



T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME ÖZELLİĞİNİN BELİRLENMESİ

AHMAD FARHAD RAJABI

Eylül, 2021

T.C.
NİĞDE ÖMER HALİSDEMİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI
KOMPOZİTLERİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME ÖZELLİĞİNİN BELİRLENMESİ

Ahmad Farhad RAJABI

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Hasan Erhan YÜCEL

Eylül 2021

Ahmad Farhad RAJABI tarafından **Doç. Dr. Hasan Erhan YÜCEL** danışmanlığında hazırlanan “**Sentetik Vollastonit İçeren Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin Kendiliğinden İyileşme Özelliğinin Belirlenmesi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Hasan Erhan YÜCEL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Prof. Dr. Kubilay AKÇAÖZOĞLU, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Talha EKMEKYAPAR, Gaziantep Üniversitesi, Mühendislik
Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

ONAY:

Bu tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca belirlenmiş olan yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../20.... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulu’nun/...../20.... tarih ve sayılı kararıyla kabul edilmiştir.

...../...../20.....

Prof. Dr. Murat BARUT
MÜDÜR

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin bilimsel ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Ahmad Farhad RAJABI



ÖZET

SENTETİK VOLLASTONİT İÇEREN TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN KENDİLİĞİNDEN İYİLEŞME ÖZELLİĞİNİN BELİRLENMESİ

RAJABI, Farhad

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman : Doç. Dr. Hasan Erhan YÜCEL

Eylül 2021, 75 sayfa

Bu tez çalışmasında sentetik vollastonitin (SV) tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin (ECC) kendiliğinden iyileşme özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, laboratuvar ortamında geliştirilen 44:1 boy:çap oranlı SV minerali ECC içerisinde çimento (Ç)+uçucu kül (UK) yerine kullanılmıştır. Daha önce yapılan çalışmalarda, Ç+UK yerine %6 SV kullanıldığında ECC'nin "taşıma gücü ve deformasyon kapasitesinin" önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, bu karışımda PVA lif içeriği azaltılarak standart ECC ile benzer "taşıma gücü ve deformasyon kapasitesi" sergileyen karışımın %1.6 PVA lif içeriğiyle tasarlanabileceği belirlenmiştir. Bu nedenle, bu çalışmada standart ECC ile birlikte üç farklı karışımın kendiliğinden iyileşme performansı araştırılmıştır. ECC karışımlarında ön yükleme sonucunda oluşturulan çatlakların su kuru ile iyileşmesi sağlanmış olup çatlak genişliklerindeki değişim haftalık olarak izlenmiştir. Ayrıca, hasarlı ve hasarsız ECC numunelerinin 28., 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerdeki performansları yarmada çekme, ultrasonik titreşim hızı, hızlı klor geçirimsizliği ve kılcal su geçirimsizliği deneyleri ile tespit edilmiştir. Kendiliğinden iyileşme performansı en yüksek olan karışımın, %2 PVA ve %6 SV içeren karışım olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: ECC, kendiliğinden iyileşme, PVA lifi, sentetik vollastonit

SUMMARY

DETERMINATION OF SELF-HEALING PROPERTY OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES INCORPORATING SYNTHETIC WOLLASTONITE

RAJABI, Ahmad Farhad

Nigde Omer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hasan Erhan YÜCEL

September 2021, 75 sayfa

In this thesis, the effect of synthetic wollastonite (SW) on the self-healing properties of engineered cementitious composites (ECC) has been investigated. For this purpose, SW mineral with aspect ratio of 44:1 developed in the laboratory has been used instead of cement (C)+fly ash (FA) in ECC. In previous studies, when 6% SW was used instead of C+FA, it was determined that the “bearing strength and deformation capacity” of ECC increased significantly. In addition, it was determined that by reducing the PVA fiber content in this mixture, the mixture exhibited similar “bearing strength and deformation capacity” with the standard ECC, can be designed with 1.6% PVA fiber content. Therefore, in this study, the self-healing performance of three different mixtures with standard ECC has been investigated. The cracks formed as a result of preloading in ECC mixtures were healed by water curing, and the change in crack widths was monitored weekly. Moreover, the performances of 28., 28+28., 28+56., 28+90. and 28+120. days of the damaged and undamaged ECC samples days have been determined by splitting tensile strength, ultrasonic pulse velocity, rapid chloride permeability and water sorptivity tests. It was determined that the mixture with the highest self-healing performance was the mixture containing 2% PVA and 6% SV.

Keywords: ECC, self-healing, PVA fiber, synthetic wollastonite

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, yüksek boy:çap (44:1) oranıyla özel bir yöntemle geliştirilen sentetik vollastonitin ECC'nin kendiliğinden iyileşme performansı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sentetik vollastonitin ECC'nin kendiliğinden iyileşme performansını önemli ölçüde geliştirdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, Ç+UK yerine %6 oranında sentetik vollastonit kullanıldığında, ECC içerisinde %20 oranında PVA lif tasarrufu sağlanabileceği belirlenmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan çok kıymetli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hasan Erhan YÜCEL'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam esnasında yardımlarını, bilgilerini, deneyimlerini ve tecrübelerini esirgemeyen çok kıymetli diğer hocamlarım Sayın Arş. Gör. Muhammet GÜNEŞ'e ve Sayın Arş. Gör. Metehan BULUT'a ayrıca teşekkür etmek istiyorum.

Bu çalışmada Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumunun (TÜBİTAK) MAG-217M182 no'lu ve Sentetik Vollastonitin Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerde Lif Donatı Olarak Uygulaması adlı projede geliştirilen karışımlar kullanılmıştır. Bu nedenle Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumuna (TÜBİTAK) sağladığı mali yardımlardan dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAFLAR DİZİNİ	xii
SİMGE VE KISALTMALAR	xiii
BÖLÜM I GİRİŞ.....	1
BÖLÜM II LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC).....	4
2.1.1 ECC'nin tasarlanması	4
2.1.2 ECC'nin uygulama çalışmaları	7
2.1.3 ECC'nin mekanik özellikleri.....	8
2.1.3.1 Basınç dayanımı özellikleri	8
2.1.3.2 Eğilme performansı özellikleri	9
2.1.4 ECC'nin durabilite özellikleri	10
2.1.4.1 Donma çözülme direnci	10
2.1.4.2 Uzun süreli şekil değiştirme kapasitesi	10
2.1.4.3 Aşırı sıcak ve soğuk iklim koşulları.....	11
2.1.4.4 Hızlı klor geçirimsizliği.....	11
2.1.4.5 Alkali silika reaksiyonu	12
2.2 ECC'nin Kendiliğinden İyileşmesi	12
2.2.1 ECC'nin kendiliğinden iyileşme teknikleri	13
2.2.1.1 Otojen iyileşme.....	13
2.2.1.2 Mikrokapsülasyon	15
2.2.1.3 İçi boş lifler	16
2.2.1.4 Bakteri ile kendiliğinden iyileşme	16
2.2.1.5 Mineral katkıları ve ajanlar	18

2.2.2 ECC'nin kendiliğinden iyileşme performansı ile ilgili çalışmalar	18
2.2.2.1 Su geçirimsizliği	18
2.2.2.2 Difüzyon	19
2.2.2.3 Su emme	20
2.2.2.4 Mekanik özellikler	20
2.3 Vollaştonit	21
2.3.1 Vollaştonitin tanımı ve özellikleri	21
2.3.2 Doğal ve sentetik vollaştonit	23
2.3.2.1 Doğal vollaştonit	23
2.3.2.2 Sentetik vollaştonit	24
2.3.3 Vollaştonit mineralinin kullanım alanları	24
2.3.3.1 Seramik sanayi	24
2.3.3.2 Plastik sanayi	25
2.3.3.3 Boya ve kaplama uygulamaları	26
2.3.3.4 Metalurjik uygulamalar	26
2.3.3.5 Diğer uygulamalar	27
2.4 Vollaştonitin Çimento Esaslı Kompozitlerde Kullanımı	27
BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMA	30
3.1 Sentetik Vollaştonit Üretimi	30
3.2 Üretilen SV'nin XRD, SEM ve XRF Analizleri	30
Şekil 3.1. Doğal vollaştonit SV'nin XRD pik değişimleri	30
3.3 ECC Karışımlarında Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	32
3.4 ECC Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü	34
3.5 ECC Karışımlarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi	36
3.5.1 Basınç dayanımı	36
3.5.2 Eğilme performansı	37
3.6 ECC Karışımlarının Kendiliğinden İyileşme Özelliğinin Belirlenmesi	38
3.6.1 Yarmada çekme dayanımı	39
3.6.2 Hızlı klor geçirimsizliği	40
3.6.3 Kılcal su geçirimsizliği	41
3.6.4 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi	42
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA	43
4.1 Basınç Dayanımı	43
4.2 Eğilme Performansı	43

4.3 ECC Karışımlarının Kendiliğinden İyileşme Performansı	45
4.3.1 Yarmada çekme dayanımı	45
4.3.2 Hızlı klor geçirimsizliği ve ultrasonik titreşim hızı	46
4.3.3 Kılcal su geçirimsizliği ve ultrasonik titreşim hızı	52
4.3.4 Kendiliğinden iyileşme performansının görsellerle irdelenmesi	55
BÖLÜM V SONUÇLAR.....	63
KAYNAKLAR.....	64
ÖZ GEÇMİŞ	75



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. SV'nin ve farklı ülkelerdeki vollastonitlerin kimyasal bileşenleri	31
Çizelge 3.2 Çimento, uçucu kül ve SV kimyasal ve fiziksel özellikleri.....	33
Çizelge 3.3. PVA liflerinin mekanik ve geometrik özellikleri	33
Çizelge 3.4. ECC karışım oranları (kg/m ³).....	35
Çizelge 3.5. Hızlı klor geçirimsizliği deneyi sınır değerleri (Coulombs).....	41
Çizelge 4.1. ECC karışımlarının basınç dayanımları (MPa)	43
Çizelge 4.2. ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim değerleri...	45
Çizelge 4.3. Hasarlı ve hasarsız kendiliğinden iyileşen ECC karışımlarının yarmada çekme dayanımları (MPa).....	46
Çizelge 4.4. Hızlı klor geçirimsizliği testine maruz bırakılan numunelerin ön yükleme miktarı (kN) ve çatlak genişlikleri (µm)	47
Çizelge 4.5. Hasarsız ECC karışımlarının hızlı klor geçirimsizliği değerleri (Coulombs)	49
Çizelge 4.6. Hasarlı ECC karışımlarının hızlı klor geçirimsizliği değerleri (Coulombs).	51
Çizelge 4.7. Hasarsız ECC karışımlarının UTH değerleri (m/sn)	51
Çizelge 4.8. Hasarlı ECC karışımlarının UTH değerleri	51
Çizelge 4.9. Kılcal su geçirimsizliği testine maruz bırakılan numunelerin ön yükleme miktarı (kN) ve çatlak genişlikleri (µm)	52
Çizelge 4.10. Hasarsız ECC karışımlarının kılcal su geçirimsizliği değerleri (mm/dak ^{0,5})	53
Çizelge 4.11. Hasarlı ECC karışımlarının kılcal su geçirimsizliği değerleri (mm/dak ^{0,5})	54
Çizelge 4.12. Hasarlı ECC karışımlarının UTH değerleri	54
Çizelge 4.13. %60 ve %70 ön yükleme yapılan ECC'lerin çatlak değişimleri (µm)	55
Çizelge 4.14. %70 ve %80 ön yükleme yapılan ECC'lerin çatlak değişimleri (µm)	59

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Çatlak açıklığına karşı çatlak köprüleme gerilme ilişkisi.....	5
Şekil 2.2. ECC'nin basınç dayanımı gelişimi (a) ve basınç testine maruz bırakılan ECC numunesi (b).....	8
Şekil 2.3. ECC'nin eğilme altındaki yer değiştirme eğrisi (a), Büyük yer değiştirmeye uğramış ECC numunesi (b) ve ECC kirişindeki çoklu mikro çatlaklar (c).....	9
Şekil 2.4. Mikrokapsülasyon yöntemiyle iyileştirme tekniği kapsülün SEM görüntüsü	15
Şekil 2.5. İçi boş liflerin kendiliğinden iyileşme amacıyla kullanılması; İyileştirme ajanı içeren cam tüp (a) ve cam tüpün kırılması ve iyileştirici ajanların çatlakları doldurması (b)	16
Şekil 2.6. Bakteri ile kendiliğinden iyileşme mekanizması (a) Çatlağın bakteriye maruz kalması, (b) Çatlağa suyun dolmasıyla bakterilerin çoğalması, (c) Bakterilerin iyileşme ürünleri oluşturması	17
Şekil 2.7. Vollastonit kristali	22
Şekil 2.8. Vollastonit minerali	23
Şekil 3.2. ECC karışımlarını oluşturan malzemelerin tane boyutu dağılımları	33
Şekil 3.3. Dört noktalı eğilme-çekme testi için deney düzeneği.....	37
Şekil 3.4. Vakum cihazı (a), hızlı klor geçirimsizliği test cihazı (b), hızlı klor geçirimsizliği test düzeneği (c)	40
Şekil 4.1. ECC karışımlarının tipik eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim eğrileri .	45

FOTOĞRAFLAR DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Kendiliğinden iyileşme öncesi (solda) ve sonrası (sağda)	19
Fotoğraf 3.1. Doğal kaynaklardan elde edilen SV'nin SEM görüntüsü (a) ve maksimum boy:çap oranının belirlenmesi (b).....	31
Fotoğraf 3.2 Çimento (a) ve UK'nin SEM görüntüleri (b).....	34
Fotoğraf 3.3 ECC karışımlarında kullanılan PVA lifi	34
Fotoğraf 3.4. ECC üretim aşaması.....	35
Fotoğraf 3.5. Üretimden sonra ECC numunelerinin kür edilmesi	36
Fotoğraf 3.6. Basınç dayanımı test cihazı ve basınç dayanımının belirlenmesi	36
Fotoğraf 3.7. Üniversal test sistemi ve ECC'nin dört noktalı eğilmede çekme testi sırasındaki davranışı	38
Fotoğraf 3.8. LEICA EZ4W cihazı.....	39
Fotoğraf 3.9. Etüvde kurutulmuş numuneler (a), silikonlanmış numuneler (b) ve kılcal su geçirimsizliği testi (c)	41
Fotoğraf 3.10. ECC karışımlarının UTH ölçümü	42
Fotoğraf 4.1. SV%0_2.0PVA karışımının 66,4 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 90 günlük iyileşme süreci	56
Fotoğraf 4.2. SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 69,7 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 63 günlük iyileşme süreci.....	57
Fotoğraf 4.3. SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının 66,4 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 90 günlük iyileşme süreci.....	58
Fotoğraf 4.4. SV%0_2.0PVA karışımının 96,2 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 120 günlük iyileşme süreci	60
Fotoğraf 4.5. SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 101,0 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 97 günlük iyileşme süreci.....	61
Fotoğraf 4.6. SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının 92,0 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 120 günlük iyileşme süreci.....	62

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklamalar
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece
Al_2O_3	Alüminyum oksit
$\text{C}_4\text{A}_3\text{S}$	Kalsiyum sülföalüminat
CaCO_3	Kalsiyum karbonat (Kireç taşı)
CaO	Kalsiyum oksit
CaSiO_3	Kalsiyum meta-silikat
CaSO_4	Kalsiyum sülfat
CO_2	Karbon dioksit
C-S-H	Kalsiyum-alüminyum(silika)-hidrat
E_m	Elastisite modülü
Fe_2O_3	Demir oksit
J'_b	Tamamlayıcı enerji
J_{tip}	Harç matrisin kırılma enerjisi
K_2O	Potasyum oksit
K_m	Harç matrisin kırılma tokluğu
MgO	Magnezyum oksit
mm	Milimetre
Na_2O	Sodyum oksit
NaCl	Sodyum klorür
NaOH	Sodyum hidroksit
SiO_2	Silisyum dioksit
SO_3	Kükürt trioksit
TiO_2	Titanyum
δ_0	Maksimum çatlak köprüleme gerilmesindeki açıklık
μm	Mikrometre
σ_0	Maksimum çatlak köprüleme gerilmesi
σ_{fc}	İlk çatlak oluşum dayanımı

Kısaltmalar	Açıklama
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ASTM	Amerikan Deney ve Malzeme Birliği
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
ECC	Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler
EDX	Enerji Dağınmımlı X-Işınları Analizi
FTIR	Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometre Analizi
PVA	Polivinil Alkol Lifi
RPM	Dakika İçerisinde Gerçekleştirilen Dönüş/Devir Sayısı
SA	Süper Akışkanlaştırıcı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SV	Sentetik Vollaştonit
TGA	Termogravimetrik Analiz
UK	Uçucu Kül
UTH	Ultrasonik Titreşim Hızı
XRD	X-Işınları Kırınım Cihazı
XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi

BÖLÜM I

GİRİŞ

Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC), son yıllarda geliştirilen yüksek performanslı fiber takviyeli çimento esaslı kompozitlerin özel bir türüdür (Li, 1998; 2003). Literatürde şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimento esaslı kompozitler olarak bilinen Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC), özellikle sünekliği ve betonların düşük çekme mukavemetini geliştirmek için 1990'larda geliştirilmiş yeni tip ultra-sünek lif takviyeli betondur (Li, 2003; Yıldırım vd., 2020). ECC'nin genellikle %2'yi aşan çekme sünekliği, geleneksel betondan iki kat daha yüksektir ve ayrıca ECC'nin çekme dayanımı 4-20 MPa aralığında değişebilir (Yu vd., 2018; Zhou vd., 2021). ECC, mikro-mekanik tasarım teorisi sayesinde, yüksek hasar toleransı, yüksek çekme dayanımları ve çoklu mikro çatlama davranışı ile kendi kendini iyileştirme kabiliyetine sahip %2'lik PVA orta lif hacmi ile geliştirilmiştir (Siad vd., 2018; Sakulich vd., 2011). 100 µm'ın daha az sıkı çatlak genişliklerini kontrol eden ve çatlamanın başlamasını ve daha fazla yayılmasını geciktiren çoklu mikro çatlakların oluşumu, ECC'nin en önemli yeteneklerinden birisidir (Siad vd., 2018; Sakulich vd., 2011). Ayrıca, ECC'deki PVA fiber-matriks arayüzündeki içsel bir denge, yüklenme boyunca lokalize mikro çatlakların başlamasını kısıtlar (Yıldırım vd., 2020). ECC'de kendi kendini kontrol eden çatlak yayılımı yeteneği, zararlı iyonların ve suyun nüfuz etmesini zorlaştırır ve bu nedenle yapısal sürdürülebilirliğin ve dayanıklılığın geliştirilmesine önemli ölçüde katkıda bulunur (Li, 2003; Li vd., 2001; Sahmaran vd., 2015). Bu üstün özellikleri nedeniyle, ECC pahalı bileşenler içermesine rağmen, 2003 yılından beri baraj onarımı (Sakata vd., 2004), beton ağırlık toprak istinat duvarı ve köprü tabliyesinin güçlendirilmesi (Li vd., 2004), yapılardaki bağlantı kirişleri (Maruta vd., 2005), bitişik basit açıklıkları (Li vd., 2005), altyapı uygulamalarını (Kewalramani vd., 2017) ve prekast elemanları (Li, 2019) birbirine bağlayan sünek bir ECC levhası ile basitçe desteklenen çok açıklıklı köprüler gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır.

ECC'ler özellikle kendiliğinden iyileşme performanslarından dolayı çok yaygın bir şekilde kullanılan yapı malzemeleri haline gelmiştir. Araştırmacılar özellikle, betonda lokal olarak sürekli genişleyen bir çatlak yerine, ECC'de birbirini izleyen çoklu mikro çatlak oluşumu ile kendiliğinden iyileşmeyi bu alanda daha cazip bir yöntem olarak

belirlemişlerdir. Önemli deneysel çalışmalar ve bu alandaki uygulamalar esas alındığında, ECC'lerin çatlaklarının kendiliğinden iyileşmesinin karışık bir kimyasal ve fiziksel sürecin kombinasyonu ile gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. ECC'nin kendiliğinden iyileşme performansını geliştirebilmek için cüruf ve silis dumanı (Zhu vd., 2014) pirinç kabuğu külü (Costa vd., 2019; Zhanga vd., 2020), metakaolin (Özbay vd., 2012) atık cam tozu (Siad vd., 2018), nano malzemeler (Sahmaran vd., 2012; Zhou vd., 2021), kireçtaşı tozu (Siad vd., 2015; Turk vd., 2018) ve diğer puzolanlar (Pachideh vd., 2020) kullanılmıştır.

Yukarıda belirtilen malzemeler dışında, iğnemsiz parçacık morfolojisine sahip sentetik vollastonitin (SV) ECC'de kullanılması fikri, ECC'nin sadece dayanım, dayanıklılık ve süneklik performansı açısından değil kendiliğinden iyileşme performansı açısından da dikkate değer bulgular sunabileceği fikrini doğurmuştur. Kimyasal bileşiminde %90-95'e kadar $\text{CaO}+\text{SiO}_2$ içeren volastonit minerali bir kalsiyum meta-silikattır (CaSiO_3) ve sıcak magmalarda kireçtaşı ile silika arasındaki kimyasal reaksiyondan oluşur. Beyaz renkli silikat minerali olarak bulunan ancak bazen krem, çok soluk yeşil veya gri olarak bulunan vollastonit, inert yapısı, iğnemsiz partikül yapısı ve alkali pH'ı nedeniyle endüstriyel mineraller (metalik olmayan) arasında eşsizdir (Ransinchung vd., 2009; Deng vd., 2013). Volastonitin iğnemsiz parçacık yapısı, en-boy oranı ile belirtilir. Wollastonit, betonun mekanik ve dayanıklılık özelliklerini etkileyen doğada 3:1 ile 20:1 arasındaki en-boy oranlarında bulunabilir (Ransinchung vd., 2009; Beaudoin vd., 1994). Bu en boy oranları ile doğal olarak elde edilebilen volastonit minerali, yaş, katı hal reaksiyonu ve sıvı faz reaksiyonu gibi üretim yöntemleri ile sentetik olarak geliştirilebilmektedir (Deng vd., 2013). Bu çalışmada ise bu metotlardan farklı olarak geliştirilen yeni bir üretim metodu kullanılarak SV üretimi yapılmıştır.

Bu tezin amacı, mineral katkı malzemesi olarak SV kullanılarak üretilen ECC'lerin kendiliğinden iyileşme özelliğinin incelenmesidir. Vollastonitin iğnemsiz parçacık yapısıyla çimento esaslı kompozitlerde lif gibi davranma özelliğinin ECC'nin kendiliğinden iyileşme performansına etkisi üç farklı ECC karışımı tasarlanarak belirlenmiştir. Öncelikle M45 kodu ile bilinen standart ECC karışımı üretilmiştir. Daha sonra, önceki çalışmalarda, çimento+uçucu kül (Ç+UK) yerine %6 vollastonit kullanıldığında ECC'nin taşıma gücü ve deformasyon kapasitesinin geliştiği bu orandan sonra azaldığı tespit edildiğinden, standart ECC karışımında Ç+UK yerine %6 SV

kullanılarak diğer ECC karışımı tasarlanmıştır. Bu tez çalışmasında tasarlanan diğer ECC karışımı ise önceki çalışmalarda %6 SV içeren ECC karışımındaki %2 PVA lifi içeriğinin %1.6'ya kadar azaltılabileceğini gösteren ECC karışımı olmuştur. Böylece standart ECC karışımı ile benzer taşıma gücü ve deformasyon kapasitesine sahip olduğu belirlenen ECC (%6 SV varlığında %1.6 PVA içeren) karışımının kendiliğinden iyileşme performansı standart ECC karışımı ile karşılaştırılmıştır.



BÖLÜM II

LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC)

Tasarlanmış çimento esaslı kompozitler, literatürdeki adı ile “Engineered Cementitious Composites” ilk olarak 1990’lı yıllarda ABD’nin Michigan Üniversitesi’nde geliştirilmiştir. Bu kompozit malzemelerin şekil değiştirme kabiliyetleri %3 ile %5 arasında değişmekte olup, bu oran çimento esaslı malzemeler için oldukça yüksektir. Bu değer, normal beton ve lif takviyeli betonların çekme şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık 300 ila 500 katıdır. ECC, diğer lif takviyeli betonlara içerik olarak benzer olmasına karşın, kontrollü ve çoklu mikro çatlama özelliğine sahiptir. Öyle ki lif takviyeli betonların aksenal çekme yükü altındaki çatlak genişlikleri 300 ve 400 µm olmasına rağmen, ECC’de bu çatlak genişliği 100 µm’den daha azdır. (Maalej ve Li, 1994; Kesner ve Billington, 2005; Şahmaran ve Li, 2007; Şahmaran ve Li, 2008). Ayrıca çatlakların oluşumundan sonra birçok sünek metal gibi yük taşıma kapasitesinin artması malzemenin şekil değiştirme sertleşmesi özelliğinden kaynaklanmaktadır. (Li, 1998; Lin vd., 1999; Li vd., 2001; Li, 2003).

ECC malzemelerinin mükemmel performansının arkasındaki ana faktör, alüminyum gibi yaygın metal malzemelere benzer şekilde ilk çatlaktan sonra yüksek deformasyon kapasitesine ulaşabilme yetenekleridir. Mikromekanik tasarımın kullanıldığı ECC’de son kırılma aşamasında bile mikro çatlaklara dayalı hasarın gelişmesi nedeniyle çatlak genişliği yaklaşık 100 µm’nin altında kalır (Şahmaran vd., 2013). Ayrıca, homojen olarak dağılmış liflerin özellikleri, matris özellikleri ve matris-lif ara yüzü dengelenerek, genişliği 30 µm’ye kadar azalabilen mikro çatlaklar kolayca elde edilebilir (Şahmaran vd., 2012).

2.1.1 ECC’nin tasarlanması

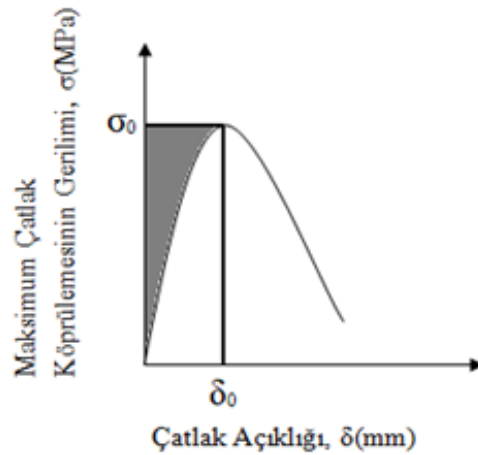
ECC’lerin tasarımında, birinci öncelik, yük altında çoklu mikro-çatlak ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışının oluşmasını sağlamaktır. Bu durum, çok sayıda büyük deformasyonların üzerine dağıtılmış olan mikro çatlakların oluşmasına izin verir.

İlk olarak, Marshall ve Cox (1988) ECC'nin çoklu mikro-çatlama ve şekil değiştirmeye sertleşmesi davranışı ile kararlı durum çatlak ilerlemesini karakterize ettiler. Daha sonra Li ve Leung (1992) ve Lin vd. (1999) genişletilmiş lif takviyeli çimento esaslı kompozitler üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarda, Griffith tipi çatlakların yayılması sırasında genleşecek olan çimento takviyeli malzeme yerine, ECC'de çoklu mikro çatlaklar oluşturmuşlar ve sabit bir kararlı durum (düz çatlaklar) sağlamak için çatlak genişliğini artırarak ECC karışımlarında deformasyon sırasında aşırı gerilmeden kaynaklanan şekil değiştirme sertleşmesi davranışının olduğunu belirtmişlerdir. Çatlama dayanımı ve çatlak genişliği arasındaki etkileşim çoklu kararlı durum çatlama dokusunu yönetir. Bu durumu elde etmek için Denklem (2.1)'de görülen eşitsizliğin uygulanması gerekmektedir.

$$J'_b = \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \geq J_{tip} \approx K_m^2 / E_m \quad (2.1)$$

J'_b tamamlayıcı enerjidir, σ_0 ve δ_0 ise sırasıyla maksimum çatlak köprüleme gerilmesi ve ona karşılık gelen çatlak açıklığıdır. J_{tip} harç matrisinin kırılma enerjisi, K_m harç matrisinin kırılma tokluğu ve E_m harç matrisinin elastisite modülü değeridir. Kırılma enerji ölçütüne ek olarak, Denklem 2.1'de görülen dayanım ölçütü uygulanmalıdır.

$$\sigma_0 > \sigma_{fc} \quad (2.2)$$



Şekil 2.1. Çatlak açıklığına karşı çatlak köprüleme gerilme ilişkisi

σ_{fc} ilk çatlak dayanımı ve σ_0 harç matrisinin maksimum çatlak köprüleme gerilmesi olarak ifade edilmektedir. Wang ve Li (2003), Denklem 2.2'nin her potansiyel çatlak

düzleminde doymuş çoklu çatlama için uygulanması gerektiğini bulmuştur. σ_{fc} bu çatlak düzleminde çatlak gerilimi olarak tanımlanır.

Çoklu kararlı durum çatlaklarının oluşumu ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışı, ECC karışımının yukarıdaki kriterlere göre seçilmesi durumunda elde edilebilir. Ayrıca, karışımlar 100 μm eşik sınırının altında çatlak genişlikleri üretmek için tasarlanmalıdır. Bu, çatlak genişliği ve çatlak köprüleme arasındaki ilişki olan Denklem (2.1)'den elde edilebilir. Çoklu ECC çatlakları sürecinde ortaya çıkan maksimum kararlı durum çatlak genişliği, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi maksimum çatlak köprüleme gerilmesine (σ_0) karşılık gelen çatlak genişliği δ_0 olarak kabul edilebilir. Çatlak genişliği δ_0 'ın üzerine çıkarsa çatlak köprüleme gerilmesi azalmaya başlar, çatlak yerini bulur ve çoklu çatlakların oluşumu durur.

ECC'nin δ_0 'ı 100 μm eşik sınırının altında tutabilir, bu da şekil değiştirme sertleşmesi özelliklerine ve çoklu çatlama özelliklerine sahip olduklarını gösterir. Belirli bir çatlak düzlemini geçen liflerin köprü kuvveti katkısının toplanmasına dayanarak çatlak köprüleme gerilme ilişkisine karşı çatlak açıklığının formülasyonu Lin vd. (1999) tarafından hazırlanmıştır. Bu bağıntı Denklem (2.3)'te ifade edilmiştir.

$$\sigma(\delta) = \frac{4V_f}{\pi d_f^2} \int_{\phi=0}^{\pi/2} \left(\int_{z=0}^{(L_f/2)\cos\phi} P(\delta) e^{-fz} p(\phi) p(z) dz \right) d\phi \quad (2.3)$$

burada V_f , lif hacim oranı, d_f lif çapı, L_f lif boyunu, ϕ lif uyum açısı, z bir lifin çatlak düzleminde merkeze olan uzaklığını, f bir katsayı ve son olarak $p(\phi)$ ve $p(z)$ ise sırasıyla çatlak düzleminde lif uyum açısı ve merkeze olan mesafesinin olasılık yoğunluk fonksiyonlarıdır. Lin ve ark. (1999), Çekme yükü $P(\delta)$, çatlak düzlemine normal olarak hizalanmış tek bir fiberin yer değiştirme yükü olarak tanımlanır. faktör e^{-fz} , eğik açının çatlak düzleminde eğik lifler için köprüleme yüklerindeki değişiklikler için hesaplanmıştır. ECC'ye uyum sağlamak için bu temel mikromekanik modellerin kullanılması, düşük geçirgenliğe bakılmaksızın kompozit malzemenin geniş çatlaklardan dolayı en az %1 büyük deformasyonlar gösterecek şekilde tasarlanabilir. Malzeme tasarım prosedürlerinin uygulanması, malzeme mühendislerinin belirli inşaat ihtiyaçlarını karşılamak için düşük geçirgenlik ve gerinim kapasitesi gibi malzeme özelliklerini seçmelerine izin verilmektedir.

2.1.2 ECC'nin uygulama çalışmaları

ABD'de Michigan Üniversitesinde ve Japonya'da Tokyo Üniversitesi ve Kajima Kurumunda, Yapı Araştırma Enstitüsü'nde, ECC uygulamaları üzerine bir dizi araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar, genel betonarme yapıların onarımında, binaların perde duvarlarının güçlendirilmesinde, inşaat demirinin kaplamasında korozyonu önlenmesinde ve kiriş kolon bağlantılarında dayanımı artırmak için kullanılmıştır. ECC'nin kullanım alanlarını belirlemek için yapılan başlıca çalışmalar bunlardır. ECC ve uygulama alanlarındaki diğer çalışmalar da Danimarka ve Avusturya'da gerçekleştirilmiştir. ECC üzerine yapılan bazı çalışmalar incelendiğinde ECC'nin çok yönlü bir malzeme olduğu söylenebilir. Örneğin, Sürekli yükler altında takviyeli kirişin yapısal mukavemetini ve dayanıklılığını belirlemek için normal çelik takviyeli PVA-ECC (hacimce %2) kirişler dört yönlü ofset yükleme ile test edilerek merkez açıklığı tamamen ters düzgün kesme yüküne maruz bırakılmıştır (Kanda vd., 1998). Testteki çeşitli parametreler, açıklık/derinlik oranını ve kesme takviyesi miktarını içermektedir. Kontrol numunesi ayrıca ECC'ye benzer basınç dayanımına (30 MPa) sahip sıradan beton ile test edilmiştir. Mishra (1995) tarafından yapılan araştırmada kiriş-kolon birleşiminde ECC kullanılmıştır. Normal detaylandırmaya sahip bu çalışmada, Polietilen-ECC bölgelerinin geleneksel bir betonarme bölgeye göre 2,8 kat daha fazla enerji emdiği bulunmuştur. Duvar tadilatları için prefabrik perde panellerinde PVA-ECC kullanımı sayısal olarak Kabele vd. (1997) tarafından, deneysel olarak ise Kanda vd. (1998) tarafından araştırılmıştır. Rijit bir şekilde bağlanmış kesme plakalarını ve ECC'nin şekil değiştirme sertleşmesi davranışına ulaşan bir malzeme yapısı modelini simüle etmek için sonlu elemanlar metodu kullanılarak, PVA-ECC plakasının benzer plakalardan daha yüksek bir sismik yük ve deformasyon kapasitesine sahip olduğu bulunmuştur. ECC'nin gerilmeyi azaltma ve kesme panelinin iç kısmındaki bağlantılarda hasarı yeniden dağıtma yeteneği, ECC panellerinde gözlemlenen geliştirilmiş yapısal mukavemet ve süneklikten kaynaklanmaktadır.

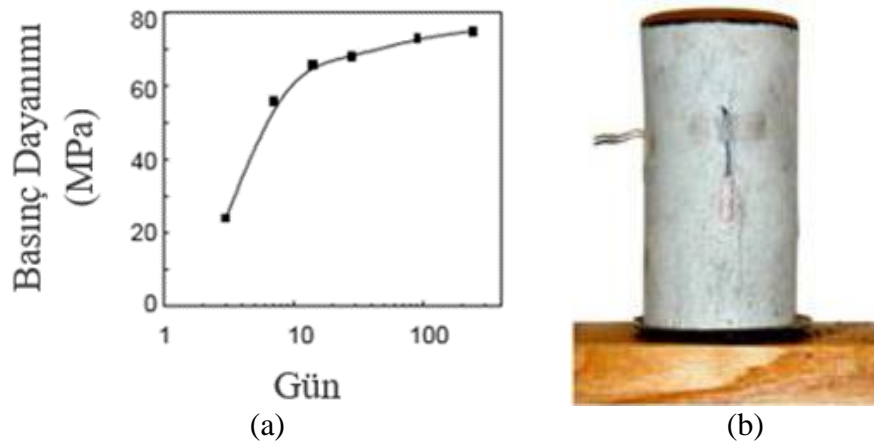
ECC, normal betonla inşa edilen yapıların korozyon direncini artırmak için koruyucu bir tabaka olarak da araştırılmıştır. Bu testlerin sonuçlarına dayanarak, geleneksel betondan yapılan numunelerin çatlak genişliğinin 1 mm'den büyük olduğu, ECC'den yapılan numunelerin ise çatlak genişliğinin 0.1 mm'den az olduğu tespit edilmiştir (Maalej and Li, 1995). ECC'nin bazı ek potansiyel uygulamaları, hibrid çelik ile

güçlendirilmiş betonarme yapıları için kısa kolonlar, amortisörler, çelik eleman bağlantıları dahil olmak üzere yüksek enerji emilim cihazlarında bulunmaktadır. Darbeye veya 3D yüklemeye maruz kalan yapılar, otoyol kaplamaları, köprü döşemeleri ve patlamaya dayanıklı bina çekirdek elemanları gibi ECC'nin izotropik enerji emme davranışından da yararlanabilir. ECC'nin değerlendirildiği diğer uygulamalar, kalıcı kalıp, lifli betonarme yapılar ve filtre kontrolü için radyoaktif atık arıtımı için bağlayıcı malzemedir(Wu vd., 1996).

2.1.3 ECC'nin mekanik özellikleri

2.1.3.1 Basınç dayanımı özellikleri

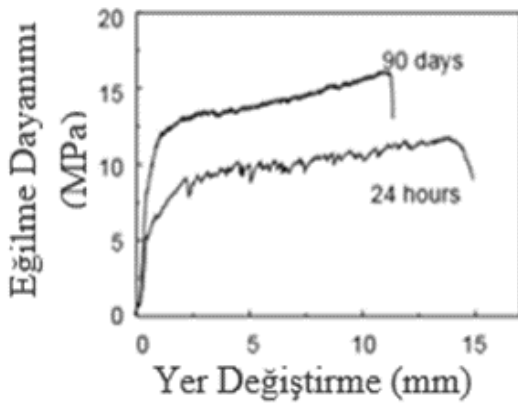
ECC'nin basınç dayanımı, sıradan yüksek dayanımlı betondan farklı değildir. ECC'nin basınç dayanımının 30 MPa ile 90 MPa arasında olduğu bilinmektedir. Ancak, ECC karışımlarında iri agrega olmadığı için elastisite modülü değeri 20-25 GPa aralığında olduğu için normal betonların elastisite modülü değerinden daha düşük olabilmektedir. ECC'nin basınç şekil değiştirme kapasitesi normal betondan biraz daha yüksek bir değere (%0,45-0,65) sahiptir. M45 kodlu standart ECC karışımının basınç dayanım grafiği Şekil 2.2.a'da gösterilmektedir. Basınç altındaki ECC'de dayanım değerinin en yüksek değere ulaşmasından sonraki davranışı incelendiğinde, numunenin ani şekilde parçalanmasından sonra basınç dayanımında kademeli olarak düşüş göstermektedir. (Şekil 2.2.b) .



Şekil 2.2. ECC'nin basınç dayanımı gelişimi (a) ve basınç testine maruz bırakılan ECC numunesi (b) (Wang and Li, 2006b)

2.1.3.2 Eğilme performansı özellikleri

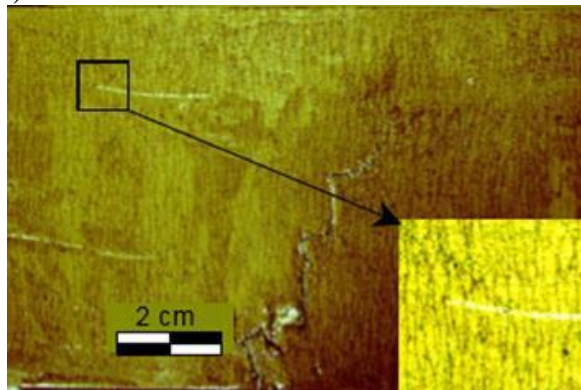
ECC'nin eğilme performansı onun çekme altındaki süneklik özelliğini yansıtmaktadır (Maalej and Li, 1994; Wang, 2005, Wang and Li, 2006; Kunieda and Rokugo, 2006). Eğilme yükü altında, kiriş numunesi büyük bir şekil değiştirme gelişimine izin vermektedir ve bununla birlikte çoklu mikro çatlaklar oluşturmaktadır. ECC kiriş örnekleri, 10-15 MPa'lık eğilme dayanımına (kırılma modülü veya MOR) kolayca ulaşabilir ve büyük ölçüde şekil değiştirme sertleşmesi şekil 2.3.a'da davranışı sergiler. Şekil değiştirme sertleşmesi ECC'nin doğal bir özelliğidir ve geometrik şekle bağlı değildir. Kiriş yüksekliği arttıkça deformasyon güçlendirmesinin zorlaştığı durumda durum farklıdır (Stang ve Li, 2004). Kuvvetle deforme olmuş bir ECC kiriş numunesinin ve kirişin altındaki çoklu mikro çatlakların görüntüleri sırasıyla Şekil 2.3.b ve Şekil 2.3.c'de gösterilmektedir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2.3. ECC'nin eğilme altındaki yer değiştirme eğrisi (a), Büyük yer değiştirmeye uğramış ECC numunesi (b) ve ECC kirişindeki çoklu mikro çatlaklar (c) (Stang ve Li, 2004)

2.1.4 ECC'nin durabilite özellikleri

Birçok alanda uygulamaya sahip olan ECC, donma-çözülme, sıcak-soğuk değişimleri, klor geçirimsizliği veya alkali silika reaksiyonu gibi çevresel koşullara maruz kalmaktadır. Bu koşulların ECC üzerindeki etkileri yapılan çalışmalarla incelenmiştir.

2.1.4.1 Donma çözülme direnci

Hava sürüklenmemiş ECC numunelerinin dayanıklılığı, donma-çözülme döngülerine maruz bırakılarak test edilmiştir. Ayrıca, hava sürüklenmemiş beton örnekleri de referans numuneler olarak test edilmiştir. ECC ve beton numuneleri 14 hafta boyunca aynı deneylere tabi tutulmuşlardır (Li vd., 2003). Beş hafta sonunda (110 döngü) donma-çözülme cihazından çıkarılan beton numunelerinde ciddi bozulmalar görülmüştür. Ancak 300 döngüye rağmen ECC numunelerinin dinamik modülünün bozulmadığı görülmüştür. ECC'in donma-çözülme direncinin sıradan betona göre 10 kat daha iyi olduğunu tespit edilmiştir.

2.1.4.2 Uzun süreli şekil değiştirme kapasitesi

Yapı malzemelerinin dayanıklı olduğu düşünüldüğünde, mekanik özellikleri zamanla bozulmamalı ve minimum tasarım özelliklerinin altına düşmemelidir. Çimentolu malzemelerin tipik hidrasyon süreci ve ECC'deki çimento matrisi, fiber ve matris/fiber arayüz özelliklerinin hassas dengesi nedeniyle, ECC'nin şekil değiştirme kapasitesi, olgunlaşma sırasında kürlenme yaşı ile birlikte gelişmektedir (Li ve Lepech, 2004). ECC üretiminden yaklaşık 10 gün sonra, yüksek oranda çoklu çatlama için optimal bir matris, fiber ve matris/fiber arayüz dengesine ulaşıldığında, pik gerilme kapasitesi elde edilir. Hidrasyon devam ettikçe, artan matris tokluğu, kompozitte düşük sünekliğe yol açar. Matris ve lif/matris özelliklerinin olgunlaşmasının sonunda, birçok yapısal uygulama tarafından uygulanan deformasyon talebinin çok üzerinde olan ancak erken yaşta görülen %5'lik şekil değiştirme kapasitesinden daha az olan, %3'lük uzun süreli sabit şekil değiştirme kapasitesi ile sonuçlanır. Uzun süreli testler 180 gün sürerken, bu sürenin sonunda ECC'de uzun süreli şekil değiştirme kapasitesinin yaklaşık olarak %3 oranında kalması beklenir.

ECC'nin şekil değiştirme kapasitesi-yaş eğrisi normal betondaki basınç dayanımı eğrisine benzer olarak görülebilir. Ancak monotonik olarak yükselmediği için uzun süreli tasarımlar için kullanılmalıdır. Basitlik için uzun dönemli davranışı asimptotik olarak karşılayan 28 günlük şekil değiştirme kapasitesi değerinin %90'ı tasarım gerilme kapasitesi olarak kabul edilebilir. Basınç dayanımını belirtmek için aynı 28 günlük değer kullanıldığından bu tasarımı basitleştirir.

2.1.4.3 Aşırı sıcak ve soğuk iklim koşulları

Kış koşullarında sıcaklık değişikliklerini simüle etmek için tasarlanan ve yukarıda açıklanan donma çözülme testlerinin aksine, sıcak ve nemli ortamların uzun vadeli etkilerini simüle etmek için ECC matrisine gömülü halde bulunan tekli lifler ve ECC malzeme örnekleri sıcak suya daldırma işlemine tabi tutulmuştur (Li vd., 2004). Hem fiber lifler hem de ECC malzemeleri için numuneler, 26 hafta boyunca 60 °C'de sıcak suya daldırılmadan önce oda sıcaklığında 28 gün süreyle kürlenmiştir. İşlemlerin sonunda, lif mukavemeti, lif elastisite modülü ve uzaması gibi lif özelliklerinde çok az değişiklikler görülmüştür. Ancak, ECC'nin şekil değiştirme kapasitesi erken yaşta %4,5'ten, % 2,75'e düşmüştür. Hızlandırılmış sıcak hava koşullarında test edilen ECC daha düşük şekil değiştirme kapasitesi ile sonuçlanırken, 26 hafta sonunda görülen ve 70 yıllık doğal hava koşullarına eşdeğer (Proctor vd., 1982) olan normal betonun 250 katından fazla olan %2,75 şekil değiştirme kapasitesi, çoğu altyapı uygulamaları için kabul edilebilir.

2.1.4.4 Hızlı klor geğirimsizliği

Bir ECC malzemesi, deniz yapıları veya buz çözücü tuz uygulamalarına maruz kalan kaldırımlar ve köprü döşemeleri gibi yüksek klorür konsantrasyonlu ortamlara maruz kaldığında, klorür iyonları lif/matris arayüzünü ve dolayısıyla kompozit özellikleri değiştirebilir. Bu etkileri test etmek için ECC numuneleri önce çeşitli gerilme seviyelerinde tek eksenli gerilmeye tabi tutulmuş, daha sonra oda sıcaklığında 1, 2 ve 3 ay boyunca %3'lük bir NaCl çözeltisine maruz bırakılarak başarısız olana kadar yeniden yüklenmiştir (Li vd., 2007). Tüm durumlarda aşırı yüklenen numuneler çoklu mikro çatlama davranışını ve %3'ün üzerinde bir deformasyon kapasitesini korumuş ancak ortalama çatlak genişliği 40 µm'den 100 µm'ye yükselmiş ve çekme mukavemeti

yaklaşık %10 azalmıştır. Kabele vd., (2007) tarafından tek eksenli eğilme testi verilerinin önerdiği gibi daha geniş bir çatlak genişliği, lif/matris arayüzündeki kimyasal bağları azalttığı için daha düşük bir çekme mukavemeti ile sonuçlanmıştır.

2.1.4.5 Alkali silika reaksiyonu

Şahmaran ve Li'nin (2007) çalışmalarında, ECC'nin alkali silika reaksiyonuna direnci belirlenmiştir. Bu testte ECC numuneleri, alkali silikanın reaksiyonundan kaynaklanan uzunluk değişikliklerini belirlemek için ASTM C 1260'ya göre 80 °C'de alkali bir çözeltiliye daldırılmıştır. 30 gün sonunda alkali çözeltiden çıkarıldıktan sonra F sınıfı veya C sınıfı uçucu kül içeren ECC numunelerinde genişleme olmadığını belirlenmiştir. ECC karışımlarında çok ince kum kullanılmasına rağmen, bu kum parçacıklarının doğası alkali bir ortamda reaktiviteyi bastırmıştır. Ek olarak yüksek hacimli uçucu külün mevcudiyeti, puzolanik reaksiyon nedeniyle ortamın pH'ını düşürür ve bir alkali silika reaksiyonunun meydana gelme olasılığını azaltır. ECC'deki PVA mikrofiberleri, meydana gelebilecek genişlemeyi azaltma eğilimindedir. Sonuç Olarak, ECC'nin alkali silika reaksiyonuna karşı dayanıklı bir malzeme olduğu kanıtlanmıştır.

2.2 ECC'nin Kendiliğinden İyileşmesi

Yapı malzemelerinin zamanla deforme olması ve işlevini kaybetmesi günümüzde önemli bir konu olduğundan ECC gibi malzemelerin tasarımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Yapıların sadece tamir edilmesi veya bozulmanın gecikmesi değil aynı zamanda deforme olan alanın kendiliğinden iyileşebilmesi servis ömrünün devam etmesini mümkün kılacaktır. Kendiliğinden iyileşme olgusu, çimento esaslı malzemelerde yıllardır görülmektedir (Wang vd., 1997). Betonun kendiliğinden iyileşmesi, belirli koşullar altında betonun kendi kimyasal ürünleriyle kendi çatlak genişliğini azaltabilmesi anlamına gelir. Bu alandaki önemli deneysel çalışmalara ve uygulamalara göre, çimento esaslı malzemelerdeki çatlakların kendiliğinden iyileşmesinin, karmaşık bir kimyasal ve fiziksel işlemin bir kombinasyonu ile gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Schlangen, 2010 yaptığı bir çalışmada kendiliğinden iyileşme sürecinin aşağıdaki gibi oluşabileceğini öne sürmüştür.

1. Kalsiyum karbonat ve kalsiyum hidroksit oluşumu
2. Sudaki kirliliğin ve betonun üretiminden sonra oluşan gevşek beton parçacıklarının çatlakları kapatması
3. Reaksiyona girmemiş çimento veya çimento esaslı malzemelerin hidratasyonu
4. Hidrate olmuş çimento esaslı matrisin, çatlak bölgelerinde genişmesi (C-S-H'nin genişmesi)

2.2.1 ECC'nin kendiliğinden iyileşme teknikleri

2.2.1.1 Otojen iyileşme

Ma vd., (2014) yaptıkları çalışmada, farklı kürleme süreleri ve farklı yükleme seviyelerine maruz bırakılan ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda, ilk 3-4 ıslak kuru döngüsünün su geçirimsizliği derecesini hızla azaltmada çok etkili olduğunu göstermişlerdir. Etkili bir başka kürleme rejimi, CaCO_3 kristallerini oluşturmaya yardımcı olan ve havadaki CO_2 'nin varlığına bağlı çevrimsel ıslak kuru kür metodudur.

Zhang (2017) ECC'nin kendiliğinden iyileşmesini doğrudan su akışı testleriyle araştırmıştır. 28 ve 90 günlük kürlemeden önce ve sonra yüklenmiş numuneler, üç farklı çevresel koşullara tabi tutulmuştur. Numuneler, 20°C 'deki suya, 60°C 'deki sıcak suya ve kalsiyum hidroksitle doyurulmuş bir çözeltiye daldırılmıştır. Kür yaşından bağımsız olmak üzere kendiliğinden iyileşme yolu ile çatlakların kapanması su miktarının geçirimsizliğini önemli ölçüde azaltmıştır.

Şahmaran vd., (2013) hızlı klor geçirimsizlik testlerinde yüksek hacimli farklı puzolanik malzemelerle (F sınıfı uçucu kül, C sınıfı uçucu kül ve cüruf) üretilen 60 günlük hasarlı ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme yeteneğini araştırmışlardır. kendiliğinden iyileşme gözlemlenmesi için, numuneler sürekli su, sürekli hava ve donma-çözülme çevrimleri altında 60 gün boyunca küre tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlara göre, sürekli su kürünün, hızlı klor geçirimsizlik testi sonuçlarının geri kazanılmasında en etkili kürleme yöntemi olduğu bulunmuştur. 60 günlük çevrimsel donma-çözülme maruziyetinden (300 döngü) sonra dahi, cüruf içeren ECC numunelerinin, hızlı klor geçirimsizlik test sonuçları, başlangıçta ölçülen 60 günlük sonuçlardan daha düşük değer

vermiştir. Bu sonuç farklı uçucu kül türlerine sahip numuneler için geçerli değildir. Bu nedenle, cüruf içeren numunelerin mikro çatlaklarındaki kendiliğinden iyileşme olgusu, donma-çözülme'nin zararlı etkilerini karşıladığı anlamına gelmektedir. CaCO_3 , cüruf içeren numuneler için kendiliğinden iyileşme ana ürünü iken; farklı uçucu kül türlerine sahip olan numuneler için, kendiliğinden iyileşme ana ürünleri olarak, çatlak yüzeylerinde C-S-H jelleri ve CaCO_3 olarak gözlemlenmiştir.

Yıldırım vd., (2018) tarafından yapılan çalışmada, çatlak iyileşmesinin ileri yaştaki numunelerde geçerli olup olmadığını anlamak için araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada kendiliğinden iyileşme performansını değerlendirmek için hızlı klor geçirimliliği testini kullanmışlardır. Sonuçlara göre; ileri yaşa sahip olan ECC numunelerinin (365 gün) çatlak iyileşme performansının erken yaştaki numuneler kadar etkin olabileceğini öne sürmüşlerdir. Ayrıca, 458 μm 'ye kadar genişliğe sahip mikro çatlakların numunelere uygun şekilde uygulanan sınırlı bir kürlenme süresi ve karışım bileşimi ile kendiliğinden kapanabileceği göstermişlerdir.

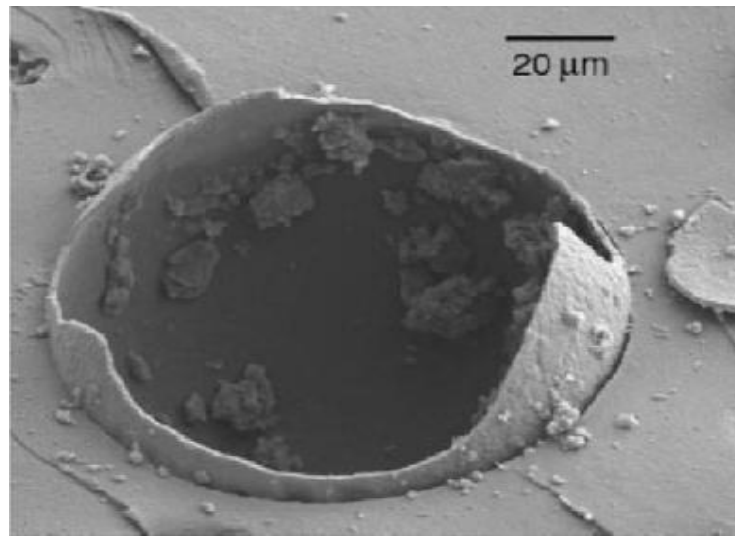
Alyousif vd., (2015) yapmış oldukları çalışmada çeşitli kimyasal bileşimlere sahip mineral katkılarla üretilen 7, 28 ve 90 günlük mikro çatlaklı ECC'lerin kendiliğinden iyileşmesini ve su emme değerlerini araştırmışlardır. ECC numunelerinin uygun tipteki mineral katkı maddesi seçimine, kür yaşına ve ek kürlenme süresine bağlı olarak kendiliğinden iyileşme derecesinin değiştiğini belirtmişlerdir. Sonuçlar, mikro çatlaklı numuneler tarafından su emme sonuçlarının otojen kendiliğinden iyileşme sayesinde %92'ye kadar geri kazandığını göstermiştir. Ek olarak bu iyileşme seviyesinin esas olarak 7 günlük iyileşme sürecinin sonunda meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Zhu vd., (2012) ürettikleri ECC numunelerini farklı oranlarda tek eksenli çekme gerilmeleri altında (%0,5 ile %3'ü arasındaki şekil değiştirme) ve çeşitli çatlak genişlikleri oluşturarak elde ettikleri hasarlı ECC numunelerini ise iki farklı donma-çözülme döngüsü ile incelemişlerdir. İlk donma-çözülme döngüsünde normal su kullanılırken ikinci donma çözülme döngüsünde ise tuzlu su çözeltisi kullanılmıştır. Kendiliğinden iyileşen numunelerin iyileşme derecesini belirlemek için kılcallık testi, ultrasonik ses geçirgenliği testi ve tek eksenli çekme testi uygulanmıştır. Ultrasonik ses geçirgenliği testi sonuçlarına göre, her iki iyileştirme döngüsü için iyileşme derecesinin ön yükleme derecesine bağlı olduğu ve %1,5'ten fazla şekil değiştirme yüklemesi

yapılan ECC numunelerinde iyileşmenin hasarsız numunelere kıyasla düşük olduğu gözlemlenmiştir. Kılcallık testi sonuçları da ultrasonik titreşim hız testi sonuçlarına benzer olarak hasarlı numunelerin ön yükeleme derecesinin %1,5'in altında olduğu yükleme durumları için kılcallık katsayısı değerinin hasarsız numuneler ile neredeyse aynı olduğunu saptamışlardır. Ayrıca XRD analizi sonuçlarına göre kendiliğinden iyileşen çatlaklarda iyileşme ürünü olarak kalsiyum karbonat ve kalsiyum hidroksit gözlemlenmiştir.

2.2.1.2 Mikrokapsülasyon

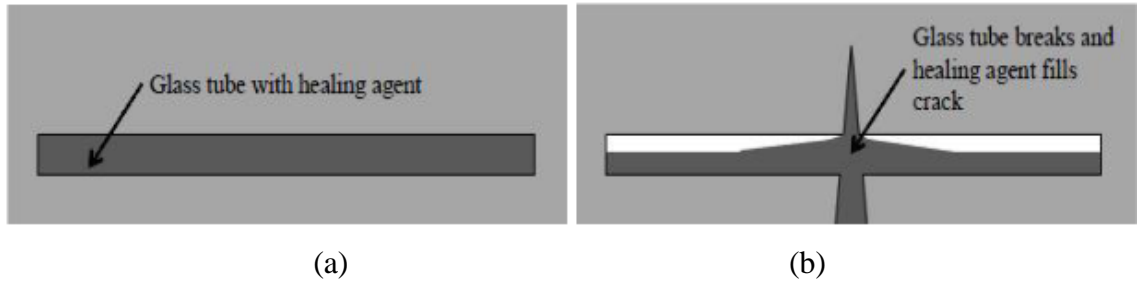
Mikrokapsülasyon, doğadan hareketle tasarlanmış tekniklerden birisidir. Örnek olarak ise bir kuş yumurtası ele alınmıştır. Belirli türde çok küçük parçacıklar, maruz kaldıkları dış çevre koşullarından korunmaları için koruyucu bir kapsül içine yerleştirilirler. Şekil 2.4, kendini iyileştiren maddeler içeren mikrokapsüllerin çalışma prensibini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi; mikroenkapsülasyon nedeniyle, kompozit malzemenin kendini iyileştiren ajanı, çatlaklar oluştuğunda reaksiyona girerek, kapsülün açılması ile çatlakları doldurur. İyileştirme maddesi çatlak yüzeyine kılcal damarlar şeklinde nüfuz etmektedir. Reaksiyon, serbest kalan iyileştirici ajanı ve çatlaklar iyileşmektedir. Boh ve Sumiga (2008), yapı malzemelerinde çimentolu matrislerin hidratasyon üretim yeteneğini artırmak amacıyla bu yöntemi kullanmışlardır.



Şekil 2.4. Mikrokapsülasyon yöntemiyle iyileştirme tekniği kapsülün SEM görüntüsü, (Boh ve Sumiga, 2008)

2.2.1.3 İçi boş lifler

İçi boş lif adı verilen bu malzemenin yardımıyla bir başka kendiliğinden iyileşme prosedürü mümkündür. Bu prosedürde, boş pipet veya tüpün çapına göre yerleştirilen kendini iyileştirme parçacıkları, çatlak oluşumu yoluyla serbest bırakılır ve kompozit malzemenin kendiliğinden iyileşme mekanizmasını tetikler. Şekil 2.5a'daki çizimde, tüp veya pipet benzeşimi bir kanala yerleştirilen kendini iyileştirme ajanları görülmektedir. Aynı Şekil 2.5b'deki gösterimde; çatlaklar oluşumuyla ajanların yerlerinden çıkarak tepkimeye girmesi görülmektedir. İçi boş liflerin kullanımının, kendini iyileştirme maddeler içeren kapsüllerden daha spesifik bir uygulama olduğu bilinmektedir. Metilmetakrilat (Dry ve McMillan, 1996), etil siyanoakrilatı (Joseph vd., 2010), poliüretan gibi kendini iyileştirici maddeler birçok araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır. Bu çalışmalarda, betonun hem mekanik hem de durabilite özellikleri açısından geliştiği gözlemlenmiştir. Thao vd. (2009) yaptıkları çalışmada içi boş liflerin içerisindeki düşük viskoziteli kimyasal katkı maddeleri ile dolu haldeki tüpün açılmasıyla akışkan katkı maddesinin çatlaklara kolayca sızdığını ve bu kimyasal katkıların çatlakları iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir. Çalışmalarında, iyileştirici madde olarak düşük viskoziteli iki bileşenli epoksi reçinelerini kullanmışlardır. Çalışmalarının sonucunda tatmin edici düzeyde kendiliğinden iyileşme performansı elde edilmesinin yanında numune rijitliği ve süneklik oranının arttığını belirlemişlerdir.

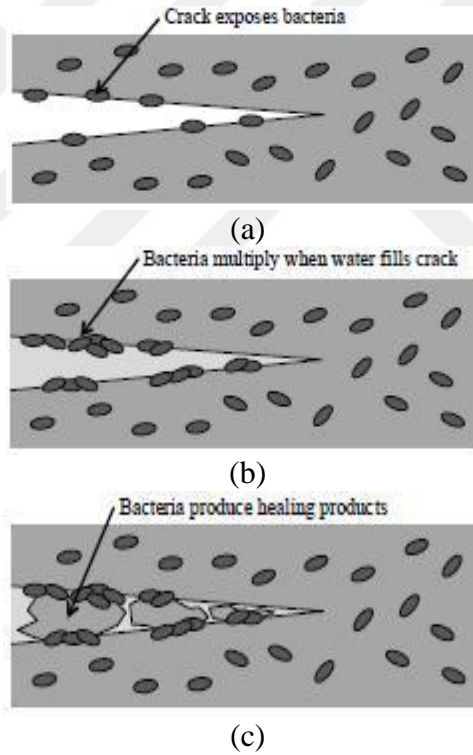


Şekil 2.5. İçi boş liflerin kendiliğinden iyileşme amacıyla kullanılması; İyileştirme ajanı içeren cam tüp (a) ve cam tüpün kırılması ve iyileştirici ajanların çatlakları doldurması (b)

2.2.1.4 Bakteri ile kendiliğinden iyileşme

Çimentolu malzemelerde kendiliğinden iyileşmenin bir türü bakteri ile iyileştirme yöntemidir. Bakteri yoluyla kendiliğinden iyileştirmede amaç çatlaklarda kalsiyum

karbonat çökeltisi elde edilmesidir. Şekil 2.6'da, bakteri yoluyla kendiliğinden iyileşme mekanizmalarının şematik gösterimi verilmiştir. Şekil 2.6a'da, çatlak ile açığa çıkan bakteriler, Şekil 2.6b'de çatlağa suyun dolmasıyla bakterilerin çoğalması ve Şekil 2.6c'de ise bakterinin iyileştirici ürün üretmesi görülmektedir. Bu yöntemde kullanılacak olan bakterilerin özenle seçilmesi gerekmektedir. Çimento hidratasyonunu artıracak ve destekleyici ürünler içeren bakteriler seçilmelidir. Çalışmalarda, kalsiyumun çökmesine yardımcı olmak için betona üreolitik bakteriler de eklenmiştir. Wang vd. (2012) "sphaericus" bakterisinin kendini iyileşme özelliğini numuneler üzerinde araştırmışlardır. Araştırma sonucuna göre, ortamda bol miktarda kalsiyum iyonu bulunduğunda, bakteri hücrelerinin duvarlarında kalsiyum karbonat çökeltisi gözlemlenmiştir. Numunenin geçirirmliliğinde azalma tespit edilmiş olup mekanik özelliklerinin geri kazanılabileceği gözlemlenmiştir.



Şekil 2.6. Bakteri ile kendiliğinden iyileşme mekanizması (a) Çatlağın bakteriye maruz kalması, (b) Çatlağa suyun dolmasıyla bakterilerin çoğalması, (c) Bakterilerin iyileşme ürünleri oluşturması

2.2.1.5 Mineral katkıları ve ajanlar

Yapılan çalışmalarda, çatlak oluşumundan sonra betonun çatlaklarını azaltmak hedefiyle mineral katkıları kullanılmıştır. Hidratasyon reaksiyonları sonucunda elde edilen çimento ürünleri ve bu malzemelerin oluşumu çeşitli çalışmalarda gözlenmiştir (Ahn, 2008; Kishi vd., 2007). Kishi vd. (2007), herhangi bir mineral içermeyen referans beton numunesi ile çimentonun %10'u C_4A_3S , $CaSO_4$ ve CaO kombinasyonu ile ikame edilmiş bir beton numunesi arasında performans karşılaştırması yapmışlardır. Sonuçlar, numunelerin bir aylık kür süresinden sonra $220 \mu m$ 'ye varan çatlakların iyileştiğini göstermiştir. Ahn ve Kishi, (2008), SiO_2 içeriği %71,3 ve Al_2O_3 içeriği %15,4 olan katkı ile birlikte iyileştirici mineral eklenerek kendiliğinden iyileşme yeteneğinde değişiklikler gözlemlemiştir. Bu çalışmadan çıkan sonuca göre, karbonatların ve genişleyen maddelerin kullanımının çatlak iyileştirici özellikler sağladığı açıkça anlaşılmaktadır.

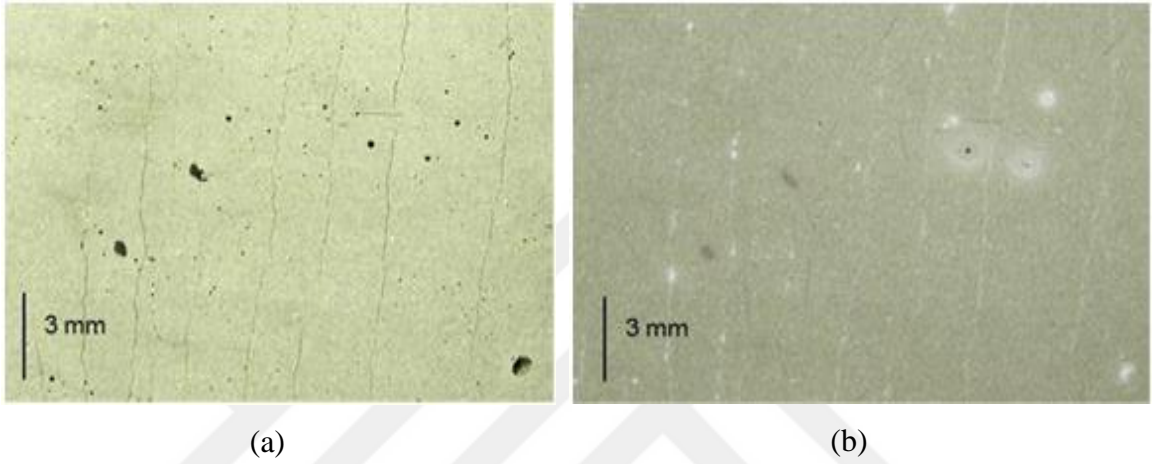
2.2.2 ECC'nin kendiliğinden iyileşme performansı ile ilgili çalışmalar

Kendiliğinden iyileşme davranışı esas olarak artan hidrasyon ve karbonatlaşmaya bağlıdır. Kendini iyileştiren ürünler sayesinde çimento esaslı numunelerin mekanik ve taşıma özellikleri iyileşmektedir. Detayları önceki bölümlerde verilen kendiliğinden iyileşme mekanizmalarının yanında, bu kısımda, iyileşme ürünlerinin mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkiler açıklanmaktadır. Kendiliğinden iyileşme davranışlarından önce ve sonra malzemelerin; geçirimsizlik, difüzyon ve su emme davranışının farklı olması beklenir. Bu sebeple, ECC numunelerinde bahsedilen bu nitelikleri detaylı bir şekilde incelemek gerekir.

2.2.2.1 Su geçirimsizliği

Lepech ve Li (2009), üç farklı çelik hasır donatı oranına sahip harç numuneleri ile birlikte çelik donatısız M45 kodlu standart ECC karışımı tasarlamışlardır. Tüm numuneler aynı çevre koşullarında tutulmuş ve farklı hasar oluşumları elde etmek için çekme gerilimi altında ön yükleme uygulanmıştır. Bazı numunelere karşılaştırma amacıyla önceden önyükleme uygulanmıştır. Testler sonucunda çatlaklı numunelerin su geçirgenliği normal numunelere göre 10^7 kat daha fazla çıkmıştır. Lepech ve Li'ye

(2009) göre, ECC'nin çok düşük su geçirimliliğinin, önyükleme sırasında oluşan kılcal çatlaklarla ilişkili olduğu söylenebilir. Ayrıca önyükleme düzeyinin büyük farklılıklara neden olmadığı da araştırma sonuçlarında yer almaktadır. Mikroskobik görüntülerde su geçirgenliği sonuçlarını destekler niteliktedir (Şekil 2.1). Elde edilen bulgular numuneler üzerindeki mikro çatlakların onarıldığını göstermiştir. Ayrıca kendiliğinden iyileşmeyi sağlayan son ürünün çoğunlukla kalsiyum karbonat kristalleri olduğu çalışmada kanıtlanmıştır (Lepech ve Li, 2009).



Fotoğraf 2.1. Kendiliğinden iyileşme öncesi (solda) ve sonrası (sağda) (Lepech ve Li, 2009)

Başka bir çalışmada, düşük lif hacimli (%0,5) karışımlar seçilerek tek çatlaklı numuneler incelenmiştir. Normal lif donatılı betonda olduğu gibi tek çatlak oluşumu ile gerilme yumuşaması sağlanması hedeflenmiştir. Çalışma kapsamında; 0-300 μm açıklıklara sahip çatlakların su geçirgenlik seviyeleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlarda; ıslanma-kuruma döngüsüne maruz bırakılan numunelerde 50 μm açıklığa sahip çatlakların iyileştiği ve sağlam numunelere yaklaştığı tespit edilmiştir (Yang vd., 2009).

2.2.2.2 Difüzyon

Normal betonlarda çatlaklar kaçınılmaz olsa da bu çatlakların betonun ömrünü kısaltması doğal kaynakların tüketiminin ve maliyetin artmasına neden olur. Özellikle buz çözücü tuzlar ve/veya deniz suyundan gelen klorür iyonları sebebiyle ciddi derecede hız kazanan donatı çeliği paslanması, bilinen en temel durabilite problemidir.

Betonda çatlakların oluşmasından sonra, klorür iyonları taşıma mekanizmalarıyla betona nüfuz ederek yapısal performansta ciddi hasarlara neden olmaktadır. Şahmaran vd. (2007) NaCl çözeltisine daldırılan standart ECC karışımı (M45) ve donatılı harç karışımları üzerinde klorür iyon difüzyonunun etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda ECC numunelerinin difüzyon katsayılarının oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. ECC numunelerinin kontrollü çatlak oluşturma davranışı sayesinde, ön yükleme ve çoklu çatlakların varlığına rağmen, difüzyon katsayısı son derece düşük seviyelere çekilebilmiştir.

2.2.2.3 Su emme

Beton yapıları etkileyen kuru veya kısmen kuru ortamlarda, taşıma mekanizması beton yapıdaki kılcal emme kuvvetine bağlıdır. Çimento partiküllerinin sürekli hidratasyonu ve uçucu külün nemli bir ortamda kendi kendini iyileştirmeye katkısı, mikro çatlakları onararak su emme seviyesini azaltabilir. Alousif vd. (2015) farklı ECC karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde kılcal su emme kapasitelerini araştırmışlardır. Deneyde; F sınıfı uçucu kül, yüksek kalsiyum oksitli C sınıfı uçucu kül ve öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu kullanılmıştır. %80'e kadar önyüklemeye maruz kalan kırıntı numuneleri 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerine ek olarak 7, 30, 60 ve 90 günlerde kürlenmiştir. Ek kür sürelerinden sonra tekrarlanan su döngülerinde su emme katsayısındaki düşüşler araştırılmıştır. Sonuçlarda mineral katkı maddesi ve kür süresi kendini iyileştirme davranışını aynı düzeyde etkilemese de genel sonuçlar değerlendirildiğinde yönelimin olumlu olduğu tespit edilmiştir.

2.2.2.4 Mekanik özellikler

ECC numunelerinin mekanik etkiler altında kendini iyileştirme davranışını belirlemek için eksenel çekme, eğilmede çekme ve yarmada çekme testleri kullanılmaktadır. Yang vd., (2009), 6 aylık numuneleri %0,3-%3 seviyelerindeki şekil değiştirme oranlarında çalışmışlardır. 10 ıslanma-kuruma çevriminde (su-hava döngüsü, su-sıcak hava döngüsü) kendiliğinden iyileşme performansını eksenel çekme testleri ile incelemişlerdir. Araştırma sonuçlarına göre, eksenel çekme deneyleri ile yapılan testlerde numunelerin 10 ıslanma-kuruma çevrimi sonrasında kür koşulları fark etmeksizin rijitlik değerlerinde iyileşmeler görülmüştür. Ancak eksenel çekme testi

sonucunda elde edilen %3 şekil değiştirme oranı ile numunelerin ön yüklemelerde bile başlangıç rijitlik değerlerini koruduğu tespit edilmiştir. Eksenel çekme yüklemesi altında %2-%3 şekil değiştirme oranına sahip numunelerde bile kendiliğinden iyileşme %1,8-%3,1 aralığında çekme gerilmeleri altında kayda değer şekil değiştirme kapasiteleri elde edildiği açıklanmıştır. Bir başka çalışmada da benzer şekilde ECC numunelerinin kendiliğinden iyileşme davranışı 10 ıslanma-kuruma çevriminde test edilmiştir. Çalışmalarda ECC numunelerinin rijitlik değerleri incelenmiş ve kendiliğinden iyileşme ile rijitliklerinde iyileşmeler olduğu tespit edilmiştir. 28 günlük ECC numuneleri; 30, 60, 90 günlük sürelerde sodyum klorür çözeltisi içerisinde tutularak, sırasıyla %0 (kontrol), %0,5, %1,0 ve %1,5'lik eksenel çekme şekil değiştirmesi oranında ön yüklenmiştir. Kontrol numuneleri ise; belirlenen ilave kür sürelerince oda sıcaklığında muhafaza edilmişlerdir. Araştırma sonucunda, numunelerin çekme dayanımları incelendiğinde tuzlu su gibi çok sert çevre koşullarında bile ECC numunelerinin kendini iyileştirme davranışına sahip olduğu ortaya konmuştur. ECC'nin kendiliğinden iyileşme davranışı buz çözücü tuzlar ve donma-çözülme çevrimleri parametreleri altında da incelenmiştir (Şahmaran ve Li, 2007). Üretiminde yüksek hacimde uçucu kül kullanılan ECC karışımlarından 28 günlük yaşlarda ön yükleyemeye tabi tutulmuşlardır. Sağlam numuneler ile ön yükleme yapılmış numuneler donma-çözülme çevrimlerinde buz çözücü tuzlar ile test edilmişlerdir. Deneylerde; önyükleme düzeyleri fark etmeksizin ECC numunelerinin başlangıç rijitlik değerlerinde zamanla önemli iyileşmeler meydana gelmiştir.

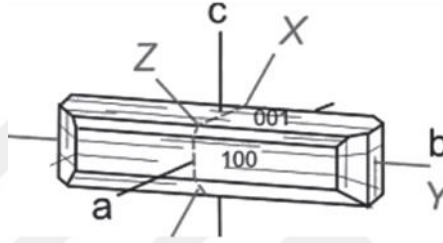
2.3 Vollaştonit

2.3.1 Vollaştonitin tanımı ve özellikleri

Vollaştonit, laboratuvarlarda kimyasal olarak üretilebilen doğal oluşumlu, metalik olmayan, iğnemsî, kristal yapılı, bazik özellikte, pH değeri 9.8 olan ve doğada beyaz renkte bulunan bir mineral türüdür. Ayrıca, safsızlıkların türüne ve miktarına bağlı olarak farklı renklerde (gri, krem, yeşil, kahverengi) de görülebilmektedir (Virta, 2001). Vollaştonit, adını İngiliz mineralog ve kimyager William Hyde Wollaşton'dan almıştır. Vollaştonit, kalsiyum, silisyum ve oksijenden oluşan kalsiyum metasilikattır (CaSiO_3) (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Denklem (2.4) volaştonit mineralinin kimyasal mekanizmasını açıklamaktadır (Paul, 1977).



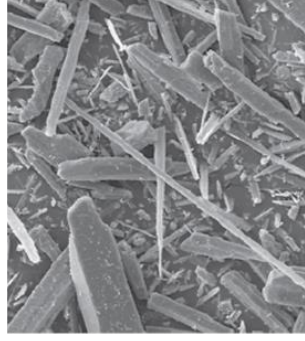
Vollastonit, Piroksen grubunun bir üyesi olan bu mineralin kristal yapısı zincir bileşiminde bulunmaktadır. Bu zincir bileşiminin iki dörtyüzlünün aktif oksijenleri bir tarafta yer alırken, üçüncü dörtyüzlünü aktif oksijenleri başka bir tarafta yer almaktadır (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Bu oksijen dağılımı mineral parçacığının lifsel doku ve yassı kristal şekil ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Yassı bir özelliğe sahip olan 16 vollastonit kristalleri Şelik 2.7’de görüldüğü üzere b eksenine paralel bir şekilde uzanmıştır ve genellikle masif, lifsel topluluklar halinde bulunmaktadır (Kumbasar, 1977).



Şekil 2.7. Vollastonit kristali (ICL, 2012)

Teorik kompozisyonu, %48,3 CaO ve %51,7 SiO₂’den oluşmaktadır. Nadiren saf olarak bulunur. Vollastonite minerali, iğne benzeri parçacık yapısına sahip kimyasal olarak inert bir malzemedir. Dilinim özelliğinden dolayı kırma ve öğütme işlemi sırasında iğne benzeri parçacıklar oluşur. Bu parçacıkların iğnemsiliği boy:çap oranı ile tanımlanır. (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Vollastonit mineralinin iğne benzeri parçacık yapısı Şekil 2.8’de görüldüğü gibidir.

Vollastonit minerali düşük kızdırma kaybı değerine sahiptir. Endüstriyel alanda kullanılan vollastonit minerallerinde bu değer 0.5-2.0 aralığında olduğu bilinmektedir. Ayrıca Mohs skalası sertlik değeri 4.5-5.0 arasında olan vollastonit mineralinin özgül ağırlığı 2.87-3.09 gr/cm³, ergime noktası ise 1540 °C olarak bilinmektedir (Anon., 2001; Kogel vd., 2006).



Şekil 2.8. Wollastonit minerali (NYCO, 2012)

2.3.2 Doğal ve sentetik wollastonit

2.3.2.1 Doğal wollastonit

Wollastonit, silisli kireçtaşının 450 °C veya üzerindeki sıcaklıklarda metamorfizma sonucu oluşan ve magmatik zonlarında meydana gelen kalsiyum metasilikat (CaSiO₃) olarak da tanımlanabilen endüstriyel bir mineraldir (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013).



Kuvars ve kalsit, düşük sıcaklıklarda kararlı bir kombinasyon oluşturur. Sıcaklık yaklaşık 400-450 °C'ye yükseldiğinde reaksiyon başlar. Bu reaksiyon 1*10⁵ Pa atmosfer basınç altında gerçekleşir ve kalsit veya kuvarz eriyiği bitinceye kadar devam eder. Wollastonit oluşumuyla birlikte CO₂ emisyonları basıncı artıracığından reaksiyonun devam etmesi için gereken yüksek sıcaklık daha da artmaktadır (950 °C'ye kadar). Bu sırada, CO₂ gazının doğal kırık ve çatlak bölgelerine kaçma eğilimi, basıncın düşmesine neden olur. Bu basınç düşüşü ile reaksiyon düşük sıcaklıklarda devam eder. Ancak basınç yükseldiğinde reaksiyon sıcaklığında ani bir artış gözlenmez. Tam aksine reaksiyon ve kalsit oluşumu gerçekleşir. Ayrıca, wollastonit nadiren azami miktarda karbon içeriğine sahip olan erimiş kayadan (magma) doğrudan kristalleşir. Ancak, bu magmaların kökeni tartışmalıdır. (Andrews, 1970; Fattah, 1994; Kogel vd., 2006; Virta, 2001).

2.3.2.2 Sentetik vollastonit

Kalsit, diyopsit ve granat gibi mineraller ile karışmış halde bulunan vollastonit minerali, doğada az miktarda bulunmaktadır. Dolayısıyla vollastoniti doğal olarak elde edebilmek için bu minerallerden arındırmak gerekmektedir. Sentetik vollastonit, doğal vollastonite göre daha homojen bir yapıya sahiptir ancak iğnemsiz kristal yapı dikkate alındığında sentetik vollastonitin iğnemsiz kristal yapısı doğal vollastonitinkine kadar iyi olmayabilir. Mevcut literatür çalışmaları incelendiğinde sentetik vollastonit üretimi için üç farklı metot bulunmaktadır. Bu metotlar; ıslak metot, katı hal reaksiyon metodu ve sıvı faz reaksiyon metodu olarak isimlendirilmektedir.

2.3.3 Vollastonit mineralinin kullanım alanları

Vollastonit mineralinin temel uygulama alanlarının seramik, boya, metalurji, kaplama, plastik ve asbest yerine kullanımı olduğu bilinmektedir. Bu mineralin bu pazarlarda çok popüler olmasının ana nedeni, iğne benzeri parçacık yapısının yüksek mukavemet özellikleri sağlamasıdır. Vollastonit minerali, seramik alanında; %28, plastik alanında; %37, metalurji alanında; %10, boya alanında; %10, sürtünme ürünlerinde; %9 ve farklı sanayilerde; %6 oranında kullanılmaktadır (Virta, 1999).

2.3.3.1 Seramik sanayi

Vollastonit minerali seramik başta olmak üzere seramik beyaz eşyalarda kullanılmakta olup, seramik karo, sofrta takımı ve sanatsal ürünlerde kullanılmaktadır. Vollastonit mineralleri bu ürünlere düşük nem difüzyonu, hızlı pişirme, düşük büzülme, mukavemet ve boyutsal homojenlik sağlar (Kogel vd., 2006). Vollastonitin iğnemsiz parçacık yapısının sağlık gereçlerinde mukavemeti artırdığı, florin yayılımını azalttığı ve kurumayı hızlandırdığı bilinmektedir. Belirli bir patentte, sağlık gereçleri gövdesinin kuru haldeyken darbe dayanımını %40'tan fazla artırdığı ve virtifikasyon sıcaklığını azalttığı belirtilmektedir (Kogel vd., 2006; Robinson ve Craig, 2000).

Vollastonitin seramik ürünlerin mineralojik ve kimyasal özelliklerine birçok katkısı olduğu bilinmektedir. Bu özellikler detaylı olarak incelenirse, vollastonit iğne benzeri tanecik yapısı sayesinde sadece pişmemiş killeri yüksek hızlı presleme ile daha

dayanıklı kılmakla kalmaz, aynı zamanda pişmemiş karolarda nemin kaçmasına yardımcı olarak nem genişmesinin tekrarını azaltır. Ayrıca duvar karolarının akustik özelliklerini geliştirir ve düşük ısıl genişmeye sahip olduğundan dolayı küçülmeyi önler. Vollastonit minerali, 991-1196 °C'lik düşük bir sinterleme sıcaklığına ve iyi bir yalıtkanlık özelliğine sahiptir. CO₂ emisyon değeri çok düşük (%1'in altında) olan volastonit mineralinin geleneksel minerallere göre daha avantajlı durumda olduğu bilinmektedir. Vollastonit minerali ayrıca sır yüzeyindeki lekeleri, düşük gaz içeriğini ve erime anında kabarmayı azaltmaktadır (Springer, 1994).

2.3.3.2 Plastik sanayi

Plastik sektörü, volastonit mineralinin yaygın olarak kullanıldığı ve büyük bir pazara sahip olduğu bir alandır (Degryse ve Elsen, 2003). Vollastonit minerali, bitmiş bir malzemenin özelliklerine katkıda bulunduğundan, plastik alanında dolgu malzemesi olarak diğer beyaz dolgu malzemeleriyle rekabet seviyesinde olabilmektedir. Vollastonitin bu alanda dolgu malzemesi olarak kullanılması, düşük su emme, termal kararlılık, kimyasal saflık, termal iletkenlik ve düşük reçine gereksinimi gibi destekleyici özellikleriyle ilgilidir (IARC, 1997).

Vollastonit kullanılarak beyaz ve yüksek parlaklıkta yüksek kaliteli dolgu malzemeleri elde edilebilmektedir. Dolgu malzemelerindeki vollastonit mineralinin beyazlık ve parlaklık özelliklerinin yanı sıra bu dolgu maddelerinin darbe, eğilme ve büzülme parametreleri de gelişmektedir. Ayrıca seramik ürünlerde olduğu gibi çekmeyi azaltır, zemin kaplamasında sürtünmeyi ve aşınma direncini artırır. Vollastonit minerali, karbonat veya talk gibi dolgu malzemelerine göre düşük su emme değerine sahiptir ve reçineli karışımlardan etkilenmemektedir.

Plastiğin üzerindeki düşük su emme değeri sayesinde leke ve suya karşı direnç sağlar. Ayrıca düşük elektrik iletkenliği sayesinde plastik üretimine olanak sağlamaktadır. Termoset ve termoplastiklerde de kullanımı bulunan vollastonit minerali, termoplastikler için sıvı kristal polimerler, naylon6, poliyester, mühendislik reçineleri, naylon6/6 gibi ürünlerde kullanılmaktadır. Termosetlerde ise poliüretanlar, poliüre, epoksiler, fenolik kalıp bileşenleri ve bazı doymamış polistiren ürünlerinde uygulamaları vardır. Ancak günümüzde fiyatları vollastonit fiyatından daha ucuz

olduğu için cam elyafı, talk, mika gibi dolgu malzemelerinin kullanımı daha yaygındır (IARC, 1997).

2.3.3.3 Boya ve kaplama uygulamaları

1950'lerin başında, Amerika Birleşik Devletleri pazarında kaplama uygulamaları için, yüksek parlaklıkta bulunan vollastonit kullanılmaya başlanmıştır. O yıllarda sadece 3:1-20:1 boy:çap aralığına sahip olan vollastonit minerali, saf beyaz sivri uçlu bir katkı maddesi olarak bilinmektedir. Vollastonitin bu iğnemsiz parçacık yapısı, olumsuz hava koşulları altında boya kaplamalarında aşınma direnci ve mekanik mukavemet özelliklerinin iyileştirilmesine katkıda bulunmaktadır. Ayrıca kılcal çatlaklara, çatlamlara ve zamanla oluşabilecek hatalara karşı direnç sağlamaktadır (IARC, 1997). Vollastonit, rengi (beyaz), yüksek pH değerlerinde kararlılığı, iyi ıslatma özellikleri ve düşük yağ emme özellikleri nedeniyle akışkanlık, küf ve renk gibi özelliklerin gerekli olduğu kaplamalara ilave edilmektedir. Vollastonit mineralinin yol çizgileri ve su bazlı emülsiyon boyalarında dolgu ve katkı maddesi olarak kullanıldığı bilinmektedir (IARC, 1997). Vollastonitin beyaz rengi ve parlaklığı, boya uygulamalarında boyalara parlak renkler vermektedir. Ayrıca vollastonitin temel özelliği sayesinde süspansiyonlarda güçlü bir astar olarak kullanılmaktadır. Vollastonit katkılı dış cephe boyaları, kendi kendini temizleyen ve özel tanecik morfolojisi sayesinde olumsuz hava koşullarına dayanıklılık sağlamaktadır (Andrews, 1970; Fattah, 1994; Springer, 1994).

2.3.3.4 Metalurjik uygulamalar

Vollastonit minerali, düşük ergime noktası nedeniyle sac yapımında uygulanan sürekli döküm işleminde önemli bir malzemedir. Ayrıca vollastonit mineralinin cüruf düzenleyici olarak da kullanıldığı bilinmektedir (Kogel vd., 2006). Örnek olarak, bir rafinaj potasındaki ergime çelik refrakter tandış içine döküldüğünde, ergimiş yüzeyin sürekliliği oluşana kadar vollastonit eklenmektedir. Bu işlem metal yüzeyinin oksidasyonunu engeller, kalıp duvarını yağlamak ve metal artıklarının emilimini sağlamak için uygulanmaktadır. Vollastonit minerali ayrıca kaynak tozu yönteminde yanma özelliklerini iyileştirmek veya kıvılcımları önlemek için kullanılır. Tüm bu metalurjik uygulamalara rağmen vollastonitin bu alandaki uygulamaları çok sık değildir (Fattah, 1994; Springer, 1994; IARC, 1997). Ayrıca bu alanda kullanılan vollastonit

minerallerinin düşük boy:çap oranında veya toz (45 veya 75 µm) formda olduğu bilinmektedir (Kogel vd., 2006).

2.3.3.5 Diğer uygulamalar

Enerji ihtiyacını azaltmak için cam ve cam elyafı alanında kalker ve silika yerine vollastonit minerali kullanılmaktadır. Ayrıca kaynak elektrotlarında, aşındırıcılarda, toprak düzenleyicide, kağıtta dolgu malzemesi olarak kullanılır. Vollastonit mineralinin yeni kullanım alanının kemik implantları olduğu bilinmektedir. Bu implantlar kemik kaybında kullanılır. Bu uygulama alanında β -vollastoniti tercih edilir. β -vollastoniti ile elde edilen implantlar kemik dokusu ile güçlü bağlar oluşturduğundan dolayı omur protezlerinde kullanımının oldukça etkili olduğu bilinmektedir.

2.4 Vollastonitin Çimento Esaslı Kompozitlerde Kullanımı

Çimento esaslı kompozitlerin karışımında mineral katkı maddesi olarak kullanılan vollastonit, kompozitlerin mekanik ve mukavemet özelliklerini geliştirerek daha dayanıklı malzemelerin elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Wahab vd., 2017; Kalla vd., 2013).

Mathur vd. (2007) tarafından yapılan çalışmaya göre, beton karışımına %10 vollastonit eklenmiş olup, çalışma sonucuna göre, vollastonitin betonun basınç ve eğilme dayanımını 28 ve 56 günde %28-35 ve %36-42 oranlarında artırdığını bulmuşlardır. Ransinchung vd. (2009) ise %15'e kadar vollastonit ve %7,5'e kadar mikro silika kullanımının mikroyapıyı geliştirdiğini ve betonun su geçirimsizliğini önemli ölçüde iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

Ransinchung ve Kumar (2010) tarafından yapılan araştırmada, %82,5 çimento, %10 vollastonit ve %7,5 mikrosilika betonun basınç dayanımının arttığı belirlenmiştir. Dey vd. (2015), çimentonun yerine %10 oranında ilave edilen vollastonit-silis dumanı birleşiminin eğilme ve basınç dayanımlarını sırasıyla %40 ve %30 oranlarında, kırılma tokluğu değerini ise %150 oranında artırdığını belirlemişlerdir. Soliman ve Nehdi (2012), çimento esaslı kompozitlerde vollastonit mineralinin kullanımının artması ile basınç dayanımı ve çatlaklara karşı olan direncin arttığını, büzülme gerilmelerinin

azaldığını, fakat eğilme dayanımında önemli bir iyileşmenin görülmediğini belirtmişlerdir. Durabilite özellikleri olarak ise, betonun su emme ve aşınma kaybı değerlerini azalttığı, donma çözülme ve sülfata karşı dirençleri ise geliştirdiği tespit edilmiştir.

Yücel ve Özcan (2019), tarafından yapılan araştırmada, sentetik volastonitin çimento harcının mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkisi deneysel olarak araştırılmıştır. Çimento harcı, kontrol harcı olarak sentetik volastonit kullanılmadan ve çimento yerine %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında sentetik volastonit kullanılarak üretilmiştir. 7. ve 28. günlerde basınç ve eğilme mukavemeti testleri yapılmıştır. Ayrıca %0, %3, %9 ve %15 oranlarında sentetik volastonit içeren karışımlara 28. günde SEM/EDX, TGA/DTA ve FTIR analizleri uygulanmıştır. Test sonuçları, çimento harcının mekanik performansının %9 sentetik volastonit içeriğine kadar arttığını göstermiştir. Bununla birlikte, %12 ve %15 sentetik volastonit içeren çimento harcının, kontrol harcından daha yüksek basınç ve eğilme mukavemetine sahip olduğu tespit edilmiştir. Mikroyapısal analizler, sentetik volastonit içeren çimento harcının dayanım özelliklerindeki iyileşmenin, sentetik volastonitin iğnemsî parçacık yapısı ile açıklanabileceğini göstermiştir. Ayrıca TGA/DTA ve FTIR analizine göre, sentetik volastonitin artmasıyla çimento harçlarındaki CaCO_3 'ün azaldığı gözlemlenmiştir.

Öz ve Güneş (2020), tarafından yapılan çalışmaya göre, sentetik volastonit mineralinin yüksek performanslı harç üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu çalışma ile ilk olarak vollastonit, belirli bir üretim yöntemi ile sentetik olarak elde edilmiştir. Daha sonra, yüksek performanslı harç üretiminde %3'lük artışlarla %0'dan %12'ye kadar çimento yerine sentetik vollastonit kullanılmıştır. Yüksek performanslı harçların akış çapları belirlendikten sonra 28. ve 90. günde mekanik ve durabilite özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca %0, %9 ve %12 oranlarında sentetik volastonit ile tasarlanan yüksek performanslı harçların mikroyapısal performans özellikleri TGA/DTA, FTIR, SEM/EDX ve XRD analizleri ile belirlenmiştir. Test ve analiz sonuçları, sentetik volastonitin yüksek performanslı harçların işlenebilirliğini azalttığını, mekanik ve durabilite özelliklerini iyileştirdiğini göstermiştir. Mikroyapısal analizler, sentetik volastonitin yüksek performanslı harç üzerindeki geliştirici etkisini vollastonitin iğnemsî parçacık yapısıyla açıklamıştır.

Yücel vd. (2021), çimento, uçucu kül ve çimento+uçucu kül yerine farklı oranlarda özel bir teknikle geliştirilen maksimum 44:1 boy:çap oranına sahip sentetik vollastonit mikrofiberleri ECC içerisinde kullanmışlardır. 44:1 boy:çap oranıyla sentetik vollastonit, iğnemsiz paracık yapısından dolayı akış sırasında birbirine kenetlenme sonucu işlenebilirliği azaltmıştır. Çimento yerine 44:1 boy:çap oranına sahip sentetik vollastonit kullanıldığında, artan vollastonit içeriği nedeniyle basınç dayanımının düştüğü ve sünekliğin önemli ölçüde arttığı tespit edilmiştir. Uçucu kül yerine 44:1 boy:çap oranına sahip sentetik vollastonit kullanıldığında, mekanik performansın basınç dayanımı ve eğilme performansı açısından %6 sentetik vollastonit içeriğine kadar iyileştiği tespit edilmiştir. Ancak çimento+uçucu kül yerine 44:1 boy:çap oranına sahip sentetik vollastonit kullanıldığında, hem “deformasyon kapasitesinin artırılması” hem de “çatlak sonrası fiber köprüleme ile taşıma mukavemetinin korunması” açısından optimum verilere ulaşılmıştır. Bu nedenle, daha düşük maksimum boy:çap (30:1) oranına sahip olan diğer sentetik vollastonitin etkisi bu karışımda yine çimento+uçucu kül yerine kullanılarak incelenmiştir. Daha yüksek boy:çap (44:1) oranına sahip olan sentetik vollastonit ECC'nin mekanik performansını, daha düşük boy:çap (30:1) oranına sahip olan sentetik vollastonitten daha yüksek seviyeye ulaştırmıştır. Sonuç olarak, çimento+uçucu kül yerine 44:1 boy:çap oranına sahip sentetik vollastonit %6 oranında kullanıldığında kontrol ECC'nin basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve sünekliği, 7-28 günde sırasıyla %19,0-%12,5, %12,0-%8,2 ve %56,2-25,5 oranlarında yükselmiştir.

BÖLÜM III

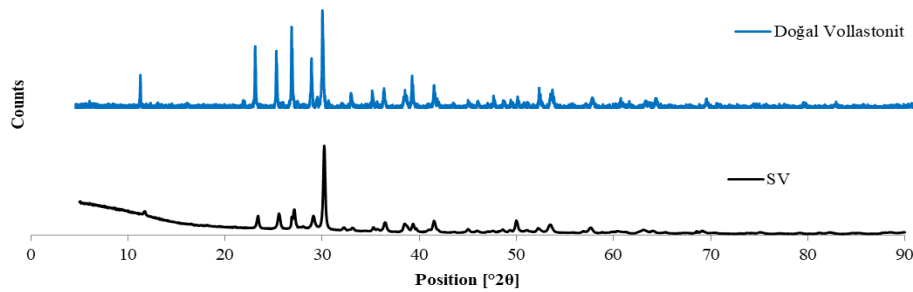
DENEYSEL ÇALIŞMA

3.1 Sentetik Vollastonit Üretimi

Çalışmanın bu bölümü, doğal CaO ve silis tozu (SiO_2) kullanılarak, birçok deneme-yanılma sonucu önceden gerçekleştirilen ve son derece yüksek, maksimum boy:çap oranına (44:1) sahip olan sentetik vollastonitin (SV) üretimini kapsamaktadır. SV, 1:1 mol CaO (56,08 gr) ve SiO_2 'nin (60,08 gr) katı madde ağırlığı kadar su (116,16 gr) ile 30 dakika boyunca 250 RPM hızda bilyalı öğütücüde karıştırılması ile üretilmiştir. Üretim aşamasının mekanokimyasal süreci bu şekilde tamamlandıktan sonra, teflona yerleştirilen karışım otoklav içerisinde 200 °C'de bekletilmiştir. Hidrotermal otoklav ile oluşturulan sıcaklık ve basınçta 2 gün kalan karışımdan tobermorit minerali elde edilmiştir. Ön öğütme işleminden sonra, tobermorit 1000 °C'de 1 saat kalacak şekilde kül fırında bırakılmış ve SV geliştirilmiştir. Son öğütme işleminden sonra SV ECC içerisinde kullanılmıştır.

3.2 Üretilen SV'nin XRD, SEM ve XRF Analizleri

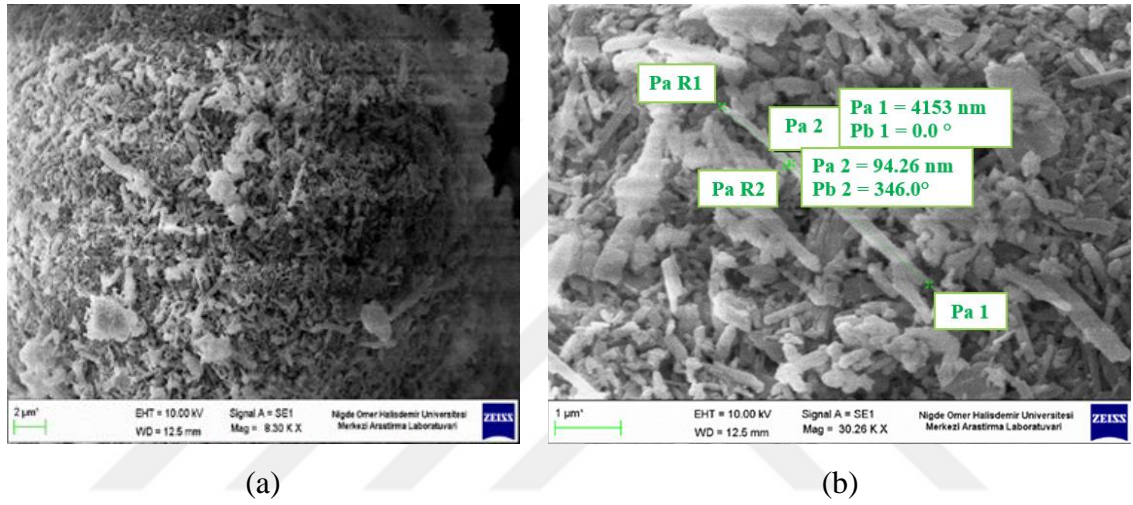
Doğal vollastonite ve SV'ye ait XRD pik değişimi Şekil 3.1'de verilmiştir. XRD analizi sonucu oluşan pikler incelendiğinde genel olarak doğal vollastonitin sahip olduğu pikler ile doğal hammaddelerle üretilen SV'nin pikleri büyük ölçüde benzerlik göstermiştir. Özellikle 30-40 position [$^{\circ}2\theta$] seviyelerinde yüksek piklerin oluştuğu görülmüştür.



Şekil 3.1. Doğal vollastonit SV'nin XRD pik değişimleri (Yücel vd., 2019)

Doğal kaynaklardan üretilen vollastonitin SEM görüntüleri Fotoğraf 3.1'de verilmiştir.

Fotoğraf 3.1(a) incelendiğinde SEM görüntüsündeki alanın çoğunun iğnemi parçacık yapısına sahip parçacıklar içerdiği görülmektedir. Fotoğraf 3.1(b)'de ise maksimum iğnemi parçacığın boy:çap oranı incelenmiş ve 44:1 olarak belirlenmiştir. Literatürde 20:1 boy:çap oranının yüksek kabul edildiği bilinmektedir (Maxim ve McConnell, 2005). Buna göre SV'nin oldukça yüksek boy:çap oranına sahip bir vollastonit olduğu söylenebilir. Vollastonitin artan boy:çap oranının çimentolu kompozitlerin performansını geliştirdiği düşünüldüğünde bu vollastonitin, tasarlanmış geopolimer kompozitlerde kullanılması son derece önemlidir.



Fotoğraf 3.1. Doğal kaynaklardan elde edilen SV'nin SEM görüntüsü (a) ve maksimum boy:çap oranının belirlenmesi (b) (Yücel vd., 2019)

SV mineralinin ve farklı ülkelerdeki doğal vollastonitlerin kimyasal içerikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. SV'nin CaO ve SiO₂ içeriklerinin doğal vollastonitlerle son derece benzer olduğu ve bu bileşenlerin toplamının %96'nın üzerinde olduğu görülmektedir. SEM, XRD ve XRF sonuçlarına göre özel bir metotla geliştirilen bu ürünün net bir şekilde vollastonit olduğu söylenebilir.

Çizelge 3.1. SV'nin ve farklı ülkelerdeki vollastonitlerin kimyasal bileşenleri

Kimyasal Bileşenler (%)	Finlandiya	ABD	Hindistan	Kenya	Meksika	Çin	SV
CaO	45	47	48	42	47	43-50	45,74
SiO ₂	52	51	49	55	52	46-53	50,71

3.3 ECC Karışımlarında Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Tüm karışımlarda, ASTM Tip I'e uyumlu CEM I 42,5R normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun (C) özgül ağırlığı 3,10 ve ikinci bir bağlayıcı olarak, ASTM C618 (2015) standartlarına uygun F sınıfı uçucu külün (UK) özgül ağırlığı 2,34'tür. SV mineralinin özgül ağırlığı 2.90 olarak belirlenmiştir. C, UK ve SV malzemelerinin kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de tane boyutu dağılımları ise Şekil 3.2'de sunulmuştur. Ayrıca C ve UK'ye ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Fotoğraf 3.2'de verilmiştir. Çimentonun mikro ölçekteki tanecik yapısı pütürlü (pürüzlü) bir yüzeye, uçucu külün tanecik yapısı küresel (oval) bir şekle ve SV mineralinin tanecik yapısının iğnemsî bir parçacık yapısına sahip olduğu tespit edilmiştir. ECC üretiminde, ülkemizdeki yerel kaynaklardan Pomza Export adlı firma tarafından temin edilen agrega tane boyutu 0-400 µm olan ince silis kumu kullanılmıştır. Kullanılan silis kumunun su emme kapasitesi ve özgül ağırlığı sırasıyla %0,3 ve 2,65'dir. Bu agregalar için tane boyutu dağılım eğrileri Şekil 3.2'de gösterilmiştir. ECC karışımlarının işlenebilirliğini arttırmak için, BASF Yapı Kimyasalları tarafından üretilen ve eski adı glenium 51 olan masterglenium 51 isimli bir polikarboksilik eter tipi süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. Bu malzemenin özgül ağırlığı ve katı içeriği sırasıyla, 1,1 ve %40'dır.

ECC'nin gösterdiği yüksek sünekliliğin ana sebebi, mikro-mekanik tabanlı tasarımı sayesinde ECC'nin ilk çatlak oluşumundan sonra şekil değiştirme sertleşmesi sergilemesidir. Mikro-mekanik tasarım aşamasında lifin mekanik ve fiziksel özellikleri gibi parametreler kullanılmaktadır. ECC üretiminde çeşitli lif türleri kullanılmış olmasına rağmen, bu çalışmada poli-vinil alkol esaslı (PVA) lif kullanılmıştır (Fotoğraf 3.3). PVA lifleri, olağanüstü kompozit performans sergilemesi ve ekonomik açıdan pahalı olması nedeniyle çok değerli bir malzemedir. PVA lifler, 8 mm uzunluğunda ve 39 µm çapındadır. Lifin nominal gerilme direnci 1620 MPa ve lifin yoğunluğu 1300 kg/m³'tür. PVA lifinin geometrik özellikleri mikro-mekanik hesaplar sonucunda hesaplanmış olup bu life ait mekanik ve geometrik özellikler Çizelge 3.3'de özetlenmiştir. PVA lifinin yüzeyi, lif/matris ara yüzey bağ kuvvetini azaltmak için hidrofobik yağ (ağırlıkça %1,2) ile kaplanır. Malzeme homojenliğini hesaba katmak için, tipik olarak karışım tasarımında hesaplanan kritik lif içeriğinin üzerinde hacimce %2 oranında bir lif içeriği kullanılmıştır. Bu lif oranı, ECC mikro mekanik malzeme

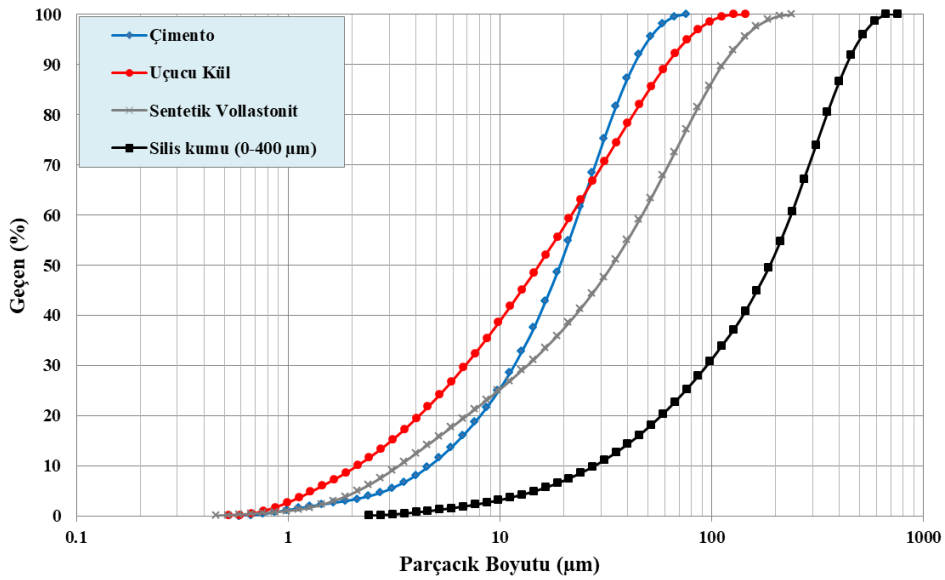
tasarım teorisi ile belirlenmiş olup, önceki araştırmalarda ECC özellikleri için optimum değer olduğu ispatlanmıştır (Li vd., 2001; Kong vd., 2003).

Çizelge 3.2 Çimento, uçucu kül ve SV kimyasal ve fiziksel özellikleri

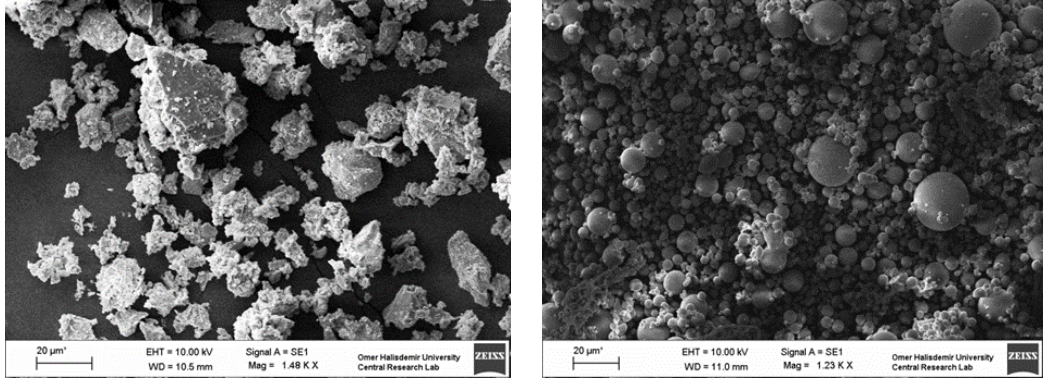
Kimyasal Analiz (%)	C	UK	SV 16
CaO	60,15	4,69	51,99
SiO ₂	20,46	53,9	44,05
Al ₂ O ₃	7,78	23,19	0,33
Fe ₂ O ₃	3,09	7,93	0,11
MgO	2,66	1,62	0,78
SO ₃	2,33	0,70	0,69
K ₂ O	0,82	1,91	0,02
Na ₂ O	0,22	1,06	-
TiO ₂	0,30	1,22	-
Fiziksel Özellikler	C	UK	SV
Kızdırma Kaybı	2,55	1,70	2,07
Özgül Ağırlık	3,10	2,34	2,90

Çizelge 3.3. PVA liflerinin mekanik ve geometrik özellikleri

Lif Türü	Nominal Dayanım (MPa)	Görünen Dayanım (MPa)	Çap (µm)	Uzunluk (mm)	Elastik Modülü (GPa)	Uzama (%)	Özgül Ağırlık
PVA	1620	1092	39	8	42,8	6,0	1,3



Şekil 3.2. ECC karışımlarını oluşturan malzemelerin tane boyutu dağılımları



(a)

(b)

Fotoğraf 3.2 Çimento (a) ve UK'nin SEM görüntüleri (b)**Fotoğraf 3.3** ECC karışımlarında kullanılan PVA lifi

3.4 ECC Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü

Bu çalışmada, SV mineralinin ECC'nin kendiliğinden iyileşme özelliğine olan etkisini incelemek için, Danışman tarafından daha önce gerçekleştirilen MAG-217M182 kodlu TÜBİTAK projesi referans alınmıştır. Projeden elde edilen sonuçlara göre, taşıma gücü ve deformasyon kapasitesinin yanı sıra, durabilite ve boyutsal stabilite verileri ECC içerisinde C+UK yerine optimum SV kullanım yüzdesinin 6 olduğunu göstermiştir. Ayrıca, yine aynı projeden C+UK yerine %6 SV kullanılan karışımda lif tasarrufuna gidilmiş olup, %1.6 PVA lifi ile kontrol karışımına benzer taşıma gücü ve deformasyon kapasitesi verilerine ulaşılmıştır. Bu nedenle, çalışmada standart ECC karışımının (SV%0_2.0PVA) yanı sıra %6 SV ve %2.0 PVA içeren ECC (SV%6_Ç-UK_2.0PVA) ve %6 SV ve %1.6 PVA (SV%6_Ç-UK_1.6PVA) içeren ECC karışımları üretilmiştir. Bu karışımlar, (Çizelge 3.4) sunulmuştur. Bu çalışmada, ECC karışımlarının hazırlanmasında 20 litre kapasiteli bir harç mikseri (Fotoğraf 3.4) kullanılmıştır.

Çimento, mineral katkı (FA ve/veya SV) ve agrega gibi katı bileşenler ilk önce bir dakika için 100 RPM’de karıştırılmıştır. Daha sonra kuru karışıma su ve SA katkısı ilave edilmiş ve homojen bir ECC matrisi (PVA lifi olmadan) üretmek için bir dakika boyunca 150 RPM’de ve sonra iki dakika boyunca 300 RPM’de karıştırılmıştır. PVA lifi en son eklenmiş ve 150 RPM’de üç dakika daha karıştırılmıştır. ECC üretim aşamasına ait fotoğraf 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.4. ECC karışım oranları (kg/m³)

Karışımlar	UK/C	(UK+SV)/C	SV/C	SV/UK	C	UK	Su	PVA	Silis Kumu	SV	SA
SV%0_2.0PVA	1.20	1.20	0.00	0.00	566.4	680.1	331.1	26.0	452.7	0.0	4.95
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	1.20	1.34	0.14	0.12	534.0	640.8	332.0	26.0	454.0	75.0	9.27
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	1.20	1.34	0.14	0.12	536.2	643.4	333.3	20.8	455.8	75.3	9.45



Fotoğraf 3.4. ECC üretim aşaması

Her ECC karışımından 7. ve 28. deney günleri için 3'er numune her yükleme koşulu altında test edilmiştir. Basınç dayanımı için 50 mm'lik küp numuneler ve dört noktalı eğilme deneyleri için 360x50x75 mm prizma numuneleri hazırlanmıştır. Hızlı klor geçirimsizliği ve kılcal su geçirimsizliği için 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda silindir numuneler alınmış ve deney koşulları için istenen ölçülerde kesilmiştir. Tüm numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve nemli plastik torbalarda 28 gün boyunca kür edilmiştir (Fotoğraf 3.5).



Fotoğraf 3.5. Üretimden sonra ECC numunelerinin kür edilmesi

3.5 ECC Karışımlarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi

3.5.1 Basınç dayanımı

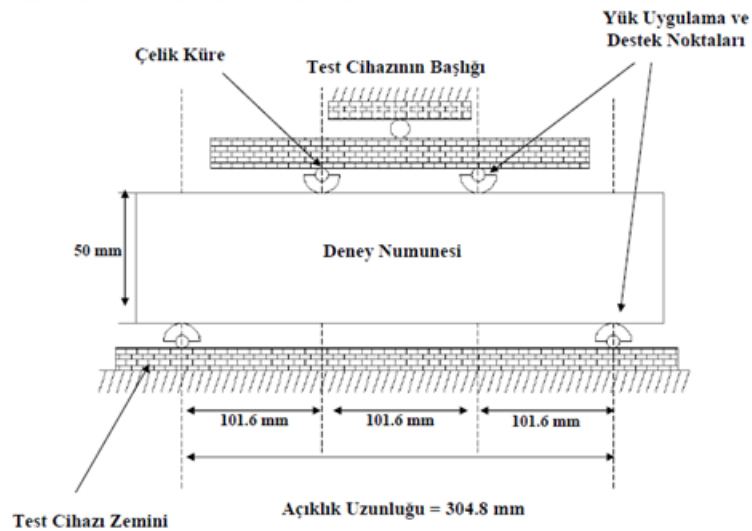
Basınç dayanımı testi ASTM C39 (2003) standardına uygun olarak 100 ton kapasiteli bir test cihazı kullanılarak küp numuneler üzerinde yapılmıştır. PVA lif içermeyen (ECC matrisi) ve PVA lif içeren her ECC karışımından 50 mm boyutlarında üçer adet küp numune alınmıştır. ASTM C39'a (2003) uygun olarak 3000 kN kapasiteli test makinesi kullanılarak küp numuneler üzerinde 7. ve 28. günlerde basınç dayanımı testi yapılmıştır (Fotoğraf 3.6). Bu süre boyunca numuneler özel hava geçirimsiz poşetlerde kür edilmiştir.



Fotoğraf 3.6. Basınç dayanımı test cihazı ve basınç dayanımının belirlenmesi

3.5.2 Eğilme performansı

ECC karışımlarının eğilme performansını ölçmek için, üretilen her ECC karışımından 360x75x50 mm boyutlarında üç prizmatik numune alınmıştır. Eğilmede-çekme deneyi üniversal test sistemi kullanılarak, karışımların eğilme yükü altında özelliklerinin belirlenmesi için kiriş numuneleri üzerinde, önce numune temizlenerek Şekil 3.5’da görüldüğü gibi yüklerin uygulanacağı noktalar belirlenmiş ve dört noktalı eğilmede çekme testi uygulanmıştır. Eğilme yükünün açıklık uzunluğu, 101.6 mm, merkez açıklık uzunluğu ile 304.8 mm’dir. Eğilme deneyleri, kapalı devre elektro-mekanik test cihazı ile deformasyon kontrollü olarak (literatürde yapılmış olan çalışmalarda olduğu gibi 0.003 mm/saniye hızla) yapılmıştır. Yükleme çerçevesinin kapasitesi 100 kN’dir. Deney sırasında, numunenin orta noktasında oluşan şekil değiştirme yüksek hassasiyette bir video ekstensometre seti ile ölçülmüş (Şekil 3.3) ve buna karşılık gelen yük bilgisayar sistemi sayesinde hassas bir şekilde (saniyede 10 veri olacak şekilde) kaydedilmiştir. ECC karışımlarının dört noktalı eğilmede çekme testi sırasındaki davranışı Fotoğraf 3.7’da gösterilmiştir. Eğilme testlerinden sonra, numunelerin yüzeyindeki çatlak genişlikleri el mikroskobu kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 3.3. Dört noktalı eğilmede-çekme testi için deney düzeneği



Fotoğraf 3.7. Üniversal test sistemi ve ECC'nin dört noktalı eğilmede çekme testi sırasındaki davranışı

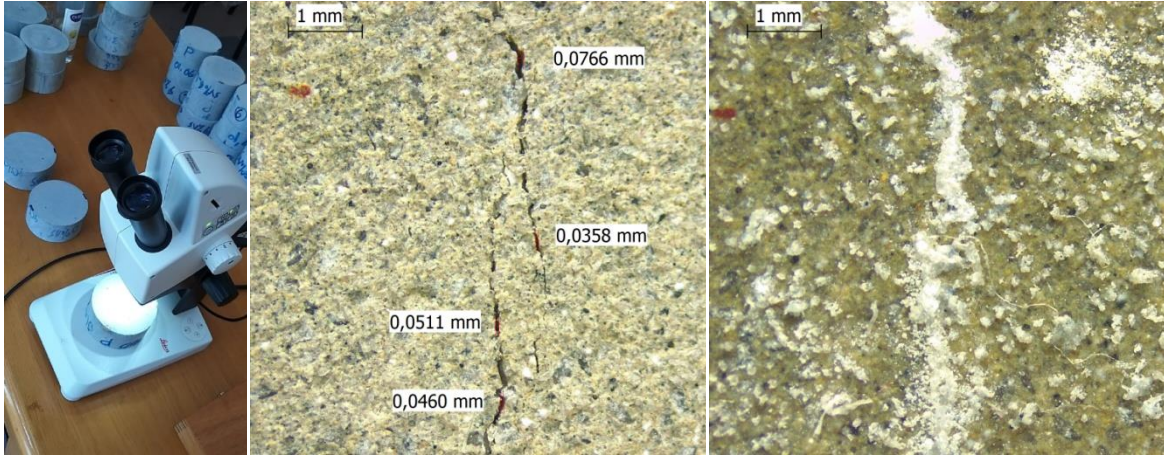
3.6 ECC Karışımlarının Kendiliğinden İyileşme Özelliğinin Belirlenmesi

ECC karışımları 28. deney gününe kadar kapalı poşetlerde bekletildikten sonra 28. günde yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Detayları 3.6.1'de anlatılan yarmada çekme dayanımının %60, %70 ve %80'i dikkate alınarak yüklenen ECC karışımlarında farklı boyutlarda çatlak genişlikleri elde edilmiştir. SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarında yarmada çekme dayanımının %60'ına kadar yükleme yapıldığında 65-70 µm genişliklerinde çatlak genişliğine ulaşılmıştır. Ancak, SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımında yarmada çekme dayanımının %60'ına kadar yükleme yapıldığında çatlak genişlikleri çok düşük düzeyde kalmıştır. Bu nedenle, bu karışımda diğer karışımlara benzer çatlak genişlikleri yarmada çekme dayanımının %70'ine kadar yükleme yapıldığında elde edilebilmiştir. Benzer şekilde SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarına yarmada çekme dayanımının %70'i kadar yükleme yapıldığında 90-100 µm genişliklerinde çatlak oluşurken, SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımı benzer çatlak genişliklerine yarmada çekme dayanımının %80'i kadar yükleme yapıldığında ulaşmıştır. 28. günde çatlak oluşturulan hasarlı numuneler hızlı klor geçirimsizliği ve kılcal su geçirimsizliği deneylerinde kullanılmak üzere ayrılmıştır.

Detayları 3.6.2'de anlatılan hızlı klor geçirimsizliğine başlanmadan önce LEICA EZ4W (Fotoğraf 3.8) cihazıyla numunelerin çatlak genişlikleri ölçülmüş ve ultrasonik titreşim hızları (UTH) belirlenmiştir. Daha sonra hızlı klor geçirimsizliği deneyi numunelere uygulanmıştır. Numunelere bu aşamadan sonra su içerisine bırakılmış ve su kürü ile iyileşmeleri sağlanmıştır. Her hafta çatlak genişlikleri ölçülen numuneler 28 (ilk poşet kürü) + 28. (hasar oluşturulduktan sonra su kürü), güne ulaştığında yine çatlak

genişlikleri ölçüldükten sonra UTH ve hızlı klor geçirimsizliğine maruz bırakılmıştır. Aynı deneyler 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerde de uygulanmıştır. Bununla birlikte, numunelerin çatlak genişlikleri her hafta ölçülmeye devam edilmiştir. 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerde çatlakları kapanan ve iyileşme sürecini tamamlayan numunelerin yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. Karşılaştırma yapabilmek amacıyla bu deney günlerinde her karışımın kontrol numunelerinin (hasarsız numuneler) de yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir.

Detayları 3.6.3'te anlatılan kılcal su geçirimsizliği deneyine başlamadan önce LEICA EZ4W (Fotoğraf 3.8) cihazıyla numunelerin ilk çatlak genişlikleri ölçülmüş ve ultrasonik titreşim hızları (UTH) belirlenmiştir. Daha sonra kılcal su geçirimsizliği deneyi numunelere uygulanmıştır. Numunelere bu aşamadan sonra su içerisine bırakılmış ve su kürü ile iyileşmeleri sağlanmıştır. Her hafta çatlak genişlikleri ölçülen numuneler 28 (ilk poşet kürü) + 28. (hasar oluşturulduktan sonra su kürü), güne ulaştığında yine çatlak genişlikleri ölçüldükten sonra UTH ve hızlı klor geçirimsizliğine maruz bırakılmıştır. Aynı deneyler 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerde de uygulanmıştır. Ayrıca, numunelerin çatlak genişlikleri her hafta ölçülmeye devam edilmiştir.



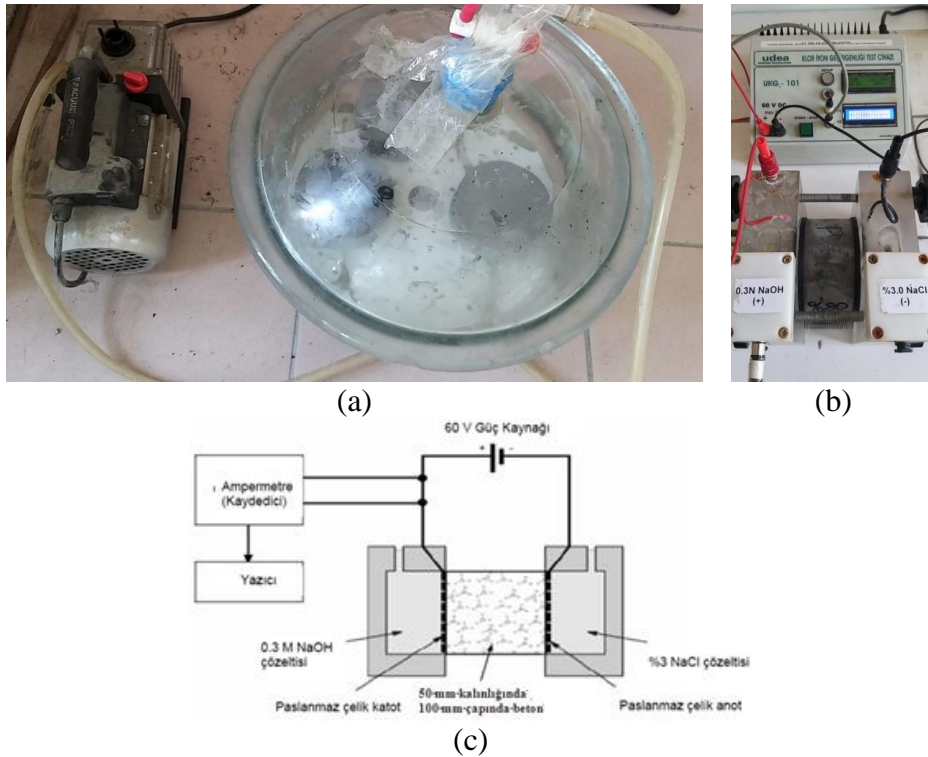
Fotoğraf 3.8. LEICA EZ4W cihazı

3.6.1 Yarmada çekme dayanımı

ECC karışımlarının yarmada çekme dayanımı ASTM C496 (2014) standardına uygun olarak belirlenmiştir.

3.6.2 Hızlı klor geçirimliliği

Hızlı klor geçirimliliği deneyi beton veya harcın elektriksel iletkenliği esasına dayanır. Bu deneye ait görseller Şekil 3.4’da gösterilmiştir. Deney, 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda üretilen silindir numunelerden kesilen, kalınlığı 50 mm ve çapı 100 mm olan silindir numuneler üzerinde ASTM C1202 (2012) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre geçen elektriksel yük miktarı (Coulombs) ve buna karşılık gelen derecelendirme Çizelge 3.5’de sunulmuştur. ASTM C1202 (2012) standardına göre, numuneler 2 saat boyunca vakumda bekletilerek içindeki havanın alınması sonucu suya doymun hale getirilmiştir Şekil (3.4(a)). Numuneler vakumdan çıkarıldıktan sonra bir tarafında 0.3 NaOH ve diğer tarafında %3 NaCl çözeltisi bulunan deney hücresi içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.4(b)). Ardından 60 V sabit potansiyel fark uygulanarak harç diskten geçen elektrik akım şiddeti miktarı belli aralıklarla kaydedilir. 6 saat süren deney sonunda, numuneden geçen toplam akım, akım-zaman grafiği altında kalan alan hesaplanarak (Coulombs) belirlenir. Hızlı klor geçirimliliği deneyi hazırlanan silindir numuneleri üzerinde 28., 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerde gerçekleştirilmiştir.



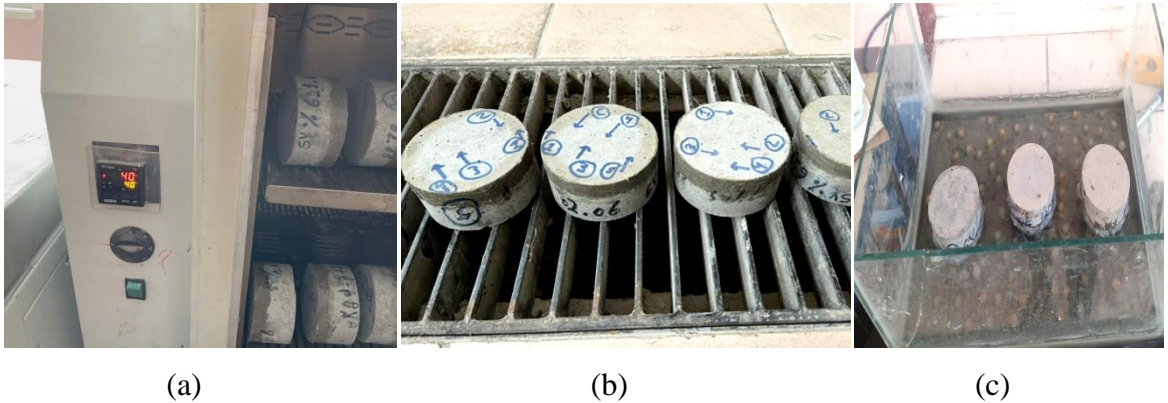
Şekil 3.4. Vakum cihazı (a), hızlı klor geçirimliliği test cihazı (b), hızlı klor geçirimliliği test düzeneği (c)

Çizelge 3.5. Hızlı klor geçirimliliği deneyi sınır değerleri (Coulombs)

Geçen Elektriksel Yük Miktarı (Coulombs)	Klor Geçirimliliği
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir

3.6.3 Kılcal su geçirimliliği

Kılcal su geçirimliliği deneyi, 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda üretilen silindir numunelerden kesilen, 100 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda 3 adet numune kullanılarak belirlenmiştir. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.9’da sunulmuştur. Deneyden önce numuneler 48 saat boyunca 40 ± 5 °C’lik bir etüvde kurutulmuştur. Daha sonra numunelerin su emmeye bırakılacak yüzeylerinin yan tarafları su geçirimliliğini engellemek için silikon kullanılarak kaplanmıştır. Çevresi silikon ile kaplanmış deney numuneleri, tabanları ince bir su tabakasıyla temas içinde olacak şekilde küçük bir havuz içerisine yerleştirilmiştir. Kılcal su geçirimliliği değerleri, suyun yaklaşık olarak 5 mm altında kalan bilyeler üzerinde ölçülmüştür. İlk olarak, numuneler kuru halde tartılmıştır. Daha sonra su içerisine bırakılan numunelerin ağırlıkları sırasıyla, 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64. dakikalarda numunelerin ıslak yüzeyi kuru bir bezle kurulandıktan sonra tartılmıştır. Dolayısıyla kılcal su geçirimliliği, birim kesit alanı başına harcın zamanla emdiği su miktarıyla değerlendirilmiştir.



Fotoğraf 3.9. Etüvde kurutulan numuneler (a), silikonlanmış numuneler (b) ve kılcal su geçirimliliği testi (c)

3.6.4 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi

Tahribatsız bir deney yöntemi olan ultrasonik titreşim hızı deneyi inşaat mühendisliğinde kullanılan çok yaygın bir tekniktir. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.10'de gösterilmiştir. Bu deney metodu uygulama açısından çok basittir. UTH deneyi ultrasonik dalganın numunenin bir ucundan diğer ucuna ilk varış süresini ölçmektedir. UTH, ASTM C597-16'ya (2016) göre uygulanan standart bir ASTM deneyidir. Standart, betonun veya harcın göreceli kalitesinin ve bazı kusurlarının (boşluklar, çatlaklar ve onarımlarının etkinliği vb.) değerlendirilmesine olarak sağlamaktadır. UTH testleri 100 mm çapında ve 50 mm boyutlarındaki ECC karışımlarına uygulanmıştır.



Fotoğraf 3.10. ECC karışımlarının UTH ölçümü

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Basınç Dayanımı

ECC karışımlarının 7. ve 28. gündeki basınç dayanımları Çizelge 4.1’de verilmiştir. Tablodan görüldüğü üzere, SV%6_Ç-UK_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının basınç dayanımları SV%0_2.0PVA karışımından 7. günde sırasıyla %17.3 ve 20.6 ve 28. günde sırasıyla, %13.1 ve %14.2 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. C+UK yerine kullanılan vollastonit mineralinin ECC karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımına olan geliştirici etkisi mineralin lifli yapısı (iğnemsiz parçacık morfolojisi) ile açıklanabilir (Kumar ve Ramujee, 2017). Bu yapı sayesinde, mikro-çatlaklar arasında bağ kurma özelliğine sahip olan vollastonit mikro-fiberlerin, arayüzdeki mikro fiber/matris bağ dayanımını artırdığı söylenebilir (Banthia ve Sheng, 1996; Hameed vd., 2009; Soliman ve Nehdi, 2014). Ayrıca azalan lif içeriğine rağmen SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının basınç dayanımının hem kontrol karışımından hem de SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımından yüksek olması ECC’lerde lif ilavesinin matristeki sıkışmış hava boşluklarının miktarını arttırmasına (Özbay vd., 2012) ve bu nedenle karışımın basınç dayanımını azaltmasına bağlanabilir (Abu-Lebdeh vd., 2012; Noushini vd., 2013; Jen vd., 2016).

Çizelge 4.1. ECC karışımlarının basınç dayanımları (MPa)

Karışımlar	7. Gün	28. Gün
SV%0_2.0PVA	40,57	67,34
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	47,60	76,15
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	48,91	77,32

4.2 Eğilme Performansı

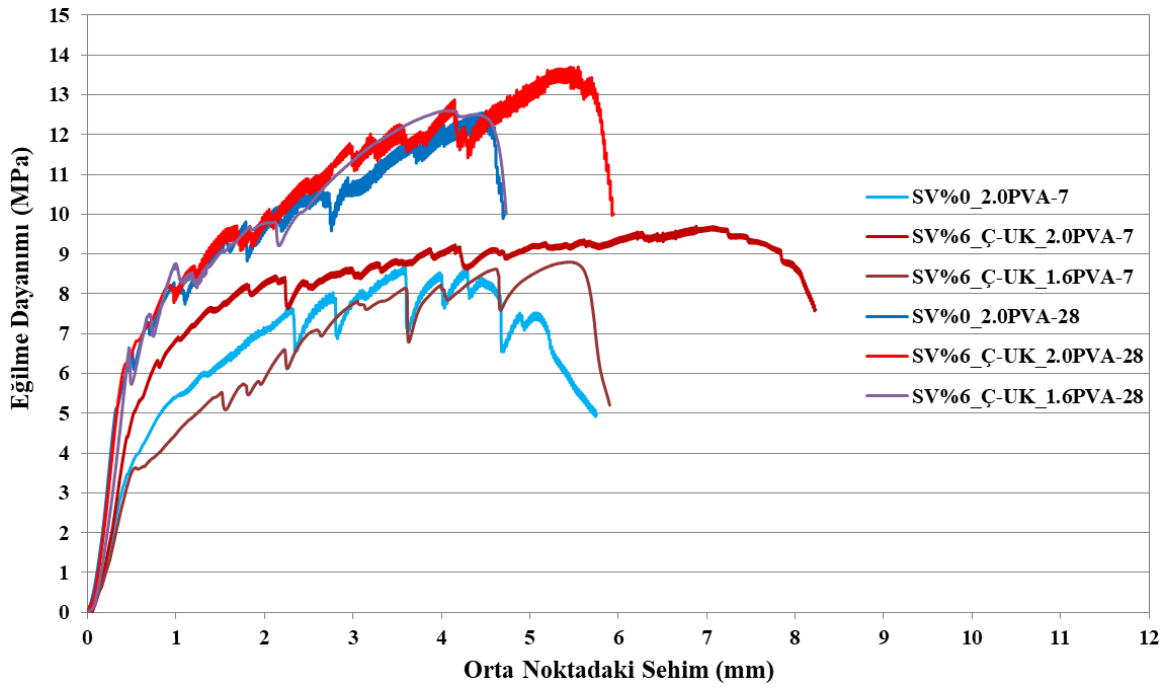
Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1’de verilenlere göre, SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının eğilme dayanımı, hem 7. hem de 28. günde SV%0_2.0PVA karışımının eğilme dayanımından sırasıyla, %11.6 ve %11.2 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Orta noktadaki sehim değerleri için bu artış oranları sırasıyla, %57.4 ve %26.6 olarak belirlenmiştir. Eğilme

dayanımı ve orta noktadaki sehım değerlerindeki bu önemli artış, vollastonit mineralinin iğnemsı (lifli) yapısı ve yüksek elastisite modülü (200 GPa) ile açıklanabilir (Kalla vd., 2015; Mathur vd., 2007a; Mathur vd., 2007). Ayrıca, partikül boyutları çimento partiküllerininkine benzer veya daha büyük olan vollastonit mikro lifleri esas olarak lifli bir yapı sergiler (Dey 2015; Soliman ve Nehdi., 2012; Kwon vd., 2015). Vollastonit mikro-fiberlerin lifli yapısı, çimentolu kompozitlerde çatlakların yayılmasını geciktirir ve çimentolu kompozitlerin sünekliliğini iyileştirmede faydalıdır (He vd., 2020) Bu nedenle, SV mineralinin iğnemsı parçacık yapısı ile bir lif gibi davranarak ECC'nin eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım değerlerinin gelişimine katkı sağladığı düşünülmektedir.

Çizelge 4.2 ve Şekil 4.1'den görüldüğü gibi, azalan PVA lif içeriğine bağlı olarak SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım değeri SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımına göre hem 7. hem de 28. günde azalmıştır. Bilindiği gibi lif içeriği sayesinde geleneksel harçtan daha yüksek çekme gerilmesine sahip olan ECC'de lif içeriğinin azalması eğilme dayanımını azaltır (Ho ve Pam, 2003; Wang vd., 2020). SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım değerlerinin standart ECC karışımı olan SV%0_2.0PVA ile benzer olduğu belirlenmiştir. MAG-217M182 kodlu TÜBİTAK projesinde (Yücel vd., 2020) elde edilen verilere göre hacimce %1.6 PVA lifinden daha az PVA lifi kullanıldığında eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım değeri SV%0_2.0PVA karışımının altına düşmüştür. Lif oranının azalmasına rağmen, vollastonit varlığında sehım değerlerinin %1.6 PVA kullanımına kadar, standart ECC karışımından yüksek çıkması; vollastonit mineralinin iğnemsı (lifli) yapısı ve yüksek elastisite modülü (200 GPa) ile açıklanabilir (Mathur vd., 2007a; Mathur vd., 2007b; Kalla vd., 2015). Ayrıca bu sonuç; SV mineralinin iğnemsı parçacık yapısından dolayı bir lif gibi davranarak, PVA lifinin yerine kısmi olarak kullanılabileceğini göstermiştir.

Çizelge 4.2. ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim değerleri

Karışımlar	7. Gün		28. Gün	
	Orta Noktadaki Sehim (mm)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Orta Noktadaki Sehim (mm)	Eğilme Dayanımı (MPa)
SV%0_2.0PVA	5.23	8.69	4.67	12.55
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	8.23	9.70	5.91	13.70
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	5.72	8.80	4.72	12.60



Şekil 4.1. ECC karışımlarının tipik eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim eğrileri

4.3 ECC Karışımlarının Kendiliğinden İyileşme Performansı

4.3.1 Yarmada çekme dayanımı

SV%0_2.0PVA, SV%6_Ç-UK_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının 28., 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerdeki hasarlı ve hasarsız numunelerinin yarmada çekme dayanımları Çizelge 4.3'te verildiği gibidir. Belirtilen bu deney günlerinde aynı küre maruz bırakılan hasarsız numunelerin yanı sıra iyileşme süreçlerini tamamlayan ECC karışımlarının yarmada çekme dayanımları belirlenmiştir. 28. gündeki hasarsız numunelerin yarmada çekme dayanımları karşılaştırıldığında SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının yarmada çekme dayanımı SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-

UK_1.6PVA karışımlarından sırasıyla, yaklaşık %7 ve %6.5 oranlarında daha yüksek çıkmıştır. Benzer şekilde diğer deney günlerinde de hasarlı ve hasarsız ECC karışımları için en iyi performans verileri SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımından elde edilmiştir. SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının SV%0_2.0PVA karışımından daha iyi yarmada çekme performansı sergilemesi SV mineralinin oldukça yüksek boy:çap (44:1) oranı sayesinde sergilediği köprüleme yeteneğinin bir sonucu olarak düşünülebilir. SV mineralinin iğnemsiz parçacık morfolojisiyle yapısıyla bir lif gibi davrandığı ve ECC'nin taşıma gücünü artırdığı söylenebilir (Banthia ve Sheng, 1996; Dey vd., 2015; Norman ve Beaudoin, 1993). Bununla birlikte, SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımından daha düşük performans sergilemesi azalan PVA lif içeriğinin bir sonucu olarak düşünülebilir. Ayrıca, SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının benzer yarmada çekme dayanımlarına sahip olmaları %6 SV mineralinin PVA lifini %0.4 oranında azaltabileceği düşüncesini doğrulamıştır. Lif oranının azalmasına rağmen, vollastonit varlığında yarmada çekme dayanımının %1.6 PVA kullanımında standart ECC karışımından yüksek çıkması; SV mineralinin iğnemsiz (lifli) yapısı ve yüksek elastisite modülü (200 GPa) ile açıklanabilir (Mathur vd., 2007a; Mathur vd., 2007b; Kalla vd., 2015).

Çizelge 4.3. Hasarlı ve hasarsız kendiliğinden iyileşen ECC karışımlarının yarmada çekme dayanımları (MPa)

Karışımlar	Ön Yükleme Durumu	28. Gün MPa	28+28. Gün MPa	28+56. Gün MPa	28+90. Gün MPa	28+120. Gün MPa
SV%0_2.0PVA	Hasarlı	-	6,42	6,66	6,68	6,71
	Hasarsız	6,01	6,15	6,34	6,41	6,50
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	Hasarlı	-	6,94	6,99	7,04	7,12
	Hasarsız	6,43	6,67	6,77	6,83	6,91
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	Hasarlı	-	6,47	6,72	6,75	6,80
	Hasarsız	6,04	6,18	6,35	6,43	6,54

4.3.2 Hızlı klor geçirimsizliği ve ultrasonik titreşim hızı

Hızlı klor geçirimsizliği testine maruz bırakılan numunelerin ön yükleme miktarı ve çatlak genişlikleri Çizelge 4.4'te sunulmuştur. Çizelgede görüldüğü üzere SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımı, SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarıyla benzer çatlak genişliklerine +%10 yükleme ile ulaşmıştır. Bu durum SV mineralinin çatlak

sonrası lif köprüleme yoluyla taşıma gücünü koruduğunun bir sonucu olarak düşünülebilir (Yücel vd., 2021)

Çizelge 4.4. Hızlı klor geçirimsizliği testine maruz bırakılan numunelerin ön yükleme miktarı (kN) ve çatlak genişlikleri (μm)

Karışımlar	28. Gün		Ön Yükleme Miktarı (kN)			Çatlak Genişlikleri (μm)		
	kN	MPa	60%	70%	80%	60%	70%	80%
SV%0_2.0PVA	47,18	6,01	28,31	33,03	-	65-70	90-100	-
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	50,48	6,43	-	35,34	40,38	-	66-71	92-102
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	47,41	6,04	28,45	33,19	-	65-70	90-100	-

Hasarsız ECC karışımlarının 28., 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerdeki hızlı klor geçirimsizliği değerleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 28., 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerdeki hızlı klor geçirimsizliği değerleri SV%0_2.0PVA karışımından sırasıyla, %14.9, %15.6, %17.0, %19.8 ve %20.6 oranlarında ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımından sırasıyla, %10.4, %14.2, %17.2, %19.5 ve %20.7 oranlarında daha düşük çıkmıştır. Çizelge 4.5 ve SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımına göre elde edilen yüzdesel farklardan görüldüğü üzere SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının hızlı klor geçirimsizliği değerleri birbirine oldukça yakındır. Bununla birlikte, SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımı genel olarak SV%0_2.0PVA karışımından az da olsa daha düşük hızlı klor geçirimsizliğine sahiptir. Ayrıca, hasarsız karışımların 28. gündeki verilerinin orta derecede klor geçirimsizliğine sahip olduğu, 28+28 ve 28+56. gündeki verilerinin ise düşük derecede klor geçirimsizliğine sahip olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının 28+90 ve 28+120. gündeki verilerinin düşük derecede klor geçirimsizliğine, ancak SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının ise aynı günlerde çok düşük derecede klor geçirimsizliğine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Hasarlı ECC karışımlarından elde edilen değerler ise Çizelge 4.6'da verilmiştir. Benzer çatlak genişliklerine sahip olan karışımlar değerlendirildiğinde (SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımları için %60-%70 ön yükleme, SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımı için %70-%80 ön yükleme), çatlakların ilk oluşturulduğu gün olan 28. günde, ve numunelerin su kürüne maruz bırakıldığı 28+28. günde ve 28+56. günde bu üç

karışımın da hızlı klor geçirimliliği değerlerinin hasarsız numunelerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Ancak, artan kür yaşı ile birlikte iyileşmeye başlayan ve iyileşen hasarlı numunelerin hızlı klor geçirimliliğinin ortalama değerleri hasarsız numunelerin hızlı klor geçirimliliği ile özellikle 28+56. günde (özellikle %60 ve %70 ön yükleme) neredeyse benzer sonuçlar vermiştir. Bununla birlikte, 28. günde hasarsız numunelerde olduğu gibi hasarlı numunelerin de orta derecede klor iyonu geçirimliliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Yine benzer olarak, 28+28 ve 28+56. günlerde de hasarlı ECC'lerin de düşük klor geçirimliliğine sahip olduğu belirlenmiştir. 28+90 ve 28+120. günlerde ise %60 ve %70 ön yükleme için hasarlı numunelerin hızlı klor geçirimliliği değerleri hasarsızlardan daha düşük çıkmıştır. %70 ve %80 yükleme için ise bu değerler sadece 28+120. günde daha düşük çıkmıştır. Çizelge 4.6'da verilen bu bulgulara göre, hasarlı SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının 28+90 ve 28+120. gündeki verilerinin düşük derecede klor geçirimliliğine, ancak hasarlı SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının ise aynı günlerde çok düşük derecede klor geçirimliliğine sahip olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, her deney gününde hasarlı SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının hasarlı SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarından daha düşük hızlı klor geçirimliliğine sahip olduğu ve biraz daha büyük ilk çatlak genişliğine rağmen daha iyi kendiliğinden iyileşme performansı sergilediği gözlemlenmiştir. Hasarlı SV%0_2.0PVA ve hasarlı SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının ise her iki ön yükleme koşulu için de kendiliğinden iyileşme performanslarının birbirine benzer olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen bu bulgulara benzer olarak, Kumar ve Ramujee (2017), vollastonitin klor iyonu geçirimliliğini önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, Ransinchung vd. (2009), vollastonit ve mikro silikanın klor iyonu penetrasyonuna karşı direncin artmasını sağlayarak sertleşmiş betonun mikro yapısını düzenlediklerini tespit etmişlerdir. Başka bir çalışmada, Kalla vd. (2013), vollastonit ve uçucu kül kombinasyonunu araştırdıkları çalışmalarında vollastonitin klorür difüzyonunu olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir. Bu gelişimdeki etkenlerden biri, vollastonit mineralinin iğnemsî parçacık yapısı sayesinde sağladığı gözenek süreksizliği olarak düşünülebilir (Mathur vd., 2007a). Ayrıca, inert yapısı nedeniyle gözenek çözeltisine herhangi bir kimyasal etkisi olmayan SV'nin gözenek sistemindeki varlığının, iğnemsî parçacık yapısı ile ECC'nin gözenek ağı kıvrımlarının formalitesini etkilediği düşünülmektedir. SV'nin benzersiz yapısı sayesinde sağladığı gözenek sistemindeki

köprüleme kabiliyetinin, hızlı klorür geçirimsizliğine karşı gözenek ağı kıvrımlarını olumlu yönde etkilediği söylenebilir (Öz ve Güneş, 2020).

Her hızlı klor geçirimsizliği deneyinden önce ECC karışımlarına uygulanan UTH deneyinden elde edilen veriler Çizelge 4.6’da sunulduğu gibidir.

Çizelge 4.5. Hasarsız ECC karışımlarının hızlı klor geçirimsizliği değerleri (Coulombs)

Karışımlar	28. Gün 60%	28+28. Gün 60%	28+56. Gün 60%	28+90. Gün 60%	28+120. Gün 60%
SV%0_2.0PVA	2844	1560	1314	1122	1078
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	2420	1316	1090	900	856
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	2700	1534	1316	1118	1080

Hasarsız ECC karışımlarının 28., 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerdeki UTH verileri Çizelge 4.7’de sunulmuştur. Çizelgede görüldüğü gibi SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının UTH değeri her test yaşı için SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının UTH değerlerinden daha yüksek çıkmıştır. Bilindiği gibi, Malhotra’ya (1976) göre UTH ölçümünden elde edilen değer 3660-4580 m/s aralığında ise bu sonuç “iyi durum” olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 28+90 ve 28+120. gündeki ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının 28+120. gündeki değerleri hariç hasarsız ECC karışımlarının tamamının UTH verileri “iyi durum” olarak düşünülebilir. SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 28+90 ve 28+120. gündeki ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının 28+120. gündeki değerleri ise Whitehurst’un (1951) değerlendirmesine göre “mükemmel” olarak değerlendirilebilir.

Hasarlı ECC karışımlarının 28., 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerdeki UTH verileri Çizelge 4.8’de sunulmuştur. Elde edilen bulgulara göre benzer çatlak genişlikleri için (daha fazla yükleme ile benzer çatlak genişliği sağlayan SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının çatlak genişliği biraz daha yüksek) en iyi performansı SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımı sergilemiştir. Örneğin SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının %60 ön yükleme verileri, SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının %70 ön yükleme verilerinden her test yaşı için çok daha düşük çıkmıştır. Benzer bulgu, SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının %70 ve SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının %80 ön yükleme tabi tutulduğu seride de

mevcuttur. Ayrıca, SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının benzer çatlak genişlikleri için hemen hemen benzer UTH verilerine sahip olduğu belirlenmiştir. Malhotra'nın (1976) değerlendirmesine göre, %70 ön yüklemeye maruz bırakılan SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının 28. gündeki verileri “orta durum” olarak kabul edilebilir. Bununla birlikte, bu iki karışımın 28. gündeki diğer numuneleri, 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. gündeki numuneleri “iyi durum” olarak değerlendirilebilir. Ancak, SV%0_2.0PVA karışımının 28+120. gündeki verileri Whitehurst'un (1951) değerlendirmesine göre “mükemmel” olarak kabul edilebilir. SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımı ise %60 ön yükleme için 28+90. ve 28+120. gündeki verilerine göre “mükemmel olarak değerlendirilebilir. En iyi keniliğinden iyileşme performansını sergileyen ve benzer çatlak genişliklerinde diğer iki karışımdan daha üstün olan SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımı ise 28, 28+28 ve 28+56. günlerde “orta” UTH verilerine, 28+90 ve 28+120. günlerde ise “mükemmel” UTH verilerine sahiptir. Ayrıca bu karışımın %70 ön yükleme için 28+56. gündeki verileri de “mükemmel” olarak değerlendirilebilir. Son olarak, özellikle %60 ve %70 ön yükleme için hasarlı ECC karışımlarının 28+56. günden itibaren hasarsızlardan daha yüksek UTH verileri sağladığı söylenebilir.

Çizelge 4.6. Hasarlı ECC karışımlarının hızlı klor geçirimsizliği değerleri (Coulombs)

Karışımlar	28. Gün			28+28. Gün			28+56. Gün			28+90. Gün			28+120. Gün		
	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%
SV%0_2.0PVA	3318	3867	-	1762	1850	-	1370	1546	-	1100	1180	-	1037	1067	-
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	-	3170	3626	-	1360	1765	-	1100	1412	-	870	945	-	812	850
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	3299	3812	-	1685	1862	-	1356	1524	-	1124	1214	-	1027	1054	-

Çizelge 4.7. Hasarsız ECC karışımlarının UTH değerleri (m/sn)

Karışımlar	28. Gün			28+28. Gün			28+56. Gün			28+90. Gün			28+120. Gün		
SV%0_2.0PVA	4010			4315			4465			4513			4580		
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	4100			4370			4532			4600			4649		
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	4000			4320			4470			4525			4582		

Çizelge 4.8. Hasarlı ECC karışımlarının UTH değerleri (m/sn, hızlı klor geçirimsizliği için)

Karışımlar	28. Gün			28+28. Gün			28+56. Gün			28+90. Gün			28+120. Gün		
	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%
SV%0_2.0PVA	3754	3608	-	4231	4100	-	4480	4399	-	4568	4483	-	4621	4582	-
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	-	3805	3721	-	4330	4241	-	4582	4528	-	4647	4594	-	4712	4671
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	3780	3650	-	4251	4102	-	4519	4450	-	4600	4501	-	4631	4558	-

4.3.3 Kılcal su geçirimsizliği ve ultrasonik titreşim hızı

Kılcal su geçirimsizliği testine maruz bırakılan numunelerin ön yükleme miktarı ve çatlak genişlikleri Çizelge 4.9’da sunulduğu gibidir. Çizelgede görüldüğü üzere SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımı, SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarıyla benzer çatlak genişliklerine +%10 yükleme ile ulaşmıştır. Bu durum SV mineralinin çatlak sonrası lif köprüleme yoluyla taşıma gücünü artırdığının bir sonucu olarak kabul edilebilir (Yücel vd., 2021).

Çizelge 4.9. Kılcal su geçirimsizliği testine maruz bırakılan numunelerin ön yükleme miktarı (kN) ve çatlak genişlikleri (µm)

Karışımlar	28. Gün		Ön Yükleme Miktarı (kN)			Çatlak Genişlikleri (µm)		
	kN	MPa	60%	70%	80%	60%	70%	80%
SV%0_2.0PVA	47,18	6,01	28,31	33,03	-	64-69	88-98	-
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	50,48	6,43	-	35,34	40,38	-	67-72	93-103
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	47,41	6,04	28,45	33,19	-	66-61	88-98	-

Hasarsız ECC karışımlarının kılcal su geçirimsizliği değerleri Çizelge 4.10’da verilmiştir. SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 28., 28., 28+28., 28+56., 28+90. ve 28+120. günlerdeki kılcal su geçirimsizliği değerleri SV%0_2.0PVA karışımından sırasıyla, %6.7, %11.7, %22.2, %26.2 ve %27.9 oranlarında ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımından ise sırasıyla, %5.3, %10.0, %20.9, %25.3 ve %24.6 oranlarında daha düşük çıkmıştır. Bu sonuçlara göre durabilite özelliği en yüksek karışım SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımı olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının SV%0_2.0PVA karışımından çok az farkla da olsa dayanıklılık özelliğinin biraz daha iyi olduğu söylenebilir. Hasarlı ECC karışımlarında da benzer bulguların elde edildiği Çizelge 4.11’den gözlemlenebilir. Öyle ki iki farklı yükleme türü için de tüm test yaşlarında en düşük kılcal su geçirimsizliği değerleri SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımından elde edilmiştir. Ayrıca SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının benzer çatlak genişliklerinde benzer kılcal su geçirimsizliği değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca hasarlı ECC karışımlarının özellikle 28+90. günden itibaren özellikle de %60 ve %70 yükleme için aynı test yaşında hasarsız ECC’lerden daha düşük kılcal su geçirimsizliği değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgulardan yola çıkarak, SV mineralinin, ECC matrisinde gözenek süreksizliği

sağladığı düşünölmüştür (Mathur vd., 2007a; Ransinchung vd., 2009; Kalla vd., 2015). Bu süreksizliğin temel sebebinin, vollastonitin sıvıların normal basınca ulaşamayacakları gözenek yapısını oluşturması olduğu söylenebilir (Mathur vd., 2007a). Bu sonuçlara benzer olarak, Mathur vd. (2007a) vollastonitin betonun su emme yüzdesini azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Kalla vd. (2015), vollastonit içeren beton üzerinde yaptıkları porozite deneyinde, genel olarak %10 vollastonit içeriğinin sınır değeri olduğunu, özellikle bu değeri sonra betonun porozite değeri arttığını göstermişlerdir. Benzer olarak, Kalla vd. (2013), vollastonit ve uçucu kül kombinasyonunu kullanarak tasarladıkları betonun, basınçlı su geçirimsizliği değeri iyileştirdiğini belirlemişlerdir. Misra vd. (2011) ise çimento yerine kullanılan vollastonit mineralinin hava geçirimsizliği indeksini (basınç/dakika) geliştirdiğini belirtmişlerdir.

Çizelge 4.10. Hasarsız ECC karışımlarının kılcal su geçirimsizliği değeri (mm/dak^{0,5})

Karışımlar	28. Gün	28+28. Gün	28+56. Gün	28+90. Gün	28+120. Gün
SV%0_2.0PVA	0,0479	0,0163	0,0117	0,0080	0,0068
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	0,0447	0,0144	0,0091	0,0059	0,0049
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	0,0472	0,0160	0,0115	0,0079	0,0065

Hasarsız UTH verilerinden elde edilen sonuçlar hızlı klor geçirimsizliği kısmında detaylı olarak incelenmiştir. Kılcal su geçirimsizliği deneyi uygulanan hasarlı ECC karışımlarının UTH değeri ise Çizelge 4.12’de sunulduğu gibidir. Elde edilen bulgulara göre en iyi karışımın SV%6_Ç-UK_2.0PVA olduğu ispatlanmıştır. Malhotra’nın (1976) değerlendirmesine göre, üç ECC karışımı için de 28., 28+28. ve 28+56. gündeki veriler “iyi durum” olarak değerlendirilebilir. Ayrıca, SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının %70 ön yükleme için 28+90. gündeki verileri “iyi durum” olarak değerlendirilebilir. Bu iki karışımın 28+90. gündeki %60 ön yükleme ve 28+120. gündeki her iki yükleme verileri Whitehurst’un (1951) değerlendirmesine göre “mükemmel” olarak kabul edilebilir. Son olarak SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 28+90 ve 28+120. gündeki verilerinin tamamı “mükemmel” olarak değerlendirilebilir.

Çizelge 4.11. Hasarlı ECC karışımlarının kılcal su geçirimsizliği değerleri (mm/dak^{0,5})

Karışımlar	28. Gün			28+28. Gün			28+56. Gün			28+90. Gün			28+120. Gün		
	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%
SV%0_2.0PVA	0,0648	0,0894	-	0,0177	0,0231	-	0,0110	0,0124	-	0,0078	0,0092	-	0,0062	0,0070	-
SV%6_Ç UK_2.0PVA	-	0,0529	0,0838	-	0,0165	0,0211	-	0,0086	0,0107	-	0,0048	0,0061	-	0,0036	0,0043
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	0,0668	0,0913	-	0,0181	0,0213	-	0,0102	0,1210	-	0,0072	0,0080	-	0,0057	0,0066	-

Çizelge 4.12. Hasarlı ECC karışımlarının UTH değerleri (m/sn, kılcal su geçirimsizliği için)

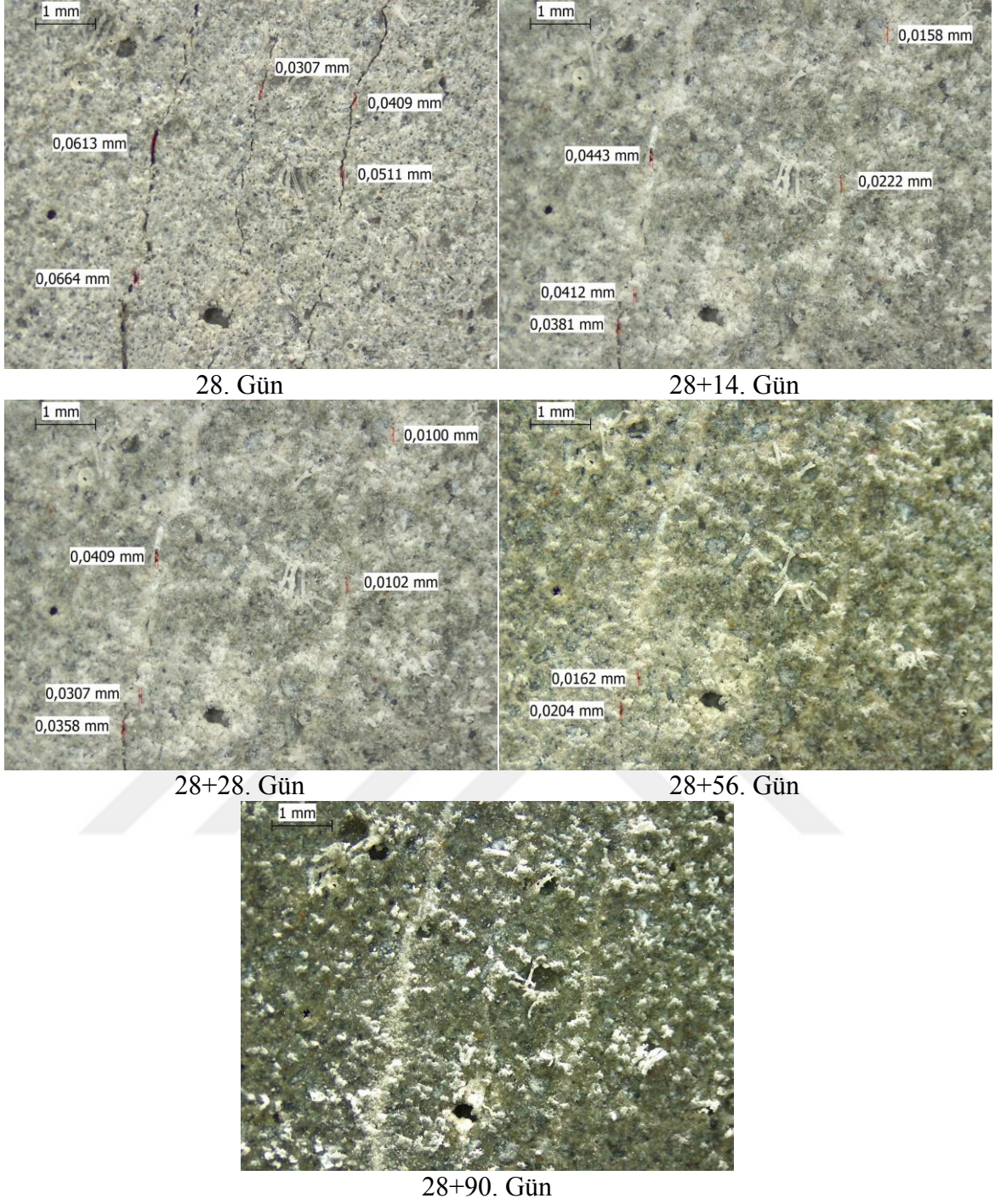
Karışımlar	28. Gün			28+28. Gün			28+56. Gün			28+90. Gün			28+120. Gün		
	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%	60%	70%	80%
SV%0_2.0PVA	3768	3690	-	4240	4164	-	4500	4481	-	4587	4545	-	4637	4600	-
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	-	3796	3714	-	4321	4230	-	4572	4520	-	4635	4587	-	4702	4665
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	3773	3676	-	4245	4157	-	4502	4488	-	4590	4545	-	4621	4597	-

4.3.4 Kendiliğinden iyileşme performansının görsellerle irdelenmesi

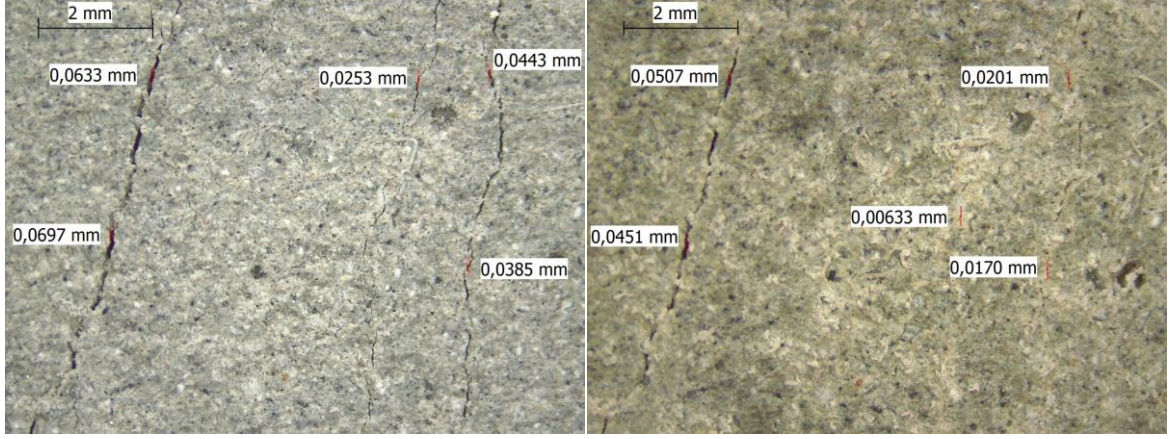
SV%0_2.0PVA, SV%6_Ç-UK_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının sırasıyla, %60, %70 ve %60 ön yükleme için ilk çatlak oluşumundan itibaren iyileşme sürecine kadar geçen çatlak izlenimleri sırasıyla, Fotoğraf 4.1, Fotoğraf 4.2 ve Fotoğraf 4.3'te verilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, daha yüksek ön yükleme altında diğer iki karışımla benzer çatlak genişliğine ulaşan SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 69,7 µm genişliğindeki çatlak genişliği 63 günde Fotoğraf 4.2'de görüldüğü üzere tamamen iyileşmiştir. İlk çatlak genişlikleri 66,4 µm olan SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının iyileşme süreçleri ise sırasıyla Fotoğraf 4.1 ve Fotoğraf 4.3'te görüldüğü gibi 90. günde tamamlanmıştır. Benzer çatlak genişliği %6 SV varlığında 27 günlük bir avantaj sağlamıştır. Böylece %6 SV varlığında %0.4 PVA lif tasarrufu sağlanabilmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.13'te verilen iyileşme sürecine göre SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımı 28+14., 28+28., 28+56., 28+63. ve 28+90. günlerde, 28. güne göre sırasıyla, %35.3, %82.8, %91.0, %100 ve %100 oranlarında iyileşme performansı sergilemiştir. SV%0_2.0PVA için bu oranlar; %38.0, %53.8, %75.8, %81.8 ve %100 olarak değişirken, SV%6_Ç-UK_1.6PVA için; %38.4, %46.5, %75.4, %82.7 ve %100 olarak değişmiştir.

Çizelge 4.13. %60 ve %70 ön yükleme yapılan ECC'lerin çatlak değişimleri (µm)

Karışımlar	28. Gün	28+14. Gün	28+28. Gün	28+56. Gün	28+63. Gün	28+90. Gün
SV%0_2.0PVA	66,4	41,2	30,7	16,2	12,1	0,0
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	69,7	45,1	12,0	6,3	0,0	0,0
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	66,4	40,9	35,5	16,3	11,5	0,0

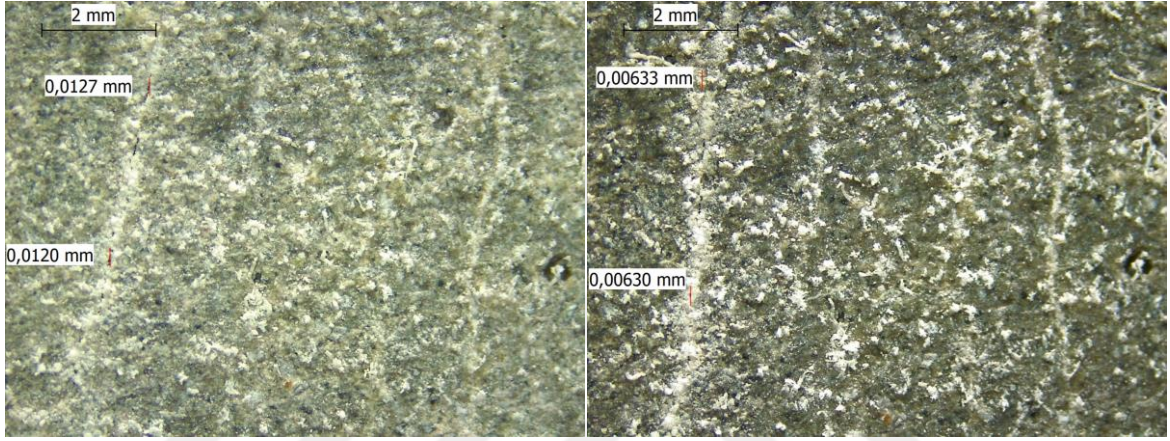


Fotoğraf 4.1. SV%0_2.0PVA karışımının 66,4 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 90 günlük iyileşme süreci



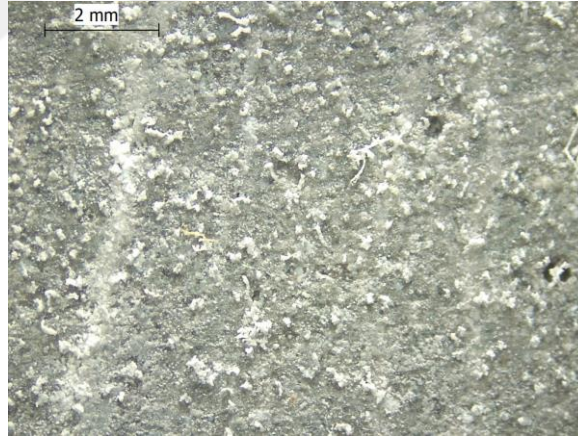
28. Gün

28+14. Gün



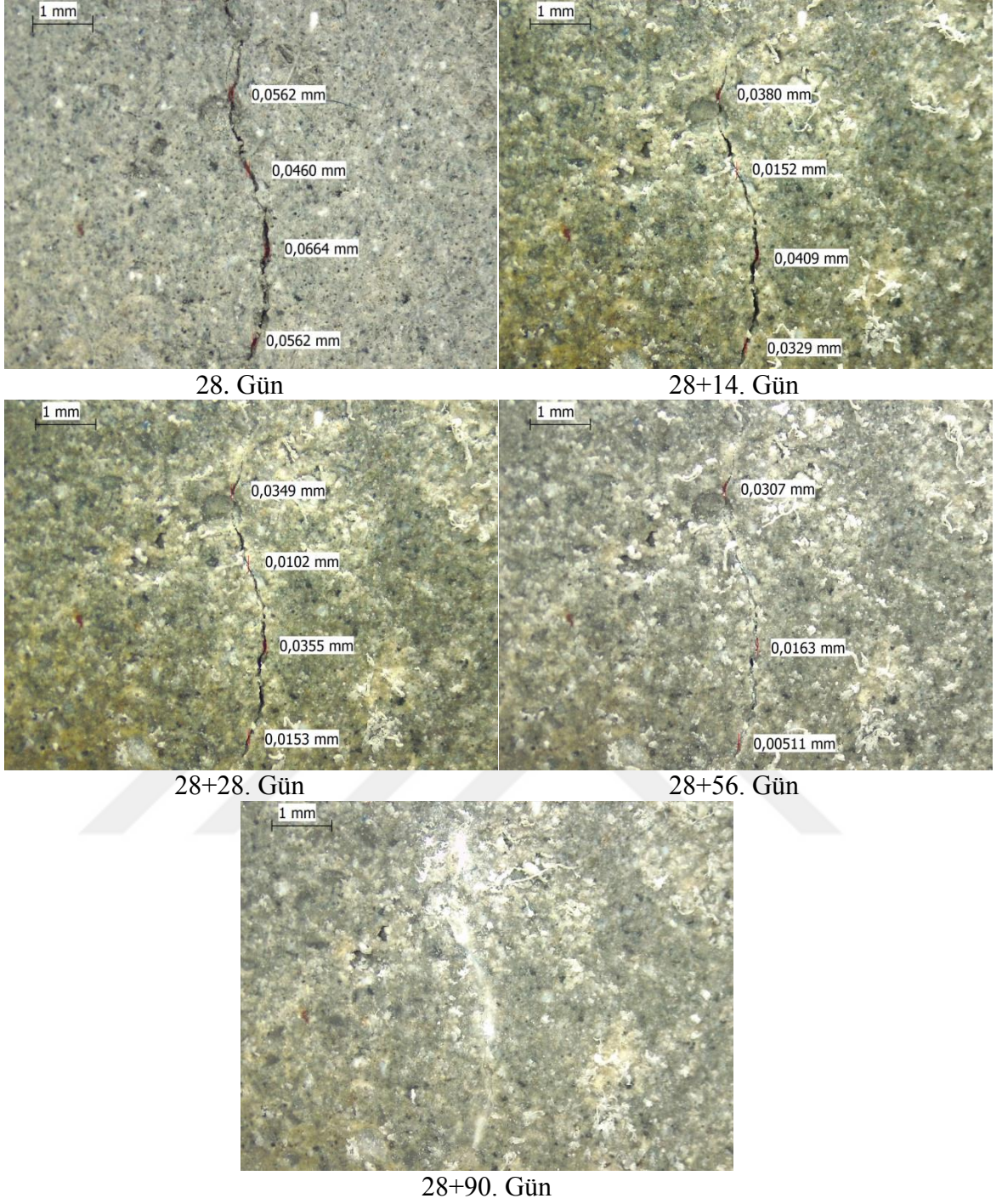
28+28. Gün

28+56. Gün



28+63. Gün

Fotoğraf 4.2. SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 69,7 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 63 günlük iyileşme süreci



Fotoğraf 4.3. SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının 66,4 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 90 günlük iyileşme süreci

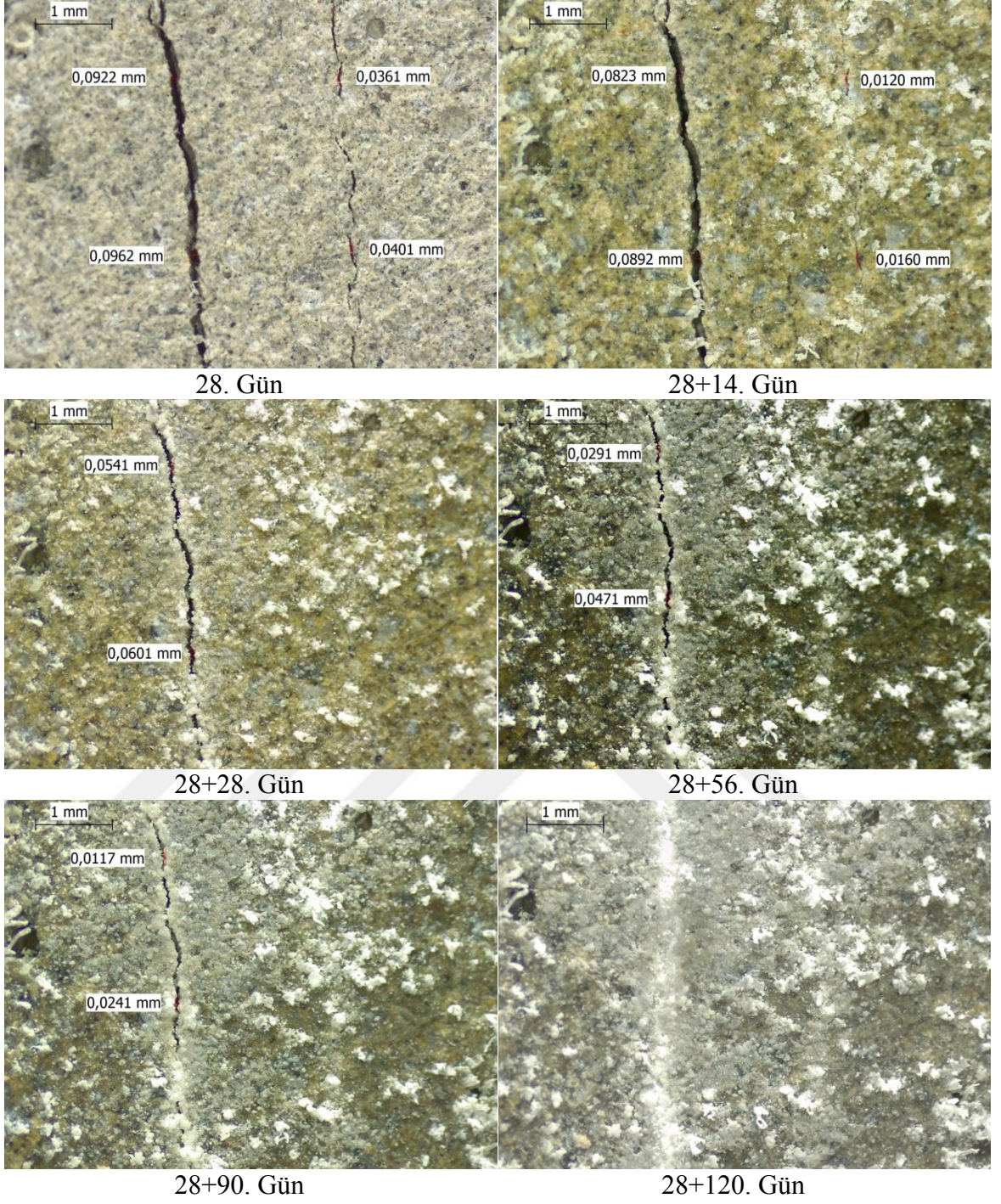
SV%0_2.0PVA, SV%6_Ç-UK_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının sırasıyla, %70, %80 ve %70 ön yükleme için ilk çatlak oluşumundan itibaren iyileşme sürecine kadar geçen çatlak izlenimleri sırasıyla, Fotoğraf 4.4, Fotoğraf 4.5 ve Fotoğraf 4.6'da sunulmuştur. Sonuçlara göre, daha yüksek ön yükleme altında diğer iki karışımla benzer çatlak genişliğine ulaşan SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 101,0 µm

genişliğindeki çatlak genişliği 97 günde Fotoğraf 4.5'te görüldüğü üzere tamamen iyileşmiştir. İlk çatlak genişlikleri sırasıyla 96,2 µm ve 92,0 µm olan SV%0_2.0PVA ve SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımlarının iyileşme süreçleri ise sırasıyla Fotoğraf 4.4ve Fotoğraf 4.6'da görüldüğü gibi 120. günde tamamlanmıştır. Benzer çatlak genişliği %6 SV varlığında 23 günlük bir avantaj sağlamıştır. Böylece %6 SV varlığında %0.4 PVA lif tasarrufu sağlanabilmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.14'te verilen iyileşme sürecine göre SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımı 28+14., 28+28., 28+56., 28+90., 28+97. ve 28+120. günlerde, 28. güne göre sırasıyla, %18.5, %59.4, %81.2, %93.8, %100 ve %100 oranlarında iyileşme performansı sergilemiştir. SV%0_2.0PVA için bu oranlar; %7.3, %37.5, %51.0, %74.9, %83.2 ve %100 olarak değişirken, SV%6_Ç-UK_1.6PVA için; %4.1, %28.2, %43.4, %86.4, %89.0 ve %100 olarak değişmiştir.

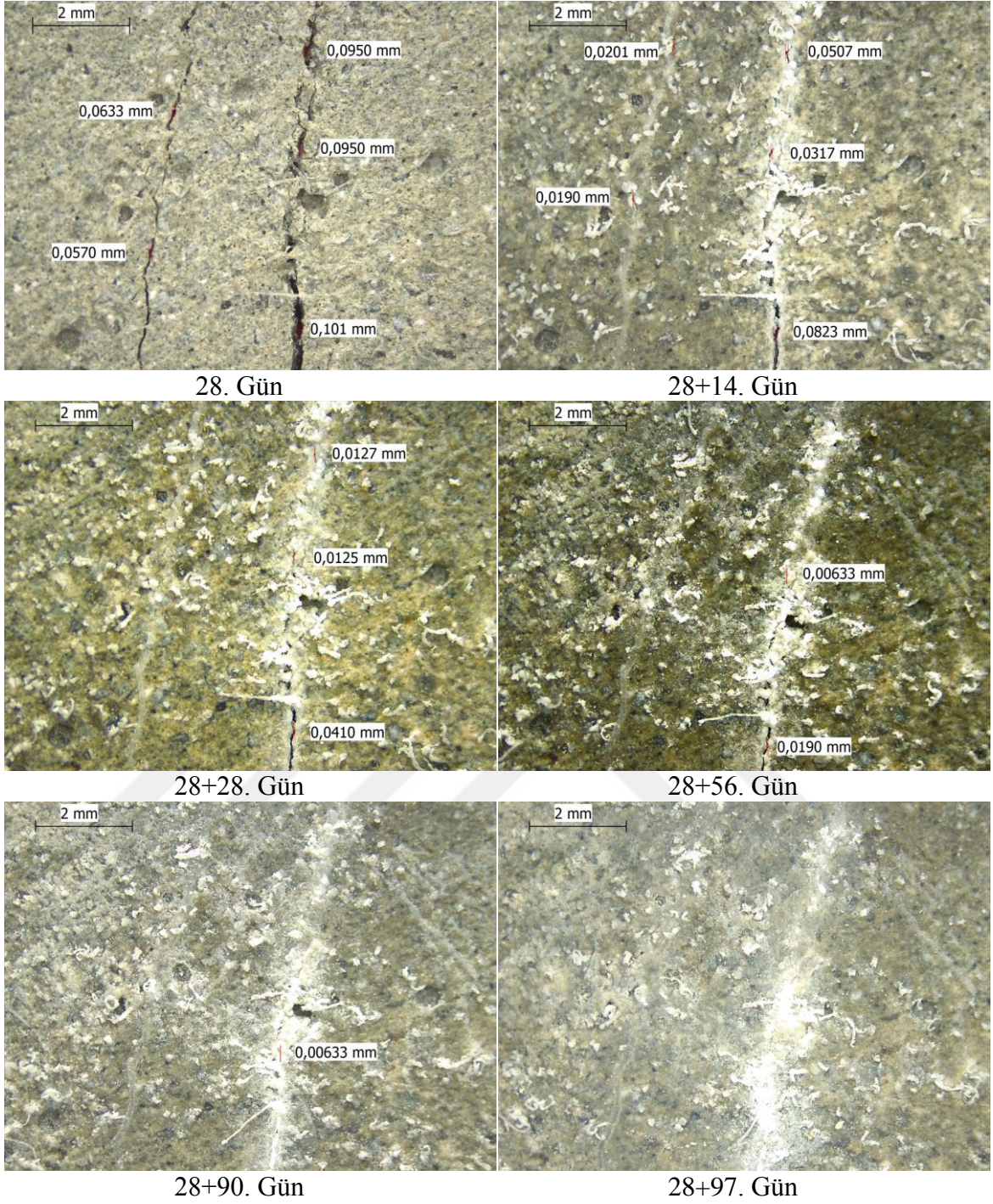
Çizelge 4.14. %70 ve %80 ön yükleme yapılan ECC'lerin çatlak değişimleri (µm)

Karışımlar	28. Gün	28+14. Gün	28+28. Gün	28+56. Gün	28+90. Gün	28+97. Gün	28+120. Gün
SV%0_2.0PVA	96,2	89,2	60,1	47,1	24,1	16,2	0,0
SV%6_Ç-UK_2.0PVA	101,0	82,3	41,0	19,0	6,3	0,0	0,0
SV%6_Ç-UK_1.6PVA	92,0	88,2	66,1	52,1	12,5	10,1	0,0

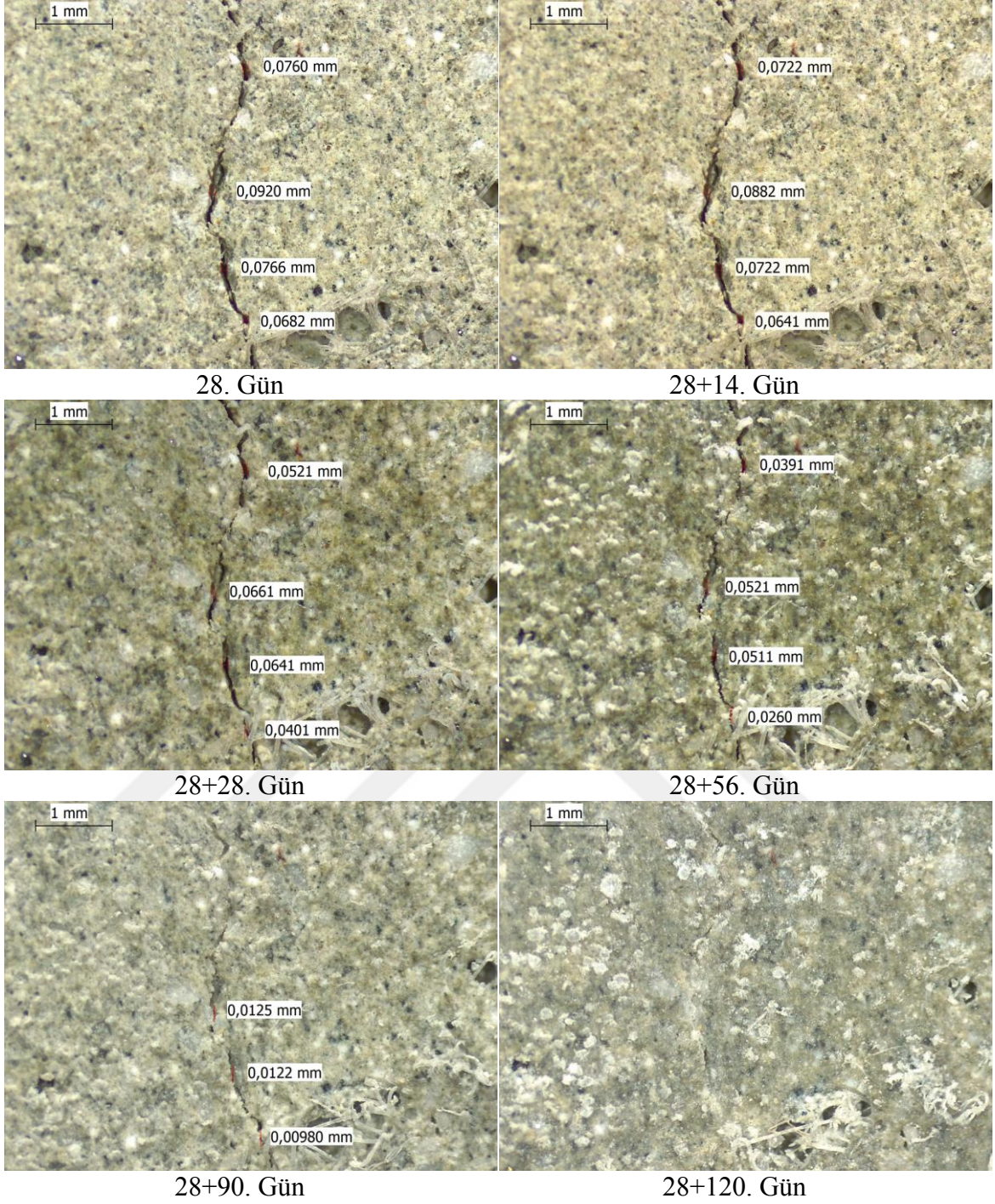
Elde edilen bulgulara göre, 44:1 maksimum boy:çap oranıyla SV minerali ECC'nin kendiliğinden iyileşme performansını yüksek iğnemsiz parçacık yapısı sayesinde sağladığı köprü kurma yeteneğiyle geliştirmiştir. Böylece tıpkı bir lif gibi davranarak ECC içerisindeki PVA lif içeriğini azaltmaya dahi yardımcı olabileceğini göstermiştir (Soliman ve Nehdi, 2012; Dey vd., 2015; Yücel ve Özcan, 2019).



Fotoğraf 4.4. SV%0_2.0PVA karışımının 96,2 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 120 günlük iyileşme süreci



Fotoğraf 4.5. SV%6_Ç-UK_2.0PVA karışımının 101,0 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 97 günlük iyileşme süreci



Fotoğraf 4.6. SV%6_Ç-UK_1.6PVA karışımının 92,0 µm genişliğindeki maksimum çatlak genişliğinin 120 günlük iyileşme süreci

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu çalışmadan elde edilen bulgular aşağıda verildiği gibidir.

- Maksimum 44:1 boy çap oranına sahip sentetik vollastonit minerali ECC'nin taşıma gücü ve deformasyon kapasitesini önemli ölçüde artırmıştır.
- SV'nin çimento+uçucu kül yerine %6 oranında kullanımı ile ECC'nin kendiliğinden iyileşme performansı hızlanmış ve aynı çatlak genişliğine sahip standart ECC'ye göre daha erken iyileşme performansı sergilemiştir.
- %6 SV ile tasarlanan ancak standart ECC'ye kıyasla %20 daha az lif ile geliştirilen ECC, SV mikrofiberlerin lif gibi davranmasının bir sonucu olarak standart ECC ile benzer iyileşme performansı sergilemiştir.

KAYNAKLAR

Abu-Lebdeh, T. M., Fini, E., and Lumpkin, M., “Flexural and tensile characteristics of micro fiber-reinforced very high strength concrete thin panels”, *American Journal of Engineering and Applied Sciences* 5 (2), 184-197, 2012.

Ahn, T. H. and Kishi, T., “The effect of geomaterials on the autogenous healing behavior of cracked concrete”, *Proceeding of 2nd ICCRRR* 235 –240, 2008.

Alyousif, A., Lachemi, M., Yıldırım, G. and Sahmaran, M., ”Effect of self-healing on the different transport properties of cementitious composites”, *Journal of Advanced Concrete Technology* 13 (3), 112-123, 2015.

Andrews, R.W., “Wollastonite”, London Institute of Geological Sciences, *Her Majesty’s Stationary Office*, 1970.

ASTM C469, “Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2014.

ASTM C618, “American Society for Testing and Materials, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete”, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2015.

ASTM Standard C39, “Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens”, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2003.

ASTM C1202, “Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration”, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2012.

ASTM C597-16, “Standard test method for pulse velocity through concrete”, *American Society for Testing and Materials, ASTM International* West Conshohocken, Pennsylvania, United States, 2016.

Banthia, N. and Sheng, J., “Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites”, *Cement and Concrete Composites* 18(4): 251-269, 1996.

Boh, B. and Sumiga, B., “Microencapsulation technology and its applications in building construction materials”, *Materials and Geoenvironment* 55(3), 329–344, 2008.

Degryse, P. and Elsen, J., “Industrial minerals-resources, characteristics and applications”, *Leuven University Press* Belgium, 120 p, 2003.

Dey, V., Kachala, R., Bonakdar, A. and Mobasher, B., “Mechanical properties of micro and sub-micron wollastonite fibers in cementitious composites”, *Construction and Building Materials* 82,351-359, 2015.

Dry, C. and McMillan, W., “Three-part methylmethacrylate adhesive system as an internal delivery system for smart responsive concrete”, *Smart Materials and Structures* 5(3), 297–300, 1996.

Fattah, H., “Wollastonite-New aspects promise growth”, *Industrial Minerals* 326, 21-43, 1994.

Güneş, M. and Öz, H.Ö., “The effects of synthetic wollastonite developed with calcite and quartz on high performance mortars”, *Structural Concrete*, 2020.

Hameed, R., Turatsinze, A., Duprat, F. and Sellier, A., “Metallic fiber reinforced concrete: effect of fiber aspect ratio on the flexural properties”, *Journal of Engineering and Applied Sciences* 4(5), 67-72, 2009.

Haner, S. ve Çuhadaroğlu, D., “Vollastonit: Bir gözden geçirme”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 37(1), 63-82, 2013.

He, Z. Shen, A. Lyu, Z. Li, Y. Wu, H. and Wang, W., “Effect of wollastonite microfibers as cement replacement on the properties of cementitious composites”, *Constructin and Building Materials* 261, 119920, 2020.

IARC, Monographs on the evaluation of carcinogenic risks to human, *IARC*, 68, 283-305, 1997.

Jen, G., Trono, W. and Ostertag, C.P., “Self-consolidating hybrid fiber reinforced concrete: Development, properties and composite behavior”, *Construction and Building Materials* 104, 63-71, 2016.

Joseph, C., Jefferson, A.D., Isaacs, B., Lark, R. and Gardner, D., “Experimental investigation of adhesive-based self-healing of cementitious materials”, *Magazine of Concrete Research* 62(11), 831-843, 2010.

Kanda, T., Watanabe, S. and Li, V.C., “Application of pseudo strain hardening cementitious composites to shear resistant structural elements”, *In Fracture Mechanics of Concrete Structures Proceedings FRAMCOS-3* pp. 1477-1490, 1998.

Kalla, P., Rana, A., Chad, Y.B., Misra A. and Csetenyi, L., “Durability studies on concrete containing wollastonite”, *Journal of Cleaner Production* 87, 726-734, 2015.

Kalla, P., Misra, A., Gupta, R.C., Csetenyi, L., Gahlot V. and Arora, A., “Mechanical and durability studies on concrete containing wollastonite–fly ash combination”, *Construction and Building Materials* 40, 1142–1150, 2013.

Kabele, P., Li, V. C., Horii, H., Kanda, T. and Takeuchi, S., “Use of BMC for ductile structural members”, *Proceedings of the 5th International Symposium on Brittle Matrix Composites*, BMC-5J. Woodhead Publishing Lim., Warsaw, Poland, 579-588, 1997.

Kesner, K.E. and Billington, S.L., “Investigation of infill panels made from engineered cementitious composites for seismic strengthening and retrofit”, *American Society of Civil Engineers and Journal Structural Engineering* 131(11), 712-1720, 2005.

Kishi, T., Ahn, T. H., Hosoda, A. and Takaoka, H., “Self-healing behavior by cementitious recrystallization of cracked concrete incorporating expansive agent”, *First International Conference on Self-Healing Materials* The Netherlands, 2007.

Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M. and Krukowski, S.T., “Industrial minerals & rocks”, *7th ed. Published by Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc.*, Colorado, 2006.

Kong, H.J., Bike, S. and Li, V.C., “Development of a self-consolidating engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization”, *Journal of Cement and Concrete Composites* 25, 301-309, 2003.

Kunieda, M. and Rokugo, K., “Measurement of crack opening behavior within ECC under bending moment”, *In Proc., Int’l RILEM Workshop HPCFRCC in Structural Applications* pp. 313-322, 2006.

Kumar, J.B. and Ramujee, K., “Mechanical & durability characteristics of wollastonite based cement concrete”, *Journal on Civil Engineering* 7(1): 1-7, 2017.

Kumbasar, I., “Silikat Mineralleri”, *İ.T.Ü Matbaası* Gümüşsuyu, 170 s, 1977.

Kwon, S. Nishiwaki, T., Choi, H. and H. Mihashi, “Effect of wollastonite microfiber on Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Cement-Based Composites based on application of multi-scale fiber-reinforcement system”, *Journal of Advanced Concrete Technology* 13 (7) 332–344, 2015.

Lepech, M. D. and Li, V. C., “Water permeability of engineered cementitious composites”, *Cement and Concrete Composites* 31(10), 744-753, 2009.

Li, V.C, and Sahmaran, M., “Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under high alkaline environment”, *Cement and Concrete Composites* 30(2), 72–81, 2008.

Li, V.C. and Sahmaran, M., “Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment”, *Proceedings of HPFRCC5 High Performance Fiber Reinforced Cement Composites* Stuttgart, Germany, July 10-13, 313–322, 2007.

Li, V. C., Lepech, M., Wang, S., Weimann, M. and Keoleian, G., “Development of green ECC for sustainable infrastructure systems”, *Conference Proceeding In International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology Beijing* China, 181-192, 2004.

Li, V.C. and Lepech, M., “Crack resistant concrete material for transportation construction”, *Transportation Research Board 83rd Annual Meeting* Washington, D.C., 04-4680, 2004.

Li, V.C., “On engineered cementitious composites (ECC) – a review of the material and its application”, *Journal of Advanced Concrete Technology* 1(3), 215–30. <https://doi.org/10.3151/jact.1.215>, 2003.

Li V.C. , Wang, S. and Wu, C., “Tensile Strain-hardening Behavior of PVA-ECC”, *ACI Materials Journal* 98, 483-492, 2001.

Li, V.C., “Engineered cementitious composites (ECC) – tailored composites through micromechanical modeling”, in: Bantia N, Bentur A, Mufti A, editors, Fiber reinforced concrete: present and the future, *Montreal: Canadian Society for Civil Engineering* 64–97, 1998.

Li, V.C. and Leung, C.K.Y., “Steady state and multiple cracking of short random fiber composites”, *ASCE Journal of Engineering Mechanics* 118(11), 2246-2264. 1992.

Lin, Z., Kanda, T., and Li, V.C., “On interface property characterization and performance of fiber-reinforced cementitious composites”, *Journal of Concrete Science and Engineering* 1(3), 173-184 1999.

Ma, H., Qian, S., and Zhang, Z., “Effect of self-healing on water permeability and mechanical property of medium-early-strength engineered cementitious composites”, *Construction and Building Materials* 68, 92-101, 2014.

Maalej, M. and Li, V.C., “Flexural/Tensile strength ratio in engineered cementitious composites”, *American Society of Civil Engineers and Journal Structural Engineering* 6(4):513-528, 1994.

Mathur, R., Misra, A. K., and Goel, P., “Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete”, *Journal of Scientific & Industrial Research* 66, 1029-1034, 2007a.

Mathur, R., Misra A.K. and Goel, P., “Marble slurry dust and wollastonite-inert mineral admixtures for cement concrete”, *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology* 35(12), 41-46, 2007.

Maxim, L.D. and McConnell, E. E., “A review of the toxicology and epidemiology of Wollastonit”, *Inhalation Toxicology* 17(9), 451-466, 2005.

Malhotra V.M., “Testing hardened concrete: nondestructive methods”, *American Concrete Institute Monograph No.9.*, USA, 1976.

Marshall, D.B. and Cox, B.N., “A J-integral method for calculating steady-state matrix cracking stresses in composites”, *Mechanics of Materials* 7(2), 127-133, 1988.

Misra, A., Arora, A. N., Kalla, P. and Panchal H., “Strength, absorption and permeability characteristics of concrete containing wollastonite”, *Indian Concrete Institute* 12(2), 17-22, 2011.

Mishra, D., “Design of pseudo strain-hardening cementitious composites for a ductile plastic hinge”, *PhD thesis, University of Michigan* Ann Arbor, Mich, 1995.

Noushini, A., Samali, B. and Vessalas, K., “Influence of polyvinyl alcohol fibre addition on fresh and hardened properties of concrete”, *Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers: HUSCAP*, 1-8, 2013.

Norman, M. P. and Beaudoin, J. J., “The effect of wollastonite micro-fibre aspect ratio on reinforcement of portland cement-based binders”, <https://seureservercdn.net/198.71.233.184/31m.b34.myftpupload.com/wpcontent/uploads/2018/02/Effect-Of-Wollastonite-Micro-Fibre-Aspect-Ratio-On-Reinforcement-Of-Portland-Cement-Based-Binders.pdf>, 1993.

Özbay, E., Sahmaran, M., Lachemi, M. and Yücel, H.E., “Effect of microcracking on frost durability of high-volume-fly-ash- and slag-incorporated engineered cementitious composites”, *ACI Materials Journal* 259-268, 2013.

Özbay, E., Şahmaran, M., Yücel, H. E., Lachemi, M. and Li, V. C. “Frost resistance and microstructure of engineered cementitious composites: Influence of fly ash and micro poly-vinyl-alcohol fiber”, *Cement and Concrete Composites* 34(2), 156-165, 2012.

Öz, H.Ö. and Güneş, M., “The effects of synthetic wollastonite developed with calcite and quartz on high performance mortars”, <https://doi.org/10.1002/suco.201900520>, 2020.

Paul, F.K., “Mineral descriptions-wollastonite, 4th ed., optical mineralogy, *Mc Graw Hill*, New York, 1977.

Proctor, B.A., Oakley, D.R. and Litherland, K.L., “Developments in the assessment and performance of GRC over 10 Years”, *Composites* 173, 1982.

Ransinchung, G.D. and Kumar, B., “Investigations on pastes and mortars of ordinary portland cement admixed with wollastonite and microsilica”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 22(4), 305-313, 2010.

Ransinchung, G. D., Kumar, B. and Kumar, V., “Assessment of water absorption and chloride ion penetration of pavement quality concrete admixed with wollastonite and microsilica”, *Construction and Building Materials* 23, 1168-1177, 2009.

Robinson, S.M. and Craig, D.B., “Reinforcement of ceramic bodies with wollastonite”, *United States Patent* No:6 037 288, 16 p, 2000.

Sahmaran, M., Yıldırım, G. ve Erdem, T. K., “Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials”, *Cement and Concrete Composites* 35(1), 89-101, 2013.

Sahmaran, M. ve Yücel, H.E., “Sürdürülebilir karayolu üstyapı kaplamaları için çatlaksız ve sünek beton tasarımı”, *Gaziantep Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Programı* MF.10.09, 2012.

Sahmaran, M. and Li, V.C., “De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites”, *Cement and Concrete Research* 37(7), 1035–1046, 2007.

Soliman, A.M. and Nehdi, M.L., “Effects of shrinkage reducing admixture and wollastonite microfiber on early-age behaviour of ultra-high performance concrete”, *Cement and Concrete Composites* 46, 81-89, 2014.

Soliman, A.M. and Nehdi, M.L., “Effect of natural wollastonite microfibers on early-age behavior of UHPC”, *Journal of Materials in Civil Engineering* 24(7) , 816-824, 2012.

Springer, J., “Ontario wollastonite: uses, markets and Ontario’s potential as a future producer”, *Industrial Mineral Background* 17, 22, 1994.

Stang, H. and Li, V.C., “Classification of fiber reinforced cementitious materials for structural applications in fiber-reinforced concretes”, *Proc, BEFIB 2004, Ed. M.di Prisco, R. Felicetti and G.A. Plizzari* pp. 197-218, 2004.

Thao, T.D.P., Johnson, T.J.S., Tong, Q.S. and Dai, P.S., “Implementation of self-healing in concrete – proof of concept”, *Civil and Structural Engineering* 2(2), 116–25, 2009.

URL, “Wollastonite”. <http://www.handbookofmineralogy.org/search.html?p=all>, 2001.

Virta, R.L., “Wollastonite”, *US Geological Survey Mineral Yearbook*, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/wollastonite/860401.pdf>, 2001.

Wahab, M.A., Latif, I.A., Kohail, M. and Almasry, A., “The use of wollastonite to enhance the mechanical properties of mortar mixes”, *Construction and Building Materials* 152, 304-309, 2017.

Wang, J., van Tittelboom, K., De Belie, N. and Verstraete, W., “Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete”, *Construction and Building Materials* 26, 532-540, 2012.

Wang, S. and Li, V.C., “Polyvinyl alcohol fiber reinforced engineered cementitious composites: material design and performances”, *in Proc., Int’l RILEM Workshop HPRCC in Structural Applications, Eds. Fischer, G., and V.C. Li, published by RILEM SARL* pp. 65-73, 2006.

Wang, S., “Micromechanics based matrix design for engineered cementitious composites”, *PhD Thesis, University of Michigan* 2005.

Wang, S. and Li, V.C., “Materials design of light weight PVA-ECC”, *In Proc., HPRCC, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds.* pp.379-390, 2003.

Wang, K., Jansen, D., Shah, S. and Karr, A., “Permeability study of cracked concrete”, **Cement and Concrete Research** 27(3), 381–93, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00031-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00031-8), 1997.

Wu, H. C., Li, V. C., Lim, Y. M., Hayes, K. F. and Chen, C. C., “Control of Cs leachability in cementitious binders”, **Journal of Materials Science Letters** 15(19), 1736-1739, 1996.

Yang, Y., Lepech, M.D., Yang, E. and Li V.C., “Autogenous healing of Engineered Cementitious Composites under wet–dry cycles”, **Cement and Concrete Research** 39(5), 382-390, 2009.

Yücel, H.E., Öz, H.Ö., Güneş, M. and Kaya, Y., “Rheological properties, strength characteristics and flexural performances of engineered cementitious composites incorporating synthetic wollastonite microfibers with two different high aspect ratios”, **Construction and Building Materials** 306, 124921, 2021.

Yücel, H.E., Öz, H.Ö., Kaya, Y. ve Güneş, M., “Sentetik Vollastonitin Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerde Lif Donatı Olarak Uygulaması”, **Tübitak Projesi, MAG-217M182** Yürütücü, 2018-2020.

Yücel, H.E. and Özcan, S., “Strength characteristics and microstructural properties of cement mortars incorporating synthetic wollastonite produced with a new technique”, **Construction and Building Materials** 223, 165–176, 2019.

Yıldırım, G., Khiavi, A.H., Yesilmen, S. and Sahmaran, M., “Self-healing performance of aged cementitious composites“, **Cement and Concrete Composites** 87, 172-186, 2018.

Zhang, J., Wang, Q. and Wang, Z. “Properties of polyvinyl alcohol-steel hybrid fiber-reinforced composite with high-strength cement matrix”, **Journal of Materials in Civil Engineering** 29(7), 04017026, 2017.

Zhu, Y., Yang, Y. and Yao, Y., “Autogenous self-healing of engineered cementitious composites under freeze–thaw cycles”, *Construction and Building Materials* 34, 522-530, (2012).



ÖZ GEÇMİŞ

Ahmad Farhad RAJABI, tarihinde 'ın ilinde doğdu. Doğduğu ilde, yılları arasında ilkokul, ortaokul ve lise öğretimini tamamladı. yılında girdiği Üniversitesi Bölümü'nden Haziran 'da mezun oldu. yılları arasında Kabil'de kalite kontrol Mühendisi olarak çalıştı. yılında Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans öğrenimine başladı.



