

DOKUZ EYLÜL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO BAZLI
KOMPOZİT HARÇ KARIŞIMLARININ
DAYANIKLILIĞININ GELİŞTİRİLMESİ

Ebru ERTEN

Ekim, 2016

İZMİR

**YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO BAZLI
KOMPOZİT HARÇ KARIŞIMLARININ
DAYANIKLILIĞININ GELİŞTİRİLMESİ**

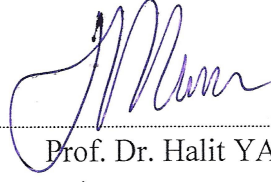
**Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Yapı Malzemesi Programı**

Ebru ERTEN

**Ekim, 2016
İZMİR**

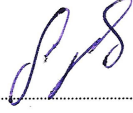
DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU

EBRU ERTEN tarafından PROF. DR. HALİT YAZICI yönetiminde hazırlanan “YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO BAZLI KOMPOZİT HARÇ KARIŞIMLARININ DAYANIKLILIĞININ GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tez tarafımızdan okunmuş, kapsamı ve niteliği açısından bir doktora tezi olarak kabul edilmiştir.



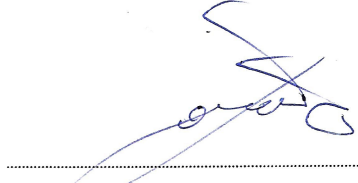
Prof. Dr. Halit YAZICI

Yönetici



Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Yrd. Doç. Dr. Abdullah SÖNMEZ

Tez İzleme Komitesi Üyesi



Doç. Dr. Çeçen ANDIĞI ÇAKIR

Jüri Üyesi



Doç. Dr. Tahir Kemal ERDEM

Jüri Üyesi



Prof. Dr. Emine İlknur CÖCEN

Müdür

Fen Bilimleri Enstitüsü

TEŞEKKÜR

Doktora tezi çalışmalarımın ilk adımlarını atmamda yolumu aydınlatan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Bülent BARADAN'a teşekkürlerimi sunarak sıhhatli, huzurlu bir emeklilik yaşamı dilerim.

Sabır taşı olsa çatlardı diyebileceğimiz günlerde dahi çalışmalarımda beni cesaretlendiren, tatlı-sert yaklaşımıyla tez çalışmasına kanalize olmamı sağlayan, sıkıntılı günlerimde benden umudu kesmeyerek teze yoğunlaşmam yönünde ısrar ederek bu günlere gelmemi sağlayan tez yöneticisi ve danışman hocam Sayın Prof. Dr. Halit YAZICI'ya sonsuz teşekkürlerimi ve minnetlerimi sunarım.

Lisansüstü öğrenimim süresince kendimi geliştirmem konusunda yol gösterici ve nazik tavırlarıyla insan odaklı çalışma yönteminin mihenk taşlarından olan, yüksek lisans tez danışmanım ve aynı zamanda tez izleme komitesi üyelerimden Sayın Prof. Dr. Selçuk TÜRKEL'e; lisansüstü öğrenimim esnasında gerek ders aşamasında, gerekse tez izleme toplantılarında soru-cevap yöntemiyle araştırmacılığa sevk ederek gelişimime destek olan sağduyulu hocam Sayın Prof. Dr. İ. Akın ALTUN'a; mimari bakış açısı ile tezin önemli detaylarına odaklanmamı sağlayan hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Abdullah SÖNMEZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Lisansüstü öğrenimim süresince laboratuvar tecrübelerinden ve imkanlarından faydalanmama olanak tanıyan değerli hocalarım Sayın Doç. Dr. Kamile TOSUN FELEKOĞLU'na ve Sayın Doç. Dr. Burak FELEKOĞLU'na teşekkür ederim.

Laboratuvar ortamındaki ekipmanların kullanımı konusunda, teoride ve pratikte yardımcı olan hocam Sayın Yrd. Doç Dr. Hüseyin YİĞİTER'e, güler yüzünü benden esirgemediği için teşekkürlerimi sunarım.

Çok değerli arkadaşım ve tez çalışmasında yoluma ışık tutan hocam Dr. İnş. Müh. Çağlar YALÇINKAYA'ya ve İnş. Yük. Müh. Ahsanollah BEGLARIGALE'ye;

laboratuar donanımı hakkında teknik destek sağlayan laboratuar teknisyeni Kamil TAHTA'ya, Suleyman ustaya, atıksu laboratuvarının kimya konularında yardımlarını esirgemeyen Çevre Mühendisliği Bölümü Çevre Bilimleri Anabilim Dalı Öğretim Üyesi Sayın Dr. Zihni YILMAZ'a ve tekniker Orhan ÇOLAK'a, Maden Mühendisliği laboratuvarında çalışmakta olan kimyager Fatih TURAN'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarda kullandığım malzemeleri sağlayan Pomza Export, BASF, OYAK Denizli Çimento, OYAK Adana Çimento, Bekaert firmalarına teşekkür ederim.

Tez çalışmasını 110M691 numaralı araştırma projesi (Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Boyutsal Kararlılığının İncelenmesi ve Boyutsal Kararlılığın Durabilite Özelliklerine Etkisinin Araştırılması) ile destekleyen Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Grubu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederim.

Tezimin hazırlamasında imkân ve desteklerini sunan, başta tüm aile bireylerim olmak üzere, Manisa Çevre ve Şehircilik İl Müdürlüğümüzün yönetim kadrosuna, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'ne teşekkürü bir borç bilirim.

Ebru ERTEN

YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO BAZLI KOMPOZİT HARÇ KARIŞIMLARININ DAYANIKLILIĞININ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZ

Çalışmanın birinci kısmında, erken yaşta iki farklı ortamda (ideal ortam ve kuruma ortamı) bekletilen, mikro çelik lif içeren Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) karışımlarının erken yaş kısıtlanmış büzülme çatlaklarının mekanik özelliklere ve NaCl çözeltisinde ıslanma-kurumaya dayanıklılığına etkisi araştırılmış, iç yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında, erken yaşta iki farklı ortamda (ideal ortam ve kuruma ortamı) bekletilen, mikro çelik lif içeren ve içermeyen UYPB karışımlarının, erken yaş kısıtlanmış büzülme çatlaklarının çelik donatının korozyon gelişimine etkisi deneysel olarak belirlenmiştir. Agrega miktarı ve gradasyonu, mineral katkıları, lif hacmi ve kür koşulları gibi parametrelerin UYPB'nin büzülme davranışına ve çatlak gelişimine etkisi büyüktür. Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının ıslanma-kuruma direncine ve çelik donatının korozyonuna etkisi belirlenmiştir. Erken yaşta kuruma ortamı sebebiyle kısıtlanmış büzülme çatlaklarına sahip olan karışımların ıslanma-kuruma çevrimleri sonrası basınç dayanımı kaybı, ideal koşullarda saklananlardan daha fazladır. Düşük su/bağlayıcı oranlı UYBP örneklerinin donatıyı korumada oldukça iyi performans gösterdiği görülmüştür. UYPB'nin en önemli özelliği, geçirimsiz yapısı nedeniyle sağladığı üstün durabilite (kalıcılık) özelliğidir. Çalışma kapsamında yapılan analizler, uçucu kül ikamesinin ve mikro çelik lif takviyesinin çatlak oluşumunu azaltarak donatı korozyonuna karşı korumayı geliştirdiğini göstermiştir. UYPB karışımlarının kalıcılık özelliklerinin korunması için erken yaş büzülme çatlaklarının önlenmesi amacıyla döküm aşamasında gerekli önlemler alınmalıdır.

Anahtar Kelimeler: Ultra yüksek performanslı beton, kısıtlanmış büzülme çatlakları, kalıcılık, ıslanma-kuruma, klorid korozyonu, donatı çeliği, korozyon potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu.

DURABILITY IMPROVEMENT OF HIGH PERFORMANCE CEMENT BASED COMPOSITE MORTARS

ABSTRACT

In the first part of the study, effects of early age restrained shrinkage cracks on mechanical properties and durability performance of micro steel fiber reinforced UHPC, exposed to two different conditions (ideal conditions and drying conditions) at early age and wetting-drying effect of NaCl solution, were investigated. Test results were supported by the micro-structural investigations. In the second part of the study, effects of early age restrained shrinkage cracks on corrosion of steel reinforcement embedded in UHPC with and without micro steel fibers, exposed to two different conditions (ideal conditions and drying conditions) at early age, were determined experimentally. Parameters such as aggregate content and grading, mineral admixtures, fiber content and curing conditions have a great influence on the crack behaviour caused by the shrinkage of the UHPC. The importance of restrained shrinkage cracks on wetting-drying durability and corrosion of embedded steel of UHPC was also determined. Loss of the compressive strength after wetting-drying cycles of mixtures with restrained shrinkage cracks due to early age drying conditions is greater than that ideal conditions. UHPC mixtures which consist of low water to binder ratio, performed very well to protect the embedded steel from corrosion. The most important characteristic of UHPC is superior durability due to its impermeable nature. The analysis conducted in this study revealed that, fly ash replacement and micro steel fiber reinforcement enhanced protection against corrosion of rebars by means of reducing crack formation. In order to maintain the durability properties of UHPC, necessary precautions should be taken to prevent early age cracks.

Keywords: Ultra high performance concrete, restrained shrinkage cracks, durability, wetting-drying, chloride corrosion, reinforcement bar, corrosion potential, corrosion current density.

İÇİNDEKİLER

| | Sayfa |
|-------------------------------------------------------------------------|-----------|
| DOKTORA TEZİ SINAV SONUÇ FORMU | ii |
| TEŞEKKÜR..... | iii |
| ÖZ | v |
| ABSTRACT..... | vi |
| ŞEKİLLER LİSTESİ | x |
| TABLolar LİSTESİ..... | xvi |
| | |
| BÖLÜM BİR – GİRİŞ | 1 |
| | |
| BÖLÜM İKİ - LİTERATÜR BİLGİLERİ..... | 5 |
| | |
| 2.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB)..... | 5 |
| 2.2 Kısıtlanmış Büzülme Durumunda Çatlak Gelişiminin Belirlenmesi | 7 |
| 2.3 Betonda Korozyon Gelişimi..... | 13 |
| 2.3.1 Korozyon | 13 |
| 2.3.2 Korozyon Gelişimi..... | 13 |
| 2.3.3 Betonarme Donatısının Korozyonu | 15 |
| 2.3.4 Betonarme Elemanlarda Korozyon Hasarları | 16 |
| 2.3.5 Donatıda Korozyon Mekanizmaları | 17 |
| 2.3.6 Çatlaklı Betonda Korozyon | 18 |
| 2.3.7 Elektrokimyasal Korozyonun Gelişimini Etkileyen Faktörler | 19 |
| 2.4 Korozyon Hızı | 26 |
| 2.5 Korozyonun İzlenmesi | 27 |
| 2.5.1 Yarı Hücre Potansiyeli..... | 28 |
| 2.5.2 Polarizasyon..... | 29 |
| 2.6 Betonarmede Korozyon Hızı Değerleri..... | 31 |
| 2.6.1 I_{corr} Değeri Aralıkları | 31 |
| | |
| BÖLÜM ÜÇ - DENEYSEL ÇALIŞMANIN AMACI VE YÖNTEMİ..... | 33 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı | 33 |
| 3.2 Deneysel Çalışmanın Yöntemi..... | 33 |
| BÖLÜM DÖRT - KULLANILAN MALZEMELER | 35 |
| 4.1 Çimento ve Puzolanlar | 35 |
| 4.2 Agregalar | 37 |
| 4.3 Mikro Çelik Lif | 38 |
| 4.4 Kimyasal Katkılar..... | 39 |
| 4.5 Su..... | 40 |
| 4.6 Çelik Donatı | 40 |
| BÖLÜM BEŞ - DÖKÜM PLANI VE NUMUNE SAYILARI | 42 |
| 5.1 Islanma-Kuruma Çalışmasında Döküm Planı ve Numune Sayıları | 42 |
| 5.2 Donatı Korozyonu Çalışmasında Döküm Planı ve Numune Sayıları | 44 |
| 5.3 Karışım Oranları..... | 45 |
| 5.3.1 Islanma-Kuruma Çalışmasında Karışım Oranları | 46 |
| 5.3.2 Donatı Korozyonu Çalışmasında Karışım Oranları..... | 47 |
| BÖLÜM ALTI - KULLANILAN CİHAZLAR VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ. 48 | |
| 6.1 Erken Yaş Lineer Büzülme Ölçüm Sistemleri | 48 |
| 6.2 Islanma Kuruma Çalışmasında Kalıpların ve Karışımların Hazırlanması, Yerleştirme Prosedürü, Ölçüm Yöntemleri..... | 49 |
| 6.2.1 Islanma - Kuruma Dayanıklılığının Araştırılması | 52 |
| 6.2.2 Kısıtlanmış Büzülme Çatlaklarının Yapısının Değerlendirilmesi | 53 |
| 6.2.3 Ultrases Deneyi..... | 55 |
| 6.2.4 Mekanik Deneyler | 56 |
| 6.2.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM/EDS) İncelemesi..... | 57 |
| 6.3 Korozyon Çalışmasında Kalıpların ve Karışımların Hazırlanması, Yerleştirme Prosedürü, Ölçüm Yöntemleri..... | 58 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| 6.3.1 Kısıtlanmış Büzülme Çatlaklarının Yapısının Değerlendirilmesi | 63 |
| 6.3.2 Korozyon Deneyleri için Yapılan Numune Hazırlıkları..... | 64 |
| 6.3.3 Üç Elektrotlu Sistem ile Korozyon Deneyi | 66 |
| 6.3.4 Donatılarda Kütle Kayıpları | 69 |
| 6.3.5 Karışımların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi | 70 |

BÖLÜM YEDİ - KISITLANMIŞ BÜZÜLME ÇATLAKLARININ TUZLU SUDA ISLANMA-KURUMA DAYANIKLILIĞINA ETKİSİ

72

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1 Karışımların Erken Yaş Büzülme Davranışı | 72 |
| 7.1.1 Kısıtlanmış Büzülme Davranışı | 75 |
| 7.2 Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi..... | 75 |
| 7.2.1 Islanma-Kuruma Çevrimlerinin Büzülme Çatlaklarına Etkisi | 75 |
| 7.2.2 Ses Geçiş Hızlarının Değerlendirilmesi..... | 81 |
| 7.2.3 Islanma-Kuruma Çevrimlerinin Eğilme Performansına Etkisi..... | 83 |
| 7.2.4 Islanma-Kuruma Çevrimlerinin Basınç Dayanımına Etkisi | 91 |
| 7.2.5 Kütle Değişimi, Klor İşleme ve Karbonatlaşma Derinlikleri | 100 |

BÖLÜM SEKİZ - KISITLANMIŞ BÜZÜLME ÇATLAKLARININ ÇELİK DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ

106

| | |
|------------------------------------------------------------------------|-----|
| 8.1 Korozyon Öncesi Kısıtlanmış Büzülme Çatlaklarının İncelenmesi..... | 106 |
| 8.2 Üç Elektrotlu Sistem Verilerinin Değerlendirilmesi..... | 114 |
| 8.3 Mekanik Özellikler..... | 125 |

BÖLÜM DOKUZ - SONUÇLAR VE ÖNERİLER

127

| | |
|-------------------|-----|
| 9.1 Sonuçlar..... | 127 |
| 9.2 Öneriler..... | 129 |

KAYNAKLAR

130

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 2.1 Lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerin sınıflandırılması | 6 |
| Şekil 2.2 Tip I portland çimentosu ile üretilen betonların kuruma büzülmesi..... | 7 |
| Şekil 2.3 Plastik büzülme çatlak standart ölçümü..... | 8 |
| Şekil 2.4 Kısıtlanmış büzülme çatlak ölçüm düzeneği - halka testi..... | 9 |
| Şekil 2.5 Karbonatlaşma, klorür iyonları veya asit etkisi nedeniyle betonun donatıyı korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması | 16 |
| Şekil 2.6 Korozyon sonucu betonarme elemanlarda görülen hasar çeşitleri | 17 |
| Şekil 2.7 Çatlak bölgesinde korozyonun gelişimi..... | 19 |
| Şekil 2.8 Yarı hücre potansiyel ölçümü | 28 |
| Şekil 2.9 Polarizasyon eğrisinin anodik ve katodik kollarının ekstrapolasyonu ile hesaplanmış korozyon yoğunluğu, Icorr | 30 |
| Şekil 2.10 Laboratuvarda farklı koşullarda yapılan birçok deneyden sonra elde edilen Icorr değeri aralıkları | 31 |
| Şekil 2.11 Icorr değerlerinin fonksiyonu olarak donatı çapının/donatı kesitinin zamanla azalması..... | 32 |
| Şekil 4.1 Mikro Çelik Lifler..... | 39 |
| Şekil 4.2 Donatı korumada kullanılan solventsiz epoksi malzemesi | 40 |
| Şekil 5.1 Islanma-kuruma çalışmasının akış diyagramı..... | 43 |
| Şekil 5.2 Donatı korozyonu çalışmasının akış diyagramı..... | 44 |
| Şekil 6.1 Lazer sensör ile büzülme ölçümü | 48 |
| Şekil 6.2 Erken yaş büzülme test kabini | 49 |
| Şekil 6.3 Erken yaş büzülme kalıbı..... | 49 |
| Şekil 6.4 40x40x170 mm ebatlı büzülme kısıtlayıcı kalıp sistemi..... | 50 |
| Şekil 6.5 Hobart mikser kullanılarak karışımların hazırlanması..... | 50 |
| Şekil 6.6 Karışımların kalıba yerleştirilmiş hali | 51 |
| Şekil 6.7 Taze karışımların iklim kabineye yerleştirilmesi | 52 |
| Şekil 6.8 Otomatik ıslanma – kuruma kabini..... | 53 |
| Şekil 6.9 Kısıtlanmış numunelerde yüzey isimlendirmesi..... | 55 |
| Şekil 6.10 Çatlak mikroskobu (Dino Capture 2.0) ile çatlak açıklıklarının ölçümü.. | 55 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 6.11 Ses geçiş hızlarının belirlenmesi..... | 56 |
| Şekil 6.12 Üç noktalı eğilme deney düzeneği..... | 57 |
| Şekil 6.13 Donatıların temizlenmesi..... | 58 |
| Şekil 6.14 Donatıların tartılarak kodlanması | 58 |
| Şekil 6.15 Döküm yüzeyinde 1 cm pas payı kalınlığına sahip betonarme örneğin şematik en kesit görünümü..... | 59 |
| Şekil 6.16 Bir numunenin şematik çizimi ve fotoğrafı | 59 |
| Şekil 6.17 Kısıtlanmış (a) ve serbest (b) numune kalıpları..... | 60 |
| Şekil 6.18 Karışımların hazırlanmasında kullanılan Zenith markalı mikser..... | 61 |
| Şekil 6.19 Karışımların kalıplara yerleştirilmesi | 61 |
| Şekil 6.20 Üst yüzeyde yer alan lifler | 62 |
| Şekil 6.21 Taze karışımların iklimlendirme kabineye yerleştirilmesi (Kuruma Koşulu = $30\pm 1^{\circ}\text{C}$, % 50 ± 2 bağıl nem)..... | 62 |
| Şekil 6.22 Numune kaplama ve kablolama aşamaları | 63 |
| Şekil 6.23 Kısıtlanmış numunelerde yüzey isimlendirmesi..... | 64 |
| Şekil 6.24 Epoksi ile donatı uçlarını kaplama işlemi..... | 65 |
| Şekil 6.25 Yetersiz epoksi kaplaması yapılan çelik donatıda gelişen korozyon..... | 65 |
| Şekil 6.26 Üç elektrotlu sistemin kullanıldığı deney düzeneğinin şematik çizimi | 67 |
| Şekil 6.27 Korozyon ölçüm sistemi | 67 |
| Şekil 6.28 Deney düzeneğini oluşturan elektrotlar | 68 |
| Şekil 6.29 Betonarme numunelerde polarizasyon eğrisi ve Tafel analizi..... | 69 |
| Şekil 6.30 Döner çelik fırça kullanılarak donatı korozyonunun temizlenmesi..... | 70 |
| Şekil 6.31 Hassas Terazî ile donatıda kütle kaybı ölçümü..... | 70 |
| Şekil 7.1 Lif içermeyen (a) ve lifli (b) UYPB karışımlarının erken yaş bünyesel büzülmesi..... | 73 |
| Şekil 7.2. Lif içermeyen (a) ve lifli (b) UYPB karışımlarının erken yaş kuruma büzülmesi..... | 74 |
| Şekil 7.3 İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlağının 500 İK öncesi ve sonrası görünümü..... | 77 |
| Şekil 7.4 UK30-İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlağının 500 İK öncesi ve sonrası görünümü | 77 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Şekil 7.5 YFC50-İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlaklarının 500 IK öncesi ve sonrası görünümü | 78 |
| Şekil 7.6 Ürünlerin YFC ikameli karışımın yüzeyinde yoğunlaştığı kısım..... | 78 |
| Şekil 7.7 YFC ikameli karışımın enerji dağılım spektrometresi (EDS) analizi..... | 79 |
| Şekil 7.8 YFC ikameli karışımda IK çevrimleri sonucu karbonatlaşma..... | 79 |
| Şekil 7.9 İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 IK çevriminden önceki ve sonraki hali (0:üst yüzey, 1 ve 2:kalıp yan yüzeyleri, 3:alt yüzey) | 80 |
| Şekil 7.10 UK30-İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 IK çevriminden önceki ve sonraki hali (0:üst yüzey, 1 ve 2:kalıp yan yüzeyleri, 3:alt yüzey) | 80 |
| Şekil 7.11 YFC50-İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 IK çevriminden önceki ve sonraki hali (0:üst yüzey, 1 ve 2:kalıp yan yüzeyleri, 3:alt yüzey) | 81 |
| Şekil 7.12 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifli serilerin ses geçiş hızları..... | 82 |
| Şekil 7.13 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlı halde bekletilen serilerin ses geçiş hızları..... | 83 |
| Şekil 7.14 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 IK sonrası (c), 500 IK sonrası (d), 300 IK eşlenik (e), 500 IK eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri..... | 84 |
| Şekil 7.15 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanmış halde bekletilen serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 IK sonrası (c), 500 IK sonrası (d), 300 IK eşlenik (e), 500 IK eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri..... | 85 |
| Şekil 7.16 Eğilme deneyi sonrası lifli numunenin görünümü (%2 lif, su kürü) | 86 |
| Şekil 7.17 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin eğilme dayanımları | 86 |
| Şekil 7.18 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest haldeki serilerin bağıl eğilme dayanımı | 87 |
| Şekil 7.19 İlk 24 saat ideal koşullarda bekletilen karışımların tokluk değerleri..... | 88 |
| Şekil 7.20 İlk 24 saat ideal koşullarda bekletilen karışımların bağıl tokluk değerleri | 88 |
| Şekil 7.21 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanan serilerin eğilme dayanımları..... | 89 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 7.22 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanan serilerin bağıl eğilme dayanımları | 89 |
| Şekil 7.23 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanan serilerin toklukları | 90 |
| Şekil 7.24 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanan serilerin bağıl toklukları | 90 |
| Şekil 7.25 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin basınç dayanımları | 92 |
| Şekil 7.26 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlı halde bekletilen serilerin basınç dayanımları | 93 |
| Şekil 7.27 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür için bağıl basınç dayanımları | 94 |
| Şekil 7.28 İlk 24 saat ideal koşullarda bekletilen serilerin bağıl basınç dayanımları | 95 |
| Şekil 7.29 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış serilerin bağıl basınç dayanımı | 96 |
| Şekil 7.30 IK etkisiyle yüzeyde korozyona uğramış bir lifin yuvası | 97 |
| Şekil 7.31 IK etkisinden kaynaklanan yüzey lifinin korozyonu sebebiyle gelişen matris hasarı | 98 |
| Şekil 7.32 500 IK çevrimi sonrası İ50-F2 karışımındaki liflerin yüzey durumu | 98 |
| Şekil 7.33 500 IK çevrimi sonrası UK30-İ50-F2 karışımındaki liflerin yüzey durumu | 99 |
| Şekil 7.34 500 IK çevrimi sonrası YFC50-İ50-F2 karışımındaki liflerin yüzey durumu | 99 |
| Şekil 7.35 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür için bağıl klor işleme derinlikleri | 101 |
| Şekil 7.36 İlk 24 saat ideal koşulda serbest halde bekletilen serilerin 300 IK sonrası İ50-F2 (a), UK30-İ50-F2 (b), YFC50-İ50-F2 (c); ilk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin 300 IK sonrası İ50-F2 (d), UK30-İ50-F2 (e), YFC50-İ50-F2 (f) klor iyonu işleme derinlikleri | 101 |
| Şekil 7.37 İlk 24 saat ideal koşulda serbest halde bekletilen serilerin 500 IK sonrası İ50-F2 (a), UK30-İ50-F2 (b), YFC50-İ50-F2 (c); ilk 24 saat kuruma | |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin 500 IK sonrası İ50-F2 (d), UK30-İ50-F2 (e), YFC50-İ50-F2 (f) klor iyonu işleme derinlikleri..... | 102 |
| Şekil 7.38 Yukarıdan aşağıya İ50-F2, UK30-İ50-F2, YFC50-İ50-F2 karışımlarından oluşan örneklerde yer alan liflerin AgNO ₃ çözeltisi püskürtülmesinden önceki hali | 103 |
| Şekil 7.39 Kuruma ortamında kısıtlanmış halde kür için kütle kayıpları | 103 |
| Şekil 7.40 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin İ50-F2 (a), UK30-İ50-F2 (b), YFC50-İ50-F2 (c) 500 IK sonrası karbonatlaşma derinlikleri | 105 |
| Şekil 8.1 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlı halde bekletilen serilerin çatlak yüzey alanları (mm ²)..... | 108 |
| Şekil 8.2 İ50-F2 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (7. hücre)..... | 109 |
| Şekil 8.3 UK30-İ50-F2 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (4. hücre)..... | 110 |
| Şekil 8.4 YFC50-İ50-F2 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (2. hücre)..... | 111 |
| Şekil 8.5 İ50-F0 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (5. hücre)..... | 112 |
| Şekil 8.6 UK30-İ50-F0 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (2. hücre)..... | 113 |
| Şekil 8.7 YFC50-İ50-F0 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (4. hücre)..... | 114 |
| Şekil 8.8 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan lifli örneklerin potansiyodinamik tarama eğrileri | 115 |
| Şekil 8.9 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan lifsiz örneklerin potansiyodinamik tarama eğrileri | 115 |
| Şekil 8.10 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan örneklerin açık devre potansiyeli (Eocp)..... | 116 |
| Şekil 8.11 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan örneklerin korozyon akım yoğunluğu (Icorr)..... | 117 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Şekil 8.12 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan lifli örneklerin potansiyostatik tarama eğrileri..... | 117 |
| Şekil 8.13 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan lifsiz örneklerin potansiyostatik tarama eğrileri..... | 118 |
| Şekil 8.14 Lifli numunelerin korozyon deneyinden önceki (a) ve sonraki (b) görünümü..... | 119 |
| Şekil 8.15 Lifsiz numunelerin korozyon deneyinden önceki (a) ve sonraki (b) görünümü..... | 120 |
| Şekil 8.16 Kuruma-kısıtlı koşuluna maruz kalan lifli örneklere gömülü donatıların korozyon deneyi sonrası yüzey görünümleri..... | 121 |
| Şekil 8.17 Kuruma-kısıtlı koşuluna maruz kalan lifsiz örneklere gömülü donatıların korozyon deneyi sonrası yüzey görünümleri..... | 121 |
| Şekil 8.18 Lifli numunelerin korozyon deneyinden önceki (a) ve sonraki (b) görünümü..... | 122 |
| Şekil 8.19 Lifsiz numunelerin korozyon deneyinden önceki (a) ve sonraki (b) görünümü..... | 123 |
| Şekil 8.20 Korozyon ürünlerinin mikroskop altındaki tipik görünümü..... | 124 |
| Şekil 8.21 UYPB karışımı ile hazırlanan beton örneğinden çıkarılan çelik numunenin korozyon ürünlerinden temizlenmesi öncesi ve sonrası hali..... | 124 |
| Şekil 8.22 Donatıların gerçek kütle kayıpları | 125 |
| Şekil 8.23 Donatıların potansiyostatik tarama eğrilerinden hesaplanan tahmini kütle kayıpları..... | 125 |

TABLULAR LİSTESİ

| | Sayfa |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| Tablo 2.1 Türe ve yaşa bağlı olarak büzülmenin sınıflandırılması..... | 11 |
| Tablo 2.2 İzin verilebilen en yüksek klorür içeriği değerleri..... | 24 |
| Tablo 2.3 Korozyonun gelişimini etkileyen faktörler ve alınabilecek önlemler..... | 25 |
| Tablo 2.4 Yarı hücre potansiyeli değerlerine göre korozyon olasılıkları..... | 29 |
| Tablo 2.5 3LP aleti ile ölçülen verilerin değerlendirilmesi | 30 |
| Tablo 2.6 Korozyon akım yoğunluğu değerlerinin sınıflandırılması..... | 32 |
| Tablo 3.1 Deneysel çalışmanın aşamaları | 34 |
| Tablo 4.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri..... | 36 |
| Tablo 4.2 SD'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri | 36 |
| Tablo 4.3 YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri..... | 37 |
| Tablo 4.4 UK'nın kimyasal ve fiziksel özellikleri..... | 37 |
| Tablo 4.5 Kuvars agregalarının kimyasal kompozisyonu..... | 38 |
| Tablo 4.6 Kuvars agregalarının elek analizleri | 38 |
| Tablo 4.7 Hiperakışkanlaştırıcı katkının genel özellikleri | 39 |
| Tablo 4.8 DEÜ Tınaztepe Yerleşkesi şebeke suyunun pH, iletkenlik, iyon konsantrasyonu ve sertliği..... | 40 |
| Tablo 4.9 Donatı çeliğinin kimyasal kompozisyonu | 41 |
| Tablo 5.1 İslanma-kuruma çalışmasında numune sayıları..... | 43 |
| Tablo 5.2 Donatı korozyonu çalışmasında numune sayıları | 45 |
| Tablo 5.3 İslanma-kuruma deneylerinde kullanılan serilerin karışım oranları | 46 |
| Tablo 5.4 Korozyon deneylerinde kullanılan serilerin karışım oranları | 47 |
| Tablo 7.1 28 gün ve 500 IK çevrimi sonrası çatlak analizleri | 76 |
| Tablo 7.2 Çevrimler sonucu klor işleme derinlikleri (mm) | 100 |
| Tablo 7.3 Karbonatlaşma derinlikleri (mm) | 104 |
| Tablo 8.1 Lifli numunelerin çatlak analizleri..... | 107 |
| Tablo 8.2 Lif içermeyen numunelerin çatlak analizleri | 107 |

BÖLÜM BİR

GİRİŞ

Ultra yüksek performanslı beton (UYPB), çimento esaslı, çelik ve muadili yüksek dayanımlı lifler içeren, sünekliği geleneksel betona kıyasla yüksek, çevre koşullarına daha dayanıklı, basınç mukavemeti 150 MPa ve üzeri olarak tarif edilen yeni nesil bir çimento esaslı kompozit malzemedir. UYPB'nin dünyada kullanımı geniş açıklıklı köprü kirişleri, onarım ve güçlendirme işleri, mimari tasarımların getirdiği narin kabuk ve döşemeler, geniş açıklıklı stadyum elemanları, görsellikle birleşmiş kent mobilyaları ve rögar kapağı gibi altyapı ürünlerini içeren geniş bir alana yayılmaktadır. Yüksek performans kavramı sadece yüksek dayanımı değil aynı zamanda kalıcılığı yüksek beton ve kompozitlerini ifade etmektedir (Yazıcı ve Yalçınkaya, 2014).

Son yıllarda, beton teknolojisinde inanılması güç gelişmeler kaydedildi. Sadece 30 yıl önce, betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç dayanımı en fazla 40 MPa idi. Böyle bir beton, küp basınç dayanımları 200-800 MPa arasında, çekme dayanımları 25- 150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/m² olan yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında, şu anda gerçekten oldukça düşük dayanımlı malzeme olarak kabul edilebilir. Beton teknolojisinde söz konusu yüksek dayanımlı bu malzemeler Reaktif Pudra Betonları olarak adlandırılırlar ve dikkate değer eğilme dayanımına ve oldukça yüksek sünekliğe sahiptirler. Süneklikleri normal betona kıyasla yaklaşık 300 kat daha fazladır. Düşük porozite değerleri bu betonlara yüksek durabilite ve düşük geçirimsizlik özellikleri kazandırır. Bu durum ise, çeşitli iklim koşullarının etkisindeki bazı yapılar için potansiyel olarak uygun bir malzeme niteliği sağlar (Taşdemir ve Bayramov, 2002).

UYPB'nin yüksek oranda bağlayıcı madde içermesi, düşük su/çimento oranı, taze hal özelliklerinin geleneksel betona kıyasla daha hassas ve karmaşık oluşu, üretim koşullarında istenen uygun iklim koşulları vb. sebeplerle kullanımı genellikle prefabrik alanında gelişmektedir. Ancak son yıllarda sahada kullanımı; köprü kısımları, köprü elemanlarının güçlendirilmesi gibi alanlarda, özellikle Amerika

Birleşik Devletleri, Kanada, Almanya, Fransa gibi ülkelerde yer bulmakta, bu nedenle sahada döküme yönelik çalışmalar hızlanmaktadır (Yazıcı ve Yalçınkaya, 2014).

UYPB'nin günümüzdeki yaygın uygulaması olan prefabrik sektöründe ve gelişmekte olan sahadaki uygulamalarında büzülme davranışının önemi vurgulanmaktadır. Çok yüksek bağlayıcı madde içeriği, düşük su/bağlayıcı malzeme oranı, silis dumanı kullanımı ve iyi ayarlanmış ince agrega gradasyonu, bu tür malzemelerde yüksek büzülme davranışına ve buna bağlı olarak çatlak hassasiyetine yol açmaktadır. Geleneksel betonlardan farklı olarak yalıtılmış koşullarda dahi erken yaşta büzülme ve çatlak riski artmakta, kütle betonu davranışı ince elemanlarda bile görülebilmekte, kuruma etkisinde ise çatlak oluşumu kaçınılmaz hale gelebilmektedir. Prefabrik üretimde bu durum ısı küllere kadar geçen süreçte üretim alanının koşullarına veya sahadaki uygulamada olumsuz iklim koşullarına bağlı olarak geleneksel betondan daha büyük bir risk teşkil etmektedir (Yazıcı ve Yalçınkaya, 2014).

Betonarme yapılarda olası hasarların teşhis ve kontrolü için, gözle görülen belirtiler yardımı ile korozyonun kalitatif olarak belirlenmesine, korozyon hızının sistematik olarak ölçülmesine ve korozyon ile ilgili bazı parametrelerin tespit edilmesine ihtiyaç vardır. Betonun dayanımını ve dayanıklılığını betonun bileşenleri, çimentonun türü ve dozajı, porozitesi, permeabilitesi, boşlukların boyutu ve dağılımı, yaşı, olgunluğu, betonun nem oranı, ortamın sıcaklığı ve nemi, tras, uçucu kül, cüruf, silis dumanı gibi puzolan malzemeler ve kimyasal katkıların kullanımı ve kürü etkiler. Ayrıca su ve çözeltilerin etkisi, karbonatlaşma ve puzolan malzeme kullanımı ile serbest kirecin bağlanması sonucu ortamın pH'sinin düşmesi, oksijen difüzyonu gibi çok fazla etken betonun ve donatının korozyonuna neden olur ve olayı hızlandırır. Gözenekliliği (porozitesi) düşük, yoğunluğu yeterli beton ile üretilen betonarme elemanın pas payı tabakası yeterli ve sürekli ise betondaki su miktarı fazla olsa bile O₂ difüzyonu azaldığı için korozyon tehlikeli sınırlara ulaşmayacaktır. Donatı korozyonunun araştırılmasında arazide veya laboratuvarda uygulanan farklı tespit, ölçüm ve deney yöntemlerinden yararlanılmaktadır. Korozyon ile ilgili

deneyler, doğrudan agresif ortamın bulunduğu doğal çevrede veya laboratuvarda yapılır. Laboratuvar deneylerinde amaç, genellikle koruma için alınan önlemlerin yeterliliğinin, örneğin Cl⁻ difüzyonunun önlenip önlenemediğinin incelenmesidir (Aköz ve Çakır, 2014; Neville, 1995).

TÜBİTAK 110M691 numaralı projenin bir bölümü olan bu deneysel çalışmada, proje kapsamında geliştirilen ve erken yaş (ilk 24 saat) büzülme özellikleri belirlenen karışımlar kullanılmıştır. Çalışma iki kısımdan oluşmaktadır:

Birinci kısımda, silis dumanının her karışımda yer alması kaydıyla, farklı puzolan ikame durumlarında (ikamesiz, uçucu kül ikameli, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikameli), erken yaşta iki farklı ortamda ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ bağıl nem ve $30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem) bekletilen, lifli ultra yüksek performanslı beton (UYPB) karışımlarının kısıtlanmış büzülme çatlaklarının $\%3,5$ konsantrasyonlu NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimlerinin mekanik ve durabilite (kalıcılık) özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

İkinci kısımda, erken yaşta iki farklı ortamda ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ bağıl nem ve $30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem) bekletilen, lif içeren ve içermeyen UYPB karışımlarıyla çalışılmıştır. Erken yaşta oldukça yüksek mertebelerde büzülme gösteren karışımların büzülmesinin kısıtlanmış halde bekletilmesi sonucunda oluşan çatlakların, beton içerisine gömülü çelik donatının korozyon gelişimine etkisi deneysel olarak belirlenmiştir.

Üretilen karışımlarda erken yaş büzülme çatlaklarının gelişmesinin mekanik ve kalıcılık özelliklerine önemli etkisi olduğu belirlenmiş, oluşan erken yaş büzülme çatlakları ile beton içine gömülü çelik donatının korozyonu arasında etkileşim olduğu ortaya konmuştur. İlk 24 saat ideal koşullarda bekletilen çatlamamış numunelerin içindeki donatılarda 10V altında hızlandırılmış korozyon deneyinde korozyon gelişmemiştir. Düşük su/bağlayıcı oranlı UYBP örneklerinin yüzeyinde çatlak oluşmasına rağmen, donatıyı korumada oldukça iyi performans gösterdiği görülmüştür. UYPB'nin en önemli özelliği, geçirimsiz yapısı nedeniyle sağladığı

üstün durabilite (kalıcılık) özelliğidir. UYPB'nin kalıcılık özelliklerinin korunması için erken yaş çatlaklarının önlenmesi amacıyla gerekli önlemler alınmalıdır. Çalışma kapsamında yapılan analizler, uçucu kül ikamesinin ve mikro çelik lif takviyesinin çatlak oluşumunu azaltarak donatı korozyonuna karşı korumayı geliştirdiğini göstermiştir.



BÖLÜM İKİ

LİTERATÜR BİLGİLERİ

2.1 Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB)

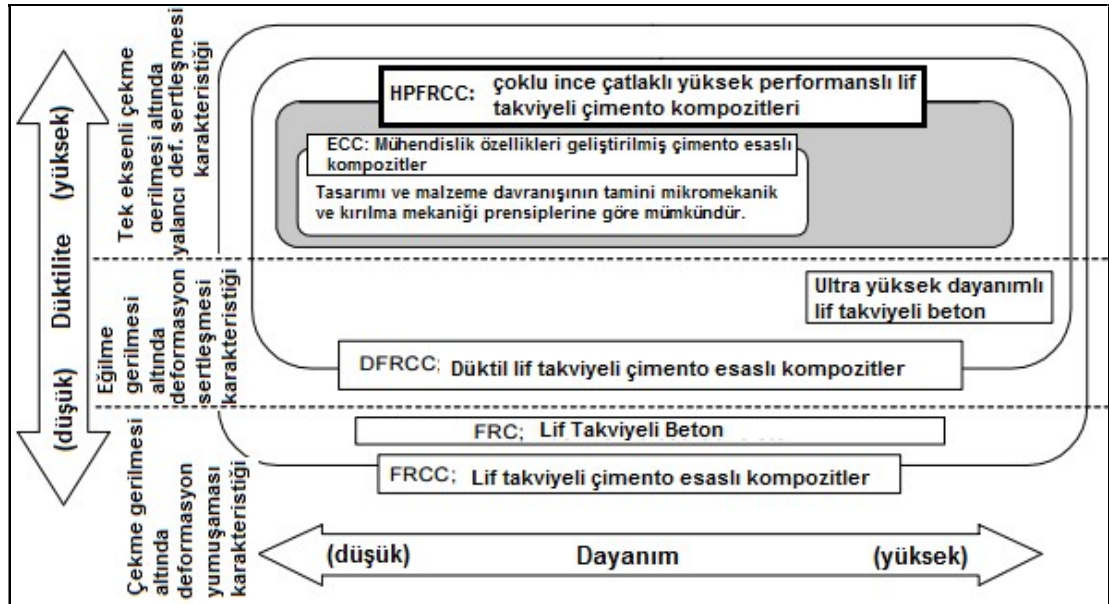
Beton teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak çimento esaslı kompozitler, geleneksel beton malzemesinden bir adım öteye geçerek yeni bir araştırma ve uygulama alanına sahip olmuştur. Yapılardan arzu edilen uzun ömür ve servis ömrü boyunca en az bakım masrafı, yüksek performanslı olarak adlandırılan çimento esaslı kompozitlerin gelişimini hızlandırmıştır. Yüksek performans kavramı sadece yüksek dayanımı değil aynı zamanda kalıcılığı yüksek beton ve kompozitleri ifade etmektedir (Yazıcı ve Yalçınkaya, 2014; Yalçınkaya, 2015).

Yeni nesil betonlar son yıllarda basınç dayanımı esaslı bir sınıflandırmaya tabi tutulmaktadır. Beton basınç dayanımındaki artış genel itibariyle servis koşulları altındaki betonarme elemanların kalıcılığını da arttırmaktadır. Dayanım ve dayanıklılık beraber gelişerek yüksek performans deyimini ortaya çıkarmıştır. Beton basınç dayanımına göre 40 MPa'ya kadar normal beton (NB), 40 ila 80 MPa arası yüksek performanslı beton (YPB), 80 ila 150 MPa arası çok yüksek performanslı beton (ÇYPB) ve 150 MPa üzerine ultra yüksek performanslı beton (UYPB) isimlendirmeleri kullanılmaktadır (Soliman, 2011).

1990'lı yılların başlarında Bouygues firması tarafından Reaktif Pudra Betonu olarak isimlendirilen bir tür çimento esaslı kompozit geliştirilmiştir (Richard ve Cheyrezy, 1995). Reaktif pudra betonları (RPB) çok düşük su/bağlayıcı (S/B) oranına sahip, yüksek oranda bağlayıcı ve inert toz içeren, kısa kesilmiş çelik lifler ile süneklik kazandırılmış ultra yüksek dayanımlı malzemelerdir. Sıkı iç yapısı sayesinde su ve zararlı solüsyon geçirimsizliğinin düşük olduğu bu kompozit, kalıcılığı açısından da yüksek performanslı olarak nitelendirilmektedir (Feylessoufi, 1996; Matte ve Moranville, 1999). RPB'lerin küp basınç dayanımları 200 – 800 MPa arasında, çekme dayanımları 25 – 150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/m^2 ve birim ağırlıkları $2500\text{--}3000 \text{ kg/m}^3$ civarındadır (Richard and

Cheyrezy, 1995). RPB, UYPB sınıfının ilk üyesi olarak kabul edilebilir. Ancak RPB üretiminde toz malzemelerin kullanılması, UYPB'nin ise iri agrega içerebilmesi ve akıcı olarak üretilebilmesi, bu iki malzemeyi farklı sınıfta gören araştırmacılara (Ma ve diğer., 2004) sebep olmuştur.

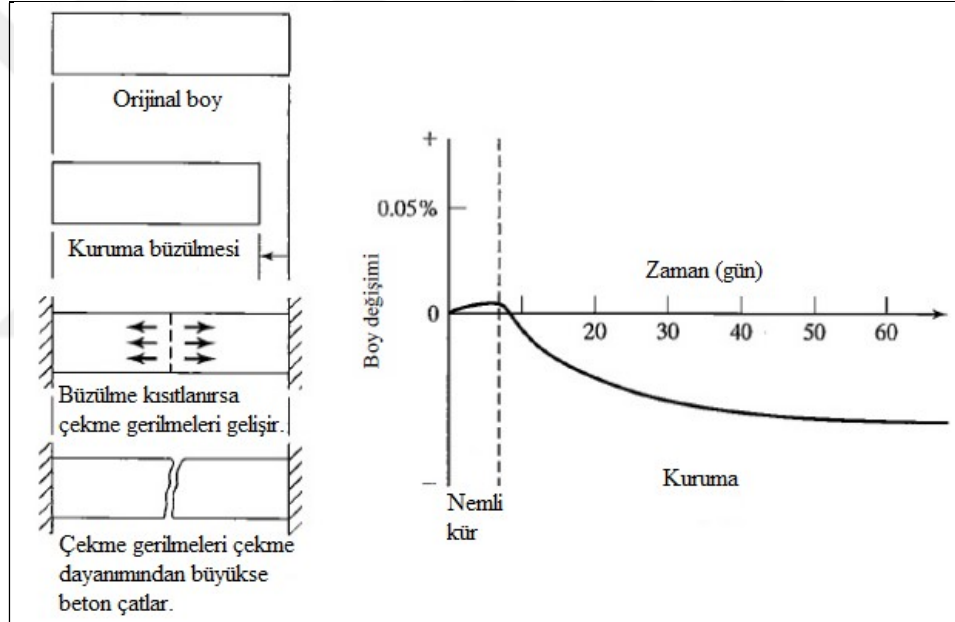
Japonya İnşaat Mühendisleri Odası Beton Komitesi, sünek çimento esaslı kompozitler hakkında Şekil 2.1'deki sınıflandırmayı kullanmıştır (Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2008). Bu sınıflandırma, çoklu çatlak oluşumu görülen çimento esaslı kompozitler alanındaki bir komite tarafından hazırlanmıştır. Sınıflandırmanın çekme ve eğilme gerilmeleri altındaki karakteristik davranışa dayandığı görülmektedir. Ultra yüksek dayanımlı lif takviyeli beton olarak isimlendirilen malzemenin "düktil, lif takviyeli çimento esaslı kompozitler" sınıfına girdiği, dayanımının yüksek olduğu ve eğilme yükleri altında deformasyon sertleşmesi yapabildiği görülmektedir. Amerikan Federal Karayolları İdaresi'nin yayınladığı raporda (Graybeal, 2006) ise, Fransız İnşaat Mühendisleri Odası ve Yollar İdaresi tarafından hazırlanan rapora (SETRA-AFGC, 2002) atıfta bulunulmuş, 150 MPa minimum dayanım sınıfı işaret edilmiştir.



Şekil 2.1 Lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerin sınıflandırılması (JSCE, 2008).

2.2 Kısıtlanmış Büzülme Durumunda Çatlak Gelişiminin Belirlenmesi

Büzülme kısıtlanırsa, bu durum kalıcılığı olumsuz etkileyen ve betonu dış etkenlere karşı savunmasız kılan büzülme çatlaklarına sebep olur (Şekil 2.2). Kısıtlanmamış büzülme eylemi de aynı şekilde zararlı olmaktadır. Bitişik beton elemanlar, biri diğerine göre farklı büzülerek, dış yüzey çatlaklarını oluşturmaktadır. Büzülme, ön gerilmeli beton elemanlarda yer alan gergin donatılarda bir miktar gerilme kaybına da sebep olur (Neville, 1995). Erken yaş rötre çatlakları betonarme binaların döşemesi, köprülerin tabanları ve kaplama betonlarında ciddi sorunlara sebep olabilir (Çorbacıoğlu, 2008).

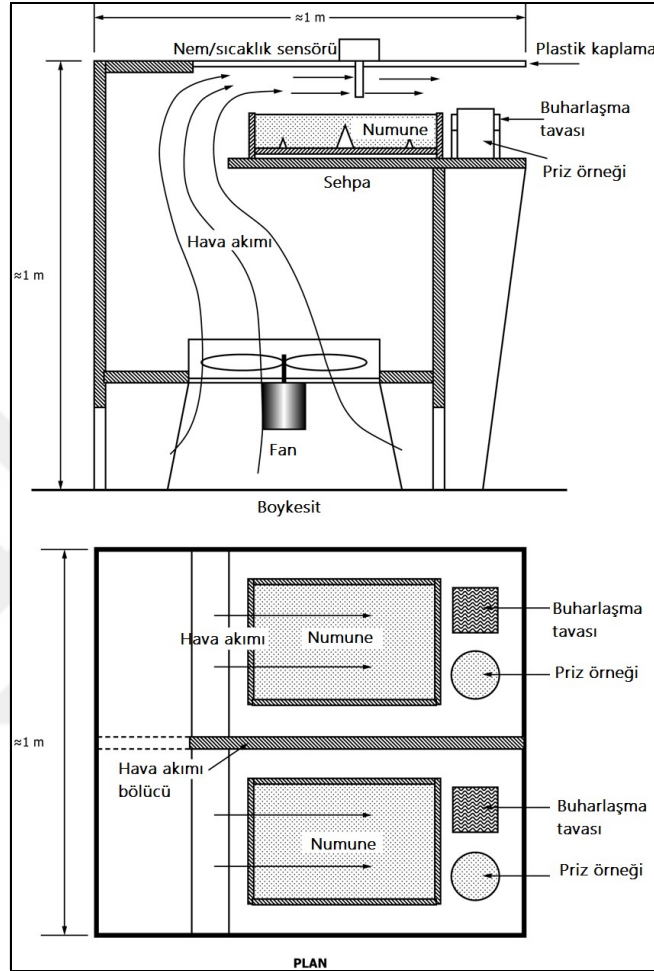


Şekil 2.2 Tip I portland çimentosu ile üretilen betonların kuruma büzülmesi (Mindes, Young ve Darwin, 2002).

Literatürde sıklıkla kullanılan iki adet kısıtlanmış büzülme çatlak standardı bulunmaktadır.

Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada, plastik büzülme çatlaklarının değerlendirildiği ASTM C1579 (2013) standardında bahsedilen deney düzeneği Şekil 2.3'te sunulmaktadır. Numune kalıbının tabanında yer alan kısıtlayıcı engeller büzülme kısıtlamaktadır. Sistemde rüzgâr hızı, sıcaklık ve priz süreleri

aynı anda kayıt altına alınmaktadır. 24 saat sürdürülen deney sonunda lif takviyesinin etkisi, lifsiz numunelere kıyasla okunan ortalama çatlak genişlikleri ile tespit edilmektedir (ASTM C1579, 2013).

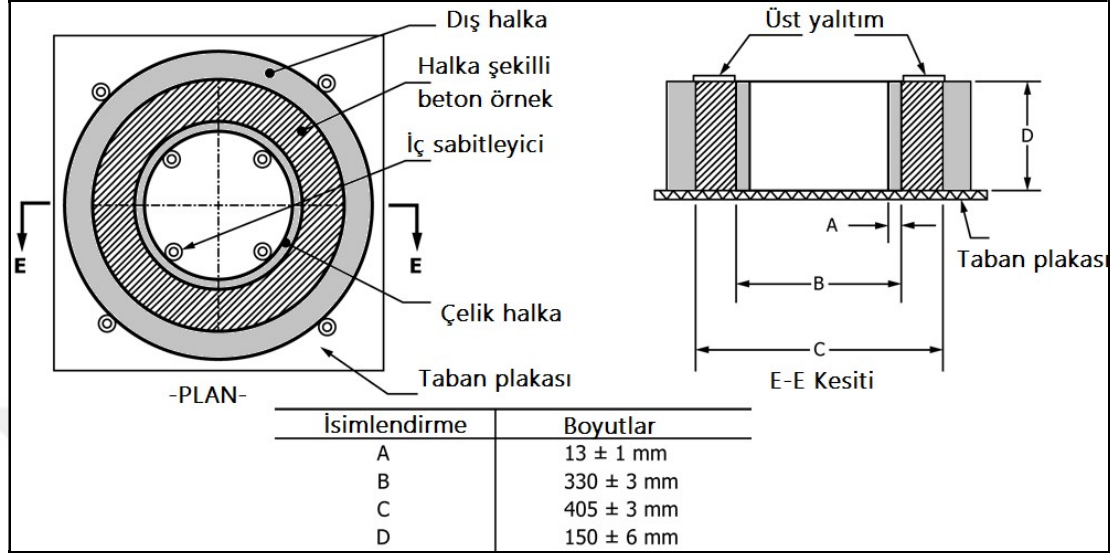


Şekil 2.3 Plastik büzülme çatlakları standart ölçümü (ASTM C1579, 2013).

ASTM C1581 (2009) standardında bahsedilen halka ölçüm düzeneği özellikle sertleşmiş halde çatlak gelişimini ve çatlak oluşma yaşını tespit eden bir yöntemdir (Yazıcı ve Yalçınkaya, 2014; Yalçınkaya, 2015).

Şekil 2.4'te sistemin şematik çizimi verilmektedir. Üst yüzeyi yalıtılmış betonlar sertleştikten sonra dış kalıplardan kurtarılmaktadır. Ölçüm bu anda başlatılır ve iç halka iç yüzeyindeki gerinim pulları yardımıyla kuruma ortamında büzülen beton halkanın oluşturduğu çelik halka deformasyonu takip edilmektedir. Deney sonucu çatlama yaşı, gelişen teorik çekme gerilmeleri gibi parametreler değerlendirilir.

Deney sistemi ilk 24 saatte gelişen gerilmeleri ve çatlakları değerlendirmede yetersiz kalabilmektedir (ASTM C1581, 2009).



Şekil 2.4 Kısıtlanmış büzülme çatlak ölçüm düzeneği - halka testi (ASTM C1581, 2009).

Ultra yüksek performanslı betonlar (UYPB), yüksek dayanıma ve lifler sayesinde yüksek süneklığe sahip olan bir malzeme olarak yapı teknolojisinin en son gelişmelerinden biridir. Ancak literatür taramalarında boyutsal kararlılığının yeterince araştırılmadığı dikkati çekmektedir (Wong ve diğer., 2007). Bu duruma rağmen birçok imalatta kullanılmıştır (Adeline, Lachemi ve Blais, 1998; Cavill ve Chirgwin, 2003; Hajar, Simon, Lecointre ve Petitjean, 2003).

Yüksek performanslı betonlarda düşük su/bağlayıcı oranı özellikle bünyesel büzülme risk haline getirmektedir (Wong ve diğer, 2007; Cusson ve Hoogeveen, 2007; Min, Jung, Yang ve Yoon, 2010). Yüksek hidratasyon ısı ve kapiler su kaçışları bu etkiyi tetiklemektedir. Ancak yapılan çalışmaların çoğu UYPB sınıfında betonlardan ziyade yüksek dayanımlı betonlar ve geleneksel betonlar üzerindedir. Tane boyutları ve kompozisyonu geleneksel betonlardan oldukça farklı olan bu tür kompozitlerin, boşluk yapısı ve aşırı derecede düşük olan su/bağlayıcı oranı da büzülme kinetikleri açısından farklılıklara sebep olabilmektedir. Kuruma büzülmesinin 0,30 su/bağlayıcı oranı altındaki betonlarda büyük bir risk oluşturmayacağı gibi bir yargı literatüre bakıldığında ilk etapta dikkati çekebilir

(Pease, 2005). Ancak uygulanan kür rejiminin ve kullanılan katkı maddelerin bu durumu tamamen değiştirebileceği görülmektedir (Holt ve Leivo, 2004).

Büzülme çatlaklarının yüksek performanslı çimentolu kompozitlerden beklenen durabiliteyi ve mekanik performansı azaltacağı söylenebilir. Büzülme çatlakları riskinin sadece sahada olmadığı, kontrollü fabrikasyon üretimde ısıl kürün başlatılmasına kadar geçen süreçte de gelişebildiği görülmektedir (Fehling ve Thiemicke, 2012).

Büzülme çatlakları riskinin azaltılmasında malzeme tasarımı açısından birçok önlem tipi bulunmaktadır. Bunlardan çeşitli puzolanların ikamesi sonucu olumlu/olumsuz sonuçlar elde edilebileceği görülmektedir (Banthia ve Gupta, 2009; Mokarem, Weyers ve Lane, 2005; Akkaya, Ouyang ve Shah, 2007). Kapiler büzülmeyi azaltan kimyasal katkıları (He, Li, Chen ve Liang, 2006; Lura, Mazzotta, Rajabipour ve Weiss, 2006; Pease, 2005) ise maliyeti oldukça arttırıcı ve bir takım yan etkilere sahip gözükmektedir. Genleşen tipte ürünlerle (Collepari, Borsoi, Collepari, Olagot ve Tiroli, 2005; Schwartzentruber, Philippe ve Marchese, 2004; Keith, Bentley, Walker ve Holland, 2006) büzülmeyi karşılanmasında ise dozaj aşımı veya yeterli deneme yapılmaması durumlarında oluşabilecek aşırı genleşme boyutsal kararlılığı bozabilmektedir. İçsel kütleme yöntemi bünyesel büzülmeyi azaltılmasında etkilidir ancak etkinlikleri kullanım miktarlarına bağlıdır. Bunun yanı sıra UYPB gibi yüksek dayanımlı kompozitlerde kullanılacak düşük elastisite modüllü agregalar veya polimerler dayanımı önemli ölçüde azaltabilmektedir (Yoo, Kim, Zi ve Yoon, 2015). Ayrıca uzun dönem çatlak riskinin artmasını da beraberinde getirebilmektedir (Mönnig ve Reinhardt, 2006; Craeye ve Schutter, 2006; Akçay ve Taşdemir, 2006; Akçay ve Taşdemir, 2008; Zhutovsky, Kovler, ve Bentur, 2004).

Öncelikle UYPB'nin boyutsal kararlılığının sağlanması bağlayıcı hamurun büzülmeyi davranışının puzolanik katkıları kullanılarak optimize edilmesi gerekmektedir. Ayrıca hamurun büzülmeyi engelleyecek olan en önemli parametre agregalardır. Agregaların hamur fazının büzülmeyi büyük oranda azalttığı dikkati çekmektedir (Barcelo, Moranville, ve Clavaud, 2005; Holt, 2005).

Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından hazırlanan TÜBİTAK 110M691 numaralı projeye konu olan ve Yalçınkaya (2015) tarafından hazırlanan doktora tezi çalışmasında, üç farklı UYPB karışımı üzerinde ASTM C1581/C1581M-09 standardına uygun olarak çatlama yaşı araştırılmıştır. Erken yaşta bünyesel deformasyon değerlerinin, kalıp açıldıktan sonra ise kuruma büzülmesi değerlerinin oluşturduğu çelik halka deformasyonları, zamana bağlı olarak ölçülmüştür. Aynı koşullarda erken yaşta bünyesel büzülme, uzun dönemde kuruma büzülme ve ağırlık değişimleri harç çubukları kullanılarak belirlenmiştir. Deney sonucunda ortalama çatlama yaşı, çatlağa sebep olan çelik halka deformasyonu verileri, çatlak açıklıklarının zamanla değişimi gibi parametreler tespit edilmiştir. Çalışmada büzülme türüne ve yaşına bağlı olarak dört değişik büzülme sınıflandırılması kullanılmıştır (Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Türe ve yaşa bağlı olarak büzülmenin sınıflandırılması (Yazıcı ve Yalçınkaya, 2014; Yalçınkaya, 2015).

| Türe göre büzülme | Yaşa göre büzülme | Ölçüm türüne göre |
|-------------------|----------------------|-------------------|
| Bünyesel büzülme | Erken yaşta büzülme | Lineer büzülme |
| Kuruma büzülmesi | Uzun dönemli büzülme | Hacimsel büzülme |

Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından yapılan deneysel çalışmada kullanılan "Bünyesel büzülme" terimi, çimentolu malzemelerin dış ortamdan yalıtılarak nem transferinin önlendiği durumda görünür hacim değişikliğini ifade etmektedir. Bünyesel büzülme temel olarak çimentonun karma oksitlerinin reaksiyon sonrası daha az hacme sahip olması (kimyasal büzülme) ve reaksiyon sırasında kılcal boşluklardaki suyun reaksiyonda kullanılması tetiklemektedir. "Kuruma büzülmesi" terimi ise karışımların dış ortama açık yüzeyinden buharlaşma yoluyla su kaybetmesi ile oluşan büzülme temsili etmektedir. Ancak deneysel çalışmada tarif edilen kuruma büzülmesi davranışı, bünyesel büzülme de içermektedir. Diğer bir deyişle kuruma sebebiyle oluşan salt büzülme, toplam büzülmeden ayıklanmamış, bünyesel büzülme ve kuruma ortamındaki fiziksel büzülme topluca kuruma büzülmesi olarak ifade edilmiştir. Uygulamadaki karşılığı olarak bünyesel büzülme, tamamen kapalı kalıp içerisinde gelişecek büzülme, kuruma büzülmesi ise erken yaşta kalıp perdah yüzeyinin, uzun vadede ise kalıp alınmasının ardından tüm yüzeylerin dış ortama

teması ile oluşacak toplam (bünyesel+fiziksel su kaçışı sebebiyle oluşan) büzülmeyi ifade etmektedir.

Yazıcı ve Yalçinkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada, yaşa göre büzülmede erken yaş ve uzun dönemli büzülme terimleri kullanılmıştır. Büzülmenin zamana göre sınıflandırılmasındaki sebepler, düşük su/bağlayıcı oranlı karışımların, hidrasyonun ilk gününde geleneksel betondan farklı olarak yüksek bir büzülme riski taşıması ve erken yaşta büzülme ölçüm yöntemlerinin uzun dönemli büzülmeden daha karmaşık olmasıdır. Daha da önemlisi, gelişmekte olan çekme mukavemetinin, kısıtlanmış durumda oluşacak parazit büzülme gerilmelerinin gerisinde kalması sonucu çatlama riski, erken yaşta daha yüksektir. Çalışmadaki erken yaştan kasıt, karıştırma sırasında bağlayıcı maddelere suyun temasından itibaren geçen ilk 24 saattir. Uzun dönemden kasıt ise kompozitin 24. saatinin ardından geçen, 90 güne kadar varan zaman dilimidir.

Yazıcı ve Yalçinkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada, karışımların büzülme kinetiklerinin araştırılmasında hacimsel ve lineer olarak iki farklı büzülme ölçüm türü kullanılmıştır. Lineer (doğrusal) büzülme, prizmatik numunelerin uzun kenarı boyunca okunan büzülme değerleridir. Erken yaşta lazer sensörler ile temassız olarak deformasyonlar kaydedilmiştir. Hacimsel büzülmede ise su içerisinde tartım yöntemi ile tüm hacimdeki toplam büzülme değeri araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan lineer büzülme yönteminde kalıp yüzeyinden kurumaya izin verilebilmekte, hem bünyesel hem de kuruma büzülmesi araştırmaları yapılabilmektedir. Hacimsel büzülme ölçümünün doğası gereği yalıtılmış numunelerde bünyesel büzülme çalışılabilmektedir. Hacimsel büzülme değerleri, teorik olarak izotropik yaklaşımla lineer büzülme değerlerine dönüştürülebilmektedir. Kullanılan lineer büzülme sistemlerinde iklimlendirilmiş kabinde ortam sıcaklığı ve bağıl nemi değişkenleri araştırılabilirken, hacimsel büzülme sisteminde harç karışım özelliklerine sahip numunelerde ortam sıcaklığı ve yapı içerisindeki sıcaklık geçmişinin bünyesel büzülme etkisi araştırılabilmektedir. Karışım oranlarının ve malzeme türlerinin büzülme davranışlarına olan etkisi deneysel çalışma kapsamında temel olarak lineer sistemlerle ölçülmüş, seçilmiş karışımlarda ise ölçüm yöntemlerinin farkı

tartışılmıştır. Bünyesel büzülme ölçümlerinin başlatılması için 20°C’de gerçekleştirilen priz süresinin tayini deneyi, kuruma ölçümlerinin başlatılması için 30°C’de (kuruma sıcaklığında) gerçekleştirilmiştir.

2.3 Betonda Korozyon Gelişimi

2.3.1 Korozyon

Korozyon, bir malzemenin yüzeyinin dıştan kimyasal etkiler veya elektrokimyasal yolla değişime uğraması olayıdır (ASTM G15–04, 2004). Terminolojik olarak bu şekilde tanımlansa da korozyon olayının fiziksel karşılığı şu şekilde açıklanabilir: Korozyon, malzemelerin doğada bulunan en kararlı (en düşük enerjili) durumları olan oksit haline geçme olayıdır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

2.3.2 Korozyon Gelişimi

Korozyon olayının başlayıp ilerleyebilmesi için dört temel unsurun yerine getirilmesi şartı vardır. Aksi takdirde bu şartlardan biri sağlanmadığında korozyon gelişimi durur. Bu şartlar şunlardır:

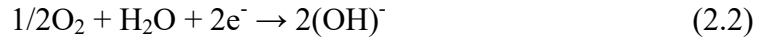
- Anodik reaksiyonlar,
- Katodik reaksiyonlar,
- Anodik ve katodik bölgeler arasında iyon transferi,
- Elektron akışı.

Malzemenin bulunduğu ortam içerisindeki nem ve oksijen varlığı ile iyon ve elektron taşınımı bu şartları oldukça etkilemektedir. Ortamdaki nem ve oksijen, katodik reaksiyonlarda etkili olduğundan, bunların varlığı ve konsantrasyonları korozyon gelişiminde önem arz etmektedir. Diğer yandan, bölgeler arasında elektron ve iyon transferi açısından ortamın elektrolitikliği korozyon olayında önemli bir rol oynamaktadır.

Anodik reaksiyon metallerin çözünmesini tarif etmektedir. Demir için reaksiyon, Denklem 2.1’de verilen şekilde gelişmektedir:



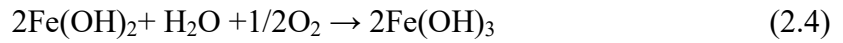
Katodik reaksiyon ise su ve oksijenin hidroksil iyonlarını oluşturduğu indirgenme işleminden oluşur (Denklem 2.2):



Anodik ve katodik reaksiyon bölgeleri arasındaki elektrolitik ortam ise, iyon transferi görevini üstlenmektedir. Betonarme açısından düşünüldüğünde nemli ve oksijenin bulunduğu elektrolitik ortamda iyon transferi beton bünyesinde gerçekleşmektedir.

Elektron akışının sağlanması için de anodik ve katodik bölgeler arasında metalik bir bağlantının olması gerekmektedir. Monolitik betonarme yapılarda donatılar sürekli ve temas halinde olduklarından bu şart genellikle sağlanmaktadır.

Daha sonra anodik ve katodik reaksiyon ürünleri birleşerek Denklem 2.3 ve Denklem 2.4’teki korozyon ürünlerini meydana getirirler.



Oluşan demirhidroksit ürünleri Fe_3O_4 , FeO , Fe_2O_3 , FeOOH , gibi oksit ve oksihidroksitlere dönüşebilir. Bu çeşitli oksitlerin oluşumu üzerinde pH, oksijen varlığı, çeşitli çevresel kirlilikler, metalin kompozisyonu ve oluşan ürünlerin yüzeye yapışma karakterleri etkilidir. Ayrıca sözü edilen çevresel faktörler korozyon reaksiyonlarını etkileyerek farklı şekillerde gelişmesini sağlayabilirler. Örneğin klorid korozyonunda klor iyonları, reaksiyonları hızlandırıcı etki meydana getirmektedir. Sistemdeki iyon ve elektron akışı korozyon hızının bir ölçütü olarak

alınabilir. Korozyon hızı, birim alandan birim zamanda oluşan kütle kaybı olarak, birim zamanda oluşan kalınlık azalması olarak veya birim alandaki akım yoğunluğu olarak verilebilir. Demir veya çelik için, değişik fiziksel ve elektrokimyasal korozyon hızı değerlerine ait örnekler Denklem 2.5 ve 2.6'daki şekilde ifade edilebilir (Yiğiter, 2008):

$$1 \text{ mA/cm}^2 \approx 11,6 \text{ mm/yıl} \approx 250 \text{ g/m}^2\text{gün} \quad (2.5)$$

$$1 \text{ } \mu\text{A/cm}^2 \approx 12 \text{ } \mu\text{m/yıl} \approx 0,25 \text{ g/m}^2\text{gün} \quad (2.6)$$

2.3.3 Betonarme Donatısının Korozyonu

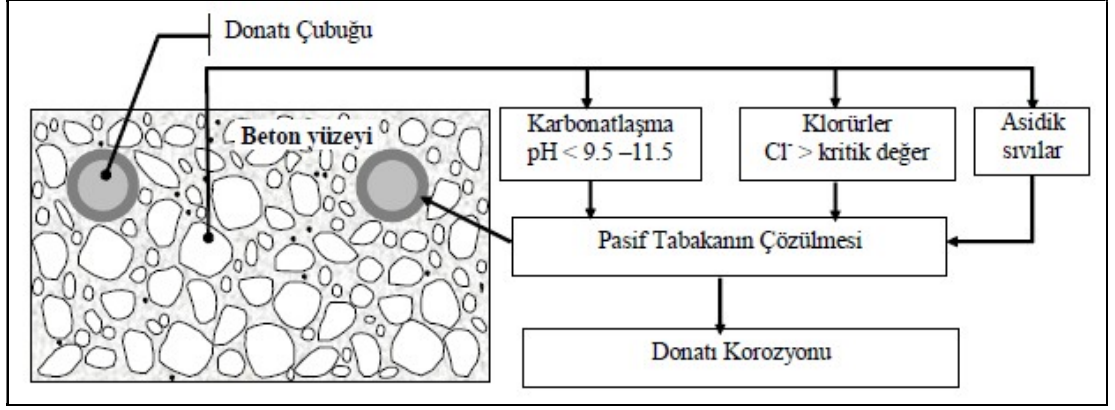
Betonarme yapı elemanının maruz kaldığı ortam koşulları sebebiyle iki temel etki, koruyucu pasif tabakayı bozarak korozyonun ilerlemesine sebebiyet verir.

Bunlar:

- Betonun karbonatlaşması ve
- Klorür saldırısı olaylarıdır.

Yetersiz kalınlıkta ve çok geçirimli bir pas payı tabakası, fiziksel ve kimyasal korumanın çok zayıf olması anlamına gelir. Atmosferdeki karbondioksit gazı hidrate çimento bileşenleri ile özellikle beton içindeki kireçle reaksiyona girerek betonun pH değerini düşürür. Karbonatlaşma cephesinin donatıya ulaşmasıyla donatı çevresindeki alkali ortam yok olur ve kimyasal koruma sona erer. Kimyasal korumanın yok olmasının bir diğer nedeni klorür iyonlarının donatıya ulaşmalarıdır. Bu durumda da donatı çubuğunun üzerinde oluşan ve metalin korozyonunu engelleyen pasif tabaka kararlılığını kaybederek çözünür.

Pasif tabakanın çözünmesiyle donatının korozyona uğraması Şekil 2.5'te şematik olarak gösterilmiştir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002; Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012).



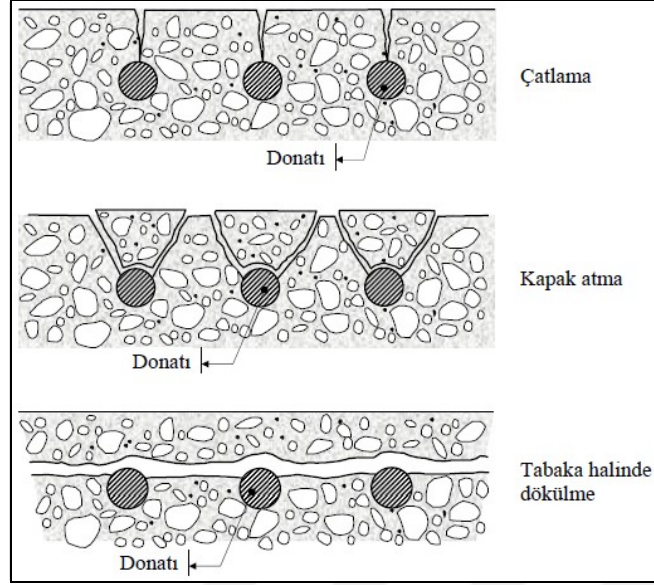
Şekil 2.5 Karbonatlaşma, klorür iyonları veya asit etkisi nedeniyle betonun donatıyı korozyondan koruma etkinliğinin kaybolması (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002; Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012).

Gerek korozyon başlangıç zamanı, gerekse korozyon hızı birtakım faktörlere bağlıdır. Bu faktörler:

- Beton kompozisyonu ve geçirimsizliği,
 - Beton rezistivitesi,
 - Donatı çeliğinin özellikleri,
 - Pas payı tabakası kalınlığı,
 - Nem içeriği,
 - Sıcaklık,
 - Oksijen varlığı,
 - Beton boşluk suyunun pH değeri,
 - Ortamda zararlı maddelerin (örneğin Cl^- iyonları) varlığı,
- şeklinde özetlenebilir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

2.3.4 Betonarme Elemanlarda Korozyon Hasarları

Korozyon reaksiyonları sonucu oluşan hacim artışı, beton bünyesinde çekme gerilmeleri oluşturmakta ve betonun çekme dayanımını aşması halinde hasara neden olmaktadır. Çatlama, kapak atma ve pas payı tabakasının dökülmesi türündeki hasarlar Şekil 2.6'da şematik olarak verilmiştir (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).



Şekil 2.6 Korozyon sonucu betonarme elemanlarda görülen hasar çeşitleri (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

2.3.5 Donatıda Korozyon Mekanizmaları

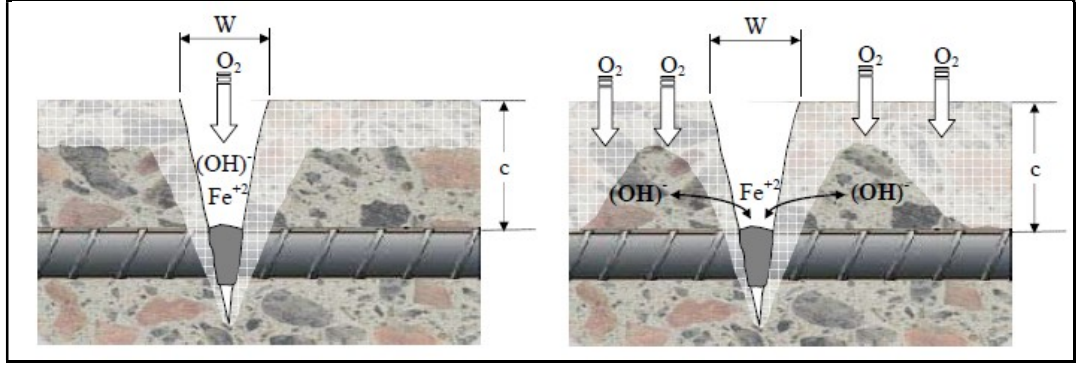
Değişik tipte korozyon mekanizmaları olup, betonarmede korozyonu dört ana başlıkta incelemek mümkündür:

- Atmosferik korozyon: Oksijen ve nemin birlikte donatıyı etkilediği durumlarda söz konusudur. Hava kirliliği ve meteorolojik koşullar bu reaksiyonun hızını etkiler.
- Elektrolitik korozyon: Ortamdaki elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu pil oluşumu bu tür korozyonun nedenidir. Korozyon önce noktasal olarak başlamasına rağmen sonradan sürekli hale dönüşür.
- Klorid korozyonu: Betondaki karbonatlaşma olayı sonucunda, alkali özelliğini yitirmiş, geçirgen betonarme elemanların yüzeyinden kapiler boşluk ve çatlaklardan donatıya ulaşan klor iyonlarının yol açtığı iki aşamalı ve sürekli bir korozyon tipidir. Betonarme yapılarda en tehlikeli korozyon tipi olarak nitelendirilir.
- Temas korozyonu: Elektriksel olarak temas halinde bulunan farklı elektropotansiyellere sahip metallerde görülen paslanma olayıdır. Betonarmede ender olarak rastlanır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002; Çil, 2006).

Nedeni ve tipi ne olursa olsun, betonarme elemanlarda meydana gelen korozyon, yapının güvenliğini tartışılmaz bir şekilde tehdit eden ve hatta sona erdiren bir durumdur. Özellikle depremlerden sonra hasar gören yapıların durumu incelendiğinde, donatıların korozyon sebebiyle büyük kesit kayıplarına uğradığı, hatta bazı betonarme elemanlarda donatıların tamamen yok olup sadece izlerinin kaldığı görülmüştür. Bu durum, yıkımın esas sebepleri arasında donatı korozyonunun ilk sıralarda yer aldığını göstermektedir (Çil, 2006).

2.3.6 Çatlaklı Betonda Korozyon

Donatıya dik çatlaklar, korozyonun nispeten dar bir alanda oluşmasına yol açarlar. Donatı boyunca uzanan, böylece tüm donatının ve dolayısıyla pas payı tabakasının hasar görmesine yol açan çatlaklar enine çatlaklara kıyasla çok daha tehlikeli kabul edilirler. Şekil 2.7 donatı üzerindeki betonda, enine çatlak bulunması durumunu temsil etmektedir. Bu durumda korozyonun gelişimi konusunda iki seçenek bulunmaktadır. İlk durumda anot ve katot çatlaklı bölgede birbirine çok yakındır. Çatlak dar (<0.5 mm) ve aktif değilse yani açılmaya devam etmiyorsa büyük olasılıkla korozyon ürünleri, betondan süzülen bileşenler, toz, kir vb. gibi maddeler çatlağın içini doldurarak korozyonun yavaşlamasına yol açacaktır. Sağda gösterilen ikinci durumda ise, çatlak içindeki küçük bölge anot, beton içinde kalan daha büyük alan ise katot olmaktadır. Bu durumdaki yüksek korozyon hızı sebebiyle donatının lokal olarak hasar görüp kopması mümkündür. Klorürlerin de ortamda bulunması halinde korozyonun çok daha hızlı bir şekilde ilerlediği unutulmamalıdır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).



Şekil 2.7 Çatlak bölgesinde korozyonun gelişimi (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

Betonarme yapılarda çatlak genişliklerinin sınırlandırılması, pas payı tabakasının kalınlığı ve kalitesinin artırılmasının yanında, korozyonu önlemede ikincil bir önlem olarak düşünülür. Çünkü uygulamada tamamen çatlaksız bir beton elde etmek oldukça güçtür. Ayrıca çatlaksız bir betona da oksijen, klorür ve karbondioksit girişi söz konusudur. Aşılmaması önerilen çatlak genişlikleri 0,2–0,3 mm civarındadır (Baradan, Yazıcı ve Ün, 2002).

2.3.7 Elektrokimyasal Korozyonun Gelişimini Etkileyen Faktörler

Bilindiği üzere korozyon olayında etkili birçok faktör bulunmaktadır. Bunlardan bazıları pas payı tabakasının kalınlığı, beton kalitesi, donatı çapı ve cinsi, betonda mineral katkı kullanımı, donatı aralıkları, betonun geçirgenliği, betonun nem içeriği, çevreden gelen agresif saldırıların tipi ve şiddeti, betonun kimyasal madde (klor, sülfat vb.) içeriği, eleman boyutları, kullanılan çimentonun kompozisyonu vb. olarak sıralanabilir. Kuşkusuz betonarme elemanların maruz kaldığı atmosfer koşulları, donatı korozyonu gelişiminin en etkili parametreleridir. Sıcaklık ve bağıl nem gibi ön plana çıkan faktörler betonarme eleman içerisinde birbirlerini etkilediklerinden, gerçek boyutlu elemanlarda faktörler ve sonuçlar karmaşık olabilmektedir (Yiğiter, 2008).

Taze ve sertleşmiş betonun elektriksel özellikleri Khalaf ve Wilson tarafından incelenmiştir (Khalaf ve Wilson, 1999). Genel olarak çalışma sonuçları göstermiştir ki; çimento hamuru, betonun elektriksel direncini kontrol eden temel faktördür. Ancak ince ve iri agregaların ikisi de taze betonda sertleşme öncesi su hareketinde

önemli rol oynamaktadır. Çimento hamurunun yapısındaki kimyasal değişimler betonun elektriksel tepkisini etkilemektedir. Taze çimento hamurunun elektriksel direnci taze betonunkinden daha düşüktür. Bunun sebebi, iri agrega ve kum içeren betona kıyasla daha iyi iletkenlik sağlayan ince çimento taneleridir.

Betonda yer alan çatlak genişliklerinin, lif tipinin ve yükleme koşullarının, kütlece %16,5 NaCl çözeltisinde gerçekleşen korozyon başlangıcına etkisi Berrocal, Löfgren, Lundgren ve Tang (2015) tarafından araştırılmıştır. Kancalı 35 mm çelik lif, düz 30 mm polivinil alkol (PVA) lif ve çelik lifler ile 18 mm uzunluğundaki PVA liflerin karışımının kullanılması (hibrit seri) ile elde edilen çalışma sonuçları göstermiştir ki; korozyon başlangıç süresi, çatlaksız betona kıyasla çatlaklı betonda lif tipinden bağımsız olmak üzere kısalmıştır. Çalışmada kullanılan çelik lifler, çatlaksız betonda PVA liflerle benzer davranış sergilemiştir. Buna karşılık, sentetik ve özellikle hibrit liflerin kullanımı korozyon başlangıcını önemli derecede geciktirmiştir. Çatlaklı beton örneklerinde ise, lifler ile çimento hamuru ara yüzeyinde gerçekleşen büyük deformasyonlardan ötürü çelik lifler dar çatlaklarda daha iyi performans sergilemiştir. Hibrit seriler ise, tekrarlı yüklemeler sonrasında ve korozyon başlangıç süresi anlamında, yüzey çatlaklarının genişliğinden çelik lifli örneklere oranla daha az etkilenerek daha iyi performans sergilemiştir. Çalışma sonuçları genel olarak göstermiştir ki; lif tipinden bağımsız olmak üzere lifli beton örnekleri, lifsiz eşlenik beton örneklerine göre korozyon başlangıç süresi anlamında aynı veya daha gelişmiş davranış göstermiştir.

Otieno, Beushausen ve Alexander (2016) tarafından, çatlaklı betonda %5 sodyum klorür kaynaklı donatı korozyonu, hızlandırılmış deneylerle ve doğal denizel ortamda test edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre; belirli bir beton kalitesinde (bağlayıcı tipinde ve su/bağlayıcı oranında), belirli pas payı tabakası ve maruz kalınan ortamda, korozyon hızı çatlak genişlikleriyle orantılı olarak artmıştır. Belirli bir su/bağlayıcı oranında, pas payı tabakasında ve çatlak açıklığında, çimentonun kısmi oranda bağlayıcı madde ile yer değiştirmesi (%30 uçucu kül, %50 yüksek fırın cürufu) ile korozyon hızı azalmıştır. Denizel ortamdaki numuneler ile

laboratuvar ortamında test edilen numuneler arasında, korozyon hızı anlamında önemli bir farka rastlanmamıştır.

Berrocal, Lundgren ve Löfgren (2016) tarafından, çelik lifli betonarme betonunda yer alan donatının klorür saldırısına bağlı olarak gerçekleşen korozyonu araştırılmıştır. Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre, betona lif ilave edilmesi ile çelik-beton ara yüzey hasarı sınırlandırılmış olup donatı korozyonu riski de bu sayede azalmıştır. Çatlak genişlikleri ve geçirimsizlik arasındaki bağlantının bir sonucu olarak, lif ilave edilmiş beton çatlaklı durumda dahi su geçirmezlik açısından lifsiz betona göre daha gelişmiş özelliktedir. Başkaca birçok çalışmada, betona çelik lif ilave edilmesinin elektriksel direnci düşüreceği yönünde bulgular beyan edilmiştir. Ancak, beton içine gömülü çelik lifler, betonun alkali ortamında oluşan pasif tabaka sayesinde, doğru akım uygulanması esnasında elektriksel anlamda izole olduğundan ötürü, bu liflerin elektriksel direnci etkilemediği yönünde çalışmalar da mevcuttur. Çelik lifler betondaki pasif tabaka ile temas halinde olduğu müddetçe izole edilmektedir. Lif korozyonu başladığı anda betonun elektriksel direnci de düşecektir. Çelik liflerin korozyonu sadece yüzeydeki ve çatlak açıklıklarındaki liflerle sınırlı olmasına rağmen, iletken liflerin varlığı sebebiyle direnci düşen donatının korozyon hızı üzerindeki etkisi araştırılmamıştır. İletken liflerin korozyon hızını önemli derecede etkilemediği ileri sürülmüş olsa da, bu durum da korozyon ile bağlantılı bir faktördür. Çelik lifler, geleneksel donatıdan daha yüksek korozyon direncine sahiptir. Fakat, yüzeyde veya çatlak açıklıklarında yer alan düşük karbonlu çelik lifler şiddetli şekilde korozyona uğrayarak göze çarpan pas lekeleri bırakarak lokal beton hasarına yol açabilir. Yüksek klorür içeriğine rağmen, betona gömülü çelik liflerin korozyondan bağımsız olduğu kanıtlanmıştır. Deneysel çalışmalar göstermiştir ki, betondaki çelik liflerin donatı korozyonunun hızına önemsiz derecede bir katkısı vardır. Diğer yandan, çelik lifler çatlaklı betonda çatlak açıklıklarını sınırladığından ötürü, klorür girişini sınırlandırdıklarından yararlıdır. Çelik lifler, donatılı beton elemanların korozyonunu azaltmaya potansiyel olarak katkı sağlasa da, donatının korozyon hızı ve iletken liflerle donatı arasında oluşan galvanik korozyon riski hakkında çalışmalar mevcut değildir.

Çatlamış betonda %5 sodyum klorür saldırısı sonucu korozyona uğrayan çelik donatının mekanik özellikleri Lu, Yuan, Cheng ve Liu (2016) tarafından araştırılmıştır. Yapılan çalışmada, korozyon sonucu donatıda meydana gelen belirgin çap kaybı özellikle çatlakların yer aldığı bölgededir.

Pradhan (2014) tarafından değişik konsantrasyonlarda klorür-sülfat ortamına maruz kalan çelik donatının korozyon davranışı araştırılmıştır. İki farklı tip çimento kullanılarak hazırlanan karışımların tüm su/çimento oranlarında ve maruz kaldığı çözeltilerin tüm konsantrasyonlarından donatıların yarı hücre potansiyel değerleri -270 mV (SCE)/-350 mV (Cu/CuSO₄)'tan daha negatiftir. Bu durum, betonda yer alan çelik donatının korozyon başlangıcına işaret etmektedir. Portland puzolanlı çimento ile üretilmiş örnekler, bağıl direnç açısından daha yüksek değerlere sahipken, normal portland çimentosu ile üretilmiş örnekler korozyon akım yoğunluğu açısından daha düşük değerlere sahiptir.

Wang, Dai, Sun ve Zhang (2016) tarafından yapılan çalışmada, betonun geçirgenliğinin çatlak açıklığına bağlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Çatlak açıklığı 100µm ile 400µm arasında ise, beton çatlaklarından klorür geçirgenliği çatlak açıklığı artışıyla hızla yükselmektedir. İlaveeten, bu sınırların ötesinde, klorür geçirgenliğinde çatlak genişliğinin etkisi daha da çarpıcı olmaktadır.

Qiao, Nakamura, Yamamoto ve Miura (2016) tarafından yapılan çalışmada, üniform olmayan ve lokal korozyona maruz çelik donatının yer aldığı betonda çatlak tipleri incelenmiştir. Bu çalışma ile üniform olmayan ve lokal korozyon dağılımının, betondaki çatlak gelişimi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Beton pas payı tabakası üzerinde NaCl havuzu kullanılarak uygulanan elektriksel korozyon metodu, pas payı tabakasının klörür saldırısı ile karşı karşıya kalması sonucu oluşan korozyon modelini temsil etmektedir. Donatıda gerçekleşen çap kaybı, beton çatlaklarının donatı korozyon hızının artışına yol açtığıın göstergesidir.

Kobayashi, Ahn ve Rokugo (2016) tarafından yapılan çalışmada, gelişmiş işlenebilirlik ve donatı korozyonuna karşı koruyuculuk özelliği olan, pekleşme

davranışı ve aynı zamanda orta derecede gerilme sünekliği sergileyen çimento bazlı kompozit (SHCC) karışımının geliştirilmesi hedeflenmiştir. Çeşitli çimento ikame oranları ve polietilen lif dozajları kullanılarak SHCC karışımı örnekleri hazırlanmıştır. Öncelikle, gerilme yükü altındaki donatısız örneklerin mekanik özellikleri ve çatlak özellikleri araştırılmıştır. Daha sonra, donatılı yekpare örneklerin ve onarım niteliğindeki donatılı SHCC kaplamalı örneklerin 150 gün boyunca %3'lük klorür çözeltisi püskürtülmesi sonrasındaki çatlak özellikleri ve klor işleme derinlikleri incelenmiştir. Çalışma sonuçları göstermiştir ki, çoklu çatlak içeren SHCC örneklerinin klorür saldırısından korunma performansı çatlakların sayısı ve çatlak açıklıklarından etkilenmektedir. Harç matrisinin su-çimento oranını azaltmak, çoklu çatlak içeren SHCC örneklerinin klorür saldırısından korunma performansını geliştirmektedir.

Otieno, Beushausen ve Alexander (2016) tarafından yapılan çalışmada, 120×130×375 mm ebatlı 210 adet kiriş örneğinin 105 adedi hızlandırılmış korozyon deneylerine (3 gün %5 NaCl çözeltisinde ıslanma - 4 gün havada kuruma çevrimi) tabi tutulurken, diğer 105 adet kiriş ise doğal korozyon sürecine maruz kalacak şekilde denizel ortama bırakılmıştır. İki farklı su/bağlayıcı oranı (0,4 ve 0,55) ve üç farklı bağlayıcı türü (%100 CEM I 42.5N (PÇ), 50/50 PÇ/Yüksek fırın cürufu ve 70/30 PÇ/Uçucu kül) kullanılarak hazırlanan beş tür betondan örnekler elde edilmiştir. Deneydeki diğer değişkenler ise pas payı tabakası kalınlığı (20 mm ve 40 mm) ve çatlak açıklığı (0, 0,4 ve 0,7 mm)'dir. Örneklerin korozyon hızı ve direnci iki haftada bir ölçülmüştür. Doğal ve hızlandırılmış korozyon deney yöntemlerinin her ikisinde de, çatlaklı ve çatlaksız donatılı beton örneklerinin korozyon hızı ile beton direnci arasında ters orantı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Belirli bir beton direnci değerinde, bağlayıcı türünde ve su/bağlayıcı oranında, betona gömülü çeliğin korozyon hızı çatlak açıklığıyla birlikte artış göstermektedir. Daha da ötesi, belirli bir çatlak açıklığı değerinde, çatlaklı betonda korozyon hızı beton kalitesinden etkilenmektedir.

TS EN 206-1 beton standardı, çevresel etkilerden kaynaklı klorürler için beton özellikleri ve kalitesi üzerinde sınırlamalar koyduğu gibi, beton bileşenlerinden

kaynaklanabilecek klorür içeriğini de sınırlandırmıştır. Bu sınırlandırmanın yanında kalsiyum klorür ve klorür esaslı katkıların, betonarme elemanlarda kullanılması yasaklanmıştır. TS EN 206-1'e göre izin verilebilen en yüksek klorür içeriği değerleri Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2 İzin verilebilen en yüksek klorür içeriği değerleri (TS EN 206-1/2002).

| Kullanılan beton | Klorür içeriği sınıfı * | Çimento ** kütlesine göre en fazla Cl ⁻ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|----------------------------------------------------|
| Korozyona dayanıklı kaldırma (tutma) parçaları hariç, çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva etmeyen | Cl 1,0 | %1,0 |
| Çelik donatı ve diğer gömülü metal ihtiva eden | Cl 0,2 | %0,20 |
| | Cl 0,4 | %0,40 |
| Çelik öngerme donatısı ihtiva eden | Cl 0,1 | %0,10 |
| | Cl 0,2 | %0,20 |
| * Özel kullanım amaçlı betonlarda uygulanacak sınıf, betonun kullanılacağı yerde geçerli olan kurallara bağlıdır. ** Tip II katkıların kullanıldığı ve katkının çimentoya dahil olarak kabul edildiği yerlerde, klorür muhtevası, klorür iyonlarının, çimento + dikkate alınan toplam katkı miktarlarına oranlanmasıyla hesaplanır. | | |

Mineral katkıların donatı çeliklerinin korozyonu üzerinde birbirine zıt iki etkisi bulunmaktadır. Bunlardan ilki fiziksel koruma üzerinde etkilidir. İkincil bağlayıcı madde olarak kullanılan mineral katkıları, çimentonun hidrasyon ürünlerinden olan sönmüş kireç ile puzolanik reaksiyon yaparak yeni kalsiyum-silikat-hidrat yapı meydana getirirler. Geçirimsizliğin azalması ile fiziksel koruma sağlayan bariyer etkisi daha yüksek mertebede bir koruma sağlar. Diğer yandan, puzolanik reaksiyonlar ile bağlanan kireç, betonun boşluk suyundaki alkaliniteyi azaltır, pH seviyesi düşer. Kimyasal koruma yüksek pH ile sağlandığından mineral katkıların kullanımı ile kimyasal koruma seviyesi azalmış olur. Aynı anda gelişen bu iki etkiden hangisi daha baskın çıkar ise, sonuç o yönde ilerleyecektir. Fiziksel koruma daha çok artarsa donatı daha iyi korunacak, kimyasal koruma azalırsa da donatının korozyon riski artacaktır (Yiğiter, 2008).

Klorür etkisine maruz betonlarda, uçucu kül veya yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların kullanımının sağladığı olumlu sonuç, mineral katkı ile klor iyonlarının kimyasal olarak bağlanması ile sağlanır. Beton bünyesine nüfuz eden klor iyonları, mineral katkı tanelerinin yüzeyinde adsorblanır ve alüminli bileşenler ile reaksiyon

yaparak kloro alüminatlar şeklinde tutulur (Yiğiter, 2008). Mineral katkıların klor iyonları ile yaptığı bu reaksiyon klor iyonlarının zararlı etkisinin azaltılmasını sağlar.

Choi, Kim ve Lee (2006) düşük kalsiyumlu uçucu kül içeren betonlara gömülü çelik çubukların korozyon davranışını %3,5 NaCl içeren agresif ortamda açık devre potansiyeli, polarizasyon direnci ölçümleri, elektrokimyasal impedans spektroskopisi ve hızlı klor geçirimsizliği ölçümleri ile araştırmışlardır. Uçucu kül içeren betonlardaki donatıların açık devre potansiyellerindeki değişimin daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Hızlı klor geçirimsizliği deney verilerine göre, uçucu küllü betonlardaki yük transfer direnci daha yüksektir. Düşük korozyon hızı, pitlerin sayısının ve boyutunun az olması ile iyi uyumludur. Su/bağlayıcı oranı azaldıkça korozyon direnci artmıştır. Dahası, uçucu kül kullanımının klorid iyonlarının permeabilitesini azaltması sebebiyle betondaki çeliğin korozyon direncine yararlı etkileri olmaktadır (Choi, Kim ve Lee, 2006). Korozyonun gelişimi için gerekli olan koşullar ve bu koşulların beton içinde ve çelikte oluşmasına yol açan etkenler CEB-RILEM tarafından derlenmiş ve Tablo 2.3'te özetlenmiştir. Reaksiyonun durdurulması için alınabilecek önlemler de aynı tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2.3 Korozyonun gelişimini etkileyen faktörler ve alınabilecek önlemler (CEB-RILEM).

| Korozyonu kontrol eden faktörler | Doğrudan bağlı olduğu koşul | Etkileyen Faktörler | Korozyonu önlemek veya hızını düşürmek için olanaklar |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Elektronlar açısından çeliğin iletkenliği | Her zaman mevcut | - | - |
| Elektro-kimyasal işlem için çelik yüzeyinde potansiyel farkları | Her zaman mevcut | - | Katodik koruma veya kimyasal katkı kullanımı |
| Hidroksit iyonlarının iletimi için betonun elektrolitik iletkenliği | Betonun su içeriği | Ortam koşulları, Betonun geçirimsizliği | Pas payı tabakasının kalınlığının artırılması |
| Elektro-kimyasal korozyon için demirin çözülmesi (anodik işlem) | Betonun karbonatlaşması veya zararlı iyonlar nedeniyle (Cl ⁻) pH<11,5 altına düşmesi | Pas payı tabakasının kalınlığı ve geçirimsizliği, beton karışımı, çatlaklar, çatlak genişliği | Beton kalitesinin artırılarak geçirimsizliğinin azaltılması |
| Katodik işlem ve pas ürünlerinin oluşması için oksijen bulunması | Oksijenin beton içinden geçerek donatı yüzeyine ulaşması | Pas payı tabakasının kalınlığı ve geçirimsizliği, betonun su içeriği, çatlaklar, çatlak genişliği | Çatlak genişliklerinin sınırlandırılması |

Korozyon riski yüksek yapılarda beton kalitesinin istenen düzeyde sağlanması şarttır. TS EN 206-1 standardına bakıldığında, klorür iyonlarına maruz ıslanma-kuruma etkisine açık yapılarda izin verilen en fazla S/Ç oranı 0,45, en düşük dayanım sınıfı C35 ve kullanılması gerekli en az çimento dozajı 320 kg/m^3 tür. Deniz suyu ile temas halinde ise kullanılacak en az çimento dozajının 340 kg/m^3 olması istenmektedir. Çok şiddetli etki durumunda, maliyeti oldukça yüksek olan önlemler almak gerekebilir. Bunlar arasında; korozyon önleyici katkı maddesi kullanmak, çeliği galvaniz ya da epoksi ile kaplamak ve katodik koruma sağlamak sayılabilir. Normal betonarme donatısı yerine paslanmaz çelik kullanımı mümkündür ancak aşırı maliyet artışı ve betonla aderansının iyi olmaması bu çözümü geçersiz kılar. Beton yüzeyinin polimer esaslı malzemelerle kaplanarak, betonun klorür ve nem geçirimsizliğinin azaltılması da mümkündür. Bir diğer seçenek polimer emdirilmiş beton (PIC) kullanımınıdır (Yiğiter, 2008).

2.4 Korozyon Hızı

Referans korozyon ölçüm yöntemi olan kütle kaybının belirlenmesi, hassas şekilde ağırlığı ölçülmüş bir donatının korozyona uğrayacağı ortama bırakılarak, belirli bir süre sonra çıkarılması ve yeniden tartım ile kaybedilmiş metal kütlelerinin hesaplanması şeklindedir. Numune yüzeyinde biriken korozyon ürünleri, genellikle kimyasal ve elektrokimyasal yöntemlerle temizlenir. Gerekirse mekanik temizleme veya mekanik+kimyasal temizleme de kullanılabilir. Kütle kaybı yönteminde, metal yüzeyinin her tarafında, hızla çözünmenin olduğu koşullarda korozyon hızı (CR) kütle kaybı olarak verilebilir (Denklem 2.7). Birim alandan çözünen metal miktarı korozyon kaybı olarak, ayrıca birim zamanda birim alandan çözünen metal miktarı korozyon hızı olarak tanımlanır (Korozyon, (b.t)).

$$\text{Korozyon hızı (CR)} = \frac{\Delta W}{A \times T} \quad (2.7)$$

Burada ΔW kütle kaybını, A yüzey alanı, T ise uygulanan zamanı göstermektedir.

Elektrokimyasal ölçüm teknikleri kullanıldığında, elektrokimyasal parametrelerin gravimetrik hale dönüştürülmesi Faraday Yasası kullanılarak yapılır (Denklem 2.8):

$$I.t/F=\Delta W/W_m/Z \quad (2.8)$$

Burada,

I : akım (A),

t : zaman (s),

F : Faraday sabiti=96500 coulomb,

ΔW : kütle kaybı (g),

W_m : metalin moleküler ağırlığı,

z : değerlidir.

Denklemin içerdiği akım, korozyon yoğunluğu, I_{corr} , olarak isimlendirilir ve üniform korozyon kabul edildiğinde korozyon hızı $\mu\text{m}/\text{cm}^2$ veya $\mu\text{m}/\text{yıl}$ birimlerinde verilir. Eğer korozyon homojen ise deneylerden bulunan akım, korozyona uğrayan metalik yüzey ile ilgilidir ve dolayısıyla, $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ biriminde verilebilir (Yiğiter, 2008).

2.5 Korozyonun İzlenmesi

Betonarme yapının tam olarak değerlendirilmesi iki aşamalı bir süreçtir. İlk aşamadaki ön inceleme, problemin yapısını karakterize etmeli ve detaylı inceleme için oluşturulacak plana yön vermelidir. Detaylı inceleme ise, problemin nedenleri ile hasarın boyutları ortaya konmalıdır (Broomfield, 2003).

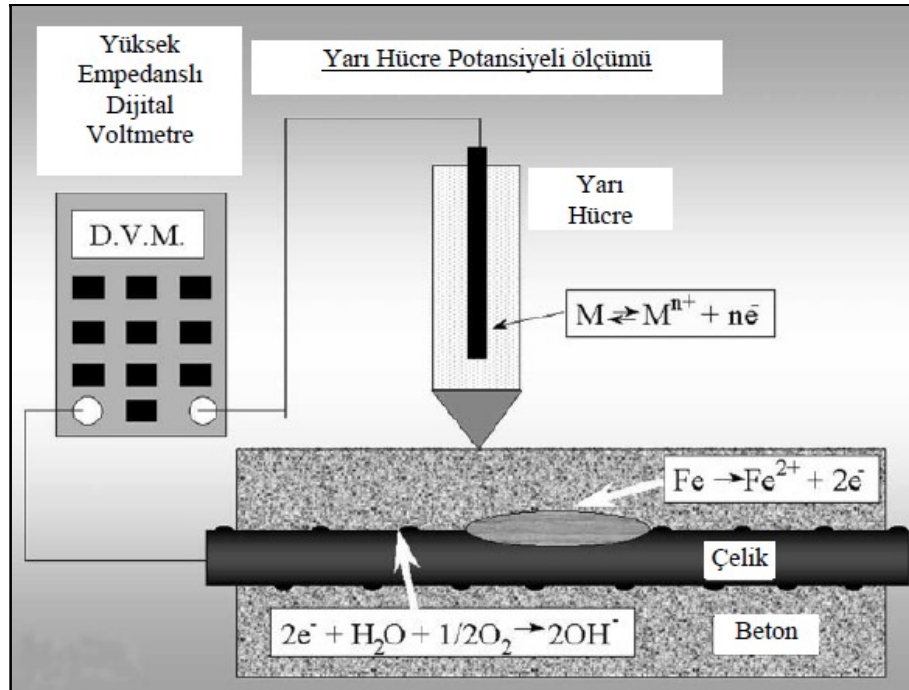
Ön incelemede genellikle görsel tetkik, çatlak ve tabaka atmaların boyutlarının belirlenmesi, birkaç noktada karbonatlaşma ve yarı hücre potansiyeli ölçümleri, laboratuvar analizleri için betondan numune alımı (kırık parça veya karot), işlemleri gerçekleştirilir. Betonda veya donatıdaki kayıplar sebebiyle yapısal bütünlüğün tehlikede olup olmadığı kontrol edilir.

Detaylı incelemede hasarın veya bozulmanın miktarı ve şiddeti mümkün olduğunca hassas bir şekilde tespit edilmeye çalışılır. Tüm elemanlarda detaylı görsel inceleme, çekiç deneyleri ile gerekli elemanlarda yarı hücre potansiyeli ölçümleri, klorid içeriği, karbonatlaşma derinliği, pas payı kalınlığı ölçümleri yapılmalıdır. Yapıdaki tüm bozulmalar, yapının maruz kaldığı koşullar not edilmeli gerekli numune alım işlemleri yapılmalıdır.

Görsel inceleme, karbonatlaşma ve klorid ölçümleri ve pas payının belirlenmesi her durumda gerekli metotlardır. Diğer tekniklerin kullanımı ile korozyon sebepleri, hasarın miktarı ve korozyonun yayılımı ile ilgili detaylar edinilir.

2.5.1 Yarı Hücre Potansiyeli

Bu test yöntemi, betonarme donatısının korozyon aktivitesini tespit etmek amacıyla laboratuvarında veya yerindeki betondaki kaplamasız donatıların elektriksel yarı hücre potansiyellerinin tespiti amacıyla kullanılmaktadır. Yarı hücre potansiyel ölçümlerine ait düzenek şematik olarak Şekil 2.8’de gösterilmektedir (Yiğiter, 2008).



Şekil 2.8 Yarı hücre potansiyel ölçümü (Yiğiter, 2008).

Bu test metodunda bakır-bakır sülfat yarı hücre tipinden başka benzer ölçüm aralığı ve hassasiyet karakteristikleri bulunan yarı hücreler de kullanılabilir. Laboratuvar çalışmalarında gümüş - gümüş klorür ya da cıva - cıva klorür (kalomel) hücreler de kullanılmaktadır. Yarı hücre ölçümlerinden bulunan açık devre potansiyelleri çelik korozyonunun termodinamik koşullarını temsil etmektedir. Potansiyel değerine göre korozyon durumu aşağıdaki Tablo 2.4'te özetlenmiştir (ASTM C876).

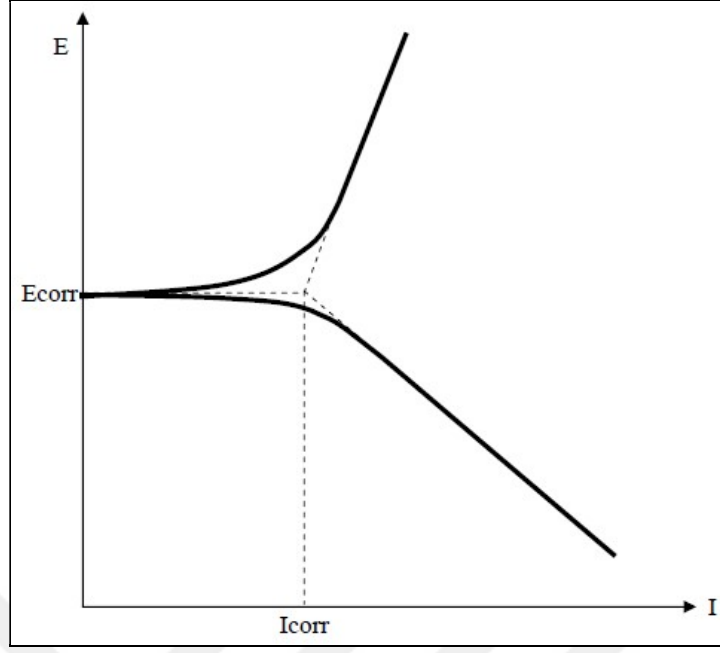
Tablo 2.4 Yarı hücre potansiyeli değerlerine göre korozyon olasılıkları (ASTM C876/2004).

| Yarı hücre potansiyeli | | Korozyon aktivitesi |
|--------------------------|--------------------------|----------------------------------------------|
| CSE* | SCE** | |
| -200 mV'dan daha pozitif | -120 mV'dan daha pozitif | %90'dan daha büyük olasılıkla korozyon yok |
| -200 ile -350 mV aralığı | -120 ile -270 mV aralığı | Belirsiz bölge |
| -350 mV'dan daha negatif | -270 mV'dan daha negatif | %90'dan daha büyük olasılıkla aktif korozyon |

* Bakır/bakır sülfat elektrodu ** Doygun Kalomel elektrot

2.5.2 Polarizasyon

Korozyonun gelişmesi hakkında bilgi sağlayan en önemli yöntemlerden biri de polarizasyon tekniğidir. Polarizasyon eğrileri elektrokimyasal hücre içinde anot ve katodun polarizasyonu sonucu gelişen, akımın şiddeti ile potansiyeli arasındaki bağıntıyı gösteren eğrilerdir (Şekil 2.9). Üç elektrotlu sistemle elde edilen polarizasyon eğrilerinin analizi ile beton içindeki çeliğin bulunduğu ortam koşullarında anlık korozyon akım yoğunluğunu ve korozyon hızını tespit etmek mümkündür (Zemajtis, 1998; Yüzer, 2003).



Şekil 2.9 Polarizasyon eğrisinin anodik ve katodik kollarının ekstrapolasyonu ile hesaplanmış korozyon yoğunluğu, I_{corr} (Yiğiter, 2008).

Günümüzde beton içindeki çeliğin korozyon akım yoğunluğunu (korozyon hızı) lineer polarizasyon metodu esasına göre ölçen aletler mevcuttur. Bunlardan en yaygın kullanılanı 3LP (3 elektrot lineer polarizasyon) aletidir. Bu alet kullanılarak ölçülen korozyon hızının değerlendirilmesi Tablo 2.5’te verilmiştir (Zemajtis, 1998; Yüzer, 2003). Anodik kolun polarizasyonu sırasında oluşan bozulmalar nedeniyle, her bir ölçüm için yeni çubuklara ihtiyaç vardır. Ancak, katkıların etkilerinin karakterizasyonu, gerilmeli korozyon kırılması hassaslığı veya katodik koruma için polarizasyon eğrilerinin kullanılması en etkili araçtır (Yiğiter, 2008).

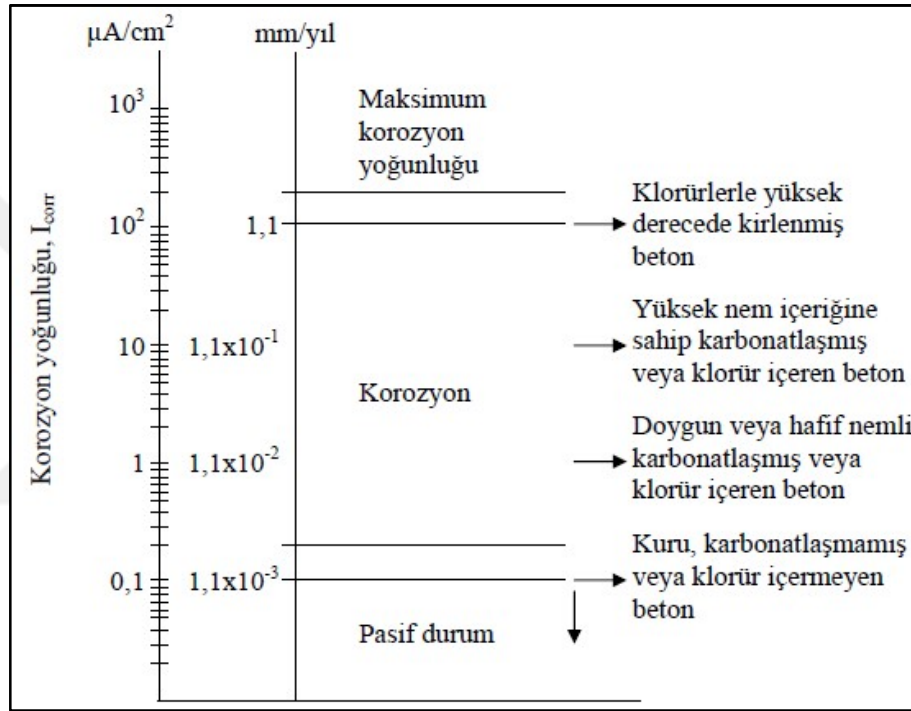
Tablo 2.5 3LP aleti ile ölçülen verilerin değerlendirilmesi.

| i_{corr} | Değerlendirme |
|-----------------------------|--------------------------------------------|
| $<0,21 \text{ mA/cm}^2$ | Hasar beklenmiyor |
| $0,21-1,07 \text{ mA/cm}^2$ | 10-15 yıl içinde olası hasar |
| $1,07-10,7 \text{ mA/cm}^2$ | 2-10 yıl içinde olası hasar |
| $>10,7 \text{ mA/cm}^2$ | 2 yıldan daha kısa süre içinde olası hasar |

2.6 Betonarmede Korozyon Hızı Değerleri

2.6.1 I_{corr} Değeri Aralıkları

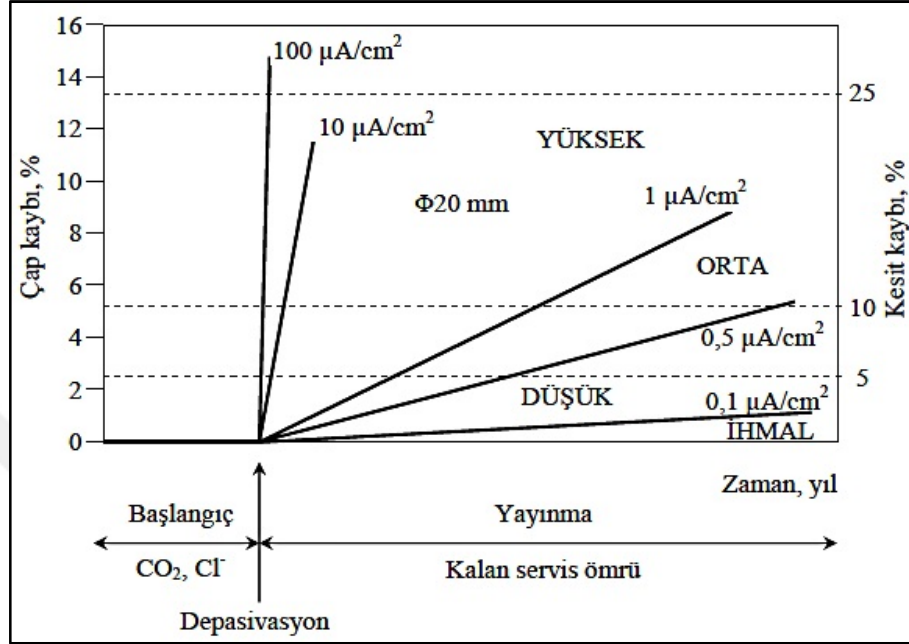
Laboratuvarda gerçekleştirilen birçok deneyden elde edilen I_{corr} değerlerinin mertebeleri Şekil 2.10'da özetlenmiştir (Andrade ve Alonso, 2004). Bu sonuçlardan, aktif ve pasif çelik arasında bir sınır tanımlamak mümkündür.



Şekil 2.10 Laboratuvarda farklı koşullarda yapılan birçok deneyden sonra elde edilen I_{corr} değeri aralıkları (Andrade ve Alonso, 2004).

Andrade ve Alonso (1996) tarafından yapılan çalışmada ölçülen I_{corr} değerlerinden bir veri bankası oluşturulmaya devam edilmekte olduğu belirtilmiştir. Bu değerler, laboratuvarda yapılan ölçümlerde $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den büyük değerlere hiç rastlanmamasına ve $1-10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ arasındaki değerlerin çok nadir görülmesine rağmen laboratuvar ölçümleri ile oldukça uyumludur. Şekil 2.11'de laboratuvarda tespit edilen I_{corr} aralıkları için, zamanla donatının kesit alanının azalması görülmektedir. I_{corr} göz önüne alındığında $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den büyük değerler, kesit alanının hızlı bir şekilde azalacağını ve yapının çabuk bir bozulma sürecine maruz

kalacağını göstermektedir. Diğer yandan, $0,1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 'den küçük değerler 100 yıldan daha fazla bir süreye işaret eder. Donatıda %5–25 kesit kaybı gerçekleşmesi için $0,5$ – $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ korozyon hızında 20–50 yıl geçmesi gerekir.



Şekil 2.11 I_{corr} değerlerinin fonksiyonu olarak donatı çapının/donatı kesitinin zamanla azalması (Andrade ve Alonso, 2004).

Bu verilere dayanarak Tablo 2.6'daki korozyon hızı sınıflandırması yapılabilir:

Tablo 2.6 Korozyon akım yoğunluğu değerlerinin sınıflandırılması (ACI 222R-01 2001, SHRP-S-330 1993).

| Korozyon Hızı ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$) | Korozyon Seviyesi |
|---------------------------------------------|-------------------|
| <0,1 | İhmal edilebilir |
| 0,1-0,5 | Düşük |
| 0,5-1,0 | Orta |
| >1 | Yüksek |

Gerçekte yapının kalan ömrünün niceliksel olarak tahmin edilmesi için korozyon hızı anahtar parametredir. Korozyon hızı ile şu bilgilere ulaşılır (Yığıter, 2008):

- Zamanla kesit alanındaki kayıp,
- Pas payının çatlamasına kadar geçen süre,
- Çelik/beton aderansındaki artan kayıplar.

BÖLÜM ÜÇ

DENEYSSEL ÇALIŞMANIN AMACI VE YÖNTEMİ

Bu çalışma, TÜBİTAK 110M691 numaralı "Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Kompozitlerin Boyutsal Kararlılığının İncelenmesi ve Boyutsal Kararlılığın Durabilite Özelliklerine Etkisinin Araştırılması" başlıklı 1001 Araştırma Projesinin bir bölümüdür. Projede Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) karışımlarının erken yaş büzülme özellikleri ve çatlakları incelenmiş olup, bu çalışmanın ilk kısmında erken yaş büzülme çatlaklarının UYPB karışımlarının mekanik ve kalıcılık özelliklerine etkisi belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci kısmında ise, erken yaş büzülme çatlaklarının aynı tür UYPB karışımlarının içine yerleştirilen donatı çeliğinin korozyonuna etkileri araştırılmıştır.

3.1 Deneysel Çalışmanın Amacı

Çalışmanın birinci kısmında, geliştirilen UYPB karışımların %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimlerine tabi tutulması sonucunda, örneklerin mekanik ve kalıcılık özellikleri incelenmiştir. Erken yaş bekletme ortamının UYPB karışımlarının çatlak davranışlarına etkisi fazladır. Geliştirilen UYPB karışımlarında oluşan erken yaş büzülme çatlaklarının tuzlu suda ıslanma-kuruma dayanıklılığına etkisinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Çalışmanın ikinci kısmında, geliştirilen UYPB karışımlarında oluşan erken yaş büzülme çatlaklarının UYPB içine gömülü çelik donatının korozyonuna etkileri incelenmiştir. Buna ilaveten, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ile çelik lif katkısının erken yaş büzülme çatlaklarına etkisi ve oluşan çatlakların donatı korozyonu ile ilişkisi incelenmiştir.

3.2 Deneysel Çalışmanın Yöntemi

İki kısımdan oluşan deneysel çalışma, kompoziti oluşturan hamur fazı, agrega fazı (harç durumu) ve lifler ile takviye edilmiş son ürün UYPB üzerinde gerçekleştirilen

mekanik ve kalıcılık özellikleri hakkındaki araştırmaları ve korozyon araştırmalarını içermektedir.

Silis dumanının her karışımda yer alması kaydıyla, farklı puzolan ikame durumlarındaki (ikamesiz, uçucu kül ikameli, öğütölmüş yüksek fırın cürufu ikameli) üç farklı karışımın %3,5 NaCl çözeltilisinde ıslanma-kuruma etkisi altındaki kalıcılıklarına ve kısıtlanmış büzölme çatlaklarının donatı korozyonuna etkisi araştırılmıştır.

Deneysel çalışmanın aşamaları Tablo 3.1' de özetlenmektedir.

Tablo 3.1 Deneysel çalışmanın aşamaları.

| Kısım | Araştırma Konusu | Deneysel değişkenler | Araştırılan özellik |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Kısıtlanmış büzölme çatlaklarının tuzlu suda ıslanma-kuruma dayanıklılığına etkisi | Puzolan ikamesi Erken yaş kür koşulu Kısıtlılık-serbestlik Islanma-kuruma çevrimleri | Çatlakların durumu Yıpranma Ses geçiş hızı Mekanik özellikler İç yapı incelemesi Klor işleme ve karbonatlaşma derinliği |
| 2 | Kısıtlanmış büzölme çatlaklarının çelik donatı korozyonuna etkisi | Puzolan ikamesi Erken yaş kür koşulu Kısıtlılık-serbestlik | Çatlakların durumu Yıpranma Donatı korozyonu |

Sistemantik taramalarda bünyesel büzölme koşulları $20\pm 1^{\circ}\text{C}$, 98 ± 2 bağlı nem (BN), kuruma büzölmesi koşulları $30\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50 ± 2 BN'dir. Sözü edilen iklimin, Türkiye'de yaz aylarındaki ortamı temsil ettiği söylenebilir. Çalışma kısımları ile, erken yaşta oluşan kısıtlanmış büzölme çatlaklarının olumsuz etkilerinin ve beton kürünün öneminin anlaşılması hedeflenmiştir.

BÖLÜM DÖRT

KULLANILAN MALZEMELER

4.1 Çimento ve Puzolanlar

Uçucu kül; pulvarize (öğütülmüş) kömür ile çalışan termik santrallerde kömürün yanması ile çok ince toz halinde elde edilen bir endüstriyel atık malzeme olup baca gazlarından elektrostatik tutucular vasıtasıyla yakalanır. Kimyasal bileşimleri ve sahip oldukları bileşikler itibariyle uçucu kül ile çimento birbirine çok benzerler. Yüksek fırın cürufu; esas itibariyle silis, kalsiyum aluminosilis ve bazik esaslı bileşikler içeren, yüksek fırınlarda demir üretimi sırasında ergimiş halde elde edilen bir atık üründür. Silis dumanı, silisyum metalinin veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretildiği tesislerin baca gazlarıyla taşınan çok ince bir endüstriyel atıktır. Çimento taneciklerinin çapı ortalama olarak 10 µm olduğu düşünülürse, silis dumanının çimentodan 100 kat daha ince olduğu görülür. Silis dumanının yüksek puzolanik özellik göstermesinin nedeni de budur (Erdoğan ve Kurbetçi, 2003; Baradan, Yazıcı ve Aydın, 2012).

Çalışmada CEM I 42,5 R türü Denizli Çimento ürünü çimento (Ç) kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3,12'dir. Silis dumanı (SD), BASF firmasının tedarik ettiği Meyco MS610 kodlu üründür. SD'nin özgül ağırlığı 2,2'dir. Öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC), ADANA Çimento Sanayi T.A.Ş. İskenderun Tesisleri ürünü olup özgül ağırlığı 2,9'dur. Soma Termik Santral atığı olan uçucu kül (UK), ASTM C-618'e göre C sınıfı, TS EN 197-1'e göre W sınıfı (kalkersi) olan yüksek kireç içerikli bir uçucu küldür. UK'nın özgül ağırlığı 2,3'tür. Çimentonun, SD'nin, YFC'nin ve UK'nın fiziksel ve kimyasal özellikleri sırasıyla Tablo 4.1, 4.2, 4.3 ve 4.4'te sunulmaktadır.

Tablo 4.1 Çimentonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri.

| Kimyasal özellikler (%) | | Fiziksel özellikler | |
|--------------------------------|--------|-----------------------------------|------|
| SiO ₂ | 19,1 | Özgül yüzey (m ² /kg)* | 369 |
| Al ₂ O ₃ | 4,40 | Priz başlangıcı (dk) | 110 |
| Fe ₂ O ₃ | 3,96 | Priz sona ermesi (dk) | 166 |
| CaO | 61,85 | Hacim Genleşmesi (mm) | 1,00 |
| MgO | 2,05 | | |
| Na ₂ O | 0,27 | | |
| K ₂ O | 0,70 | | |
| | | Basınç Dayanımı (MPa) | |
| SO ₃ | 3,72 | 2 günlük | 27,1 |
| Cl ⁻ | 0,0004 | 7 günlük | 43,3 |
| Kızdırma kaybı | 1,82 | 28 günlük | 56,0 |

*Blaine yöntemiyle tedarikçi firma tarafından tespit edilmiştir.

Tablo 4.2 SD'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

| Kimyasal Kompozisyon | (%) |
|---------------------------------------------------------|--------|
| SiO ₂ | 92,26 |
| Al ₂ O ₃ | 0,89 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,97 |
| CaO | 0,49 |
| MgO | 0,96 |
| Na ₂ O | 0,42 |
| K ₂ O | 1,31 |
| SO ₃ | 0,33 |
| Cl ⁻ | 0,09 |
| Fiziksel Özellikler | - |
| Özgül yüzey (m ² /kg)* | ≈20000 |
| Puzolanik aktivite indeksi, ASTM C-311 (28 gün), (%) | 95 |

*Brunauer–Emmett–Teller (BET) nitrojen adsorpsiyonu yöntemiyle tedarikçi firma tarafından tespit edilmiştir.

Tablo 4.3 YFC'nin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

| Kimyasal Kompozisyon | (%) |
|---------------------------------------------------------|------------|
| SiO ₂ | 39,32 |
| Al ₂ O ₃ | 9,36 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,90 |
| CaO | 36,61 |
| MgO | 6,38 |
| Na ₂ O | - |
| K ₂ O | - |
| SO ₃ | 0,16 |
| SO ₄ | 0,19 |
| Cl ⁻ | 0,013 |
| Fiziksel Özellikler | - |
| Özgül yüzey (m ² /kg)* | 599 |
| Puzolanik aktivite indeksi, ASTM C-311 (28 gün), (%) | 120 |

* Blaine yöntemiyle tedarikçi firma tarafından tespit edilmiştir.

Tablo 4.4 UK'nın kimyasal ve fiziksel özellikleri.

| Kimyasal Kompozisyon | (%) |
|---------------------------------------------------------|------------|
| SiO ₂ | 47,15 |
| Al ₂ O ₃ | 20,42 |
| Fe ₂ O ₃ | 4,15 |
| CaO | 20,47 |
| MgO | 1,51 |
| Na ₂ O | 0,59 |
| K ₂ O | 1,36 |
| SO ₃ | 2,08 |
| SO ₄ | - |
| Cl ⁻ | 0,015 |
| Serbest CaO | 1,2 |
| Kızdırma kaybı | 0,97 |
| Fiziksel Özellikler | - |
| Özgül yüzey (m ² /kg)* | 292 |
| Puzolanik aktivite indeksi, ASTM C-311 (28 gün), (%) | 83 |

* Blaine yöntemiyle tedarikçi firma tarafından tespit edilmiştir.

4.2 Agregalar

Çalışmada Pomza Export firmasından temin edilen, İzmir yöresine ait kuvars agregaları kullanılmıştır. İlk aşamada üreticinin temin ettiği dört boyut aralığında kuvars agregası kullanılmıştır; 0 – 0,4 mm, 0,5 – 1 mm, 1 – 3 mm ve 5 – 8 mm. Kullanılan agregaların DEÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarında özgül ağırlık ve su emme oranının tayini deneyi yapılmış olup, agregaların tüm boyutları için özgül

ağırlığın $2,65 \text{ g/cm}^3$, su emmenin %0,12 olduğu belirlenmiştir. Agregaların bazı kimyasal özellikleri Tablo 4.5'te, elek analizleri Tablo 4.6'da sunulmaktadır. Tablo 5'ten görüleceği üzere 0,5 – 1 mm aralığı için %26 oranında 1 mm'den büyük dane bulunmaktadır. Bu danelerin 1,2 mm çapına kadar olduğu belirlenmiştir. Ayrıca kırma olan kuvars kumlarında çok fazla oranda kusurlu, kübik yapıdan uzak kum daneleri gözlenmiştir. Elek analizindeki maksimum agrega dane boyutu (D_{maks}) farklılığının temel sebebi budur.

Tablo 4.5 Kuvars agregalarının kimyasal kompozisyonu.

| Kimyasal Kompozisyon | (%) |
|--------------------------------|-------|
| SiO ₂ | 99,79 |
| Al ₂ O ₃ | 0,06 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,02 |
| CaO | 0,02 |
| MgO | 0,01 |
| Na ₂ O | 0,02 |
| K ₂ O | 0,01 |
| SO ₃ | - |
| Cl ⁻ | - |

Tablo 4.6 Kuvars agregalarının elek analizleri.

| Elek Açıklığı (mm) | 5 – 8 mm | 1 – 3 mm | 0,5 – 1 mm | 0 – 0,4 mm |
|--------------------|----------|----------|------------|------------|
| 8 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| 4 | 14 | 100 | 100 | 100 |
| 2 | 0 | 53 | 100 | 100 |
| 1 | 0 | 0 | 74 | 100 |
| 0,500 | 0 | 0 | 0 | 100 |
| 0,250 | 0 | 0 | 0 | 76,0 |
| 0,125 | 0 | 0 | 0 | 8,4 |
| 0,090 | 0 | 0 | 0 | 5,9 |
| 0,075 | 0 | 0 | 0 | 4,0 |
| 0,063 | 0 | 0 | 0 | 2,1 |
| 0,053 | 0 | 0 | 0 | 1,7 |
| elek altı | 0 | 0 | 0 | 0,0 |

4.3 Mikro Çelik Lif

Kullanılan mikro çelik lifler 6 mm uzunluğa, 0,16 mm çapa sahip pirinç kaplı liflerdir. Liflerin narinliği (boy/çap oranı) 37,5'tir. Çekme dayanımları 2000 MPa, özgül ağırlıkları 7,17'dir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Mikro Çelik Lifler.

4.4 Kimyasal Katkılar

Hiperakışkanlaştırıcı olarak BASF firmasının geliştirdiği Glenium ACE 30 kullanılmıştır. Bu katkıının genel özellikleri BASF firması tarafından belirlenmiş olup Tablo 4.7’de sunulmaktadır.

Tablo 4.7 Hiperakışkanlaştırıcı katkıının genel özellikleri.

| | |
|------------------------------|-----------------------------|
| Malzemenin yapısı | Polikarboksilik eter esaslı |
| Renk | Kahverengi |
| Yoğunluk | 1,045-1,085 kg/litre |
| Klor içeriği % (EN480-10) | <0,1 |
| Alkali içeriği % (EN 480-12) | <3 |

İkinci çalışmada, kimyasal katkılara ilaveten kullanılan, beton numunelerinin iki ucundan çıkan ve atmosfer koşullarına maruz kalan donatıların kaplanmasında kullanılan epoksi malzemesi, Polisport firmasının geliştirdiği EPSK 1400 RAL solventsiz epoksi son kat boyasıdır (Şekil 4.2).



Şekil 4.2 Donatı korumada kullanılan solventsiz epoksi malzemesi.

4.5 Su

Hazırlanan numunelerde karışım suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Suyun kimyasal analizi Tablo 4.8’de sunulmaktadır.

Tablo 4.8 DEÜ Tınaztepe Yerleşkesi şebeke suyunun pH, iletkenlik, iyon konsantrasyonu ve sertliği*

| | |
|-------------------------|-----------------------------|
| pH | 7,6 |
| İletkenlik | 400 μ s/cm |
| Kalsiyum (Ca^{+}) | 56,11 mg/L |
| Magnezyum (Mg^{+2}) | 19,45 mg/L |
| Klorür (Cl^{-}) | 50 mg/L |
| Tuzluluk | <%0,1 |
| Toplam Sertlik | 22 F.S° = 220 mg/L $CaCO_3$ |

*Dokuz Eylül Üniversitesi Çevre Mühendisliği Laboratuvarında tespit edilmiştir.

4.6 Çelik Donatı

Tempcore yöntemi ile nervürlü olarak imal edilen donatıların anma çapı 10 mm’dir. Donatılar, TS 708 “Çelik - Betonarme için - Donatı çeliği” standardına göre S420 kalitesindedir. Kullanılan çeliğin kimyasal kompozisyonu Tablo 4.9’da sunulmuştur.

Tablo 4.9 Donatı çeliğinin kimyasal kompozisyonu*

| Bileşen | Miktar (%) |
|---------|------------|
| C | 0,209 |
| Si | 0,030 |
| Mn | 0,567 |
| Cu | 0,441 |
| S | 0,026 |
| Ni | 0,122 |
| Zn | 0,017 |

*Dokuz Eylül Üniversitesi Maden Mühendisliği Laboratuvarında tespit edilmiştir.

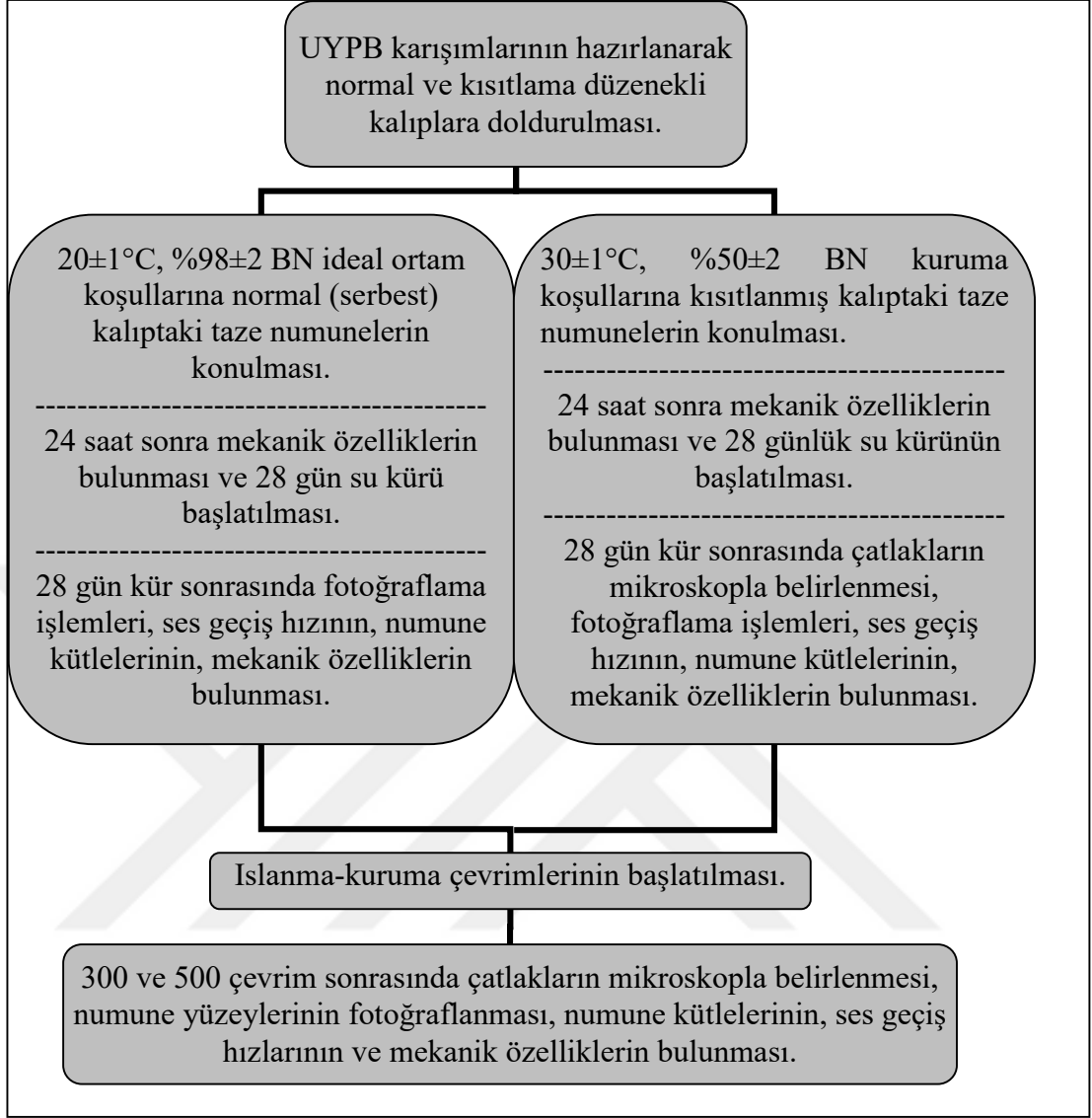
BÖLÜM BEŞ

DÖKÜM PLANI VE NUMUNE SAYILARI

5.1 İslanma-Kuruma Çalışmasında Döküm Planı ve Numune Sayıları

İkamesiz, UK ikameli ve YFC ikameli üç farklı UYPB karışımının %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma etkisine dayanıklılıkları araştırılmıştır. Bu kısımda, aşağıdaki işlem sırası benimsenerek, ilk 24 saat ideal koşullarda serbest olarak ve kuruma koşulunda kısıtlı halde bekletilen karışımların ıslanma-kuruma (IK) dayanıklılıkları araştırılmıştır (Şekil 5.1). Büzülme kısıtlama sistemine sahip pimli kalıplara dökülen üç farklı UYPB karışımı kuruma koşulunda ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ BN) 24 saat boyunca bekletilmiştir. İdeal koşulda ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ BN) ise normal kalıp sisteminde serbest halde bekletme yapılmıştır. Numunelerin çatlak gözlemleri yapıp 24 saatlik dayanımları bulunduktan sonra 28 günlük su kürü başlatılmıştır. 28 günlük su kürünün ardından çatlak uzunluk ve ortalama genişlikleri belirlenmiştir. 300 ve 500 çevrim sonrasında da büzülme çatlaklarının ve numunenin genel durumu çatlak mikroskobu ve fotoğraflama çalışmalarıyla kayıt altına alınmış, mukavemet değişimleri belirlenmiştir. Tüm karışım türlerinde her yaş ve çevrim türü için 6'şar numune test edilmiştir (Tablo 5.1). Serbest kalıp numune boyutları $40\times 40\times 160$ mm iken, kısıtlanmış kalıp numune boyu $40\times 40\times 170$ mm'dir.

İslanma-kuruma (IK) çevrimlerinin hasar mekanizmasının anlaşılması için 300 ve 500 çevrim sonrası eğilme yükü - sehim eğrileri, basınç dayanımları, numune gövdesinin bütünlüğü, büzülme çatlaklarının durumu, ultra ses geçiş hızları ve kütle kayıpları gibi parametreler değerlendirilmiştir. IK çevrimleri sonrası ek olarak klor işleme derinlikleri, karbonatlaşma derinlikleri ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri araştırılmıştır.



Şekil 5.1 Islanma-kuruma çalışmasının akış diyagramı.

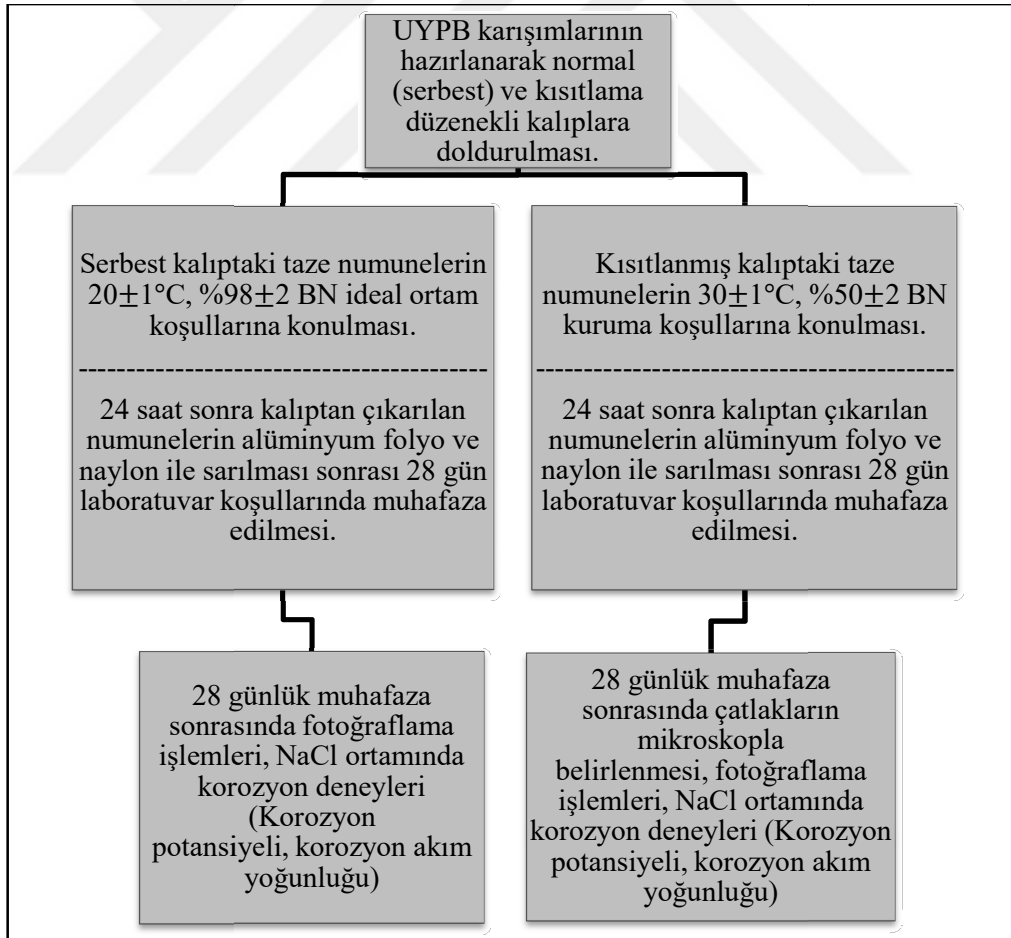
Tablo 5.1 Islanma-kuruma çalışmasında numune sayıları.

| | LİFLİ-300 ve 500 çevrim | | | | | | | | | | | |
|------|-------------------------|------|-------------------------|----|-----------------------|----|-------------------------|----|-----------------------|----|-------------------------|----|
| | İ50-F2 | | | | UK30-İ50-F2 | | | | YFC50-İ50-F2 | | | |
| | İdeal Ortam (Serbest) | | Kuruma Ortamı (Kısıtlı) | | İdeal Ortam (Serbest) | | Kuruma Ortamı (Kısıtlı) | | İdeal Ortam (Serbest) | | Kuruma Ortamı (Kısıtlı) | |
| Adet | E* | İK** | E | İK | E | İK | E | İK | E | İK | E | İK |
| | | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |

*E=Eşlenik numune, **İK=Islanma-kurumaya tabi tutulan numune

5.2 Donatı Korozyonu Çalışmasında Döküm Planı ve Numune Sayıları

Bu kısımda, üç farklı UYPB karışımı ile donatılı olarak hazırlanan betonlarda çelik donatının korozyonu incelenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmanın akış diyagramı Şekil 5.2'de özetlenmektedir. Bu karışımlar hazırlandıktan sonra kısıtlanmış ve serbest kalıp düzeneklerine yerleştirilmiştir. Serbest kalıp düzenekleri ideal ortamda, büzülme kısıtlayan kalıplar ise iklimlendirme kabiniinde oluşan kuruma ortamında 24 saat muhafaza edilmiştir. 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler korozyon deneyleri öncesinde folyo ile kaplama, donatı epoksileme ve kablolama işlemlerine tabi tutulmuştur. Bu şekilde 28 gün laboratuvar ortamında yalıtılmış halde bekletilen numunelerin alüminyum folyo kaplamaları sökülerek çatlak analizleri, yüzeylerin fotoğraflanması işlemleri yapılmıştır. Daha sonrasında 24 saat %3,5 NaCl çözeltisinde bekletilen numuneler doygun halde doğrudan korozyon deneylerine tabi tutulmuştur.



Şekil 5.2 Donatı korozyonu çalışmasının akış diyagramı.

Her bir karışım ve erken yaş koşulu için 6'şar adet 75×75×205 mm ebatlı donatılı numune test edilmiştir (Tablo 5.2).

Tablo 5.2 Donatı korozyonu çalışmasında numune sayıları.

| | İ50-F2 | | UK30-İ50-F2 | | YFC50-İ50-F2 | |
|---------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|-------------------------|
| | İdeal Ortam (Serbest) | Kuruma Ortamı (Kısıtlı) | İdeal Ortam (Serbest) | Kuruma Ortamı (Kısıtlı) | İdeal Ortam (Serbest) | Kuruma Ortamı (Kısıtlı) |
| Lifli numune adedi | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| | İ50-F0 | | UK30-İ50-F0 | | YFC50-İ50-F0 | |
| | İdeal Ortam (Serbest) | Kuruma Ortamı (Kısıtlı) | İdeal Ortam (Serbest) | Kuruma Ortamı (Kısıtlı) | İdeal Ortam (Serbest) | Kuruma Ortamı (Kısıtlı) |
| Lifsiz numune adedi | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |

5.3 Karışım Oranları

Tez çalışması kapsamında kullanılan İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları, 110M691 numaralı TÜBİTAK Projesi kapsamında geliştirilen ve büzülme özellikleri tespit edilmiş karışımlardır.

%45 agrega (%55 hamur) hacminin çelik liflerle yerleştirilebilir kıvamda UYPB üretimi için uygun olduğu belirlenmiştir. Kendiliğinden yerleşebilir bir karışım için belirlenen agrega hacmine ve gradasyonuna sahip kontrol karışımında (AG45) 1–3 mm aralığındaki agregalara 5–8 mm agreganın ağırlıkça %50 oranında ikame edilmesi (agrega irileştirilmesi) sonucunda baskın eğilim olarak büzülme kısıtlama performansı %50'ye kadar olan ikamelerde sağlanmıştır. İri agrega ikamesinin %50'den fazla olması durumunda agregalar etrafındaki mikro çatlak ağının artışı, kuruma etkisinde dış ortama nem kaybını, bünyesel büzülme koşullarında içsel nemin yer değiştirmesini arttırabilir. Erken yaş büzülmenin azaltılması, karışım homojenitesinin korunması ve lifli karışımlarda lif yönlenmesinin eğilme performansını olumsuz etkilememesi için irileştirme oranı %50 seçilmiştir. Böylelikle karışımın maksimum agrega dane boyutu (D_{maks}) 8 mm'ye yükselmiş ve kesikli gradasyon elde edilmiştir. İri agregaların, tüm karışım yerine 1-3 mm agrega kısmına ikame edilmesinin sebebi, UYPB'deki 1 mm altı ve üst agrega oranını

bozmadan, gradasyonu aşırı kabalaştırmadan bir araştırma yürütülmesi isteğidir. Lif takviyesi hacimce %2 olarak uygulanmış, gerekli hacim gradasyonu bozmayacak şekilde agrega hacminden düşülmüştür. Lifli karışımlarda 100 mm alt çapa sahip mini çökme konisi kullanılarak yapılan yayılma deneyi sonucu 250 mm kendiliğinden yayılma çapı hedefiyle akışkanlaştırıcı farklı dozajlarda kullanılmıştır.

Hacimce %45 agrega (%55 hamur) içeren (AG45), toplam bağlayıcı ağırlığına %20 silis dumanı ikamesi yapılmış, maksimum agrega dane boyutu (D_{maks}) 8 mm olan, agrega irileştirme oranı %50 olan (İ50), hacimce %2 mikro çelik lif içeren (F2) karışım İ50-F2 olarak isimlendirilmiştir. Bu karışıma %50 öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ve %30 uçucu kül (UK) ikamesi yapılarak, hamur fazları aynı yayılma çapına sahip olan üç karışım (İ50-F2, UK30-İ50-F2, YFC50-İ50-F2) kullanılmıştır.

5.3.1 İslanma-Kuruma Çalışmasında Karışım Oranları

Bu kısımda, ultra yüksek performanslı harcın %3,5 NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma dayanıklılığının araştırılması için hazırlanan karışım dizaynlarında kullanılan malzeme oranları Tablo 5.3'te verilmektedir. 40×40×160 mm ebatlı lifli karışımların kirece doymun suda 28 gün kür edildikten sonraki basınç dayanımları 150 MPa ± %5 gibi bir dayanım hedefiyle oluşturulmuştur. Bu nedenle, benzer dayanımları elde etmek için UK ikamesi %30 oranında, YFC ikamesi ise %50 oranında seçilmiştir.

Tablo 5.3 İslanma-kuruma deneylerinde kullanılan serilerin karışım oranları.

| Bileşen (kg/m ³) | Karışımlar | | |
|------------------------------|------------|-------------|--------------|
| | İ50-F2 | UK30-İ50-F2 | YFC50-İ50-F2 |
| Su | 182 | 171 | 183 |
| Çimento | 729 | 480 | 365 |
| Silis dumanı | 182 | 171 | 183 |
| Yüksek fırın cürufu | - | - | 365 |
| Uçucu kül | - | 206 | - |
| 5 – 8 mm kuvars | 230 | 230 | 230 |
| 1 – 3 mm kuvars | 230 | 230 | 230 |
| 0,5 – 1 mm kuvars | 380 | 380 | 380 |
| 0 – 0,4 mm kuvars | 310 | 310 | 310 |
| Mikro çelik lif | 143,4 | 143,4 | 143,4 |
| Akışkanlaştırıcı (ACE30) | 27 | 33 | 17 |

Tablo 5.3 (devam)

| Bileşen (kg/m ³) | Karışımlar | | |
|------------------------------|------------|-------------|--------------|
| | İ50-F2 | UK30-İ50-F2 | YFC50-İ50-F2 |
| Tasarım Özellikleri | | | |
| Mikro çelik lif hacmi (%) | 2 | 2 | 2 |
| Agrega hacmi (%)* | 45 | 45 | 45 |
| Hamur hacmi (%) | 55 | 55 | 55 |
| Su /Çimento | 0,25 | 0,36 | 0,50 |
| Su / Çimento** | 0,27 | 0,39 | 0,52 |
| Su/Bağlayıcı | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Su/Bağlayıcı** | 0,22 | 0,22 | 0,21 |

*Lifler agrega hacmine dahil edilmiştir. ** Katkıdan gelen su ile.

5.3.2 Donatı Korozyonu Çalışmasında Karışım Oranları

Bu kısımda, betonun çeliği korumadaki etkisinin araştırılması amacıyla, Bölüm 5.3'te anlatılan lif içeren karışımların lif içermeyen halleri de hazırlanmıştır. Ultra yüksek performanslı-donatılı betonun akım yoluyla hızlandırılmış korozyon deneyleri için hazırlanan beton karışımlarında kullanılan malzeme miktarları Tablo 5.4'te verilmektedir.

Tablo 5.4 Korozyon deneylerinde kullanılan serilerin karışım oranları.

| Bileşen (kg/m ³) | Karışımlar | | | | | |
|------------------------------|------------|-------------|--------------|--------|-------------|--------------|
| | Lifli | | | Lifsiz | | |
| | İ50-F2 | UK30-İ50-F2 | YFC50-İ50-F2 | İ50-F0 | UK30-İ50-F0 | YFC50-İ50-F0 |
| Su | 182 | 171 | 183 | 182 | 171 | 183 |
| Çimento | 729 | 480 | 365 | 729 | 480 | 365 |
| Uçucu kül | - | 206 | - | - | 206 | - |
| Yüksek fırın cürufu | - | - | 365 | - | - | 365 |
| Silis dumanı | 182 | 171 | 183 | 182 | 171 | 183 |
| 5-8 mm kuvars | 230 | 230 | 230 | 240 | 240 | 240 |
| 1-3 mm kuvars | 230 | 230 | 230 | 240 | 240 | 240 |
| 0,5-1 mm kuvars | 380 | 380 | 380 | 397 | 397 | 397 |
| 0-0,4 mm kuvars | 310 | 310 | 310 | 324 | 324 | 324 |
| Akışkanlaştırıcı | 27 | 33 | 17 | 27 | 33 | 17 |
| Mikro Çelik Lif | 143 | 143 | 143 | - | - | - |
| Su/bağlayıcı | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| Su/çimento | 0,25 | 0,36 | 0,50 | 0,25 | 0,36 | 0,50 |

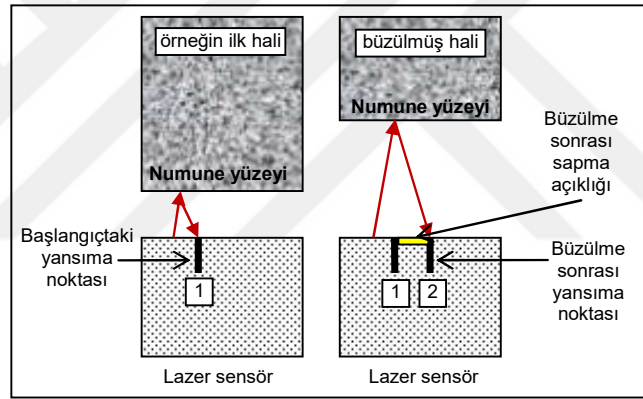
BÖLÜM ALTI

KULLANILAN CİHAZLAR VE ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ

İki kısımdan oluşan deneysel çalışmada kullanılan yöntemler, taze karışımın hazırlanmasından test edilmesine kadar geçen süreçte sırayla verilmektedir.

6.1 Erken Yaş Lineer Büzülme Ölçüm Sistemleri

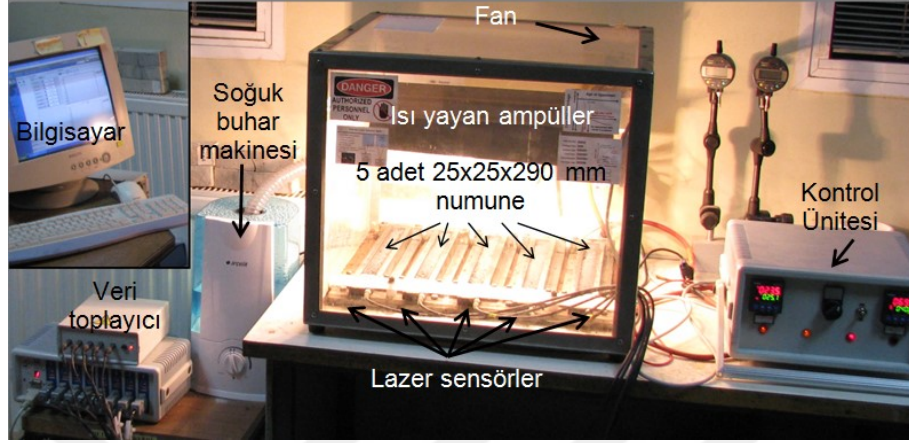
Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada, çimentolu matrislerin erken yaş büzülme ölçümlerinde kullanılan yöntem lazer ölçüm sistemidir. Henüz erken dönemde plastik halde bulunan matrise dışarıdan deforme edici bir kuvvet uygulamadan ölçmek için lazer ile mesafe ölçümü mantığı kullanılmıştır (Şekil 6.1).



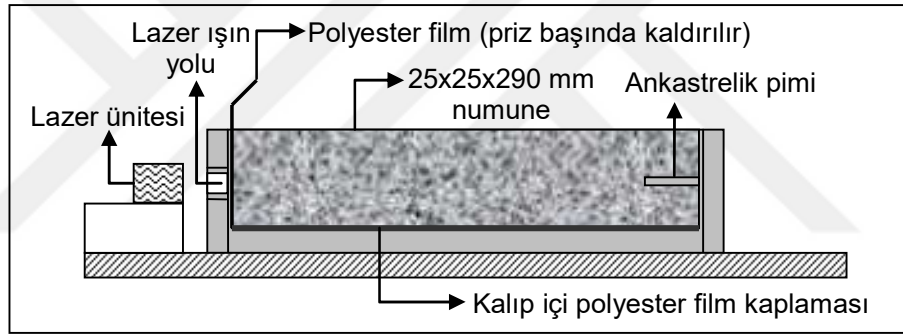
Şekil 6.1 Lazer sensör ile büzülme ölçümü.

Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada kullanılan erken yaş (<24 saat) büzülme ölçüm kabininde aynı anda 5 adet numune (25×25×290 mm) test edilmiş, değerlendirmeler beş numunenin ortalama büzülme eğrileri kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan sistem ve büzülme kalıpları Şekil 6.2'de, büzülme kalıplarının ayrıntıları Şekil 6.3'te gösterilmektedir. Sistemde, kuruma koşullarında numune perdah yüzeyi kabin ortamına açıkken bünyesel büzülme koşullarında (nem kaybının olmadığı) numunelerin yüzeyi naylon örtü ile kapatılmıştır. Erken yaş bünyesel büzülme ölçümleri 20°C - %98 bağıl nem (BN), kuruma büzülmesi ölçümleri ise 30°C - %50 BN kabin koşullarında ölçülmüştür. Priz başlangıç ve bitiş süreleri TS EN 480-2 standardına göre 20°C ve 30°C sıcaklığa sahip termal banyo içerisinde

tespit edilmiştir. İlgili büzülme ortamı sıcaklığında ölçülen priz başlangıcı anında Şekil 6.3'te sunulan lazer ışın yolu önündeki engel kaldırılmış ve kayıt başlatılmıştır.



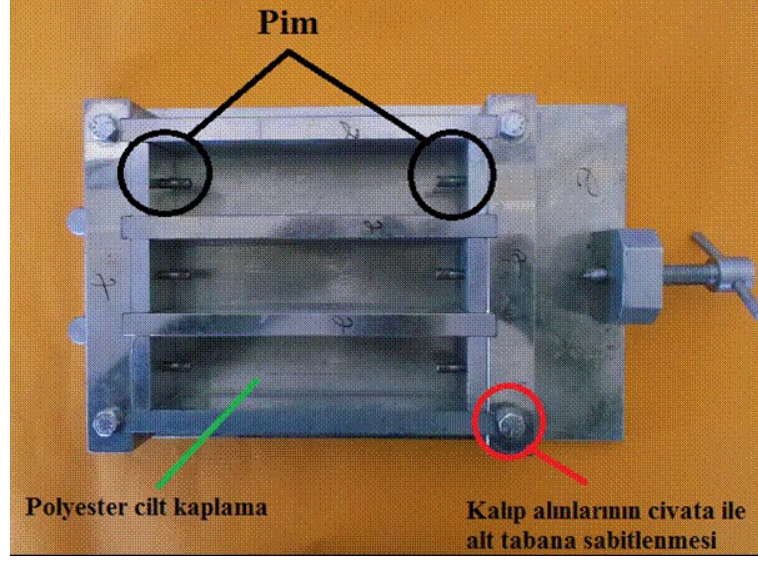
Şekil 6.2 Erken yaş büzülme test kabini.



Şekil 6.3 Erken yaş büzülme kalıbı.

6.2 Islanma-Kuruma Çalışmasında Kalıpların ve Karışımların Hazırlanması, Yerleştirme Prosedürü, Ölçüm Yöntemleri

Kısıtlayıcı kalıp sistemi 40×40×170 mm iç hacimli, aksel yönde numuneyi kısıtlamaya çalışan bir tasarıma sahiptir (Şekil 6.4). Kalıplarda kısıtlama etkisinin yalnızca aksel yönde oluşması için kalıp iç yüzeyleri polyester cilt ile kaplanmış ve yağlanmıştır. Kalıp alın parçalarının alt tabana civatalar ile sabitlenmesiyle çekme etkisinde hareket etmemesi sağlanmıştır. Kalıp alınlarının merkezinde büzülme kısıtlayıcı etki oluşturmak üzere vidalı pimler mevcuttur.



Şekil 6.4 40×40×170 mm ebatlı büzülme kısıtlayıcı kalıp sistemi.

Birinci çalışmada, karışımların hazırlanmasında yüksek devirde dönebilen, güçlendirilmiş bir Hobart mikser kullanılmıştır (Şekil 6.5). Bağlayıcı maddeler, karışım suyunun 3/4'ü ve akışkanlaştırıcının 1/4'ü karışımıyla ıslatılmıştır. Tüm maddeler ıslandıktan sonra kalan katkı ve su karışıma eklenerek hızlı karıştırma uygulanmıştır. Karıştırma, 3 dakika yavaş kuru karışım, 2 dakika yavaş ıslak karışım ve 5 dakika katkının da ilave edilmesinin ardından hızlı karışım olacak şekilde toplamda 10 dakikada tamamlanmıştır.



Şekil 6.5 Hobart mikser kullanılarak karışımların hazırlanması.

Karışımlar kalıplara vibrasyon ve sıkıştırma uygulanmaksızın kendiliğinden yerleşmiş (Şekil 6.6), yoğun viskoziteli karışımlarda sıkışık havanın atılması için 5 saniyelik kalıp vibrasyonu uygulanmıştır.

Bir kısım numune döküm anından itibaren, kalıbın içerisinde kalmak ve dış ortamla sadece 40×170 mm'lik üst yüzeyden temas halinde kalmak koşuluyla, kapaklı kür kabininde (20±1°C, %98±2 bağıl nem) 24 saat boyunca bekletilmiştir. Diğer bir kısım numune ise Şekil 6.7'deki iklimlendirme kabininde (30±1°C, %50±2 bağıl nem) 24 saat boyunca kurumaya maruz bırakılmıştır.



Şekil 6.6 Karışımların kalıba yerleştirilmiş hali.



Şekil 6.7 Taze karışımların iklim kabinine yerleştirilmesi.

6.2.1 İslanma - Kuruma Dayanıklılığının Araştırılması

Şekil 6.8’de IK kabini (hızlandırılmış korozyon kabini) gösterilmektedir. Seçilmiş karışımlara ait ve her bir yaşta test edilecek 6’şar numune ilk 24 saat ideal koşullarda ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ BN) serbest halde, 6’şar numune de ilk 24 saat kuruma koşullarında ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ BN) kısıtlanmış olarak bekletilmiştir. Numuneler, fotoğraflama ve çatlak mikroskobu incelemelerinin ardından 28 gün standart su kürüne bırakılmıştır. 28 gün standart su kürü sonrası aynı işlemler tekrarlanmış, IK çevrimlerine her bir karışım ve erken yaş kısıtlama durumu için 300 çevrimde ve 500 çevrimde 6’şar numune test edilecek şekilde numune yerleştirilmiştir. IK çevrimlerine eş sürede su küründe bekletilen eşlenik numuneler 300 ve 500 çevrim kadar süre sonrası test edilmiştir. Kabindeki numuneler $\%3,5$ NaCl çözeltisinde ıslanma ve kuruma çevrimlerine maruz bırakılmıştır. Kabin içerisinde bir çevrim otomatik olarak: 45 dakika ıslanma (20°C $\%3,5$ NaCl çözeltisi ile), 100 dakika kuruma (60°C sıcak hava ile), 150 dakika kuruma (20°C normal hava ile) aşamalarından oluşmaktadır. NaCl çözeltisi ile IK çevrimlerinin yapılmasının sebebi çelik liflerin korozyonunun ve büzülme çatlaklarının korozyona etkisinin araştırılmasıdır. 300 ve 500 IK çevrimi sonrası büzülme çatlaklarının durumu,

ultrases geçiş hızları, mekanik özellikler, bir kısım numunede iç yapı incelemeleri, eğilme sonrası kırık yüzeyde klor işleme derinliği ve karbonatlaşma derinlikleri araştırılmıştır. Görsel değerlendirme ve dayanım değişimlerinin yorumlanabilmesi için fotoğraflama ve çatlak mikroskobu ile çatlakların karakterize edilmesi işlemleri gerçekleştirilmiştir.

%0,2 konsantrasyonda $AgNO_3$ zeltisi püskürtülerek klorürün işlemediği bölge kahverengi olarak gözlenmiştir. Karbonatlaşmış kesitin tespiti için fenolftalein çözeltisi püskürtülmüş ve renk değişimi gözlenmiştir. Çekirdekdeki pembe renkli bölüm ($pH > 9,5$) henüz karbonatlaşmamış kısmı göstermektedir. Dış yüzeydeki renk değiştirmeyen ($pH < 9,5$) kısmın kalınlığı ölçülerek karbonatlaşma derinlikleri tespit edilmiştir. Koyu renkli UYPB türü betonlarda karbonatlaşmış ve karbonatlaşmamış bölgenin bu yöntem ile ayırt edilmesinin zor olduğu belirtilmelidir.



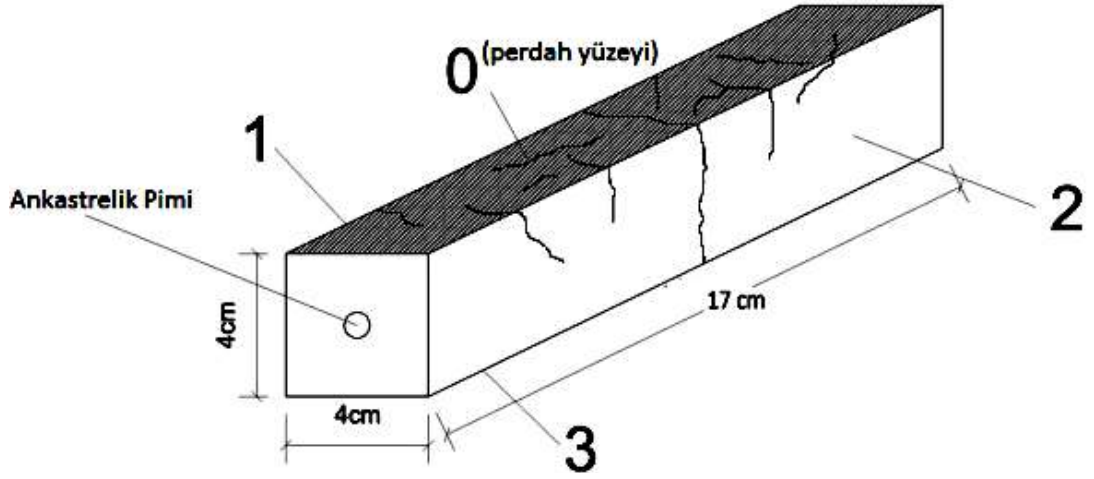
şekil 6.8 Otomatik ıslanma – kuruma kabini.

6.2.2 Kısıtlanmış Büzülme atlaklarının Yapısının Değerlendirilmesi

Birinci alışma kapsamındaki numuneler, kısıtlanmış kalıptan 24 saat sonra çıkarılmış ve 28 gün standart su krne bırakılmıştır. 28. günün sonunda IK

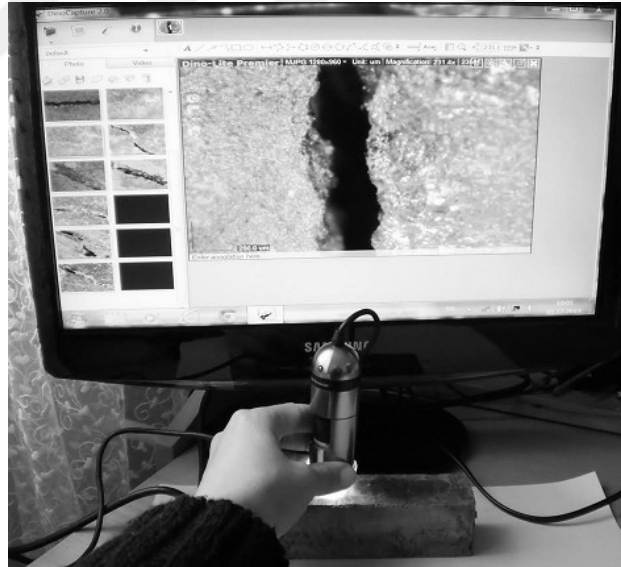
koşullandırması başlatılmıştır. Erken yaşta 30°C, %50 bağıl nem ortamında ankastrelik pimleri ile kısıtlanmış halde 24 saat bekletilmiş 40×40×170 mm'lik numunelerin ıslanma-kuruma (IK) koşullandırması öncesi (28. gün), 300 ve 500 IK çevrimi sonrası çatlak gelişimleri incelenmiştir.

Çalışmada, dijital çatlak mikroskobu ile sistematik taramalar gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte fotoğraf makinesi ile tüm yüzeyler fotoğraflanarak genel görünüm kayıt altına alınmıştır. Numune yüzeyleri: perdah yüzeyi (0), yan yüzeyler (1 ve 2) ve alt yüzey (3) olmak üzere üç grupta değerlendirilmiştir (Şekil 6.9). Bunun sebebi, çatlakların yüzeysel olup olmadığının, derinliği olan çatlakların en kesit boyunca ilerleyip ilerlemediğinin anlaşılmasıdır. Yan iki yüzey (1 ve 2), çatlak karakteri, yönlenmesi ve bunlara çevrimlerin etkisi adına farklı fikirler veremeyeceğinden tek bir yüzey olarak ortak şekilde değerlendirilmiştir. Çatlak incelemeleri 6'şar numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Dallanarak yön değiştirmemiş ve karakteri benzer her bir çatlak, tek çatlak olarak kendi içinde değerlendirilmiştir. Numunenin her bir yüzeyindeki çatlak uzunlukları ve açıklıkları bulunmuştur. Ardından, genel değerlendirme için toplam çatlak uzunluğu ve toplam çatlak yüzeyi alanı tanımlanmıştır. Her bir yüzeydeki çatlak uzunlukları ölçülmüştür. Ortalama çatlak açıklıkları ise yön değiştirmemiş ve benzer karakterdeki her bir çatlaktan alınan en az üç ölçüm ile belirlenmiştir. Her bir çatlak için tespit edilen ortalama çatlak açıklıkları, çatlak sayısına bölünerek ilgili yüzeyin ortalama çatlak açıklığı tespit edilmiştir. Çatlak uzunluğunun ortalama çatlak çapıyla çarpılması ile çatlak yüzey alanı bulunmuştur. Kısıtlama sebebiyle oluşan çatlaklar, çevrimlerden sonra her bir numune üzerinde tekrardan bulunarak incelenmiştir. En geniş çatlakların çevrimler etkisi ile değişimi ve yüzey görünümleri fotoğraflanmıştır. Ayrıca, 300 ve 500 çevrim sırasında yeni gelişen, büzülme çatlaklarının devamı veya dalı olmayan çatlaklar da değerlendirmeye alınmıştır.



Şekil 6.9 Kısıtlanmış numunelerde yüzey isimlendirmesi.

Numunelerin büzülme çatlaklarının belirlenmesinde yüzeyler üzerine kare ızgaralar çizilmiş, böylelikle çatlakların yerleri kaydedilmiştir. Çatlaklar dijital çatlak mikroskobu ile monitörden izlenmiş, çatlak açıklıkları mikroskop yazılımı (DinoCapture 2.0) sayesinde tespit edilmiştir (Şekil 6.10).

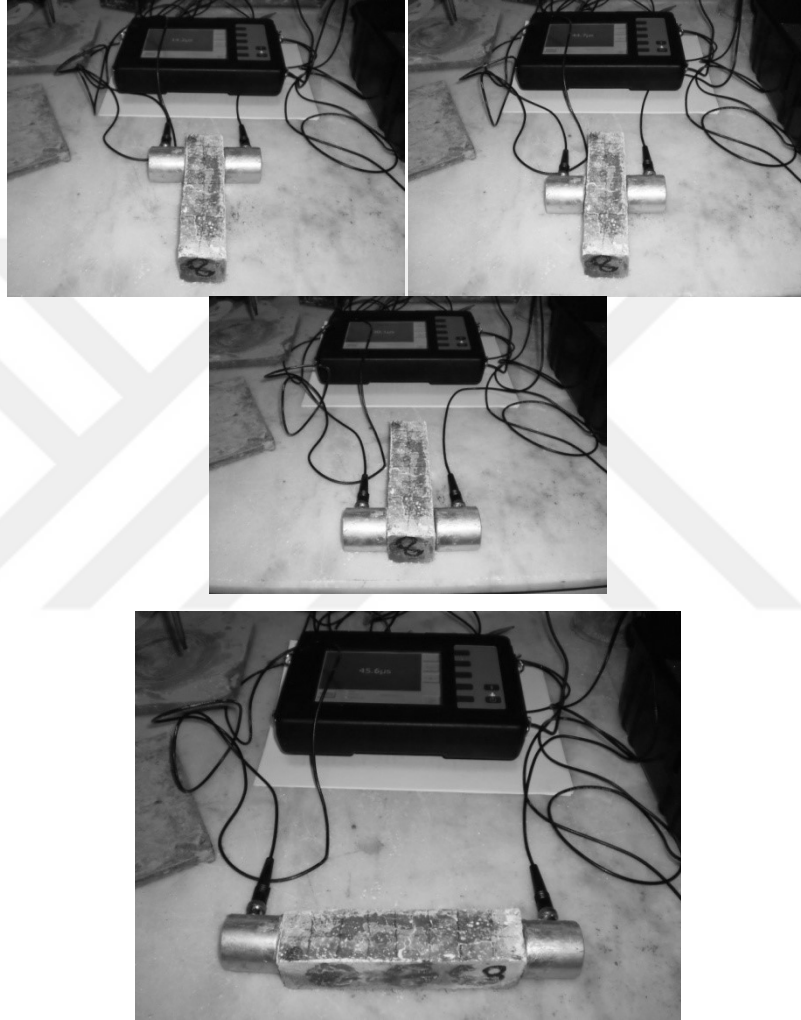


Şekil 6.10 Çatlak mikroskobu (Dino Capture 2.0) ile çatlak açıklıklarının ölçümü.

6.2.3 Ultrases Deneyi

Kısıtlanmış numunelerin başlarında pim olmasından dolayı ses geçiş hızı ölçümleri kısa kenar doğrultusunda, 3 farklı noktadan alınmış, ortalama değerler

kaydedilmiştir (Şekil 6.11). Pimsiz numunelerde gerçekleştirilen uzun kenar ve kısa kenar doğrultularındaki ses geçiş hızlarının benzer olduğu, farkın %4'ten az olduğu görülmüştür. Bu sebeple kısa kenar doğrultusunda pimli ve pimsiz numunelerde okunan geçiş hızları kıyaslanmıştır. Ses geçiş hızları km/saniye cinsinden, 4 cm'lik boyun ses geçiş süresine oranı ile elde edilmiştir.



Şekil 6.11 Ses geçiş hızlarının belirlenmesi.

6.2.4 Mekanik Deneyler

Eğilme dayanımlarının belirlenmesinde en az üç adet 40×40×160 mm numune kullanılmıştır. Kapalı devre elektromekanik eğilme test cihazında gerçekleştirilen deneylerde lifli kompozitler için deplasman kontrollü yükleme hızı 0,2 mm/dakika, liffsiz malzemeler için ise 0,02 mm/dakika orta nokta sehimidir. Üç noktalı eğilme

deneyinde kullanılan mesnet açıklığı 130 mm'dir. Orta nokta sehimleri, yükleme yüzüne paralel alt yüzey ortasına yakın konuşlandırılan bir kodlayıcı ile alınmıştır (Şekil 6.12). Eğilme deneyi sonucu lüfatsız karışımların dayanım mertebesi, lifli karışımların ise dayanım ve eğilme toklukları yük - sehım eğrisi altındaki alan hesaplanarak bulunmuştur. Eğilme sonrası çıkan parçalara 240 kgf/saniye yükleme hızında basınç deneyi uygulanmıştır.



Şekil 6.12 Üç noktalı eğilme deney düzeneği.

6.2.5 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM/EDS) İncelemesi

Numune kırılarak elde edilen parçalardan boyut ve yüzey özellikleri açısından en uygun olan parça seçilerek, kırık yüzeyde, ikincil elektron modunda (SE- secondary electron) mikroyapı incelemesi yapılmıştır.

Kırık yüzey örneklerini hazırlamak için önce, pirinç bir plaka üzerine çift taraflı yapışkanlı karbon bant yapıştırılmıştır. Örnekler bu bantların üzerine yerleştirilmiş ve örneklerin üst kısmının kenarlarına da birer küçük bant yapıştırılmıştır. Karbon bant, seramik ve beton gibi iletken olmayan malzemelerde iletkenliği sağlamak amacıyla kullanılmaktadır. Kırık yüzeyli örnekler daha sonra altın kaplama için vakum pompasına alınmıştır. Örneklerin altın kaplanmasından sonra, örnekler JEOL-JSM 6060 marka SEM (Scanning Electron Microscope) cihazına yerleştirilmiştir. Ürünlerin yoğunlaştığı bölgede EDS analizi ile element kompozisyonları incelenmiştir.

6.3 Korozyon Çalışmasında Kalıpların ve Karışımların Hazırlanması, Yerleştirme Prosedürü, Ölçüm Yöntemleri

240 mm uzunluğunda, $\Phi 10$ çapındaki çelik donatılar kalıplara yerleştirilmeden önce hassas bir şekilde alkol ile yıkanıp temizlenmiş ve temiz havlular üzerinde kurutulmuştur (Şekil 6.13).



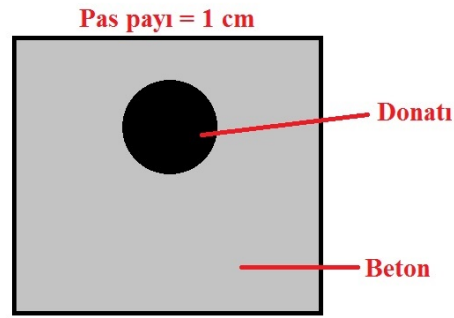
Şekil 6.13 Donatıların temizlenmesi.

Donatılar kurutulduktan sonra, 0,001 g hassasiyetinde, 1000 gram kapasitesinde, otomatik kalibrasyonlu gelişmiş hassas terazi ile tartılmıştır. Dökümü yapılacak her numunenin içindeki donatının ağırlığı bilinmektedir. Her donatı tartıldıktan sonra kodlanmış aparatlara yerleştirilmiştir (Şekil 6.14).

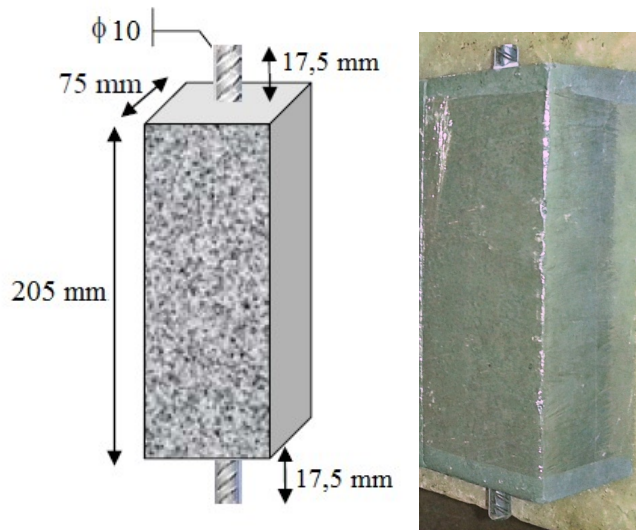


Şekil 6.14 Donatıların tartılarak kodlanması.

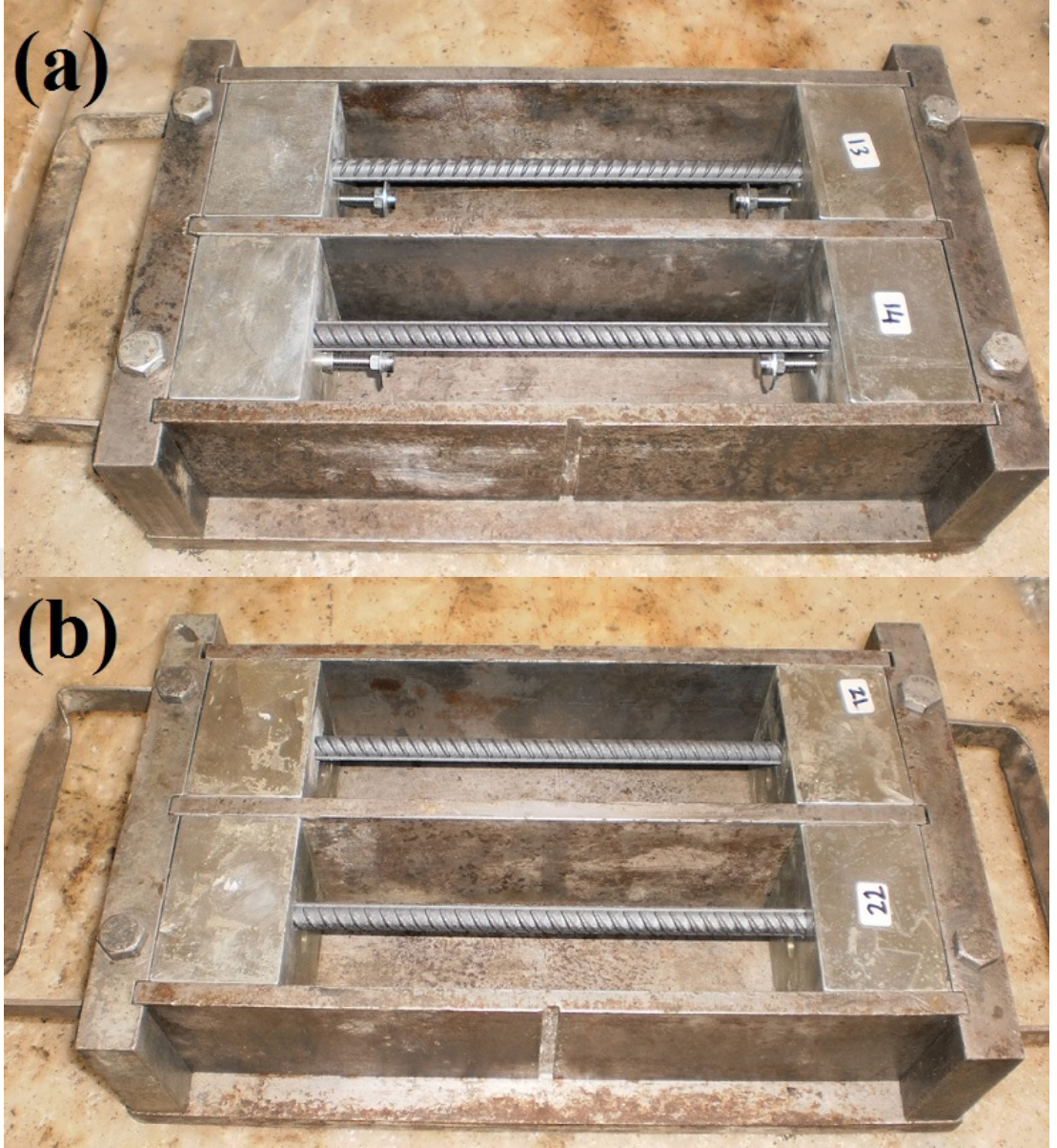
Bilindiği üzere pas payı tabakası donatıyı fiziksel olarak koruyan bir bariyerdir. Bu tabakanın kalınlığı ve geçirimsizliği donatıyı korumadaki en büyük iki etkidir. Temizlenip tartılarak kodlanan çelik donatılar kalıp sisteminin döküm yüzeyinden itibaren 1 cm pas payı kalacak şekilde kalıba yerleştirilmiştir (Şekil 6.15). Kısıtlayıcı kalıp sistemi, prizmatik şekilli, 75×75×205 mm iç hacimli, aksenal yönde numuneyi kısıtlamaya çalışan bir tasarıma sahiptir. Numuneler yatay olarak dökülmüştür. Çelik donatıların uçları, 205 mm uzunluğundaki beton prizmanın alt ve üst tabanından 17,5 mm pay bırakılmış halde açıkta kalmıştır. Betonarme numunelerin şematik çizimi ve fotoğrafı Şekil 6.16’da gösterilmiştir. Kısıtlama etkisi ile çatlak elde edilme oranını azaltmamak için kalıp iç yüzeyleri yağlanmamıştır. Kalıp alın parçalarının çift yönlü cıvatalar ile sabitlenmesiyle çekme etkisinde hareket etmemesi sağlanmıştır. Kalıp alınlarının merkezinde büzülme kısıtlayıcı etki oluşturmak üzere rondelalı-vidalı pimler mevcuttur (Şekil 6.17).



Şekil 6.15 Döküm yüzeyinde 1 cm pas payı kalınlığına sahip betonarme örneğin şematik en kesit görünümü.



Şekil 6.16 Bir numunenin şematik çizimi ve fotoğrafı.



Şekil 6.17 Kısıtlanmış (a) ve serbest (b) numune kalıpları.

İkinci çalışmada, karışımların hazırlanmasında yüksek devirde dönebilen, güçlendirilmiş bir mikser kullanılmıştır (Şekil 6.18). Öncelikle karışım suyunun tamamı ile bağlayıcı maddeler ıslatılarak yüksek devirde karıştırılmıştır. Uygun kıvam elde edildiği anda agrega eklenerek hızlı karıştırma uygulanmıştır. Daha sonra karışımın lifli ya da lifsiz oluşuna göre lif eklenerek karıştırma işlemi tamamlanmıştır. Özetle karıştırma işlemi, bağlayıcı maddeler 2 dakika yavaş, hamur karışımı 2 dakika hızlı, agrega 2 dakika hızlı, lif 2 dakika hızlı devirde karıştırılacak şekilde toplamda 8 dakikada tamamlanmıştır.

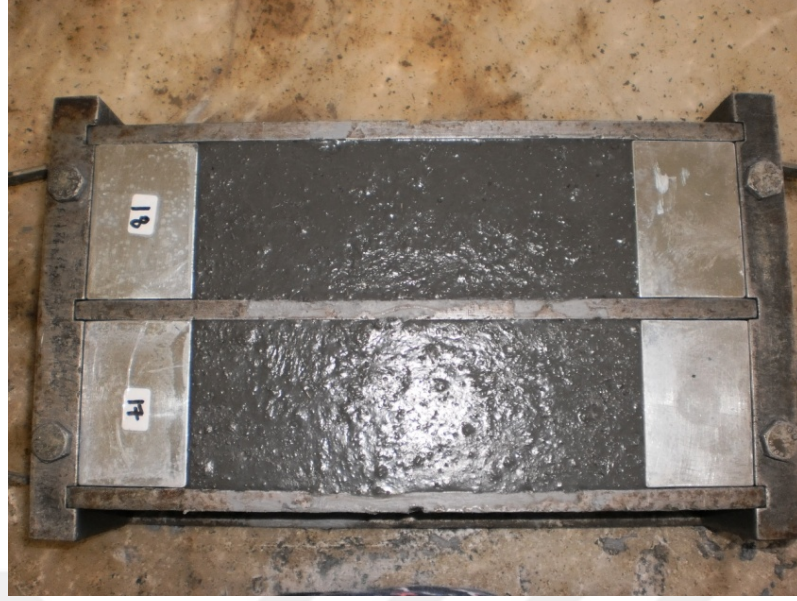


Şekil 6.18 Karışımların hazırlanmasında kullanılan Zenith markalı mikser.

Hazırlanan karışımlar kalıpların orta kısmından dökülmüştür. Bu sayede liflerin yönelimlerinin her bir numunede aynı şekilde olması sağlanmıştır. Karışımlar kalıplara kendiliğinden yerleşmiştir. Ancak sıkışık havanın atılması için kalıp yanlarına plastik çekiç ile birkaç kez hafifçe vurulmuştur (Şekil 6.19 ve Şekil 6.20).



Şekil 6.19 Karışımların kalıplara yerleştirilmesi.



Şekil 6.20 Üst yüzeyde yer alan lifler.

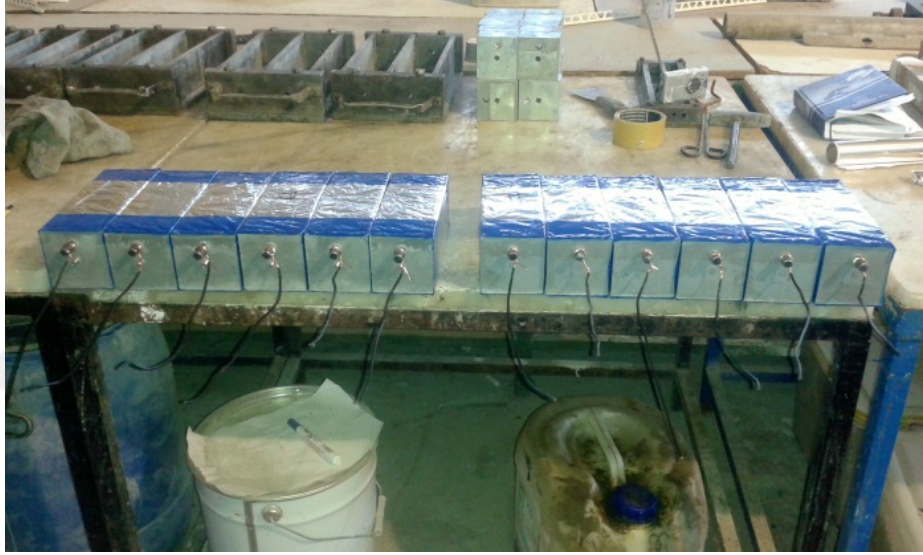
Serbest kalıp sistemlerindeki numuneler yalıtılmış kür kabininin ideal ortamında ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ bağıl nem) 24 saat boyunca bekletilmiştir. Kısıtlı kalıp sistemindeki numuneler ise sadece 75×205 mm'lik üst yüzeyden temas halinde olacak şekilde 24 saat boyunca kuruma ortamında ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem) tutulmuştur (Şekil 6.21).



Şekil 6.21 Taze karışımların iklimlendirme kabinine yerleştirilmesi (Kuruma Koşulu= $30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem).

6.3.1 Kısıtlanmış Büzülme Çatlaklarının Yapısının Değerlendirilmesi

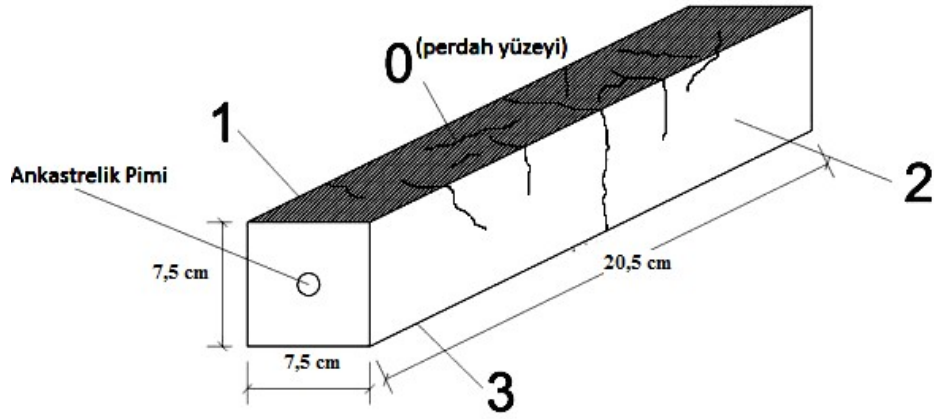
İkinci çalışma kapsamında, erken yaşta $30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem ortamında ankastrelik pimleri ile kısıtlanmış halde 24 saat bekletilmiş numuneler, kalıptan 24 saat sonra çıkarılmıştır. Streç film üzerine alüminyum folyo giydirilerek kaplanan numuneler laboratuvar ortamında 28 gün bekletilmiştir. Bu işlemin sebebi ölçümler öncesi donatıda veya liflerde oluşabilecek oksidasyonu engellemek ve betona yalıtılmış bir kür ortamı sağlamaktır. Şekil 6.22'de görüldüğü gibi, numunelerin iki ucundan taşan donatı paylarından birine bakır kablo sarılmıştır.



Şekil 6.22 Numune kaplama ve kablolama aşamaları.

Numune kaplama ve kablolama aşamalarından sonra donatıların açıkta kalan kısımları, epoksi esaslı iki bileşenli koruyucu kaplama malzemesi ile kaplanmıştır. $75\times 75\times 205$ mm ebadındaki numuneler, 28 gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra, numune yüzeylerindeki çatlak gelişimleri izlenmiştir (Şekil 6.23).

Sistematik taramalar birinci çalışmadaki yöntemle yapılmıştır. Çatlak incelemeleri 6'şar numune üzerinde gerçekleştirilmiştir. Üç farklı karışımdaki en geniş çatlakların yüzey görünümleri fotoğraflanmıştır.



Şekil 6.23 Kısıtlanmış numunelerde yüzey isimlendirmesi.

6.3.2 Korozyon Deneyleri için Yapılan Numune Hazırlıkları

Bölüm 6.3.1'de numune kaplama ve kablolama aşamalarından sonra donatıların açıkta kalan kısımlarının epoksi esaslı iki bileşenli koruyucu kaplama malzemesi (POLISPORT-EPK 1400 RAL) ile kaplandığından bahsedilmiştir. Bu aşamada donatı çevresi plastik borularla kalıplanarak epoksi malzemesinin donatının her yerine temas etmesi sağlanmıştır. Bu yöntemle, korozyon olayının sadece beton içerisinde gelişmesini sağlama amacı güdülmüştür. Ayrıca, %3,5 konsantrasyona sahip NaCl çözeltisinin yalnızca belirli bir pas payı bölgesini geçerek donatıya ulaşmasını sağlamak amacı ile prizmanın 75×75 mm ebatlı iki adet tabanı da tamamen epoksi ile kaplanmıştır (Şekil 6.24).



Şekil 6.24 Epoksi ile donatı uçlarını kaplama işlemi.

Epoksileme ile donatı korumasının yetersiz olduğu durumlarda deneylerden anlamlı veri elde edilememiştir (Şekil 6.25). Bu durumda yeni numuneler hazırlanmıştır.



Şekil 6.25 Yetersiz epoksi kaplaması yapılan çelik donatıda gelişen korozyon.

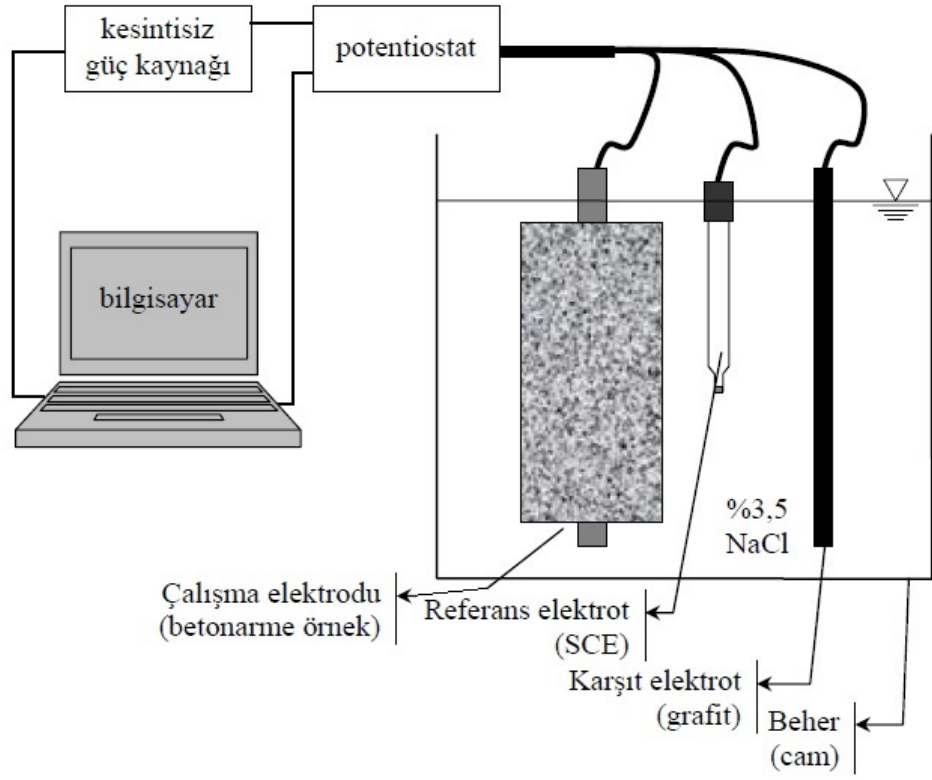
6.3.3 Üç Elektrotlu Sistem ile Korozyon Deneyi

Seçilmiş UYPB karışımlarının akım yoluyla hızlandırılmış korozyon deneyleri, iki farklı ön bekletme koşulu için araştırılmıştır.

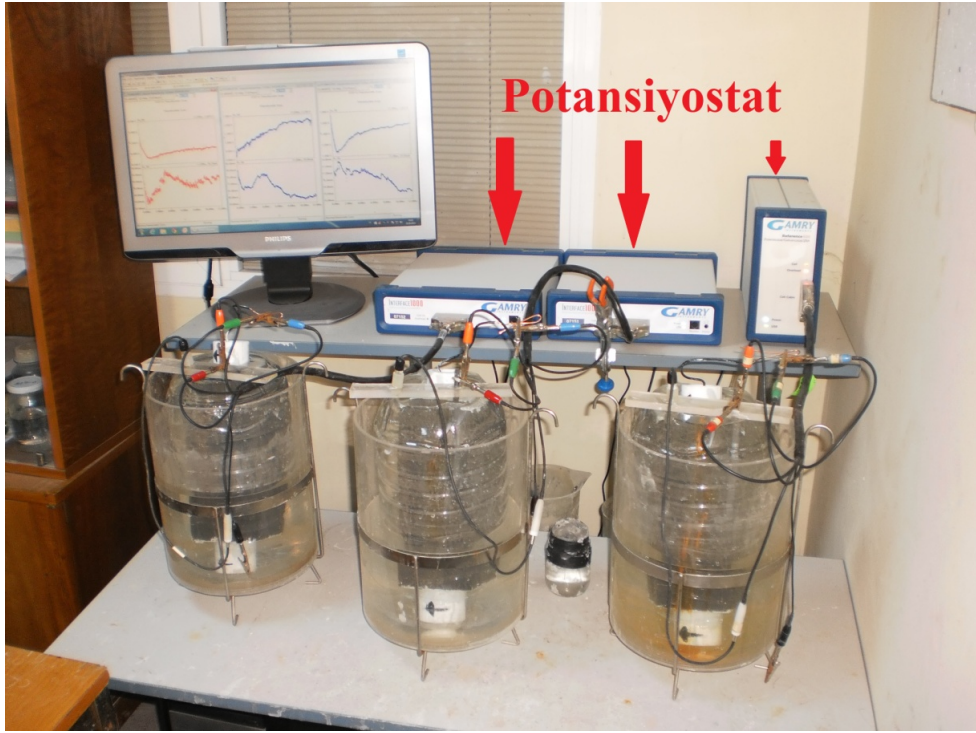
Bu ön bekletme koşullarından birincisi "İlk 24 saat ideal koşul ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ bağıl nem)" ortamıdır. İkincisi ise "İlk 24 saat kuruma koşulu ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem)" ortamıdır. Bu ortamlarda bekletilmiş, serbest ve kısıtlı numunelerin alüminyum folyo ve streç film ile kaplanarak 28 gün laboratuvar ortamında kuru olarak bekletilmesinin ardından korozyon deneyleri yapılmıştır.

Numuneler, 28 gün laboratuvar koşullarında yalıtılmış olarak bekletildikten sonra şehir şebeke suyu ile hazırlanan $\%3,5$ oranındaki NaCl çözeltisine tamamen daldırılmıştır. 24 saat sonra doygun numuneler, vakit kaybı olmaksızın deney cihazına yerleştirilmiştir. Korozyon hızlarının tespit edilmesine yönelik deneylerde elektrolitik ortam, şehir şebeke suyu ile hazırlanmış $\%3,5$ NaCl çözeltisidir.

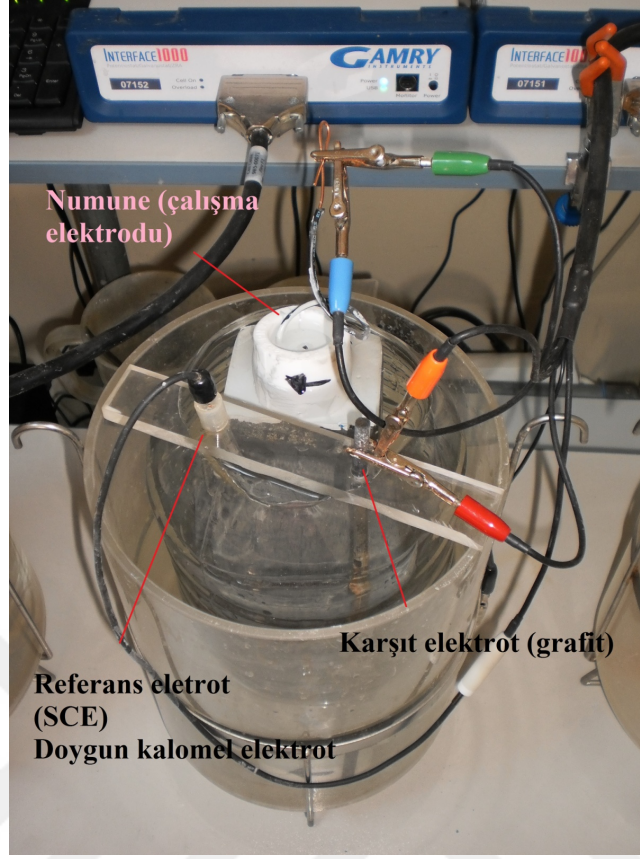
Korozyon ölçümleri üç elektrotlu sistem kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.26 ve 6.27). Ölçümlerde, Gamry REF 600 ve Gamry İnterface 1000 Potentiostat/Galvonastat/ZRA sistemleri kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı 20°C 'dir. Referans elektrot doygun kalomel elektrot (SCE) olup, karşıt elektrot grafitir. Cihazın yeşil ve mavi renkli timsah ağızlı klipsleri (W/WS) donatıya temas eden bakır tele, kırmızı ve turuncu renkli timsah ağızlı klipsleri (C/CS) ise çözeltiye daldırılan elektroda takılmıştır. Bu klipslerden yeşil ve kırmızı renkli olanları akımı taşımaktayken mavi ve turuncu renkli olanlar ise voltajı ölçmektedir. Beyaz renkli elektrot referans elektrottur (Şekil 6.28).



Şekil 6.26 Üç elektrotlu sistemin kullanıldığı deney düzeneğinin şematik çizimi (Yiğiter, 2008).



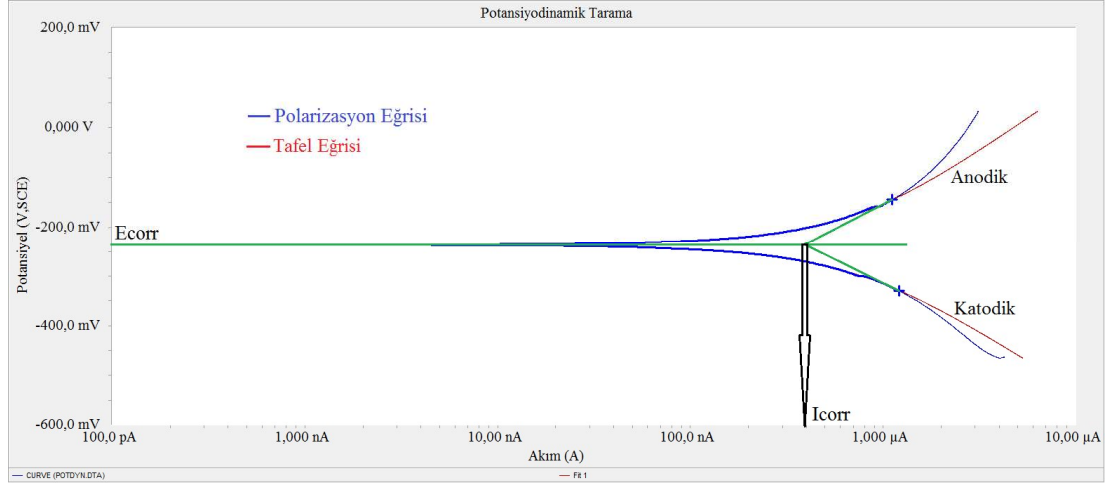
Şekil 6.27 Korozyon ölçüm sistemi.



Şekil 6.28 Deney düzeneğini oluşturan elektrotlar.

Korozyon çalışmalarının birinci bölümünde bir ucuna bakır kablo bağlanarak üretilen donatıların polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Öncelikle numunelerin açık devre potansiyeli değeri 3600 saniye süresince ölçülmüş, ardından açık devre potansiyeline göre -0,25 V ile +0,25 V arasında, 0,2 mV/s potansiyel artış hızı ile potansiyodinamik tarama eğrileri çıkarılmıştır.

Analizler sonucunda numunelerin korozyon potansiyelleri (E_{corr}) ve korozyon akım yoğunlukları (I_{corr}) belirlenmiştir. Şekil 6.29'da örnek bir eğri ve eğri üzerinde gerçekleştirilen ekstrapolasyon ile Tafel analizi görülmektedir.



Şekil 6.29 Betonarme numunelerde polarizasyon eğrisi ve Tafel analizi.

İkinci aşamada, numunelere zorlanmış bir potansiyel uygulanarak hızlandırılmış korozyon deneyleri gerçekleştirilmiştir. Donatılı numunelerin 10 V sabit potansiyel altında 86400 saniye süresince akım (A) – zaman (s) grafikleri elde edilmiştir. Numunedeki korozyon miktarının belirlenmesinde bu potansiyostatik tarama eğrileri kullanılmıştır. Denklem (2.8)'de verilen Faraday Yasası kullanılarak çelik numunedeki tahmini kütle kayıpları bulunmuştur. Deney sonunda numune kırılmış ve donatılar temizlenerek gerçek kütle kaybı belirlenmiştir.

6.3.4 Donatılarda Kütle Kayıpları

Üç elektrotlu sistem kullanılarak teste tabi tutulan beton numunelerinin içerisinde yer alan donatılar 24 saatlik deney süresinde oluşan korozyon ürünlerinden arındırılmıştır. Temizleme işlemi döner çelik fırça ile yapılmıştır (Şekil 6.30).



Şekil 6.30 Döner çelik fırça kullanılarak donatı korozyonunun temizlenmesi.

Korozyon ürünlerinden temizlenen donatılar hassas terazi ile tartılmıştır (Şekil 6.31).



Şekil 6.31 Hassas Terazi ile donatıda kütle kaybı ölçümü.

6.3.5 Karışımların Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

Basınç ve eğilme dayanımının tespiti için karışımlardan 40×40×160 mm ebatlarında 3'er adet prizmatik numune alınmıştır. Numuneler 28 gün standart su kürüne tabi tutulmuştur. Kür sonrasında üç noktalı eğilme deneyi gerçekleştirilmiş,

deney sonucu oluşan altışar parçada, 40×40 mm²'lik alanda basınç deneyi uygulanmıştır.



BÖLÜM YEDİ

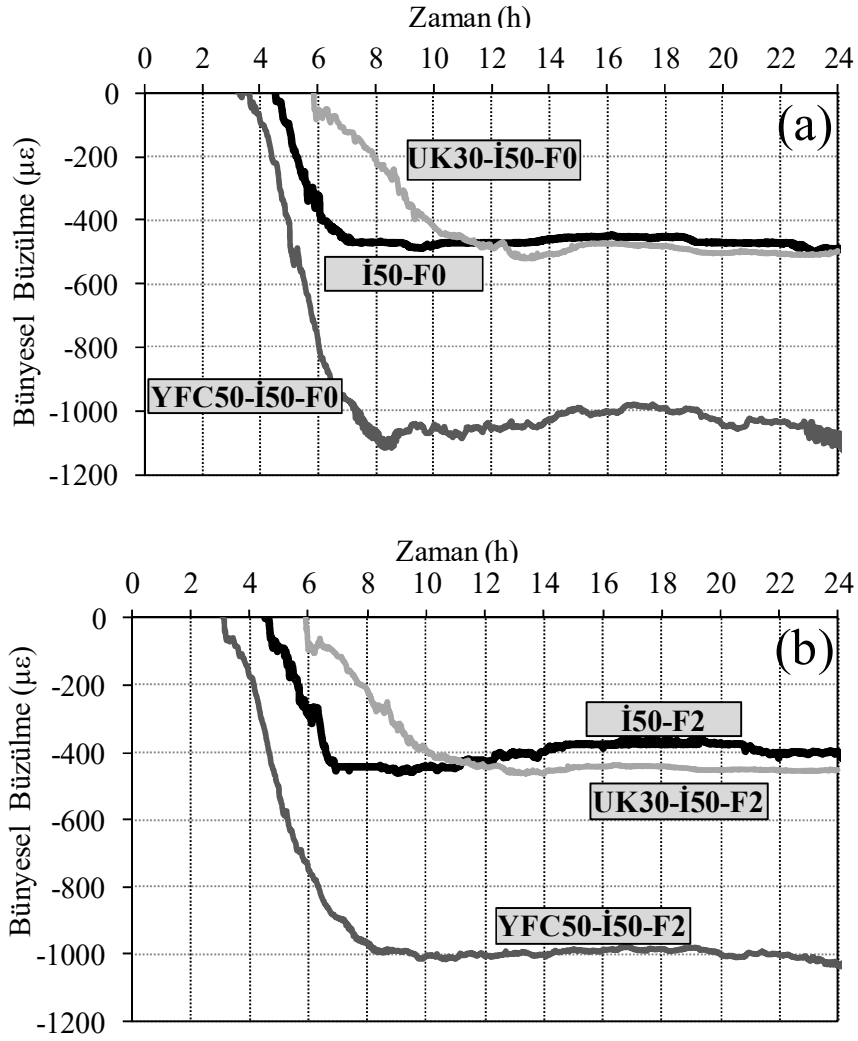
KISITLANMIŞ BÜZÜLME ÇATLAKLARININ TUZLU SUDA ISLANMA-KURUMA DAYANIKLILIĞINA ETKİSİ

7.1 Karışımların Erken Yaş Büzülme Davranışı

Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada, üç farklı UYPB karışımının erken yaş büzülme davranışları aşağıda özetlenmiştir. Geliştirilen karışımların gerek bünyesel büzülme, gerekse kuruma büzülmesi mertebeleri oldukça yüksek seviyelerdedir. Şekil 7.1’de lazer sistemiyle ölçülen lifsiz ve lifli UYPB karışımlarının erken dönem bünyesel büzülme ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, 98 ± 2 bağıl nem) ölçüm sonuçları sunulmaktadır.

Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada, %2 lif içeren, maksimum agrega dane boyutu (D_{maks}) 8 mm olan İ50-F2 karışımına, %50 öğütülmüş yüksek fırın cürufu (YFC) ve %30 uçucu kül (UK) ikamesi yapılarak elde edilen üç karışım üzerinde işlenebilirlik, büzülme ve mekanik özellik deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmadaki amaç YFC ve UK ikamesinin nihai UYPB ürünlerindeki davranışının belirlenmesidir. Çalışmaya konu olan karışımlar, irileştirilmiş gradasyona sahip (maksimum agrega dane boyutu 8 mm olan), hacimce %45 agrega (%55 hamur) ve %2 mikro çelik lif içeren, toplam bağlayıcı ağırlığına %20 SD ikamesi yapılmış, hamur fazları aynı yayılma çapına sahip olan karışımlardır. Karışım isimlerinde "İ50" ifadesi irileştirme oranını, "YFC50" ve "UK30" ifadesi puzolan türü ve ikame oranını, "F2" ifadesi mikro çelik lif hacmini belirtmektedir.

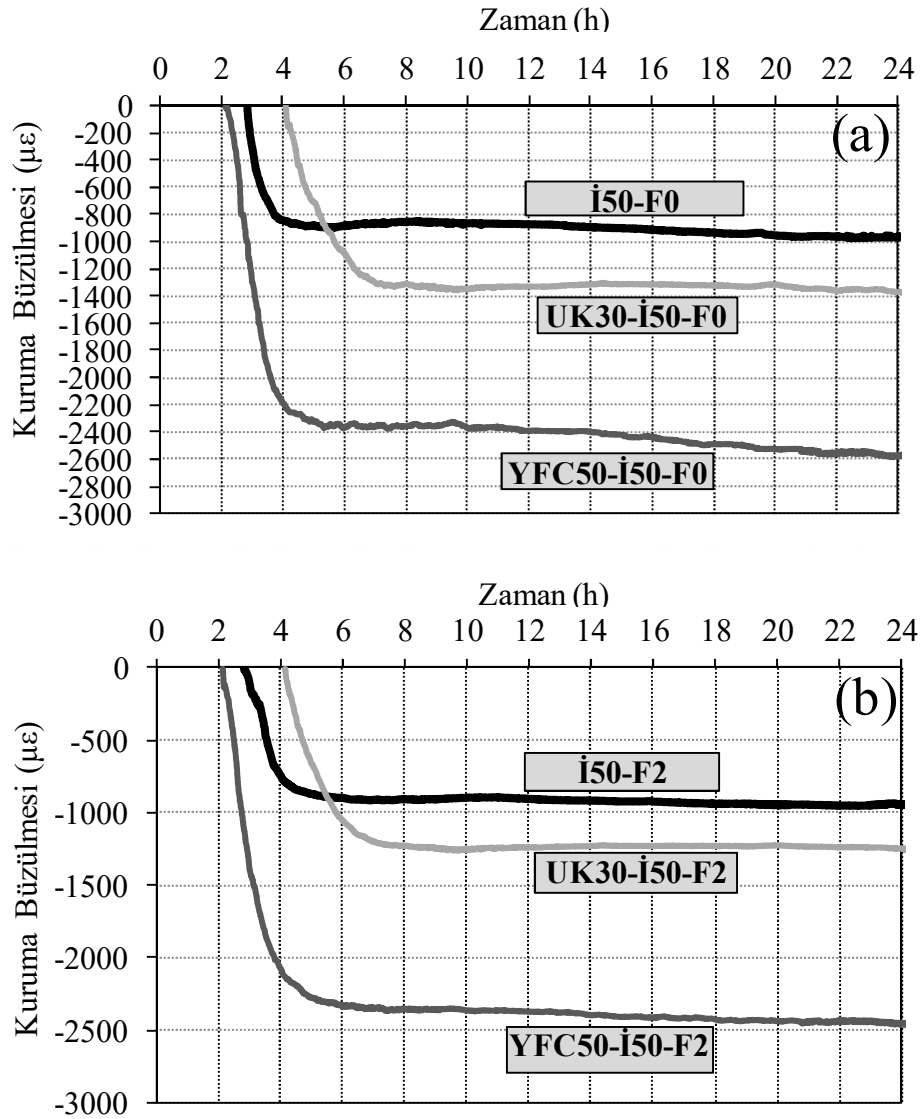
Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada, UK ikamesi ile erken yaş bünyesel büzülme kontrol karışımına kıyasla azalırken, YFC ikamesi ile artmıştır. Yüksek inceliği, kapiler boşluk daraltıcı özelliği ve yüksek puzolanik aktivitesi sebebiyle YFC ikamesi bünyesel büzülme değerini önemli oranda arttırmıştır (Lee vd., 2006; Nawa ve Horita, 2004).



Şekil 7.1 Lif içermeyen (a) ve lifli (b) UYPB karışımlarının erken yaş bünyesel büzülmesi (Yazıcı ve Yalçınkaya, 2014).

Şekil 7.2’de lifsiz ve lifli UYPB karışımlarının erken yaş kuruma büzülmesi ($30\pm 1^\circ\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem) grafikleri verilmektedir. Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada, puzolan ikamesi ile kür hassasiyetinin arttığı görülmektedir. UYPB karışımlarında YFC ikamesi sonucu erken dönem bünyesel büzülme ve kuruma büzülmesi değerleri önemli oranda artmıştır. Su/bağlayıcı oranı çok düşük UYPB türü kompozitlerde kuruma ortamındaki toplam büzülmeyi etkileyen en önemli faktörler bünyesel büzülme ve kimyasal bağlı su miktarıdır. İkame oranının artışı ile çimento dozajı azaldığında erken yaş kuruma ortamında buharlaşabilen su miktarı artabilir. Katkı ihtiyacını arttıran UK ikamesinin YFC ikamesine göre daha az kuruma büzülmesi oluşturmasının diğer bir sebebi, kalıp

yüzeyinden fiziksel su kaçıının yüksek akışkanlaştırıcı oranlarında oluşan fil derisi sebebiyle azalması olabilir. Ayrıca düşük nem ortamında içsel kurumunun YFC ikamesiyle daha şiddetli gelişmesi beklenmektedir. Lif takviyesinin erken yaş büzülmeyi azaltmada önemli bir katkı sunmadığı görülmektedir. Ancak liflerden genellikle beklenen, kısıtlanmış durumda çatlak oluşumunu engellemesi veya çatlak açıklıklarının sınırlandırmasıdır. Yüksek oranda puzolan içeren karışımlarda ilk 24 saat kür uygulaması önem kazanmaktadır.



Şekil 7.2. Lif içermeyen (a) ve lifli (b) UYPB karışımlarının erken yaş kuruma büzülmesi (Yazıcı ve Yalçınkaya, 2014).

7.1.1 Kısıtlanmış Büzülme Davranışı

Yazıcı ve Yalçınkaya (2014) tarafından yapılan çalışmada geliştirilen UYPB karışımlarına (İ50-F2, YFC50-İ50-F2, UK30-İ50-F2), ASTM C-1581/C-1581M-09 standardına göre halka testi uygulanmıştır.

Tüm karışımlar ASTM C-1581/C-1581M-09 standardına göre 7 gün içinde çatlayarak *yüksek çatlama potansiyeli* sınıfına girmiştir. UYPB türü erken yaş büzülmesi yüksek olan çimento esaslı kompozitlerde, kuruma ortamının şiddetlenmesi, çatlak oluşumlarını çok erken saatlere çekebilir. Kısıtlanmış büzülme altında çatlama direncini geliştirmek için UK ikamesi, çatlak genişliğini sınırlandırmak için daha fazla oranda lif önerilebilir.

7.2 Deneysel Verilerin Değerlendirilmesi

7.2.1 Islanma-Kuruma Çevrimlerinin Büzülme Çatlaklarına Etkisi

Lifli UYPB'lerin kısıtlanmış büzülme sonucu farklı yüzeylerinde oluşan çatlakların uzunluk, genişlik ve alanlarının çevrimler sonucu değişimi Tablo 7.1'de sunulmaktadır. Tabloda perdah yüzeyi (üst yüzey) (0), yan yüzeyler (1 ve 2) ve alt yüzey (3) isimlendirmeleri kullanılmıştır. Çatlak uzunlukları mm, ortalama çatlak açıklıkları ise μm cinsinden verilmiştir. Çatlak yüzeyi alanları, çatlak uzunlukları ve ortalama çatlak çaplarının çarpımı ile mm^2 cinsinden tanımlanmıştır. Tablo 7.1'de verilen ortalama çatlak açıklığı, her numunenin aynı yüzeyinde ölçülen ortalama çatlak açıklığının, numuneler bazındaki ortalamasıdır. Çatlak uzunluğu ise her bir yüzeydeki toplam çatlak uzunluklarının numuneler bazındaki ortalamasıdır. Toplam sütununda verilen değerler ise yüzey farkı gözetmeksizin her bir karışımın numune başına düşen ortalama toplam çatlak uzunlukları ve ortalama toplam çatlak yüzey alanlarıdır. Çalışmanın detayları yöntem kısmında anlatılmıştır.

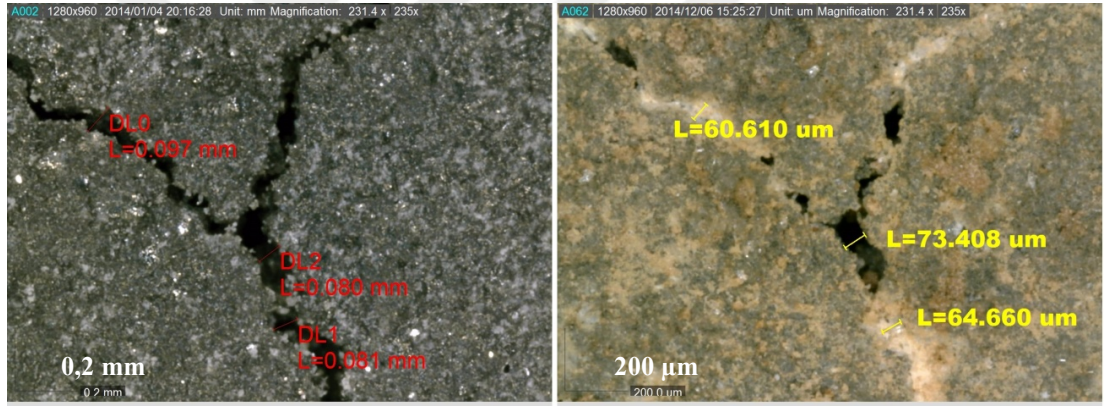
Tablo 7.1 28 gün ve 500 IK çevrimi sonrası çatlak analizleri.

| Karışım | Ölçülen Değer | 28 Gün | | | | 500 Çevrim | | | |
|--------------|----------------------------------------|---------|-----------|---------|--------|------------|-----------|---------|--------|
| | | Üst (0) | Yan (1+2) | Alt (3) | Toplam | Üst (0) | Yan (1+2) | Alt (3) | Toplam |
| İ50-F2 | Çatlak Uzunluğu (mm) | 102 | 18 | 0 | 120 | 102 | 18 | 0 | 120 |
| | Ort. Çatlak Açıklığı (µm) | 82,1 | 32,0 | 0 | | 62,8 | 23,9 | 0 | |
| | Çatlak Yüzeyi Alanı (mm ²) | 8,4 | 0,6 | 0 | 9,0 | 6,4 | 0,4 | 0 | 6,8 |
| UK30-İ50-F2 | Çatlak Uzunluğu (mm) | 140 | 21 | 0 | 161 | 80 | 21 | 0 | 101 |
| | Ort. Çatlak Açıklığı (µm) | 61,0 | 44,2 | 0 | | 56,9 | 132,6 | 0 | |
| | Çatlak Yüzeyi Alanı (mm ²) | 8,5 | 0,9 | 0 | 9,4 | 4,5 | 2,8 | 0 | 7,3 |
| YFC50-İ50-F2 | Çatlak Uzunluğu (mm) | 171 | 22 | 0 | 193 | 171 | 22 | 0 | 193 |
| | Ort. Çatlak Açıklığı (µm) | 155,0 | 60,8 | 0 | | 105,2 | 52,6 | 0 | |
| | Çatlak Yüzeyi Alanı (mm ²) | 26,6 | 1,3 | 0 | 27,9 | 18,0 | 1,2 | 0 | 19,2 |

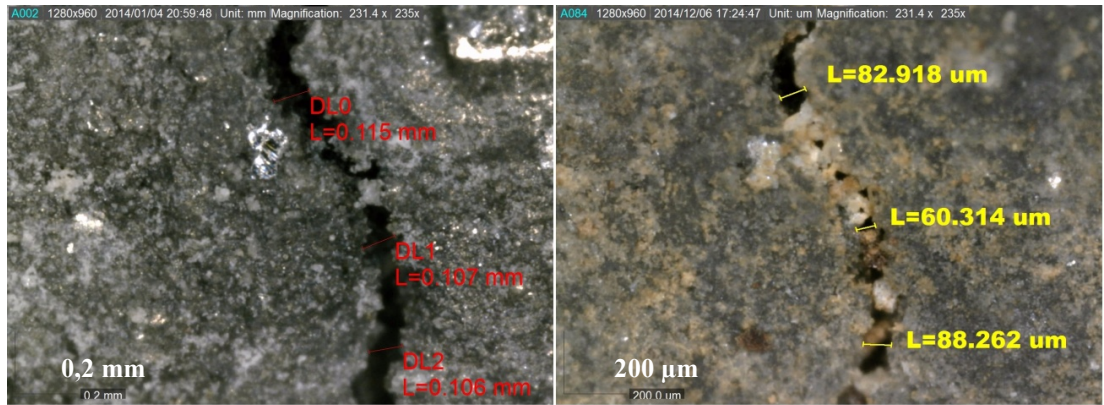
Ort.: ortalama

Lifli UYPB'ler incelendiğinde çevrimler öncesi kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kurumaya doğrudan maruz kalan üst yüzeyde en büyük uzunlukta olduğu, çatlak açıklıklarının da bu yüzeyde en fazla olduğu görülmektedir (Tablo 7.1). Yan yüzeylerin çatlak açıklıkları, üst yüzeydeki çatlak açıklıklarının %40'ı ile %70'i mertebesindedir. Çatlak uzunlukları ise üst yüzeyin 1/10'u mertebesindedir. Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kalıp alt yüzünde oluşmadığı veya üst ve yan yüzeydeki çatlakların kalıp alt yüzüne ulaşmadığı görülmektedir. İ50-F2 karışımı için ortalama toplam çatlak uzunluğu 120 mm, ortalama çatlak yüzey alanı ise 9 mm²'dir. Aynı değerler sırasıyla UK30-İ50-F2 karışımı için 161 mm, 9,4 mm², YFC50-İ50-F2 karışımı için 193 mm, 27,9 mm²'dir. Erken yaşta okunan serbest büzülme miktarları arttıkça çatlak uzunluk ve genişlikleri artmaktadır. IK çevrimleri sonucu çatlak uzunluk ve açıklıklarında azalma gözlenmiştir. Toplam değerlerdeki azalmalar incelendiğinde, çevrime giriş değerlerine kıyasla çatlak uzunluğu aynı kalmak suretiyle 8,7 mm² ortalama çatlak yüzey alanı ile en fazla YFC ikameli karışımın azalış gösterdiği anlaşılmaktadır. IK çevrimleri sonrası lifli karışımlardaki üst ve yan yüzey büzülme çatlaklarının alt yüzeye erişemediği görülmüştür. Ayrıca, çatlak mikroskobu incelemelerinde dar çatlakların IK etkisi ile kapandığı görülmüştür.

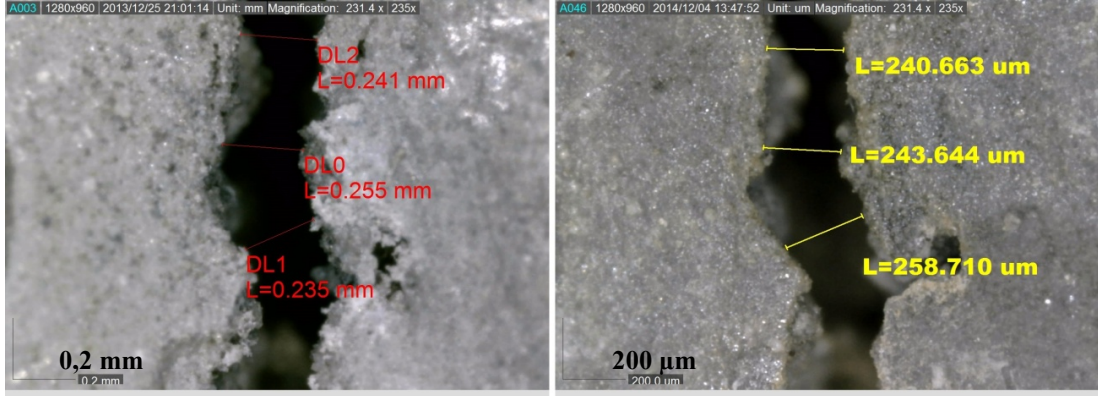
Şekil 7.3'te İ50-F2, Şekil 7.4'te UK30-İ50-F2 ve Şekil 7.5'te YFC50-İ50-F2 karışımlarındaki en geniş çatlaklarının olduğu bölgelerin IK çevrimi öncesi ve sonrası halleri aynı ölçekte sunulmaktadır. IK etkisi ile çatlakların bariz şekilde daraldığı görülmektedir. Bu durumun iki temel sebebi vardır. Birincisi %3,5 NaCl çözeltisindeki yüksek klorür konsantrasyonu etrenjitin genişleme özelliğini azaltmıştır. Etrenjit genişmesi, beton içeriğindeki (OH)⁻ iyonlarının çözeltideki Cl⁻ iyonları ile yer değiştirmesi ile bastırılır (Mehta ve Monteiro, 2013). Beton, klorür iyonlarının bir kısmını fiziksel ve kimyasal olarak bağlayabilmektedir. Bu nedenle, beton içindeki klorür iyonları bağlı ve serbest klorür olarak ikiye ayrılır. Kimyasal bağlama sırasında çimento bileşenleri ve klorürler arasındaki reaksiyondan Friedel tuzu adı verilen yeni bir ürün meydana gelir. Fiziksel bağlama jel boşluklarında klorür iyonlarının adsorbe edilmesiyle gerçekleşir (Baradan vd., 2002).



Şekil 7.3 İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlağının 500 IK öncesi ve sonrası görünümü.

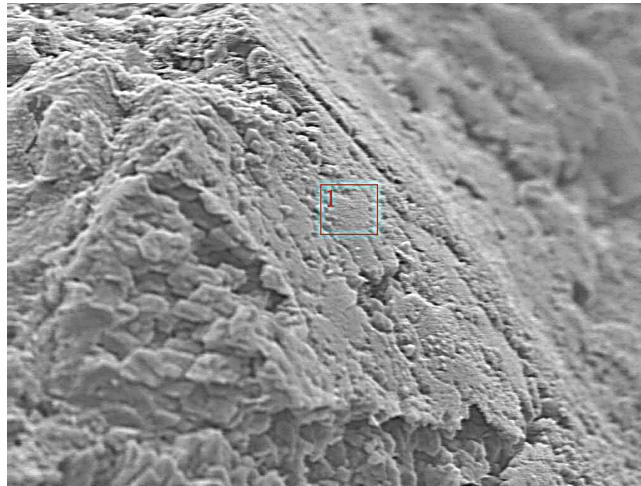


Şekil 7.4 UK30-İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlağının 500 IK öncesi ve sonrası görünümü.

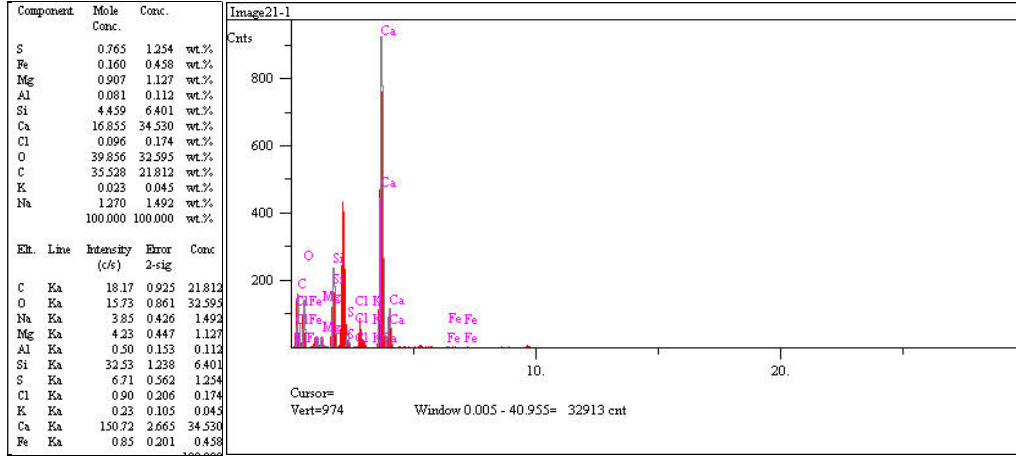


Şekil 7.5 YFC50-İ50-F2 karışımının en geniş büzülme çatlakının 500 IK öncesi ve sonrası görünümü.

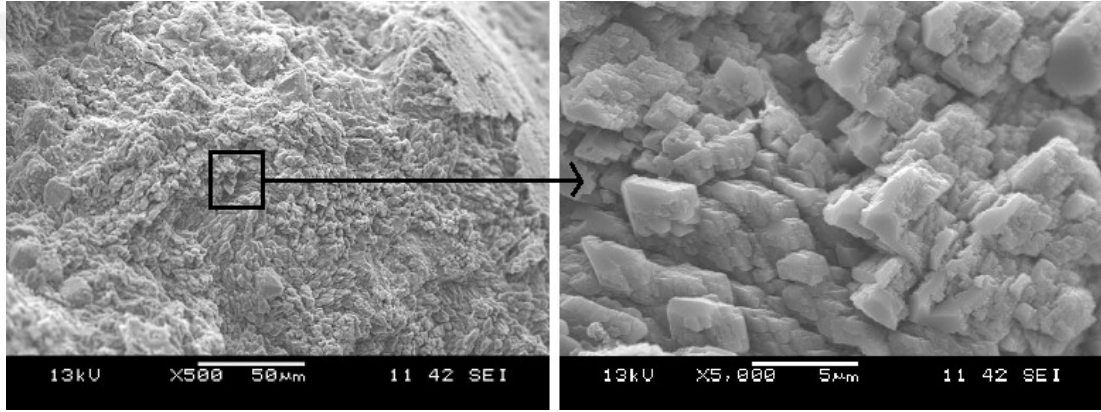
Bölüm 7.2.3'te anlatılacak olan, 500 IK çevrimi sonrası yapılan eğilme deneyi sırasında büzülme çatlaklarından kırılan YFC ikameli karışımla hazırlanmış numunelerin çatlak yüzeyinden elde edilen kırık yüzeyde taramalı elektron mikroskobu (SEM) incelemesi yapılmıştır. Kırık yüzey numunelerde ikincil elektron fotoğrafları çekilmiş, enerji dağılım spektrometresi (EDS) analizleri gerçekleştirilmiştir. Ürünlerin yüzeyde yoğunlaştığı kısımdan (Şekil 7.6) alınan EDS element analizi Şekil 7.7'de yer almaktadır. Ca, C ve O piklerinin yüksek olduğu görülmektedir. Kırık yüzeylerde yoğun karbonatlaşma mevcuttur (Şekil 7.8). Yazıcı vd. (2003) tarafından da belirtildiği gibi, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin CO_2 ile reaksiyonundan CaCO_3 oluşur ve çökelerek çatlakları tıkar.



Şekil 7.6 Ürünlerin YFC ikameli karışımın yüzeyinde yoğunlaştığı kısım.



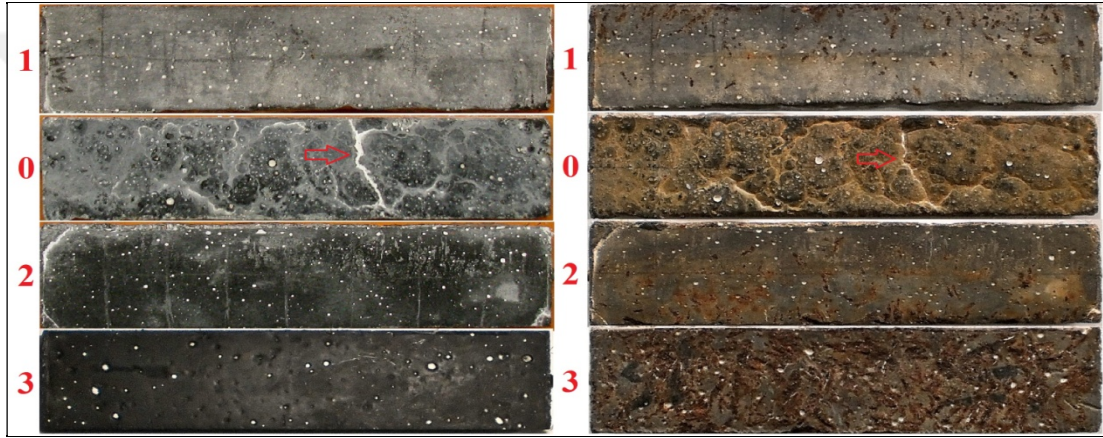
Şekil 7.7 YFC ikameli karışımın enerji dağılım spektrometresi (EDS) analizi.



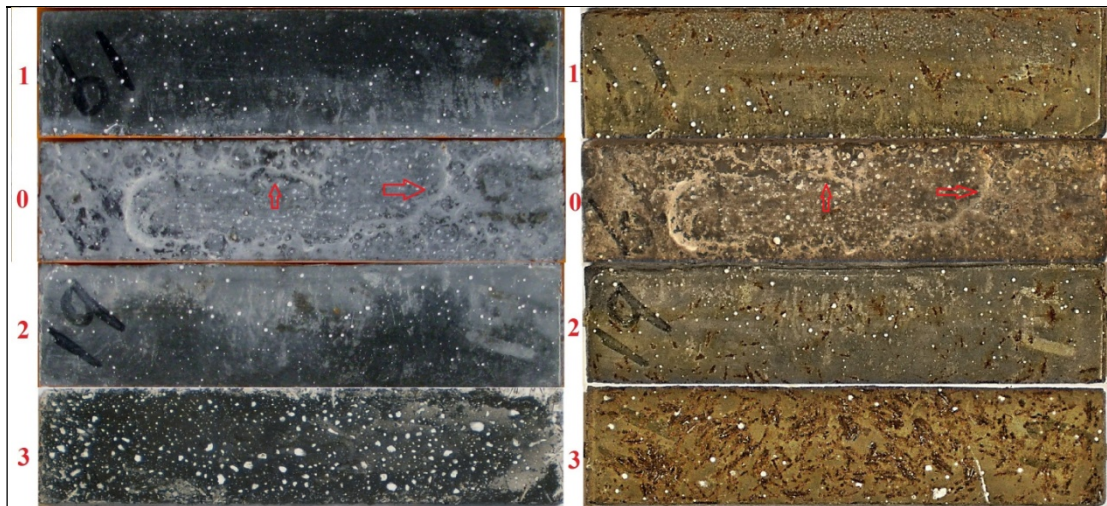
Şekil 7.8 YFC ikameli karışımında IK çevrimleri sonucu karbonatlaşma.

Şekil 7.9’da İ50-F2, Şekil 7.10’da UK30-İ50-F2 ve Şekil 7.11’de YFC50-İ50-F2 karışımlarından en çok hasar gören numunenin 28 gün su kürü sonrası ve 500 IK çevrimi geçirmiş hali sunulmaktadır. IK etkisi ile çatlakların tıkanarak daraldığı ya da kısmen gözden kaybolduğu görülmektedir (Şekil 7.9). IK etkisi sonucu kontrol karışımında dağılma oluşmamıştır. UK ikameli karışımında çatlak yüzey alanlarında azalma olduğu ancak kontrol karışımına kıyasla mevcut çatlakların sayı olarak aynı kaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 7.10). YFC ikameli karışımında da çatlak açıklıklarının daraldığı gözlemlenmiştir. Ancak, kontrol karışımına kıyasla YFC ikameli karışımın UK ikameli karışımdan %15 daha kötü performans sergilediği gözlemlenmiştir. Lifli matrislerin performansının değerlendirilmesinde ortalama değerler göz önüne alınmalıdır. Bir numune üzerinden değerlendirme yapıldığında değişkenliği yüksek ve dağılımı rastgele olan çatlakların etkisini anlamak güçleşmektedir.

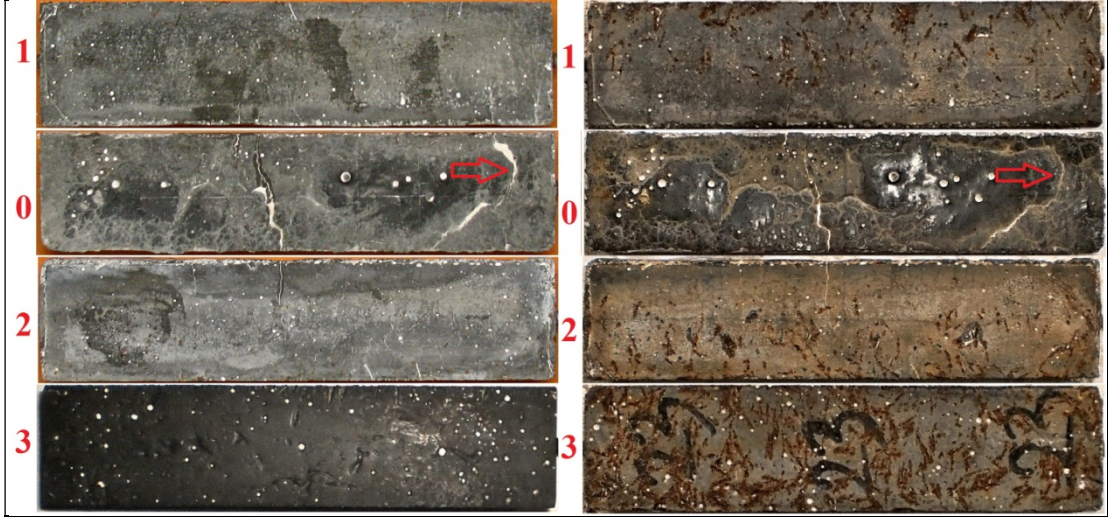
Lifli matrislerde lifler, büzülme çatlaklarını köprülemektedir. IK etkisi ile bu çatlakların uzamasını ve genişlemesini kısıtlamaktadır. Bu durum, numune yüzeyinden kalıp alt tabanına indikçe belirginleşmektedir. Yüzeyde, priz öncesinden itibaren başlayan hızlı kuruma, yüzey görünümlerini bozabilmekte, kendiliğinden yerleşen kıvamdaki bu karışımlarda kalıp yüzeyinden birkaç mm aşağıya çökebilen mikro çelik liflerin sebep olduğu köprüleme eksikliği, numune perdah yüzeyini daha hassas hale getirmektedir. Tüm karışımlarda, 500 IK sonrasında kalıp yüzeylerine temas eden çelik lifler korozyona uğramaktadır. Korozyon, kalıp tabanlarında en belirgindir.



Şekil 7.9 İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 IK çevriminden önceki ve sonraki hali (0:üst yüzey, 1 ve 2:kalıp yan yüzeyleri, 3:alt yüzey)



Şekil 7.10 UK30-İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 IK çevriminden önceki ve sonraki hali (0:üst yüzey, 1 ve 2:kalıp yan yüzeyleri, 3:alt yüzey)

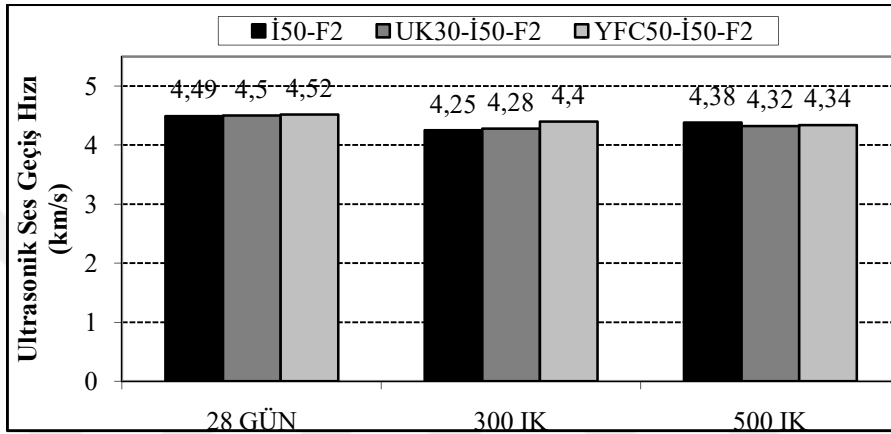


Şekil 7.11 YFC50-İ50-F2 karışımından imal edilmiş bir örneğin 500 IK çevriminden önceki ve sonraki hali (0:üst yüzey, 1 ve 2:kalıp yan yüzeyleri, 3:alt yüzey)

7.2.2 Ses Geçiş Hızlarının Değerlendirilmesi

Numunelerin IK çevrimlerindeki durumunu takip etmek için tahribatsız yöntemlerden olan ultrasonik ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Sürelerden, ses geçiş hızları hesaplanmıştır. Şekil 7.12'de ilk 24 saat serbest halde ideal koşullarda bekletilen karışımların, 28 gün su kürü, 300 IK ve 500 IK geçirdikten sonraki ses geçiş hızları sunulmaktadır. İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için 28 gün su kürü sonrası sırasıyla 4,49, 4,50 ve 4,52 km/sn geçiş hızı elde edilmiştir. Karışımların basınç dayanımları aynı yaşta 146, 151 ve 157 MPa elde edilmişti. 300 IK çevrimi sonrası ses hızları 28 güne kıyasla %3 ila %6 oranında azalarak İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 4,25, 4,28, 4,4 km/sn bulunmuştur. 300 IK çevrimi sonrası basınç dayanımları İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 156, 161 ve 179 MPa elde edilmişti. 500 IK çevrimi sonrası 28 güne göre ultrasonik ses geçiş hızları %3 ila %4 oranında azalarak İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 4,38, 4,32 ve 4,34 km/sn bulunmuştur. 500 IK sonrası elde edilen basınç dayanımları sırasıyla 171, 167, 180 MPa'dır. Numunelerin maruz kaldığı IK çevrimi sayısının artışıyla ses geçiş hızlarının arttığı, artışın 500 IK çevrimi sonrasında belirginleştiği görülmektedir. 28 gün su kürüne kıyasla 300 IK çevrimi sonrası basınç dayanımı artışı %7 ila %14 arasındayken, 500 IK çevrimi sonrasında %15 ila %17 olarak kaydedilmiştir.

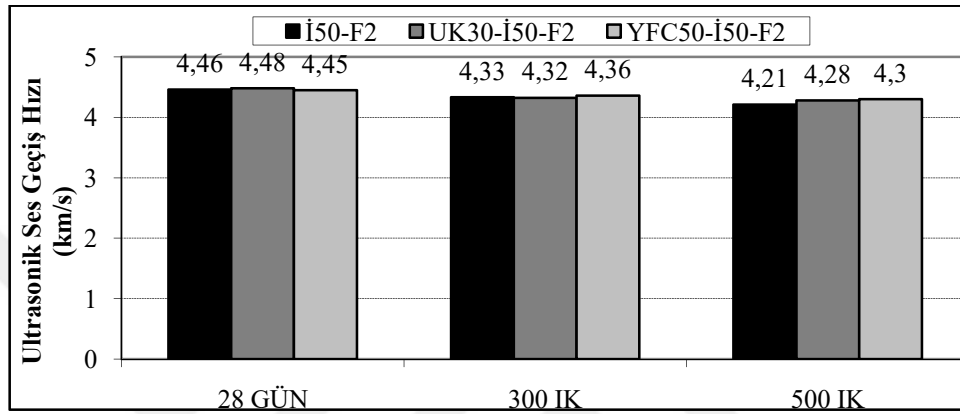
Ultrases hızlarında belirgin bir azalma oluşmasında basınç dayanımı değişiminden ziyade çevrim sayısındaki artış etkilidir. %3,5 NaCl çözeltisinde IK etkisine maruz kalan örneklerin hidrasyon ürünlerinin Cl^- iyonları ile yer değiştirerek yıkanmasıyla bağlantısız boşlukları olan bir iç yapının meydana geldiği düşünülmektedir. Tekrarlı ıslanma-kuruma etkileri sonucu matriste ve ara yüzeylerde oluşan hasarın basınç dayanımına etkisinin görülebildiği 500 IK çevrimi sonucu ses geçiş hızları belirgin mertebede azalmaktadır.



Şekil 7.12 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen lifli serilerin ses geçiş hızları.

Şekil 7.13'te ilk 24 saat kısıtlanmış halde kuruma koşullarında bekletilen lifli karışımların, 28 gün su kürü, 300 IK ve 500 IK geçirdikten sonraki ses geçiş hızları sunulmaktadır. 28 gün su kürü sonrası İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için ses geçiş hızları sırasıyla 4,46, 4,48 ve 4,45 km/sn, basınç dayanımları ise sırasıyla 133, 136 ve 126 MPa elde edilmiştir. 300 IK çevrimi sonrası hızlar aynı sırayla 4,33, 4,32 ve 4,36 km/sn iken dayanımlar sırasıyla 145, 150, 152 MPa'dır. 500 IK sonrası İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için ses geçiş hızları 4,21, 4,28 ve 4,30 km/sn iken, basınç dayanımları sırasıyla 133, 129 ve 116 MPa'dır. Kısıtlanmış serilerde ses geçiş hızlarında özellikle 500 IK çevrimi sonrası büyük düşüş olmuştur. Bununla beraber basınç dayanımlarındaki kayıp aynı oranda değildir. Şekil 7.12'de basınç dayanımları ile geçiş hızları arasında güçlü bir ilişki kurulamasa da dayanım düşüşünün ses geçiş hızı ölçümleriyle yakalanabileceği belirlenebilmiştir. Ultrasonik ses geçiş hızı ölçümleri, kısıtlanmış numunelerin alın bölgelerindeki pimler sebebiyle prizmaların kısa mesafelerinden, 160 mm uzunluk

boyunca üç farklı noktadan alınmıştır. Ultrasonik cihaz problemleri arası ölçüm mesafesi sadece 40 mm'dir. Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının basınç dayanımı sonuçlarına büyük etki yapmadığı söylenebilir. Numunelerde 40×40 mm'lik tüm kesiti geçebilen ve gözle görülebilen çatlaklar, ses geçiş hızlarını önemli derecede etkilemektedir. Bu çatlakların, daha çok orta kısımda bulunan çatlak yoğunluğunun eğilme sonrası basınç deneylerine yansımaması bu sonucu meydana getirmiş olabilir.



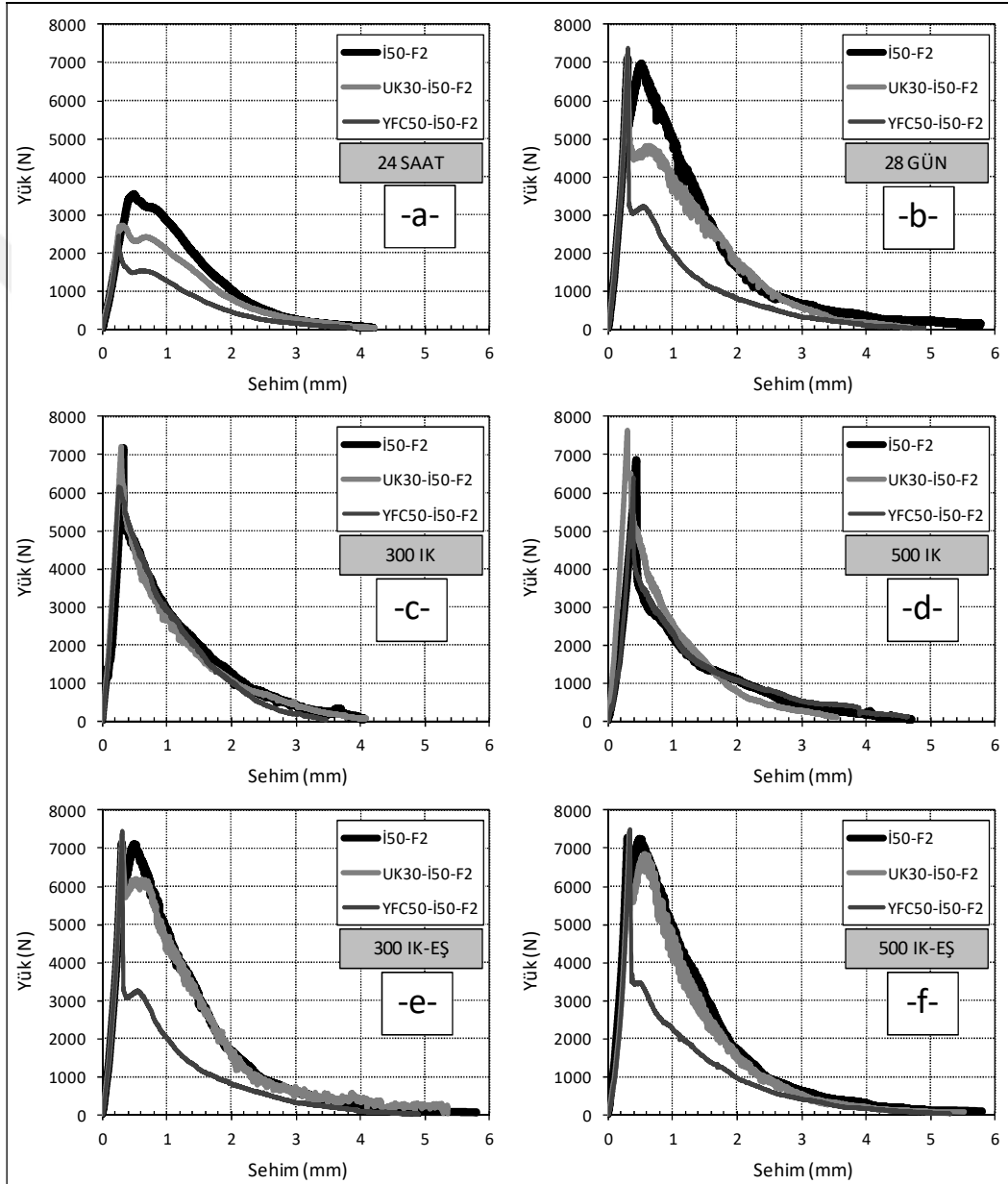
Şekil 7.13 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlı halde bekletilen serilerin ses geçiş hızları.

7.2.3 İslanma-Kuruma Çevrimlerinin Eğilme Performansına Etkisi

İK çevrimlerinin eğilme performansına olan etkisi, basınç dayanımlarındaki araştırmanın sisteminde, eğilme dayanımları ve eğilme yükleri altında elde edilen yük – sehim eğrilerinin irdelenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımlarına ek olarak eğilme tokluklarının yaşa göre ve İK etkisi altında değişimi belirlenmiştir. İlk gün kuruma koşullarında ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, 50 ± 2 BN) kısıtlanmış halde bekletilen numuneler ve ideal ortamda ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, 98 ± 2 bağıl nem) serbest halde bekletilen numunelerin standart su kuru (28 gün) sonrası maruz kaldığı 300 İK ve 500 İK çevriminin eğilme performansına etkisi bu bölümde tartışılmıştır.

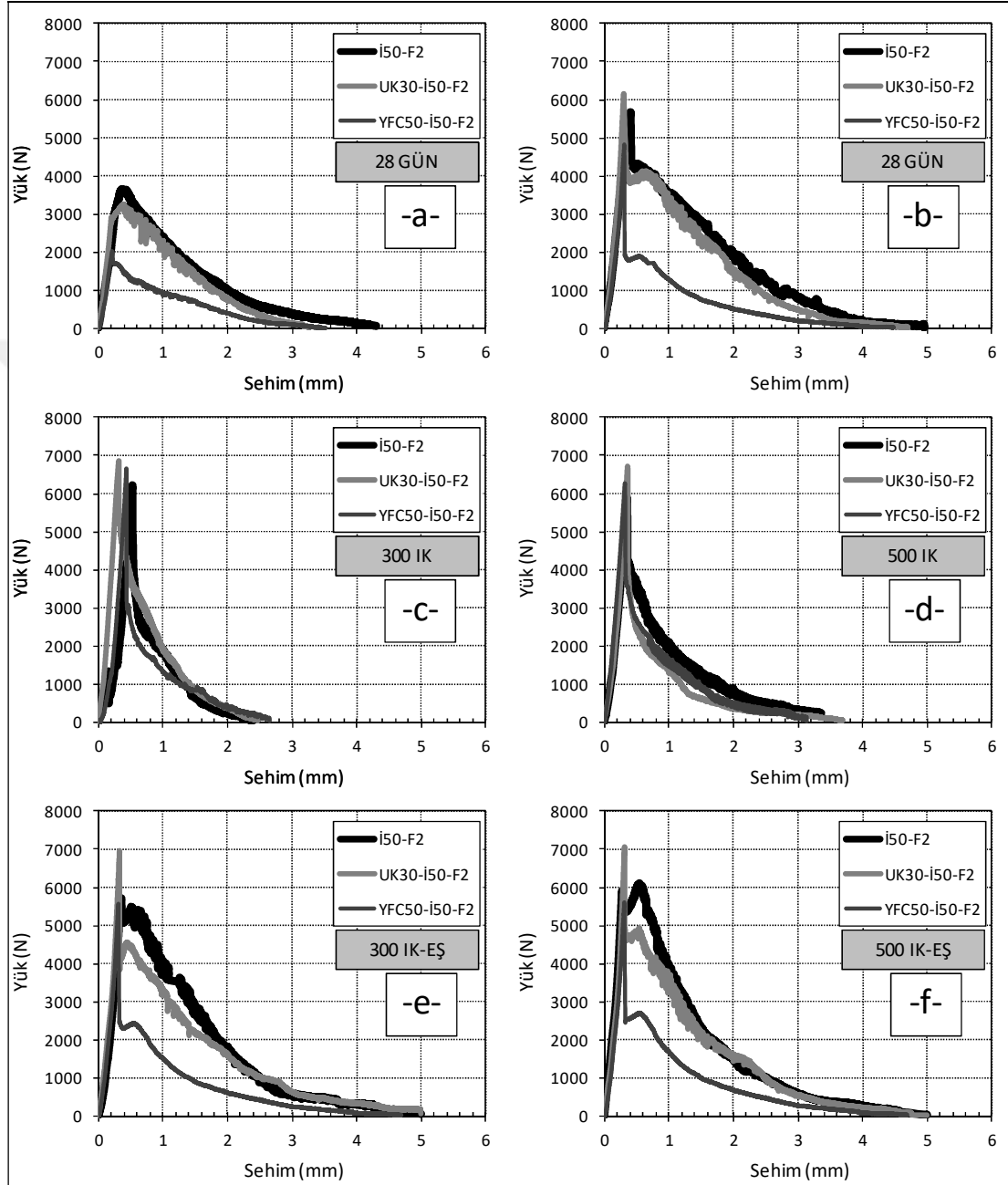
Şekil 7.14'te ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal koşullarda serbest halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası ortalama eğilme yükü–sehim eğrileri sunulmaktadır. Çevrimler sonucu deformasyon yumuşaması davranışı belirginleşmiştir. Tepe yüklerinde ise bir miktar yükseliş gözükmektedir. Yük seviyesindeki artış paralelinde kuyruk bölgesindeki performans düşüşü lif - matris

ara yüzeyi hasarını işaret etmektedir. Yük seviyesindeki yükselmenin sebebi çevrimlerin sebep olduğu kür etkisi ve karbonatlaşma olabilir. Kuyruk bölgesindeki düşüşün numune dış yüzeyindeki liflerin korozyonu ve ıslanma - kuruma çevrimlerindeki sıcaklık değişimleri sebebiyle oluşan ara yüzey hasarından kaynaklandığı söylenebilir. Deneyler sırasında su kürü gören numunelerde ilk çatlak sonrası lif kopma sesleri duyulmuştur.



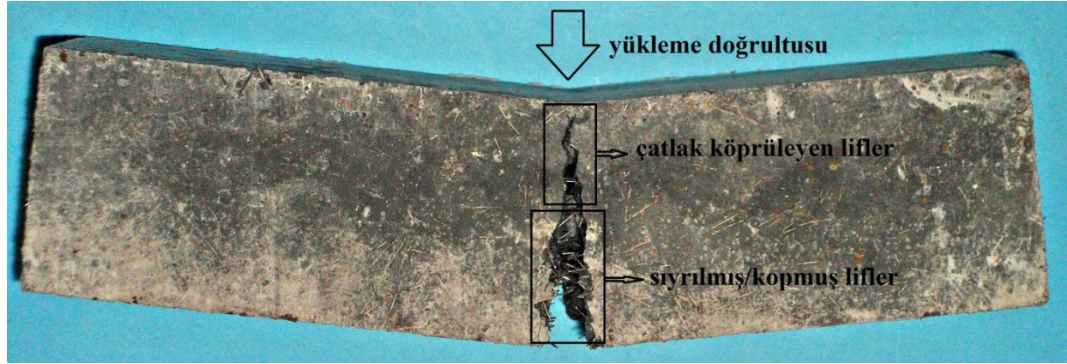
Şekil 7.14 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 İK sonrası (c), 500 İK sonrası (d), 300 İK eşlenik (e), 500 İK eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri.

Şekil 7.15'te ilk 24 saat kalıp içerisinde kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası ortalama eğilme yükü – sehim eğrileri sunulmaktadır.



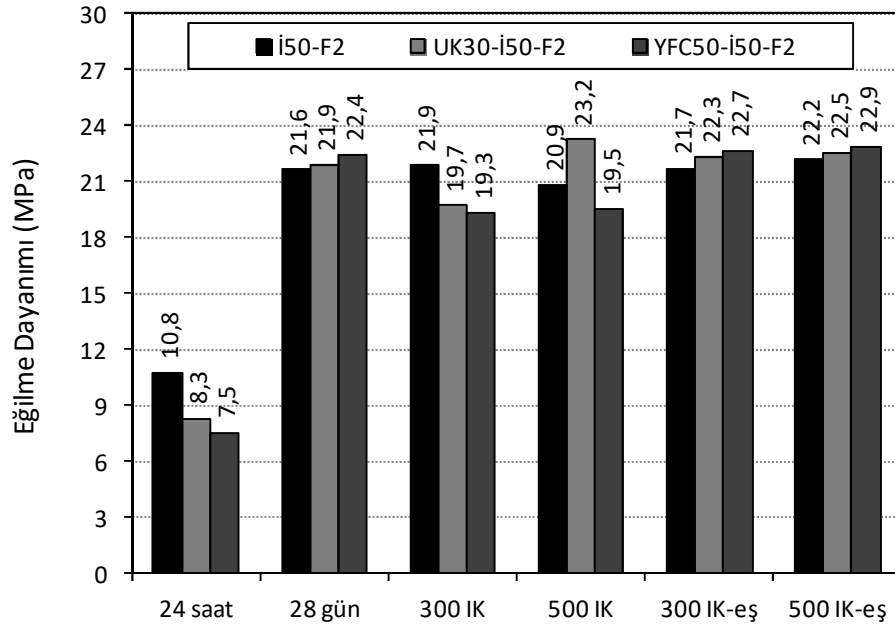
Şekil 7.15 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanmış halde bekletilen serilerin 24 saatlik (a), 28 günlük (b), 300 IK sonrası (c), 500 IK sonrası (d), 300 IK eşlenik (e), 500 IK eşlenik (f) eğilme yükü – sehim eğrileri.

Eğilme deneyi sonrasında oluşan çatlak açıklığı Şekil 7.16’da sunulmaktadır.

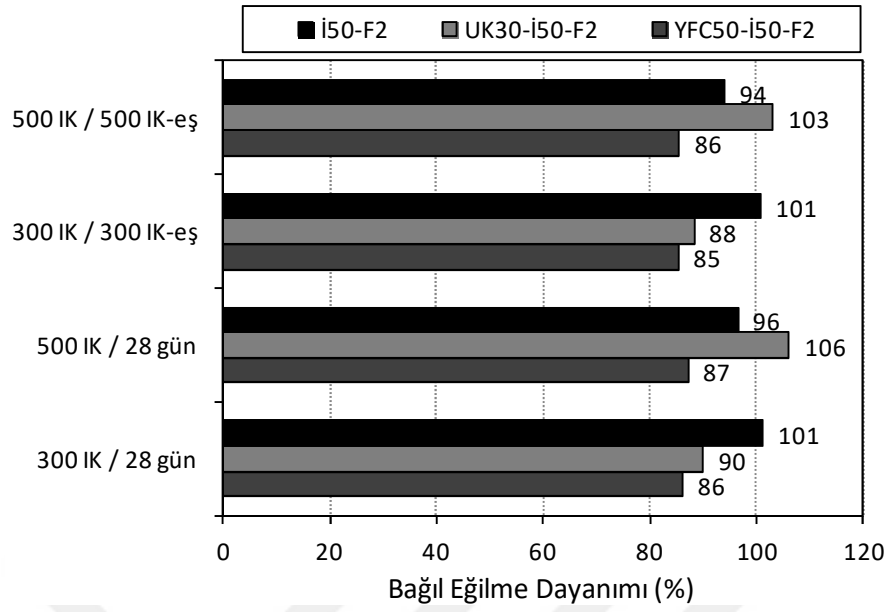


Şekil 7.16 Eğilme deneyi sonrası lifli numunenin görünümü (%2 lif, su kürtü).

Şekil 7.17’de ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal koşullarda serbest halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası eğilme dayanımları sunulmaktadır. Şekil 7.18’de bağıl dayanımlar incelendiğinde eğilme dayanımlarında %15’e varan dayanım kayıplarının gözüktüğü, bu kayıpların en fazla YFC ikameli matriste olduğu görülmektedir. Diğer karışımlarda çok az oranlarda, eşlenik dayanımlara kıyasla düşüş söz konusudur. Eğilme dayanımlarında 2 MPa dolaylarındaki kaybın minör bir sonuç olduğu söylenebilir.

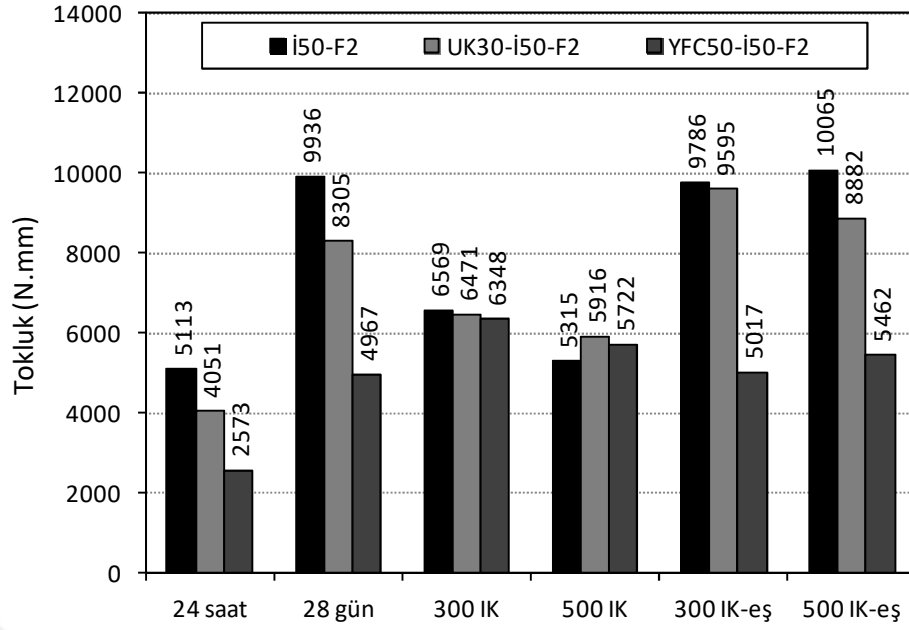


Şekil 7.17 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin eğilme dayanımları.

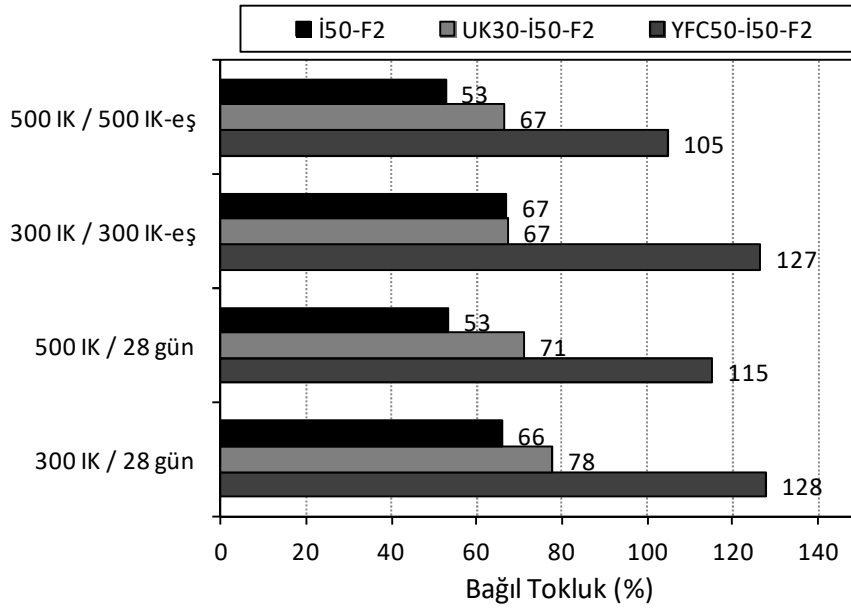


Şekil 7.18 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest haldeki serilerin bağıl eğilme dayanımı.

Şekil 7.19'da ideal koşullarda bekletilmiş serilerin tokluk değerleri, Şekil 7.20'de ise bağıl halleri verilmektedir. Kontrol karışımı ve UK ikameli karışımların %30 - %50'ler mertebesinde tokluk kaybı yaşadığı, YFC ikameli karışımın tokluğunun çevrimler ile arttığı görülmektedir. Eğilme yükü - sehim grafikleri incelendiğinde ilk çatlak yükü sonrası liflerin gerilme köprüleme özelliğinin azaldığı görülmektedir. Tüm karışımların çevrimler sonucu geldiği eğilme yükü - sehim formu benzerdir. Bu sebeple eşlenik performansı yüksek olan karışımların IK hasarı daha yüksek olmuştur. Yüzeydeki liflerin korozyonunun ve lif-matris ara yüzeyi hasarının bu sonucu meydana getirdiği söylenebilir.



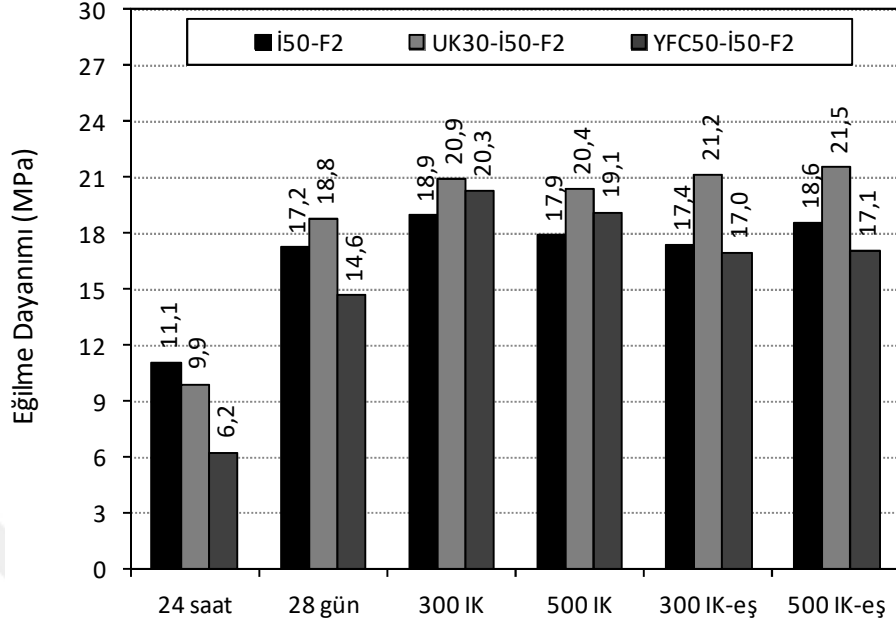
Şekil 7.19 İlk 24 saat ideal koşullarda bekletilen karışımların tokluk değerleri.



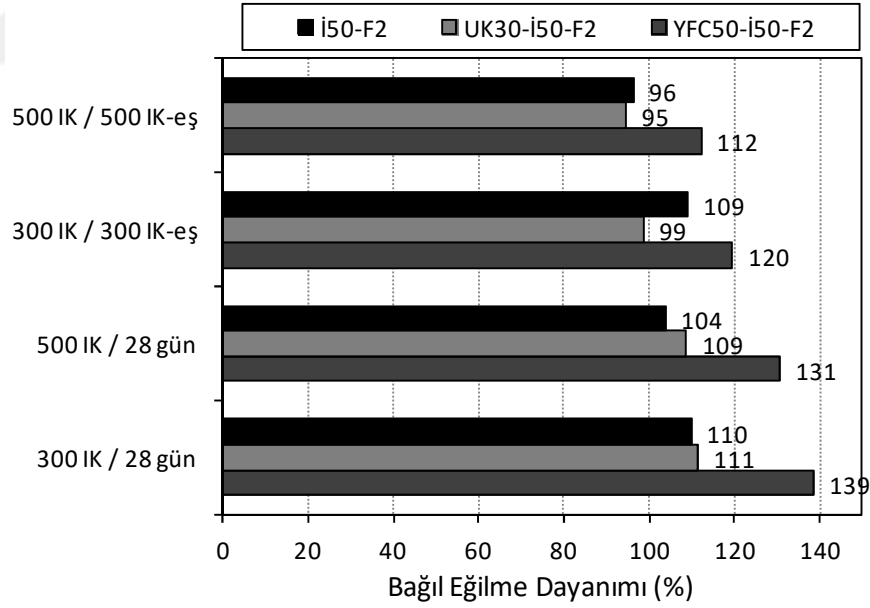
Şekil 7.20 İlk 24 saat ideal koşullarda bekletilen karışımların bağıl tokluk değerleri.

Şekil 7.21'de ilk 24 saat kuruma koşullarında kısıtlanmış halde bekletilen serilerin eğilme dayanımları verilmektedir. Bağıl değerlendirme ise Şekil 7.22'de sunulmaktadır. Eğilme dayanımlarında çevrimler neticesinde önemli bir değişiklik olmazken, YFC ikamesi sonucu %40'lara ulaşan artış söz konusudur. Islanma-

kuruma çevrimlerinin kür etkisi oluşturması sebebiyle dayanım artışları görülmektedir.



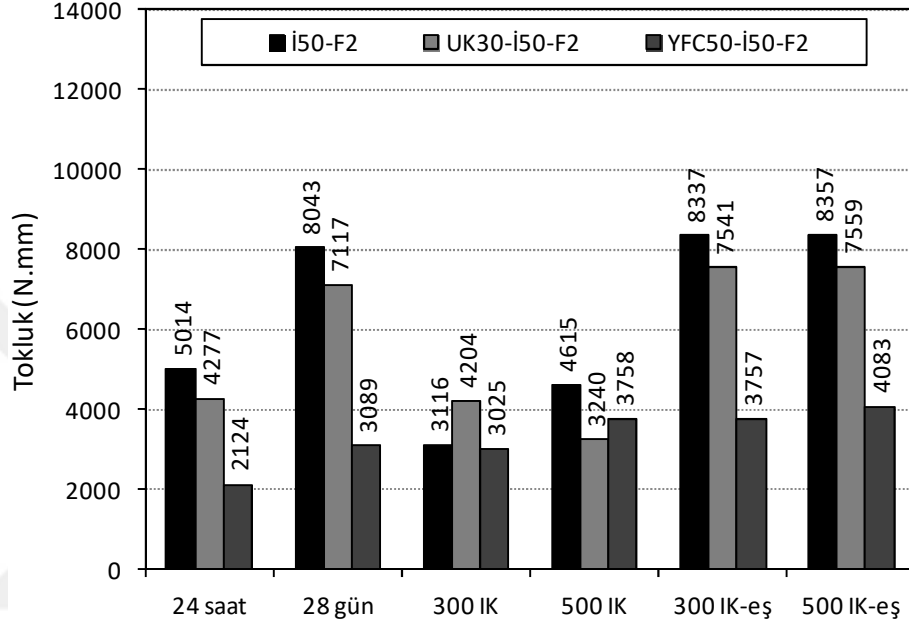
Şekil 7.21 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanan serilerin eğilme dayanımları.



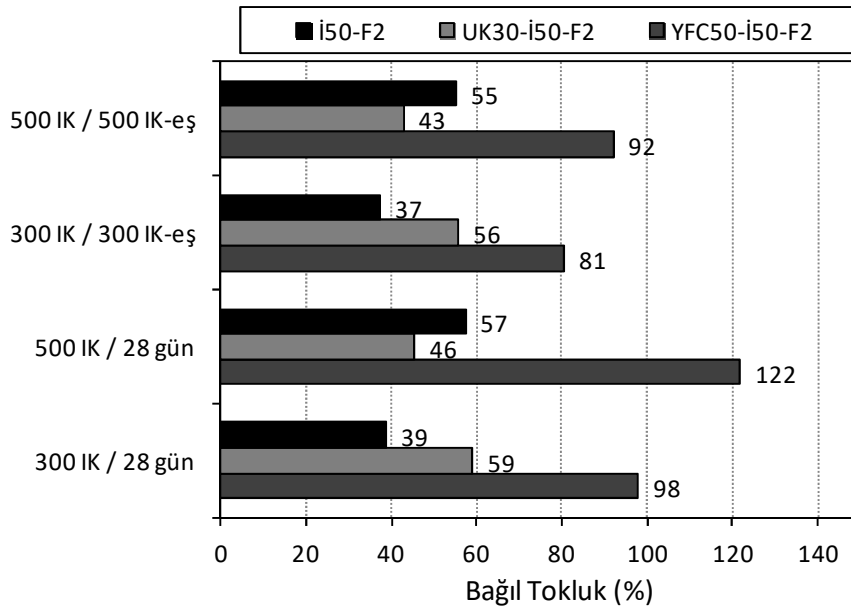
Şekil 7.22 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanan serilerin bağıl eğilme dayanımları.

Şekil 7.23'te kısıtlanmış serilerin tokluk değerleri, Şekil 7.24'te ise bağıl halleri sunulmaktadır. YFC ikamesi sonucu dayanımlardaki eğilime paralel tokluk artışları söz konusudur. Yük-sehim eğrileri incelendiğinde çevrimler sonucu uzayıp

kısalabilen kuyruk bölgesinin ve tepe yükünün tokluk sonuçlarını belirlediği görülmektedir. Tokluk değerlerindeki düşüşün eğilme dayanımlarından daha belirgin olduğu görülmektedir. Diğer bir ifadeyle söz konusu hasarın matristen ziyade lif - matris ara yüzey özelliklerinden ve yüzeyde korozyon sonucu kaybedilen liflerden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 7.23 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanan serilerin toklukları.

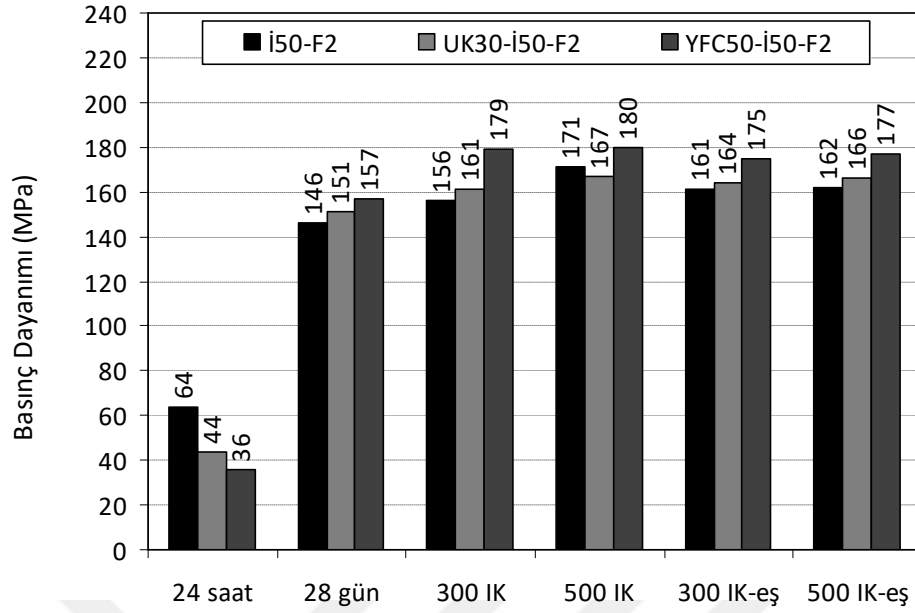


Şekil 7.24 İlk 24 saat kuruma ortamında kısıtlanan serilerin bağlı toklukları.

7.2.4 İslanma-Kuruma Çevrimlerinin Basınç Dayanımına Etkisi

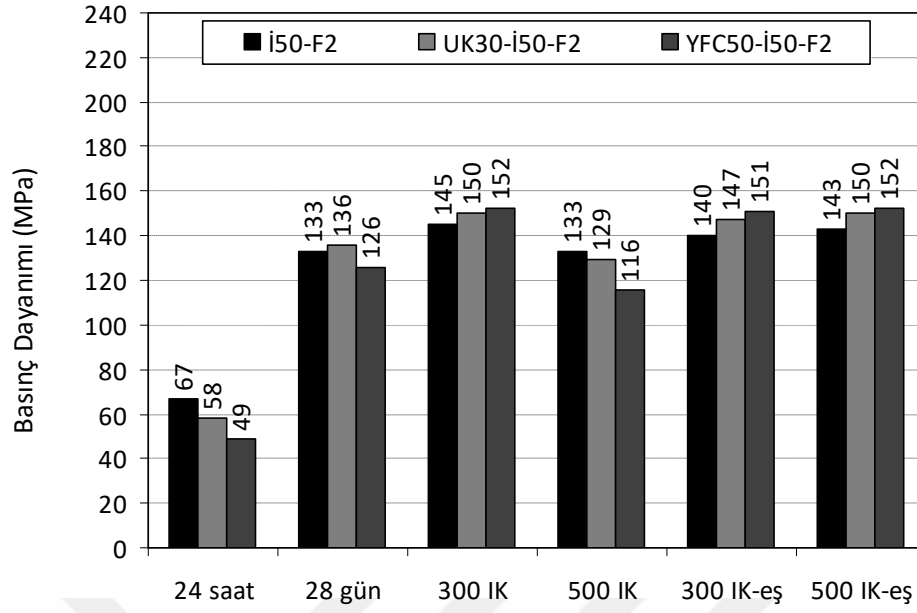
İslanma-Kuruma (İK) çevrimlerinin yüksek performanslı çimento esaslı kompozit malzemenin kalıcılığına etkisinin basınç dayanımı noktasında araştırıldığı bu bölümde ilk gün kalıp içerisinde bekletilme koşullarının etkisi üç farklı karışım için tartışılmaktadır. İlk gün kuruma koşullarında ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ BN) kısıtlanmış halde bekletilen numuneler ve ideal ortamda ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ BN) serbest halde bekletilen numunelerin standart su kürü (28 gün) sonrası maruz kaldığı 300 ve 500 İK çevriminin basınç performansına etkisi araştırılmıştır. Sonuçlar, gerek çevrime giriş, gerekse aynı süre kür edilmiş (eşlenik) dayanımlarla kıyaslanarak irdelenmiştir.

Şekil 7.25'te ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal koşullarda serbest halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası basınç dayanımları sunulmaktadır. Grafiklerde “-eş” ifadesi çevrim süresince su küründe tutulmuş serileri, diğer bir deyişle eşlenik serileri göstermektedir. İlk 24 saatte basınç dayanımları incelendiğinde beklendiği üzere puzolan ikame oranı artışıyla dayanımlar azalmaktadır. Kontrol karışımı, kül ikameli ve YFC ikameli karışımların basınç dayanımları sırasıyla 64, 44 ve 36 MPa olarak elde edilmiştir. 28 gün standart kür sonrası ise aynı değerler sırasıyla 146, 151 ve 157 MPa'ya ulaşmıştır. Grafikler incelendiğinde ıslanma-kuruma çevrimine giriş dayanımı olan 28 günlük basınç dayanımlarını geliştirdiği görülmektedir. Eşlenik numuneler incelendiğinde ise dayanım artışının sürdüğü görülmektedir. Boşluklarda oluşacak tuz kristalizasyonunun ve olası karbonatlaşmanın basınç dayanımlarını arttırdığı söylenebilir. 500 İK çevrimi süresince su küründe tutulan numunelerin basınç dayanımı İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 162, 166 ve 177 MPa elde edilmiştir.



Şekil 7.25 İlk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen serilerin basınç dayanımları.

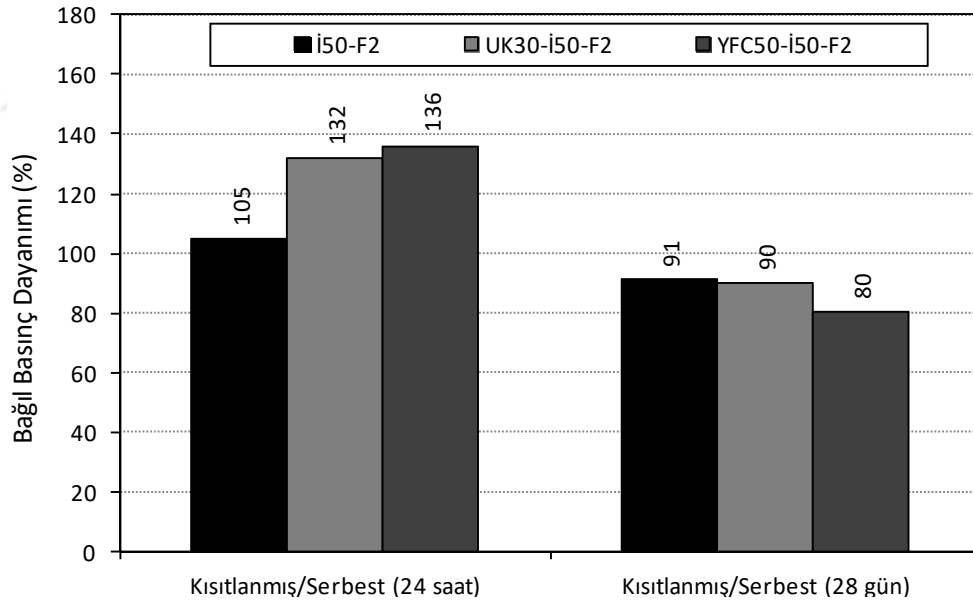
Şekil 7.26'da ilk 24 saat kalıp içerisinde kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilmiş numunelerin çevrimler öncesi ve sonrası basınç dayanımları sunulmaktadır. İlk 24 saatte İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için basınç dayanımları sırasıyla 67, 58 ve 49 MPa elde edilmiştir. 28 günlük standart kür sonrası bu değerler sırasıyla 133, 136 ve 126 MPa mertebesine yükselmiştir. 300 ıslanma kuruma çevrimi sonrası basınç dayanımlarının giriş dayanımına göre arttığı ve eşlenik serilere göre etkilenmediği söylenebilir. Kabin ortamında üflenen sıcak havanın, boşluklarda oluşacak tuz kristalizasyonunun ve olası karbonatlaşmanın basınç dayanımlarını arttırdığı söylenebilir. 500 IK çevrimi süresince su küründe tutulan numunelerin basınç dayanımı İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 143, 150 ve 152 MPa elde edilmiştir. Çevrim sayısının artışıyla eşlenik dayanımların da artışına paralel olarak IK etkisine maruz örneklerin dayanımlarının bir miktar düşük olduğu görülmektedir. YFC ikameli karışımda 500 çevrim sonucu çevrime giriş dayanımına göre 10 MPa'lık düşüş söz konusudur.



Şekil 7.26 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlı halde bekletilen serilerin basınç dayanımları.

Şekil 7.25 ve Şekil 7.26 kıyaslandığında kısıtlanmış haldeki numunelerin serbest haldekilere kıyasla erken yaşta daha yüksek dayanım verdiği, ilerlemiş yaşlarda ise daha düşük dayanım verdiği görülmektedir. Burada kısıtlama etkisinin çatlak oluşturma mekanizmasından ziyade erken yaş mukavemet gelişiminin sıcaklık artışı ile artması, ancak ilerleyen yaşlarda nihai dayanımlarının düşmesi durumu söz konusudur. Kuruma ortamında kısıtlama etkisinin 30°C, serbest halde ideal koşulların ise 20°C sıcaklık ile teşkil edildiğini vurgulamak gerekmektedir. Yüksek oranda çimento içeren bu tür kompozitlerde sıcaklık artışı ile erken yaşta dayanım gelişiminin hızlandığı, düzensiz gelişen hidrasyon ürünlerinin hidrate olmayan çimento partikülleri etrafında bariyer etkisi yaptığı ve hidrate olmamış partikül miktarını arttırarak uzun dönemli dayanımlarda düşüşe sebep olduğu bilinmektedir (Barnett, Soutsos, Millard ve Bungey, 2006; Yalçınkaya, Beglarigale ve Yazıcı, 2013). Bu çalışmada kısıtlanmış durumda gelişmesi muhtemel çatlakların basınç dayanımına etkisinin belirgin olmadığı görülmektedir. Çatlaklar, genellikle numunenin orta kısmında yoğunlaşmaktadır. Basınç dayanımları, eğilme sonrası basınç deneyi ile bulunduğundan bu çatlakların mekanik özelliklere etkisinin tam olarak yansımından söz edilemez. Ancak, kuruma ortamında YFC içeren karışımın diğer karışımlara göre serbest büzülme değerinin oldukça fazla olması, agrega dane çeperlerinde ve çimento hamurunun içsel kısıtlandığı noktalarda ara yüzey hasarına

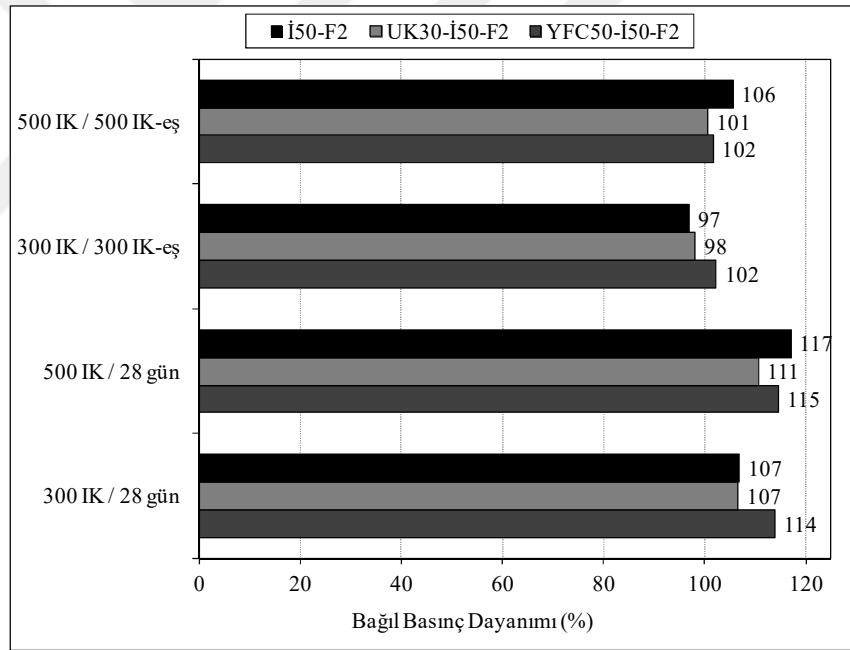
sebeup olmuş olabilir. Ayrıca, durabilite zorlamaları veya büzölme sebebiyle gelişen çatlaklı yapılarıdaki hasarı belirlemede eğilme yüklemesinin basınç dayanımına göre daha iyi bir gösterge olduğu söylenebilir. Şekil 7.27’de erken yaşta kuruma etkisinde kısıtlamanın ve ideal koşullarda serbest durumda kür etmenin, basınç dayanımlarına etkisi kıyaslanarak bağıl olarak sunulmaktadır. Erken yaşta hızlı gelişen hidrasyon reaksiyonlarının basınç yüklemesi altında büzölme çatlaklarından daha baskın bir etkiye sahip olduğu görölmektedir. İnceliği ve puzolanik aktivitesi yüksek YFC puzolanı ikamesi ile sıcaklık artışıyla dayanım artışı en belirgindir (%36). Ardından 28 gün su kürü yapılması durumunda karışımlarda ters bir etki oluşmaktadır. YFC50-İ50-F2 karışımı erken yaşta sıcaklık artışı ile en yüksek dayanım artışı oluştururken, 28 gün su kürü sonrası en yüksek dayanım kaybını (%20) beraberinde getirmektedir. Başka bir deyişle sıcaklık artışı, puzolan ikamesi durumunda dayanım kazanma hızını artırırken ilerlemiş yaş dayanımlarını kontrol karışımına göre daha olumsuz etkilemektedir.



Şekil 7.27 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür için bağıl basınç dayanımları.

Erken yaşta (24 saat) ideal koşullarda serbest halde tutulan serilerin değişik yaşlarda ve İK çevrimleri sonrası basınç dayanımları bağıl olarak Şekil 7.28’de sunulmaktadır. Karışımların 300 İK sonrası basınç dayanımları, İK’ye giriş dayanımına göre (28 gün) önemli oranda değişmemiş, belirgin kayıp gözlenmediği

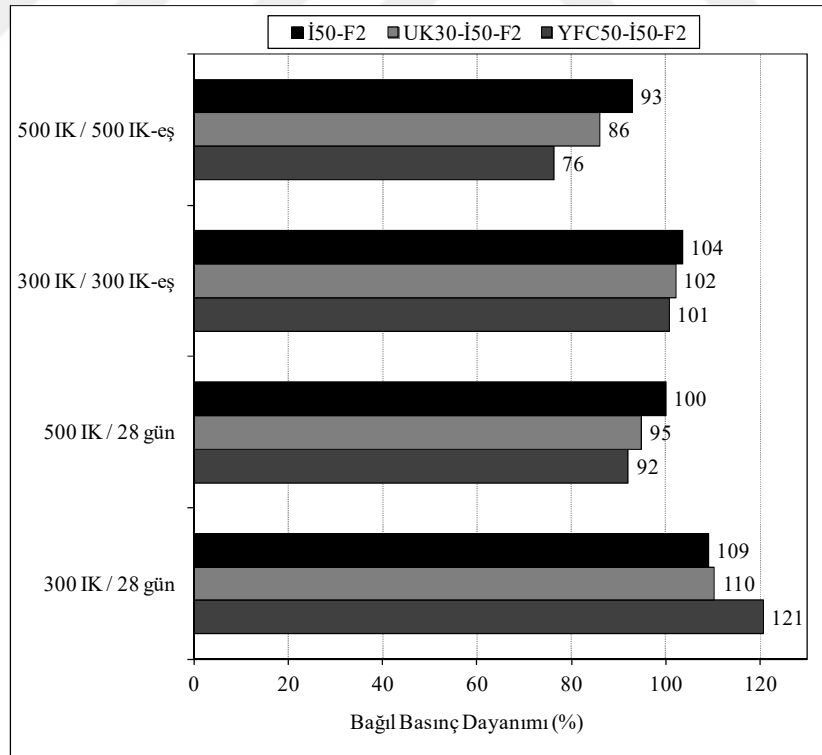
gibi tüm serilerde dayanım artışı olmuştur. 300 IK çevrimi boyunca eşlenik olarak su küründe tutulan numunelere göre ise İ50-F2, UK30-İ50-F2 karışımları için sırasıyla %3, %2 dayanım kaybı meydana gelmiştir. YFC50-İ50-F2 karışımında ise %2 dayanım artışı gözlenmiştir. Dayanım kazanma oranları 500 IK çevrimi sonrası sırasıyla %6, %1 ve %2'ye yükselmektedir. Çevrime giriş dayanımları İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 146, 151 ve 157 MPa'dır. 28 günden, eşlenik numunelerin 500 IK çevrimi boyunca suda bekleme süresine kadar en büyük dayanım artışı YFC50-İ50-F2 karışımı tarafından sergilenmiştir (%13). Su/bağlayıcı oranı tüm karışımlar için 0,20'dir. Ancak, su/çimento oranı UK ikamesi ile 0,36'ya, YFC ikamesi ile 0,50'ye yükselmektedir. Eşlenik numunelere kıyasla, 500 IK sonrası dayanım kaybı yoktur. İdeal koşullarda saklanan numunelerin çatlaksız bir yapıya sahip olduğu görülmüştür.



Şekil 7.28 İlk 24 saat ideal koşullarda bekletilen serilerin bağıl basınç dayanımları.

Erken yaşta (24 saat) kuruma koşullarında kısıtlanmış halde tutulan serilerin değişik yaşlarda ve IK çevrimleri sonrası basınç dayanımları bağıl olarak Şekil 7.29'da sunulmaktadır. Çevrime giriş dayanımları İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla 133, 136 ve 126 MPa'dır. Karışımların 300 IK sonrası basınç dayanımları artarken, 500 IK sonrası basınç dayanımları, giriş

dayanımlarına kıyasla UK ikameli ve YFC ikameli karışımlarda düşüş göstermiştir. 300 IK sonrası eşlenik dayanımlara kıyasla, YFC ikameli karışım %4 dayanım artışı yaşamıştır. 500 IK çevrimi sonrası ise eşlenik dayanımlar referans alınarak İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için dayanım kayıpları sırasıyla %7, %14 ve %24 olarak elde edilmiştir. Şekil 7.29 incelendiğinde kısıtlanmış numunelerde, ideal koşullarda saklanan numunelere kıyasla 28 günlük dayanımların İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları için sırasıyla %9, %10 ve %20 oranında daha az olduğu görülmüştür. İlk 24 saatte görülmeyen, uzun dönemde oluşan bu etkinin temel sebebinin erken yaşta hızlı ve düzensiz gelişen hidrasyon ürünleri olabileceği vurgulanmıştır. Erken yaşta büzülme sonucu gelişmesi muhtemel kılcal çatlaklar, IK çevrimleri sırasında çimento hamuru gövdesine su işleyişini kolaylaştırabilir. Çevrime giriş dayanımlarına kıyasla 300 çevrim sonrası önemli bir kayıp olmadığı göz önüne alındığında mikro boyuttaki çatlakların ıslanma-kuruma çevrimlerinin erken safhalarında kütleme ve tuz kristalizasyonu etkisi ile kısmen iyileştiği söylenebilir.



Şekil 7.29 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış serilerin bağıl basınç dayanımı.

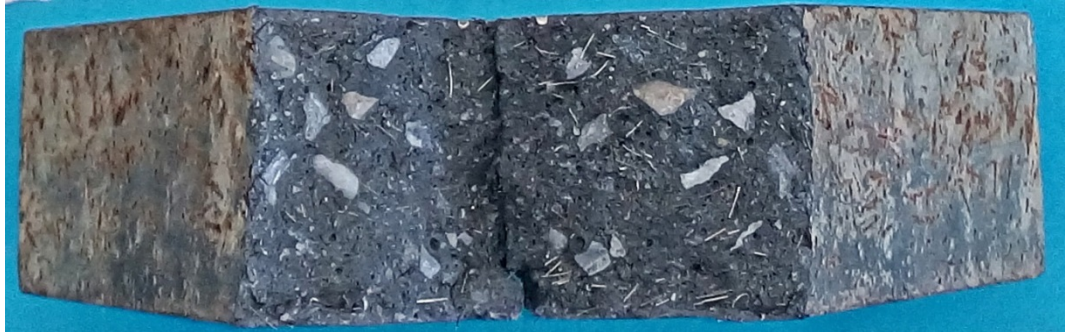
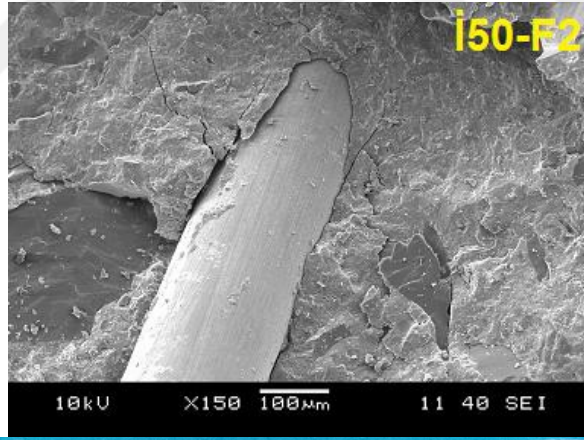
300 IK çevriminde örnek yüzeylerinde çelik lif korozyonunun başladığı gözlenmiş olup, 500 IK çevriminde bu hasarın giderek arttığı belirlenmiştir. Şekil 7.30'da IK etkisiyle yüzeyde korozyona uğramış bir lifin yuvası görülmektedir. Şekil 7.31'de ise yüzey lifinin korozyonu sebebiyle gelişen matris hasarı görülmektedir. YFC ikameli karışımların viskozitesi, diğer karışımlara göre daha düşüktür. Taze halde kalıp tabanına oturan lif oranının fazla oluşu, yüzeysel hasara yol açan IK etkisinden en fazla etkilenilmesine sebep olmuştur. Eğilme deneyi sonrası kırık yüzeyler incelendiğinde iç kısımda pas lekeleri ve lif korozyonu görülmemiştir. İç yapıda lif korozyonu başlangıcı olup olmadığının anlaşılması için karışımlarda kırık yüzeylerde taramalı elektron mikroskobu (SEM) fotoğrafları araştırılmıştır. Numune yüzeyinden 5 - 10 mm içeriden alınan kırık yüzey örnekleri incelenmiştir. Üç farklı UYPB karışımının iç kesimlerinde lif korozyonu olmadığı tespit edilmiştir (Şekil 7.32, 7.33, 7.34). Korozyona uğrayan liflerin sadece kalıp yüzeyinde kalan lifler olduğu görülmüştür.



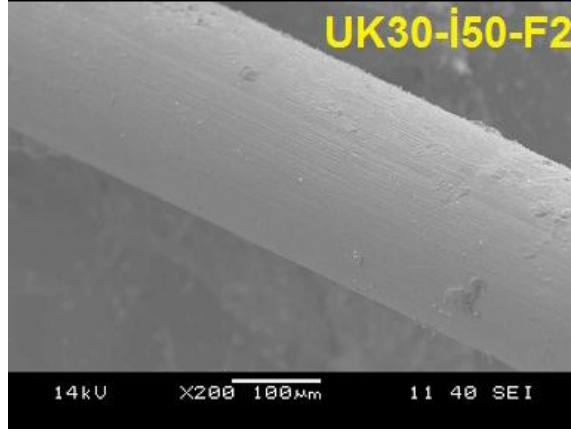
Şekil 7.30 IK etkisiyle yüzeyde korozyona uğramış bir lifin yuvası.



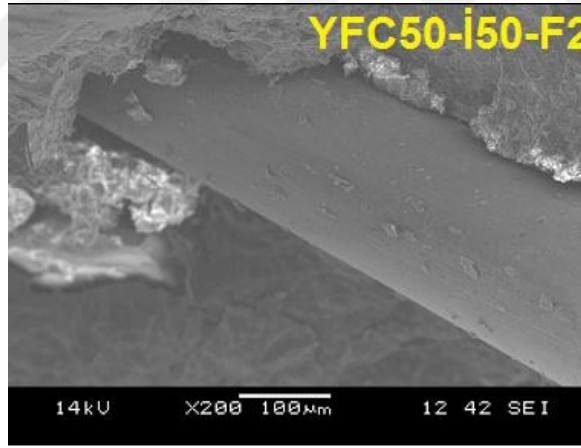
Şekil 7.31 IK etkisinden kaynaklanan yüzey lifinin korozyonu sebebiyle gelişen matris hasarı.



Şekil 7.32 500 IK çevrimi sonrası İ50-F2 karışımındaki liflerin yüzey durumu.



Şekil 7.33 500 IK çevrimi sonrası UK30-İ50-F2 karışımındaki liflerin yüzey durumu.



Şekil 7.34 500 IK çevrimi sonrası YFC50-İ50-F2 karışımındaki liflerin yüzey durumu.

7.2.5 Kütle Değişimi, Klor İşleme ve Karbonatlaşma Derinlikleri

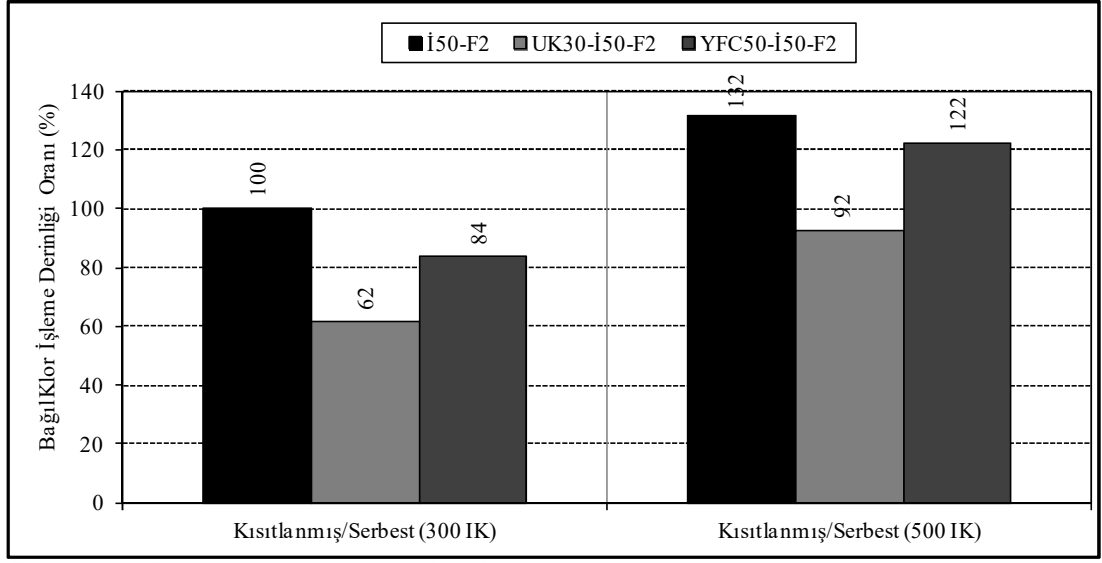
Betonun klor geçirgenliğini değerlendiren birçok yöntem geliştirilmiştir. Bunlardan biri betonun klor işleme derinliğini ölçen basit bir metot olan AgNO_3 (gümüş nitrat) çözeltisi püskürtülerek betonun renk değişimini gözlemlemeye yardımcı olan yöntemdir (Yazıcı, 2008).

Bu çalışmada eğilmede çekme deneyi sonrası iki parçaya ayrılmış örneğin iç yüzeyine püskürttüğümüz gümüş nitrat çözeltisinin klor işlemiş kısımları renk değiştirmezken, klor işlememiş çekirdek kısmı sarı renge dönüşmüştür. Dış bölgedeki klorürlerce kirlenmiş bölgenin kalınlığı kumpas vasıtası ile ölçülür. Tablo-7.2'de örnek yüzeyine %0,2 AgNO_3 çözeltisi püskürtülerek elde edilen klor işleme derinlikleri yer almaktadır.

24 saat kuruma koşulunda bekletilen karışımların çevrimler sonucu klor işleme derinlikleri genellikle artmıştır (Şekil 7.35). Cl^- iyonları beton bünyesine girdikten sonra mineral katkı tanecikleri üzerine adsorbe olurlar ve alüminli bileşenler ile reaksiyon yaparak bağlanırlar. Sisteme daha fazla mineral katkı konulması klor iyonu tutma kapasitesini arttırmıştır. Bu bulgu, Polder ve Peelen (2002)'in deniz ortamındaki mineral katkılı betonlarda daha yüksek klorid penetrasyon direnci elde etmeleri ile uyumludur (Yiğiter, 2008).

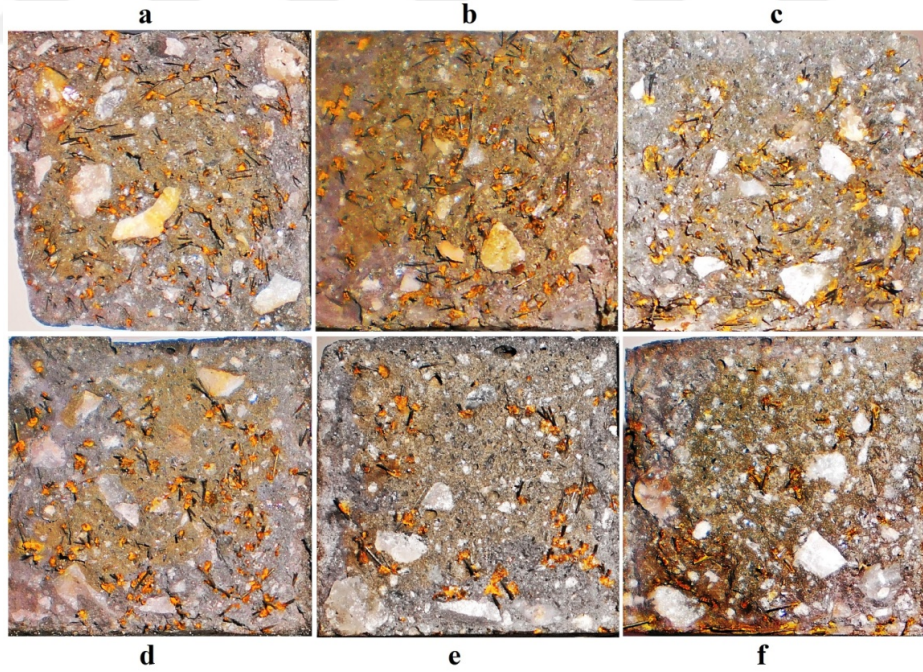
Tablo 7.2 Çevrimler sonucu klor işleme derinlikleri (mm).

| | 300 IK | | 500 IK | |
|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | İdeal Koşul | Kuruma Koşulu | İdeal Koşul | Kuruma Koşulu |
| İ50-F2 | 5,0 | 6,5 | 5,7 | 7,5 |
| UK30-İ50-F2 | 6,0 | 3,7 | 6,6 | 6,1 |
| YFC50-İ50-F2 | 5,0 | 4,2 | 4,5 | 5,5 |

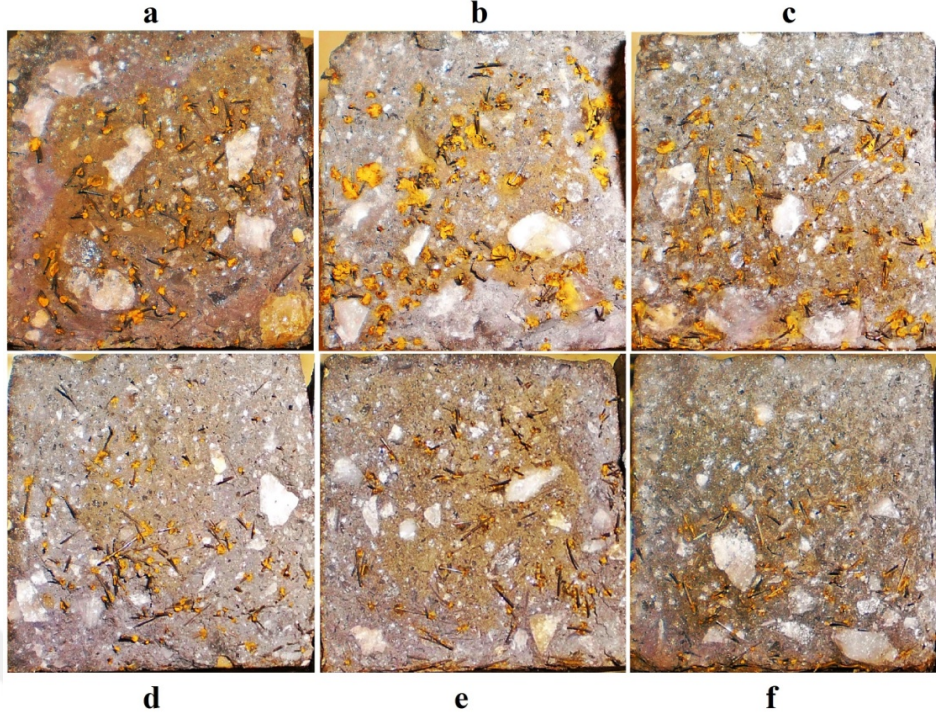


Şekil 7.35 Kuruma ortamında kısıtlama ve serbest halde kür için bağlı klor işleme derinlikleri.

Şekil 7.36 ve Şekil 7.37'de ilk 24 saat ideal koşullarda serbest halde bekletilen ve kuruma koşulunda kısıtlı halde bekletilen serilerin 300 ve 500 ıslanma-kuruma çevrimi sonrası klor iyonu işleme derinlikleri görsel olarak sunulmaktadır.

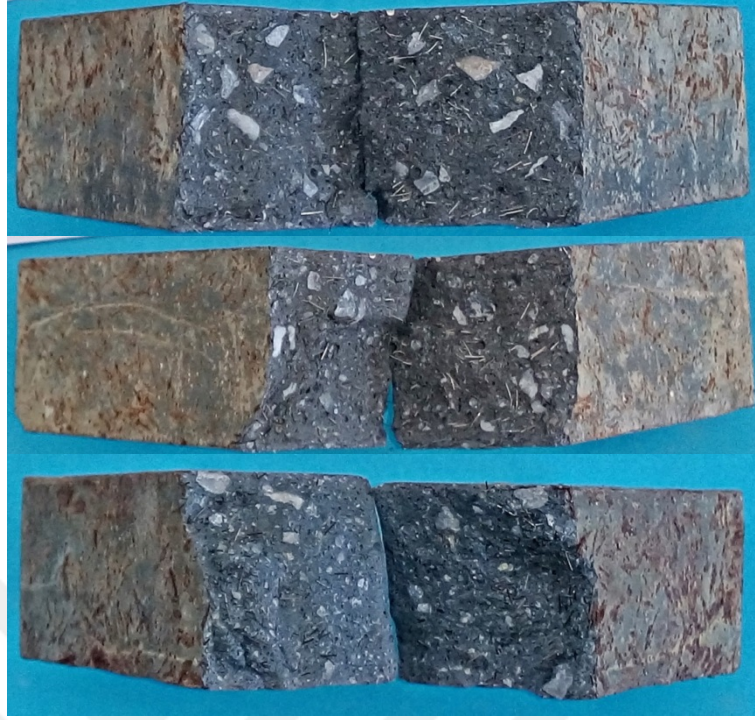


Şekil 7.36 İlk 24 saat ideal koşulda serbest halde bekletilen serilerin 300 IK sonrası İ50-F2 (a), UK30-İ50-F2 (b), YFC50-İ50-F2 (c); ilk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin 300 IK sonrası İ50-F2 (d), UK30-İ50-F2 (e), YFC50-İ50-F2 (f) klor iyonu işleme derinlikleri.



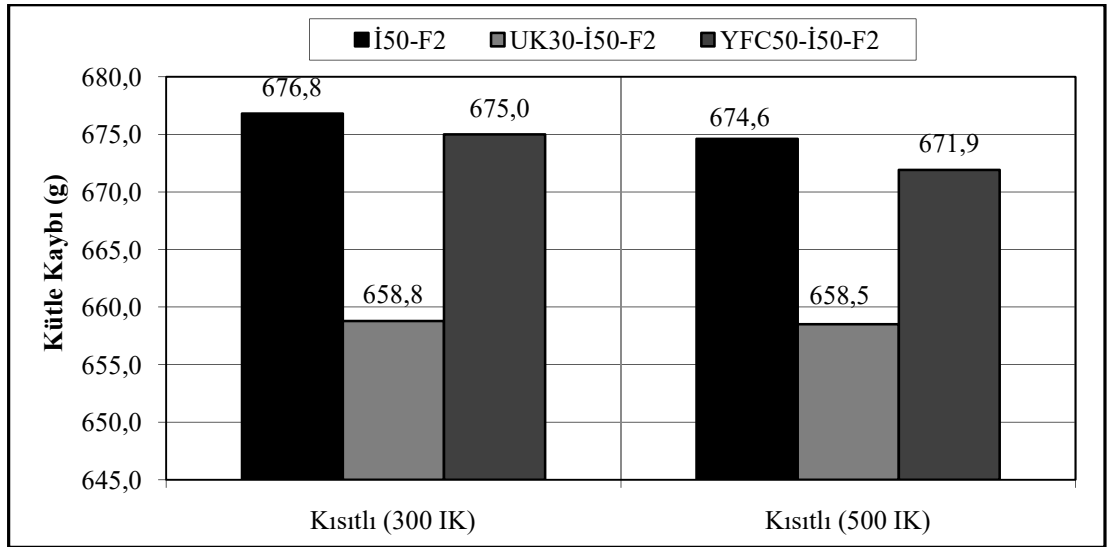
Şekil 7.37 İlk 24 saat ideal koşulda serbest halde bekletilen serilerin 500 IK sonrası İ50-F2 (a), UK30-İ50-F2 (b), YFC50-İ50-F2 (c); ilk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin 500 IK sonrası İ50-F2 (d), UK30-İ50-F2 (e), YFC50-İ50-F2 (f) klor iyonu işleme derinlikleri.

Gümüş Nitrat (AgNO_3) püskürtülmesi sonrasında oluşan sarı noktalar lif korozyonu ile ilgili olmamakla beraber, püskürtme öncesi görünüm Şekil 7.38’de yer almaktadır.



Şekil 7.38 Yukarıdan aşağıya İ50-F2, UK30-İ50-F2, YFC50-İ50-F2 karışımlarından oluşan örneklerde yer alan liflerin AgNO_3 çözeltisi püskürtülmesinden önceki hali.

Benzer şekilde karışımlarda erken yaşta kuruma ortamında kısıtlama işlemi, İK çevrimlerinde kütle kaybını arttırmıştır (Şekil 7.39).



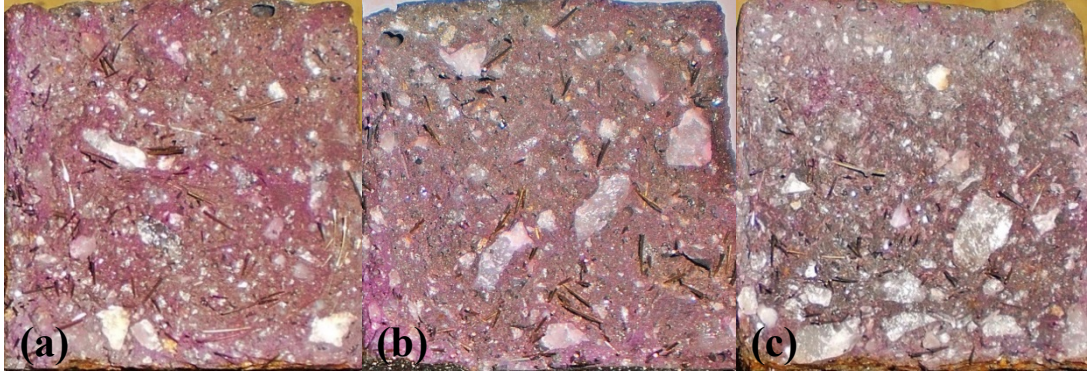
Şekil 7.39 Kuruma ortamında kısıtlanmış halde kür için kütle kayıpları.

Beton yüzeyine püskürtülen baz indikatörü olan fenolftalein, pH değeri 11-12,5 olan karbonatlaşmamış betonu koyu pembe renge dönüştürür. Karbonatlaşma sonucu pH değeri 8-9'a düşmüş beton, renk değişimi göstermez. Baz indikatörü olarak kullanılan çözeltili fenolftalein çözeltilisidir (Yazıcıoğlu, Demirel, Gönen ve Özer, 2012). Karbonatlaşma derinliğini belirlemek için betonu mümkün olduğunca yüzeye dik kesip, kesilen temiz yüzeye indikatör sıvı püskürtülür. Karbonatlaşmış kısım renksiz kalırken, karbonatlaşmamış kısım sıvı ile reaksiyona girip renk verir. Bu amaçla genellikle %0,1 fenolftalein alkol eriyiği kullanılır. Karbonatlaşma derinliği beton yüzeyinden itibaren 0,1 mm hassasiyetle her örnek için en az 4 farklı noktadan ölçülmüştür. Fenolftalein, hidrasyon ürünü olan $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girerek ortamın pembe bir renk almasına neden olur. Numunelerin karbonatlaşma meydana gelen kısımlarında renk değişimi gözlenmez. Çünkü $Ca(OH)_2$, CO_2 ile tepkimeye girmiş olduğundan ortamın pH değeri 11-12,5 değerinden 8-9 gibi değerlere düşmüştür. Böylece ortamda fenolftalein'in tepkimeye girerek pembe renge dönüştüreceği $Ca(OH)_2$ bulunmaz. Örnekler üzerinde renk değiştirmeyen kısımların derinlikleri ölçülerek ortalama karbonatlaşma derinliği (D) hesaplanmıştır (Tablo 7.3) Bu tip ölçüm daha önce Ramezianpour (1987), Claisse (1998) ve Paillere (1986) tarafından kullanılmıştır (Yazıcıoğlu ve diğer., 2012).

Tablo 7.3 Karbonatlaşma derinlikleri (mm).

| Karışım Türü | 300 IK | | 500 IK | |
|--------------|-------------|---------------|-------------|---------------|
| | İdeal Koşul | Kuruma Koşulu | İdeal Koşul | Kuruma Koşulu |
| İ50-F2 | 0 | 2,0 | 0 | 7,5 |
| UK30-İ50-F2 | 0 | 5,0 | 0 | 15,0 |
| YFC50-İ50-F2 | 0 | 10,0 | 0 | 25,0 |

24 saat ideal koşullarda bekletilen ve ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulan İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımlarıyla hazırlanan örneklerin kesitinde karbonatlaşma derinliği gözlenmemiştir. Çatlaksız numunelerle sağlanan geçirimsizlik karbonatlaşmayı azaltır. Kısıtlanmış (çatlaklı) numunelerde daha yüksek karbonatlaşma derinliği söz konusudur (Şekil 7.40).



Şekil 7.40 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlanmış halde bekletilen serilerin İ50-F2 (a), UK30-İ50-F2 (b), YFC50-İ50-F2 (c) 500 IK sonrası karbonatlaşma derinlikleri.

24 saat kuruma koşullarında bekletilen ve ıslanma-kuruma çevrimine tabi tutulan örnekler arasında en fazla karbonatlaşma derinliği YFC50-İ50-F2 içeren karışımda gözlemlenmiştir. Subaşı, Beycioğlu ve Çomak (2011) tarafından, UK ikame oranına ve zamana bağlı olarak karbonatlaşma derinliği değerlerinin değiştiği, en fazla karbonatlaşmanın %30 UK ikameli betonlarda, en az karbonatlaşmanın ise referans betonlarda meydana geldiği belirtilmiştir. Uçucu kül veya yüksek fırın cürufu kullanım oranı arttıkça karbonatlaşma derinliği değerleri de artış göstermiştir. Yüksek mineral katkılı sistemlerin başlangıç pH değerleri nispeten daha düşük olduğundan, düşük pH'lı karbonatlaşma cephesi de daha kolay ilerleyebilmektedir. Diğer yandan, mineral katkı kullanımı ile çimentonun reaksiyon ürünü olan Ca(OH)_2 puzolanik reaksiyonlar ile tüketilmektedir. Sistemde karbonatlaşacak daha az kireç kaldığından, cephe daha çok ilerlemiştir.

BÖLÜM SEKİZ

KISITLANMIŞ BÜZÜLME ÇATLAKLARININ ÇELİK DONATI KOROZYONUNA ETKİSİ

UYPB karışımlarında oluşan erken yaş büzülme çatlaklarının UYPB içine gömülü çelik donatının korozyonuna etkileri bu bölümde incelenmiştir. Uçucu külün, yüksek fırın cürufunun ve çelik lif katkısının erken yaş büzülme çatlaklarına etkisi ile oluşan çatlakların donatı korozyonu ile ilişkisi bu bölümde araştırılmıştır.

8.1 Korozyon Öncesi Kısıtlanmış Büzülme Çatlaklarının İncelenmesi

Lifli ve lif içermeyen UYPB'lerin kısıtlanmış büzülme sonucu farklı yüzeylerinde oluşan çatlakların uzunluk, genişlik ve alanlarının değişimi Tablo 8.1 ve Tablo 8.2'de sunulmaktadır. Tabloda perdah yüzeyi (üst yüzey) 0, yan yüzeyler (1 ve 2) ve alt yüzey (3) isimlendirmeleri kullanılmıştır. Çatlak uzunlukları “mm”, ortalama çatlak açıklıkları ise “µm” cinsinden verilmiştir. Çatlak uzunlukları ve ortalama çatlak çaplarının çarpımı ile elde edilen çatlak yüzeyi alanları “mm²” cinsinden tanımlanmıştır. Tablo 8.1 ve Tablo 8.2'de verilen ortalama çatlak açıklığı, ise yön değiştirmemiş ve benzer karakterdeki her bir çatlaktan alınan en az üç ölçüm ile belirlenmiştir. Her bir çatlak için tespit edilen ortalama çatlak açıklıkları, çatlak sayısına bölünerek ilgili yüzeyin ortalama çatlak açıklığı tespit edilmiştir. Çatlak uzunluğu ise her bir yüzeydeki toplam çatlak uzunluklarının numuneler bazındaki ortalamasıdır. Çatlak uzunluğunun ortalama çatlak çapıyla çarpılması ile çatlak yüzey alanı bulunmuştur.

Çalışma kapsamında erken yaşta, 30±1°C, %50±2 bağıl nem ortamında ankastrelik pimleri ile kısıtlanmış halde 24 saat bekletilmiş numunelerde çatlak uzunluk ve açıklıkları korozyon deneyleri öncesi (28. gün) incelenmiştir. Çelik lifli ve çelik lif içermeyen UYPB'lerin kısıtlanmış büzülme sonucu farklı yüzeylerinde oluşan çatlakların uzunluk, genişlik ve alanlarının değişimi sırasıyla Tablo 8.1 ve 8.2'de sunulmaktadır.

Tablo 8.1 Lifli numunelerin çatlak analizleri.

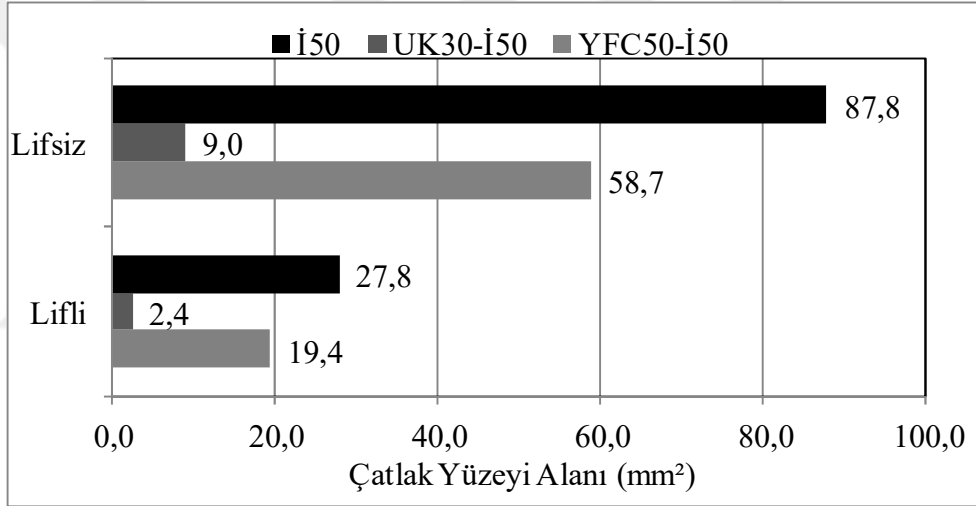
| Çelik Lifli Numunelerin 28. Gün Çatlak Analizleri | | | | | |
|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------|-----------|---------|-------|
| | Yüzey Adı | Üst (0) | Yan (1+2) | Alt (3) | Genel |
| İ50-F2 | Çatlak Uzunluğu (mm) | 158,5 | 68,4 | 45,0 | 271,9 |
| | Ortalama Çatlak Çapı (μm) | 141,3 | 49,5 | 45,3 | |
| | Çatlak Yüzeyi Alanı (mm^2) | 22,4 | 3,4 | 2,0 | 27,8 |
| UK30-İ50-F2 | Çatlak Uzunluğu (mm) | 31,6 | 8,0 | 0,0 | 39,6 |
| | Ortalama Çatlak Çapı (μm) | 67,3 | 39,7 | 0,0 | |
| | Çatlak Yüzeyi Alanı (mm^2) | 2,1 | 0,3 | 0,0 | 2,4 |
| YFC50-İ50-F2 | Çatlak Uzunluğu (mm) | 129,2 | 44,6 | 0,0 | 173,8 |
| | Ortalama Çatlak Çapı (μm) | 121,8 | 81,7 | 0,0 | |
| | Çatlak Yüzeyi Alanı (mm^2) | 15,7 | 3,6 | 0,0 | 19,4 |

Tablo 8.2 Lif içermeyen numunelerin çatlak analizleri.

| Çelik Lif İçermeyen Numunelerin 28. Gün Çatlak Analizleri | | | | | |
|------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------|-----------|---------|-------|
| | Yüzey Adı | Üst (0) | Yan (1+2) | Alt (3) | Genel |
| İ50-F0 | Çatlak Uzunluğu (mm) | 239,0 | 183,4 | 53,0 | 475,4 |
| | Ortalama Çatlak Çapı (μm) | 314,2 | 60,6 | 29,5 | |
| | Çatlak Yüzeyi Alanı (mm^2) | 75,1 | 11,1 | 1,6 | 87,8 |
| UK30-İ50-F0 | Çatlak Uzunluğu (mm) | 50,0 | 0,0 | 0,0 | 50,0 |
| | Ortalama Çatlak Çapı (μm) | 179,8 | 0,0 | 0,0 | |
| | Çatlak Yüzeyi Alanı (mm^2) | 9,0 | 0,0 | 0,0 | 9,0 |
| YFC50-İ50-F0 | Çatlak Uzunluğu (mm) | 252,5 | 145,8 | 83,3 | 481,6 |
| | Ortalama Çatlak Çapı (μm) | 167,4 | 80,2 | 57,1 | |
| | Çatlak Yüzeyi Alanı (mm^2) | 42,3 | 11,7 | 4,8 | 58,7 |

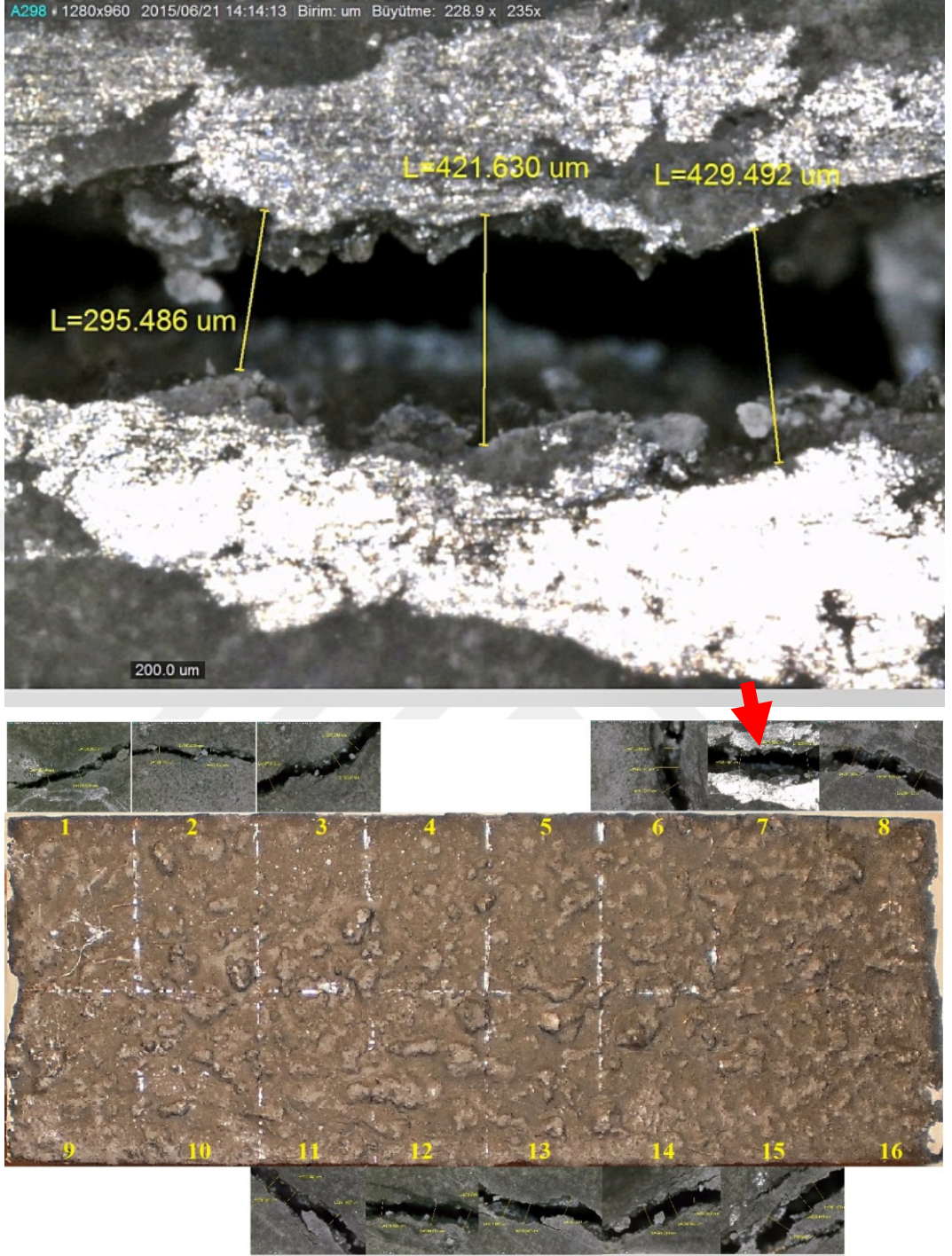
Lifli UYPB'ler incelendiğinde kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kurumaya doğrudan maruz kalan üst yüzeyde en büyük uzunlukta oluştuğu, çatlak açıklıklarının da bu yüzeyde en fazla olduğu görülmektedir. Lifli numunelerde, yan yüzeylerin çatlak açıklıkları, üst yüzeydeki çatlak açıklıklarının %35'i ile %70'i mertebesindedir. Lif içermeyen numunelerde, yan yüzeylerin çatlak açıklıkları, üst yüzeydeki çatlak açıklıklarının %0'ı ile %48'i mertebesindedir. İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 numunelerinde kısıtlanmış büzülme çatlaklarının kalıp alt yüzünde de

oluştığı ve üst-yan yüzeydeki çatlakların kalıp alt yüzüne ulaştığı görülmektedir. Lifli numunelerde İ50-F2 karışımı için ortalama toplam çatlak uzunluğu 271,9 mm, ortalama çatlak yüzey alanı ise 27,8 mm²'dir. Aynı değerler sırasıyla UK30-İ50-F2 karışımı için 39,6 mm, 2,4 mm², YFC50-İ50-F2 karışımı için 173,8 mm, 19,4 mm²'dir. Erken yaşta okunan serbest büzülme miktarları arttıkça çatlak uzunluk ve genişlikleri artmaktadır. Şekil 8.1'e göre lifsiz karışımlar arasında ikamesiz kontrol karışımı en büyük çatlak yüzey alanına (87,8 mm²) sahiptir. Lif takviyesinin çatlak yüzey alanını azaltmadaki etkinliği bu grafikte birlikte daha iyi anlaşılmaktadır. Ayrıca puzolan ikamesinin çatlak yüzey alanlarını sınırlayıcı etkisi vardır. En iyi performansı uçucu kül ikameli, lif takviyeli karışım sergilemiştir.

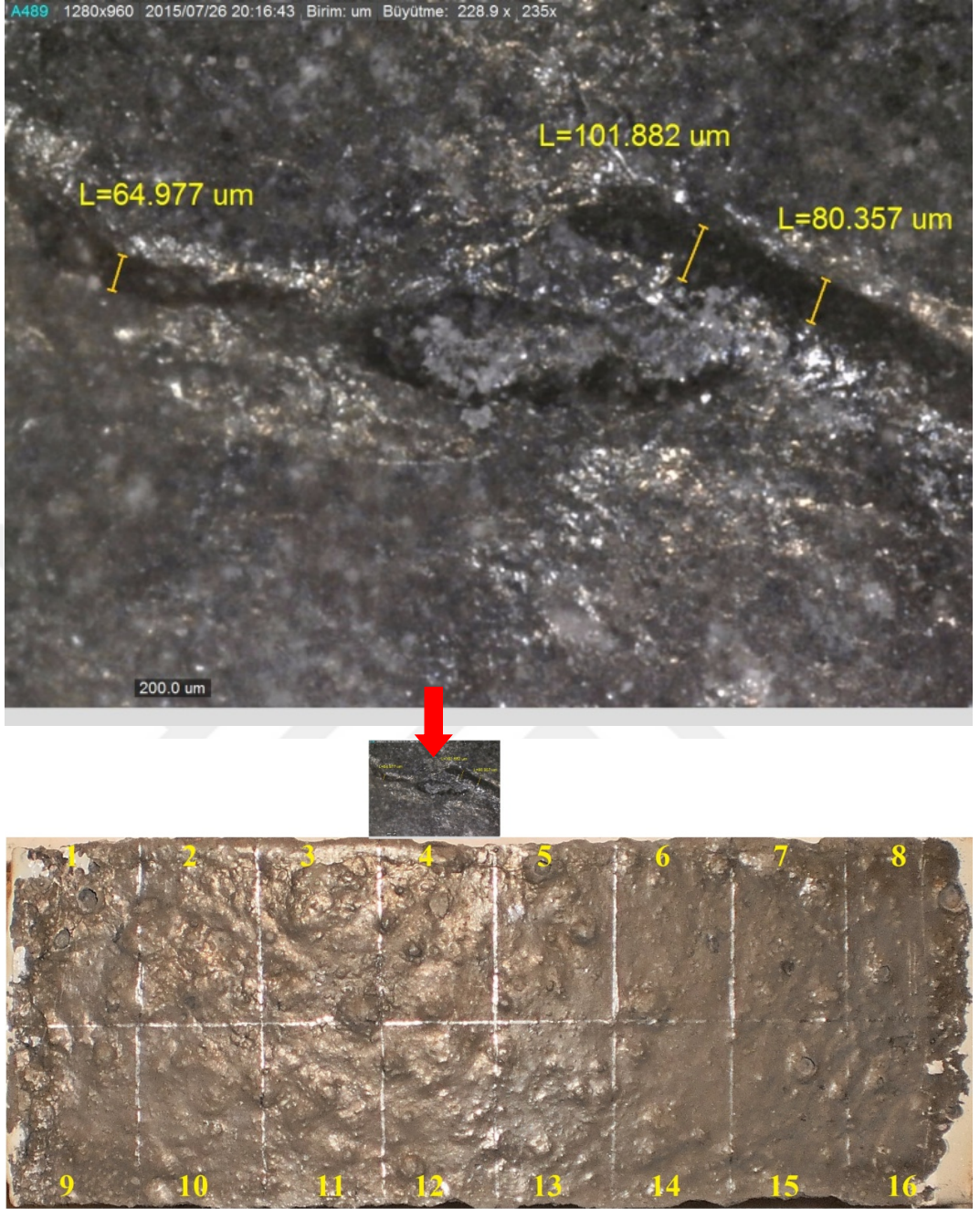


Şekil 8.1 İlk 24 saat kuruma koşulunda kısıtlı halde bekletilen serilerin çatlak yüzey alanları (mm²).

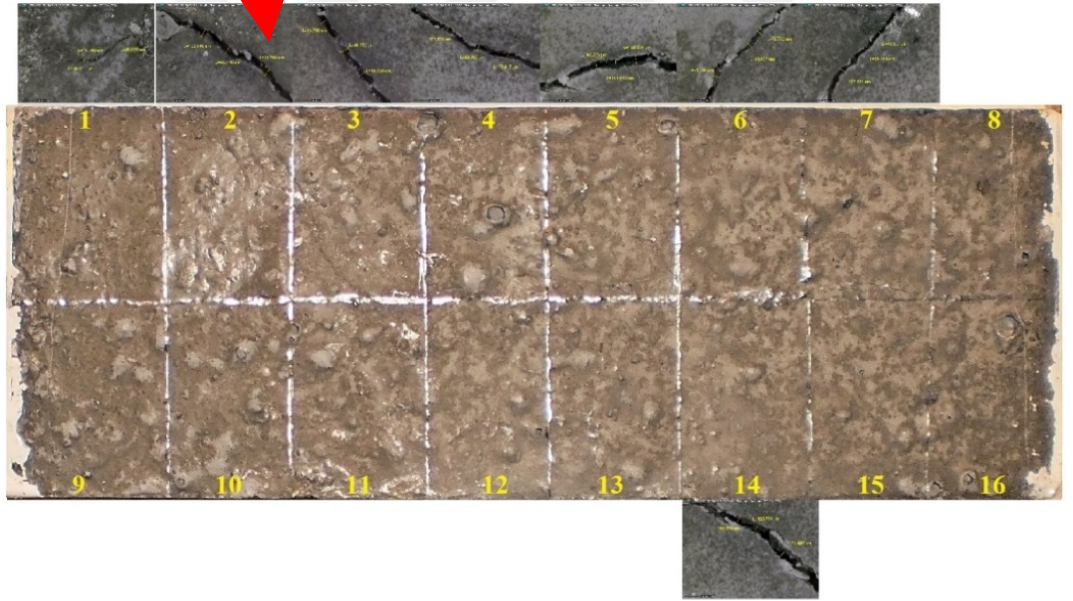
Bununla birlikte tüm yüzeyler fotoğraflanarak genel görünüm kayıt altına alınmıştır. Lifli ve lifsiz karışımların kuruma koşulunda oluşan en geniş çatlak açıklıklarının bulunduğu üst yüzeylerinin fotoğrafları Şekil 8.2, 8.3, 8.4, 8.5, 8.6, 8.7'de yer almaktadır. UK30-İ50-F2 karışımı ile hazırlanan numunelere çıplak gözle bakıldığında görülebilen nitelikte derin çatlaklara rastlanamamıştır, ancak mikroskopla görülebilen az sayıdaki kılcal çatlak ölçülmüştür. Lifsiz numunelerin kısıtlanmış koşulda çelik lifli numunelerden fazla çatladığı belirlenmiştir.



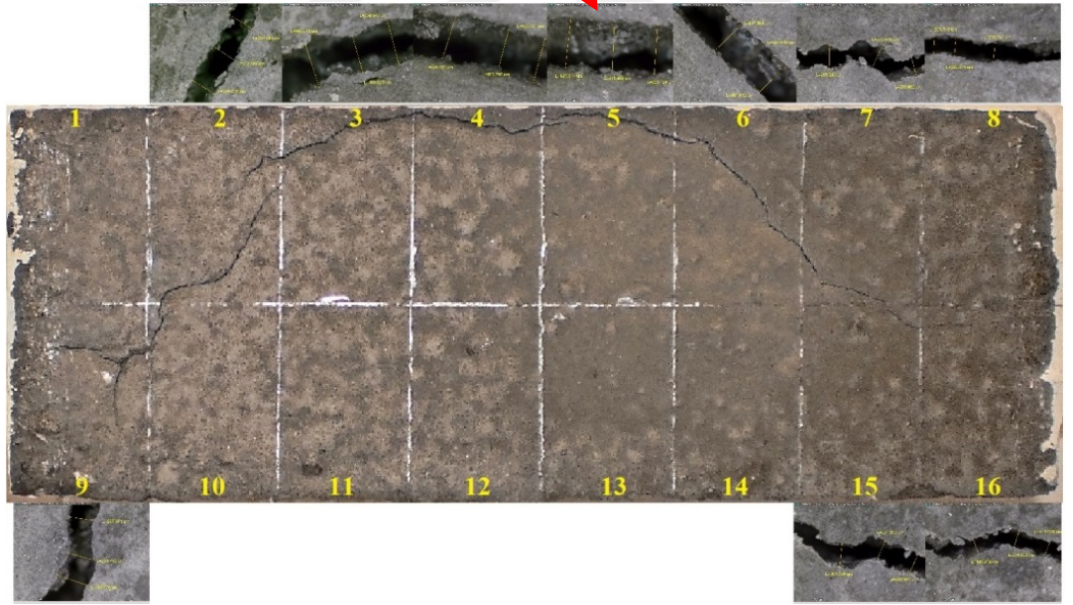
Şekil 8.2 İ50-F2 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (7. hücre).



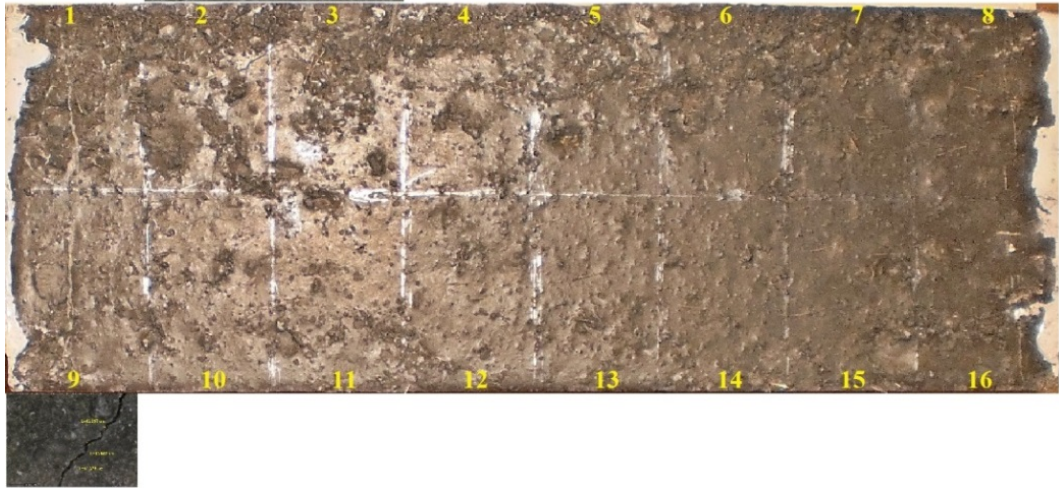
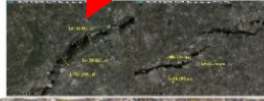
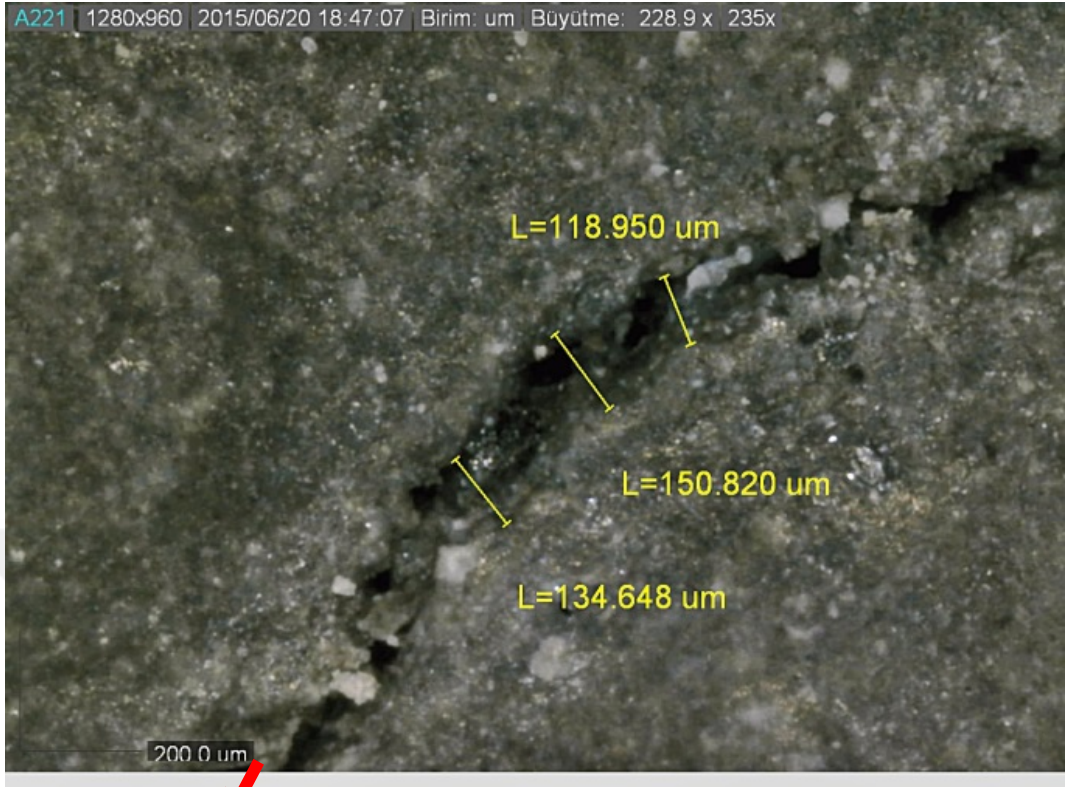
Şekil 8.3 UK30-İ50-F2 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (4. hücre).



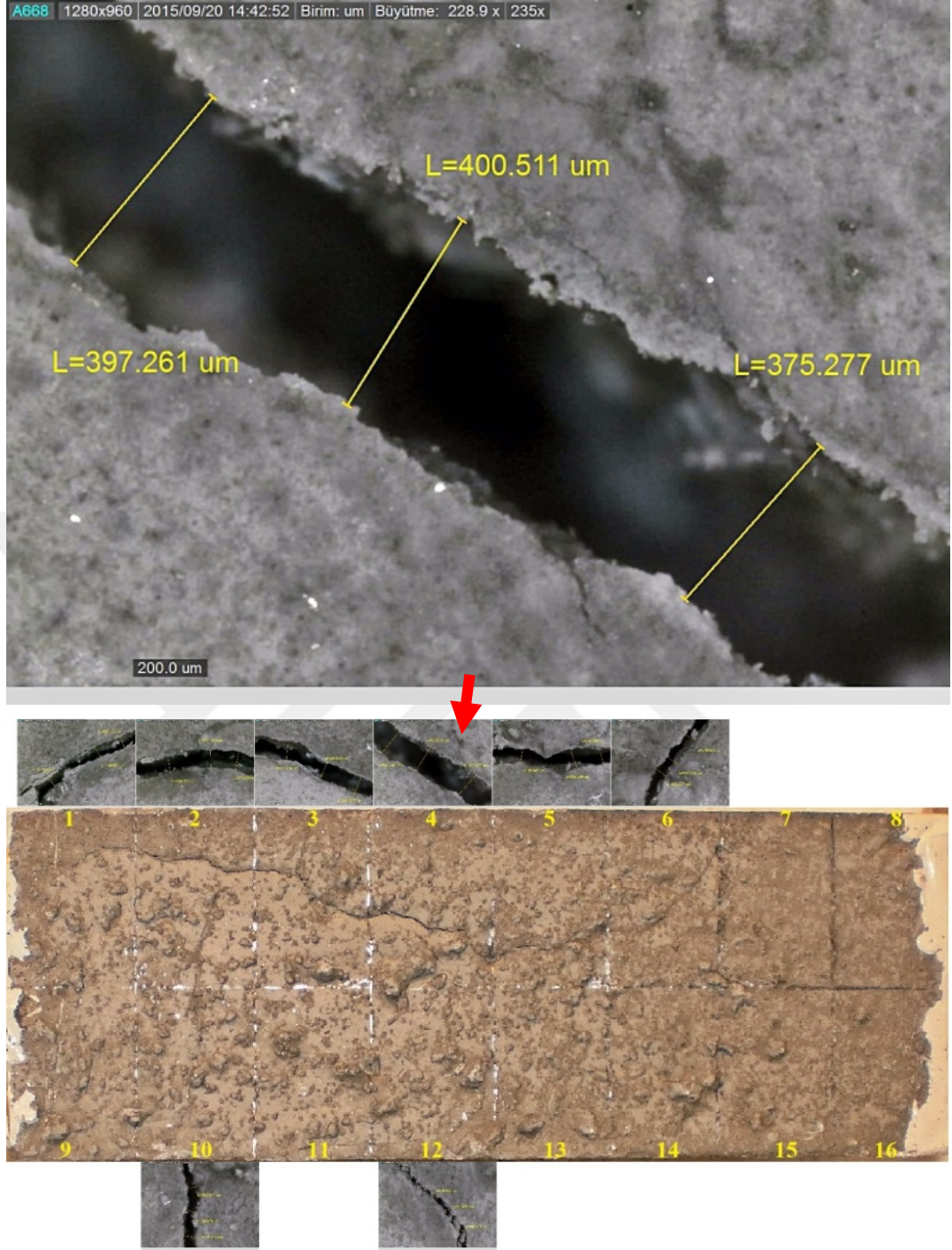
Şekil 8.4 YFC50-İ50-F2 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (2. hücre).



Şekil 8.5 İ50-F0 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (5. hücre).



Şekil 8.6 UK30-İ50-F0 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (2. hücre).

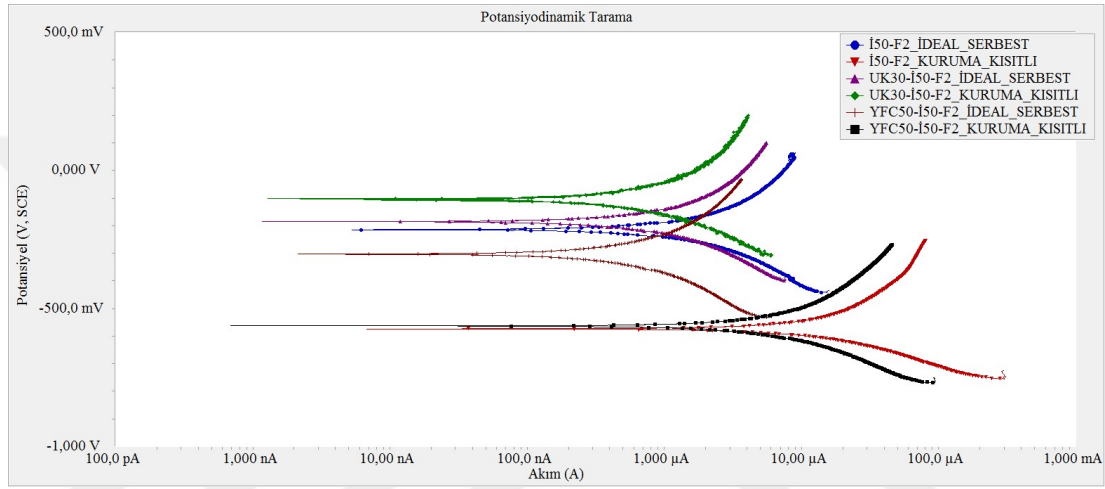


Şekil 8.7 YFC50-İ50-F0 karışımı ile hazırlanan numunenin en geniş çatlak açıklığı ve numune üzerindeki yeri (4. hücre).

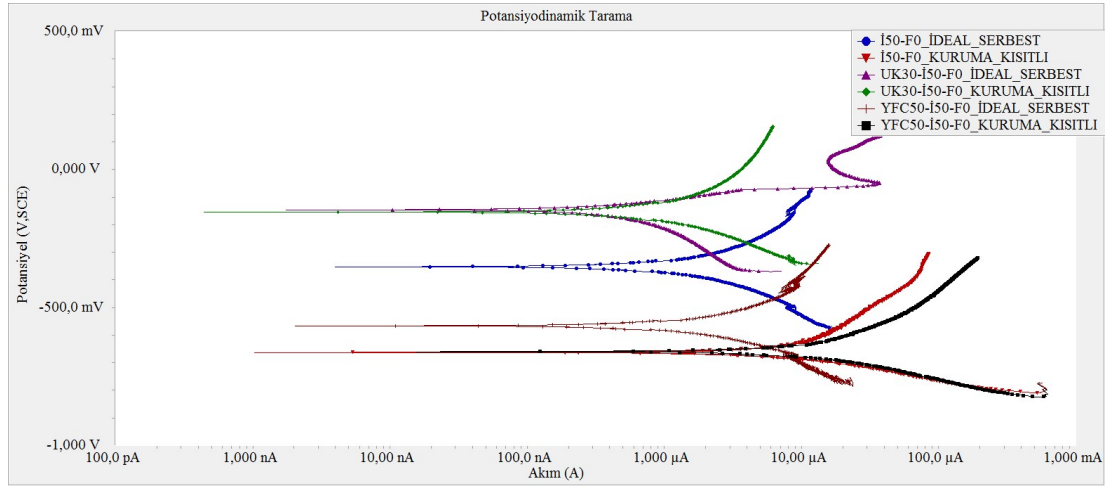
8.2 Üç Elektrotlu Sistem Verilerinin Değerlendirilmesi

Betonarme numunelerden elde edilen polarizasyon eğrileri, lifli ve lifsiz karışımlar için sırasıyla Şekil 8.8 ve 8.9'da verilmiştir. Lifsiz numunelerden elde

edilen korozyon akım yoğunluğu değerlerinde lifli numunelere kıyasla artış görülmektedir. Kuruma-kısıtlı koşulda bekletilen numunelerin ideal-serbest koşulda yer alanlardan daha fazla çatlak yüzey alanına sahip olması nedeniyle daha büyük korozyon akım yoğunluğu değeri gelişmiştir. Ayrıca, UK ikameli örneklerin toplam çatlak yüzeyi alanı diğer numunelerden çok daha az olduğundan daha düşük korozyon akım yoğunluğu değerleri elde edilmiştir. Bu durum, büzülme çatlaklarının donatı korozyonundaki kuvvetli etkisini işaret etmektedir.

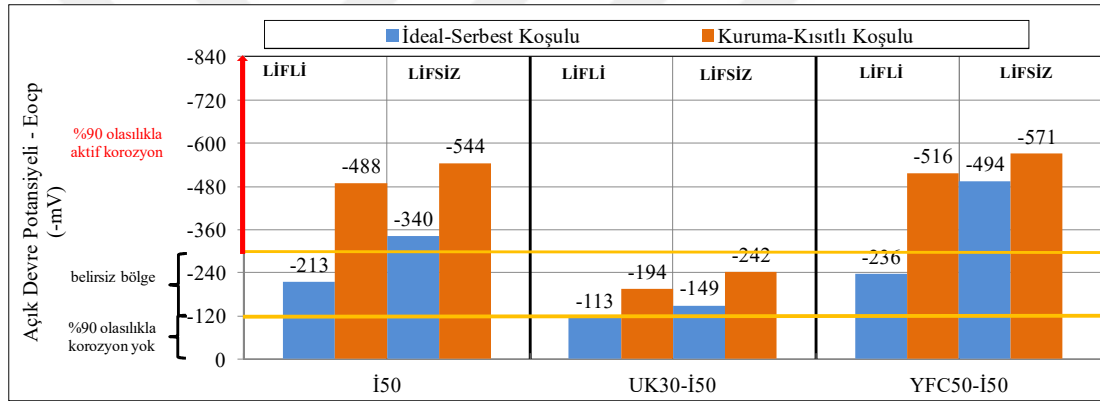


Şekil 8.8 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan lifli örneklerin potansiyodinamik tarama eğrileri.



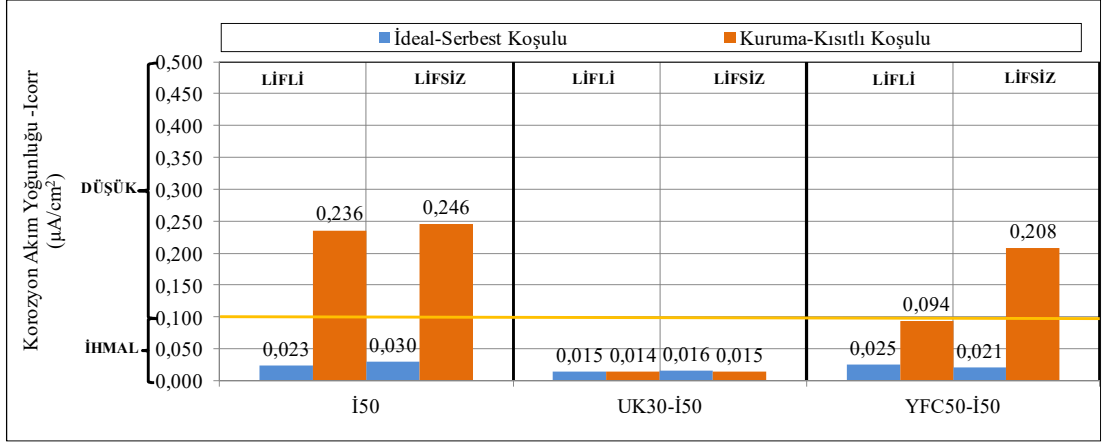
Şekil 8.9 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan liffsiz örneklerin potansiyodinamik tarama eğrileri.

Şekil 8.10'da ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal-serbest ve kuruma-kısıtlı koşullarında bekletilmiş numunelerin açık devre potansiyeli (E_{ocp}) değerleri sunulmaktadır. ASTM C876'ya göre -270mV potansiyel değeri aktif korozyon gelişimi açısından niteleyici bir sınır olarak kabul edilmektedir. Uçucu kül içeren örneklerde potansiyel değerlerine bakıldığında genel olarak bu limitin altında kaldığı söylenebilir. Açık devre potansiyeli değerleri, karışımların erken yaş büzülme miktarları ve kısıtlı halde çatlak gelişimleri ile paralellik arz etmektedir. YFC içeren lifsiz karışımlar ise -494 mV ile -571 mV değerlere sahip olmakla beraber aktif korozyon gelişimi %90'dan daha büyük olasılık taşımaktadır. Puzolan ikameli karışımlar arasında YFC ikameli karışımın erken yaş büzülmesi ve çatlak gelişimi fazla olduğundan korozyon gelişimi de UK ikameli karışıma oranla daha fazladır.



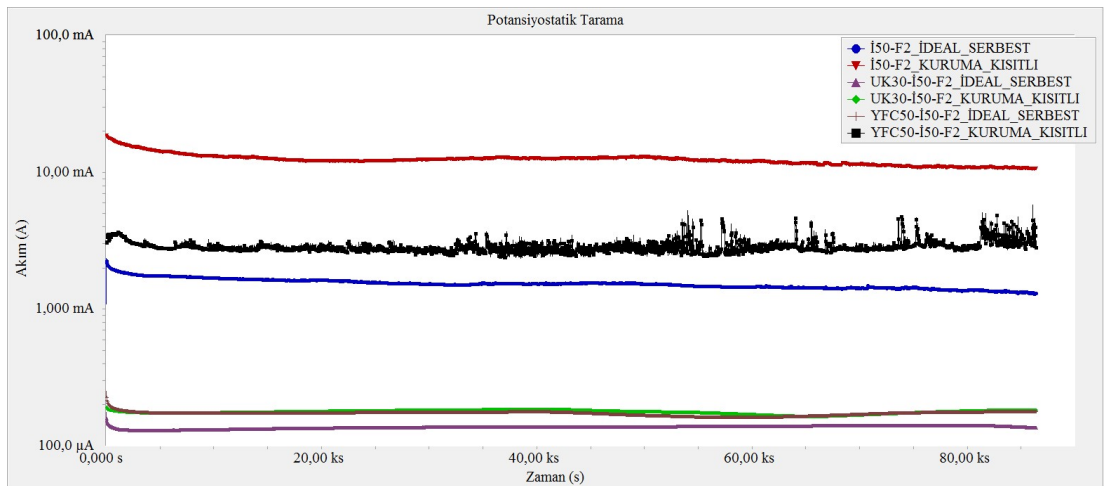
Şekil 8.10 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan örneklerin açık devre potansiyeli (E_{ocp}).

Şekil 8.11'de ilk 24 saat kalıp içerisinde ideal-serbest ve kuruma-kısıtlı koşullarında bekletilmiş numunelerin korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}) değerleri sunulmaktadır. Numunelerin 28 gün laboratuvar koşullarına tabi tutulduktan sonra yapılan korozyon deneyi sonuçları incelendiğinde, çatlak miktarı azaldıkça korozyon akım yoğunluğu da azalmaktadır. Ancak çok geçirimsiz bir malzeme olan UYPB karışımlarında 10 mm pas payı altında yapılan ölçümde gelişen çatlaklara rağmen korozyon akım yoğunlukları düşük mertebede kalmıştır. UK içeren lifli ve lifsiz karışımda ise korozyon akım yoğunluğunun çok düşük ($<0,1 \mu A/cm^2$ – ihmal edilebilir) mertebede olduğu görülmektedir.

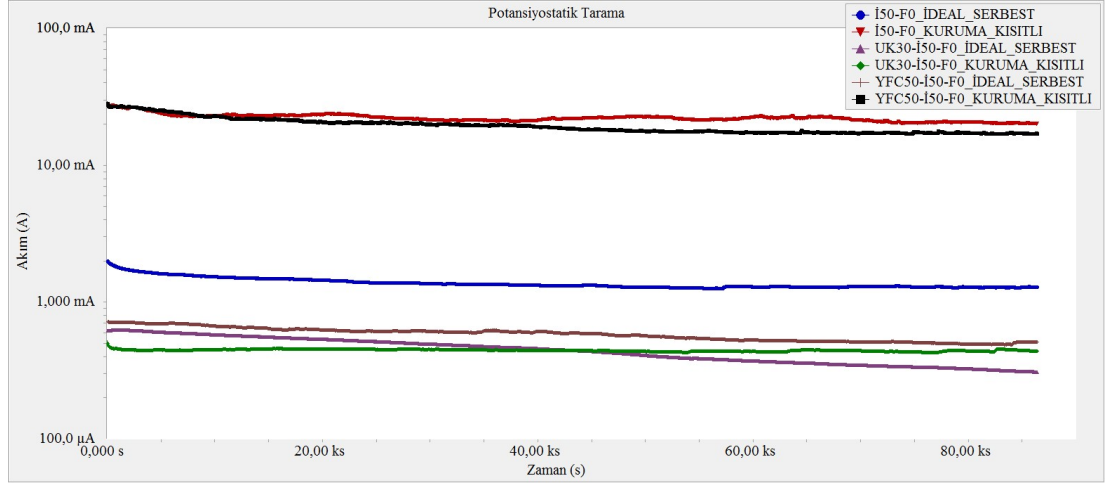


Şekil 8.11 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan örneklerin korozyon akım yoğunluğu (I_{corr}).

Hızlandırılmış korozyon deneylerinden elde edilen potansiyostatik tarama eğrileri lifli ve lifsiz numuneler için sırasıyla Şekil 8.12 ve 8.13'te logaritmik ölçekte verilmiştir. Bu yöntem hızlandırılmış/zorlanmış bir korozyon deneyi olup yöntemden elde edilen sonuçlar, potansiyodinamik eğriler ile bulunan serbest korozyon akım yoğunluğu değerleri ile paralellik göstermektedir. Eğrilerde akım değerlerinin yüksek olması daha yüksek korozyon kaybı anlamına gelmektedir. Düşük su/bağlayıcı oranına sahip UYPB karışımları ile üretilen betonarme örnekler, erken yaş koşullarında çatlarsa durabilite olumsuz etkilenmektedir. Ayrıca, çatlak açıklıklarının artışı korozyon gelişimini olumsuz yönde etkilemektedir.

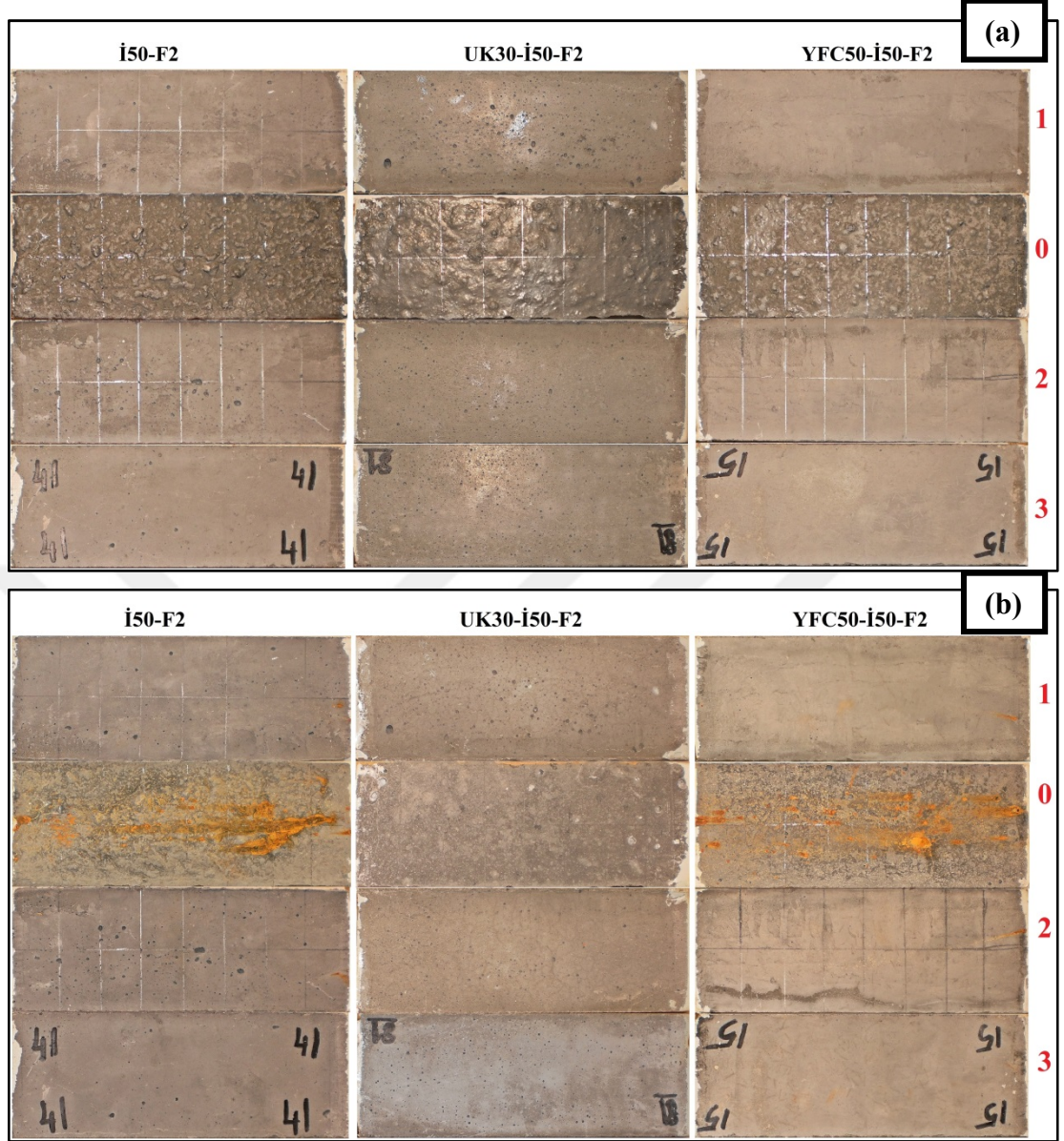


Şekil 8.12 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan lifli örneklerin potansiyostatik tarama eğrileri.



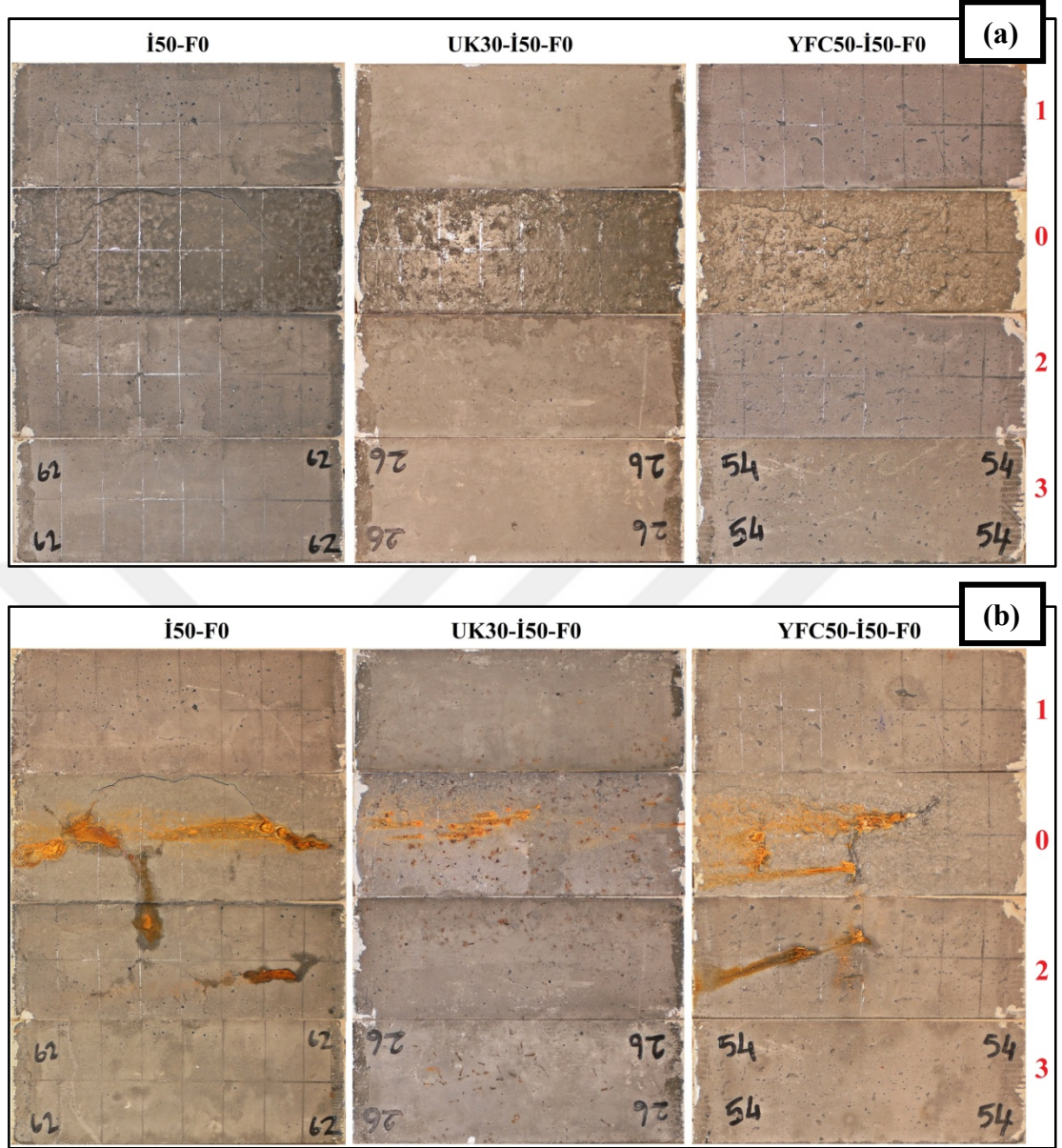
Şekil 8.13 İdeal-serbest veya kuruma-kısıtlı koşullarında tutulan lifsiz örneklerin potansiyostatik tarama eğrileri.

Şekil 8.14'te kuruma ortamında kısıtlı halde bekletilen lif takviyeli numuneler arasında en geniş çatlığa sahip olanların hızlandırılmış korozyon deneyi öncesi ve sonrası görünüşleri sunulmaktadır. Şekil 8.14'te belirtilen 0, 1, 2 ve 3 kodlamaları, Şekil 6.23'te tarif edilen prizmatik numune yüzeylerini belirtmektedir. Çatlak yüzey alanı fazla olan kontrol karışımı ve YFC ikameli karışımda korozyon ürünlerinin beton çatlaklarından yüzeye doğru sızdığı görülmektedir. UK ikameli karışımla üretilen betonarme örneklerde ise bu durum gözlenmemiştir.



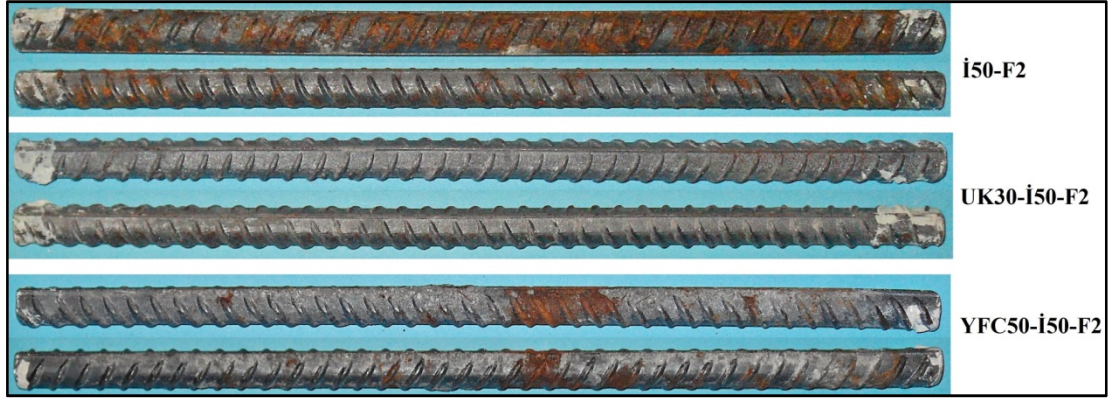
Şekil 8.14 Lifli numunelerin korozyon deneyinden önceki (a) ve sonraki (b) görünümü.

Şekil 8.15'te kuruma ortamında kısıtlı halde bekletilen lifsiz numuneler arasında en geniş çatlığa sahip olanların hızlandırılmış korozyon deneyi öncesi ve sonrası halleri sunulmaktadır. Çatlaklardan sızan korozyon ürünlerinin miktarı lifsiz numunelerde daha yüksektir. Görsel sonuç elektrokimyasal veriler ile uyumlu olup, İ50-F0 ve YFC50-İ50-F0 betonuna gömülü donatılarda daha fazla oranda korozyon geliştiği görülmektedir.

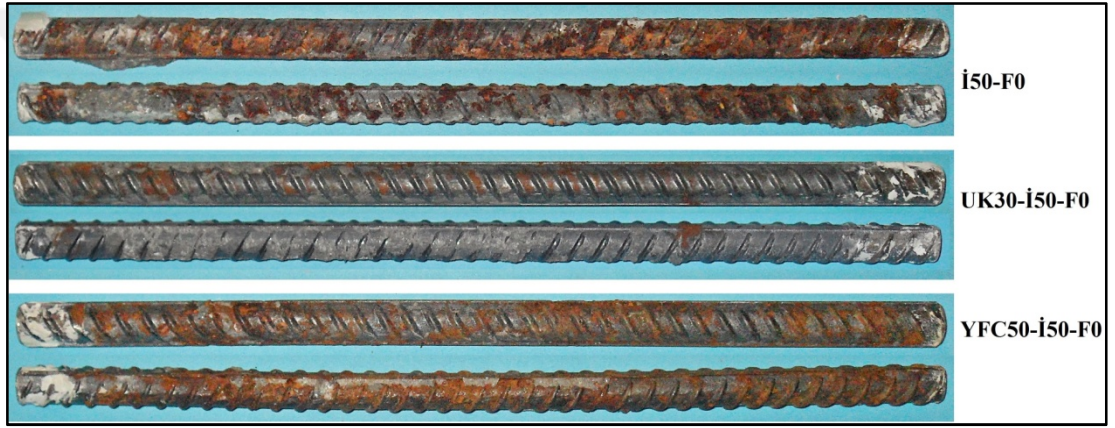


Şekil 8.15 Lifsiz numunelerin korozyon deneyinden önceki (a) ve sonraki (b) görünümü.

Hızlandırılmış korozyon deneyleri sonrasında betonarme numunelerin içinden çıkarılan donatılarda gözlemsel incelemeler yapılmıştır. Deney sonrasında kısıtlanmış lifli ve lifsiz UYPB karışımları içerisinde çıkarılan donatılar sırasıyla Şekil 8.16 ve 8.17'de yer almaktadır. Donatı yüzeyindeki korozyon ürünlerinin miktarı ile karışımların çatlak açıklıkları arasında paralellik görülmektedir. Liflerin çatlakları önlemesi ile kalıcılığa katkı sağladığı, donatıların lifsiz karışımlara gömülü olması durumunda korozyon hasarının arttığı görülmektedir. Benzer sonuçlar Qi'nin plastik büzülme çatlakları ile ilgili çalışmasında da ortaya konmuştur (Qi, 2003).

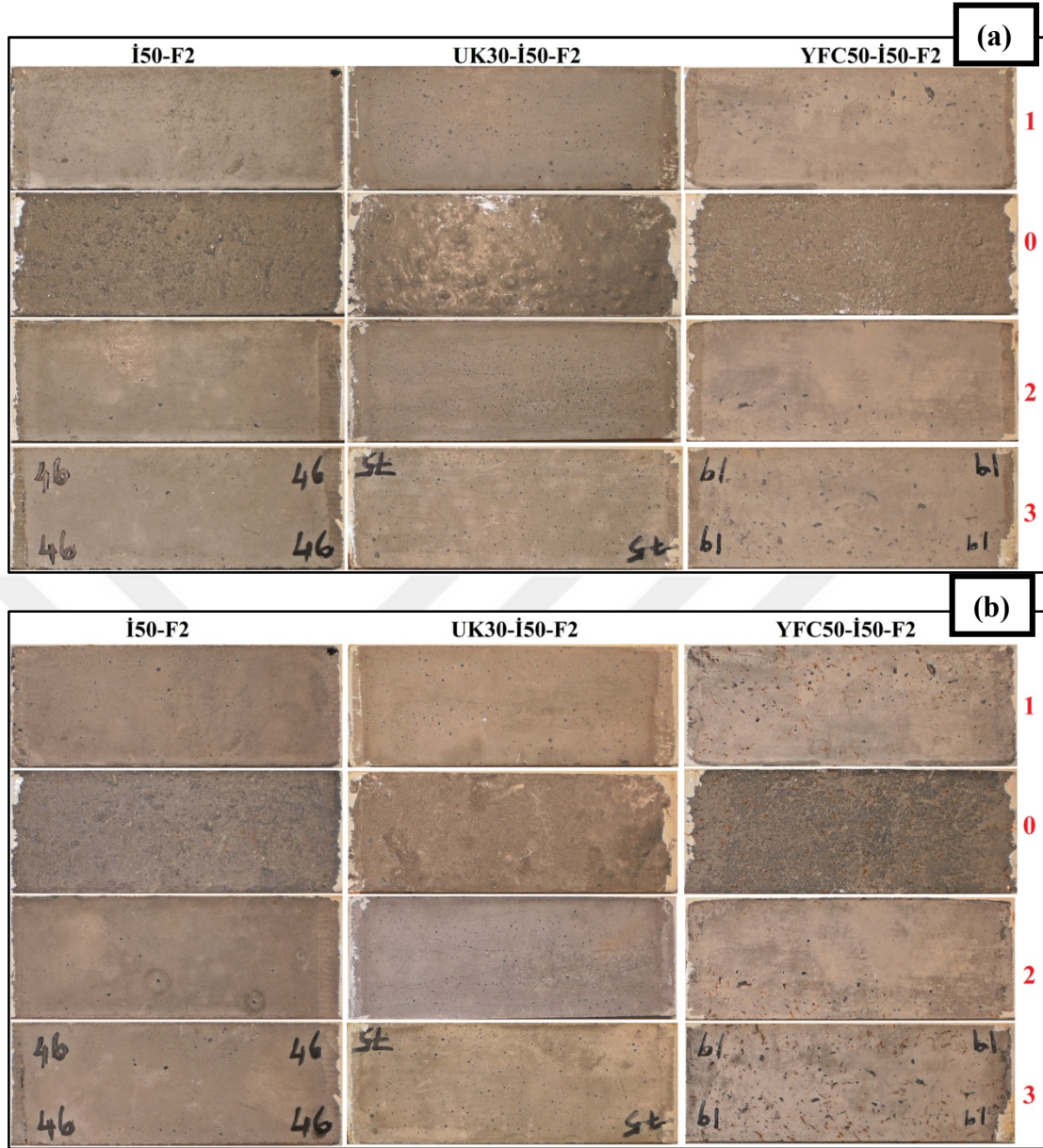


Şekil 8.16 Kuruma-kısıtlı koşuluna maruz kalan lifli örneklere gömülü donatıların korozyon deneyi sonrası yüzey görünümleri.



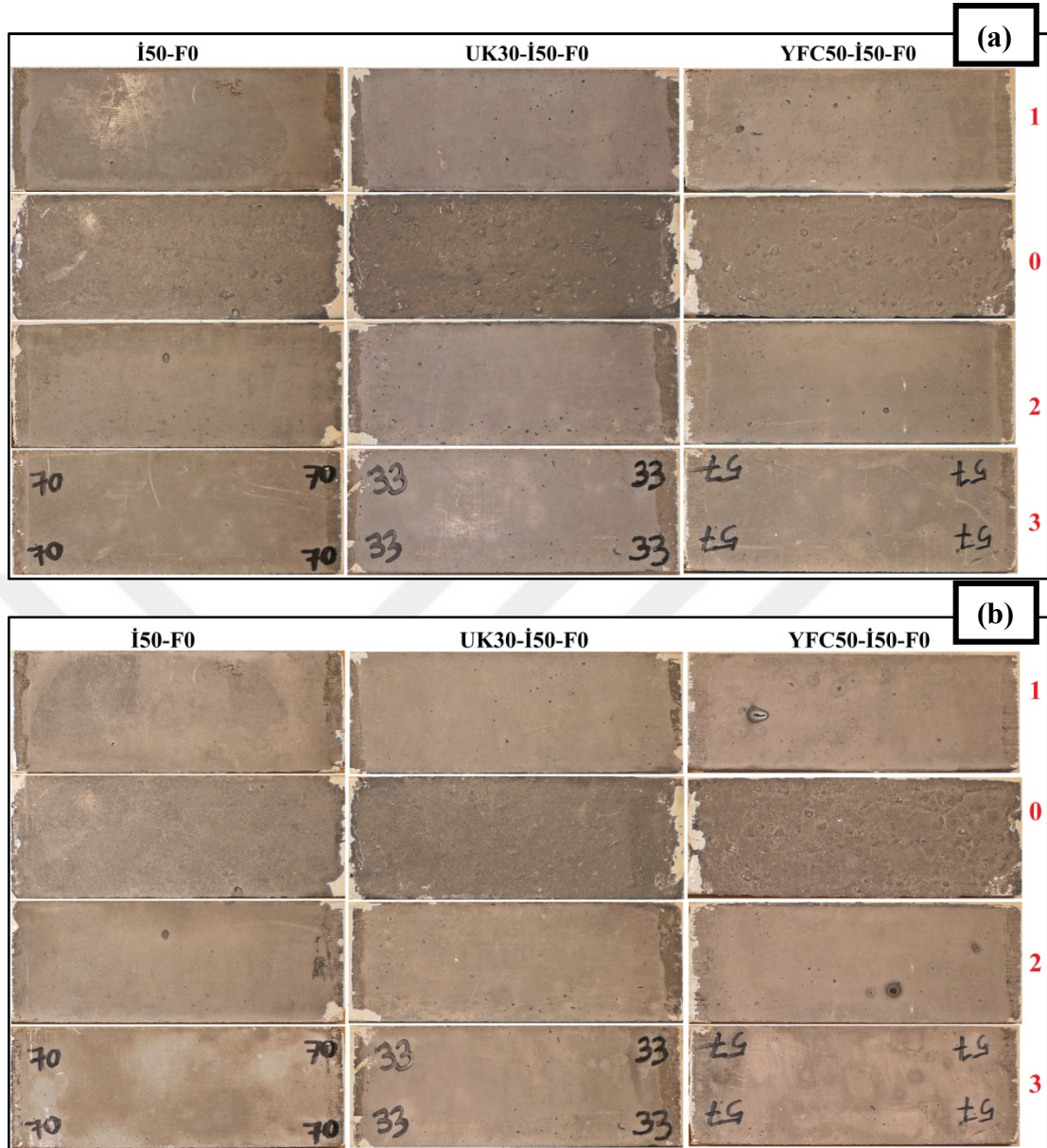
Şekil 8.17 Kuruma-kısıtlı koşuluna maruz kalan lifsiz örneklere gömülü donatıların korozyon deneyi sonrası yüzey görünümleri.

Şekil 8.18’de ideal ortamda serbest halde bekletilen lif takviyeli çatlaksız numunelerin hızlandırılmış korozyon deneyi öncesi ve sonrası halleri sunulmaktadır. Beton örneklerinde çatlak bulunmadığından ötürü korozyon ürünü gözlenmemiştir.



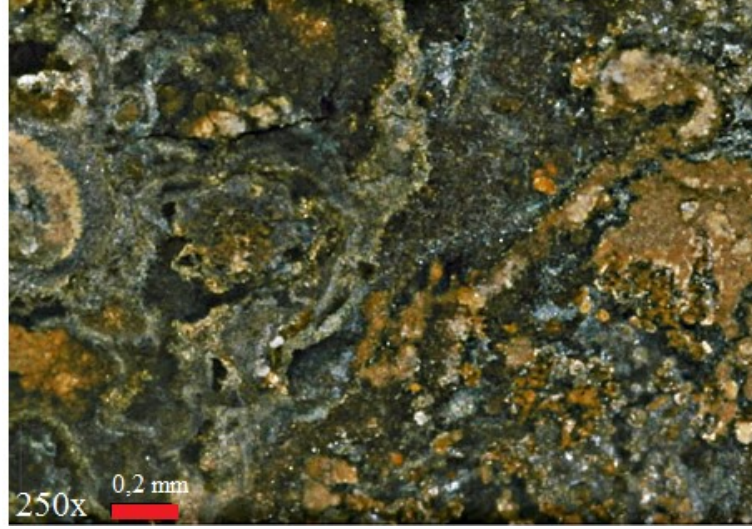
Şekil 8.18 Lifli numunelerin korozyon deneyinden önceki (a) ve sonraki (b) görünümü.

Şekil 8.19’da ideal ortamda serbest halde bekletilen lifsiz çatlaksız numunelerin hızlandırılmış korozyon deneyi öncesi ve sonrası halleri sunulmaktadır. Beton örneklerinde çatlak bulunmadığından ötürü korozyon ürünü gözlenmemiştir.



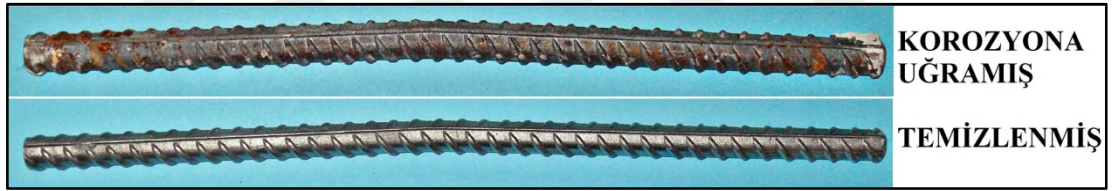
Şekil 8.19 Lifsiz numunelerin korozyon deneyinden önceki (a) ve sonraki (b) görünümü.

Donatı yüzeylerinde gözlenen korozyon ürünlerinin mikroskop altındaki tipik görünümü Şekil 8.20'de sunulmaktadır.



Şekil 8.20 Korozyon ürünlerinin mikroskop altındaki tipik görünümü.

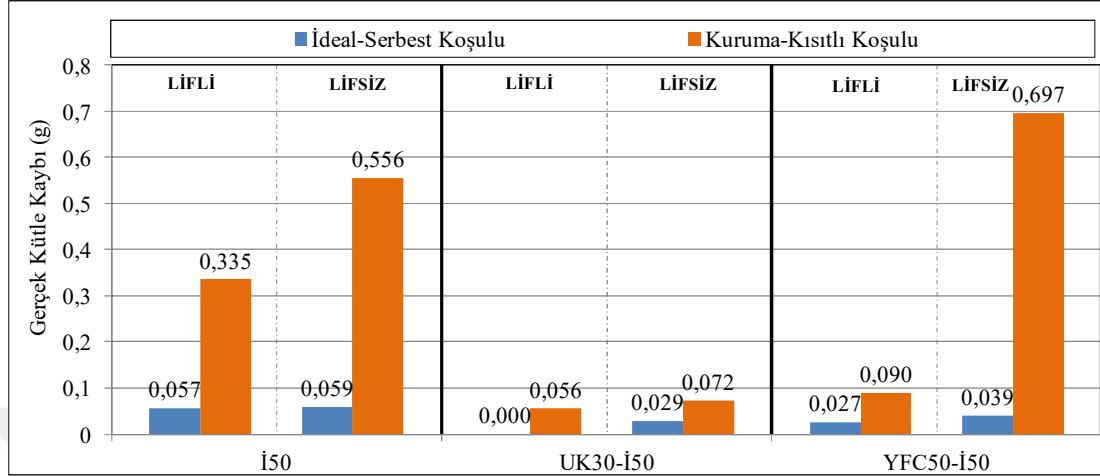
Donatıların orijinal nervür dişlerine ve tüm şekline zarar vermeden temizleme işlemi yapılmıştır. Deneylerde kullanılan bir donatının temizlik öncesi ve sonrası görünümü Şekil 8.21'de yer almaktadır.



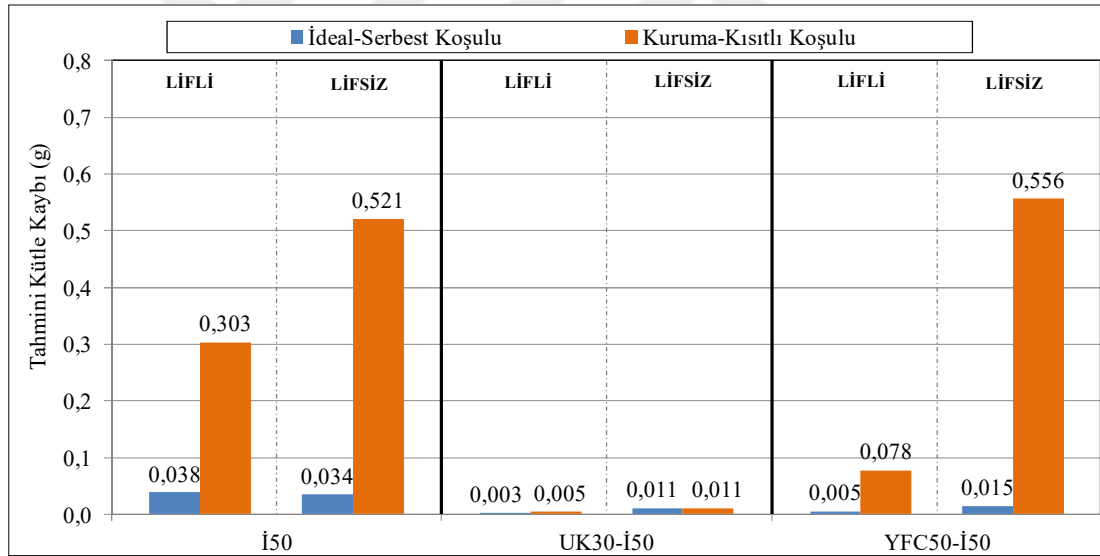
Şekil 8.21 UYPB karışımı ile hazırlanan beton örneğinden çıkarılan çelik numunenin korozyon ürünlerinden temizlenmesi öncesi ve sonrası hali.

Hızlandırılmış korozyon deneyleri sonrasında numunelerden çıkartılan çelik donatıların temizlenmesiyle elde edilen gerçek kütle kayıpları Şekil 8.22'de yer almaktadır. Potansiyostatik tarama eğrileri kullanılarak hesaplanan tahmini kütle kayıpları ise Şekil 8.23'te sunulmaktadır. Ölçülen gerçek kütle kayıpları ile potansiyostatik tarama eğrilerinden Faraday Kanunu kullanılarak hesaplanan tahmini kütle kayıpları paralellik göstermektedir. Karışım türüne bağlı olarak numunelerdeki çatlak uzunlukları ve açıklıkları azaldıkça donatıdaki kütle kaybı da azalmıştır. Diğer yandan lif kullanımı ile çatlaklı yapı azaldığından korozyon sonucu oluşan kütle kaybı azalmıştır. İdeal koşullarda bekletilen çatlamamış numunelerin donatılarındaki korozyon gelişimi ihmal edilebilir mertebededir. Bu sonuç çatlamamış UYPB'nin

geçirimsizlik özelliğini ve donatıyı koruma etkinliğini göstermektedir (Aköz ve Çakır, 2014; Otieno ve diğer., 2016).



Şekil 8.22 Donatıların gerçek kütle kayıpları.



Şekil 8.23 Donatıların potansiyostatik tarama eğrilerinden hesaplanan tahmini kütle kayıpları.

8.3 Mekanik Özellikler

İ50-F2, UK30-İ50-F2 ve YFC50-İ50-F2 karışımları ile üretilen örneklerin 28 günlük standart kür sonrası ortalama eğilme dayanımları sırasıyla 21,6, 21,9, 22,4 MPa; ortalama basınç dayanımları ise 146, 151, 157 MPa'dır. İ50-F0, UK30-İ50-F0

ve YFC50-İ50-F0 karışımları ise standart kür sonrası sırasıyla 21, 21,3 ve 21,4 MPa eğilme dayanımı ve 111, 121 ve 132 MPa basınç dayanımı sergilemiştir.



BÖLÜM DOKUZ

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Birbirini tamamlayan iki kısımdan oluşan bu çalışmada, silis dumanının her karışımda yer alması kaydıyla, farklı puzolan ikame durumlarında (ikamesiz, uçucu kül ikameli, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ikameli), erken yaşta iki farklı koşulda ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ bağıl nem ve $30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem) bekletilen lifli ultra yüksek performanslı beton (UYPB) karışımlarının kısıtlanmış büzülme çatlaklarının, $\%3,5$ konsantrasyonlu NaCl çözeltisinde ıslanma-kuruma çevrimleri sonrasında mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Erken yaşta (ilk 24 saat) büzülmeleri kısıtlanarak bekletilen, lif içeren ve içermeyen UYPB karışımlarının yüzeyinde oluşan çatlakların, beton içerisine gömülü çelik donatının korozyon gelişimine etkisi deneysel olarak belirlenmiştir.

9.1 Sonuçlar

UYPB'nin erken yaşta sergilediği bünyesel büzülme ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ bağıl nem) ve kuruma büzülmesi ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem) mertebeleri oldukça yüksektir. Kuruma büzülmelerinin kısıtlanması halinde çatlaklar oluşmaktadır. Oluşan çatlakların, düşük su/bağlayıcı oranlı oldukça geçirimsiz yapıdaki UYPB karışımlarının kalıcılık özelliğine olumsuz etkileri söz konusudur. Çalışma sonuçları kalıcılık özelliğinin korunması için erken yaş bekleme ortamının önemini ortaya koymuştur. UYPB karışımlarına erken yaşta sağlanacak elverişli bir kür ortamının çatlakları önlemedeki önemi büyüktür.

Numunelerin çatlama durumları göz önüne alındığında dayanım kayıpları düşük düzeydedir. Erken yaşta kuruma ortamı sebebiyle büzülme çatlaklarına sahip olan karışımların IK (ıslanma-kuruma) çevrimleri sonucu basınç dayanımı kaybı, ideal koşullarda saklananlardan daha fazladır. Kayıplar 500 IK çevrimi ile belirginleşmektedir. Basınç dayanımı noktasında IK ortamının kür etkisi yapabildiği, dayanımı arttırabildiği görülmüştür.

Kısıtlanmış büzülme çatlaklarının eğilme yükleri altında UYPB'nin tokluğunu önemli oranda düşürdüğü, düşüşün diğer mekanik özelliklerden daha belirgin olduğu görülmüştür.

Numune yüzeylerinde kalan lifler çevrimlerin erken safhalarından itibaren yoğun korozyona uğramaktadır. Korozyon sonucu yüzey bölgesinde bozulmalar, pullanmalar ve liflerin kaybolması durumlarıyla karşılaşılmıştır. 500 IK sonucu numune derinliklerinde ise lif korozyonu oluşmamıştır. Bu durum UYPB karışımlarının geçirimsizlik özelliğinin sonucudur.

IK ortamında büzülme kaynaklı çatlaklar daralabilmektedir. Bu sebeple erken yaş koşullarının hasar mekanizmasına olan etkisi azalmaktadır. Daralan çatlaklar sebebiyle ideal koşulda kür edilmiş karışımlara benzer mekanik hasarlar söz konusudur. Ayrıca liflerin sadece dış yüzeyde korozyona uğraması erken yaş koşullarının etkisini azaltmaktadır.

Uçucu kül veya yüksek fırın cürufu kullanım oranı arttıķa karbonatlaşma derinliği değerleri de artış göstermiştir. En büyük artış miktarı yüksek fırın cürufu ikameli karışımda görülmektedir.

İlk 24 saat ideal koşulda ($20\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%98\pm 2$ bağıl nem) 24 saat boyunca bekletilen örnekler, iklimlendirme kabininde kuruma koşulunda ($30\pm 1^{\circ}\text{C}$, $\%50\pm 2$ bağıl nem) 24 saat boyunca kurumaya maruz kalan örneklerden her durumda daha iyi performans sergilemiştir. Erken yaşta UYPB karışımlarına uygulanacak kr yönteminin çatlak sayısını ve açıklıklarını sınırlamada önemi büyüktür. elik lif takviyesi ile serbest büzülme miktarları belirgin oranda azaltılamazken, kısıtlı durumda oluşan çatlakların yüzey alanı önemli oranda azaltılabilmektedir. Ayrıca UK (uçucu kül) ikamesinin çatlak yüzey alanlarını sınırlamada etkili olduğu belirlenmiştir. UK ikamesi ve lif takviyesi beraber uygulandığında büzülme çatlakları etkili bir biçimde azaltılabilmektedir.

Korozyon deney sonuçları, büzülme kaynaklı çatlak gelişimi ile paralellik göstermektedir. YFC (yüksek fırın cürufu) ikamesi sonucu erken yaşta büzülme ve çatlak gelişimi arttığından korozyon gelişimi de artmıştır. 10 mm'lik pas payı tabakasındaki çatlaklara rağmen korozyon akım yoğunlukları düşük mertebede kalmıştır. UK ikamesi durumunda korozyon akım yoğunlukları ihmal edilebilir mertebelere düşmüştür.

Hızlandırılmış korozyon deneyleri sonrasında ölçülen gerçek kütle kaybı ile hesaplanan tahmini kütle kaybı paralel sonuçlar vermiştir. Korozyon hızı yüksek numunelerde oluşan korozyon ürünlerinin büzülme çatlaklarından dışarı doğru sızdığı gözlenmiştir. Daha fazla büzülme çatlağı içeren numunelerde donatı yüzeyindeki korozyon ürünlerinin yoğunluğu da fazladır. Erken yaşta, ideal koşullarda kür edilen numunelerde büzülme çatlakları oluşmadığından ötürü donatılarda korozyon gelişmemiştir.

9.2 Öneriler

UYPB türü kompozitlerin deniz ortamı gibi klorür içeren bir bölgede kullanımında pas payı tabakası bırakılarak yüzeydeki liflerin korunması gerekmektedir. Kalıp yüzeylerinin kalitesi ve pürüzsüzlüğünün artırılmasıyla matris dışına ulaşan liflerin sayısı azaltılmış, koruma tabakası artırılmış olacaktır.

Farklı türde lifler kullanılarak, farklı pas payı tabakası kalınlıklarında üretilecek olan UYPB'nin performansı araştırılabilir.

Islanma-kuruma çevrimlerinin sayısı artırılarak (>1000 devir) mekanik ve durabilite özelliklerinin araştırılmasında fayda vardır.

Donatı korozyonu çalışmasında ıslanma-kuruma çevrimleri yapılabilir.

Geleneksel betona kıyasla daha geçirimsiz bir malzeme olan UYPB'den beklenen, donatıyı korozyona karşı koruma etkinliği, büzülme çatlaklarının engellenmesi ile daha da artırılabilir.

KAYNAKLAR

- Adeline, R., Lachemi, M. ve Blais, P. (1998). Design and behaviour of the Sherbrooke Footbridge. *International Symposium on High-performance and Reactive Powder Concretes*, 89-97, Canada.
- Aitcin, P.C. (1999). Autogenous shrinkage of concrete. *International Workshop on Autogenous Shrinkage of Concrete*, 257-268, Hiroshima.
- Akçay, B. ve Taşdemir, M. A. (2006). Influence of lightweight aggregates on internal curing and fracture of concrete. *International RILEM Conference On Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, 31-40. Lyngby, Denmark.
- Akçay, B. ve Taşdemir, M. A. (2008). Optimisation of using lightweight aggregates in mitigating autogenous deformation of concrete. *Construction and Building Materials*, 23 (1), 353-363.
- Akkaya, Y., Ouyang, C. ve Shah, S. P. (2007). Effect of supplementary cementitious materials on shrinkage and crack development in concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29 (2), 117-123.
- Aköz, F. ve Çakır, Ö. (2014). Betonarme Korozyonu. *Hazır Beton*, Temmuz-Ağustos, 70-85.
- Andrade, C. ve Alonso, C. (1996). Corrosion rate monitoring in the laboratory and on-site. *Construction and Building Materials*, 10 (5), 315-328.
- Andrade, C. ve Alonso, M.C. (2004). Values of corrosion rate of steel in concrete to predict service life of concrete structures, In Gustavo Cragnolino, Narasi Sridhar (Eds). *ASTM Symposium on Application of Accelerated Corrosion Tests to*

Service Life Prediction of Materials, 282-295. American Society for Testing and Materials. PA.

Apicella, F. (b.t.). *Crack-Free Repair Materials ... Are We There Yet?*. 20 Temmuz 2016, <http://www.mnconcretecouncil.com/ftpgetfile.php?id=155>

Arslan, G., Taflan, K.S., Haberveren, S. ve Taşdemir, M.A. (2008). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin tasarımı, mekanik davranışı ve uygulama alanları, 20 Temmuz 2016, <http://www.ekutuphane.imo.org.tr/pdf/3147.pdf>

ASTM C311/C311M-13 (2013). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02. American Society for Testing and Materials. PA. <http://compass.astm.org>

ASTM C876-09 (2009). *Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete*. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02. American Society for Testing and Materials. PA. <http://compass.astm.org>

ASTM C1581/C1581M- 09a (2009). *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM C1698-09. (2014). *Standard test method for autogenous strain of cement paste and mortar*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

ASTM G1-03 (2011). *Standard practice for preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens*. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02. American Society for Testing and Materials. PA. <http://compass.astm.org>

ASTM G5-14 (2014). *Standard reference test method for making potentiodynamic anodic polarization measurements*. Annual Book of ASTM Standards. Volume

03.02. American Society for Testing and Materials. PA.
<http://compass.astm.org>

ASTM G15-04 (2004). *Standard terminology relating to corrosion and corrosion testing*. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02. American Society for Testing and Materials. PA. <http://compass.astm.org>

ASTM G109-07 (2013). *Standard test method for determining the effects of chemical admixtures on corrosion of embedded steel reinforcement in concrete exposed to chloride environments*. Annual Book of ASTM Standards. Volume 03.02. American Society for Testing and Materials. PA.
<http://compass.astm.org>

Banthia, N. ve Gupta, R. (2009). Plastic shrinkage cracking in cementitious repairs and overlays. *Materials and Structures*, 42 (5), 567-579.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Aydın, S. (2012). *Beton* (1. Baskı). İzmir: D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. (2002). *Betonarme yapılarda kalıcılık (Durabilite)* (1. Baskı). İzmir: D.E.Ü. Mühendislik Fakültesi Yayınları.

Barcelo, L., Moranville, M. ve Clavaud, B. (2005). Autogenous shrinkage of concrete: A balance between autogenous swelling and self-desiccation. *Cement and Concrete Research*, 35(1), 177-183.

Barnett, M. N., Soutsos, S. G., Millard, J. H. ve Bungey, S. J. (2006). Strength development of mortars containing ground granulated blast-furnace slag: Effect of curing temperature and determination of apparent activation energies. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 434-440.

- Bayramov, F., Taşdemir, C. ve Taşdemir, M.A., (2004). Optimisation of steel fibre reinforced concrete by means of statistical response surface method. *Cement and Concrete Composites*, 26, 665-675.
- Berrocal, C. G., Löfgren, I., Lundgren, K. ve Tang, L. (2015). Corrosion initiation in cracked fibre reinforced concrete: Influence of crack width, fibre type and loading conditions. *Corrosion Science*, 98, 128-139.
- Berrocal, C. G., Lundgren, K. ve Löfgren, I. (2016). Corrosion of steel bars embedded in fibre reinforced concrete under chloride attack: State of the art. *Cement and Concrete Research*, 80, 69-85.
- Broomfield, J.P. (2003). *Corrosion of steel in Concrete-understanding, investigation and repair*. Taylor & Francis e-Library.
- Cavill, B. ve Chirgwin G. (2003). The world's first RPC road bridge at Shepherds Gully Creek, NSW. *21st Biennial Conference of Concrete Institute of Australia*, 89- 98. Brisbane, Australia.
- Chindaprasirt, P., Homwuttiwong, S. ve Sirivivatnanon, V. (2004). Influence of fly ash fineness on strength, drying shrinkage and sulfate resistance of blended cement mortar. *Cement and Concrete Research*, 34 (7), 1087-1092.
- Choi, Y., Kim, J. ve Lee, K. (2006). Corrosion behavior of steel bar embedded in fly ash concrete. *Corrosion Science*, 48, 1733-1745.
- Colleparidi, M., Borsoi, A., Colleparidi, S., Olagot, J. J. O. ve Tiroli, R. (2005). Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non- wet curing conditions. *Cement and Concrete Composites*, 27 (6), 704- 708.

- Craeye, B. ve Schutter, G. (2006). Experimental evaluation of mitigation of autogenous shrinkage by means of a vertical dilatometer for concrete. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing And Mitigation*, 21- 30. Lyngby, Denmark.
- Cusson, D. ve Hoogeveen T. (2007). An experimental approach for the analysis of early-age behaviour of high-performance concrete structures under restrained shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 37 (2), 200-209.
- Çil, İ. (2006). Betonarme donatısında elektriksel yöntemlerle korozyon ölçümü. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 8 (1), 59-63.
- Çorbacioğlu, C. U. (2008). *Beton karışım tasarımının geçirimsizliğe ve mekanik özelliklere etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Erdoğan, Ş. ve Kurbetçi, Ş. (2003). Betonun performansına sağladıkları etkinlik açısından kimyasal ve mineral katkı maddeleri. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426 (4), 115-120.
- Esping, O. (2007). *Early-age properties of self-compacting concrete -Effects of fine aggregate and limestone filler*. Doktora Tezi, Chalmers Teknoloji Üniversitesi, Gothenburg.
- Fehling, D. ve Thiemicke, J. (2012). Structural Behaviour. M. Schmidt, E. Fehling, C. Glotzbach, S. Fröhlich ve S.Piotrowski, (Ed.), *Ultra-high performance concrete and nanotechnology in construction* (1st ed.) (477-484). Kassel: Kassel University Press.
- Feylessoufi, A. (1996). Water environment and nanostructural network in a reactive powder concrete. *Cement and Concrete Composites*, 18 (1), 23-29.

- Güvensoy, G., Bayramov, F., Ilki A., Sengül C., Tasdemir M.A., Kocatürk A.N.ve diğer. (2004). Mechanical behavior of high performance steel fiber reinforced cementitious composites under cyclic loading condition. *International Symposium on Ultra-High Performance Concrete, Kassel*, 649-660.
- Fritz, C. (1991). Tensile Testing of SIFCON. *In First International Workshop on HPFRCCs*, Mainz, RILEM, Eds. H.W.Reinhardt and A.E. Naaman, 518-528.
- Gesoğlu, M., Özturan, T. ve Güneyisi, E. (2004). Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates. *Cement Concrete Research*, 34 (7), 1121-1130.
- Grassl, P., Wong, H. S. ve Buenfeld, N. R. (2010). Influence of aggregate size and volume fraction on shrinkage induced micro-cracking of concrete and mortar. *Cement and Concrete Research*, 40 (1), 85-93.
- Graybeal, B. (2006). *Material property characterization of ultra-high performance concrete*. 4 Ağustos 2015,
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/structures/06103>.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M. ve Özbay, E. (2010). Strength and drying shrinkage properties of self- compacting concretes incorporating multi-system blended mineral admixtures. *Construction and Building Materials*, 24 (10), 1878-1887.
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Mohamadameen, A., Alzebaree, R., Algın, Z. ve Mermerdaş, K. (2014). Enhancement of shrinkage behavior of lightweight aggregate concretes by shrinkage reducing admixture and fiber reinforcement. *Construction and Building Materials*, 54, 91-98.
- Hajar, Z., Simon, A., Lecointre, D. ve Petitjean, J. (2003). Construction of the first road bridges made of ultra-high-performance concrete. *2003 International Symposium on High Performance Concrete*, 1-18. Orlando.

He, Z., Li, Z. J., Chen, M. Z. ve Liang, W. Q. (2006). Properties of shrinkage reducing admixture-modified pastes and mortar. *Materials and Structures*, 39 (4), 445-453.

Holt, E. ve Leivo, M. (2004). Cracking risks associated with early age shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 26 (5), 521-530.

Holt, E. (2005). Contribution of mixture design to chemical and autogenous shrinkage of concrete at early ages. *Cement and Concrete Research*, 35 (3), 464-472.

Japan Society of Civil Engineers (JSCE) (2008). *Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC)*. Tokyo: JSCE Concrete Library.

Kaval, M. (b.t.). *Yapılarda hasar tespiti - I, 6. bölüm beton özellikleri ve betonda hasar sebepleri*. 5 Eylül 2016,
<http://www2.aku.edu.tr/~mkaval/dersler/YHT1/6zelikleri.pdf>

Khalaf, F. M. ve Wilson, J.G. (1999). Electrical properties of freshly mixed concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 11, 242-248.

Keith, F. R., Bentley, C. L., Walker, W. W. ve Holland, J. A. (2006). Shrinkage-compensating concrete pavements perform well. *Concrete International*, 28 (1), 47-51.

Kobayashi, K., Ahn, D. L. ve Rokugo, K. (2016). Effects of crack properties and water – cement ratio on the chloride proofing performance of cracked SHCC suffering from chloride attack. *Cement and Concrete Composites*, 69, 18-27.

Korozyon (b.t). 29 Nisan 2016, http://mim.bilecik.edu.tr/Dosya/Arsiv/deney_foyleri/Korozyon%20deney.pdf

- Lee, K. M., Lee, H. K., Lee, S. H. ve Kim, G. Y. (2006). Autogenous shrinkage of concrete containing granulated blast-furnace slag. *Cement and Concrete Research*, 36 (7), 1279-1285.
- Lu, C., Yuan, S., Cheng, P. ve Liu, R. (2016). Mechanical properties of corroded steel bars in pre-cracked concrete suffering from chloride attack. *Construction and Building Materials*, 123, 649-660.
- Lura, P., Mazzotta G. B., Rajabipour, F. ve Weiss, J. (2006). Evaporation, settlement, temperature evolution, and development of plastic shrinkage cracks in mortars with shrinkage-reducing admixtures. K. Kovler (Ed.), *ConcreteLife'06 - International RILEM-JCI Seminar on Concrete Durability and Service Life Planning: Curing, Crack Control, Performance in Harsh Environments*. (1) (203-213). Ein-Bokek: RILEM Publications SARL.
- Ma, J., Orgass, M., Dehn, F., Schmidt, D. ve Tue, N. V. (2004). Comparative investigations on ultra-high performance concrete with and without coarse aggregates. *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, 205-212. Kassel, Germany.
- Matte, V. ve Moranville, M. (1999). Durability of reactive powder composites: Influence of silica fume on the leaching properties of very low water/binder pastes. *Cement and Concrete Composites*, 21 (1), 1-9.
- Min, K. H., Jung, H. C., Yang, J. M. ve Yoon, Y. S. (2010). Shrinkage characteristics of high-strength concrete for large underground space structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 25 (2), 108-113.
- Mindes, S., Young J. F. ve Darwin D. (2002). *Concrete* (2. baskı). Prentice Hall.
- Mokarem, D. W., Weyers, R. E. ve Lane, D. S. (2005). Development of a shrinkage performance specifications and prediction model analysis for

- supplemental cementitious material concrete mixtures. *Cement and Concrete Research*, 35 (5), 918-925.
- Mounanga, P., Khelidj, A., Loukili, A. ve Baroghel-Bouny, V. (2004). Predicting Ca(OH)₂ content and chemical shrinkage of hydrating cement pastes using analytical approach. *Cement and Concrete Research*, 34, 255-265.
- Mönnig, S. ve Reinhardt, H. W. (2006). Results of a comparative study of the shrinkage behavior of concrete and mortar mixtures with different internal water sources. *International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation*, 67-75. Lyngby, Denmark.
- Nawa, T. ve Horita, T. (2004). Autogenous shrinkage of high-performance concrete. *International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures*, 1-10. Sapporo, Japan.
- Neville A.M. (1995). *Properties of concrete*. Longman Scientific and Technical, NewYork.
- Otieno, M., Beushausen H. ve Alexander, M. (2016). Resistivity-based chloride induced corrosion rate prediction models and hypothetical framework for interpretation of resistivity measurements in cracked RC structures. *Materials and Structures*, 49, 2349-2366.
- Otieno, M., Beushausen H. ve Alexander, M. (2016). Chloride-induced corrosion of steel in cracked concrete – Part I: Experimental studies under accelerated and natural marine environments. *Cement and Concrete Research*, 79, 373-385.
- Pease, B. J. (2005). *The role of shrinkage reducing admixtures on shrinkage, stress development and cracking*. Yüksek Lisans Tezi, Purdue Üniversitesi, Indiana.

- Pradhan, B. (2014). Corrosion behavior of steel reinforcement in concrete exposed to composite chloride-sulfate environment. *Construction and Building Materials*, 72, 398-410.
- Qi, C. (2003). *Quantitative assessment of plastic shrinkage cracking and its impact on the corrosion of steel reinforcement*. Doktora Tezi, Purdue Üniversitesi, Indiana.
- Qiao, D., Nakamura, H., Yamamoto, Y. ve Miura, T. (2016). Crack patterns of concrete with a single rebar subjected to non-uniform and localized corrosion. *Construction and Building Materials*, 116, 366-377.
- Richard, P. ve Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*, 25 (7), 1501-1511.
- SETRA-AFGC. (2002). *Ultra high performance fibre-reinforced concretes, interim recommendations*. Paris: Association Française de Génie Civil.
- Schwartzentruber, A., Philippe, M. ve Marchese, G. (2004). Effect of PVA, glass and metallic fibers, and of an expansive admixture on the cracking tendency of ultrahigh strength mortar. *Cement and Concrete Composites*, 26 (5), 573-580.
- Soliman, A. M. (2011). *Early-age shrinkage of ultra high-performance concrete: mitigation and compensating mechanisms*. Doktora Tezi, Western Ontario Üniversitesi.
- Soliman, A. M. ve Nehdi, M. L. (2011). Effect of drying conditions on autogenous shrinkage in ultra-high performance concrete at early-age. *Material and Structures*, 44, 879-899.

- Subaşı, S., Beycioğlu, A. ve Çomak, B. (2011). Puzolan Katkısının Betonun Karbonatlaşma Derinliğine Etkisi. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 24, 117-128.
- Taşdemir, M. A., Taşdemir, C., Grimm, R. ve König, G. (2002). Role of aggregate fraction in the fracture of semi-lightweight high strength concrete. *Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, 1453-1466, Leipzig.
- Taşdemir, M.A., Bayramov, F. ve Yerlikaya, F.M. (2003). Geleneksel ve yüksek performanslı çelik donatılı betonlar. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, Sayı 426.
- Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F. (2002). Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı. *İTÜ Dergisi/d Mühendislik*, 1 (2), 125- 144.
- Taşdemir, M.A., Özkul, M.H. ve Atahan, H.N. (1999). Türkiye'deki son depremler ve beton. *II. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu*, İMO, Adana, 9- 19.
- Topçu, İ.B. ve Karakurt, C., (2005/3). Reaktif pudra betonları. *TMH - Türkiye Mühendislik Haberleri*, 437.
- TS-EN 206-1 (2002). *Beton - Bölüm 1: Özellik, performans, imalat ve uygunluk*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğınobalı, A. (2009). *Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri*. TÇMB / AR-GE / Y03.03., 20 Temmuz 2016, <http://www.ekatalog.co/yayinlar/tcmb/ekatalog/06/files/publication.pdf>
- Wang, H.-L., Dai, J.-G., Sun, X.-Y. ve Zhang, X.-L. (2016). Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration. *Construction and Building Materials*, 107, 216-225.

- Wetzel, A., Glotzbach, C., Maryamh, K. ve Middendorf, B. (2015). Microstructural investigations on the skinning of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 57, 27-33.
- Wong, A. C. L., Childs, P. A., Berndt, R., Macken, T., Peng, G. D. ve Gowripalan, N. (2007). Simultaneous measurement of shrinkage and temperature of reactive powder concrete at early-age using fibre Bragg grating sensors. *Cement and Concrete Composites*, 29 (6), 490-497.
- Yalçın, H. ve Koç, T. (1999). *Katodik Koruma*. Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayını.
- Yalçinkaya, Ç. (2015). *Yüksek performanslı çimentolu kompozitlerin erken ve ilerlemiş yaşlarda boyutsal stabilitesinin araştırılması*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- Yalçinkaya, Ç., Beglarigale, A. ve Yazıcı, H. (2013). Akışkanlaştırıcı dozajının ve ortam sıcaklığının ultra yüksek performanslı betonun erken yaş otojen deformasyonuna ve mukavemet gelişimine etkisi. *Yapılarda Kimyasal Katkılar 4. Sempozyum ve Sergisi, Bildiriler Kitabı* içinde (33-46). Ankara.
- Yazıcı, H. ve Yalçinkaya, Ç. (2014). *Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin boyutsal kararlılığının incelenmesi ve boyutsal kararlılığın durabilite özelliklerine etkisinin araştırılması*. Tübitak Proje No: 110M691
- Yazıcıoğlu, S., Demirel, B., Gönen, T. ve Özer, Ş. (2012). Farklı Tip Çimentoların Betonun Karbonatlaşmasına Etkisi. *SDU International Technologic Science*, 4(3), 112-120.
- Yiğiter H. (2008). *Betonarme donatısında klorid korozyonu gelişiminin elektrokimyasal yöntemlerle belirlenmesi*. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.

- Yoo, D. Y., Kim, J., Zi, G. ve Yoon, Y. S. (2015). Effect of shrinkage-reducing admixture on biaxial flexural behavior of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 89, 67-75.
- Yüzer, N. (1998). *Silis dumanı katkılı betonarme elemanlara klorür etkisinin hızlandırılmış korozyon deneyi ile araştırılması*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Yüzer, N. (2003). Betonarme yapılarda korozyon ölçüm yöntemleri ve hasar tespiti. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 426, 134-138.
- Zemajtis, J. (1998). *Modeling the time to corrosion initiation for concretes with mineral admixtures and/or corrosion inhibitors in chloride-laden environments*. Doktora Tezi, Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia.
- Zhutovsky, S., Kovler, K. ve Bentur, A. (2004). Influence of cement paste matrix properties on the autogenous curing of high-performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26 (5), 499-507.