oluşumunda kritik bir rol oynar. Kısıtlanmış rötre çatlaklarını önlemek veya etkilerini azaltmak için çeşitli önlemler alınabilir:

- Betonun içine daha fazla donatı eklenmesi betonun çekme dayanımını artırarak rötre kaynaklı gerilimlerin daha geniş bir alana yayılmasını sağlar. Bu yöntem, çatlakların boyutunu ve sayısını azaltmada etkili olabilir (Grzybowski, 1991).
- Beton karışımına çelik tel veya polimer lif eklenmesi betonun çekme dayanımını artırır ve mikro çatlakların oluşumunu sınırlayarak kısıtlanmış rötre çatlaklarının etkisini azaltır. Lifler, beton içindeki gerilimlerin homojen bir şekilde dağıtılmasına yardımcı olur (Mindess ve diğ., 2003).
- Çimento miktarının azaltılması betonun büzülme potansiyelini düşürür. Çimento hidratasyonu sırasında meydana gelen hacim küçülmesi kullanılan çimento miktarına doğrudan bağlıdır. Ancak bu azaltma, betonun mekanik dayanımını etkilemeyecek şekilde dikkatlice planlanmalıdır (Neville, 2022).
- Betonun döküm işlemi sonrasında uygun kürleme yöntemlerinin uygulanması betonun iç yapısındaki nem kaybını sınırlayarak büzülme gerilimlerini azaltır.

Sulama, nemli örtü veya buhar bariyerleri gibi kürlenme yöntemleri betonun hacim küçülmesini kontrol altında tutmada etkili olabilir (Mehta ve Monteiro, 2014).

- Düşük hidrasyon ısısına sahip çimento kullanılması betonun sıcaklık farklarından kaynaklanan hacim değişimlerini azaltır. Bu durum, kısıtlanmış rötre çatlaklarının oluşum riskini düşürmek için etkili bir yöntemdir (Grzybowski, 1991).

#### **1.5.4. Kuruma Rötresi Çatlakları ve Beton Yüzeyindeki Suyun Buharlaşması**

Kuruma rötresi sertleşmiş beton içerisindeki suyun bir kısmının buharlaşarak kaybolması sonucu meydana gelen büzülmedir. Bu durum, betonun iç yapısındaki kapiler boşluklarda bulunan suyun eksilmesiyle başlar ve bu kayıp betonun hacminde kalıcı bir küçülmeye yol açabilir. Kuruma rötresi özellikle betonun bağıl nem oranının düşük olduğu veya yüksek sıcaklığa maruz kaldığı ortam koşullarında belirgin hale gelir (Erdoğan, 2023; Onaran, 2003). Betonun yaşadığı bu nem hareketi ıslanma-kuruma döngüleri sırasında meydana gelen çift yönlü nem değişiminden farklıdır. Kuruma rötresi sırasında gerçekleşen nem kaybı genellikle kalıcıdır ve geri dönüşü olmayan bir etkiye sahiptir.

Beton yüzeyinden buharlaşan suyun miktarı birçok çevresel faktöre bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bunlar arasında betonun sıcaklığı, düşük bağıl nem oranı ve ortam sıcaklığı en önemli etmenler olarak sıralanabilir (Demirel, 2008).

Beton yüzeyinde su buharlaşması betonun yüzey tabakalarında büzölmelere yol açarak kuruma rötresi çatlaklarının oluşmasına neden olabilir. Beton yüzeyinden suyun buharlaşmasını etkileyen rüzgâr hızının ve bağıl nem oranının etkisi Lerch, (1957) tarafından yapılan çalışmalarda detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Bu çalışmaya göre rüzgâr hızının 0 km/s'den 40 km/s'ye çıkması durumunda, beton yüzeyinden buharlaşan suyun miktarı 9 kat artmaktadır. Aynı şekilde bağıl nem oranının %90'dan %10'a düşmesi durumunda ise buharlaşma miktarı 8 kat artış göstermektedir. Bu veriler, beton yüzeyindeki suyun buharlaşmasını önlemek için çevresel koşulların ne kadar önemli olduğunu göstermektedir (Lerch, 1957). Kuruma rötresi çatlakları betonun yüzeyinde genellikle ince ve yüzeyle sınırlı çatlaklar olarak gözlemlenir.

Bu çatlaklar betonun derin yapılarına ulaşmadığından mekanik dayanımını doğrudan etkileyen bir sorun olmayabilir.

Ancak, betonun geçirgenliğini artırarak su, klorür iyonları ve diğer zararlı maddelerin betonun içine daha kolay nüfuz etmesine neden olabilir. Bu durum özellikle betonarme yapılarda donatıların korozyon riskini artırır ve uzun vadede yapının dayanıklılığını olumsuz etkiler (Mehta ve Monteiro, 2014). Bu nedenle, çevresel koşulların kontrol edilmesi uygun karışım tasarımı ve etkili kürlenme yöntemlerinin uygulanması kuruma rötresi çatlaklarının oluşumunu önlemek için kritik önlemler arasında yer almaktadır (Neville, 2022).

### **1.6. Deniz Suyu ve Tuzlu Sudaki Betonların Davranışları**

Deniz suyu ve tuzlu su ortamları betonun dayanıklılığı üzerinde son derece olumsuz etkilere sahip çevresel koşullardır. Bu tür ortamlarda beton kimyasal ve fiziksel bozunmaya maruz kalırken aynı zamanda içindeki çelik donatının korozyonuna da yol açarak yapısal bütünlüğünü kaybedebilir (Neville, 2022). Deniz suyu %3,5 oranında tuz içerir ve bu tuzun büyük bir kısmını klorür ve sülfat iyonları oluşturur. Bu iyonlar, betonun geçirgen yapısından faydalanarak iç yapıya nüfuz eder ve hem beton matrisine hem de donatılara zarar verir. Tuzlu su ortamlarının olumsuz etkileri özellikle liman yapıları, köprüler, deniz kenarındaki binalar ve su altı yapılarında daha belirgindir (Mehta ve Monteiro, 2014).

Klorür iyonları, betonun içindeki çelik donatıyı koruyan pasif tabakayı yok ederek donatı korozyonunu başlatır. Korozyon sürecinde, çelik donatılar oksijen ve nemle reaksiyona girerek hacimce genişleyen pas oluşumuna yol açar. Bu genişleme betonun çatlamasına, ayrışmasına ve donatıyla olan aderansın kaybolmasına neden olur (Neville, 2022). Klorür iyonlarının beton içindeki hareketi betonun geçirgenliği, su/çimento oranı ve çevresel koşullara bağlı olarak değişiklik gösterir. Özellikle düşük kaliteli betonlarda klorür penetrasyonu daha hızlı gerçekleşir (Mindess ve diğ., 2003).

Sülfat iyonları ise, beton içindeki kalsiyum alüminat hidratlarla reaksiyona girerek etrenjit gibi genişleyen bileşiklerin oluşmasına sebep olur. Bu genişleme, betonun çatlamasına, yüzeydeki parçalanmalara ve dayanım kaybına yol açar. Sülfat etkisi özellikle yüksek sülfatlı zeminlerde veya tuzlu suyun sık sık değişken nem koşullarına maruz kaldığı yerlerde daha belirgindir (Kosmatka ve diğ., 2011). Ayrıca, deniz suyu ortamlarında tuz kristalleri betonun yüzeyinden buharlaşan suyun ardından oluşurlar. Bu kristaller betonun gözeneklerinde birikerek iç gerilimlere yol açar.

Tuz kristallerinin hacimce büyümesi beton yüzeyinde mikro çatlaklar oluşmasına ve zamanla beton matrisinin zayıflamasına neden olur (Mays, 1991). Deniz suyu ortamlarında betonun dayanıklılığını artırmak için çeşitli tasarım ve koruma önlemleri alınabilir. Betonun düşük su/çimento oranına sahip olması betonun gözenekli yapısını azaltarak klorür ve sülfat iyonlarının penetrasyonunu sınırlar. Düşük geçirgenlik hem kimyasal hem de fiziksel bozunmalara karşı betonun direncini artırır (Neville, 2022). Ayrıca, mineral katkıları deniz suyu ortamlarında betonun dayanıklılığını artırmada kritik bir rol oynar. Uçucu kül, cüruf ve silis dumanı gibi mineral katkıları, betonun bağlayıcı fazını güçlendirir ve gözenek yapısını sıkılaştırır. Bu durum zararlı iyonların iç yapıya nüfuz etmesini zorlaştırır. Süper akışkanlaştırıcılar ise düşük su/çimento oranı ile işlenebilirliği artırmak için kullanılır (Mehta ve Monteiro, 2014). Lif katkılı betonlar ise deniz suyu ortamlarında çatlak oluşumunu sınırlayarak dayanıklılığı artırır. Çelik, polimer veya cam lifler, mikro çatlakların genişlemesini engelleyerek zararlı iyonların penetrasyonunu sınırlar. Kendiliğinden iyileşen beton teknolojisi deniz suyundaki mikro çatlakların karbonatlaşma reaksiyonlarıyla yeniden kapanmasını teşvik ederek dayanıklılığı artırır (Grzybowski, 1991). Deniz suyuna maruz kalan betonların dayanıklılığını artırmak için koruyucu önlemler büyük önem taşır. Donatıyı çevreleyen beton tabakasının kalınlığının artırılması klorür iyonlarının donatıya ulaşmasını zorlaştırır. Ayrıca, epoksi kaplı donatılar korozyona karşı ilave bir koruma sağlar (Neville, 2022). Beton yüzeyine su geçirmez kaplamalar uygulanması zararlı iyonların beton içine girmesini önleyerek dayanıklılığı artırır. Bu kaplamalar özellikle deniz suyu ortamlarında kullanılan liman ve kıyı yapılarında yaygın olarak tercih edilir (Mays, 1991). Ayrıca, betonun uygun şekilde kürlenmesi hidrasyon sürecinin tamamlanmasını sağlar ve betonun iç yapısını daha sıkı hale getirerek dayanıklılığını artırır (Kosmatka ve diğ., 2011). Deniz suyu ortamlarında beton dayanıklılığını artırmak için nano katkıları ve biyolojik iyileşme teknolojileri gibi yenilikçi yaklaşımlar, gelecekteki araştırmalar için büyük bir potansiyel taşır. Bu teknolojiler, betonun hem mekanik hem de kimyasal dayanıklılığını artırarak sürdürülebilir yapı malzemelerinin geliştirilmesine katkıda bulunabilir (Mehta ve diğ., 2014).

### **1.7. Betonda Çatlakların Kendiliğinden İyileştirilmesi**

Zhang ve diğerleri (2020) beton için kendi kendini iyileştirme tekniklerini; malzeme karıştırma (mineral katkı maddeleri, lifler, nano dolgular ve kürlenme maddeleri) ve kendi

kendini iyileştirme teknolojileri (elektrokaplama, şekil hafızalı alaşım, kapsül, vasküler ve bakteri) olmak üzere iki farklı kategoride incelemiştir. Betondaki kendi kendini iyileştirme yaklaşımlarını otojen iyileştirme ve otonom iyileştirme olmak üzere ikiye ayırmışlardır. Çatlak iyileşmesi sayesinde, çimento beton yapıların mekanik özellikleri ve dayanıklılığı çoğu durumda bir dereceye kadar geri kazanıldığı sonucuna varmışlardır. Ancak, otojen iyileşme yöntemlerinin çoğunun yalnızca 150 µm'den daha geniş olmayan çatlakları tamamen onarmak için mümkün olduğunu, buna karşılık otonom iyileşme teknolojilerinin daha büyük çatlakları, hatta 1 mm'ye kadar olanları, iyileştirme potansiyeline sahip olduğunu gözlemlemiştir. Yine de en iyi iyileşme yöntemi seçmenin zor olduğunu belirtmişlerdir.

Cappelleso ve diğerleri (2024) deniz ortamında klorür girişini ve korozyonu önlemek için iyileştirici madde olarak kristal oluşturan bir katkı maddesi içeren kendi kendini onaran beton üzerine çalışmalar yapmışlardır. İki farklı çatlak genişliğine (100 µm ve 300 µm) sahip önceden çatlamış beton numunelerinde kristal katkı maddesinin (Penetron admix) etkinliğini incelemiştir. Bu çalışmalarında çatlak kapanmasının görsel incelemesinden ziyade dayanıklılığa öncelik vermişlerdir. Sülfat ve klorür iyon girişinin etkilerini ve diğer bozulma faktörlerini inceleyerek zorlu deniz ortamlarında kendi kendini onaran betonun dayanıklılığı hakkında deneysel sonuçlar sunmuşlardır. Yaptıkları çalışmaların sonuçlarında kristal oluşturan katkılı serilerinde beton matrisinin iyileştiği ve 12 aylık maruziyetten sonra referans serisine kıyasla çatlamamış ve iyileşmemiş numunelerde klorür girişinde %31 oranında önemli bir azalma sağlandığını gözlemlemiştir. Kristal oluşturan katkılı serilerinde zamanla kütlede önemli bir değişiklik gözlemlememiştir. Kristal oluşturan katkı maddesinin çatlamamış numunelerde ve dar iyileşmiş çatlaklara sahip numunelerde donatı korozyonunu etkili bir şekilde önlediği ancak iyileşmemiş seride ve büyük çatlaklara sahip numunelerde, iyileşme rejiminden bağımsız olarak korozyonun belirgin olduğunu gözlemlemiştir.

Zhao ve diğerleri (2021) beton üretiminde deniz suyu ve deniz kumu kullanımına ilişkin yapılan araştırmalar incelendiğinde, deniz suyu kullanıldığında daha düşük büzülme değerlerinin elde edildiği, su/bağlayıcı oranı 0,5'ten 0,3'e düşüldükçe büzülme değerlerinin arttığı görülmüştür. Jonkers ve diğerleri (2010) çalışmalarında canlı bakteri hücreleri yerine endosporları çimento harcı karışım suyuna katmışlardır.

Bu yöntem ile çimento harcı içine katılan endosporlar 4 aya yakın canlı kalabilmişlerdir. Mikroorganizmaların çimento içinde canlı kalma süresini uzatmak amacıyla literatürde kullanılan bir başka yöntem ise hücrelerin sentetik malzemelerle kapsül içine alınmasıdır. Wiktor ve Jonkers (2011) Delft Üniversitesi'nde geliştirdikleri sistem ile endosporları (kalsiyum laktat ile beraber) kendilerinin ürettiği genişletilmiş hafif kil agregaların içine enjekte etmişlerdir. Çatlak oluşumunda yüzeye beraber kırılan agregaların içindeki karışım sayesinde yüzey çatlakları kalsiyum karbonat çökeltisi ile tamamen kapatılmış ve malzemenin geçirgenliği azaltılmıştır.

Kan ve Shi (2012) tarafından yürütülen çalışmada, yüksek oranda uçucu kül içeren daha ileri yaşlardaki numunelerde daha küçük genişliğe sahip çoklu çatlak oluşumunun daha mümkün olduğu tespit edilmiştir. Zhang ve diğerleri (2014) farklı oranlarda uçucu kül içeren üç ECC, "Engineered Cementitious Composites" (tasarlanmış çimento esaslı kompozitler), karışımının kullanıldığı başka bir çalışmada, uçucu kül miktarının artmasıyla hem basınç dayanımının hem de çatlak genişliğinin azaldığı, bununla birlikte, birbirini izleyen daha yoğun çoklu çatlak oluşumunun sehim kapasitesini arttırdığını bulmuşlardır. Kan ve Shi (2012) ile Yang ve diğerleri (2011) kendiliğinden iyileşmenin hangi hız ve oranda gerçekleştiğini değerlendirmek için rezonans frekans ölçümlerini kullanmışlardır. Yang ve diğerleri (2011) yaptıkları çalışmada, rezonans frekans ölçümlerine ilaveten ECC numunelerine tek eksenli çekme testleri de uygulamışlardır. Sonuçta, suyun var olduğu çevresel koşullar altında ECC'de belli bir oranda yüksek çekme sünekliğine ulaşılabildiğini ve 60 µm altındaki çatlak genişliklerinde kendiliğinden iyileşmenin oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte, erken yaşta görülen bu iyileşmenin daha olgun numunelerdeki iyileşmeye kıyasla daha az etkili olduğunu tespit etmişlerdir. Roig-Flores ve diğerleri (2015) iyileştirici madde olarak kristal katkı maddesi kullanarak kendi kendini onaran betonu incelemişlerdir. Bu çalışmalarında, lif takviyeli beton kristal katkı maddesiyle karıştırıp, farklı çevre koşulları altında inceleme gerçekleştirmişlerdir. Roig-Flores ve diğerleri (2016) kristal katkılarla karıştırılmış betonun iyileşme yeteneğini araştırmışlardır. Kendi kendini iyileştirme özelliğini ölçmek için geçirgenlik ve çatlak kapatma testleri yapmışlardır. Biri 0,45 su/çimento oranına sahip ve 350 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu çimento ve diğeri 0,60 su/çimento oranına sahip ve 275 kg/m<sup>3</sup> yoğunluklu çimento karışımları olmak üzere iki beton kalitesi incelemişlerdir.

Deneyleer sonucunda, kristal katkılı betonların, normal betonlara göre basınç dayanımlarının %15 oranında daha fazla olduğunu gözlemlemişlerdir. Snoeck ve diğerleri (2014) süper emici polimerler ve mikrofiberler eklendiğinde beton malzemelerin kendi kendini iyileştirme mekanizmasını araştırmışlardır. Süper emici polimerlerin eklenmesi nedeniyle çatlakların iyileşme özelliğinde bir artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Bunun nedeni, süper emici polimerlerin ıslak ortama maruz kaldıklarında şişebilmeleridir. %1 oranda süper emici polimer içeren numuneler ıslak-kuru döngüler altında işlendiğinde 138 µm genişliğindeki çatlağı iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Beton karışımına süper emici polimer eklenmesi nedeniyle su geçirgenliğinin azaldığını ve çatlakların kapandığını görmüşlerdir.

Çatlakların ilerlemesini önlemek için betonda lif kullanımı yaygın bir yöntemdir. Lawler ve diğerleri (2005) yaptıkları çalışmada mikro ve makro lifler kullanılarak elde edilen hibrit lifli betonların mekanik ve kırılma davranışlarını araştırmışlardır. Mikro (polipropilen) ve makro (çelik) lifler farklı oranlarda kullanılarak üretilen hibrit lifli betonların eğilme dayanımı, basınç dayanımı, tokluk ve darbe direnci gibi özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Hibrit lifli betonların basınç dayanımı tek tip mikro veya makro lifli betonlara kıyasla daha yüksek bulunmuştur. Eğilme dayanımı açısından mikro lifler ile güçlendirilmiş betonlar daha iyi performans gösterirken, makro lifler ise tokluk ve darbe direncini daha çok artırmıştır. Hibrit lifli betonlarda mikro lifler çatlak başlangıcını, makro lifler ise çatlak ilerlemesini denetleyerek sinerjik bir etki göstermiştir. Sonuçlar, mikro ve makro liflerin uygun oranlarda harmanlanmasının betonun mekanik ve kırılma davranışını önemli ölçüde iyileştirebileceğini göstermiştir.

Lif katkılı kendiliğinden iyileşen çimentolu malzemeler, son yıllarda inşaat mühendisliği ve malzeme bilimi alanlarında büyük bir ilgi görmüştür. Bu malzemeler hem mekanik dayanım hem de çevresel koşullara karşı dayanıklılık açısından önemli avantajlar sunmaktadır (Li, 2008). Özellikle mikro çatlakların iyileşmesi ve betonun uzun vadeli performansının iyileştirilmesi amacıyla geliştirilen kendiliğinden iyileşen betonlar çevresel etkilerden kaynaklanan bozunmalara karşı daha dirençli hale gelmektedir. Lifler bu tür betonlarda mikro çatlakların oluşumunu engelleyerek ya da mevcut çatlakların genişlemesini sınırlayarak betonun yapısal bütünlüğünü artırır (Van Tittelboom ve De Belie, 2013).

Aynı zamanda, kendiliğinden iyileşme mekanizmaları mikro çatlakların yeniden kapanmasını sağlayarak betonun uzun ömürlü olmasını ve bakım gereksinimlerinin azaltılmasını sağlar (Huang ve diğ., 2016). Bu bulgular, lif katkılı kendiliğinden iyileşen çimentolu malzemelerin geleneksel betonlardan çok daha üstün performans sergileyebileceğini ve yapıların dayanıklılığını artırmada önemli bir potansiyel taşıdığını göstermektedir. Bu yenilikçi malzemeler hem sürdürülebilirlik hem de yapıların uzun vadeli güvenilirliği açısından gelecek vaat etmektedir (Yang ve diğ., 2011).

Deniz suyu ve tuzlu su ortamlarında kullanılan betonlar kimyasal ve fiziksel etkiler nedeniyle dayanıklılık açısından özel bir tasarım gerektirir. Yapılan literatür çalışmalarına bakıldığında; lif katkıları, mineral katkıları ve kendiliğinden iyileşme teknolojileri, betonun agresif çevresel koşullara karşı direncini artıran yenilikçi çözümler sunmaktadır.

Bu çalışmada kristal oluşturan katkılı ve katkısız, mikro lifli kristal oluşturan katkılı ve katkısız harçların normal kür havuzunda ve tuzlu su kür havuzlarında çatlak iyileşmelerinin gelişimi incelenmiştir.

## 2. DENEYDE KULLANILAN MALZEMELER

### 2.1. Çimento

Tüm deneysel çalışmada, Nuh Çimento Hereke Tesislerinde üretilmiş CEM I 42,5R Portland çimentosu kullanılarak hazırlanan harç karışımlarında su/çimento (s/ç) oranı sabit 0,35 olarak seçilmiştir. Çimentonun özellikleri Tablo 2.1’de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Kullanılan Çimentonun Özellikleri

Fiziksel Özellikler								
Özgül Ağırlık	3170 kg/m <sup>3</sup>							
Blaine Özgül Yüzey	3560 cm <sup>2</sup> /g							
Priz Başlangıç	165 dakika							
Priz Son	205 dakika							
Hacimsel Sabitliği	1,05 mm							
7 Günlük Basınç Dayanımı	49,2 MPa							
28 Günlük Basınç Dayanımı	59,7 MPa							
Mineralojik Birleşim (%)								
C <sub>3</sub> S		C <sub>2</sub> S		C <sub>3</sub> A		C <sub>4</sub> AF		
63,17		10,46		5,99		11,43		
Kimyasal Bileşim (%)								
Oksit İçeriği (%)	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO
CEMI 42.5 R	65,66	23,12	4,12	3,42	0,30	0,90	2,61	1,21

### 2.2. Agrega

Deneyde numunelerin hazırlanmasında kullanılan agrega kuvarz kökenli doğal kum olup Tablo 2.2’de agreganın özellikleri verilmiştir. Bu doğal kum 4 mm elekten geçirilerek kullanılmıştır.

Tablo 2.2. Kullanılan Agreganın Özellikleri

Kumun Özgül Ağırlığı	2400 kg/m <sup>3</sup>
Su Emme Değeri	%2,1

### 2.3. Akışkanlaştırıcı Katkı

Akışkanlaştırıcı olarak Sika ViskocreteSF 18 süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkının üretici tarafından beyan edilen teknik özellikleri Tablo 2.3’te verilmektedir.

Tablo 2.3. Akışkanlaştırıcı Katkı Maddesinin Özellikleri

Teknik Bilgi	
Kimyasal Yapı	Modifiye polikarboksilat esaslı polimer
Yoğunluk	1,10+0,02 kg/l, 20°C
PH değeri	3-7
Donma Noktası	-10°C
Suda Çözünabilir Klorür Yüzdesi	Maksimum 0,1% klorür içermez

#### 2.4. Kristal Oluşturan Katkı

Kristal üreterek betonun kendiliğinden iyileşmesini ve geçirimsizliği sağlaması adına Xypex Admix C-1000 kullanılmıştır. Kuru bir toz halinde üretilmiş olan bu katkı maddesi Portland çimentosu, çok ince işlenmiş silis kumu ve çeşitli etkili kimyasallar içermektedir. Kullanılan kristal oluşturucu katkıının üretici firmadan alınan kimyasal içeriği Tablo 2.4'te verilmiştir.

Tablo 2.4. Kullanılan Kristal Oluşturan Katkının Kimyasal İçeriği

Oksit İçeriği (%)	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO
Kristal Oluşturan Katkı	73,26	13,84	3,74	2,22	1,23	0,38	3,89	0,76

#### 2.5. Sentetik Mikro Lif

Kratos Mikro Sentetik Fiber Donatısı taze betonda oluşan plastik ve uzun vadeli kuruma büzülme çatlaklarının önlenmesinde kullanılan EN 14889-2 Sınıf I standardına uygun olarak üretilen sentetik fiber donatıdır. Kullanılan liflerin üretici tarafından beyan edilen teknik özellikleri Tablo 2.5'te verilmiştir.

Tablo 2.5. Kullanılan Mikro Lifin Teknik Özellikleri

Mikro Sentetik Lif Özellikleri	
Fiber Sınıf	EN 14889-2 Sınıf I
Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	1,38
Uzunluk (mm)	12
Filament Yarıçap (mikron)	17-21
Çekme Gerilmesi (MPa)	800-1100
Korozyon Direnci	Yüksek
Erime Noktası (°C)	255-265
Fiber Adedi/kg	200 milyon
Lif Türü	Monofilament

### 3. DENEYSEL YÖNTEMLER

#### 3.1. Karışımın Özellikleri

Su/çimento oranı 0,35 olan harç karışımları Standart RILEM karıştırıcısında hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlardan bazılarında çimento ağırlığının %1,5 oranında kristal oluşturarak kendiliğinden iyileşmeyi sağlayacak katkı maddesi ve mikro lif kullanılmıştır. Standart bir betonun harç fazında hazırlanan karışımda kullanılan malzemenin miktarları ve oranları Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Harç Karışımında Kullanılan Malzemenin Miktarları

Bileşen (g)	Referans	Kristal Oluşturan Katkılı	Mikro Lif Katkılı	Mikro Lif ve Kristal Oluşturan Katkılı
	0,35	X-0,35	F-0,35	FX-0,35
Çimento	4840	4840	2269	2269
Kristal Oluşturan Katkı	-	72,6	-	1,7
Akışkanlaştırıcı	3,3	3,3	2,1	2,1
Doğal Kum	2144	2144	1005	1005
Su	1693	1693	794	794
Mikro Lif			33,99	33,99

Çatlak kapanma kabiliyetini ölçmek için 10 cm çapında 2,5 cm yüksekliğinde halka diskler, basınç ve eğilme deneyimlerini belirlemek için 40×40×160 mm boyutunda prizma, su geçirimsizliğini belirlemek için 100×100×100 mm küp numuneler kullanılmıştır.

#### 3.2. Yayılma Tablası Deneyi

Öncelikle Şekil 3.1’de gösterilen standart RILEM karıştırıcısında hazırlanan kristal oluşturucu katkı içeren ve içermeyen harçların kıvamları TS EN-1015/3 standardına göre yayılma tablası deneyi uygulanarak belirlenmiştir.

Kalıp olarak üst çapı 6,5 cm, alt çapı 7,5 cm ve yüksekliği 4 cm olan bir kesik koni kullanılmıştır. Kalıpta yapışma olmaması için harçlar kalıba dökülmeden önce hafif nemli bırakılmıştır. Daha sonra hazırlanan harçlar kalıba 2 kademede olacak şekilde yerleştirilmiştir.

Kalıbın üst tarafı spatula ile düzlenmiş ve kalıp çekilerek çıkartılmıştır. Deney aletinin kolu TS EN-1015/3 standardına göre saniyede 1 kez olacak şekilde 15 kez çevrildikten sonra, Şekil 3.2’de de görüldüğü gibi yayılan numunenin çapı iki farklı eksende metre yardımı ile ölçülmüş ve okunan değerlerin ortalaması kaydedilmiştir.



Şekil 3.1. Standart RILEM Karıştırıcısı



Şekil 3.2. Yayılma Tablası Görüntüsü

### 3.3. Çatlak Kapanma Kabiliyeti

Standart RILEM karıştırıcısında katkısız, kristal oluşturan katkı ve mikro lifli karışımlar hazırlanarak daha önceden hazırlanmış ve yağlanmış çapı 10 cm olan, yüksekliği 2,5 cm boyutundaki çember şeklindeki kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıplara yerleştiren harçlara 3 mm derinliğindeki tek katlı ve çift katlı asetat kağıtları yerleştirilerek dar ve geniş çatlaklar oluşturulmuştur. Çatlak oluşturulmuş numune Şekil 3.3'te görülmektedir. Bu numuneler kalıpta laboratuvar ortamında bir gün bekletildikten sonra kalıptan çıkartılarak 28 gün kür havuzunda bekletilmiştir. Katkısız numuneler, kristal oluşturan katkı numuneler, mikro lifli numuneler reaksiyon oluşturmamaları için birbirinden farklı kür havuzlarına yerleştirilmiştir. Temsili çatlak oluşturmak için harç numunelerine batırılan asetat kağıtları 3., 7. ve 14. günde çıkartılmıştır. Farklı boyutlardaki ve farklı yaşlardaki çatlakların kapanma kabiliyetleri 56. güne kadar optik mikroskopla belirli aralıklarla ölçülmüştür.



Şekil 3.3 Karışımların Kalıplara Yerleştirilmesi

Disk numunelerinden birbirinden farklı özelliklerde oluşturulan çatlak serilerinin isimlendirilmesi ve çatlak özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir. Örnek verilecek olunursa 0,35-C3-N serisi ile isimlendirilen numunede 0,35 su/çimento oranını, C harfinden sonra gelen sayı çatlağın oluşturulduğu günü ve N harfi ise çatlağın ince çatlaklı olduğunu göstermektedir. Eğer serilerde W harfi varsa bu örneklerde geniş çatlaklar oluşturulmuştur. Kristal oluşturan katkı maddesini göstermek için seri adlarına X, mikro lif katkı maddesini göstermek için seri adlarına F harfi ve son olarak tuzlu suda olduğunu göstermek için seri adlarına S harfi eklenmiştir. S serileri karışımlar 1000 ml suya 58,44g tuz gelecek şekilde kür havuzu oluşturulmuştur.

Tablo 3.2. Farklı Özelliklerde Oluşturulan Çatlak Serilerinin İsmiendirilmesi ve Çatlak Özellikleri

Seri İsmi	Kür Şartları	Çatlak Oluşturulma Günü	Çatlak Genişliği
0,35-C3-N	Normal su	3. gün	Dar
0,35-C7-N	Normal su	7. gün	Dar
0,35-C14-N	Normal su	14. gün	Dar
0,35-C3-W	Normal su	3. gün	Geniş
0,35-C7-W	Normal su	7. gün	Geniş
0,35-C14-W	Normal su	14. gün	Geniş
X-0,35C3-N	Normal su	3. gün	Dar
X-0,35C7-N	Normal su	7. gün	Dar
X-0,35C14-N	Normal su	14. gün	Dar
X-0,35-C3-W	Normal su	3. gün	Geniş
X-0,35-C7-W	Normal su	7. gün	Geniş
X-0,35-C14-W	Normal su	14. gün	Geniş
S-0,35-C3-N	Tuzlu su	3. gün	Dar
S-0,35-C7-N	Tuzlu su	7. gün	Dar
S-0,35-C14-N	Tuzlu su	14. gün	Dar
S-0,35-C3-W	Tuzlu su	3. gün	Geniş
S-0,35-C7-W	Tuzlu su	7. gün	Geniş
S-0,35-C14-W	Tuzlu su	14. gün	Geniş
SX-0,35C3-N	Tuzlu su	3. gün	Dar
SX-0,35-C7-N	Tuzlu su	7. gün	Dar
SX-0,35-C14-N	Tuzlu su	14. gün	Dar
SX-0,35-C3-W	Tuzlu su	3. gün	Geniş
SX-0,35-C7-W	Tuzlu su	7. gün	Geniş
SX-0,35-C14-W	Tuzlu su	14. gün	Geniş
F-0,35-C3-N	Normal su	3. gün	Dar
F-0,35-C7-N	Normal su	7. gün	Dar
F-0,35-C14-N	Normal su	14. gün	Dar
F-0,35-C3-W	Normal su	3. gün	Geniş
F-0,35-C7-W	Normal su	7. gün	Geniş
F-0,35-C14-W	Normal su	14. gün	Geniş
FX-0,35-C3-N	Normal su	3. gün	Dar
FX-0,35-C7-N	Normal su	7. gün	Dar
FX-0,35-C14-N	Normal su	14. gün	Dar
FX-0,35-C3-W	Normal su	3. gün	Geniş
FX-0,35-C7-W	Normal su	7. gün	Geniş
FX-0,35-C14-W	Normal su	14. gün	Geniş

### 3.4. Basınç ve Eğilme Dayanımı Deneyleri

Bu deneyde Tablo 3.1’de verilen 0,35C ile X-0,35C serilerinin basınç ve eğilme dayanımları incelenmiştir. Bu karışımlar 40×40×160 mm ölçülerinde olan prizmalara

dökülmüştür. Kalıba yerleştirilen harçlar için her seferinde 20 kez tokmakla vurularak harçların kalıba tam yerleşmesi sağlanmıştır.

Bir gün sonra bu numuneler kalıplardan sökülüştür. Sökülen kalıplar ayrı ayrı kür havuzuna konulmuştur. Kür havuzundaki numuneler 7. gün ve 28. günde çıkartılarak laboratuvar ortamında bulunan basınç dayanımları ve eğilme dayanımları ölçülmüştür. Eğilme dayanım testi yapılırken cihazda ayrılan iki ayrı parça için basınç dayanımları 40×40 mm kesit üzerinde yapıldı ve çıkan sonuçların ortalaması hesaplanmıştır.

### **3.5. Kılcal Su Geçirimsizliği Deneyi**

Betonda kılcallık deneyi 100×100×100 mm boyutlu küp kalıplarda yapılmıştır. Bu kalıplara daha önceden karışım oranları verilmiş olan 0,35 ve X-0,35 serileri ile bu serilerin tuzlu suda bekletilecek olan S-0,35 ve SX-0,35 numuneler dökülmüş ve temsili çatlaklar oluşturulmuştur. Daha sonra bir gün kalıpta bekletilen numuneler kalıptan sökülerek ayrı ayrı kür havuzuna bırakılmıştır. Numuneler 28 gün sonra kür havuzundan çıkartılmıştır. Kılcallık deneyine başlamadan önce, numuneler 110°C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilip oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Numunelere sadece temsili çatlak oluşturulan yüzeyden su girecek şekilde çatlak oluşturulan yüzey harici kenar bölgeler likit su yalıtım malzemesi ile kaplanmış olup kalan üst yüzey ise alüminyum folyo ile kapatılmıştır. Numunelerin önce kuru ağırlıkları ölçülmüş olup daha sonra sırasıyla 1 dk, 5 dk, 10 dk, 20 dk, 30 dk, 60 dk, 2 saat, 3 saat, 4 saat, 5 saat, 6 saat, 1 gün, 2 gün, 3 gün, 6 gün, 7 gün, 8 gün, 9 gün, 10 gün ağırlıkları hassas terazide ölçüm yapılarak betonun bu süre zarfındaki kılcal yolla emdiği su miktarları tespit edilmiştir.

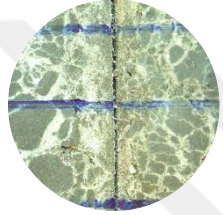
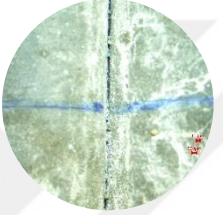

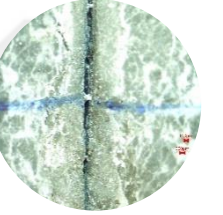
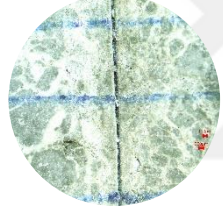
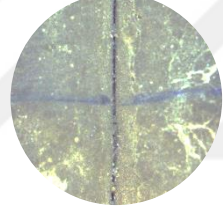
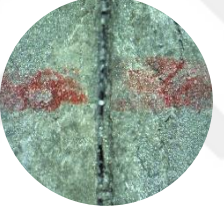
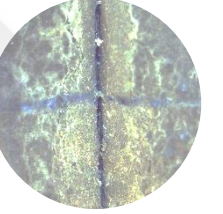
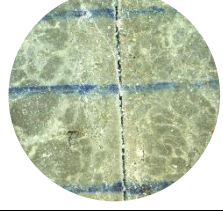
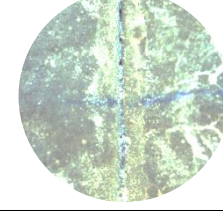
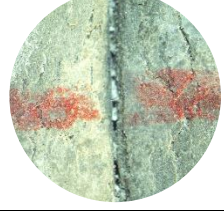
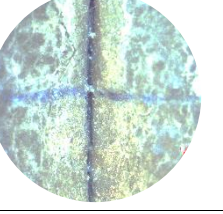
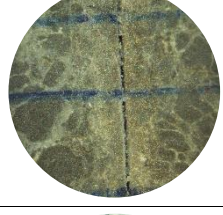
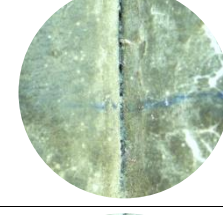
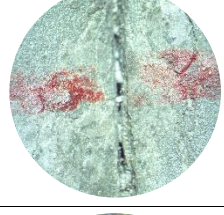
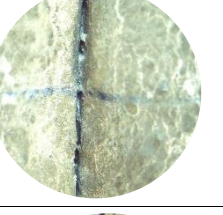
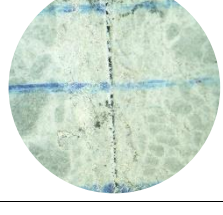
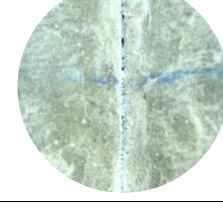
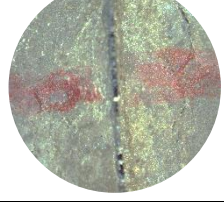
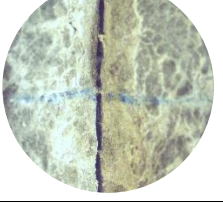
## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Yayılma Tablası Deneyi

Kristal katkıli numunelerin yayılması ortalama 10,3 cm iken kristal katkısız numunelerin yayılması 10,1 cm olarak ölçülmüştür. Kristal katkıli ve kristal katkısız numunelerin yayılmasında belirgin bir fark gözlemlenmemiştir.

### 4.2. Çatlak Kapanma Kabiliyeti

Tablo 4.1. Kristal Oluşturan Katkı İçeren ve İçermeyen Dar-Geniş Çatlaklı Örnekler

	1.SÜTUN		2.SÜTUN	
	0,35-C3-N	X-0,35-C3-N	0,35-C3-W	X-0,35-C3-W
3 Gün				
7 Gün				
14 Gün				
28 Gün				
56 Gün				

Temsili çatlaklar oluşturulmuş örneklerin 3, 7, 14, 28 ve 56 gün sonra kristal oluşturan katkı içeren-içermeyen, tuzlu suda kristal oluşturan katkı içeren-içermeyen ve mikro lifli kristal oluşturan katkılı-katkısız serilerin görselleri mikroskop altında görüntülenmiştir.

Tablo 4.1'in 1. sütununda görüldüğü gibi numunelerin üretildikten sonra 3. günde oluşturulan çatlakların belirtilen günlerdeki mikroskop görüntüleri bulunmaktadır. 1. sütunda bulunan 0,35-C3-N ile X-0,35-C3-N serilerinin görüntüleri karşılaştırılacak olunursa 14. günden itibaren kapanmalar belirgin bir seviyeye ulaşmış olup kristal katkı oluşturan serilerin çatlak kapanmalarındaki iyileşmelerinin yüksek seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı tablonun 2. sütununda aynı serinin geniş çatlaklı örnekleri sunulmuştur. Bu serilerde iyileşmenin daha az olduğu ve ileri yaşlardan itibaren iyileşmelerin belirli seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

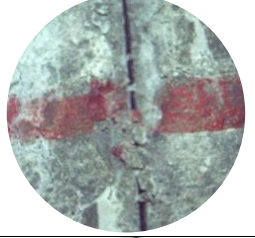
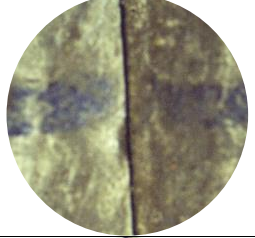
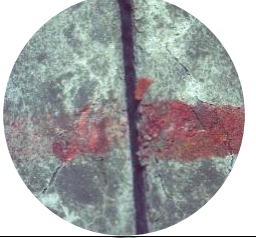
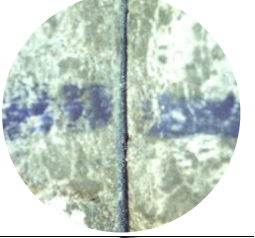
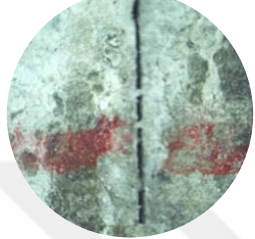
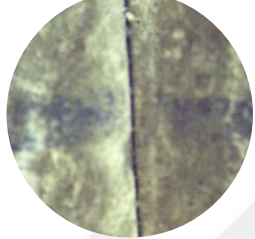
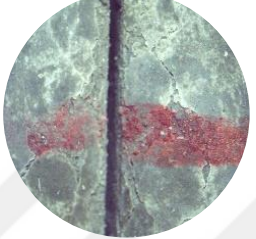
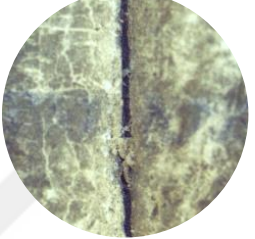
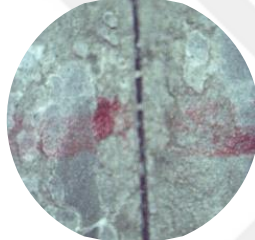
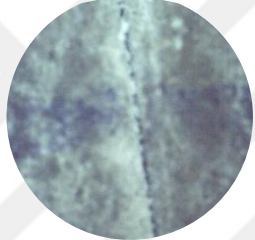
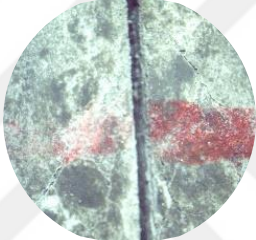
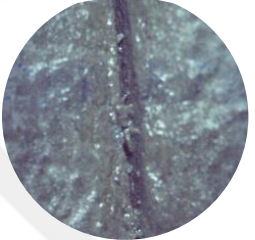
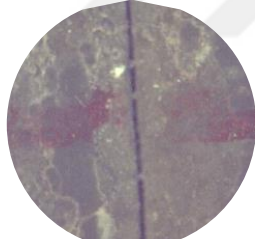
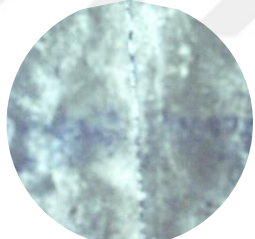
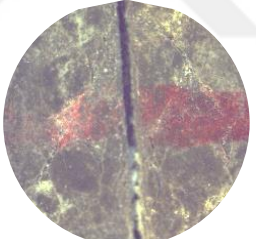
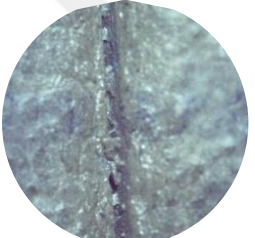
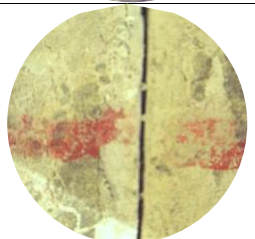
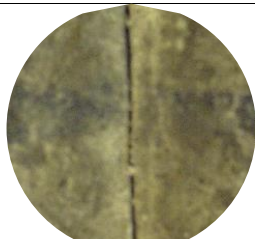
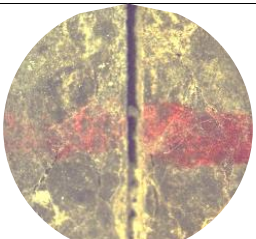
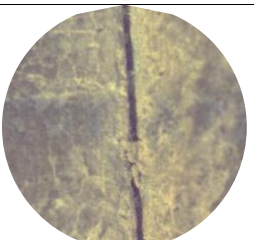
Tablo 4.1'in 1. sütun ve 2. sütun serileri birlikte incelendiğinde kristal oluşturan katkılı serilerin iyileşmelerinin, kristal oluşturan katkı içermeyen serilere göre daha belirgin seviyede olduğu görülmüştür.

Tablo 4.2'de elde edilen numunelerin tuzlu suda bekletildiği durumdaki çatlak iyileşmeleri fotoğraflanmıştır. Tablo 4.2'nin 1. sütununa göre kristal oluşturan katkı içeren numuneler içermeyen numunelere kıyasla 14. günden itibaren belirgin seviyede iyileşme gerçekleştirdiği gözlemlenmiştir. Özellikle 28. gün ve 56. gün numunelerine bakıldığında kristal oluşturan katkı içeren serilerin tuzlu suda kapanmalarının belirgin seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

Aynı serilerin geniş çatlaklarına bakıldığında ise Tablo 4.2'nin 2. sütununda görüntüler incelendiğinde kendiliğinden iyileşmenin daha ileri yaşlarda sağlanabildiği gözlemlenmiştir.

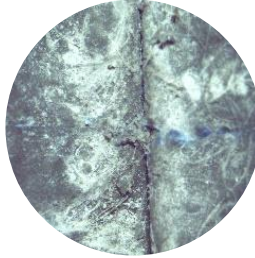
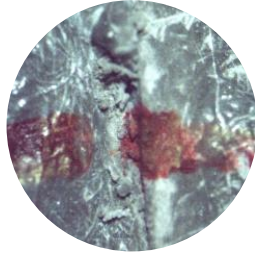



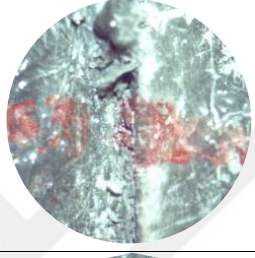

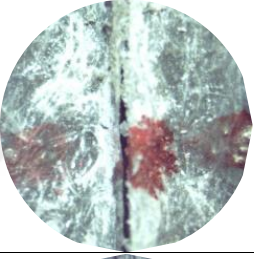
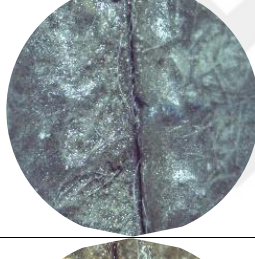
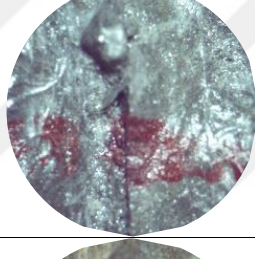
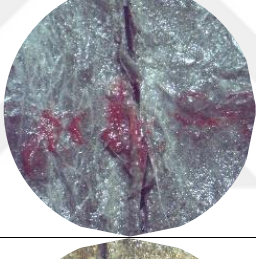
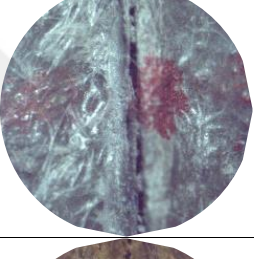
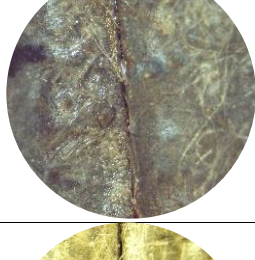
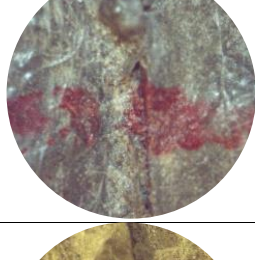
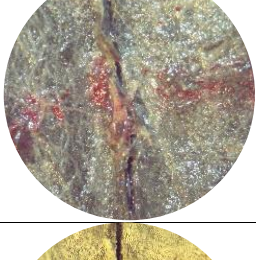
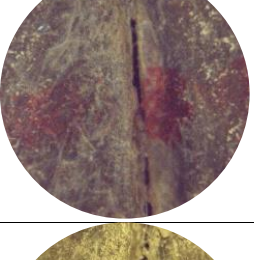
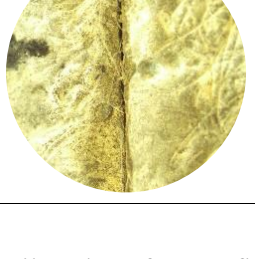
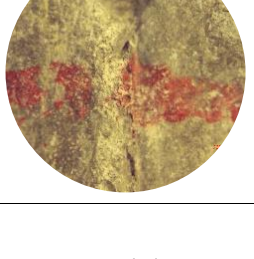
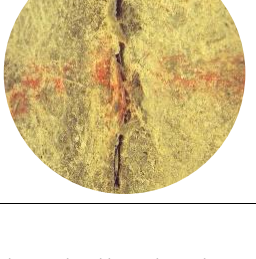
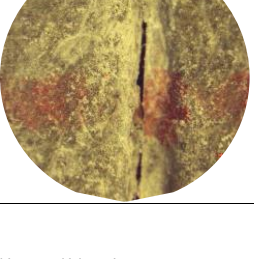
Çatlak genişliğinin daha büyük olduğu Tablo 4.2'nin 2. sütunun görüntüleri incelendiğinde kristal oluşturan katkı içermeyen serilerin, kristal oluşturan katkı içeren serilere göre iyileşmelerinin sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Kristal oluşturan katkı içeren geniş çatlaklı serilerde 28. günden itibaren iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir.

Tablo 4.2. Tuzlu Suda Kristal Oluşturan Katkı İçeren ve İçermeyen Dar-Geniş Çatlaklı Örnekler

	1.SÜTUN		2.SÜTUN	
	S-0,35-C3-N	SX-0,35-C3-N	S-0,35-C3-W	SX-0,35-C3-W
3 Gün				
7 Gün				
14 Gün				
28 Gün				
56 Gün				

Tablo 4.3'te mikro lif ile karıştırılmış kristal oluşturan katkı maddesi içeren ile içermeyen numunelerin dar çatlaklar ve geniş çatlaklardaki iyileşmelerinin görüntüleri alınmıştır. Dar çatlaklı numunelerin mikro lifli kristal oluşturan katkı içeren örnekleri içermeyen örneklerine kıyasla 7. günden itibaren iyileşmeleri Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Geniş çatlaklıların ise kristal oluşturan katkı maddeli numuneleri içermeyen numunelere kıyasla 7. günden itibaren iyileşme gösterdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.3. Mikro Lifli Kristal Oluşturan Katkı İçeren ve İçermeyen Dar-Geniş Çatlaklı Örnekler

	1.SÜTUN		2.SÜTUN	
	F-0,35-C3-N	FX-0,35-C3-N	F-0,35-C7-W	FX-0,35-C7-W
3 Gün				
7 Gün				
14 Gün				
28 Gün				
56 Gün				

Tüm mikroskop fotoğrafları görüntü işleme yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve çatlak açıklıkları belirlenmiştir. Çatlak kapanma oranları tüm seriler için 2 disk numunesinde 3 ayrı konumda alınan toplam 6 adet çatlak genişliği ölçümünün ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4. Çatlak Genişliği ile Çatlak Kapanma Oranı Arasındaki İlişki

	Seri ismi	Ortalama çatlak genişliği (µm)	Ortalama çatlak kapanma oranı (%)				
			3 gün	7 gün	14 gün	28 gün	56 gün
1. GRUP	0,35-C3-N	266,88	-	2,77	16,91	23,73	25,18
	0,35-C3-W	349,04	-	3,59	13,56	16,14	20,39
	0,35-C7-N	240,01	-	-	15,20	18,12	23,52
	0,35-C7-W	368,67	-	-	1,69	4,26	7,67
	0,35-C14-N	273,31	-	-	-	12,82	18,68
	0,35-C14-W	369,27	-	-	-	11,72	15,01
2. GRUP	X-0,35-C3-N	211,37	-	17,04	47,69	58,36	73,28
	X-0,35-C3-W	304,53	-	20,01	29,71	37,15	60,74
	X-0,35-C7-N	274,84	-	-	24,37	33,28	66,64
	X-0,35-C7-W	410,97	-	-	10,90	45,02	65,18
	X-0,35-C14-N	258,84	-	-	-	16,10	63,19
	X-0,35-C14-W	370,67	-	-	-	22,17	63,14
3. GRUP	S-0,35-C3-N	301,39	-	7,77	12,81	16,54	23,34
	S-0,35-C3-W	578,26	-	-	-6,23	7,03	15,66
	S-0,35-C7-N	284,98	-	-	15,07	25,87	19,14
	S-0,35-C7-W	565,72	-	-	-	8,46	20,57
	S-0,35-C14-N	240,51	-	-	-	23,29	27,45
	S-0,35-C14-W	528,12	-	-	-	2,34	10,79
4. GRUP	SX-0,35-C3-N	293,82	-	47,01	51,48	58,57	70,34
	SX-0,35-C3-W	327,58	-	15,72	20,96	28,90	50,67
	SX-0,35-C7-N	269,06	-	-	41,56	46,12	66,74
	SX-0,35-C7-W	332,03	-	-	45,13	50,59	67,09
	SX-0,35-C14-N	267,85	-	-	-	43,72	66,15
	SX-0,35-C14-W	471,95	-	-	-	58,04	70,56
5. GRUP	F-0,35-C3-N	238,65	-	3,75	13,50	29,95	56,90
	FX-0,35-C3-N	293,37	-	13,15	45,16	70,44	85,99
	F-0,35-C7-N	331,58	-	-	5,94	29,84	59,57
	FX-0,35-C7-N	330,82	-	-	11,76	44,28	88,27
	F-0,35-C14-N	288,03	-	-	-	30,78	58,48
	FX-0,35-C14-N	362,50	-	-	-	72,86	88,49
	F-0,35-C3-W	482,69	-	23,44	22,18	28,06	45,52
	FX-0,35-C3-W	460,99	-	42,10	42,73	76,25	90,06

Tablo 4.4'e bakıldığında, kristal oluşturan katkısız serilerde otojen iyileşme gözlemlenmiştir. 1. grup serilerinde çatlak genişliği arttıkça çatlak kapanma oranlarının daha düşük seviyelerde olduğu görülebilmektedir.

Büyük yaşlarda gerçekleşen kendi kendine iyileşmenin belirli oranda olduğu anlaşılmaktadır. 2. gruptaki kristal oluşturan katkı içeren serilerine bakıldığı zaman; çatlak kapanma oranlarının yüksek olduğu görülmüş olup katkının etkin bir şekilde beklenen görevini yerine getirdiği gözlemlenmiştir. 2. grup serileri arasında, en yüksek ortalama çatlak kapanma oranına sahip seri, ince çatlaklı seridir. Çatlak kapanma oranının, çatlak genişliği arttıkça azaldığı görülebilir, ancak referans serilerinden farklı olarak, kristal oluşturan katkı maddeleri kullanıldığında çatlak oluşum zamanı daha az etkili bir parametredir; bu serilerde yüksek kendi kendini iyileştirme değerleri de belirlenmiştir. Bu katkı maddelerinin özellikle erken yaşlarda dar çatlakları doldurduğu ve kapattığı gözlemlenmiştir.

3. grup serilerde numunelerin tuzlu suda kapanma oranlarına bakılmaktadır. Çatlak genişliği arttıkça kapanma oranlarının azaldığı gözlemlenmiştir. 3. grup serileri ile 1. grup serileri karşılaştırıldığında tuzlu suda bekletilen numunelerin çatlak kapanma oranları normal suda bekletilen numunelere göre belirgin bir fark oluşturmamıştır.

4. grup serilerde ise kristal katkı içeren serilerin tuzlu sudaki iyileşmelerine bakılmıştır. Tablo 4.4'te görüldüğü gibi kristal katkı içeren numunelerin içermeyenlere göre kapanma oranlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu grubun geniş çatlaklı serileri incelendiğinde çatlak genişliği arttıkça kristal oluşturan katkı maddesinin çatlak kapanma oranına etkisinin iyi seviyede olduğu gözlemlenmiştir.

5. grup serileri mikro lifli numuneler ile mikro lifli kristal oluşturan katkı içeren serilerin kapanma oranlarının gözlemlendiği kısmı kapsamaktadır. Bu gruptaki kristal oluşturan katkı içermeyen serilerde çatlak genişlikleri ile kapanma oranları arasında ilişkinin anlaşılır seviyede olmadığı görülmektedir.

Kristal oluşturan katkı içeren serilere bakıldığında katkı içermeyen serilere göre kapanma oranlarının daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca tüm serilere bakıldığında kristal oluşturan katkı içermeyen seriler incelendiğinde lif katkılı serilerin çatlak açılmasını önlediği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.4'de tüm grup seriler incelendiğinde, mikro lifli kristal oluşturan katkı içeren geniş çatlaklı serinin (FX-0,35-C3-W) çatlak genişliği yüksek seviyelerde olmasına rağmen kapanma oranının %90 seviyelere ulaştığı gözlemlenmiştir.

### 4.3. Basınç ve Eğilme Dayanımı

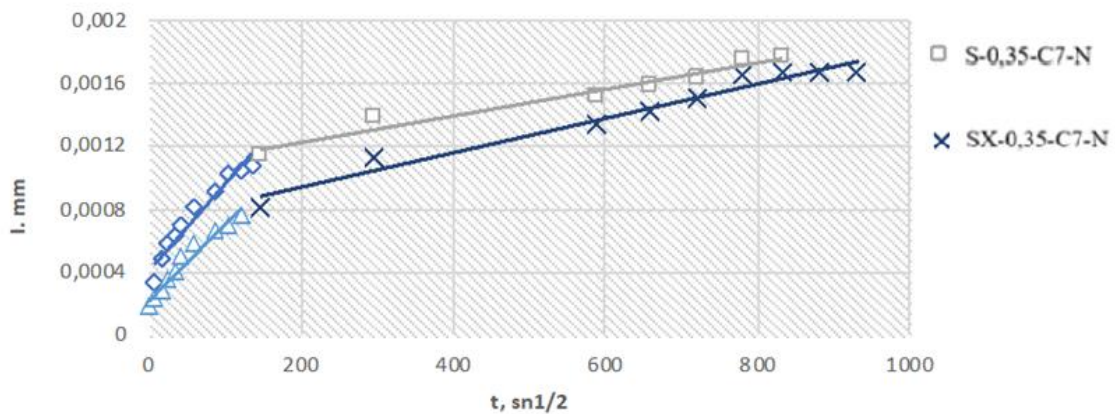
Dayanım deney sonuçlarının 7. ve 28. gündeki ortalama değerlerinin Tablo 4.5'te sunulmuş ve kristal oluşturan katkı ilavesinin harçların dayanımları üzerinde belirgin bir değişiklik yapmadığı belirlenmiştir.

Tablo 4.5. Basınç ve Eğilme Dayanımları

	Basınç Dayanımı (MPa)	
	7 gün	28 gün
Referans (0,35)	44,83	62,34
Kristal oluşturan katkı içeren (X-0,35)	45,96	60,95
	Eğilme Dayanımı (MPa)	
	7 gün	28 gün
Referans (0,35)	8,21	6,43
Kristal oluşturan katkı içeren (X-0,35)	7,54	7,52

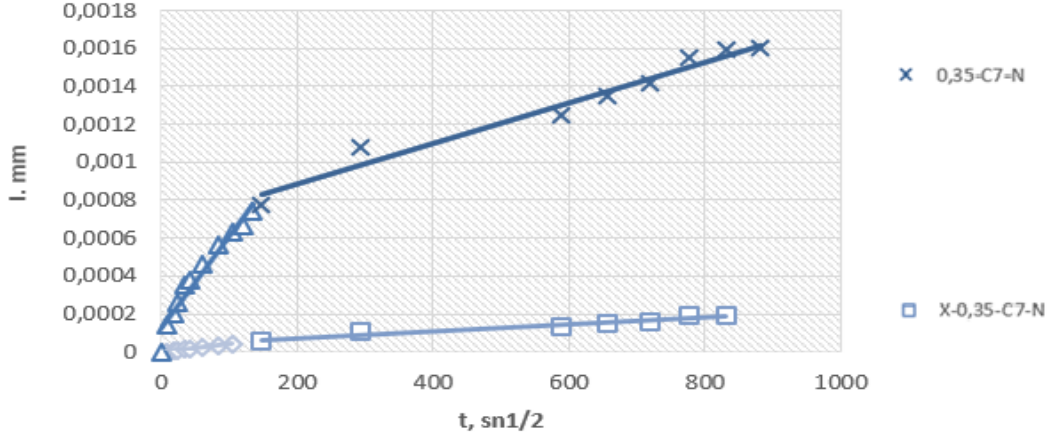
### 4.4. Kılcal Su Geçirirliği Deneyi

Üretilen harçların kılcal su emme zaman grafikleri, ASTM C 1585 standardına uygun olarak ölçülmüştür. Çalışılan tüm serilerde kristal oluşturan katkılı serilerin su işleme derinliklerinin (l), katkısız serilere kıyasla daha düşük olduğu gözlenmiştir. Şekil 4.1'de örnek olarak 7 gün sonra kendiliğinden iyileşmenin başladığı tuzlu suda kristal oluşturan katkı içermeyen ve tuzlu suda kristal oluşturan katkı içeren örneklerin karşılaştırması verilmiştir.



Şekil 4.1. Tuzlu Suda Kristal Oluşturan Katkı İçeren ve İçermeyen Harçların Kılcal Yolla Su Emme Derinlikleri

Şekil 4.2’de ise kristal oluşturan katkı içeren X-0,35-C7-N serisi ve kristal oluşturan katkı içermeyen 0,35-C7-N serilerinin karşılaştırılması sunulmuştur. Şekil 4.2’de görüldüğü üzere X-0,35-C7-N serisinin su işleme derinliği 0,35-C7-N serisine göre belirgin derecede düşüktür.



Şekil 4.2. Kristal Oluşturan Katkı İçeren ve İçermeyen Harçların Kılcal Yolla Su Emme Derinlikleri

## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Temsili çatlaklara sahip kristal oluşturan katkılı ve katkısız harç numuneleri, tuzlu suda kristal oluşturan katkılı ve katkısız harç numuneleri, mikro lifli kristal oluşturan katkılı ve katkısız harç numuneleri üzerinde gerçekleşen deneysel faaliyetler neticesinde aşağıda belirtilen sonuçlara ulaşılmıştır:

- Erken dönemde genişliği sınırlı olan çatlaklara sahip serilerin optik mikroskop altındaki görüntülerine bakıldığında, kristal oluşturan katkılı serilerde 14. günden itibaren kristal oluşturan katkı maddesinin belirgin seviyede kendiliğinden iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir.
- Tablo 4.4'de 1.grup serilerden çatlak genişliği yüksek olan 0.35-C7-W serisinde iyileşmenin kısmi olduğu fakat aynı grup serilerde kristal katkılı serilere bakıldığında iyileşmenin belirgin olduğu gözlemlenmiştir. Bu belirgin iyileşmenin kristal oluşturan katkı maddesi ilavesi sonucunda gerçekleştiği anlaşılmaktadır.
- Tuzlu suda kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen dar çatlaklı örnekler ile geniş çatlaklı örnekler incelendiğinde kristal oluşturan katkı içeren dar çatlaklı örneklerdeki iyileşmelerin kristal oluşturan katkı içermeyen örneklerle göre 14. günden itibaren ciddi seviyede kendiliğinden iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir. Aynı serilerin geniş çatlaklı örneklerinde ise kısmi iyileşmeler görülmüş olup, kendiliğinden iyileşmeler ileri yaşlarda gözlemlenmiştir.
- Mikro lifli kristal oluşturan katkı içeren ve içermeyen dar çatlaklı örnekler ile geniş çatlaklı örnekler incelendiğinde hem dar çatlaklı örnekler hem de geniş çatlaklı örneklerde kristal oluşturan katkı içeren karışımlarda kristal oluşturan katkı içermeyenlere göre 7. günden itibaren belirgin seviyede kendiliğinden iyileşmelerin olduğu gözlemlenmiştir.
- Çatlak genişliği yükseldikçe çatlak kapanma oranının azaldığı ancak kristal oluşturan katkılı serilerde katkısız serilere göre çatlak oluşma zamanının daha az belirleyici bir faktör olduğu ve bu serilerde yüzdeler olarak büyük oranda kendi kendine iyileşmelerin gözlemlendiği tespit edilmiştir.
- Tüm seriler için çatlak oluşma günlerine göre çatlak kapanma oranları incelendiğinde, katkılı serilerin kapanma oranlarının katkısız serilere göre belirgin bir şekilde yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle mikro lifli katkılı serilerin katkısız serilere göre kapanma oranları oldukça yüksek olduğu gözlemlenmiştir.

- Mikro lifli kristal oluşturan katkı içermeyen serilerde çatlak genişlikleri ile kapanma oranları arasında ilişkinin belirgin seviyede olmadığı anlaşılmıştır. Mikro lifli kristal oluşturan katkı içeren serilere bakıldığında katkı içermeyen serilere göre kapanma oranlarının daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Kristal oluşturan katkıların kullanımı, harçların basınç ve eğilme dayanımı üzerinde belirgin bir etki yaratmamıştır.
- Kılcal su geçirimliliği deneyindeki grafikler incelendiğinde kristal oluşturan katkı içeren serilerin su işleme derinlikleri, katkı içermeyen serilere göre düşük olduğu gözlemlenmiştir.



## KAYNAKLAR

- A.C.I. Committee 224, (2007). Causes, Evaluation, and Repair of Cracks in Concrete Structures. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Abrams, D. A. (1919). *Design of concrete mixtures* (Vol. 1). Structural Materials Research Laboratory, Lewis Institute.
- Akman, M. S. (1997). Yapı Malzemeleri. İstanbul: İTÜ İnşaat Fakültesi Yayınları.
- Almusallam, A. A. (2003). Effect of environmental conditions on the properties of concrete in arid regions. *Cement and Concrete Research*, 33(2), 355-364.
- Bazant, Z. P. (1994). Mechanics of quasibrittle materials. *Applied Mechanics Reviews*, 47(6), 355-378.
- Bazant, Z. P., & Planas, J. (2019). *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*. Routledge: CRC Press.
- Bergin, M., Schlangen, E., & Van Breugel, K. (2014). Influence of microstructure on transport properties of concrete. *Cement and Concrete Research*, 65(7), 135-142.
- Cappelleso, V. G., Van Mullem, T., Gruyaert, E., Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2024). Self-healing concrete with a bacteria-based or crystalline admixture as Healing agent to prevent chloride ingress and corrosion in a marine environment. *Developments in the Built Environment*, 100486.
- Cuenca, E., Mezzena, A., & Ferrara, L. (2021). Synergy between crystalline admixtures and nano-constituents in enhancing autogenous healing capacity of cementitious composites under cracking and healing cycles in aggressive waters. *Construction and Building Materials*, 266, 121447.
- Çorbacıoğlu, C. U. (2008). Beton karışım tasarımının geçirimsizliğe ve mekanik özelliklere etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 501061140.
- Belie, N. (2016). Application of bacteria in concrete: A critical review. *RILEM Technical Letters*, 1, 56-61.
- Demirel, B. (2008). Betonda Rötire Çatlakları ve Önlenmesi. *İnşaat Teknolojisi Dergisi*, 21(3), 12-18.
- Erdoğan, T. Y. (2003). Beton, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim AŞ Yayını, 1. Baskı, Ankara, 741s.
- Eriç, M. (1994). Yapı Fiziği ve Malzemesi, (s. 367), İstanbul: Literatür Kitabevi
- Ersoy, U. (2001). Betonarme Elemanların Tasarım ve Hesap Esasları. *İTÜ Yayınları*. İstanbul: Evrim Yayınları

- Ghorbani, S., Tang, W., & Schlangen, E. (2016). The effect of aggregate grading on self-healing concrete performance. *Materials and Structures*, 49(4), 1045-1055.
- Grzybowski, M. (1991). Crack Formation and Propagation in Cementitious Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(1), 77-94.
- Hearn, N. (1998). Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: *What is the difference?* *Materials and Structures*, 31(8), 563-567.
- Huang, H., Ye, G., Qian, C., & Schlangen, E. (2016). Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. *Materials & Design*, 92, 499-511.
- Huang, H., Qian, C., & Wang, X. (2022). Research advances in self-healing cementitious materials. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 20(1), 17-31.
- Jonkers, H. M. (2007). Self-healing concrete: A biological approach. *Springer Handbook of Mechanical Engineering*, 12(3), 425-452.
- Jonkers, H. M., Thijssen, A., Muyzer, G., Copuroglu, O., & Schlangen, E. (2010). Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. *Ecological engineering*, 36(2), 230-235.
- Kan, L. L., & Shi, H. S. (2012). Investigation of self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites (ECC) materials. *Construction and Building Materials*, 29, 348-356.
- Kim, J. K., Moon, Y. H., & Eo, S. H. (2015). Effects of curing conditions on the properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Research*, 35(5), 1174-1181.
- Kosmatka, S. H., Panarese, W. C., & Kerkhoff, B. (2011). *Design and control of concrete mixtures* (Vol. 5420, pp. 60077-1083). Skokie, IL: Portland cement association.
- Lawler, J. S., Zampini, D., & Shah, S. P. (2005). Microfiber and macrofiber hybrid fiber-reinforced concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 595-604.
- Lerch, W. (1957). Plastic shrinkage. *In Journal Proceedings* (Vol. 53, No. 2, pp. 797-802).
- Li, V. C. (2008). Engineered cementitious composites (ECC) material, structural, and durability performance. *Concrete Construction Engineering Handbook* (pp. 59-77). New York: CRC Press.
- Mays, G. C. (Ed.). (1991). *Durability of concrete structures: investigation, repair, protection*. New York: CRC Press.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concreto. Microestrutura, propriedades e materiais*, 2. Sao Paulo: IBRACON

- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). Concrete Prentice Hall PTR. *Upper Saddle River*.
- Muratoğlu, Ö. (2009). Betonda Plastik Rötme Çatlaklarının Nedenleri ve Önlenmesi. *İnşaat Teknolojisi Dergisi*, 16(4), 24-31.
- Neville, A. M. (2022). *Properties of Concrete*. India: Pearson Education Limited.
- Onaran, K., (2003). Malzeme Bilimi 377s, Bilim Teknik Yayınevi, İstanbul.
- Page, C. L., & Page, M. M. (Eds.). (2007). *Durability of concrete and cement composites*. Elsevier.
- Rathore, R. (2021). A review of bacteria-based self-healing concrete. *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal*, 11(12), 839-844.
- Ravina, D., & Shalon, R. (1968, April). Plastic shrinkage cracking. In *Journal reinforced concrete*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(5), 595-604. Separating Its Mechanisms-Reply. *Materials And Structures*, 27(174), 618-619.
- Roig-Flores, M., Moscato, S., Serna, P., & Ferrara, L. (2015). Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. *Construction and Building Materials*, 86, 1-11.
- Roig-Flores, M., Pirritano, F., Serna, P., & Ferrara, L. (2016). Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. *Construction and Building Materials*, 114, 447-457.
- Snoeck, D., Van Tittelboom, K., Steuperaert, S., Dubruel, P., & De Belie, N. (2014). Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(1), 13-24.
- Tasdemir, M. A. (2002). Betonun Dayanım ve Durabiliteye Göre Tasarımı ve Üretimi. *IMO Istanbul Subesi, Sürekli Eğitim Seminerleri, Harbiye-Istanbul*.
- Taylor, H. F. (1997). *Cement chemistry* (Vol. 2, p. 459). London: Thomas Telford.
- Van Tittelboom, K., & De Belie, N. (2013). Self-healing in cementitious materials-A review. *Materials*, 6(6), 2182-2217.
- Yang, Y., Yang, E. H., & Li, V. C. (2011). Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age. *Cement and concrete research*, 41(2), 176-183.
- Zhang, Z., Qian, S., & Ma, H. (2014). Investigating mechanical properties and self-healing behavior of micro-cracked ECC with different volume of fly ash. *Construction and Building Materials*, 52, 17-23.

- Zhang, W., Zheng, Q., Ashour, A., & Han, B. (2020). Self-healing cement concrete composites for resilient infrastructures: A review. *Composites Part B: Engineering*, 189, 107892.
- Zhao, Y., Hu, X., Shi, C., Zhang, Z., & Zhu, D. (2021). A review on seawater sea-sand concrete: Mixture proportion, hydration, microstructure and properties. *Construction and Building Materials*, 295, 123602.
- Wang, J. Y., Snoeck, D., Van Vlierberghe, S., Verstraete, W., & De Belie, N. (2014a). Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete. *Construction and building materials*, 68, 110-119.
- Wang, K., Wang, X., & Xiong, Y. (2014b). Mechanisms of self-healing in cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*, 45(4), 184-193.
- Wiktor, V., & Jonkers, H. M. (2011). Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete. *Cement and concrete composites*, 33(7), 763-770.

## KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

**Bulut, B.**, Türkmen, S., (2024). Çimentolu Malzemelerde Çatlakların Kendiliğinden İyileşmesi, *14. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi*, İstanbul, Türkiye, 28-29 Aralık 2024.



## ÖZGEÇMİŞ

Burak BULUT İlk, orta ve lise öğrenimini Elazığ'da tamamladı. 2017 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Tezli Yüksek Lisans çalışmalarını 2024 yılında tamamladı. 2018 yılından beri Türk Deniz Kuvvetleri'ndeki görevine devam etmektedir.

