



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

LABORATUVAR ORTAMINDA ÜRETİLEN SENTETİK VOLLASTONİTİN  
TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK  
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Yasin KAYA

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL

Mayıs 2020

**Yasin KAYA** tarafından **Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL** danışmanlığında hazırlanan “**Laboratuvar Ortamında Üretilen Sentetik Vollastonitin Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi**” 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 : Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi  
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü

Üye : Doç. Dr. Mehmet Tolga GÖĞÜŞ, 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.

Yasin KAYA

## ÖZET

### LABORATUVAR ORTAMINDA ÜRETİLEN SENTETİK VOLLASTONİTİN TASARLANMIŞ ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

KAYA, Yasin

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

:Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL

Mayıs 2020, 103 sayfa

Bu tez çalışmasında, sentetik vollastonitin (SV) Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerin (ECC) mekanik özellikleri üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. İlk aşamada, SV minerallerinin üretimi sağlanmış ve en yüksek boy:çap oranına sahip iki SV tipi (SV16-SV28) belirlenmiştir. İkinci aşamada ise, belirlenen SV'ler ECC tasarımında kullanılmıştır. ECC'ler 0.27 sabit su/bağlayıcı (s/b-su/çimento (Ç)+uçucu kül (UK)+SV) oranıyla üretilmiştir. İlk olarak, ECC kontrol karışımı üretilmiş ve daha sonra SV16 sırasıyla Ç, UK ve Ç+UK yerine %3, %6, %9 ve %12 oranlarında üçüncü bir mineral katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. Bu karışımların sonuçlarına göre, SV28 minerali Ç+UK birleşiminde, SV16 minerali ise yine aynı birleşimin Ç/UK oranı 2.2 ve kuvarz kaynağı 1000 µm olan karışımlarda %3, %6 ve %9 oranlarında kullanılmıştır. Üretilen ECC karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımı, eğilme performansı ve kırılma tokluğu değerleri belirlenirken, elastisite modülü değeri yalnızca 28 gün için belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, SV16 mineralinin ECC karışımlarının mekanik özelliklerini %6 oranına kadar iyileştirdiği belirlenmiştir.

*Anahtar Sözcükler:* Sentetik vollastonit, ECC, mekanik özellik, basınç ve eğilme dayanımı

## SUMMARY

### THE EFFECT OF SYNTHETIC WOLLASTONITE PRODUCED IN LABORATORY ENVIRONMENT ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES

KAYA, Yasin

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Hasan Erhan YÜCEL

May 2020, 103 pages

In this thesis, the effect of synthetic wollastonite (SW) on the mechanical properties of Engineered Cementitious Composites (ECC) was investigated as experimentally. In the first stage, the production of SW minerals was provided and two SW types (SW16-SW28) having highest aspect ratio were determined. In the second stage, the determined SWs were used in ECC design. ECCs were carried out with rate of 0.27 fixed water/binder (w/b - water/cement (C)+fly ash (FA)+SW). Firstly, the ECC control mixture was produced, and then SW16 was replaced as a third mineral additive at ratio of 3%, 6%, 9% and 12% instead of Ç, UK and Ç+UK, respectively. According to results of these mixtures, the SW28 was used in cement+fly ash combination in 3%, 6% and 9% ratios. The SW16 was used in the same combination mixtures with C/FA ratio of 2.2 and quartz source 1000 µm in 3%, 6% and 9% ratios. The compressive strength, flexural performance and fracture toughness values of the produced ECC mixtures were determined for 7 and 28 days, while the elasticity modulus value was determined for only 28 days. When the results were examined, it was determined that the produced SW16 mineral was improved the mechanical properties of ECCs by up to 6%.

*Keywords:* Synthetic wollastonite, ECC, mechanical property, compressive and flexural strength

## ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans çalışması, ülkemizde yüksek boy:çap oranına sahip olarak üretimi yapılmayan sentetik vollastonit mineralinin üretilmesi ve aynı zamanda lif takviyeli beton türlerinden olan Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerde (ECC), tasarımında hacimce %2 oranında yer alan PVA lifinin sağladığı yararların yanı sıra sebep olduğu ekonomik problemlerin, üretilen sentetik vollastonit ile önemli bir kısmının karşılanacağı açısından oldukça önemlidir.

Ülkemiz ve sektörümüz için önem arz eden bu çalışmada başta ailemin her bir ferdi olan babam **Kadir KAYA**'ya, annem **Meral KAYA**'ya, abim **Murat KAYA**'ya ve kardeşim **Büşra KAYA**'ya çok minnettarım. Ailemin yanı sıra üniversite hayatım boyunca desteğini hiçbir zaman esirgemeyen ve bir hocadan çok daha değerli olan danışman hocam **Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL**'e, bu çalışmanın başından sonuna her zaman desteğini hissettiğim **Arş. Gör. Muhammet GÜNEŞ**'e ayrıca teşekkür etmek istiyorum. Sentetik vollastonitin üretimi konusunda benden bilgi ve tecrübelerini esirgemeyen **Doç. Dr. Orkun ERSOY**'a ve çalışmalarında yardımını eksik etmeyen **Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ** hocama teşekkürü bir borç bilirim. Yüksek lisans eğitimim boyunca beni sürekli destekleyen **Dr. Öğr. Üyesi Firdevs UYSAL**'a, **Fuat ÖZCAN**'a ve **Arş. Gör. Uğur ÜNAL**'a çok teşekkür ederim.

Bu çalışma **Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) MAG-217M182** no'lu ve **Sentetik Vollastonitin Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerde Lif Donatı Olarak Uygulaması** adlı proje kapsamında yapılmış olup, TÜBİTAK'A sağladığı maddi yardımlardan dolayı minnettarım.

Son olarak ise lisans hayatımın bana kazandırdığı çok değerli arkadaşlarım olan **Burak KILIÇ**, **Behiç ERDEM**, **Selami ŞİMŞEK**, **Kutay SARI**, **Can Furkan ÖZCAN**, **Emine YILMAZ** ve **Özden GÜVENÇ**'e çok teşekkür ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET .....	iv
SUMMARY .....	v
ÖNSÖZ .....	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ .....	xi
FOTOĞRAFLAR VB. MALZEMELER DİZİNİ .....	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR .....	xiv
BÖLÜM I GİRİŞ .....	1
BÖLÜM II LİTERATÜR TARAMASI .....	5
2.1 Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC).....	5
2.1.1 Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin geçmişi.....	5
2.1.2 ECC'nin tasarlanması.....	7
2.1.3 ECC'nin uygulama çalışmaları.....	9
2.1.4 ECC'nin mekanik özellikleri.....	10
2.1.4.1 Basınç dayanımı özellikleri .....	10
2.1.4.2 Eğilme performansı özellikleri.....	11
2.1.5 ECC'nin durabilite özellikleri .....	12
2.1.5.1 Donma çözünme direnci .....	13
2.1.5.2 Uzun süreli şekil değiştirme kapasitesi .....	13
2.1.5.3 Tropik iklim koşulları.....	14
2.1.5.4 Klor geçirimsizliği.....	14
2.1.5.5 Alkali silika reaksiyonu.....	15
2.6 Vollaştonitin Tanımı ve Özellikleri .....	15
2.7 Vollaştonit Mineralinin Kullanım Alanları.....	17
2.7.1 Seramik sanayi.....	17
2.7.2 Plastik sanayi .....	18
2.7.3 Boya ve kaplama uygulamaları .....	19
2.7.4 Metalurjik uygulamalar .....	19
2.7.5 Asbest yerine kullanımı .....	20

2.7.6 Diğer uygulamalar .....	20
2.8 Sentetik Vollastonit.....	21
2.8.1 Katı hal reaksiyon metodu.....	22
2.8.2 Sıvı faz reaksiyon metodu .....	22
2.8.3 Islak metot .....	23
2.9 Vollastonitin Çimentolu Kompozitlerde Kullanımı .....	24
<b>BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMA .....</b>	<b>25</b>
3.1 Sentetik Vollastonit Üretimi .....	25
3.1.1 Gerekli hammaddelerin temini ve özelliklerinin belirlenmesi .....	25
3.1.2 Üretim prosedürü.....	29
3.1.3 Doğal hammaddeler kullanılarak sentetik vollastonitlerin üretilmesi .....	32
3.1.4 Atık malzemeler kullanılarak sentetik vollastonitlerin üretilmesi.....	32
3.2 Puzolanik Aktivite Deneyi.....	34
3.3 ECC Karışımlarında Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri.....	37
3.4 ECC Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü .....	40
3.5 ECC Karışımlarının Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi .....	44
3.5.1 Basınç dayanımı .....	44
3.5.2 Kırılma tokluğu .....	45
3.5.3 Eğilme performansı .....	46
3.5.4 Elastisite Modülü.....	47
<b>BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>49</b>
4.1 Doğal Hammaddelerden Sentetik Vollastonitlerin Üretilmesi .....	49
4.1.1 Tobermoritlerin elde edilmesi .....	49
4.1.2 Doğal hammaddelerden sentetik vollastonitin elde edilmesi .....	51
4.1.3 Atık malzemelerden sentetik vollastonitin elde edilmesi.....	61
4.3 Puzolanik Aktivite Deney Sonuçları.....	64
4.3.1 Yayılma çapı.....	64
4.3.2 Basınç dayanımı ve aktivite indeksi .....	65
4.4 ECC Karışımlarının Mekanik Özellikleri Deney Sonuçları .....	66
4.4.1 Basınç dayanımı .....	66
4.4.3 Kırılma tokluğu .....	73
4.4.4 Eğilme performansı sonuçları.....	76
<b>BÖLÜM V SONUÇLAR.....</b>	<b>84</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>90</b>

ÖZGEÇMİŞ .....	102
BU ÇALIŞMADAN ÜRETİLEN ESERLER .....	103



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Vollaştonit üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal içerikleri .....	29
Çizelge 3.2. Vollaştonitin karışım içerikleri, sentezleme süresi ve sinterleme sıcaklığı.....	33
Çizelge 3.3. Puzolanik Aktivite Testi Karışımları ve Malzeme Miktarları .....	35
Çizelge 3.4. Çimento, uçucu kül ve sentetik vollaŝtonitlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri .....	38
Çizelge 3.5. PVA liflerinin mekanik ve geometrik özellikleri .....	40
Çizelge 3.6. ECC karışım oranları (kg/m <sup>3</sup> ).....	42
Çizelge 4.1. Puzolanik aktivite deneyi aktivite indeks değerleri .....	66
Çizelge 4.2. ECC matrislerinin kırılma tokluğu test sonuçları .....	76
Çizelge 4.3. ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim değerleri...	81

## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tipik çekme dayanımı-gerilme eğrisi ve ECC çatlak genişliği gelişimi .....	6
Şekil 2.2. ECC'nin eğilme yüküne karşı davranışı .....	6
Şekil 2.3. Çatlak açıklığına karşı çatlak köprüleme gerilme ilişkisi.....	8
Şekil 2.4. ECC 'nin basınç dayanımı gelişimi (a), Basınç testine maruz bırakılan ECC numunesi (b) (Wang and Li, 2006b).....	11
Şekil 2.5. ECC'nin eğilme altındaki yer değiştirme eğrisi (a), Büyük yer değiştirmeye uğramış ECC numunesi (b), ECC kirişindeki çoklu mikro çatlaklar (c) (Stang ve Li, 2004).....	12
Şekil 2.6. Vollaştonit kristali .....	16
Şekil 2.7. Vollaştonit minerali (NYCO, 2012) .....	16
Şekil 3.1. Vollaştonit üretiminde kullanılan hammaddelerin tane boyut dağılımı .....	27
Şekil 3.2. ECC karışımlarını oluşturan malzemelerin tane boyutu dağılımları .....	38
Şekil 3.3. Matris tokluğu tayini için kullanılan deney tertibi .....	46
Şekil 3.4. Dört noktalı eğilme-çekme testi için deney düzeneği.....	47
Şekil 3.5. Elastisite modülünün belirlenmesine ait tipik bir gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı .....	48
Şekil 4.1. Doğal hammaddelerle üretilen SV'lerin XRD sonuçları; (a) 24 saat sentezlenmiş, (b) 48 saat sentezlenmiş, (c) 72 saat sentezlenmiş.....	59
Şekil 4.2. Atık malzemeler ile üretilen SV'lerin XRD analiz sonuçları.....	64
Şekil 4.3. Puzolanik aktivite deneyi yayılma çapı sonuçları .....	65
Şekil 4.4. Puzolanik aktivite deneyi basınç dayanımı sonuçları.....	65
Şekil 4.5. ECC karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları .....	70
Şekil 4.6. ECC karışımlarının 28 günlük elastisite modülü sonuçları .....	73
Şekil 4.7. I nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım eğrileri .....	82
Şekil 4.8. II nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım eğrileri .....	82
Şekil 4.9. III nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım eğrileri.....	82
Şekil 4.10. IV nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım	

eğrileri.....	83
Şekil 4.11. V nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim eğrileri.....	83
Şekil 4.12. VI nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim eğrileri.....	83



## FOTOĞRAFLAR VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 3.1. Sentetik vollastonit üretiminde kullanılan hammaddeler.....	26
Fotoğraf 3.2. Vollastonit üretiminde kullanılan malzemelerin SEM görüntüleri.....	28
Fotoğraf 3.3. Vollastonit üretim prosedürü .....	31
Fotoğraf 3.4. Atık malzemelerle üretilen tobermoritlerin malzeme içeriği .....	34
Fotoğraf 3.5. Puzolanik aktivite deneyi .....	36
Fotoğraf 3.6. Çimento (a), UK (b), SV16 (c) ve SV28'in SEM görüntüleri (d) .....	39
Fotoğraf 3.7. ECC karışımlarında kullanılan PVA lifi .....	40
Fotoğraf 3.8. Harç mikseri kullanılarak ECC üretimi için katı bileşenlerin karıştırılması (a), su ekleme (b), SA ekleme (c) ve PVA ekleme (d) .....	43
Fotoğraf 3.9. Üretimden sonra ECC numunelerinin kür edilmesi .....	44
Fotoğraf 3.10. Basınç dayanımı test cihazı ve basınç dayanımının belirlenmesi .....	44
Fotoğraf 3.11. Matris tokluğu için numuneye çentik açılması .....	45
Fotoğraf 3.12. Üniversal test sistemi ve ECC'nin dört noktalı eğilmede çekme testi sırasındaki davranışı .....	47
Fotoğraf 3.13. Elastisite modülünün video ekstansometre ile belirlenmesi .....	48
Fotoğraf 4.1. Tobermorit mineralleri .....	50
Fotoğraf 4.2. Tobermorit mineralleri .....	50
Fotoğraf 4.3. Doğal hammaddeler ile üretilen vollastonit minerallerinin SEM görüntüleri.....	54
Fotoğraf 4.4. Sentetik vollastonitlerin boy:çap ölçümleri .....	61
Fotoğraf 4.5. Atık malzemelerle üretilen sentetik vollastonitler .....	62
Fotoğraf 4.6. Atık malzemeler ile üretilen SV'lerin SEM analiz görüntüleri .....	63

## SİMGE VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$Al_2O_3$	Alüminyum oksit
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat (Kireç taşı)
$CaO$	Kalsiyum oksit
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum hidroksit
$Ca(NO_3)_2$	Kalsiyum nitrat
$CaSiO_3$	Kalsiyum meta silikat (Vollastonit)
C-A(S)-H	Kalsiyum-alüminyum(silika)-hidrat
C-S-H	Kalsiyum-silika-hidrat
$CO_2$	Karbon dioksit
ECC	Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit
$Fe_2O_3$	Demir oksit
$H_2O$	Su
$K_2O$	Potasyum oksit
$MgO$	Magnezyum oksit
$Na_2O$	Sodyum oksit
$NaCl$	Sodyum klorür
$NaOH$	Sodyum hidroksit
$SiO_2$	Silisyum dioksit
$SO_3$	Kükürt trioksit
cm	Santimetre
mm	Milimetre
$\mu m$	Mikrometre
s/b	su/bağlayıcı
s/ç	su/çimento
$\alpha-CaO.SiO_2$	$\alpha$ -vollastonit
$\beta-CaO.SiO_2$	$\beta$ -vollastonit
$^{\circ}C$	Santigrat derece

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Deneysel ve Malzeme Birliği
MIP	Civa Tutma Porozimetresi
RPM	1 Dakika İçerisinde Gerçekleştirilen Dönüş/Devir Sayı
SA	Süper Akışkanlaştırıcı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SHRP	Stratejik Otoyol Araştırma Programı
TS	Türk Standartları
VYPH	Vollastonit Katkılı Yüksek Performanslı Harç
XRD	X-Işınları Kırınım Cihazı
XRF	X-Işını Floresans Spektrometresi

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Günümüzde, insanların barınma, eğitim, sağlık, ulaşım, enerji yapıları vs. gibi günlük hayatı sekteye uğratmayacak temel yapılara ihtiyaç duyduğu bilinmektedir. Bu yapıların inşa edilmesinde başrol oynayan yapı malzemesi ise betondur. Beton, sahip olduğu yüksek basınç dayanımı, çok yönlülük, ekonomiklik, kullanılabilirlik, yangına dayanıklılık, korozyona karşı direnci ve donatı ile oluşturduğu aderans gibi birçok avantaja sahip olan kompozit bir malzemedir.

Betonun sahip olduğu bu avantajlar, onun günümüze kadar dünya çapında oldukça yaygın bir şekilde kullanımını sağlamış ve gelecekte de bu kullanımının aynı şekilde devam edeceğini göstermektedir. Fakat yapı sektörü için bu kadar önemli olan beton malzemesinin sahip olduğu bazı dezavantajlarda bulunmaktadır. Bu dezavantajların başında ise beton malzemesinin eğilme yükleri altında düşük performans sergileyerek gevrek kırılma özelliği göstermesidir. Betonun sahip olduğu bu olumsuz özellik nedeniyle, beton, yapılarda çelik donatı ile birlikte kullanılmaktadır. Donatı ile sağladığı aderans sayesinde betonun basınç ve çeliğin ise çekme kuvvetlerine karşı daha dayanıklı olduğu bilinmektedir. Ancak, bazı beklenmeyen durumlarda ortaya çıkan deprem kuvvetleri betonarme yapılarda büyük hasara ve hatta yıkımlara bile neden olmaktadır. Ülkemizde ve Dünya'nın birçok yerinde meydana gelen bu doğa olayı birçok insanın can ve mal kaybına neden olmuştur. Bundan dolayı, deprem kuvvetleri etkisi altında olan yapıların ayakta kalması veya yıkılmadan hasar alması için betona süneklilik özelliği kazandırılan ve mikromekanik prensipler doğrultusunda yüksek performanslı lif takviyeli olan, literatürde 'Engineered Cementitious Composites (ECC)' olarak bilinen Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit geliştirilmiştir (Li, 1998; Li, 2003; Li vd. 2001).

Bu kompozit sahip olduğu polivinil-alkol (PVA) lifleri sayesinde eğilme yükleri altında çoklu mikro çatlaklar oluşturarak büyük şekil değişimleri meydana getirebilmektedir. ECC'nin tasarlanmasında hacimce %2 oranında kullanılan PVA lifi, %6 oranında birim uzamaya ve 1600-2500 MPa arasında çekme dayanımına sahiptir (Li vd., 2001). Polietilen liflerinin fiyatının PVA liflerine kıyasla daha yüksek olmasından dolayı, ECC

karışımlarında genellikle PVA liflerinin tercih edildiği bilinmektedir. Tasarımında hacimce %2 oranında PVA lif kullanılan ECC, ilk çatlağın oluşmasından sonra karakteristik olarak şekil değiştirmesi sertleşmesi yaparak çoklu mikro çatlaklar oluşturmaktadır. ECC karışımlarının sahip olduğu çatlak genişliklerinin en yüksek yük taşıma kapasitesinde bile 100 µm seviyesinden daha düşük olduğu bilinmektedir. Lifli betonların yük altında oluşturduğu çatlak genişliği 300-400 µm iken, bu değer ECC karışımlarında 60 µm seviyesinden az olabilmektedir. Bu durum ECC'yi diğer lifli beton türlerinden ayıran en önemli özelliğidir.

ECC'nin sahip olduğu bu yüksek performans, diğer lifli beton türlerine göre çevresel koşullar altında daha yüksek dayanımlı olmasını sağlamaktadır (Şahmaran ve Li, 2007; Şahmaran ve Li, 2008; Şahmaran ve Li, 2009; Şahmaran vd., 2008; Li vd., 2007). Maalej ve Li (1994) tarafında yapılan bir çalışmada ise, %1 oranına çelik lif içeriğine sahip olan FRC ile ECC karışımlarının 29-30 gün sonunda eğilme/çekme mukavemetleri oranları incelendiğinde, bu oranların ECC karışımlarında 5, FRC karışımlarında ise 3 olduğu belirlenmiştir. Kesner ve Billington (2002) çalışmasına göre, ECC ve betondan oluşan iki panele kesme yükü uygulanmış ve bunun sonucunda beton panelin basınç dayanımının 38 kN, ECC ile elde edilmiş panelin ise 56 kN'luk dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir. Şahmaran vd., (2007) tarafından yapılan bir çalışmada ise ECC karışımlarının harç karışımlarına göre 30, 60 ve 90 gün sonunda daha düşük bir klor iyon geçirimsizliğine sahip olduğunu belirlemişlerdir.

ECC'nin sahip olduğu yüksek eğilme performansı ve dayanıklılık özelliklerinin PVA lif gibi davranan malzemelerle iyileştirilebileceği düşünülmektedir. Bundan dolayı, PVA lif gibi davranabilen vollastonit mineralinin bu ihtiyacı karşılayabileceği bilinmektedir. Vollastonit minerali, kalsit içeren kalker ile silisin yüksek magma sıcaklığında etkileşmesi sonucu doğal olarak oluşmasının yanı sıra laboratuvar ortamında da sentetik olarak üretimi sağlanabilmektedir. Yüksek saflıklarda beyaz renk, safsızlıklarda ise krem, yeşil ve hatta kahverengine sahip olan vollastonit minerali iğnemsiz parçacık yapısına sahiptir. Kimyasal bileşiminde minimum %90 oranında CaO ve SiO<sub>2</sub> bulunduran bu mineral alüminyum, potasyum, demir, sodyum, magnezyum ve manganez elementlerini de içerebilmektedir. Vollastonit minerali, mohs sertlik skalasına göre 4.5-5 aralığında yer alırken pH değerinin 9.9 olduğu bilinmektedir. Sahip olduğu bu pH değeri bazik ortam oluşturduğundan ve aynı zamanda elastisite modülü

ve çekme gerilmesi değerlerinin sırasıyla 300-530 GPa ve 2700-4100 MPa arasında olmasından dolayı çimentolu kompozitlerin oluşturulmasında oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Vollaistonitin sahip olduğu bu değerler, onun aynı zamanda seramik, plastik, metalurjik uygulamalar, boya ve kaplamalardaki kullanımını da önemli ölçüde değerli kılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, vollaistonitin laboratuvar ortamında sentetik olarak üretilerek tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerde (ECC) lif donatı olarak kullanılması ve bu sentetik vollaistonitin kompozitlerin mekanik özellikleri üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, vollaistonit minerali literatür çalışmaları dışında belirlenen özel bir yöntemle üretilmiştir. Bu yöntemde, yüksek boy:çap oranına sahip olan vollaistonit mineralinin üretimi iki farklı malzeme grubunun kullanılmasıyla elde edilmek istenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, iki farklı tane boyut dağılımına sahip olan CaO ve SiO<sub>2</sub> hammadde kaynakları vollaistonit mineralinin üretiminde kullanılmıştır. CaO kaynağı olarak, maksimum tane boyutları sırasıyla 3080 µm ve 517 µm olan kalsit ile sönmemiş kireç hammaddeleri kullanılırken, SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak ise maksimum tane boyutları sırasıyla 454 µm ve 127 µm olan silis kumu ve silis tozu hammaddeleri kullanılmıştır. Bu hammaddelerle CaO:SiO<sub>2</sub> molar oranı 1:1 olacak şekilde 4 farklı kombinasyon oluşturulmuş ve elde edilen bu kombinasyonlar 24, 48 ve 72 saatlik sentezleme sürelerinde sentezlendikten sonra 1000 °C, 1100 °C, 1200 °C ve 1300 °C sıcaklıklarında sinterlenmiştir. Vollaistonitin üretimi, doğal hammaddelerin kullanılmasının yanı sıra atık hammaddelerin kullanılmasıyla da sağlanmıştır. Bu üretim aşamasında ise CaO kaynağı olarak mermer tozu, sinterlenmiş mermer tozu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılırken, SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak ise silis dumanı kullanılmıştır. Bu atık malzemeler de CaO ve SiO<sub>2</sub> molar oranları 1:1 olacak şekilde karışımlarda kullanılmış ve doğal hammaddelerle elde edilen en yüksek boy:çap oranına sahip vollaistonitin üretim prosedürü uygulanmıştır. Bu işlemlerin sonucunda 40 farklı vollaistonit minerali elde edilmiş ve en yüksek boy:çap oranının sönmemiş kireç ve silis kumunun 48 saatlik sentezlenmesinin ardından 1000 °C sıcaklıkta sinterlenmesi sonucu elde edildiği görülmüştür. Üretimi sağlanan bu vollaistonit minerallerinden en yüksek boy:çap oranına sahip olan iki vollaistonit tipi (SV16-SV28) karışımlarda kullanmak üzere belirlenmiştir. Belirlenen bu iki tip vollaistonit minerali ECC karışımlarında kullanılmadan önce Puzolanik Aktivite Deneyine tabi tutulmuştur. İnert bir yapıya sahip olan vollaistonit minerali, bu deneyde puzolanik bir reaksiyon yerine fiziksel bir etki ile

dayanıma katkı sağlayacağı düşünülmüştür. Bundan dolayı, bu deneyin ilk aşamasında her iki vollastonit tipi (SV16-SV28) ASTM C311/C311M-13'e (2013) standardına göre yapılırken, ikinci aşamasında ise süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılarak yapılmıştır. Bu deneyin sonucunda 7 ve 28 gün sonunda karışımların Puzolanik Aktivite İndeks değerleri hesaplanmış ve süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılarak üretimi sağlanan karışımların standart sınır değerleri sağladığı belirlenmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, belirlenen SV'ler ECC tasarımında mineral bir katkı malzemesi olarak kullanılmıştır. SV ilaveli ECC'lerin üretimi 0.27 sabit su/bağlayıcı (çimento (Ç)+uçucu kül (UK)+vollastonit) oranıyla, 310±10 mm sabit bir yayılma çapına sahip olacak şekilde SA kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, ECC kontrol karışımı sabit su/bağlayıcı oranı ile üretilmiştir. Daha sonra ise sentetik vollastonit (SV16) sırasıyla çimentonun, uçucu külün ve çimento+uçucu külün yerine %3, %6, %9 ve %12 oranlarında yeni bir mineral katkı malzemesi olarak ikame edilmiştir. Bu karışımlardan elde edilen sonuçlar doğrultusunda, en iyi performansın çimento+uçucu kül kombinasyonunun %6 SV içeriğinde en yüksek değerlere ulaştığı ve %9 SV içeriğinden sonra düşmeye başladığı belirlenmiştir. Bu sonuçlardan dolayı, SV28 minerali çimento+uçucu kül kombinasyonunda, SV 16 minerali ise aynı kombinasyonun Ç/UK oranı 2.2 ve kuvarz kaynağı iri (1000 µm) olan karışımlarında %3, %6 ve %9 oranlarında kullanılmıştır. Üretimi sağlanan ECC karışımlarının mekanik özelliklerinin belirlenmesi için 7 ve 28 gün sonunda, basınç dayanımı, eğilme performansı ve kırılma tokluğu deneylerine tabi tutulurken, sadece elastisite modülü deneyi 28 gün sonunda uygulanmıştır. ECC karışımlarının deney sonuçları değerlendirildiğinde, üretilen SV16 mineralinin SV28 mineraline göre ECC'nin mekanik özelliklerini daha çok iyileştirdiği ve bu iyileşmenin optimum seviyesinin %6 SV içeren ECC karışımlarında olduğu, %9 ve sonrasındaki oranlarda ise düşmeye başladığı belirlenmiştir.

## BÖLÜM II

### LİTERATÜR TARAMASI

#### 2.1 Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler (ECC)

##### 2.1.1 Tasarlanmış çimento esaslı kompozitlerin geçmişi

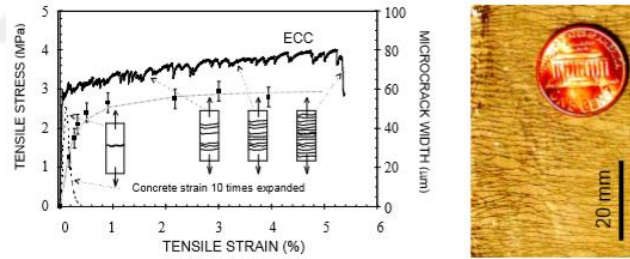
Yüksek dayanıma ve yüksek süneklilik özelliklerine sahip olan malzemelerin yeni bir sınıfı olarak, 'Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit (ECC)', normal hizmet koşullarında ciddi yükleme ve yüksek dayanıklılık altında yüksek hasar toleransı elde etmek için tasarlanmış lif takviyeli çimento esaslı kompozittir (Li, 1998; Li vd., 2001; Li, 2003a). ECC'yi geleneksel beton ve lif takviyeli betondan (FRC) ayıran en belirgin özellik, % 3 ile %5 arasında daha yüksek gerilme gerinim kapasitesi arasında olmasıdır. Normal betondan 300 kat daha fazla olan sünme kapasitesine sahip olan ECC, mikro çatlakların oluşumuna izin vermektedir. Ayrıca, birçok sünek metal gibi, çatlakların oluşmasından sonra bu yük taşıma artışı malzemenin sertleşmesini göstermeye izin vermektedir.

Tipik bir ECC, FRC'nin içeriğine benzemesine rağmen, mikro-çatlak bileşenleri ile bileşenler (agrega, çimento ve fiberler) arasındaki ara yüzün özellikleri mikro mekanik gerinim sertleştirme yoluya yapılmaktadır (Li, 1998; Lin vd., 1999; Li vd., 2001; Li, 2003a). Çimentonun kırılma özellikleri, karışım oranı ile dikkatlice kontrol edilmektedir. Dayanım, elastisite modülü ve lif oranı gibi özellikler ECC kullananlar için özelleştirilmiştir. Ek olarak, bu malzemenin özellikleri arasındaki lif-matris ara yüzeyi, lif üreticileriyle işbirliği içinde kullanılmak üzere optimize edilmiştir.

Yüksek sünek ve dayanım özelliğine sahip olan yüksek lif takviyeli çimento esaslı kompozitlerin performansının ana nedeni, karışımda bulunan yüksek lif içeriğinden kaynaklanmasına rağmen, bu performans ECC karışımlarında orta derecede (hacimce % 2) lif içeriği ile sağlanabilmektedir. Bu düşük lif hacmi inşaat uygulamalarında malzemenin esnekliğine olanak sağlamaktadır. ECC günümüze kadar, kendiliğinden yerleşen uygulamalarında (Kong ve diğ., 2003), püskürterek çıkartma işleminde (Stang

ve Li, 1999), püskürtme (Kim ve diğ., 2003) ve geleneksel karıştırma (Lepech ve Li, 2007) metotları için tasarlanmıştır.

Şekil 2.1’de %2 PVA lif içeriğine sahip olan tipik bir ECC için çekme dayanımı-gerilme eğrisi gösterilmektedir. İlk çatlaktan sonra, karakteristik gerginlik sertleştirme davranışına çoklu mikro çatlak olarak eşlik etmektedir. Ayrıca Şekil 2.1’de elastik olmayan sünme sırasında mikro çatlak genişliğinin gelişimi gösterilmektedir. Nihai yükte bile, çatlak genişlikleri 80 mikrondan daha küçük olmaktadır. Bu durum, geleneksel güçlendirme veya kendinden güçlendirme ile kombinasyon halinde kullanılacak kompakt çatlak genişliği, malzemenin özelliğinden bağımsız olarak kontrol edilir. Buna karşılık, normal beton ve lif takviyeli beton, çatlak genişliğini kontrol edebilmek için çelik takviyeyle güvenli hale getirilmektedir. Yüksek eğilme yüklerine maruz kalan ECC kirişi, metal bir plakaya benzer şekilde sünek bir plastik deformasyona uğramıştır (Şekil 2.2). Basınç yüklerine maruz bırakılan ECC karışımları ise, yüksek dayanımlı betona (Ör. 60 MPa’dan daha büyük) benzer basınç dayanımı performansının elde edildiği göstermektedir (Lepech ve Li, 2007).



**Şekil 2.1.** Tipik çekme dayanımı-gerilme eğrisi ve ECC çatlak genişliği gelişimi (Weimann ve Li, 2003a)



**Şekil 2.2.** ECC'nin eğilme yüküne karşı davranışı (Weimann ve Li, 2003a)

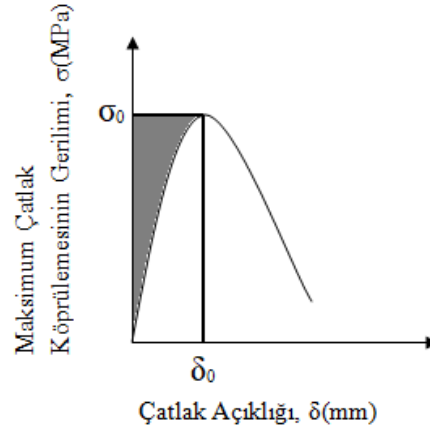
### 2.1.2 ECC'nin tasarlanması

ECC kompozitlerinin tasarımında, birinci öncelik, yük altında çoklu çatlak ve deformasyon sertleştirme 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 gerinim sertleşmesinde kararlı durum çatlak ilerlemesini karakterize ettiler. Bundan sonra Li ve Leung (1992) ve Lin ve arkadaşları (1999) genişletilmiş lif takviyeli çimentolu kompozitler üzerinde çalışmışlardır. Bu çalışmalarda, Griffith tipi çatlakların yayılması sırasında genişecek 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 gerinim sertleşmesinin 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.

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

$J'_b$  Şekil 2.3'te gösterilen karşılıksız enerjidir,  $\sigma_0$  ve  $\delta_0$  ise sırasıyla maksimum çatlak köprülemesinin gerilimi ve ona karşılık gelen çatlak açıklığıdır.  $J_{tip}$  harç matrisinin kırılma enerjisi,  $K_m$  harç matrisinin kırılma dayanıklılığı ve  $E_m$  harç matrisinin elastisite modülü değeridir. Kırılma enerji ölçütüne ek olarak, Denklem 2.2'de görülen dayanım ölçütü uygulanmalıdır.

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



**Şekil 2.3.** Çatlak açıklığına karşı çatlak köprüleme gerilme ilişkisi

$\sigma_{fc}$  ilk çatlak dayanımı ve  $\sigma_0$  harç matrisinin maksimum çatlak köprülemesinin gerilimi olarak ifade edilmektedir. Wang ve Li (2003), Denklem 2.2'nin her potansiyel çatlak düzleminde doymuş çoklu çatlama için uygulanması gerektiğini bulmuştur,  $\sigma_{fc}$  bu çatlak düzleminde çatlama gerilmesi olarak algılanır.

Çoklu kararlı durum çatlaklarının oluşumu ve gerilme sertleştirme davranışı, ECC karışımının yukarıdaki kriterlere göre seçilmesi durumunda elde edilebilir. Ayrıca, karışımlar  $100 \mu\text{m}$  eşik sınırının altında çatlak genişlikleri üretmek için tasarlanmalıdır. Bu, çatlak genişliği ve çatlak köprüleme arasındaki ilişki Denklem 2.1'den elde edilebilir. ECC çoklu çatlama sırasında sergilenen maksimum kararlı durum çatlak genişliği, Şekil 2.3'de gösterildiği gibi, maksimum çatlak köprüleme gerilimine ( $\sigma_0$ ) karşılık gelen çatlak genişliği  $\delta_0$  olarak kabul edilebilir. Eğer çatlak genişliği  $\delta_0$ 'ın ötesinde bir büyüme gösterirse çatlak köprüleme gerilimi azalmaya başlar ve bu durumda çatlak yerleşmiş olup çoklu çatlak oluşumu sona ermektedir. ECC malzemesi,  $100 \mu\text{m}$  eşik sınırının altında  $\delta_0$  tarafından tutularak, gerilme sertleştirme performansı ve çoklu çatlama performansını önerebilir.

Belirli bir çatlak düzlemini geçen liflerin köprü kuvveti katkısının toplanmasına dayanarak çatlak köprüleme gerilme ilişkisine karşı çatlak açıklığının formülasyonu Lin ve ark. (1999) tarafından hazırlanmıştır. Bu ilişki Denklem 2.3'te gösterilmiştir.

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

$V_f$  liflerin hacmini,  $d_f$  liflerin çapını,  $L_f$  lif boyunu,  $\phi$  lifin uyum açısını,  $z$  bir lifin çatlak düzleminden merkeze olan uzaklığını,  $f$  bir katsayı ve son olarak  $p(\phi)$  ve  $p(z)$  ise sırasıyla çatlak düzleminden lif uyum açısı ve merkeze olan mesafesinin olasılık yoğunluk fonksiyonlarıdır. Lin ve ark. (1999), çatlak düzlemine normal olarak hizalanmış tek bir lifin yer değiştirme yüküne karşı dışarı çekme yükü olan  $P(\delta)$ 'yi tanımlamıştır.  $e^{f\phi}$  faktörü, eğik açının çatlak düzleminden eğik lifler için köprüleme yüklerindeki değişiklikler için hesaplanmıştır. ECC' nin uyum sağlaması için bu temel mikromekanik modellerin kullanılması, düşük geçirgenlik önemsenmeden kompozitin sahip olduğu büyük çatlak genişlikleri nedeniyle, en az yüzde biri, büyük deformasyonlar sergilemek üzere tasarlanabilir. Malzeme tasarım prosedürlerinin uygulanması, malzeme mühendislerinin belirli inşaat ihtiyaçları için düşük geçirgenlik ve gerinme kapasitesi gibi malzeme özelliklerini seçmelerine izin vermektedir.

### 2.1.3 ECC'nin uygulama çalışmaları

ABD'de Michigan Üniversitesinde ve Japonya'da Tokyo Üniversitesi ve Kajima Kurumunda, Yapı Araştırma Enstitüsü'nde yapısal uygulamalarda ECC uygulamaları üzerine bir dizi araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalar, genel betonarme yapıların tamirinde, binaların perde duvarlarının güçlendirilmesinde, inşaat demirinin kaplamasında korozyonu önlenmesinde ve kiriş kolon bağlantılarında dayanımı arttırmak için kullanılmıştır. Bunlar ECC'nin kullanım alanlarının belirlenmesinde yapılan başlıca çalışmalardır. ECC ve onun uygulama alanlarındaki diğer çalışmalar ise Danimarka ve Avusturya tarafından da yapılmıştır.

Sürekli yükler altında güçlendirilmiş kirişin yapısal dayanım ve dayanıklılığını belirlemek için, geleneksel çelik ile güçlendirilmiş PVA-ECC (hacimce %2) kirişleri dört yönlü ofset yüklemesi ile test edilmiştir ve orta açıklık tamamen ters tek biçimli kesme yüküne maruz bırakılmıştır (Kanda et al., in press, 1998). Testlerdeki çeşitli parametreler arasında, açıklık/derinlik oranı ve kesme takviyesi miktarı bulunmaktadır. ECC benzer basınç dayanımlı (30 MPa) sıradan beton ile kontrol örnekleri de test edilmiştir.

Kiriş-kolon birleşim bölgesinde ECC'nin kullanımı Mishra (1995) tarafından araştırılmıştır. Normal detaylandırma ile yapılan bu çalışmada, PE-ECC'ye sahip bölgelerin geleneksel çelik ile güçlendirilmiş beton bölgesine oranla 2,8 kat daha fazla enerji sönümlendiği belirlenmiştir. Duvar tadilatları için prefabrik perde panellerinde PVA-ECC kullanımı sayısal olarak Kabele ve ark. (1997) tarafından, deneysel olarak ise Kanda ve diğerleri (1998) tarafından araştırılmıştır. Rijit bir şekilde birleştirilen kesme panellerine FEM (Sonlu Elemanlar Yöntemi) simülasyonu ve ECC'nin gerilme-sertleştirme davranışını yakalayan malzeme yapılı model kullanarak, PVA-ECC panelinin, düz betonla yapılan benzer panellere kıyasla çok daha yüksek sismik yük ve deformasyon kapasitesini sürdürdüğü bulunmuştur. ECC'nin gerilimi azaltma ve bağlantı noktalarındaki hasarı kesme panelinin iç kısmına yeniden dağıtabilme yeteneği, ECC panellerinde gözlenen gelişmiş yapısal dayanıklılık ve süneklilikten kaynaklanmaktadır.

ECC ayrıca geleneksel beton ile oluşturulan yapıların korozyona karşı dayanımını arttırmak için koruyucu bir tabaka olarak da araştırılmıştır. Bu araştırmanın sonucuna göre geleneksel beton ile oluşturulan örneklerin çatlak açıklığı 1 milimetreden fazla iken ECC ile oluşturulan örneklerin çatlak genişliği 0,1 milimetreden daha az açıklığa sahip olduğu belirlenmiştir (Maalej and Li 1995). ECC'nin bazı ek potansiyel uygulamaları, hibrid çelik ile güçlendirilmiş betonarme yapıları için kısa kolonlar, amortisörler, çelik eleman bağlantıları da dahil olmak üzere yüksek enerji emilim cihazlarında bulunmaktadır. Çarpmaya veya 3 boyutlu yüklemeye tabi tutulan yapılar, aynı zamanda, ECC'nin, otoyol kaplamaları, köprü güverteleri ve patlamaya dayanıklı bina çekirdek elemanları gibi izotropik enerji emme davranışından da yararlanabilir. ECC'nin düşünüldüğü diğer uygulamalar, kalıcı kalıp, lifli betonarme yapılar ve filtre kontrolü için radyoaktif atık arıtımı için bağlayıcı bir malzemedir (Wu ve ark. 1996).

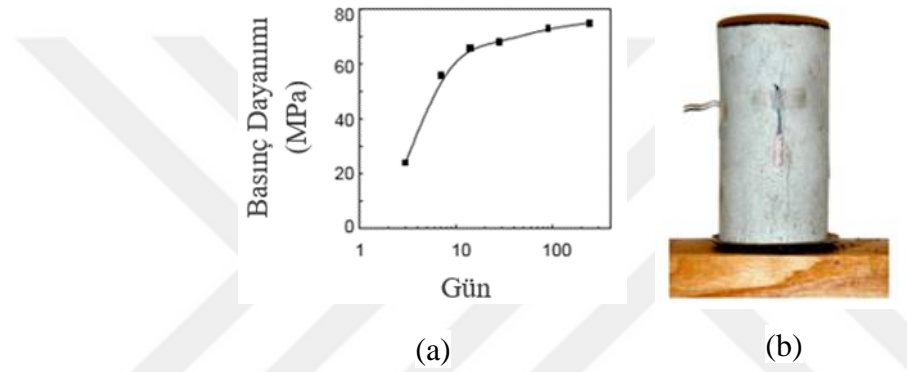
## **2.1.4 ECC'nin mekanik özellikleri**

### **2.1.4.1 Basınç dayanımı özellikleri**

ECC'nin basınç dayanımı özelliği normal yüksek performanslı betondan herhangi bir farkı bulunmamaktadır. ECC'nin sahip olduğu basınç dayanımının 30 MPa ile 90 MPa

aralığında olduğu bilinmektedir. Ancak, ECC karışımlarında kaba agrega bulunmadığından dolayı elastisite modülü değeri (20-25 GPa) normal betonun değerinden daha düşük olabilmektedir. ECC'nin basınç gerinim kapasitesi ise normal betona göre biraz daha yüksek değere (%0.45-0.65) sahiptir. Şekil 2.4.a'da standart ECC (M45) basınç silindirin dayanım grafiği gösterilmiştir.

Basınç altındaki ECC'nin pik sonrasındaki davranışı incelendiğinde, numunenin patlayarak parçalanmasından ziyade kademeli olarak şişerek (Şekil 2.4.b) yüksek mukavemetli betondan daha yumuşak bir şekilde inme eğilimindedir.

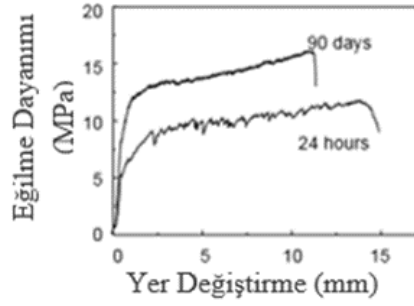


**Şekil 2.4.** ECC 'nin basınç dayanımı gelişimi (a), Basınç testine maruz bırakılan ECC numunesi (b) (Wang and Li, 2006b)

#### 2.1.4.2 Eğilme performansı özellikleri

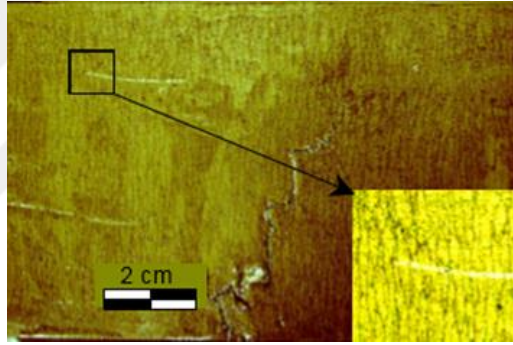
ECC'nin eğilme performansı onun çekme altındaki süneklilik özelliğini yansıtmaktadır (Maalej and Li, 1994; Wang, 2005, Wang and Li, 2006; Kunieda and Rokugo, 2006a). Eğilme yükü altında, kiriş numunesinin altında büyük bir eğilme şekil değişimine gelişimine izin vermektedir ve bununla birlikte çoklu mikro çatlaklar oluşturmaktadır. ECC kiriş numuneleri 10-15 MPa'lık eğilme dayanımı değerlerine (kırılma modülü veya MOR) kolaylıkla ulaşabilir ve büyük ölçüde gerinim sertleştirme yöntemi eşlik etmektedir (2.5.a). Gerinim sertleştirilmesi ECC' nin kendinden bir özelliğidir ve geometrik şekle bağlı değildir. Bu durum kiriş yüksekliği arttıkça gerinim sertleştirmesinin daha zor hale geldiği FRC için geçerli değildir (Stang ve Li, 2004). Yüksek oranda deformasyona uğramış olan ECC kiriş numunesi ve kiriş altında meydana gelen çoklu mikro çatlakların görüntüleri sırasıyla Şekil 2.5.b ve Şekil 2.5.c'

de verilmiştir. ECC, normal beton ve FRC' ye göre yorulma tepkisi bakımından önemli derecede iyileşmelere sahiptir. Suthiwarapirak ve arkadaşları (2002) tarafından yapılan bir çalışmada, ECC üzerinde eğilme yorulma testi yapılmış ve onarım uygulamalarında yaygın olarak kullanılan polimer çimento harçları ile karşılaştırıldığında daha yüksek süneklilik ve yorulma ömrü gösterdiğini belirlemişlerdir.



(a)

(b)



(c)

**Şekil 2.5.** ECC'nin eğilme altındaki yer değiştirme eğrisi (a), Büyük yer değiştirmeye uğramış ECC numunesi (b), ECC kirişindeki çoklu mikro çatlaklar (c) (Stang ve Li, 2004)

### 2.1.5 ECC'nin durabilite özellikleri

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

### **2.1.5.1 Donma çözünme direnci**

Daha önce yapılan bir çalışmada, hava sürüklenmemiş ECC örneklerinin dayanıklılığı, ASTM C666'ya uygun olarak donma ve çözme 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 et al, 2003). Beş hafta sonunda (110 döngü) standart gereği donma-çözünme cihazından çıkarılan beton numunelerinde ciddi bozulmaların olduğu görülmüştür. Ancak ECC numuneleri 300 döngüye rağmen dinamik modülünde herhangi bir bozulmanın olmadığı görülmüştür. Bu performans ASTM C666'ya göre hesaplandığında, ECC'nin donma-çözünme direncinin normal betona göre 10 kat daha iyi olduğunu göstermiştir.

### **2.1.5.2 Uzun süreli şekil değiştirme kapasitesi**

Bir inşaat malzemesinin dayanıklı olduğu düşünüldüğünde, mekanik özellikleri zamanla bozulmamalı ve minimum tasarım özelliklerinin altına düşmemelidir. Bunun için daha önce yapılmış olan bir çalışmada, ECC'nin uzun süreli şekil değiştirme kapasitesini belirlemek için bir dizi gerilme testi yapılmıştır. 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 bir 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 yükselmediğinden, uzun

vadeli tasarımlar için kullanılmalıdır. Basitlik açısından, uzun vadeli davranışa asimptotik olarak yaklaşan 28 günlük şekil değiştirme kapasitesi değerinin % 90'ı tasarım gerilme kapasitesi olarak kabul edilebilir. Bu, basınç mukavemeti belirtilmesi için aynı 28 günlük değer olarak kullanıldığı için tasarımı kolaylaştırır.

### **2.1.5.3 Tropik 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 materyalleri için numuneler, 26 hafta boyunca 60 °C'de sıcak suya daldırılmadan önce oda sıcaklığında 28 gün süreyle kürlenmiştir. Bu işlemlerim 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 iken, % 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 et al, 1982) olan normal betonun 250 katından fazla olan %2.75 şekil değiştirme kapasitesi, çoğu altyapı uygulamaları için kabul edilebilir.

### **2.1.5.4 Klor geçirimliliği**

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 incelemek için, ECC örnekleri ilk olarak farklı gerilme seviyelerinde tek eksenli gerilmeye tabi tutulmuş, daha sonra 1, 2 ve 3 ay boyunca oda sıcaklığında %3 NaCl çözeltisine maruz bırakılmış ve son olarak başarısız olana kadar yeniden yüklenmiştir (Li ve ark. 2007). Tüm durumlarda, yeniden yüklenen örnekler, çoklu mikro-çatlama davranışını ve % 3'ten daha fazla şekil değiştirme kapasitesini korumuş, ancak ortalama çatlak genişliği 40 µm'den 100 µm'ye yükselmiş ve gerilme mukavemeti yaklaşık % 10 azalmıştır. Kabele ve diğerlerinin (2007) tek eksenli eğilme

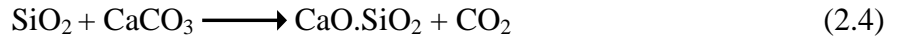
testi verilerinde de önerildiği gibi, daha geniş çatlak genişliği lif/matris arayüzündeki kimyasal bağları azalttığından dolayı daha düşük gerilme kuvvetine neden olmaktadır.

#### 2.1.5.5 Alkali silika reaksiyonu

Şahmaran ve Li (2007b) tarafından yapılmış olan bir çalışmada, ECC'nin alkali silika reaksiyonuna karşı dayanımını belirlenmiştir. Bu çalışmada, ECC numunelerinin alkali silika reaksiyonuna bağlı olarak uzunluk değişimlerini belirlemek için ASTM C 1260 standardına göre 80 °C'lik alkali çözeltisine daldırılmıştır. F sınıfı veya C sınıfı uçucu kül içeren ECC numunelerinde, 30. gün sonunda alkali çözeltisinin içerisinde çıkarıldığında herhangi bir genişlemenin olmadığını belirlemişlerdir. ECC karışımlarında çok ince kum kullanılmış olmasına rağmen, bu kum parçacıklarının doğası, alkali bir ortamda reaktiviteyi bastırmıştır. Ayrıca, yüksek hacimli uçucu külün varlığı, puzolanik reaksiyona bağlı olarak ortamın pH değerini azaltmakta ve alkali silika reaksiyonunun oluşmasını daha az olası bir hale getirmektedir. ECC bünyesinde bulunan PVA mikrofiberler, oluşabilecek herhangi bir genleşmeyi azaltma eğilimindedir. Sonuç olarak, bu çalışma ile ECC'nin alkali silika reaksiyonuna karşı dayanıklı bir malzeme olduğu kanıtlanmıştır.

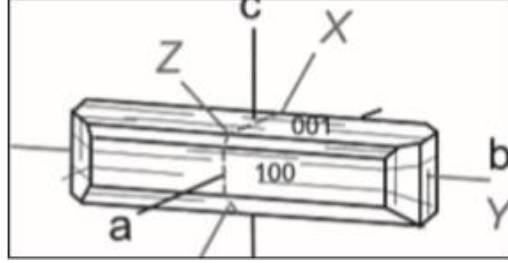
#### 2.6 Vollastonitin Tanımı ve Özellikleri

İngiliz kimyager ve mineralog olan William Hyde Wollaston'a ithafen isimlendirilmiş olan vollastonit minerali, magmatik kayalar ile kalkerlerin kontaktlarında ısı metaformize işlemine bağlı olarak oluşan bir kalsiyum metasilikattır ( $\text{CaSiO}_3$ ) (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Vollastonit mineralinin oluşum mekanizması aşağıdaki formülde izah edilmiştir (Paul, 1977).



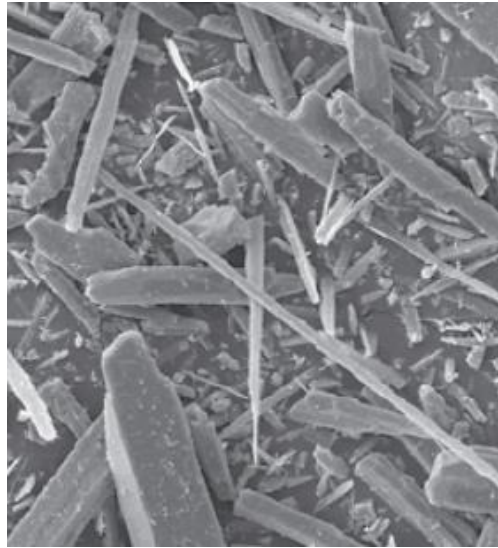
Piroksen grubunun bir üyesi olan bu mineralin kristal yapısı zincir bileşiminde  $(\text{Si}_3\text{O}_9)^{6-}$  bulunmaktadır. Bu zincir bileşiminin iki dörtyüzlünün aktif oksijenleri bir tarafta yer alırken, üçüncü dörtyüzlünü aktif oksijenleri başka bir tarafta yer almaktadır (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Bu oksijen dağılımı mineral parçacığının lifsel doku ve yassı kristal şekil ile uyum içerisinde olduğunu göstermektedir. Yassı bir özelliğe sahip olan

vollastonit kristalleri b eksenine paralel bir şekilde uzanmıştır ve genellikle masif, lifsel topluluklar halinde bulunmaktadır (Kumbasar, 1977). Vollastonit mineralinin kristal hali Şekil 2.6' da gösterilmiştir.



Şekil 2.6. Vollastonit kristali (ICL, 2012)

Kimyasal kompozisyonunda minimum %90 oranında CaO ve SiO<sub>2</sub> içeren vollastonit mineralinin saf hali doğada çok kısıtlı bir oranda bulunmaktadır. Kimyasal olarak inert bir malzeme olan vollastonit minerali, iğnemsî bir parçacık yapısına sahiptir. Sahip olduğu dilinim özellikleri sayesinde kırma ve öğütme işlemleri sırasında iğne şekilli parçacıklar oluşur. Bu parçacıkların iğnemsîliği boy:çap oranı ile tanımlanmaktadır (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Vollastonit mineralinin sahip olduğu iğnemsî parçacık yapısı aşağıdaki Şekil 2.7' de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. Vollastonit minerali (NYCO, 2012)

Genellikle parlak ve beyaz renge sahip olan vollastonit minerali, safsızlıkların tipine ve miktarına göre farklı renklerde (gri, krem, yeşil, kahverengi) de görülebilmektedir

(Virta, 2001). Vollaŝtonit minerali dūŝuk kızdırma kaybı değerine sahiptir ve bu değerin endüstriyel alanlarda kullanılan vollaŝtonit minerallerinde 0.5-2.0 aralığında olduğu bilinmektedir. Ayrıca bu mineralin pH değerinin 9.9 olması kaplama endüstrisindeki popülaritesini oldukça arttırmaktadır. Mohs skalası sertlik değeri 4.5-5.0 arasında olan vollaŝtonit mineralinin özgül ağırlığı  $2.87-3.09 \text{ gr/cm}^3$ , ergime noktası ise  $1540 \text{ }^\circ\text{C}$  olarak bilinmektedir (Anon., 2001; Kogel vd., 2006).

## **2.7 Vollaştonit Mineralinin Kullanım Alanları**

Vollaştonit mineralinin ana kullanım alanlarının seramik, boya, metalurji, kaplama, plastik ve asbest yerine kullanımı olduğu bilinmektedir. Bu mineralin bu pazarlarda oldukça yüksek bir popülariteye sahip olmasının asıl nedeni ise sahip olduğu iğnemsî parçacık yapısının sağladığı yüksek mukavemet özelliğinden kaynaklanmaktadır. Vollaştonit mineralinin kullanım alanları pazarlara göre incelendiğinde, seramik alanında; %28, plastik alanında; %37, metalurji alanında; %10, boya alanında; %10, sürtünme ürünlerinde; %9 ve farklı sanayilerde; %6 oranında kullanılmaktadır (Virta, 1999).

### **2.7.1 Seramik sanayi**

Seramiklerde ve özellikle seramik beyaz eŝyalarda kullanımı oldukça eskiye dayanan vollaŝtonit minerali, genel olarak sağlık gereçleri, seramik karolar, sofra eŝyaları ve sanatsal ürünlerde kullanılmaktadır. Vollaŝtonit minerali bu ürünlerde dūŝuk nem yayılımı, hızlı piŝme, dūŝuk küçülme, mukavemet ve boyutsal homojenlik sağlamaktadır (Kogel vd., 2006). 1993 yılında seramik sektöründe kullanılan vollaŝtonit miktarının yaklaşık 150.000 ton olduğu bilinmektedir. Bu değer o yıllarda üretilen toplam vollaŝtonit miktarının %42' lik kısmını oluŝturmaktadır (IARC, 1997).

Vollaŝtonitin iğnemsî parçacık yapısının sağlık gereçlerinde mukavemeti geliŝtirdięi, florin yayılımını azalttığı ve kurumayı hızlandırdığı ortaya çıkartılmıŝtır. Verilen bir patentte, kuru halde bulunan sağlık gereçlerinin bünyesinin darbe direncini %40'tan fazla oranda arttırdığı ve virtifikasyon sıcaklığını dūŝürdüęü belirtilmiŝtir (Kogel vd., 2006; Robinson ve Craig, 2000).

Vollastonit mineralinin seramik ürünler üzerindeki minerolojik ve kimyasal özelliklerine birçok katkısının olduğu bilinmektedir. Bu özellikler detaylı bir şekilde incelenecek olursa, vollastonit sahip olduğu iğnemsiz parçacık yapısı sayesinde yüksek hızlı presleme ile pişirilmemiş killeri daha dayanıklı hale getirmesinin yanı sıra pişmesi sağlanmayan karolarda nem çıkışına yardımcı olarak nem genişlemesinin tekrarlanmasını azaltır. Ayrıca duvar karolarının akustik özelliklerini geliştirir ve düşük ısıl genleşmeye sahip olduğundan dolayı küçülmeyi önlemektedir. Vollastonit minerali 991-1196 °C gibi düşük sinterleme sıcaklığına ve iyi bir derecede izolatör özelliğine sahiptir. CO<sub>2</sub> yayılım değeri (%1'in altında) çok düşük olan vollastonit minerali geleneksel minerallere göre daha avantajlı bir durumda olduğu bilinmektedir. Vollastonit minerali ayrıca, sır yüzeyinde bulunan beneklerin azalması, düşük gaz içeriği ve ergime anındaki kabartmayı da azaltmaktadır (Springer, 1994).

### **2.7.2 Plastik sanayi**

Plastik sanayi, vollastonit mineralinin yaygın olarak kullanıldığı ve büyük bir pazara sahip olan alandır (Degryse ve Elsen, 2003). Vollastonit minerali, tamamlanmış bir malzemenin özelliklerine katkı sağlamasından dolayı plastik alanında dolgu malzemesi olarak diğer beyaz dolgu malzemeleriyle rekabet halinde olabilmektedir. Vollastonitin bu alanda dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliği sahip olduğu düşük su emme, ısıl kararlılık, kimyasal saflık, ısıl iletkenlik, düşük reçine gereksinimi gibi destekleyici özellikleri ile alkalıdır (IARC, 1997). Vollastonitin kullanılması ile beyaz ve yüksek parlaklığa sahip yüksek kaliteli dolgu malzemeleri elde edilebilmektedir. Vollastonit mineralinin dolgu malzemelerinde beyazlık ve parlaklık özelliklerinin yanı sıra bu dolgu maddelerinin çarpma, eğilme ve çekme parametrelerini de geliştirmektedir. Ayrıca seramik ürünlerdeki gibi küçültmeyi azaltır, zemin döşemesindeki sürtünme ve aşınma direncini arttırmaktadır. Vollastonit minerali, karbonat ya da talk gibi dolgu malzemeleriyle karşılaştırıldığında düşük su emme değerine sahiptir ve reçineli karışımlardan etkilenmemektedir. Plastik üzerindeki düşük su emme değeri sayesinde lekelenme ve suya karşı dayanım kazandırır. Ayrıca sahip olduğu düşük elektrik iletkenlik özelliği sayesinde plastiklerin üretimine olanak sağlamaktadır.

Termoset ve termoplastiklerde de kullanımı bulunan vollastonit minerali, termoplastikler için sıvı kristal polimerler, naylon6, poliyester, mühendislik reçineleri,

nylon6/6 gibi ürünlerde kullanılmaktadır. Termosetlerdeki kullanımı ise, poliüretanlar, poliüre, epoksiler, fenollü kalıp bileşenleri ve bazı doymamış polisteri ürünlerinde uygulamaları mevcuttur. Ancak günümüzde, cam elyaf, talk, mika gibi dolgu malzemelerinin fiyatlarının vollastonitin fiyatından daha ucuz olmasından dolayı kullanımı daha yaygındır (IARC, 1997).

### **2.7.3 Boya ve kaplama uygulamaları**

İlk olarak 1950'li yılların başlarında, Amerika Birleşik Devletleri pazarında kaplama uygulamaları için, yüksek parlaklıkta bulunan vollastonit kullanılmaya başlanmıştır. O yıllarda yalnızca 3:1-20:1 boy:çap aralığına sahip olan vollastonit minerali saf halde ve beyaz renkli bir iğnemsiz katkı malzemesiydi. Vollastonitin sahip olduğu bu iğnemsiz parçacık yapısı, boya kaplamalarında olumsuz hava koşullarında aşınmaya karşı direnci ve mekanik dayanım özelliklerinin iyileştirmesine katkı sağlamaktadır. Bunlara ek olarak, kılcal çatlak, çatlama ve zamanla oluşması mümkün olan hatalara karşı direnç sağlamaktadır (IARC, 1997). Vollastonitin çok saf halde iken sahip olduğu renk (beyaz), yüksek pH değerlerinde kararlı olması, iyi ıslatma özelliği ve düşük yağ absorpsiyonu özelliklerinden ötürü akışkanlık, küf ve renk gibi özelliklerin gereksinim duyulduğu kaplamalara ilave edilmektedir.

Vollastonit minerali son zamanlarda, yol işaretleme ve su bazlı emülsiyon boyalarında dolgu ve katkı malzemesi olarak kullanıldığı bilinmektedir (IARC, 1997). Vollastonitin sahip olduğu beyaz renk ve parlaklık boya uygulamalarında boyalara parlak renkler kazandırmaktadır. Ayrıca vollastonitin bazik özelliği sayesinde süspansiyonlarda kuvvetli bir astar boyası olarak kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Vollastonit katkılı dış cephe boya, kendi kendini temizleyebilme ve özel tanecik morfolojisi sayesinde olumsuz hava koşullarına karşı direnç sağlamaktadır (Andrews, 1970; Fattah, 1994; Springer, 1994).

### **2.7.4 Metalurjik uygulamalar**

Vollastonit minerali, ergime noktasının düşük olmasından dolayı sac yapımında uygulanan sürekli döküm işleminde önem arz eden bir malzemedir. Bunun yanı sıra vollastonit mineralinin cüruf şartlandırıcı olarak da kullanıldığı bilinmektedir (Kogel

vd., 2006). Örneklendirilecek olursa, ergimiş halde bir rafinasyon potasında bulunan çelik refrakter tandişi içerisine döküldüğünde, ergimiş halde bulunan yüzeyin sürekliliği oluşuncaya kadar vollastonit minerali ilave edilmektedir. Bu işlem, metal yüzeyin oksitlenmesini önlemekte, kalıp cidarını yağlamak ve metal halde bulunan kalıntıların emilim olayını sağlamak amacıyla uygulanmaktadır. Vollastonit minerali, kaynak toz yönteminde yanma karakteristiklerini geliştirmede veya kıvılcımı engellemede de kullanılmaktadır. Tüm bu metalürjik uygulamalara rağmen vollastonit mineralinin 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) halinde olduğu bilinmektedir (Kogel vd., 2006).

### **2.7.5 Asbest yerine kullanımı**

ABD ve Avrupa'da geniş bir uygulama alanı olan asbestin neden olduğu sağlık risklerinden dolayı kullanımını kısıtlanmış ve bunun yerine vollastonit mineralinin kullanıldığı bilinmektedir. Asbest yoğun olarak beton boru dökümlerinde mekanik mukavemeti sağlamak için kullanılmaktadır. Neden olduğu sağlık olduğu risklerinden dolayı asbest yerine yüksek boy:çap oranına sahip olan vollastonit mineralinin uzun dilinim parçacıkları kullanılmaktadır (Springer, 1994). Son yıllarda vollastonit minerali bazı sürtünmeli ürünlerde, çimentonun üretiminde ve ateşe karşı dayanıklı olan duvar levhasında asbest yerine yaygın olarak kullanıldığı bilinmektedir. İnşaat ve izolasyon levha aplikasyonlarında, yılda yaklaşık olarak 35-40 bin ton miktarında yüksek boy:çap oranına sahip olan vollastonit minerali tüketilmektedir. Bu mineral genel olarak iç ve dış ortamların duvar levhası aplikasyonlarında, kayraklarda, özel olarak şekillendirilmiş olan yalıtım malzemelerinde, çatı kiremitlerinde ve ısıya karşı dayanıklı olan levha uygulamalarında kullanılmaktadır.

### **2.7.6 Diğer uygulamalar**

Vollastonit minerali enerji ihtiyacını azaltmak için cam ve fiberglas alanında kireçtaşı ve silika yerine kullanılmaktadır. Ayrıca, kaynakların elektrotlarında, aşındırıcılarda, toprak şartlandırıcı olarak, kağıtta dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Vollastonit mineralinin yeni kullanım alanının ise kemik implantlar olduğu bilinmektedir. Bu implantlar kemik kayıplarında kullanılmaktadır. Bu uygulama alanında ise  $\beta$ -

vollastoniti tercih edilmektedir.  $\beta$ -vollastoniti ile elde edilen implantlar kemik dokusuyla kuvvetli bağlar kurduğundan dolayı omur protezlerinde kullanımının oldukça etkili olduğu bilinmektedir.

## 2.8 Sentetik Vollastonit

Doğal bir mineral olan vollastonit aynı zamanda laboratuvar ortamında sentetik olarak da üretilmektedir. Danimarka, Almanya, ABD, Rusya ve İtalya gibi ülkelerde vollastonit mineralinin sentetik olarak üretimi için belli başlı teknikler mevcuttur. Elde edilen bu kalsiyum meta silikatlar çoğu zaman sulu bir kıvamda olup susuz kıvam sahip olanların kristalik yapıları doğal vollastonitin kristalik yapısına benzememektedir.

Danimarka'da kalsiyum meta silikatların elde edilebilmesi için ülkede oldukça fazla bulunan kum ve tebeşir kullanılır. Kum ve tebeşir, eritme görevini üstlenmiş olan dolomit ile karıştırılarak bir bulamaç haline getirilir. Elde edilen bu bulamaç ise 1560 °C sıcaklığa maruz bırakılarak katılaşması sağlanır. Katılaştıran bulamaç elek yardımıyla elenir ve elendikten sonra başka bir fırında 1250 °C sıcaklığa maruz bırakılır. Bu işlemlerin sonucunda oluşan malzemenin %50'si vollastonit mineralidir ve bu mineralin opak, beyaz renkli ve köşeli olduğu bilinmektedir. Bunun yanı sıra elde edilen malzemede akarmanit ve gehlenit de vardır. Sentetik olarak üretimi gerçekleştirilen ve elde edilen ürüne 'Synopal' denmekte ve bu ürün yer ve çatı kaplamalarında, mozaik yapımında kullanılmaktadır.

İtalya'da elde edilen sentetik vollastonite ise 'Wollanita' denmektedir ve tebeşir, dolomit ve silis kumu kullanılarak üretimi sağlanmaktadır. Üretimi sağlanan bu sentetik vollastonit ise aşındırıcı olarak, geleneksel seramikler ve yol malzemesinde kullanılmaktadır (Anon, 1991; Can, 1991).

Üretilen bu sentetik vollastonitler doğal vollastonite göre daha saf ve homojen bir yapıya sahiptir. Fakat bu vollastonitlerin kristalik yapıları incelendiğinde sentetik vollastonitin sahip olduğu iğnemsiz yapı doğal vollastonitin sahip olduğu iğnemsiz yapı kadar yüksek olmayabilir. Hali hazırda bulunan literatür çalışmalarına bakıldığında sentetik vollastonit üretimi için 3 farklı metodun bulunduğu görülmektedir. Bu metotlar;

katı hal reaksiyon metodu, sıvı faz reaksiyon metodu ve ıslak metot olarak bilinmektedir.

### **2.8.1 Katı hal reaksiyon metodu**

Bu üretim metodunda 800 °C üzerindeki sıcaklıklarda bulunan silikanın kalsiyum karbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) veya kalsiyum oksit ( $\text{CaO}$ ) ile reaksiyona girmesi esasına dayanmaktadır. Bu metot sayesinde, atık birer malzeme olan kalsit, silis dumanı, doğal silisyum içerikli karbonatlar ve mermer tozu kullanılmakta ve bu malzemeler yararlı hale getirilmektedir. Fakat elde edilen sentetik vollastonitler, iğnemsî parçacık yapısına sahip olmamaktadır (Zhu, 2013).

Kuvartz tozu, diatomit ve silikoferekrom malzemeleri  $\text{SiO}_2$  kaynağı olarak kullanılırken, bilyeli değirmene yerleştirilen mermer tozu malzemesi  $\text{CaO}$  kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu karışım kuru presten geçirilmekte ve 900-1100 °C arasındaki bir sıcaklıkta 4 saat boyunca sinterlenmektedir. Bu işlemlerin sonunda elde edilen ürünün düşük boy:çap oranına sahip olduğu bilinmektedir.

### **2.8.2 Sıvı faz reaksiyon metodu**

Sıvı faz reaksiyon metodunda, geri dönüştürülmesi mümkün olan atık malzemelerin kullanılması ile yüksek boy:çap oranına sahip olan sentetik vollastonitler üretildiğinden dolayı, bu yöntem oldukça önem arz eden bir üretim yöntemidir (Zhu, 2013). %55  $\text{SiO}_2$  + %26  $\text{CaO}$  + %13  $\text{ZnO}$  + %2  $\text{MgO}$  + %13  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ya da %50  $\text{SiO}_2$  + %30  $\text{CaO}$  + %20  $\text{ZnO}$  malzemelerinin bir araya getirilmesi ile elde edilen karışım yüksek dereceli sıcaklıklara dayanabilen krozeler içerisinde eritilmekte ve daha sonra bu karışımlara çekme kuvveti uygulanarak 1 mm çapındaki çubuk şekillere dönüştürülmektedir. Bu işlemin sonunda, lifli parçacık yapısına sahip olan sentetik vollastonit elde edilmiştir. Bu üretim yöntemi ile iğnemsî parçacık yapısına sahip olan sentetik vollastonitin üretimi yapılabilir. Ancak, bu iğnemsî parçacık yapının oluşması için gerekli olan sinterleme sıcaklığı (1400 °C'den yüksek) oldukça fazladır. Bunun yanı sıra, üretim esnasında gerekli olan şartları sağlamak diğer üretim yöntemlerine göre oldukça zordur. Bu üretim yönteminde kullanılan sıvı faz, bazik  $\text{CaO}$  ve asidik  $\text{SiO}_2$  malzemelerinin 1:1 mol oranında karıştırılması sonucu elde edilmekte ve farklı yerlerde

değerlendirilebilmesi için bazı metal içerikli oksitler ilave edilmektedir. Isıya karşı dayanıklı olan kaplar metal içerikli oksitlerden üretildiğinden dolayı içerisinde yerleştirilmiş olan malzeme ile reaksiyona girebilmektedir. Bundan dolayı, korozyon ve kirlilik gibi olumsuz durumlar meydana gelebilmektedir.

### 2.8.3 Islak metot

Islak metot yöntemi genel olarak yüksek basınç altında ve 200 °C'nin altındaki sıcaklıklarda uygulanmaktadır. Bu üretim metodu, başlangıçta oluşturulan karışımın bir kroze içerisinde eritilerek bir araya getirilmesi ile devam etmektedir (Zhu, 2013). Hali hazırda bulunan 3 üretim metodu arasından en yüksek boy:çap oranına sahip olan sentetik vollastonitin üretimi, bu yöntem ile elde edilebilmektedir. Ancak, bu üretim yönteminde, genel olarak inorganik tuzlar  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  ve  $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  veya yüksek saflık derecesine sahip olan çözücüler (sitrik asit) ham madde olarak kullanılmaktadır (Lin vd., 2007). İnorganik tuzlar maliyeti yüksek ve daha az sünek sentetik vollastonitin elde edilmesine sebep olurken, sitrik asit ise sağlık ve çevre problemlerine yol açmaktadır. Bundan dolayı bu üretim yönteminde geri dönüşümü sağlanmış olan malzemenin kullanımı uygun olmamaktadır (Zhu, 2013).  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  ile NaOH çözeltilerinin karıştırılması sonucu oluşturulan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  süspansiyonu (CTAP+TEOS+ $\text{H}_2\text{O}$ )'ya ilave edilerek beyaz renge sahip bir süspansiyon elde edilir. Bu süspansiyon paslanmaya karşı dayanıklı olan çelik içerisinde 30 saat boyunca 180 °C sıcaklıkta bekletilmekte ve ardından oda sıcaklığında soğutulmaktadır. Bu süspansiyon, filtreleme ve yıkanma işleminin sonrasında 72 saat boyunca 60 °C sıcaklıkta kurutularak toz formuna dönüştürülmektedir. Oluşturulan bu toz formu 800 °C'lik bir fırın içerisinde 2 saat boyunca sinterlenerek vollastonite dönüştürülmektedir.

Mevcut üretim metotları incelendiğinde, her bir üretim metodunun bazı avantaj ve dezavantajlara sahip olduğu görülmektedir. Bundan dolayı, uygulama alanlarında kullanılması mümkün olan sentetik vollastonit mineralin üretilmesi metodunun bulunması endüstriyel alan için oldukça önem arz etmektedir. Bu nedenle, bu tez çalışmasında özel bir üretim metodu ile yüksek boy:çap oranına sahip sentetik vollastonitin üretimi gerçekleştirilmiştir.

## 2.9 Vollaştonitin imentolu Kompozitlerde Kullanımı

Çimento esaslı kompozitlerin oluşturulmasında mineral katkı malzemesi olarak kullanılan vollaştonit, bu kompozitlerin mekanik ve durabilite özelliklerini iyileŝtirerek daha dayanıklı ve uzun ömürlü kompozitlerin elde edilmesine katkı sağlamaktadır (Wahab vd., 2017; Kalla vd., 2013). Bu konu ile ilgili olarak mevcut literatür çalışmaları değerlendirildiğinde, Mathur vd. (2007a) tarafından yapılmış olan bir çalışmada, beton karışımına %10 oranında vollaştonit minerali ilave edilmiş ve bunun sonucunda vollaştonit minerali betonun 28 ve 56 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerlerini sırasıyla %28-35 ve %36-42 oranlarında arttırdığını belirlemişlerdir. Ransinchung vd. (2009) yapmıŝ olduğu bir çalışmada ise, %15 oranına kadar vollaştonit ve %7,5 oranına kadar mikro silikanın kullanılmasının, mikro yapıyı iyileştirdiği ve bunun sonucunda betonun su sızdırmazlığını önemli derecede geliŝtirdięini belirtmişlerdir. Ransinchung ve Kumar (2010) tarafından yapılan çalışmada ise, %82,5 oranında imento, %10 oranında vollaştonit ve %7,5 oranında mikro silikanın kullanılmasıyla elde edilen betonun en yüksek basınç dayanımına sahip olduğunu belirtmişlerdir. Dey vd. (2015) yapmıŝ oldukları bir çalıŝmaya göre, çimentonun yerine %10 oranında ilave edilen vollaştonit-silis dumanı birleŝiminin eğilme ve basınç dayanımlarını sırasıyla %40 ve %30 oranlarında, kırılma tokluğu değerini ise %150 oranında arttırdığını belirlemişlerdir. Soliman ve Nehdi (2012) tarafından yapılan bir çalıŝmaya göre, imento esaslı kompozitlerde vollaştonit 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, aşınma kaybını ve kuruma büzülmesi değerlerini azalttığı, donma çözülme ve sülfata karşı dirençleri ise geliştirdiği tespit edilmiştir.

## BÖLÜM III

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında, ülkemizde üretimi mevcut olmayan vollastonit mineralinin literatürde yer almayan bir yöntem ile laboratuvar koşulları altında sentetik olarak üretilmesi ve üretilen bu vollastonit minerallerinin ECC'nin mekanik özellikleri üzerine etkilerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, çalışma iki aşamalı olarak planlanmıştır. İlk aşamada sentetik vollastonitin üretimi gerçekleştirilmiş, ikinci aşamada ise üretilen sentetik vollastonit minerali, ECC üretiminde kullanılarak mekanik özellikleri belirlenmiştir.

#### 3.1 Sentetik Vollastonit Üretimi

##### 3.1.1 Gerekli hammaddelerin temini ve özelliklerinin belirlenmesi

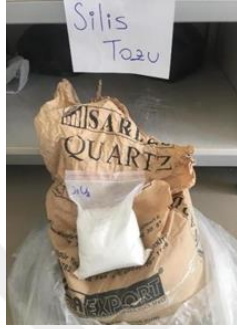
Bu çalışma kapsamında, sentetik vollastonit üretimi iki farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, CaO ve SiO<sub>2</sub> içeriği yüksek olan doğal hammaddeler kullanılırken ikinci aşamada ise atık malzemeler kullanılarak sentetik vollastonit üretilmeye çalışılmıştır. Birinci aşamada CaO kaynağı olarak kalsit (CaO-1) ve sönmemiş kireç (CaO-2), SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak ise kuvarz mineralinden elde edilen silis tozu (Q-1) ve silis kumu (Q-2) kullanılmıştır. İkinci aşamada ise CaO kaynağı olarak mermer tozu (MT), sinterlenmiş mermer tozu (SMT) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılırken (ÖYFC), SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak ise silis dumanı (SD) kullanılmıştır. Sentetik vollastonit üretiminde kullanılan bütün hammaddeler Fotoğraf 3.1'de gösterilmiştir.



(a) Sönmemiş kireç



(b) Kalsit



(c) Silis tozu



(d) Silis kumu



(e) Silis dumanı



(f) Öğütölmüş yüksek fırın cürufu



(g) Mermer tozu

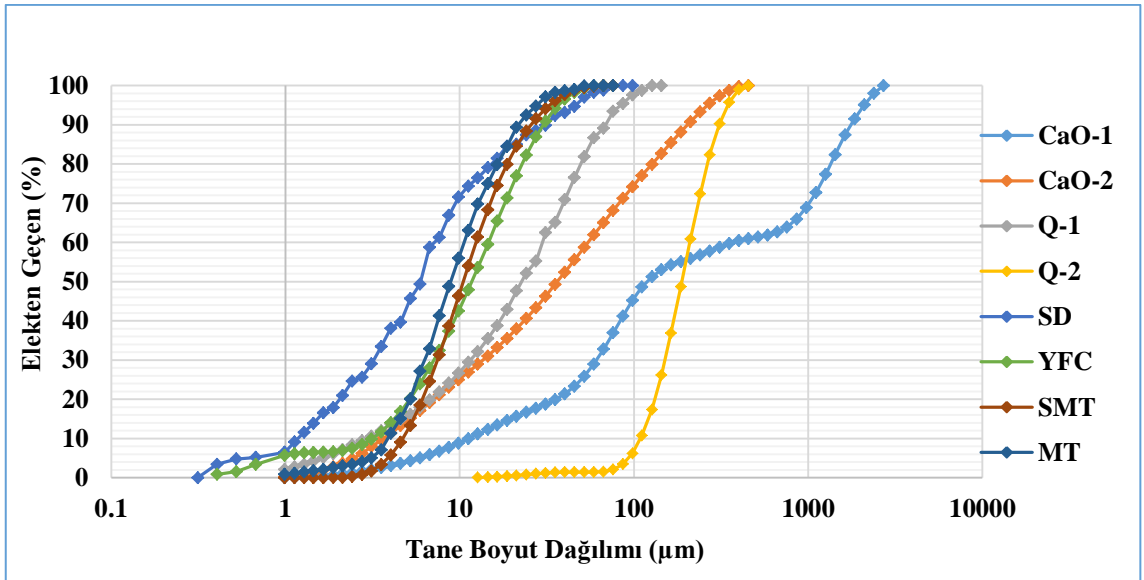


(h) Sinterlenmiş mermer tozu

**Fotoğraf 3.1.** Sentetik vollastonit üretiminde kullanılan hammaddeler

Vollastonit üretiminde kullanılan ham maddelerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için tane boyut dağılımı ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüsü analizleri, kimyasal özelliklerinin belirlenmesi için ise x-ışını floresansı (XRF) analizi yapılmıştır.

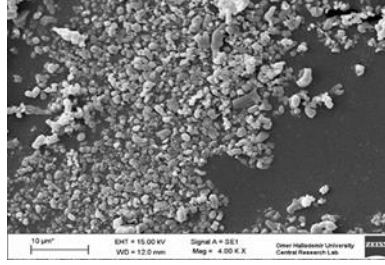
Vollastonit üretiminde kullanılan hammaddelerin tane boyut analizi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde bulunan Parçacık Boyut Analizörleri kullanılarak yapılmış olup tane boyut dağılımları Şekil 3.1’de verilmiştir. Vollastonit üretiminin ilk aşamasında CaO kaynağı olarak kullanılan hammaddeler tane boyutları bakımından incelendiğinde Şekil 3.1’den anlaşıldığı gibi sönmemiş kirecin kalsit mineraline göre daha ince olduğu görülmektedir. Sönmemiş kirecin (CaO-2) maksimum tane boyutu 517  $\mu\text{m}$  iken kalsit mineralinin (CaO-1) maksimum tane boyutu 3080  $\mu\text{m}$ ’dir. SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak kullanılan kuvars hammaddeleri incelendiğinde ise silis tozu mineralinin (Q-1) maksimum tane boyutunun 127  $\mu\text{m}$ , silis kumunun (Q-2) 454  $\mu\text{m}$  olduğu görülmektedir. Vollastonit üretiminin ikinci aşamasında CaO kaynağı olarak kullanılan atık malzemelerden mermer tozu (MT) maksimum tane boyutu 68  $\mu\text{m}$  iken sinterlenmiş mermer tozu (SMT) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun (ÖYFC) maksimum tane boyutu 76  $\mu\text{m}$ ’dir. SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak kullanılan silis dumanının ise (SD) maksimum tane boyutu ise 87  $\mu\text{m}$ ’dir.



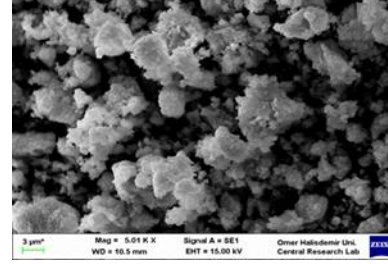
Şekil 3.1. Vollastonit üretiminde kullanılan hammaddelerin tane boyut dağılımı

Vollastonit üretiminde kullanılan hammaddelerin SEM analizi Niğde Ömer Halisdemir

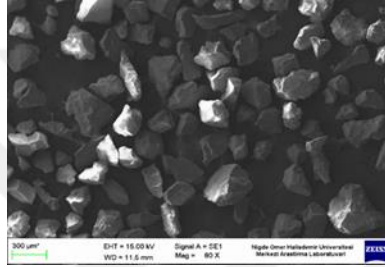
Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı'nda yaptırılmış olup, analiz sonuçları Fotoğraf 3.2'te detaylı olarak gösterilmektedir. Bu analiz ile hammaddelerin tanecik yapıları görülmüştür.



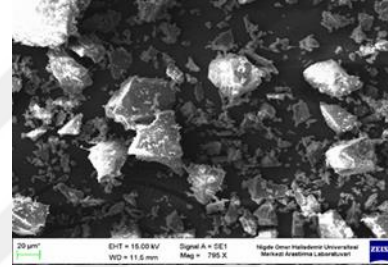
(a) Sönmemiş kireç



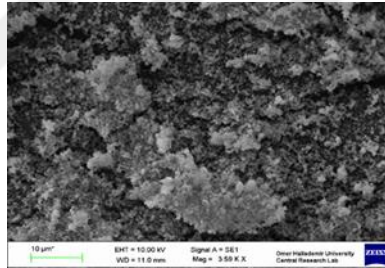
(b) Kalsit



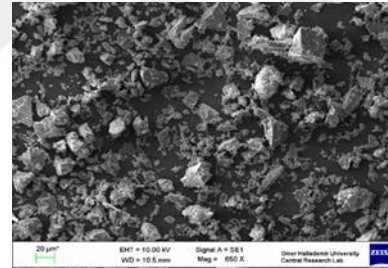
(c) Silis kumu



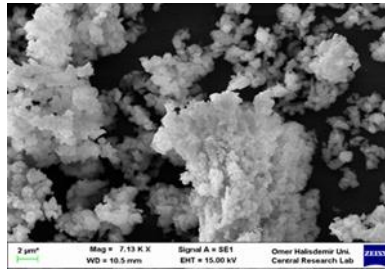
(d) Silis tozu



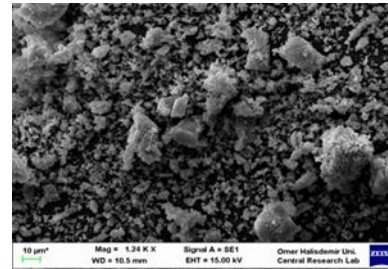
(e) Silis dumani



(f) Öğütülmüş yüksek fırın cürufu



(g) Mermer tozu



(h) Sinterlenmiş mermer tozu

**Fotoğraf 3.2.** Vollaştonit üretiminde kullanılan malzemelerin SEM görüntüleri

Sentetik vollaştonit üretiminde kullanılan hammaddelerin XRF analizi Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Nanoteknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından yapılmış olup, analiz sonuçları Çizelge 3.1' de detaylı olarak verilmiştir. Sentetik

vollastonit üretiminin ilk aşamasında CaO kaynağı olarak kullanılan kalsit ve sönmemiş kirecin Çizelge 3.1'e göre CaO içerik değerleri sırasıyla %89,13 ve %91,26 iken, SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak kullanılan silis tozu ve silis kumunun SiO<sub>2</sub> içerik değerlerinin ise sırasıyla %98,89 ve %96,23 olduğu görülmektedir. Vollastonit üretiminin ikinci aşamasında kullanılan atık malzemelerin XRF analizi sonuçları incelendiğinde ise mermer tozu, sinterlenmiş mermer tozu ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun CaO içeriği değerleri sırasıyla %46,15, %78,60 ve %38,83 iken, silis dumanının içeriğinde bulunan SiO<sub>2</sub> değerinin %93,53 olduğu belirlenmiştir. Hammaddelerin sahip olduğu bu CaO ve SiO<sub>2</sub> değerleri, sentetik vollastonitin üretilmesi için gerekli olan hammadde miktarlarının molar cinsinden hesaplanması açısından önem arz etmektedir.

**Çizelge 3.1.** Vollastonit üretiminde kullanılan hammaddelerin kimyasal içerikleri

Kimyasal İçerik (%)	Kalsit	Sönmemiş Kireç	Silis Tozu	Silis Kum	Silis Dumanı	Öğütülmüş Yüksek Fırın Cürufu	Mermer Tozu	Sinterlenmiş Mermer Tozu
CaO	89,13	91,26	0,20	1,54	0,55	38,83	46,15	78,60
SiO <sub>2</sub>	0,27	0,31	98,89	96,23	93,53	36,82	0,62	1,54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	0,70	0,69	0,48	0,78	13,31	0,20	0,41
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	0,11	0,06	0,85	0,88	0,70	0,15	0,25
MgO	0,45	1,73	0,04	0,2	0,79	5,65	7,64	17,92
SO <sub>3</sub>	0,02	0,44	0,02	0,21	0,11	0,50	0,12	0,15
K <sub>2</sub> O	-	0,01	0,03	0,15	0,1	0,75	0,02	0,05
Na <sub>2</sub> O	-	0,01	0,03	0,07	0,40	0	0,05	0,01
Diğer Elementler	-	0,08	-	-	0,17	2,2	0,05	0,14
Kızdırma Kaybı	10,7	5,5	0,09	0,9	1,93	1,92	45	0,9

### 3.1.2 Üretim prosedürü

Bu çalışma kapsamında, sentetik vollastonitin (SV) üretimi için mekanokimyasal süreç, hidrotermal süreç ve katı hal reaksiyon süreci olmak üzere üç farklı aşamadan oluşan bir üretim prosedürü geliştirilmiştir. SV üretimi için temel olarak iki farklı CaO ve SiO<sub>2</sub> içeren hammaddeler kullanılmıştır. Vollastonit üretiminin ilk aşamasında, CaO kaynağı olarak kullanılan sönmemiş kireç üretiminde hiçbir işlem uygulanmadan doğrudan

kullanılırken, kalsit minerali ( $\text{CaCO}_3$ ) ise  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 'de 1 saat boyunca sinterlenmiş ve CaO elde edilerek kullanılmıştır. Diğer bir temel mineral olan  $\text{SiO}_2$  kaynakları olan silis kumu ve silis tozu, vollastonit üretimi için herhangi bir işlem uygulanmadan doğrudan kullanılmıştır. Sentetik vollastonit üretiminde ilk olarak CaO ve  $\text{SiO}_2$  minerallerinin molar ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu molar ağırlıklar doğrultusunda CaO ve  $\text{SiO}_2$  minerallerinin 1:1 mol oranında tartılmış ve bilyeli öğütücünün haznesine yerleştirilmiştir (Fotoğraf 3.3.a). Bu işlemin ardından su/katı oranı ağırlıkça 1 olacak şekilde saf su eklenmiş ve bu karışım, bilyeli değirmende  $250\text{ rpm}$  hızında 30 dakika boyunca karıştırılmıştır (Fotoğraf 3.3.b). Bu karıştırma işlemi aynı zamanda mekanokimyasal etkileşimi de sağlamaktadır. Bu mekanokimyasal işlemin sonunda öğütücü haznesinde oluşan karışımın sentezlenmesi için teflona yerleştirilmiştir. (Fotoğraf 3.3.c). Teflon ise yüksek basınçlı hidrotermal otoklav reaktörüne yerleştirilerek Fotoğraf 3.3.d'de görüldüğü gibi  $200\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta 24 saat boyunca bekletilmiştir (Bu süre SEM analizleri sonucunda 48 ve 72 saat olarak güncellenmiştir). Bu süreç hidrotermal süreci oluşturmakta olup sonrasında vollastonitten farklı bir kalsiyum silikat olan tobermorit minerali elde edilmiştir (Fotoğraf 3.3.e). Teflondan çıkarılan tobermorit mineralinin neminin alınması için tobermorit  $100\text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta  $23.5\pm 0.5$  saat boyunca bekletilmiştir (Fotoğraf 3.3.f). Sonrasında elde edilen tobermorit minerali  $100\text{ rpm}$  hızında 90 saniye boyunca halkalı öğütücüde öğütülerek uygun boyutlara indirgenmiştir ve 40 nolu elekten elenerek sinterleme işlemine hazır hale getirilmiştir (Fotoğraf 3.3.g). Bu işlemden sonra, tobermorit mineralleri farklı sinterleme sıcaklıklarında ( $1000\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1300\text{ }^\circ\text{C}$ ) kroze içerisinde sinterlenmiştir (Fotoğraf 3.3.h). Sinterleme işleminin ardından vollastonit minerali elde edilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)



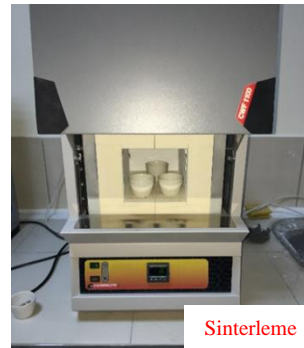
(e)



(f)



(g)



(h)

Fotoğraf 3.3. Vollastonit üretim prosedürü

### 3.1.3 Doğal hammaddeler kullanılarak sentetik vollastonitlerin üretilmesi

Yukarıda açıklanan üretim prosedürüne bağlı olarak çalışma kapsamında üretilen tobermoritler T harfi kullanılarak sınıflandırılmış, tüm sentetik vollastonitler ise SV olarak adlandırılmıştır. Üretilen SV'lerin karışım içerikleri, sentezleme günleri ve sinterleme sıcaklıkları Çizelge 3.2'de belirtilmiştir. Çizelge 3.2'den de anlaşılacağı gibi vollastonit üretiminde önem arz eden parametrelerden sentezleme süresi ve sinterleme sıcaklığı değiştirilerek bu parametrelerin üretilen vollastonitlerin iğnemi parçacık yapısına olan etkileri belirlenmeye çalışılmıştır.

Bu çalışma kapsamında üretilen SV'lerin iğnemi parçacık yapısına sahip olması ve yüksek boy:çap oranına sahip vollastonitlerin üretilmesi çalışmanın en önemli amaçlarından bir tanesidir. Bu amaç doğrultusunda SV üretiminin ilk aşamasında, her biri iki farklı tane boyutuna sahip CaO ve SiO<sub>2</sub> seçilerek, bunların farklı kombinasyonları (CaO-1+Q-1, CaO-1+Q-2, CaO-2+Q-1 ve CaO-2+Q-2) yüksek boy:çap oranına sahip iğnemi parçacık yapıları vollastonitlerin üretilmesi için kullanılmıştır.

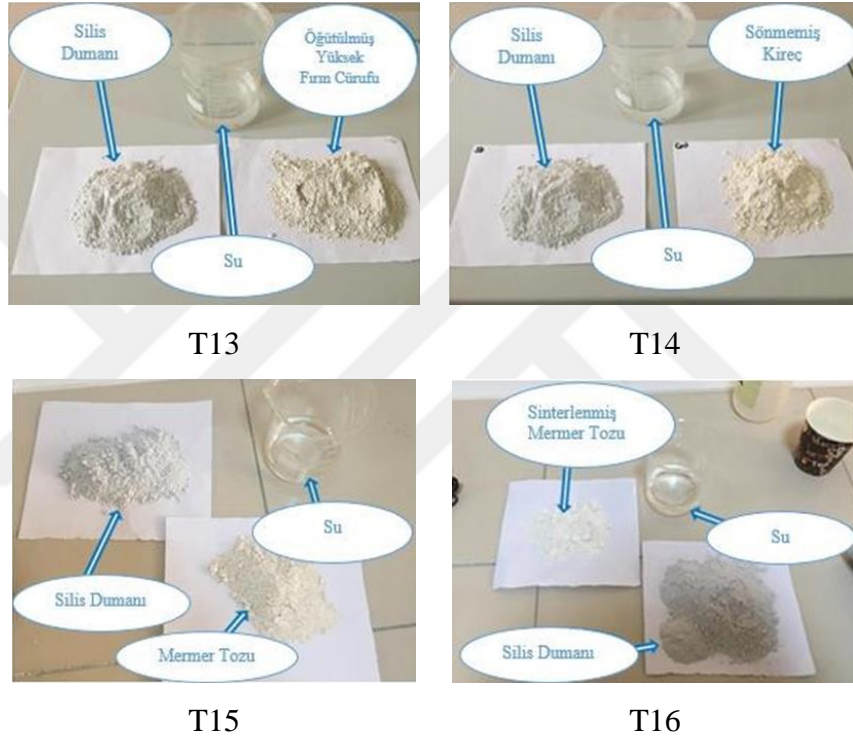
### 3.1.4 Atık malzemeler kullanılarak sentetik vollastonitlerin üretilmesi

Sentetik vollastonit üretiminin ikinci aşamasında kullanılması planlanan atık malzemeler, yukarıda açıklanan prosedür uygulanarak üretilmesi amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda, Fotoğraf 3.1'de verilmiş olan malzemelerden mermer tozu (MT), 1000 °C'de 1 saat sinterlenen sinterlenmiş mermer tozu (SMT), sönmemiş kireç (CaO-2) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (ÖYFC) CaO kaynağı olarak kullanılırken, silis dumanı (SD) ise SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu malzemeler Fotoğraf 3.4'de görüldüğü gibi belirli kombinasyonlarda (SD+ÖYFC, SD+CaO-2, SD+MT, SD+SMT) kullanılmış ve SV'lerin üretimi sağlanmıştır. Karışımlarda kullanılan atık malzemelerin ağırlıkları, Çizelge 3.1'de verilen atık malzemelerin kimyasal içeriklerine bağlı olarak sahip oldukları CaO ve SiO<sub>2</sub>'in 1:1 mol oranında karıştırılması için gerekli olan miktarların hesaplanması ile belirlenmiştir.

**Çizelge 3.2.** Vollastonitin karışım içerikleri, sentezleme süresi ve sinterleme sıcaklığı

<b>Karışım Numarası</b>	<b>Tobermorit Sınıfı</b>	<b>Karışım İçerikleri</b>	<b>Sentezlenme Süresi (saat)</b>	<b>Sinterleme Sıcaklığı (°C)</b>
SV 1	T1	CaO-1+Q-1	24	1100
SV 2		CaO-1+Q-1	24	1200
SV 3		CaO-1+Q-1	24	1300
SV 4	T2	CaO-2+Q-1	24	1100
SV 5		CaO-2+Q-1	24	1200
SV 6		CaO-2+Q-1	24	1300
SV 7	T3	CaO-1+Q-2	24	1100
SV 8		CaO-1+Q-2	24	1200
SV 9		CaO-1+Q-2	24	1300
SV 10	T4	CaO-2+Q-2	24	1100
SV 11		CaO-2+Q-2	24	1200
SV 12		CaO-2+Q-2	24	1300
SV 13	T5	CaO-1+Q-1	48	1000
SV 14		CaO-1+Q-1	48	1100
SV 15		CaO-1+Q-1	48	1200
SV 16	T6	CaO-2+Q-1	48	1000
SV 17		CaO-2+Q-1	48	1100
SV 18		CaO-2+Q-1	48	1200
SV 19	T7	CaO-1+Q-2	48	1000
SV 20		CaO-1+Q-2	48	1100
SV 21		CaO-1+Q-2	48	1200
SV 22	T8	CaO-2+Q-2	48	1000
SV 23		CaO-2+Q-2	48	1100
SV 24		CaO-2+Q-2	48	1200
SV 25	T9	CaO-1+Q-1	72	1000
SV 26		CaO-1+Q-1	72	1100
SV 27		CaO-1+Q-1	72	1200
SV 28	T10	CaO-2+Q-1	72	1000
SV 29		CaO-2+Q-1	72	1100
SV 30		CaO-2+Q-1	72	1200
SV 31	T11	CaO-1+Q-2	72	1000
SV 32		CaO-1+Q-2	72	1100
SV 33		CaO-1+Q-2	72	1200
SV 34	T12	CaO-2+Q-2	72	1000
SV 35		CaO-2+Q-2	72	1100
SV 36		CaO-2+Q-2	72	1200

Sentetik vollastonit üretiminin ilk aşamasında, doğal ham maddelerin kullanılması ile elde edilen SV'lerin üretim prosedürü (mekanokimyasal, hidrotermal ve katı hal reaksiyon süreçleri), atık malzemeler ile SV'lerin üretilmesinde de kullanılmıştır. Doğal ham maddeler ile üretilen SV minerallerinde en yüksek boy:çap oranına sahip SV 16'nın üretim prosedüründe 48 saat sentezleme süresi ve 1000 °C sinterleme sıcaklığı kullanıldığından, bu aşamada elde edilen karışımlarda en yüksek boy:çap oranını elde edebilmek için 48 saat boyunca sentezlenmiş ve sinterleme sıcaklığı olarak 1000 °C kullanılmıştır.



**Fotoğraf 3.4.** Atık malzemelerle üretilen tobermoritlerin malzeme içeriği

### 3.2 Puzolanik Aktivite Deneyi

Puzolanik aktivite deneyi, çimentolu kompozitlerin oluşturulmasında çimentonun yerine kullanılması planlanan puzolanda mevcut olan aktif silis ile Portland çimentosunun hidrasyonu sonucu meydana gelen serbest kirecin varlığına bağlı olan reaksiyondur. Bu reaksiyon sonucu meydana gelen serbest kireç, sulu ortamda puzolanik reaksiyonu başlatmakta ve bu reaksiyonu devam ettirerek benzer hidrasyon ürünlerinin oluşmasına olanak sağlamaktadır (Gökçe ve Özturan, 1996). ASTM C618'e (2015) göre puzolanik karakterdeki minerallerin betonda katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğinin

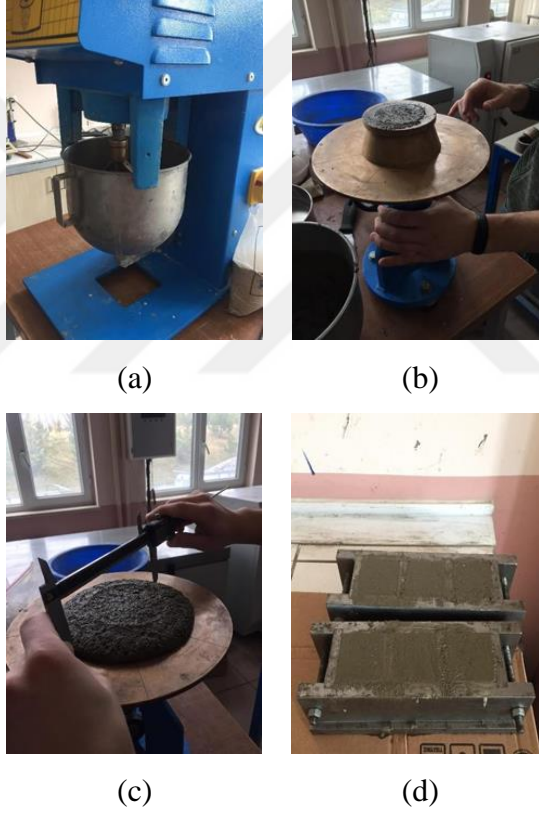
belirlenebilmesi için mineralin puzolanik aktivite indeksinin hesaplanması gerekmektedir. Bununla birlikte inert karakterdeki minerallerin de bu deney yöntemi kullanılarak beton/harç karışımlarında kullanılabilirliği hakkında fikir edinilebileceği düşünülmektedir. Ancak inert malzemelerin puzolanik bir reaksiyon sonucu değil, fiziksel bir etki ile dayanım değişimine olan katkısı incelenebilir. Bu nedenle, inert bir malzeme olan vollastonit minerali puzolanik aktivite deneyine tabi tutulmuştur. Bu çalışma kapsamında, en yüksek boy:çap oranına sahip olarak üretilen SV'lerden SV16 ve SV28, ECC karışımlarında kullanılmak üzere seçildiğinden bu iki SV tipi için puzolanik aktivite deneyi uygulanmıştır. Bu deney metodunda harç karışımlarında bulunan belirli ağırlıktaki çimentonun yerine SV16 ve SV28 eklenerek vollastonit minerallerinin harcın basınç dayanımına olan etkisi kontrol numunesi ile karşılaştırılarak belirlenmiştir. Puzolanik aktivite deneyi ASTM C311/C311M-13'e (2013) göre yapılmıştır. Vollastonit iğnemsiz yapıya sahip olduğundan dolayı çimento esaslı kompozitlerde işlenebilmeyi azalttığı bilindiğinden, bu standartlardan ayrı olarak her iki SV için akışkanlaştırıcı kullanılarak da puzolanik aktivite deneyi prosedürü uygulanmıştır. Deney karışımları hazırlanırken CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu ve CEN standart kumu kullanılmıştır. Deneyde kullanılan malzemeler ve miktarları Çizelge 3.3'te detaylı bir şekilde verilmiştir.

**Çizelge 3.3. Puzolanik Aktivite Testi Karışımları ve Malzeme Miktarları**

Karışımlar	Çimento	Standart Kum	Su	SV	SA (Süper Akışkanlaştırıcı)	
<b>Kontrol Karışımı</b>	500 gr	1375 gr	242 ml	-	-	
<b>Puzolanik Aktivite Karışımları</b>	<b>I</b> SV16	400 gr	1375 gr	242±ml	100 gr	-
	SV28	400 gr	1375 gr	242±ml	100 gr	-
	<b>II</b> SV16/SA	400 gr	1375 gr	242 ml	100 gr	Yayılma Çapına Göre
	SV28/SA	400 gr	1375 gr	242 ml	100 gr	Yayılma Çapına Göre

Bu test yönteminde, ilk olarak kontrol karışımı, yukarıda verilen karışım oranlarına ve ASTM C311/C311M-13 (2013) standardına uygun olarak Fotoğraf 3.5.a' da görülen mikserde hazırlanmıştır. Bu aşamadan sonra, kontrol karışımı ASTM C1437-15'ye (2015) göre sarsma tablası testine tabi tutulmuştur. Sarsma tablası testinde, kontrol karışımı iki tabaka halinde sarsma tablasının kalıbına yerleştirilmiş (Fotoğraf 3.5.b) ve

yerleştirilen bu karışıma her bir tabakada 20 kez şişleme işlemi yapılmıştır. şişleme işlemi tamamlandıktan sonra, harcın yzeyi dzleştirilmiş ve kalıp dikey olarak kaldırılmıştır. Sarsma tablası 15 saniyede 25 kez dzşrşlmş ve kontrol karışımının homojen bir şekilde yayılması sağlanmıştır. Kontrol karışımının farklı noktalarından bir cetvel yardımıyla dzrt farklı olęm yapıldıktan sonra (Fotoğraf 3.5.c) karışım sarsma tablası zzerinde 50x50x50 mm'lik kalıplara iki aşamada 60 saniyede 60 vuruş yapılarak sıkıştırılmıştır (Fotoğraf 3.5.d). Sıkıştırılma işleminden sonra karışımların priz alması için 24 saat beklenmiştir. 24 saatin sonunda kalıptan ęıkarılan bu karışımlar 7 ve 28 gzn sonunda aktivite indekslerinin belirlenebilmesi için  $23 \pm 2$  °C sıcaklıktaki kirece doygun suda kurlenmeye bırakılmıştır.



**Fotoğraf 3.5.** Pozzolanik aktivite deneyi

Son olarak ise 7 ve 28 gzn sonunda karışımların aktivite indeksleri aşağıdaki formzle gze hesaplanmıştır.

$$\text{Aktivite İndeks Dayanımı} = (A/B) * 100 \quad (3.1)$$

Formül 1’de belirtilen A puzolanik aktivite karışımının ortalama basınç dayanımı iken B ise kontrol karışımının ortalama basınç dayanımını ifade etmektedir.

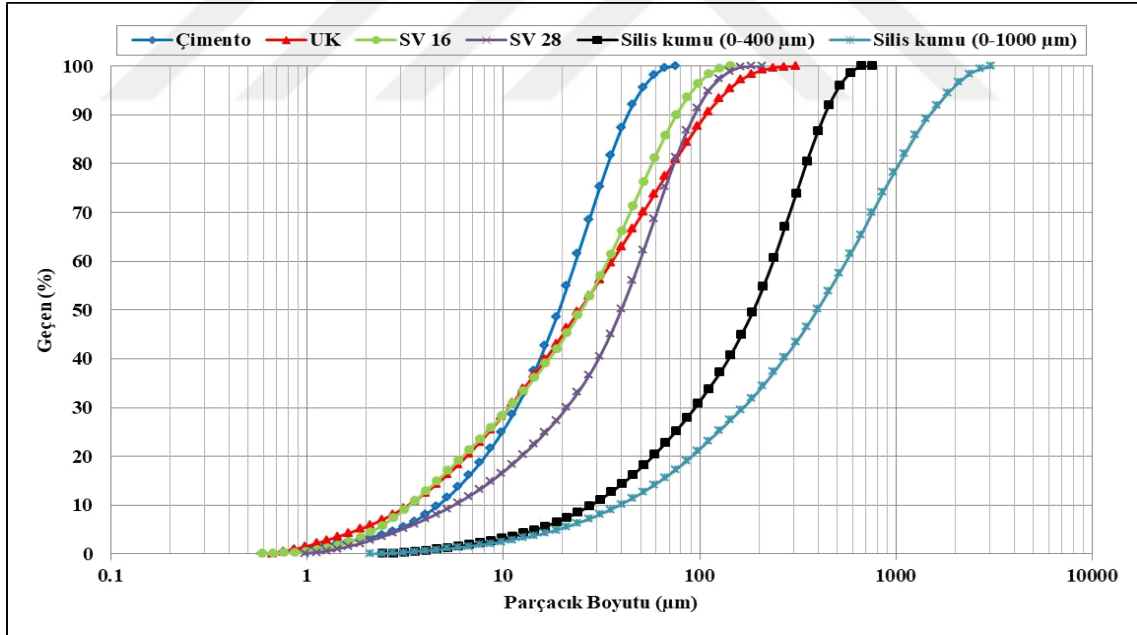
Puzolanik aktivite karışımları hazırlanırken Çizelge 3.3’te belirtilen oranlar kullanılmıştır. SV16 ve SV28 minerallerinin kullanılacağı puzolanik aktivite I nolu grup karışımlarından su miktarı kontrol karışımında elde edilen yayılma çapına göre belirlenirken, puzolanik aktivite II nolu grup karışımlarında su miktarı sabit olup kontrol karışımının yayılma ölçümleri referans alınarak akışkanlaştırıcı miktarı belirlenmeye çalışılmıştır.

### 3.3 ECC Karışımlarında Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

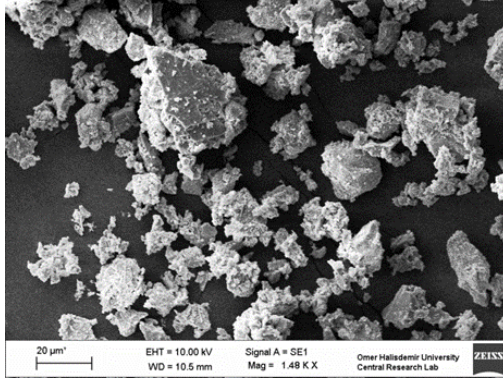
Tüm karışımlarda, ASTM Tip I’e uyumlu CEM I 42.5R normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Bu çimentonun özgül ağırlığı 3.10 ve Blaine inceliği 325 m<sup>2</sup>/kg olarak belirlenmiştir. İkinci bir bağlayıcı olarak, ASTM C618 (2015) standartlarına uygun F sınıfı uçucu kül (UK) kullanılmıştır. UK’nın özgül ağırlığı ve Blaine inceliği sırasıyla 2.31 ve 290 m<sup>2</sup>/kg’dır. Çalışmada çimento ve uçucu kül yerine belirli oranlarda, üretim prosedürü kısmında anlatıldığı gibi özel bir metotla elde edilen sentetik vollastonitler (SV16 ve SV28) kullanılmıştır. SV16 ve SV28’in özgül ağırlığı sırasıyla 2.80 ve 2.85 olarak belirlenmiştir. Çimento, UK, SV16 ve SV28 malzemelerinin kimyasal bileşimleri ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.4’te, tane boyutu dağılımları ise Şekil 3.2’de sunulmuştur. Ayrıca çimento, UK, SV16 ve SV28’e ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Fotoğraf 3.6’da verilmiştir. SEM görüntülerinden görüldüğü üzere, çimentonun mikro ölçekteki tanecik yapısı pütürlü (pürüzlü) bir yüzeye, uçucu külün tanecik yapısı küresel (oval) bir şekle ve SV 16 ile SV 28 minerallerinin tanecik yapılarının iğnemsî bir parçacık yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca SV16’nın maksimum boy:çap oranı (44:1), SV 28’in maksimum boy:çap oranından (30:1) daha yüksektir. ECC üretiminde, agrega tane boyutu 0-400 µm ve 0-1000 µm olan ince silis kumları kullanılmıştır. Kullanılan silis kumlarının su emme kapasiteleri ve özgül ağırlıkları sırasıyla %0,3 ve 2,65’dir. Bu agregalar için tane boyutu dağılım eğrileri Şekil 3.2’de gösterilmiştir. ECC karışımlarının işlenebilirliğini arttırmak için, polikarboksilik eter tipi süper akışkanlaştırıcı (SA) kullanılmıştır. Bu malzemenin özgül ağırlığı ve katı içeriği sırasıyla, 1,1 ve %40’dır.

**Çizelge 3.4.** Çimento, uçucu kül ve sentetik vollastonitlerin kimyasal ve fiziksel özellikleri

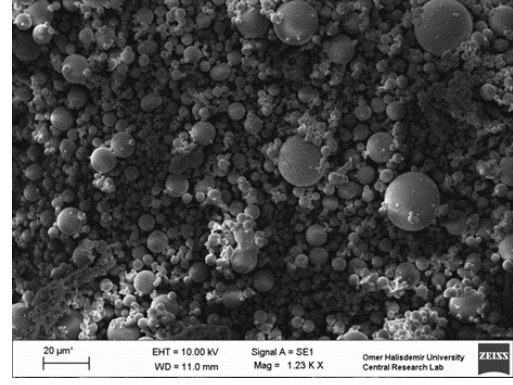
<b>Kimyasal Analiz (%)</b>	<b>Çimento</b>	<b>UK</b>	<b>SV 16</b>	<b>SV 28</b>
<b>CaO</b>	60.15	1.47	45.74	51.69
<b>SiO<sub>2</sub></b>	20.46	61.25	50.71	44.55
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	7.78	22.19	0.24	0.36
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3.09	7.02	0.10	0.10
<b>MgO</b>	2.66	1.70	0.87	0.70
<b>SO<sub>3</sub></b>	2.33	0.06	0.34	0.43
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0.82	2.34	0.01	0.02
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0.22	0.27	0.00	0.03
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0.30	0.90	0.03	-
<b>Fiziksel Özellikler</b>				
<b>Kızdırma Kaybı</b>	2.55	2.60	2.00	2.00
<b>Özgül Ağırlık</b>	3.10	2.31	2.80	2.85



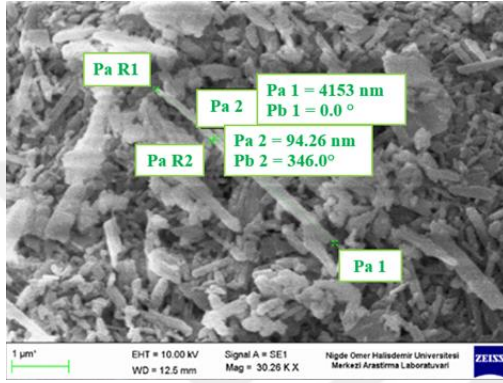
**Şekil 3.2.** ECC karışımlarını oluşturan malzemelerin tane boyutu dağılımları



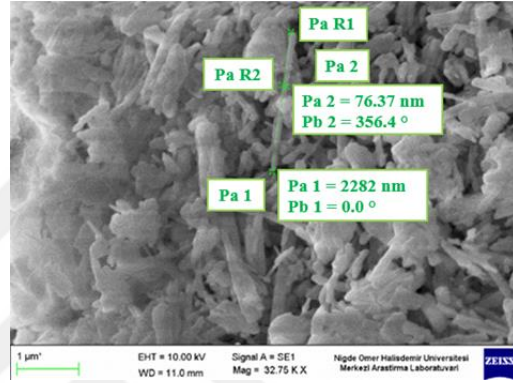
(a)



(b)



(c)



(d)

**Fotoğraf 3.6.** Çimento (a), UK (b), SV16 (c) ve SV28'in SEM görüntüleri (d)

ECC üretiminde çeşitli lif türleri kullanılmış olmasına rağmen, bu çalışmada poli-vinil alkol esaslı (PVA) lif kullanılmıştır (Fotoğraf 3.7). 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/m<sup>3</sup>'tür. PVA lifinin geometrik özellikleri mikro-mekanik hesaplar sonucunda hesaplanmış olup bu life ait mekanik ve geometrik özellikler Çizelge 3.5'te 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).



**Fotoğraf 3.7.** ECC karışımlarında kullanılan PVA lifi

**Çizelge 3.5.** PVA liflerinin mekanik ve geometrik özellikleri

Lif Türü	Nominal Dayanım (MPa)	Görünen Dayanım (MPa)	Çap ( $\mu\text{m}$ )	Uzunluk (mm)	Elastik Modülü (GPa)	Uzama (%)	Özgül Ağırlık
PVA	1620	1092	39	8	42,8	6,0	1,3

### 3.4 ECC Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü

Daha önce yapılmış olan ön çalışmalar ve bu konu ile ilgili literatür araştırmalarında, laboratuvar ortamında üretilen sentetik vollastonitin standart harç karışımlarında çimento yerine ağırlıkça %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında eklendiğinde, karışımların basınç ve eğilme dayanımlarında %9 oranına kadar kullanımında artış sağladığı %9 oranından sonra bu dayanımlarda düşüşlerin olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, üretilmesi planlanan ECC karışımlarında toplam bağlayıcı miktarının ağırlıkça %3, %6, %9 ve %12 oranlarında sentetik vollastonitin kullanılmasına karar verilmiştir.

İlk olarak UK/Çimento oranı 1,20 olan ve litertürde M45 (Kong vd., 2003) olarak adlandırılan ECC kontrol karışımı olarak hazırlanmıştır. Daha sonra SV16 minerali; çimento, uçucu kül ve çimento+uçucu kül yerine %3, %6, %9 ve %12 oranlarında kullanılarak sırasıyla, I, II ve III nolu karışım grupları hazırlanmıştır. Böylece toplamda 13 farklı ECC karışımı hazırlanmış olup, SV16'nın; çimento, UK ve çimento+UK yerine kullanımı ayrı ayrı incelenmiştir. Tüm karışımlarda; su/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranları sabit tutulmuş olup, bu oranlar sırasıyla, 0.27 ve 0.36 olarak belirlenmiştir. Bu karışımlarda agrega olarak maksimum tane boyutu 400  $\mu\text{m}$  olan silis kumu kullanılmıştır. Bu karışımların tanımı Çizelge 3.6'da sunulmuştur. Yaklaşık

olarak benzer işlenebilirliği ve liflerin homojen olarak dağılmasını sağlamak amacıyla karışımlardaki SA içeriği değiştirilmiştir.

Çizelge 3.6'dan görüldüğü gibi, artan SV16 yüzdesine bağlı olarak, ECC karışımlarının SA içeriği artmıştır. Ayrıca, UK'nın pürüzsüz yüzey özellikleri ve küresel şekli, ECC karışımlarının işlenebilirlik özelliklerini iyileştirmiştir. Elde edilen bu karışımların 7 ve 28 gün sonunda temel mekanik özellikleri (basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme performansı ve kırılma tokluğu) belirlenmiştir. SV16 mineralinin ECC karışımlarında göstermiş olduğu basınç, elastisite, eğilme ve kırılma tokluğu performansı değerlendirildiğinde, SV16 mineralinin III nolu karışım grubunda en iyi sonuç verdiği görülmüştür. Bundan dolayı III nolu karışım grubu referans alınarak SV28 mineralinin de bu karışım grubunda kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca, ECC tasarımında UK/Ç oranı 1.2 olan oranın, 2.2'ye yükseltilecek bu oranın seçilmiş karışım grubunun mekanik özellikleri üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Sonrasında ise, karışımlarda kullanılan 400 µm parçacık boyutuna sahip olan silis kumunun yerine 1000 µm parçacık boyutundaki silis kumu kullanılarak farklı agrega boyutunun mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Çizelge 3.6'da gösterildiği gibi, ECC karışımları, bileşenlerin karışım kimliklerinden tanımlanabilecekleri şekilde etiketlenmiştir. Karışım tanımlarındaki ilk iki harf sentetik vollastonit mineralini göstermektedir. Harflerden sonraki %'li rakam SV16 mineralinin toplam bağlayıcı içeriğine bağlı olarak hesaplanan kullanım yüzdesini gösterirken, devamında gelen harf ise SV16 mineralinin hangi malzeme/malzemeler ile yer değiştirdiğini belirtmektedir. Örneğin; SV%3\_Ç karışımında; SV16 minerali, toplam bağlayıcı içeriğinin %3'ü hesaplanarak çimentonun yerine kullanılmıştır. Standart olarak M45 kodu ile bilinen ECC karışım oranı SV%0 (Çizelge 3.6) (Wang ve Li, 2007) ECC karışım tasarımında referans olarak kullanılmıştır.

**Çizelge 3.6** ECC karışım oranları (kg/m<sup>3</sup>)

Grup No	Karışımlar	UK/Ç	(UK+SV 16)/Ç	SV16/Ç	SV16/UK	Çimento	UK	SV 16	Su	PVA	Silis Kumu	SA
Kontrol	SV%0	1.20	1.20	-	-	564.5	677.8	0.0	329.9	26.0	451.2	4.95
I	SV%3_Ç	1.29	1.36	0.071	0.055	526.5	676.9	37.2	329.5	26.0	450.6	6.63
	SV%6_Ç	1.38	1.54	0.152	0.110	488.7	676.0	74.3	329.1	26.0	450.0	9.00
	SV%9_Ç	1.50	1.74	0.247	0.165	450.9	675.2	111.4	328.7	26.0	449.4	11.25
	SV%12_Ç	1.63	1.99	0.359	0.220	413.3	674.3	148.3	328.2	26.0	448.9	14.69
II	SV%3_UK	1.13	1.20	0.066	0.058	566.1	642.3	37.4	330.9	26.0	452.5	7.08
	SV%6_UK	1.07	1.20	0.132	0.124	567.7	606.7	75.0	331.8	26.0	453.7	9.91
	SV%9_UK	1.00	1.20	0.198	0.198	569.3	570.8	112.8	332.8	26.0	455.0	12.50
	SV%12_UK	0.94	1.20	0.264	0.282	570.9	534.7	150.8	333.7	26.0	456.3	16.07
III	SV%3_Ç-UK	1.20	1.27	0.068	0.057	548.2	657.9	37.3	330.3	26.0	451.6	6.89
	SV%6_Ç-UK	1.20	1.34	0.140	0.117	531.8	638.2	74.7	330.6	26.0	452.1	9.27
	SV%9_Ç-UK	1.20	1.42	0.218	0.181	515.3	618.4	112.1	330.9	26.0	452.5	12.33
	SV%12_Ç-UK	1.20	1.50	0.300	0.250	498.8	598.6	149.6	331.2	26.0	452.9	14.92
IV	SV 28 %3_Ç-UK	1.20	1.27	0.068	0.057	548.4	658.1	37.3	330.4	26.0	451.8	6.80
	SV 28 %6_Ç-UK	1.20	1.34	0.140	0.117	532.1	638.6	74.7	330.8	26.0	452.3	8.95
	SV 28 %9_Ç-UK	1.20	1.42	0.218	0.181	515.8	619.0	112.2	331.2	26.0	452.9	12.09
V	2.2_SV%0	2.20	2.20	-	-	381.8	838.8	0.0	324.2	26.0	443.3	3.05
	2.2_SV%3_Ç-UK	2.20	2.30	0.099	0.045	370.5	815.1	36.7	324.7	26.0	444.0	4.53
	2.2_SV%6_Ç-UK	2.20	2.41	0.204	0.093	359.2	791.5	73.5	325.1	26.0	444.6	6.11
	2.2_SV%9_Ç-UK	2.20	2.52	0.317	0.144	347.9	767.7	110.3	325.6	26.0	445.3	7.50
VI	1000_SV%0	1.20	1.20	-	-	564.5	677.8	0.0	329.9	26.0	451.2	4.80
	1000_SV%3_Ç-UK	1.20	1.27	0.068	0.057	548.2	657.9	37.3	330.3	26.0	451.6	6.75
	1000_SV%6_Ç-UK	1.20	1.34	0.140	0.117	531.8	638.2	74.7	330.6	26.0	452.1	8.96
	1000_SV%9_Ç-UK	1.20	1.42	0.218	0.181	515.3	618.4	112.1	330.9	26.0	452.5	11.95

Bu çalışmada, tüm ECC karışımlarının hazırlanmasında 20 litre kapasiteli bir harç mikseri (Fotoğraf 3.8) kullanılmıştır. Çimento, mineral katkı (FA ve/veya SV16) 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 görseller Fotoğraf 3.8’de verilmiştir.



(a)



(b)



(c)



(d)

**Fotoğraf 3.8.** Harç mikseri kullanılarak ECC üretimi için katı bileşenlerin karıştırılması (a), su ekleme (b), SA ekleme (c) ve PVA ekleme (d)

Her ECC karışımından 7 ve 28. deney günleri için 3 numune alınmış ve her yükleme koşulu altında test edilmiştir. Basınç dayanımı testi ve elastisite modülü için 50 mm'lik küp numuneler, kırılma tokluğu ve dört noktalı eğilme deneyleri için 360x50x75 mm prizma numuneleri hazırlanmıştır. Tüm örnekler 24 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve nemli plastik torbalarda 7 ve 28 gün boyunca % 95±5 bağıl nem,  $23 \pm 2$  °C'de kür edilmiştir. (Fotoğraf 3.9).



**Fotoğraf 3.9.** 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 300 ton kapasiteli bir test cihazı kullanılarak küp numuneler üzerinde yapılmıştır. PVA lifi içermeyen (ECC matrisi) ve PVA lifi 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. günde basınç dayanımı testi yapılmıştır (Fotoğraf 3.10). Bu süre boyunca numuneler özel hava geçirimsiz poşetlerde kür edilmiştir.



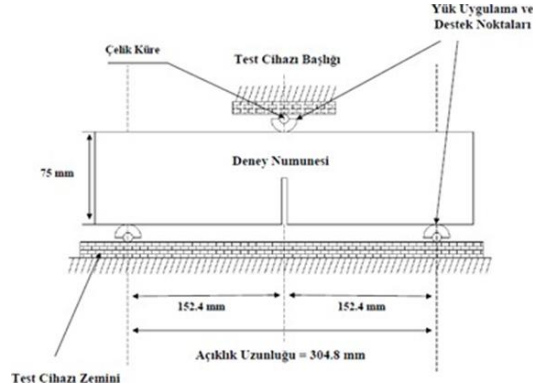
**Fotoğraf 3.10.** Basınç dayanımı test cihazı ve basınç dayanımının belirlenmesi

### 3.5.2 Kırılma tokluğu

Çimento bağlayıcılı malzemeler için gerilme şiddet faktörünü (kırılma tokluğu) ölçmek amacıyla ASTM E399 (2003) “Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness KIC of Metallic Materials” standart test yöntemi kullanılmıştır. Bu standart test metodunun çimento bağlayıcılı matrislerde (iri agrega içermeyen) uygulanması daha önce yapılmış olan çalışmalarda detaylı bir biçimde incelenip bu tür sistemlerde (ECC gibi matrisinin üretiminde iri agrega kullanılmayan) uygulanabilirliği doğrulanıp farklı çalışmalarda ECC tasarımı esnasında kullanılmıştır (Wang ve Li, 2006; Li vd., 1995; Wang ve Li, 2007; Li ve Wu, 1992; Stults vd., 2009; Lepech vd., 2008). Ayrıca bu yöntemle hesaplanan matrisin kırılma tokluğu değeri ECC’nin mikro-mekanik tasarım yöntemleri ile geliştirilmesi aşamasında önemli bir rol oynamıştır (Li, 1998; Li vd., 1995). Kırılma tokluğunun ölçülmesi için bu çalışmada kullanılan deney tertibi Fotoğraf 3.11’de gösterilmiştir. 7 ve 28 günlük matris (lifsiz ECC) kırılma tokluğu tayini için 360x75x50 mm boyutlarında 3 adet kiriş numunesi hazırlanıp, numunelerin tam ortalarına yaklaşık 30 mm derinliğinde çentik açılmıştır (Fotoğraf 3.11). Daha sonra bu numunelere 0.002 mm/saniye hızla üç noktalı eğilmede-çekme testi uygulanmıştır (Şekil 3.3). Bu testten sonra numunelerin kesin çentik derinlikleri ölçülüp matris toklukları hesaplanmıştır.



**Fotoğraf 3.11.** Matris tokluğu için numuneye çentik açılması



**Şekil 3.3.** Matris tokluğu tayini için kullanılan deney tertibi

Numunelerin kırılma tokluğu, aşağıdaki Formül (2) uyarınca hesaplanmıştır:

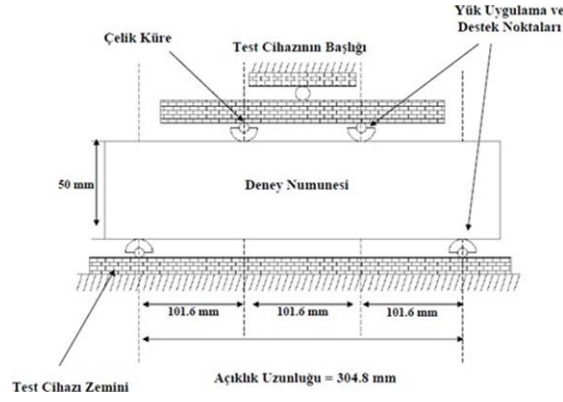
$$K_Q = \frac{P_Q S}{BW^2} \cdot f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (3.1)$$

$P_Q$  : Tepe yükü,  $S$ : Açıklık uzunluğu,  $B$ : Numunenin yüksekliği,  $W$ : Numunenin derinliği ve  $f\left(\frac{a}{W}\right)$ : geometrik kalibrasyon faktörü (her numunenin deney sonrasında ölçülen gerçek çatlak derinliğine göre 1.91 ile 2.18 aralığında değişmektedir).

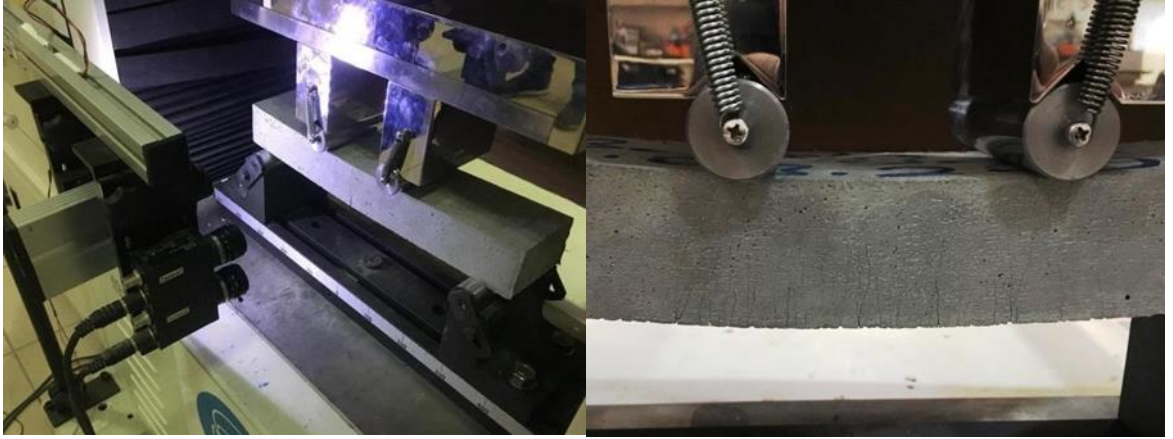
### 3.5.3 Eğilme performansı

ECC karışımının eğilme performansını ölçmek için, üretilen her ECC karışımından 360x75x50 mm boyutlarında üç prizmatik numune alınmıştır. Eğilmede-çekme deneyi universal test sistemi kullanılarak, karışımların eğilme yükü altında özelliklerinin belirlenmesi için kiriş numuneleri üzerinde, önce numune temizlenerek Şekil 3.4'te 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 extansometre seti ile ölçülmüş (Fotoğraf 3.12) 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 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Dört noktalı eğilmede-çekme testi için deney düzeneği



Fotoğraf 3.12. Üniversal test sistemi ve ECC'nin dört noktalı eğilmede çekme testi sırasındaki davranışı

### 3.5.4 Elastisite Modülü

Çalışma kapsamında üretilmiş olan toplam 24 adet ECC karışımı, ASTM C 469 (2014) standardına göre elastisite modülü deneyine tabi tutulmuştur. Her karışımdan 3 adet test edilen 50x50x50 mm boyutlarındaki kübik örnekler, nemli plastik torbalarda 28 gün boyunca % 95±5 bağıl nem,  $23 \pm 2$  °C'de kür edilmiştir. 28 gün sonunda her bir kübik numuneye ASTM C39'a (2003) göre basınç dayanımlarının belli bir oranında (%40) tek eksenli basınç altında dörder kez yükleme-boşaltma işlemi yapılmıştır. Bu işlemin ardından, numunelerin başlangıç ve sınır yükleri arasındaki deformasyon miktarları bir video ekstansometre seti yardımıyla Fotoğraf 3.14'te görüldüğü gibi ölçülmüştür. Elde

dilen sonuçlar ilgili standartla değerlendirilmiş ve numunelerin elastisite modülü değerleri belirlenmiş olup elastisite modülün belirlenmesinde kullanılan tipik bir gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı Şekil 3.5' te gösterilmiştir.



**Fotoğraf 133.** Elastisite modülünün video ekstansometre ile belirlenmesi



**Şekil 3.5.** Elastisite modülünün belirlenmesine ait tipik bir gerilme-birim şekil değiştirme diyagramı

## BÖLÜM IV

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu bölümünde, doğal ve atık ham maddelerin kullanılmasıyla üretilen sentetik vollastonitlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri yorumlanmıştır. Ayrıca, en yüksek boy:çap oranına sahip olan iki sentetik vollastonit minerali (SV16 ve SV28) hem puzolanik aktivite deneyine tabi tutularak çimentolu kompozitlerde kullanılabilirliği belirlenmiş hem de ECC karışımlarında kullanılarak basınç dayanımı, eğilme performansı, kırılma tokluğu ve elastisite modülü gibi temel mekanik özellikler üzerindeki etkileri belirlenmiş ve yorumlanmıştır.

#### 4.1 Doğal Hammaddelerden Sentetik Vollastonitlerin Üretilmesi

##### 4.1.1 Tobermoritlerin elde edilmesi

Bu çalışma kapsamında, Çizelge 3.2’de belirtildiği gibi doğal hammaddelerin kullanılmasıyla 36 farklı vollastonit minerali elde edilmiştir. İlk olarak farklı sentezleme günlerinde toplam 12 adet tobermorit minerali üretilmiştir. Dört farklı kombinasyonun 24 saat boyunca sentezlenmesi sonucunda elde edilen tobermorit mineralleri (T1, T2, T3 ve T4) Fotoğraf 4.1’de gösterilmiştir. Fotoğraf 4.1’den görüldüğü üzere, ince kuvarz kaynağının (silis tozu/Q-1) kullanıldığı tobermorit mineralleri (T1 ve T2) sertleşmiş halde otoklavdan çıkarılırken, iri kuvarz kaynağının (silis kumu/Q-2) kullanıldığı T3 ve T4 tobermorit minerallerinin ise sertleşmediği ve otoklav içerisinde harç kıvamında olduğu görülmüştür. Bu durum hidrotermal sürecin işleyişini olumsuz yönde etkilememektedir. Temel olarak aynı içeriğe sahip olan bu hammaddelerin (CaO-1/CaO-2, Q-1/Q-2) oluşturduğu karışımlar arasındaki fiziki farklılık, kuvarz hammaddelerinin tane boyutlarından kaynaklanmaktadır. Yüzey alanı büyük olan silis tozu (Q-1) için gerekli olan su miktarı, yüzey alanı küçük olan silis kumu (Q-2) için gerekli olan su miktarından fazla olduğundan, dört karışım da ortamda bulunan su ile reaksiyona girmiş ancak T3 ve T4 karışımlarında fazladan su ortaya çıkmıştır.



**Fotoğraf 14.** Tobermorit mineralleri

İlk 4 tobermorit mineralinde gözlemlenen fiziksel özellikler (Silis tozu kullanılan karışımlarda tobermoritlerin (T5, T6, T9 ve T10) sertleşmesi, silis kumu kullanılan karışımlarda tobermoritlerin (T7, T8, T11 ve T12) harç kıvamında olması), 48 ve 72 saat boyunca sentezlenen tobermoritlerde de gözlemlenmiştir. 48 ve 72 saat boyunca sentezlenmiş olan karışımların görüntüleri Fotoğraf 4.2' de verilmiştir.

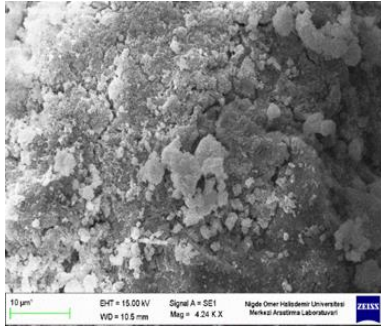


**Fotoğraf 15.** Tobermorit mineralleri

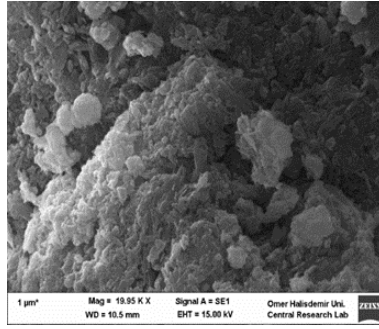
#### 4.1.2 Doğal hammaddelerden sentetik vollastonitin elde edilmesi

Tobermorit mineralleri elde edilip, sinterleme işlemi için uygun boyutlara getirildikten sonra tobermoritler farklı sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiştir. Bu ısıl işlem ilk olarak 24 saat boyunca sentezlenen tobermorit minerallerine uygulanmıştır. Tobermorit mineralleri ilk aşamada 1100 °C, 1200 °C ve 1300 °C sinterleme sıcaklıklarına maruz bırakılmıştır. Ancak sinterleme sıcaklığı 1300 °C'ye getirildiğinde CaO ve SiO<sub>2</sub> kombinasyonlarının eridiği ve kroze yapıya geçtiği görülmüştür. Sinterleme sonrası ortaya çıkan ürünün tanecik halinde değil eriyik halde bir kütle şeklinde oluştuğu görülmüştür. Oluşan ürünler iri parçalara ayrılmış ve SEM analizi yaptırılarak görüntüleri incelenmiştir. Bu analizlerin incelenmesi neticesinde 1300 °C sinterleme sıcaklığının SV'de bulunması istenen iğnemsî parçacık yapısını sağlamadığı görülerek 1300 °C sıcaklığın kullanılmaması gerektiğine karar verilmiştir. Ayrıca SEM analizlerinde sinterleme sıcaklığının artmasıyla iğnemsî parçacık yapısından uzaklaşıldığı görülmüştür. Bu nedenle bundan sonra üretilecek tobermoritlerin sinterleme sıcaklıklarına literatürde de vollastonit üretimi için minimum sinterleme sıcaklığı olarak bilinen 1000 °C sinterleme sıcaklığı eklenmiştir (Ohnemuller vd., 1975). Bu aşamadan sonra oluşan tobermorit mineralleri (T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11 ve T12) farklı sinterleme sıcaklıklarında (1000 °C, 1100 °C ve 1200 °C) sinterlenerek toplamda 24 adet daha vollastonit minerali elde edilmiştir.

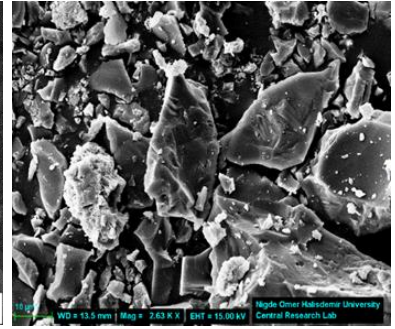
Doğal hammaddeler kullanılarak elde edilen bütün SV'lerin SEM görüntüleri Fotoğraf 4.4'te detaylı olarak verilmiştir. SEM görüntülerinde dikkat edilmesi gereken en önemli nokta SV'lerin iğnemsî parçacık yapısına sahip olup olmadıklarının belirlenmesidir. Üretilen SV'lerin SEM görüntüleri incelendiğinde 1 gün (24 saat) boyunca sentezlenmiş olan tobermorit minerallerinin oluşturduğu vollastonitlerin (SV 1, SV 2, SV 3, SV 4, SV 5, SV 6, SV 7, SV 8, SV 9, SV 10, SV 11 ve SV 12) iğnemsî parçacık yapısına sahip olmadığı görülmüştür. Özellikle 1100 °C ve 1200 °C sinterleme sıcaklıklarına sahip olan SV'lerin mikro yapısında topaklanmaların olduğu belirlenmiştir. 1300 °C sıcaklıkta sinterlenen vollastonit mineralleri ise yüksek sıcaklık etkisiyle eridiğinden dolayı köşeli iri taneciklerin oluştuğu saptanmıştır. Sonuç olarak, 24 saatlik sentezleme süresinin hammaddelerin reaksiyonu sonucunda iğnemsî parçacık yapısına sahip vollastonitlerin üretilmediği belirlenmiştir.



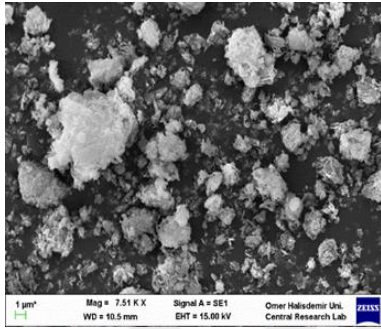
SV 1



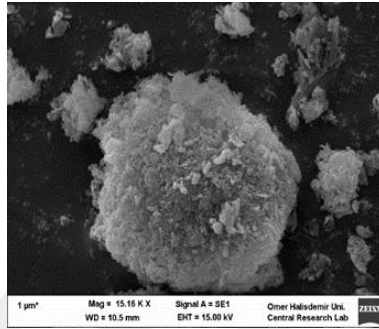
SV 2



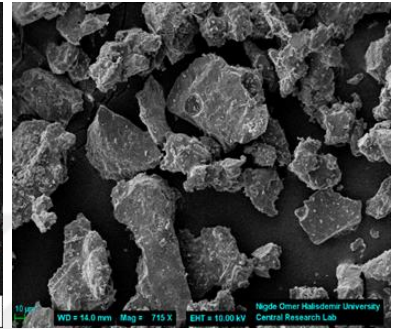
SV 3



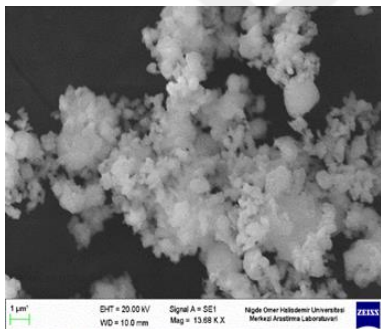
SV 4



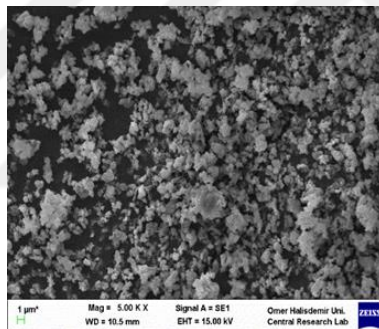
SV 5



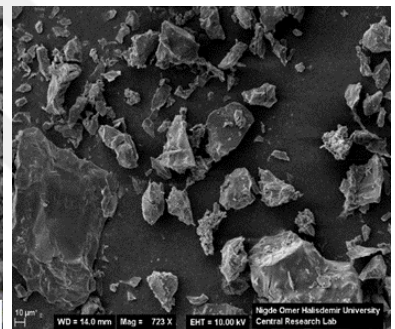
SV 6



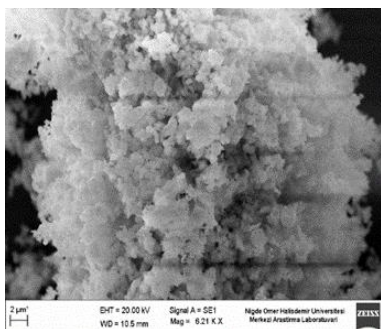
SV 7



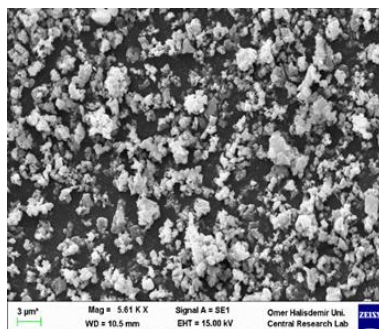
SV 8



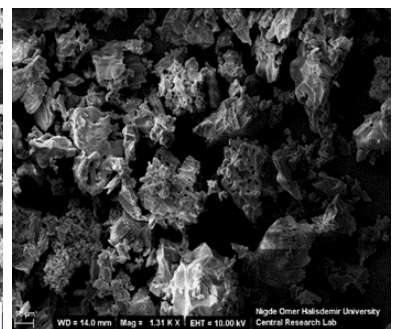
SV 9



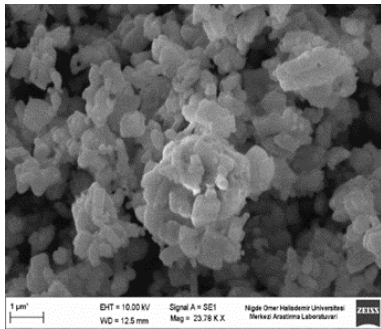
SV 10



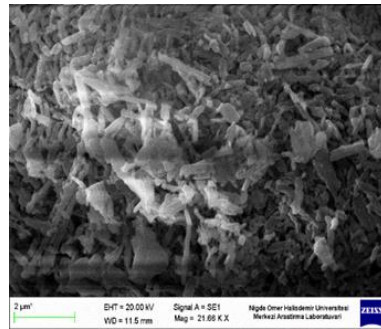
SV 11



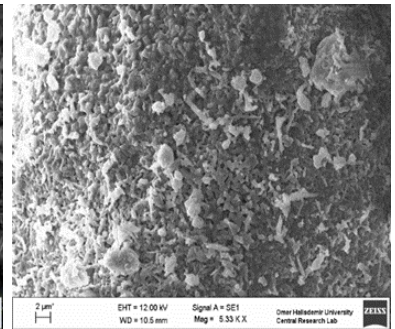
SV 12



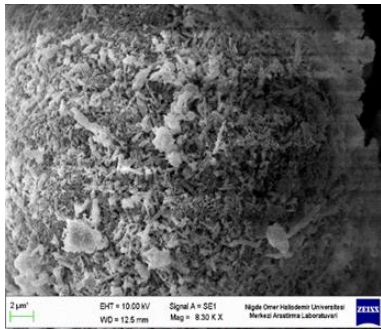
SV 13



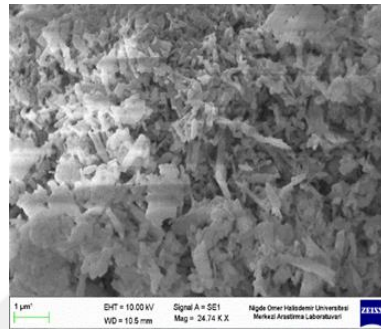
SV 14



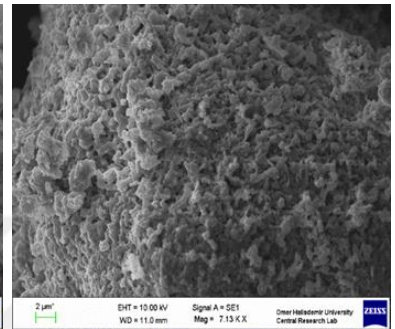
SV 15



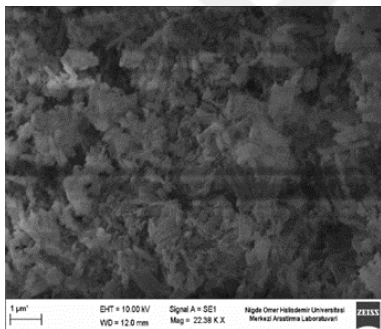
SV 16



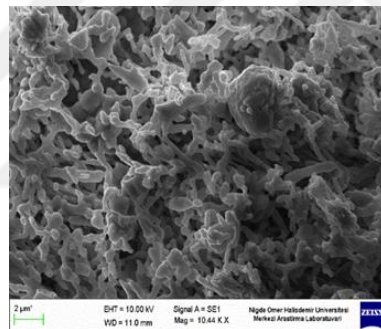
SV 17



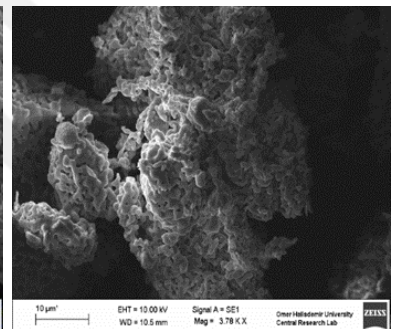
SV 18



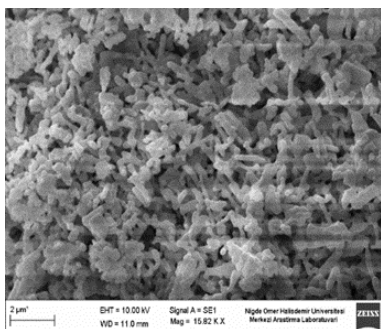
SV 19



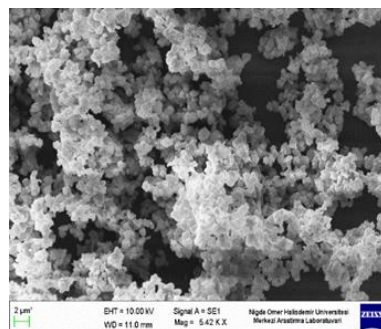
SV 20



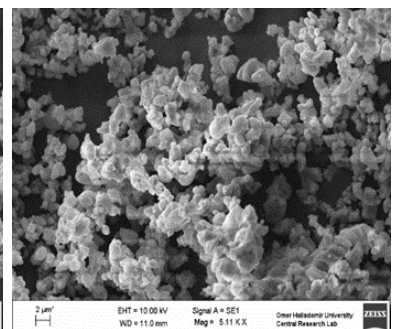
SV 21



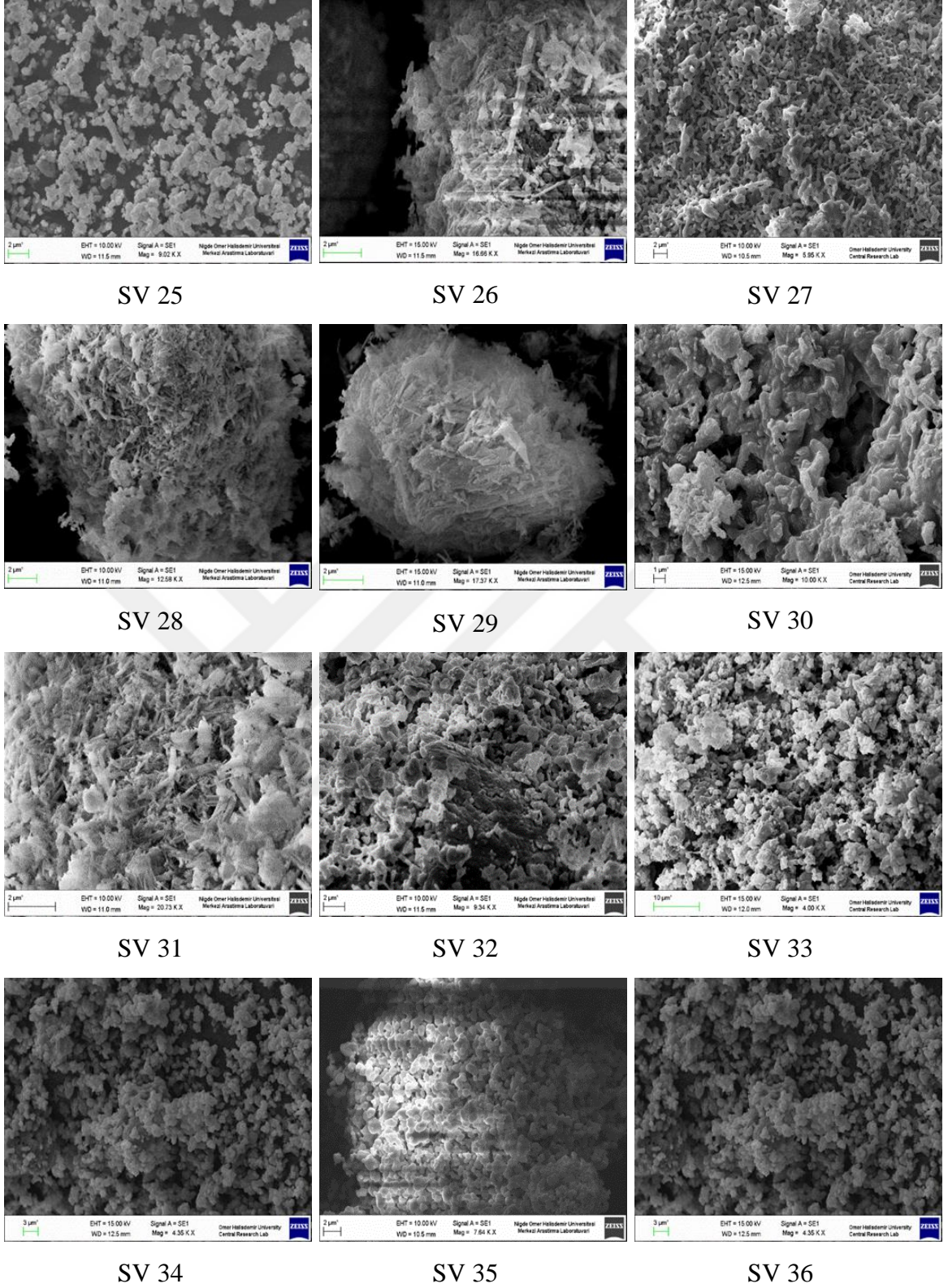
SV 22



SV 23



SV 24



**Fotoğraf 16.** Doğal hammaddeler ile üretilen wollastonit minerallerinin SEM görüntüleri

48 saat boyunca sentezlenen wollastonit minerallerinin SEM görüntüleri incelendiğinde kuvarz kaynağı olarak silis tozu (Q-1) ile üretilen wollastonitlerden CaO kaynağı olarak

kalsit (CaO-1) ile üretilen minerallerden SV14'te iğnemsî parçacık yapısı gözlemlenirken, SV13 parçacık yapısında topaklanmaların olduğu, SV15'te ise ağımsı bir yapının olduğu gözlemlenmiştir. CaO kaynağı olarak sönmemiş kireç (CaO-2) kullanılarak üretilen minerallerden SV16 ve SV17'de iğnemsî parçacık yapısına rastlanırken, SV18 mineralinde ise iğnemsî parçacık yapısının oluşmadığı ve ağımsı bir yapının olduğu belirlenmiştir. Kuvartz kaynağı olarak silis kumunun (Q-2) kullanıldığı SV'lerin SEM analizleri incelendiğinde elde edilen SV19, SV20, SV21, SV22, SV23 ve SV24 minerallerinin hiç birinde iğnemsî parçacık yapısına rastlanmamıştır. Bu üretimlerde, CaO kaynağı olarak kalsitin (CaO-1) kullanıldığı SV19'un tanecik yapısında topaklanmaya rastlanırken, SV20 ve SV21 minerallerinde ise ağımsı bir yapı elde edilmiştir. CaO kaynağı olarak sönmemiş kireç (CaO-2) kullanıldığında ise üretilen SV22 mineralinde ağımsı bir yapı gözlemlenirken, SV23 ve SV24 minerallerinde topaklanmaların olduğu görülmüştür.

Sentezleme süresi olarak 72 saatin kullanıldığı üretim prosedürüne göre elde edilen vollastonit minerallerinin SEM görüntüleri incelendiğinde ise 48 saat boyunca sentezlenen vollastonit mineralleri ile benzer yapıların olduğu belirlenmiştir. Ancak bazı kombinasyonlarda sentezleme süresinin uzaması sebebiyle iğnemsî parçacık yapısının olduğu/kaybolduğu görülmüştür. Silis tozu (Q-1) kullanılarak elde edilen vollastonit minerallerinden kalsit (CaO-1) ile üretilen SV25 mineralinin parçacık yapısında topaklanmaların olduğu, SV26 mineralinde iğnemsî parçacık yapısının olduğu, SV27 mineralinde ise ağımsı bir parçacık yapısı gözlemlenmiştir. Aynı kuvartz kaynağının sönmemiş kireç (CaO-2) ile kullanılmasından elde edilen SV28 ve SV29'un iğnemsî parçacık yapısına sahip olduğu belirlenirken, SV30 mineralinin ise ağımsı parçacık yapısına sahip olduğu görülmüştür. Silis kumu (Q-2) ve kalsit (CaO-1) ile üretilen SV minerallerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, SV31 mineralinin iğnemsî parçacık yapısına sahip olduğu gözlemlenirken, SV32 ve SV33 minerallerinde ise ağımsı bir yapının hakim olduğu belirlenmiştir. Silis kumunun (Q-2) sönmemiş kireç (CaO-2) ile kullanılması sonucu elde edilen SV minerallerinde ise herhangi bir iğnemsî yapıya rastlanmazken, SV34 mineralinde ağımsı parçacık yapısı, SV35 ve SV36 minerallerinde ise topaklanmış parçacık yapısına rastlanmıştır.

Çalışma kapsamında 36 adet vollastonit minerali üretilmiş ve bunlardan 7 tanesinin iğnemsî parçacık yapısına sahip olduğu, 29 tanesinin ise iğnemsî parçacık yapısına

sahip olmadığı belirlenmiştir. Üretilen SV'lerin SEM analizleri genel olarak incelendiğinde, sentetik vollastonit üretiminde kullanılan hammaddelerin tane boyutlarının, sentezleme süresinin ve sinterleme sıcaklıklarının iğnemsî parçacık yapısının oluşmasına etki eden parametreler olduğu görülmektedir. İğnemsî parçacık yapısının oluşması değerlendirilirken, hammaddelerin tane boyutu kendi aralarında ince ve iri olarak iki gruba ayrılmıştır. Tane boyutu dağılımlarına göre, Şekil 3.1'den de anlaşılacağı gibi ince olarak belirlenen hammaddeler silis tozu (Q-1) ve sönmemiş kireç (CaO-2), iri olarak belirlenen hammaddeler ise silis kumu (Q-2) ve kalsit (CaO-1) mineralleridir. Hammaddelerin ince tane boyutuna sahip olması iğnemsî parçacık yapısının oluşmasını sağlamıştır. Hem ince hem de iri hammaddelerin kullanılması ile üretilen SV'lerde ise kuvarz kaynağının ince taneli olması ile iğnemsî parçacık yapısı oluşmuş, kuvarz kaynağının iri taneli olması durumunda ise iğnemsî parçacık yapısı elde edilememiştir. Dolayısıyla, ince ve iri ham maddelerin kombinasyonu ile üretilen SV'lerin iğnemsî parçacık yapısının oluşmasında kuvarz kaynağının ince taneli olması gerektiği görülmüştür. Literatürde vollastonit üretimi ile ilgili Yazdani ve ark. (2010) tarafından yapılan çalışmada sentetik vollastonit üretimi için farklı tane boyut dağılımına sahip iki kuvarz kaynağı kullanılmış ve bunun neticesinde daha ince tane boyut dağılımına sahip kuvarz kaynağı ile elde edilen sentetik vollastonitin iri kuvarz kaynağıyla üretilen sentetik vollastonite göre daha iyi iğnemsî parçacık yapısına sahip olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla, bu çalışmada ince tane boyutuna sahip kuvarz minerali ile iğnemsî parçacık yapısının elde edilmesi literatür ile desteklenmiştir. İri tane boyutuna sahip hammaddelerin üretimde kullanılması ise iğnemsî parçacık yapısı oluşmasında sentezleme süresinin önemli olduğunu göstermiştir. İri ham maddeler kullanılarak elde edilen SV'lerin 48 saatlik sentezleme süresinde iğnemsî parçacık yapısının oluşmadığı belirlenirken, 72 saatlik sentezleme süresinde ise iğnemsî parçacık yapısı oluşmuştur (Wu vd., 2013).

Vollastonit üretiminde karışımların otoklava yerleştirilme işleminden sonra 24, 48 ve 72 saat süresince 200 °C sıcaklıkta sentezlenmesi prosedüründeki sentezlenme süresi SV'lerin iğnemsî parçacık yapısına sahip olmasını etkileyen en önemli parametrelerden biridir. Üretilen SV'lerin SEM analizleri incelendiğinde, 24 saatlik sentezleme süresi kullanılarak üretilen SV'lerin hiçbirinin iğnemsî parçacık yapısına sahip olmadığı belirlenmiştir. Sentezleme süresi 48 ve 72 saate çıkarıldığında iğnemsî parçacık yapısına sahip SV'lerin üretilmediği görülmüştür. 48 ve 72 saatlik sentezleme süreleri

karşılaştırıldığında, iri ham maddeler kullanılarak 48 saat sentezleme süresi ile üretilen SV'lerin sentezleme süresinin 72 saate çıkarılması ile parçacık yapısı topaklanma olarak görülen vollastonitin (SV 19) iğnemsî parçacık yapısına sahip vollastonit minerali (SV 31) olması sağlanmıştır (Wu vd., 2013). SV 31 mineralinde gözlemlenen bu durum ise, CaO ve SiO<sub>2</sub> hammaddelerinin tane boyut dağılımlarının iri olması sebebiyle iğnemsî parçacık yapısını kazanabilmeleri için daha uzun sentezleme süresine (72 saat) ihtiyaç duyulmasından kaynaklanmaktadır. Diğer hammadde kombinasyonları üretilen SV'ler için sentezleme süresinin 48 saatten 72 saate çıkarılması iğnemsî parçacık yapısı oluşumunda herhangi bir değişikliğe yol açmazken, iğnemsî parçacık yapısının fiziksel özelliği olan boy:çap oranında farklılıklar oluşmasına sebep olmuştur.

Üretilen SV'lerin SEM analizleri sinterleme sıcaklığı açısından incelendiğinde, iğnemsî parçacık yapısına sahip SV'lerin 1000 °C ve 1100 °C sıcaklıkta elde edilebildiği görülmüştür. Hammaddelerin ince tane boyutuna sahip olduğu karışımlarda hem 1000 °C hem de 1100 °C sinterleme sıcaklıklarında iğnemsî parçacık yapısının oluştuğu belirlenirken, silis tozu (Q-1) ve kalsit (CaO-1) hammaddelerinden elde edilen SV'lerin sadece 1100 °C sinterleme sıcaklığında iğnemsî parçacık yapısının oluştuğu görülmüştür. Bu durum Yarusova ve ark. (2017) yaptığı çalışma ile açıklanabilir. Yapılan bu çalışmada, elde edilen tobermorit mineralleri 1000 °C, 1100 °C ve 1200 °C sinterleme sıcaklıklarında sinterlenmiş ve oluşan vollastonit minerallerinin SEM görüntüleri incelendiğinde, 1000 °C ve 1100 °C sinterleme sıcaklıklarında iğnemsî yapıya rastlandığını, 1200 °C sinterleme sıcaklığında ise iğnemsî yapıya rastlanmadığını belirtmişlerdir. Ayrıca, hammaddelerdeki tane boyutunun azalması daha düşük sinterleme sıcaklığında iğnemsî parçacık yapısına sahip SV'nin üretilebileceğini göstermiştir. Son olarak, sinterlendiğinde iğnemsî parçacık yapısı elde edilen bir tobermorit mineralinin vollastonit üretimindeki sinterleme sıcaklığı arttırıldığında iğnemsî parçacık yapısından ağımsî parçacık yapısına geçişin olduğu belirlenmiştir.

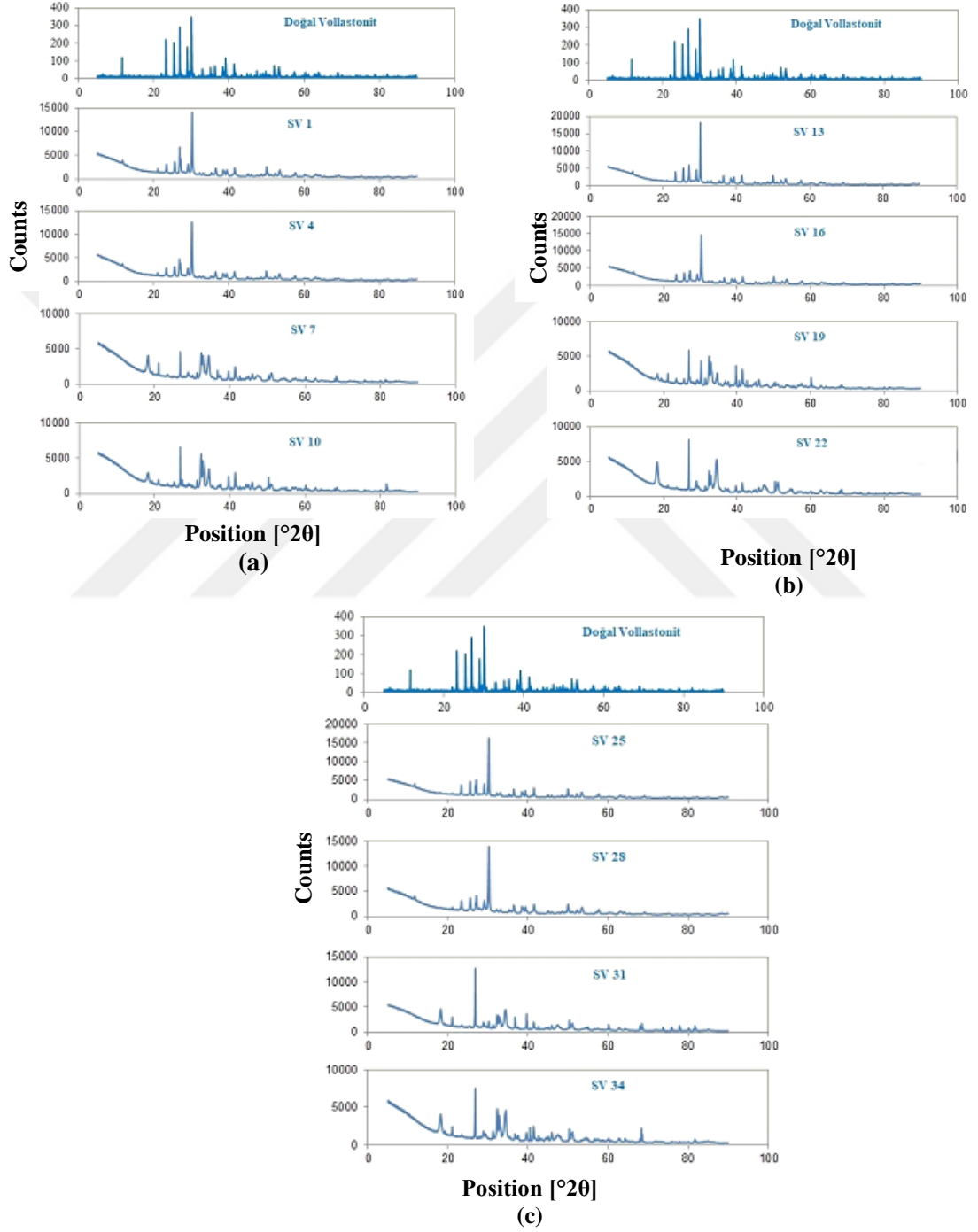
Yukarıda açıklanan iğnemsî parçacık yapısına sahip sentetik vollastonit üretiminde önemli olan parametrelere ek olarak, kuvarz kaynağının sahip olduğu SiO<sub>2</sub> oranı, tane boyutu ile birlikte önemli bir parametre olabilir. Çalışma kapsamında üretilen SV'lerin üretiminde kullanılan silis tozu ve silis kumu sırasıyla %98,89 ve %96,23 oranda SiO<sub>2</sub> içeriğine sahiptir. Fotoğraf 4.4'de görülen SEM görüntüleri incelendiğinde, kuvarz kaynağı olarak silis tozunun kullanıldığı SV 14, SV 16, SV 17, SV 26, SV 28 ve SV

29'da iğnemsiz parçacık yapısı belirlenmiştir. Bu durum, silis kumuna göre silis tozunun sahip olduğu yüksek orandaki (%98,89) SiO<sub>2</sub> içeriği ile açıklanabilir. Ohnemuller ve ark. (1975) belirttiği gibi hammadde içeriği vollastonit üretimi için çok önemlidir ve iyi vollastonit mineralinin üretilmesi için SiO<sub>2</sub> oranının %98 değerinden fazla olması gerekmektedir.

Doğal hammaddeler kullanılarak üretilen SV'lerin genellikle düşük sinterleme sıcaklığında iğnemsiz parçacık yapıları elde edilmiştir. Bundan dolayı, her tobermorit sınıfı için en düşük sinterleme sıcaklıklarında üretilen vollastonitlerin (SV 1, SV 4, SV 7, SV 10, SV 13, SV 16, SV 19, SV 22, SV 25, SV 28, SV 31 ve SV 34) XRD analizleri yaptırılmış ve sonuçlar Şekil 4.1' de gösterilmiştir. XRD analizi sonucu oluşan pikler incelendiğinde genel olarak doğal vollastonitin sahip olduğu pikler ile doğal hammaddelerle üretilen SV'lerin pikleri ile büyük ölçüde benzerlik gösterirken, bazı SV'lerin doğal vollastonitten farklı piklere de sahip olduğu belirlenmiştir. Özellikle SV 7, SV 10, SV 19, SV 22, SV 31 ve SV 34'ün 30-40 position [ $^{\circ}2\theta$ ] seviyelerinde yüksek piklerin oluştuğu görülmüştür. Bu SV'lerin ortak özellikleri kuvarz kaynağı olarak silis kumunun (Q-2) kullanılmasıdır. Daha önce de bahsedildiği gibi SV üretiminde kullanılan silis kumu (Q-2) iri kuvarz kaynağını ifade etmekte olup hammaddelerin iri tanecikler içermesi CaO ile reaksiyonların tam olarak gerçekleşmemesine neden olabilmektedir. Bu nedenle de reaksiyona girmeyen hammaddelerin varlığı sebebiyle XRD analizinde doğal vollastonitte oluşmayan farklı pikler ortaya çıkabilmektedir.

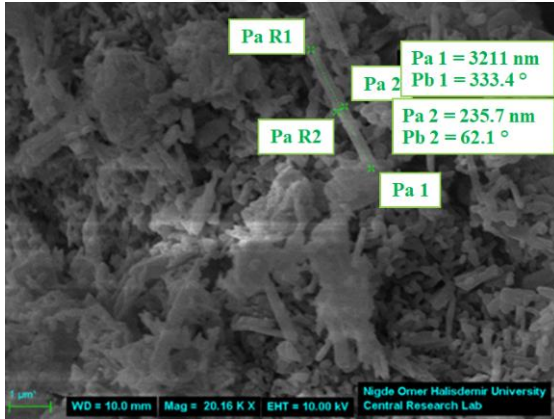
Bu çalışma kapsamında üretilen sentetik vollastonitlerden SV 14, SV 16, SV 17, SV 26, SV 28, SV 29 ve SV 31 minerallerinin iğnemsiz parçacık yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. İğnemsiz parçacıkların sahip olduğu fiziksel özellik (boy:çap oranı) vollastonit mineralinin kullanım alanında ciddi bir öneme sahiptir (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013; Mathur vd., 2007; Dey vd., 2015). Özellikle çimentolu kompozitlerin üretilmesinde kullanılan vollastonitlerin yüksek boy:çap oranına sahip olması bazı dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilemektedir (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013; Mathur vd., 2007; Dey vd., 2015). İğnemsiz parçacık yapısına sahip olan SV'lerin boy:çap oranlarının yüksek olması, ECC karışımlarında özellikle sünekliliği etkileyen en önemli parametre olarak düşünülmektedir. Bu tez çalışması kapsamında üretilen SV'lerin sahip olduğu boy:çap oranları SEM görüntülerinden elde edilen iğnemsiz yapıların ölçümleri alınarak sağlanmıştır. Elde edilen bu ölçümler

Fotoğraf 4.5'te detaylı olarak verilmiştir. Fotoğraf 4.5'te verilen boy ve çap ölçümleri maksimum boy:çap oranını belirlemeye yönelik olup üretim sonucu elde edilen iğnemişi parçacık yapısına sahip olan vollastonitlerin en yüksek boy:çap oranı belirlenmeye çalışılmıştır.

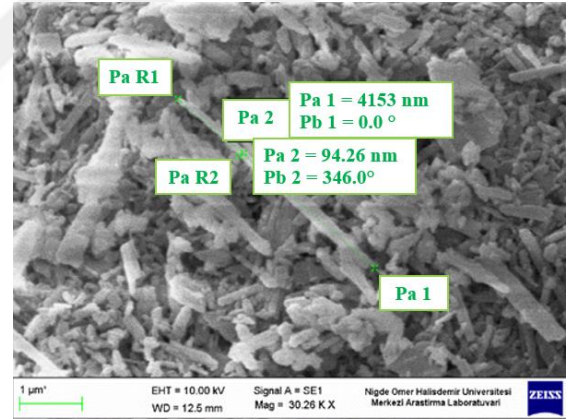


**Şekil 4.1** Doğal hammaddelerle üretilen SV'lerin XRD sonuçları; (a) 24 saat sentezlenmiş, (b) 48 saat sentezlenmiş, (c) 72 saat sentezlenmiş

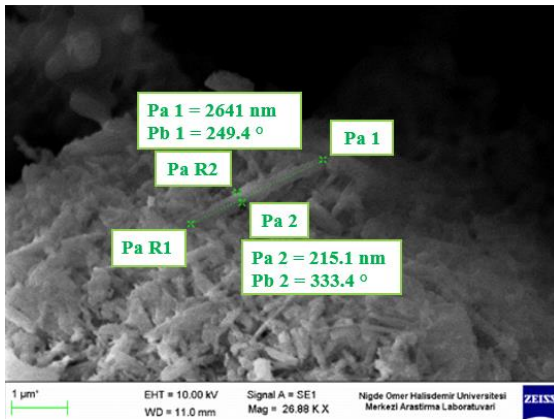
Üretilen SV'lerin boy:çap oranları incelendiğinde, her SV türü için maksimum boy:çap oranı ölçümleri dikkate alınmış ve en yüksek boy:çap oranı SV14'ün 13:1, SV16'nın 44:1, SV17'nin 12:1, SV26'nın 12:1, SV28'in 30:1, SV29'un 8:1, SV31'in 21:1 olarak belirlenmiştir. Bu çalışmanın ikinci aşaması için en yüksek iki farklı boy:çap oranına sahip olan sentetik vollastonitin seçilip, bu vollastonit türlerinin ECC karışımlarında kullanılması hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda, üretilen vollastonitlerden elde edilen boy:çap oranlarına göre en yüksek boy:çap oranı 44:1 olan SV16 minerali üretilebilmiştir. Buna göre en yüksek boy:çap oranına sahip SV olan SV16 mineralinin 'Üretim Prosedürü' kısmında açıklanan prosedüre göre, silis tozu (Q-1) ve sönmemiş kireç (CaO-2) hammaddeleri (ince tanecik boyutuna sahip hammaddeler) ile sentezleme süresinin 48 saat (2 gün) ve sinterleme sıcaklığının 1000 °C olarak uygulanması neticesinde elde edildiği belirlenmiştir. En yüksek iğnemsî parçacık yapısına sahip SV minerallerinin boy:çap oranları incelendiğinde, SV16 ve SV28 mineralleri en yüksek boy:çap oranı olarak sırasıyla 44:1 ve 30:1 değerlerine sahip olmuş ve bu nedenle ECC karışımlarında kullanılmalarına karar verilmiştir.



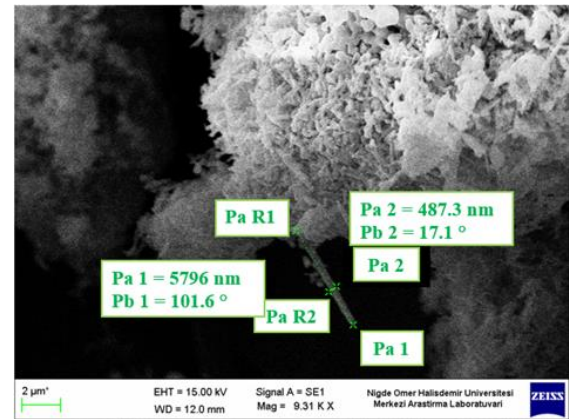
SV 14



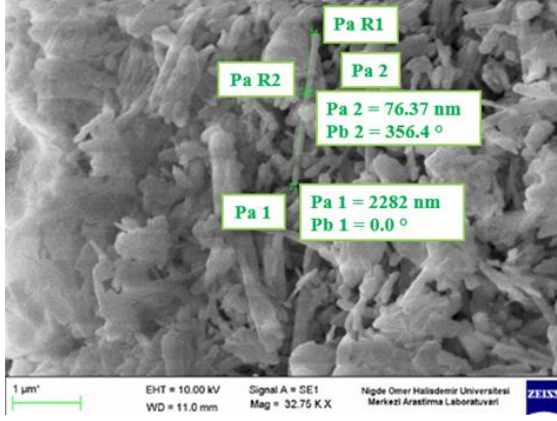
SV 16



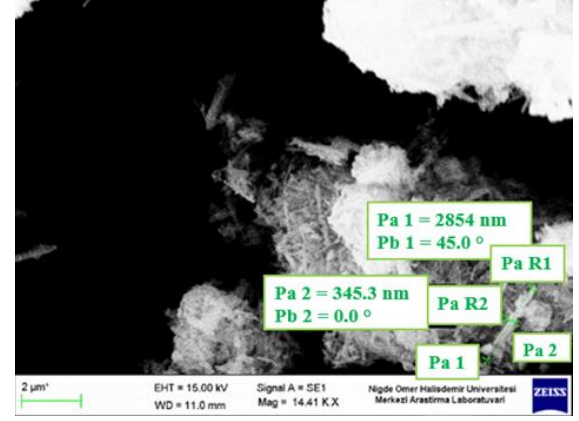
SV 17



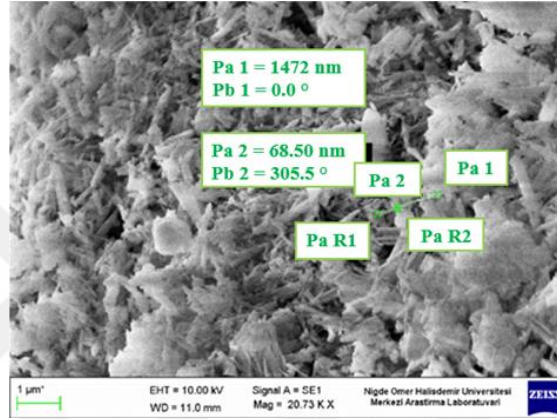
SV 26



SV 28



SV 29



SV 31

**Fotoğraf 17.** Sentetik wollastonitlerin boy:çap ölçümleri

#### 4.1.3 Atık malzemelerden sentetik wollastonitin elde edilmesi

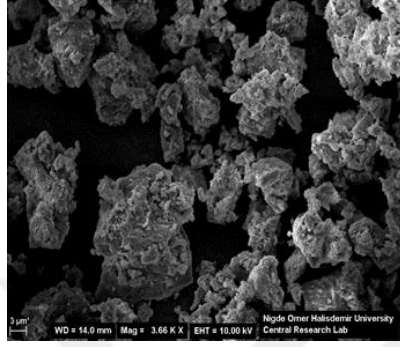
Doğal hammaddelerin kullanılması ile elde edilen SV'lerin incelenmesi sonucunda en yüksek boy:çap oranına sahip SV'nin (SV16) elde edildiği üretim prosedürü parametreleri (48 saat sentezleme, 1000 °C sinterleme), bu aşamada uygulanmıştır. Bu prosedür sonucunda elde edilen SV mineralleri Fotoğraf 4.6'da gösterilmiştir.



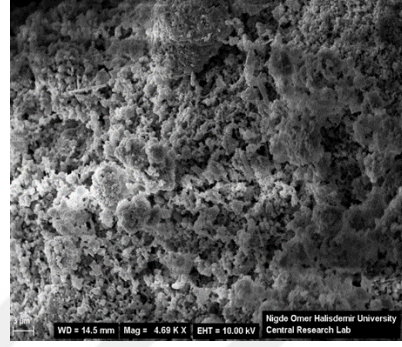
**Fotoğraf 18.** Atık malzemelerle üretilen sentetik wollastonitler

Atık malzemeler ile elde edilen SV'lerin SEM analizi görüntüleri Fotoğraf 4.7'de verilmiştir. Üretilen SV'lerin SEM analiz görüntüsü incelendiğinde, SV37, SV38 ve SV39 minerallerinde herhangi bir iğnemi yapı gözlemlenmemiştir. SV40 mineralinde ise çok sınırlı sayıda iğnemi parçacık yapısı görülürken, mineralin genelinde topaklanmış taneciklerin oluştuğu, bu nedenle de genel olarak iğnemi parçacık yapısına sahip olmadığı belirlenmiştir. Atık malzemeler kullanılarak üretilen SV'lerin iğnemi parçacık yapısına sahip olamama sebebinin kimyasal içerikleri olabileceği düşünülmektedir. Çizelge 3.1'de CaO kaynağı olarak kullanılan ÖYFC, MT ve SMT incelendiğinde, ÖYFC'nin yaklaşık olarak %35 civarlarında CaO ve SiO<sub>2</sub> içermesinin yanı sıra bünyesinde %13 civarında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve %5 civarında MgO bulundurduğu, MT'nin %46 civarında CaO ve %7 civarında MgO içerdiği, SMT'nin ise %78 civarında CaO ve %18 civarında MgO içerdiği görülmektedir. SV üretiminin birinci aşamasında CaO kaynağı olarak kullanılan hammaddelerin ise CaO içeriklerinin atık malzemelere göre çok daha yüksek olduğu ve içeriklerinde farklı oksitlerin neredeyse hiç bulunmadığı görülmüştür. Dolayısıyla atık malzemeler kullanılarak üretilen SV'lerin

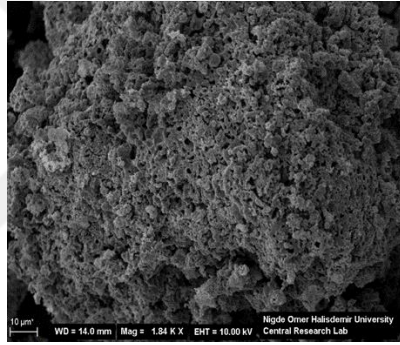
İğnemsî parçacık yapısına sahip olamama sebebinin içeriklerindeki farklı oksitler olduğu düşünülmektedir. Buna ek olarak, atık malzemelerle üretilen SV'lerde SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak kullanılan SD'de SiO<sub>2</sub> içeriğinin %93 seviyelerinde olduğu ve iğnemsî parçacık yapısının oluşabilmesi için yeterli olmadığı gözlemlenmiştir (Ohnemuller vd., 1975).



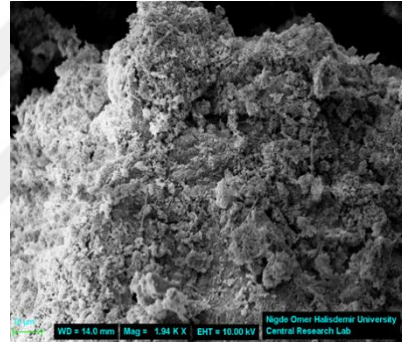
SV 37



SV 38



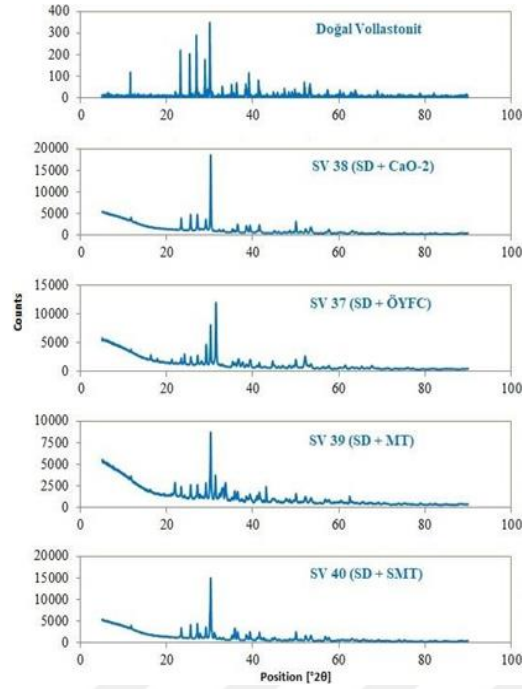
SV 39



SV 40

**Fotoğraf 19.** Atık malzemeler ile üretilen SV'lerin SEM analiz görüntüleri

Atık malzemeler ile elde edilen SV'lerin XRD sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir. Üretilen SV'lerin XRD sonuçları incelendiğinde, geniş boyutlardaki pikler  $\alpha$ -vollastoniti, orta boyuttaki pikler ise  $\beta$ -vollastoniti göstermektedir. Doğal vollastonitin sahip olduğu pikler atık malzemelerle üretilen SV'lerin pikleri ile benzerlik göstermektedir. Bu nedenle atık malzemeler ile üretilen SV'lerin vollastonit olduğu anlaşılmıştır. Ancak malzemelerin kimyasal içerik farklılıklarından dolayı küçük ölçekli piklerde değişiklikler gözlemlenmiştir. Bu değişiklikler doğal vollastonit ve üretilen SV'lerin arasındaki  $\alpha$ -vollastonit ve  $\beta$ -vollastonit içeriğinden kaynaklanmaktadır (Zhu ve Sohn, 2012).

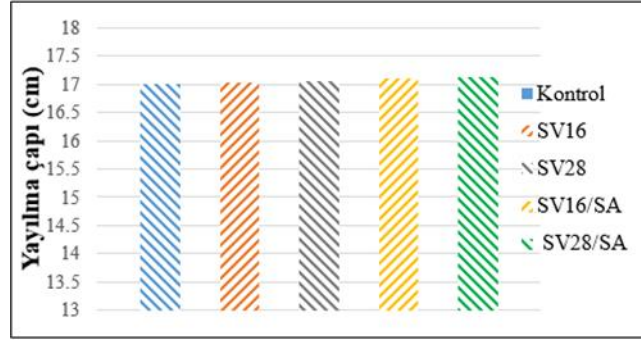


Şekil 4.2. Atık malzemeler ile üretilen SV'lerin XRD analiz sonuçları

### 4.3 Puzolanik Aktivite Deney Sonuçları

#### 4.3.1 Yayılma çapı

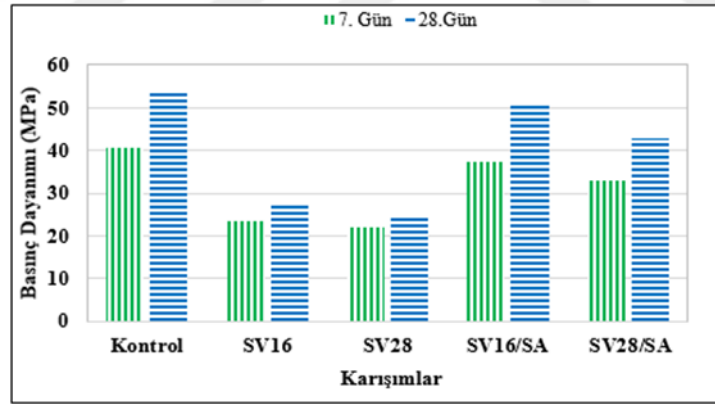
Puzolanik aktivite deneyinin yayılma çapı sonuçları değerlendirildiğinde (Şekil 4.3), kontrol karışımının yayılma çapının 17.0 cm olduğu, I nolu grup karışımlarından SV16 karışımı için 17.03 cm, SV28 karışımı için ise 17.06 cm olduğu belirlenmiştir. I nolu grup karışımlarından farklı olarak süper akışkanlaştırıcı ile hazırlanan II nolu karışım grubunda ise SV16/SA için 17.1 cm, SV28/SA için 17.13 cm'lik yayılma çapı sonuçları elde edilmiştir. Kontrol karışımının yayılma çapının referans alınarak su içeriğinin belirlendiği I nolu grup karışımlarından SV16 karışımı için 310 ml su kullanılırken, SV28 karışımı için 308 ml su kullanılmıştır. Herhangi bir standardı olmadan sadece puzolanik aktivite deney prosedürü ile üretilen II nolu karışım grubundan SV16/SA ve SV28/SA karışımlarında sırasıyla 6.3 gr ve 6.2 gr süper akışkanlaştırıcının kullanıldığı belirlenmiştir. Her iki grup karışımları incelendiğinde SV16 içeren karışımları daha yüksek su veya akışkanlaştırıcı içerdiği belirlenmiştir. Bunun temel nedeni ise SV16 mineralinin sahip olduğu iğnemsilik değerinin SV28 mineralinden fazla olmasından kaynaklanmaktadır (Tatnall, 2006).



Şekil 4.3. Puzolanik aktivite deneyi yayılma çapı sonuçları

#### 4.3.2 Basınç dayanımı ve aktivite indeksi

Hazırlanan bütün karışımlara 7 ve 28 günlük yaşlarda basınç dayanımı testi uygulanmış, elde edilen sonuçlar Şekil 4.4'te detaylı bir şekilde verilmiştir. Basınç dayanımı sonuçları sayesinde grup I ve II nolu karışımların aktivite indeks değerleri hesaplanmıştır. Bu karışım gruplarının puzolanik aktivite indeks değerleri Çizelge 4.1' te detaylı bir şekilde verilmiştir.



Şekil 4.4. Puzolanik aktivite deneyi basınç dayanımı sonuçları

Puzolanik aktivite indeks değerleri incelendiğinde, grup I karışımından SV16 minerali ile üretilen standart harcın kontrol harcına göre 7 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksi sırasıyla, %57,61 ve %50,72 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde SV28 için bu değerler sırasıyla, %54,23 ve %46,05'tir. ASTM C618'e (2015) göre bu değerlerin her iki test yaşı için de en az %75 olması gerekmektedir. SV16 ve SV28 minerallerinin yüksek boy:çap (maksimum 44:1 ve 30:1) oranları nedeniyle artan iğnemsiz parçacık morfolojisi akış sırasında kenetlenmeyi artırmış ve su/çimento oranları 0,484'ten

sırasıyla, 0,620 ve 0,616'ya yükselmiştir. Bilindiği gibi artan s/ç içeriği harcın basınç dayanımını azaltmaktadır. Bu çalışmada SV16 ve SV28 minerallerinin s/ç içerikleri benzer kıvama ulaşabilmek için kontrol karışımına göre sırasıyla %28,10 ve %27,27 oranlarında artmıştır. Bu nedenle minimum dayanım gereksinimi olan %75 sağlanamamıştır. Grup II karışımlarından SV16/SA standart harcın 7 ve 28 günlük aktivite indeks değerleri ise sırasıyla %91.73 ve %93.18 iken, bu değerler SV28/SA standart harcında 7 ve 28 günde sırasıyla %80.68-%79.09 olarak belirlenmiştir. Grup II karışımları minimum dayanım gereksinimi olan %75 şartını karşılamıştır. Bu durumun elde edilmesinin temel nedeni ise, grup II karışımlarının sabit su ile hazırlanıp referans yayılma çapı için SA kullanılmasından kaynaklanmaktadır.

**Çizelge 4.1.** Puzolanik aktivite deneyi aktivite indeks değerleri

Karışımlar	Basınç Dayanımı (MPa)		Aktivite İndeksi (%) 7 Gün/28 Gün
	7. Gün	28. Gün	
<b>Kontrol</b>	40.62	54.14	-
<b>Grup-I</b>			
SV 16	23.4	27.35	57.61/50.52
SV 28	22.03	24.93	54.23/46.05
<b>Grup-II</b>			
SV 16/SA	37.26	50.45	91.73/93.18
SV 28/SA	32.77	42.82	80.68/79.09

#### 4.4 ECC Karışımlarının Mekanik Özellikleri Deney Sonuçları

##### 4.4.1 Basınç dayanımı

Kontrol, I, II ve III nolu lifli ve lifsiz ECC karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 4.5'te sunulmuştur. I nolu karışım gruplarında artan SV16 içeriğine bağlı olarak lifli ve lifsiz ECC'lerin basınç dayanımı değerleri devamlı bir şekilde azalmıştır. SV%3\_Ç, SV%6\_Ç, SV%9\_Ç ve SV%12\_Ç karışımlarının basınç dayanımları 7. günde lifli ECC için sırasıyla, %2.1, %3.1, %15.5 ve %21.5 oranlarında azalırken, lifsiz ECC için sırasıyla, %7.8, %10.4, %16.7 ve %21.9 oranlarında azalmıştır. 28. günde ise bu değerler lifli ECC için sırasıyla, %4.1, %6.3, %10.9 ve %13.8 oranlarında azalırken, lifsiz ECC için sırasıyla, %3.3, %5.1, %10.1 ve %12.8

oranlarında azalmıştır. Çimentonun yerine SV16 mineralinin kullanılması sonucu 7 ve 28 günde oluşan dayanım kaybı iki şekilde açıklanabilir. İlk olarak bu dayanım kaybı, vollastonit mineralinin inert bir yapıya sahip olması nedeniyle herhangi bir kimyasal reaksiyon göstermemesine bağlanabilir. Ayrıca bu durum I nolu karışımlarda UK içeriğinin sabit tutulmasına rağmen azalan çimento içeriğinden dolayı ortamda azalan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  nedeniyle bir kısım UK mineralinin pozolanik reaksiyonda yer almaması ile açıklanabilir (Bisaillon vd., 1994; Wahab vd., 2013). Bu nedenle, artan SV16 içeriği ve bununla birlikte azalan çimento içeriğine bağlı olarak, hem vollastonitin inert yapısı hem de artan UK/Ç oranından dolayı UK mineralinin bir kısmının reaksiyonda yer almaması bu dayanım kaybının temel nedenleri olarak düşünülmektedir (Ransinchung ve Kumar, 2010; Bisaillon vd., 1994; Kalla vd., 2013).

II nolu karışım gruplarında artan SV16 içeriğine bağlı olarak lifli ve lifsiz ECC'lerin basınç dayanımı değerleri, 7 ve 28. günde %6 SV16 içeriğine kadar artmış daha sonra azalmaya başlamış ancak yine de SV%9\_UK ve SV%12\_UK karışımlarının basınç dayanımları kontrolden daha yüksek çıkmıştır. SV%3\_UK, SV%6\_UK, SV%9\_UK ve SV%12\_UK karışımlarının basınç dayanımları 7. günde lifli ECC için sırasıyla, %15.9, %20.9, %13.9 ve %6.3 oranlarında artmıştır. Bu değerler 28. günde %6.1, %13.1, %9.3 ve %3.2 olarak belirlenmiştir. Lifsiz ECC karışımlarının 7. günde basınç dayanımları ise kontrole göre sırasıyla, %0.7, %5.1, %3.4 ve %1.5 oranlarında artmıştır. Bu artış oranları 28. günde %5.6, %10.0, %6.7 ve %2.1 değerlerine ulaşmıştır. UK yerine kullanılan vollastonit mineralinin ECC karışımlarının 7 günlük basınç dayanımına olan geliştirici etkisi mineralin lifli yapısı (iğnemsî parçacık morfolojisi) ile açıklanabilir (Kumar ve Ramujee, 2017; Soliman ve Nehdi, 2014). Böylece mikro çatlaklar arasında bağ kurma özelliğine sahip olan vollastonit mikro fiberlerin, ara yüzeydeki mikro fiber/matris bağ dayanımını artırdığı söylenebilir (Soliman ve Nehdi, 2014; Banthia ve Sheng, 1996; Hameed vd., 2009).

III nolu karışım gruplarında, II nolu karışım gruplarına benzer olarak ECC'deki artan SV16 oranı, lifli ve lifsiz ECC'lerin basınç dayanımı değerlerini %6 SV16 içeriğine kadar artırmış, bu değerden sonra azaltmaya başlamasına rağmen, SV%0'a göre daha yüksek basınç dayanımı sağlamıştır. SV%3\_Ç-UK, SV%6\_Ç-UK, SV%9\_Ç-UK ve SV%12\_Ç-UK karışımlarının basınç dayanımları lifli ECC için 7. günde sırasıyla, %11.8, %19.0, %10.3 ve %6.1 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla, %4.6, %12.5, %6.3

ve %2.4 oranlarında artmıştır. Bu artış lifsiz ECC'ler için ise 7. günde sırasıyla, %0.5, %3.8, %0.9 ve %0.5 ve 28. günde sırasıyla, %4.8, %8.5, %5.5 ve %1.8'dir. Şekil 4.5'ten ve yüzde artış oranlarından da görüldüğü üzere III nolu karışımların basınç dayanımları kontrolden ve I nolu karışımlardan yüksek, ancak II nolu karışımlardan daha düşüktür. Bunun nedeni II nolu karışımlarda, III nolu karışımlara göre çimento içeriğinin de bir miktar azaltılmasıdır. Önceki bölümlerde açıklandığı gibi III nolu karışımlarda, UK/çimento oranı kontrol karışımıyla aynı olacak şekilde (1.20), SV16, çimento+UK yerine kullanılmıştır. Bu sabit oran sayesinde, hem UK'nın hidrasyon sonucu oluşan  $Ca(OH)_2$  ile reaksiyonu kontrol karışımıyla benzer şekilde sağlanmış hem de azalan UK yerine SV16 kullanımı mikro fiber/matris bağ dayanımını artırmıştır (Banthia ve Sheng, 1996; Hameed vd., 2009; Wahab vd., 2013). Ayrıca azalan çimento içeriğine rağmen sağlanan bu dayanım artışı hem çimento maliyeti hem de çimentonun neden olduğu çevresel etki nedeniyle önemli bir bulgu olarak düşünülmektedir.

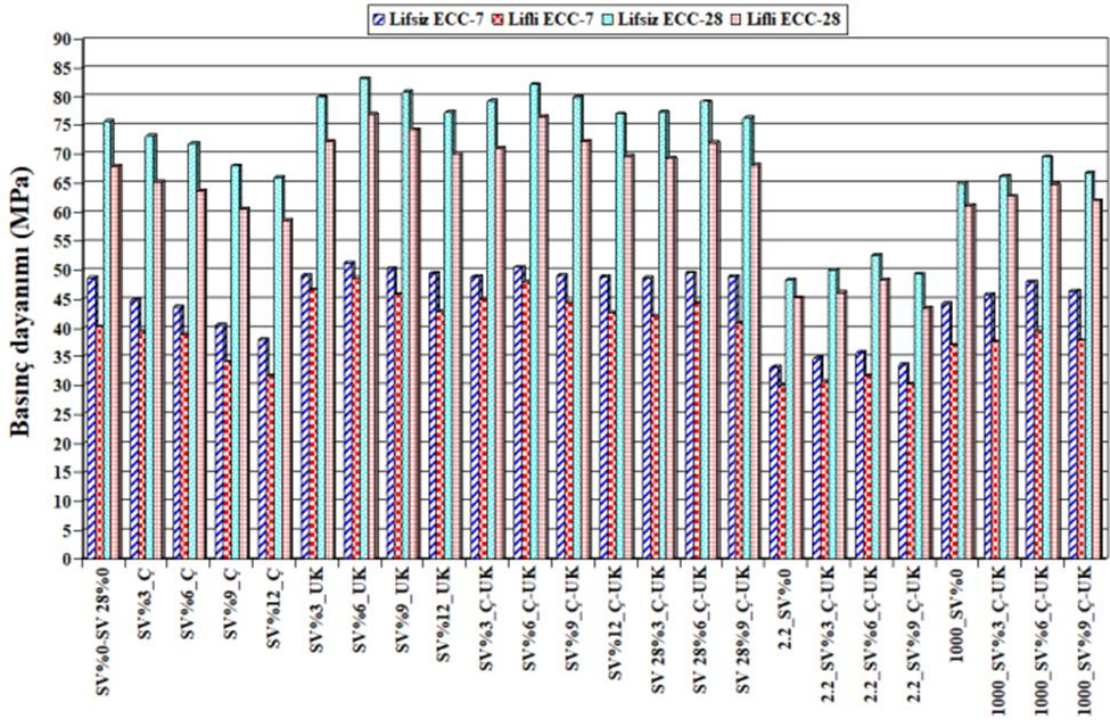
IV, V ve VI nolu lifli ve lifsiz ECC karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri Şekil 4.5'te verilmiştir. IV nolu karışım gurubunda vollastonit olarak maksimum boy:çap oranı SV16 vollastonitinden daha düşük olan SV28 vollastoniti, UK/çimento oranı 1.20 olacak şekilde çimento+UK yerine kullanılmıştır. SV28%3\_Ç-UK, SV28%6\_Ç-UK, ve SV28%9\_Ç-UK karışımlarının basınç dayanımları lifli ECC için 7. günde sırasıyla, %4.6, %10 ve %1.6 oranlarında, 28. günde ise sırasıyla, %1.9, %6 ve %0.2 oranlarında artmıştır. Bu artış lifsiz ECC'ler için ise 7. günde sırasıyla, %0.1, %1.8 ve %0.4 ve 28. günde sırasıyla, %2.1, %4.6 ve %0.8'dir. Bu sonuçlara göre, III nolu karışımlara benzer olarak IV nolu karışımlar da kontrol karışımından daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bu durum III nolu karışımlarda açıklandığı gibi, UK/çimento oranının 1.20 olmasından dolayı hem UK'nın hidrasyon sonucu oluşan  $Ca(OH)_2$  ile reaksiyonu kontrol karışımıyla benzer şekilde sağlanması hem de azalan UK yerine SV28 kullanımının mikro fiber/matris bağ dayanımını artırması ile açıklanabilir (Banthia ve Sheng, 1996; Hameed vd., 2009; Wahab vd., 2013). Ancak, çimento+UK yerine daha düşük boy:çap oranıyla SV28'in kullanılması sonucu elde edilen basınç dayanımı değerleri, SV16 kullanımında elde edilen basınç dayanımı değerlerinden daha düşüktür. Lif takviyesinin verimliliği boy:çap oranına, lifin hacimsel kullanım oranına ve lif/matris arasındaki bağ dayanımına bağlıdır. Bu nedenle, daha yüksek boy:çap oranına sahip olan vollastonitin mikro çatlaklar arasında bağ kurma özelliğinin daha yüksek olduğu ve ara yüzeydeki mikro fiber/matris bağ dayanımını daha yüksek seviyelere

çıkardığı ve kompozitlerin mekanik özelliklerini geliştirdiği söylenebilir (Dey vd., 2015; Nikonova vd., 2003).

V nolu grupta UK/çimento oranı 2.20 olup, SV16 minerali bu oran sabit kalacak şekilde çimento+UK yerine Şekil 4.5'ten görüldüğü üzere %3, %6 ve %9 oranlarında kullanılmıştır. Bu gruptaki en yüksek basınç dayanımı değeri 7. ve 28. günde III nolu gruba paralel olarak %6 SV16 içeren karışımdan elde edilmiştir. Artan SV içeriği %6 oranına kadar mikro fiber/matris bağ dayanımını artırmış, bu orandan sonra matrisi olumsuz etkilemesine rağmen kontrol karışımından daha yüksek basınç dayanımı vermiştir (Wahab vd., 2017). Bununla birlikte, III nolu gruptaki lifli SV%0, SV%3\_Ç-UK, SV%6\_Ç-UK ve SV%9\_Ç-UK karışımlarının basınç dayanımı değerleri, V nolu gruptaki lifli 2.2\_SV%0, 2.2\_SV%3\_Ç-UK, 2.2\_SV%6\_Ç-UK ve 2.2\_SV%9\_Ç-UK karışımlarının basınç dayanımlarından 7. gün için sırasıyla, %35.1, %47.1, %51.4 ve %46.8 oranlarında ve 28. gün için sırasıyla, %50.0, %53.7, %58.0 ve %66.0 oranlarında artmıştır. Lifsiz karışımlarda ise bu oranlar, 7. gün için sırasıyla, %46.8, %41.2, %41.4 ve %46.2 ve 28. gün için sırasıyla, %56.8, %58.5, %56.0 ve %61.6 olarak bulunmuştur. Bu durumun nedeni V nolu gruptaki UK/çimento oranının, III nolu gruptaki UK/çimento oranından çok daha yüksek olmasıdır. Bilindiği gibi çimentonun yerine kullanılan puzolanik malzeme içeriğinin çok yüksek değerlerde olması matrisin dayanımını önemli ölçüde azaltır (Topçu ve Canbaz, 2001; Çelik vd., 2004).

VI nolu grupta tane boyutu 0-400 µm olan silis kumu yerine, tane boyutu 0-1000 µm olan silis kumu kullanılmış olup, SV16 minerali UK/çimento oranı 1.20 olacak şekilde çimento+UK yerine Şekil 4.5'ten görüldüğü üzere %3, %6 ve %9 oranlarında kullanılmıştır. Bu gruptaki en yüksek basınç dayanımı değeri 7 ve 28. günde 1000\_SV%6\_Ç-UK karışımından elde edilmiştir. %9 SV içeriğinde matris dayanımı olumsuz etkilemesine rağmen kontrol karışımından daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir (Wahab vd., 2017). Bununla birlikte, III nolu gruptaki lifli SV%0, SV%3\_Ç-UK, SV%6\_Ç-UK ve SV%9\_ÇUK karışımlarının basınç dayanımı değerleri, VI nolu gruptaki lifli 1000\_SV%0, 1000\_SV%3\_Ç-UK, 1000\_SV%6\_Ç-UK ve 1000\_SV%9\_Ç-UK karışımlarının basınç dayanımlarından 7. gün için sırasıyla, %8.5, %19.4, %21.6 ve %17.2 oranlarında ve 28. gün için sırasıyla, %11.2, %13.2, %17.9 ve %16.4 oranlarında artmıştır. Lifsiz karışımlarda ise bu oranlar, 7. gün için sırasıyla, %9.9, %6.9, %5.3 ve %6.1 ve 28. gün için sırasıyla, %16.4, %19.6, %18.0 ve %19.6

olarak bulunmuştur. Bu durum VI nolu gruptaki silis kumunun tane büyüklüğünün III nolu gruptaki silis kumunun tane boyutundan çok daha büyük olmasıyla açıklanabilir. Bilindiği gibi kullanılan agreganın inceliği arttıkça daha kompakt ve sıkı bir iç yapı elde edilir (Şahmaran vd., 2012). Bu nedenle artan incelik malzemenin basınç dayanımını artırır (Demir vd., 2002).



Şekil 4.5. ECC karışımlarının 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

#### 4.4.2 Elastisite modülü

ECC karışımlarına ait 28 günlük elastisite modülü verileri Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 karşılaştırıldığında ECC karışımlarının elastisite modülü verilerinin, basınç dayanımlarına paralel olarak değiştiği gözlemlenmiştir (Özcan, 2018; Türk vd., 2010). I nolu grubun elastisite modülü değerleri lifli ve lifsiz ECC'ler için sırasıyla, 19.5-21.9 GPa ve 20.7-24.0 GPa aralıklarında değişmiştir. Şekil 4.6'dan görüldüğü gibi, çimento yerine vollastonit kullanımı ECC'nin elastisite modülünü azaltmıştır. I nolu grupta %3, %6, %9 ve %12 oranlarında SV16 içeren karışımların elastisite modülü değerleri sırasıyla, lifli ECC'ler için %2.7, %4.6, %8.2 ve %11.0 oranlarında, lifsiz ECC'ler için ise %2.5, %4.2, %7.9 ve %13.8 oranlarında azalmıştır. Bu durum, betona gevreklik özelliği kazandıran bir malzeme olan çimentonun azalan

oranının bir sonucu olarak düşünülebilir (Bache, 1981; Karihaloo, 1995; Taşdemir ve Bayramov, 2002).

II nolu grupta UK yerine SV16 vollastonitinin kullanımının ECC'nin elastisite modülünü arttırdığı ve bu artışın %6 SV16 içeriğine kadar devam ettiği belirlenmiştir. Bu grubun elastisite modülü verileri lifli ECC'ler için 21.9-24.2 GPa ve lifsiz ECC'ler için 24.0-26.7 GPa aralıklarında değişmiştir. SV%3\_UK, SV%6\_UK, SV%9\_UK ve SV%12\_UK, karışımlarının elastisite modülleri, lifli ECC'ler için sırasıyla, %8.2, %10.5, %9.1 ve %4.1 oranlarında ve lifsiz ECC'ler için sırasıyla %8.8, %11.3, %9.2 ve %6.7 oranlarında artmıştır. Yüksek elastisite modülüne sahip olan SV16 vollastonitinin (Mathur vd., 2007; Kalla vd., 2015) yüksek boy:çap oranı sayesinde sahip olduğu mükemmel iğnemsiz parçacık morfolojisi ile dayanıma etkisini özellikle daha geç yaşlarda gösteren UK yerine kullanımının ECC'nin elastisite modülünü artırdığı düşünülmektedir (Topçu ve Canbaz, 2001).

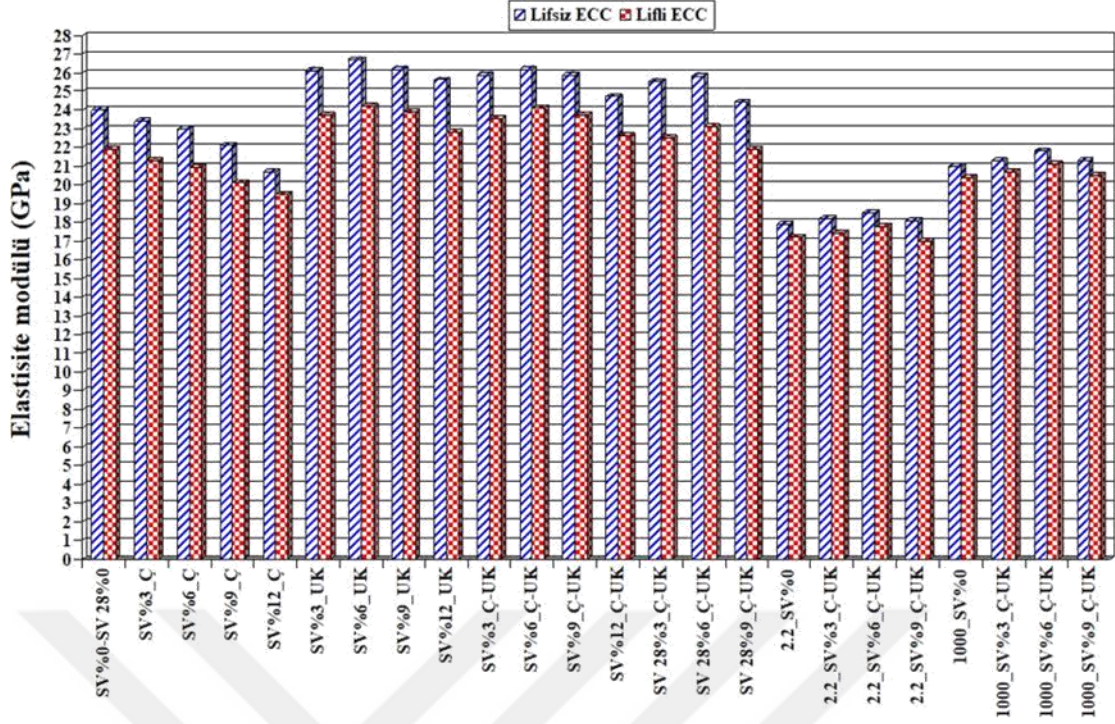
III nolu grup karışımlarının elastisite modülleri %6 SV16 içeriğine kadar artmış, %9 ve %12 SV16 içeriğinde azalmış ancak yine de kontrol karışımından daha yüksek çıkmıştır. Bu grup karışımlarının elastisite modülleri lifli karışımlarda 21.9-24.1 GPa aralığında değişirken, lifsiz karışımlarda 24.0-26.2 GPa aralığında değişmiştir. SV%3\_Ç-UK, SV%6\_Ç-UK, SV%9\_Ç-UK ve SV%12\_Ç-UK, karışımlarının elastisite modülleri, lifli ECC'ler için sırasıyla, %7.3, %10.0, %8.2 ve %3.2 oranlarında ve lifsiz ECC'ler için sırasıyla %7.9, %9.2, %7.9 ve %2.9 oranlarında artmıştır. II nolu grupta UK/çimento oranı kontrol karışımıyla aynı olacak şekilde (1,20) çimento+uçucu kül yerine vollastonit kullanıldığı için SV16 minerali arttıkça azaltılan UK miktarı çimentoya göre daha fazla olduğundan ve bu spesifik oran korunduğundan bu gruptaki karışımların elastisite modülü değerleri kontrol karışımından daha yüksek olup, II nolu gruptaki karışımlara yakın değerler vermiştir (Topçu ve Canbaz, 2001).

IV nolu grupta lifli ve lifsiz ECC karışımlarının elastisite modülleri 21.9-23.1 GPa ve 24.0-25.8 GPa aralıklarında değişmiştir. %3, %6 ve %9 oranlarında SV28 içeren ECC karışımlarının elastisite modülü değerleri kontrol karışımına kıyasla lifli ECC'ler için %2.7, %5.5 ve %0,0 oranlarında ve lifsiz ECC'ler için %6,3, %7,5 ve %1,7 oranlarında artmıştır. Şekil 4.6'dan ve bu yüzde artış değerlerinden açıkça görüldüğü üzere, daha yüksek boy:çap oranıyla SV16 vollastonitinin kullanıldığı III nolu karışımların, daha

düşük boy:çap oranıyla SV28 vollastonitinin kullanıldığı IV nolu karışımlardan daha yüksek elastisite modülüne sahip oldukları ve kontrole göre daha yüksek yüzde artışı sergiledikleri belirlenmiştir. Bu durum boy:çap oranı arttıkça vollastonitin artan iğnemselliği sayesinde açıklanabilir (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013).

V nolu karışım grubunda lifli ECC'lerin elastisite modülleri 17,0-17,8 GPa, lifsiz ECC'lerin elastisite modülleri ise 17,9-18,5 GPa değerleri arasındadır. 2.2\_SV%3\_Ç-UK, 2.2\_SV%6\_Ç-UK ve 2.2\_SV%9\_Ç-UK karışımlarının elastisite modülü 2.2\_SV%0 karışımından lifli ECC'ler için sırasıyla, %1,2, %3,5 ve %-1,2 oranlarında ve lifsiz ECC'ler için %1,7, %3,4 ve %1,1 oranlarında artmıştır. Bu karışım grubunda, III nolu karışım grubunundan farklı olarak çok daha fazla uçucu kül ve çok daha az çimento içeriği bulunmaktadır. Bu nedenle, III ve V nolu gruplar karşılaştırıldığında V nolu grubun hem elastisite modülü değerleri hem de kontrol karışımına göre yüzde artış değerleri III nolu gruptan daha azdır. V nolu grubun daha düşük elastisite modülüne sahip olması, rijit bir malzeme olan çimentonun azalması ve dayanıma etkisi özellikle 90 gün ve sonrasında daha etkili olan UK'nin artması olarak açıklanabilir (Topçu ve Canbaz, 2001; Şahmaran vd., 2012; Bache, 1981; Karihaloo, 1995; Taşdemir ve Bayramov, 2002).

VI nolu grup için lifli ve lifsiz ECC karışımlarının elastisite modülleri sırasıyla, 20.4-21.1 GPa ve 21.0-21.8 GPa aralıklarında değişmiştir. 1000\_SV%3\_Ç-UK, 1000\_SV%6\_Ç-UK ve 1000\_SV%9\_Ç-UK karışımlarının elastisite modülleri kontrol karışımına göre lifli ECC'ler için sırasıyla, %1.5, %3.4 ve %0.5 oranlarında ve lifsiz ECC'ler için sırasıyla, %1.4, %3.8 ve %1.4 oranlarında artmıştır. III nolu gruba göre daha iri agrega tane boyutuyla tasarlanan bu grubun elastisite modülü değerleri basınç dayanımına paralel olarak aynı SV16 içerikleri için, III nolu grubunun elastisite modülü değerlerinden daha düşük çıkmıştır. Bu nedenle agreganın tane boyutunun artmasının elastisite modülünü azalttığı söylenebilir.



Şekil 4.6. ECC karışımlarının 28 günlük elastisite modülü sonuçları

#### 4.4.3 Kırılma tokluğu

ECC matris numunelerinde kırılmaya karşı dayanım deneyleri, kirişlerin üretilmesinden 7 ve 28 gün sonra gerçekleştirilmiştir. ECC karışımlarının kırılma tokluğu deney sonuçları Çizelge 4.2’de özetlenmiştir. Çizelge 4.2, I nolu karışımların kırılma tokluğunun 7 ve 28 günde kontrol karışımından daha düşük olduğunu göstermektedir. I nolu karışımlarda SV16 minerali çimento yerine kullanıldığı için azalan çimento oranıyla birlikte azalan hidrasyon ürünleri sebebiyle ECC matrisinin rijitliği azalmıştır. Ayrıca SV16’nın kullanım yüzdesinin artmasıyla azalan çimento içeriğinin bir sonucu olarak  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  içeriğinin azalması da ek C-S-H jelleri oluşumuna katkıda bulunan UK mineralinin bir kısmının reaksiyonda görev almamasına neden olur (Wahab, 2013). Bu nedenle UK ilavesiyle oluşan ek C-S-H jellerinde azalma olduğu düşünülmektedir (Hughes, 1982). Ayrıca artan SV16 mineralinin yüksek boy:çap oranı I nolu karışımlarının sünekliğini iğnemsî parçacık yapısından dolayı tıpkı bir lif gibi davranarak artırmıştır (Banthia ve Sheng, 1996; Norman ve Beaudoin, 1993). Bu nedenlerin bir sonucu olarak, I nolu karışımların kırılma tokluğu SV16 içeriğinin artmasıyla azalmıştır.

II nolu ECC karışımlarının kırılma tokluğu değerleri ise %6 SV16 içeriğine kadar 7 ve 28 günde azalmış ancak bu değerden sonra kontrol karışımından daha yüksek çıkmıştır. UK içeriğinin azaltılması sonucu UK mineralinin, matrisin C-S-H jeline olan katkısı azalmıştır (Özbay vd., 2013). Ayrıca SV16'nın iğnemesi parçacık morfolojisi ve yüksek boy:çap oranı da sünekliği arttırmıştır. Böylece II nolu karışımların kırılma tokluğu %6 SV16 içeriğine kadar azalmıştır. Bu değerden sonra kırılma tokluğunda meydana gelen artış SV16'nın ECC matrislerinin mikro yapısını olumsuz yönde etkilemesinin bir sonucu olarak düşünülebilir (Toutanji vd., 2010).

Çizelge 4.2'den görüldüğü üzere, SV%3\_Ç-UK ve SV%6\_Ç-UK karışımları aynı SV16 içeriğine sahip olan I ve II nolu karışımlardan hem 7 hem de 28 günde daha düşük kırılma tokluğu değerlerine sahiptirler. Bu durum UK/çimento oranının (1,20) kontrolle eşit tutulması sonucu hidrasyon ürünlerinin oluşan miktarının kontrole benzer olmasının yanı sıra artan SV16 minerali ile sağlanan lif etkisi ile açıklanabilir. Ayrıca kullanılan SV16 mineralinin yüksek boy:çap oranı bu etkinin temel sebebi olarak düşünülmektedir (Norman ve Beaudoin, 1993). Ayrıca SV%9\_Ç-UK karışımının kırılma tokluğu değeri de SV%0 karışımından oldukça düşüktür. Bununla birlikte SV%12\_Ç-UK karışımının kırılma tokluğu değeri kontrolden yüksek olmasına rağmen kontrole oldukça yakındır.

IV nolu grupta daha düşük boy:çap oranıyla üretilen SV28 mineralinin ECC'nin kırılma tokluğuna olan etkisi incelenmiş, ayrıca vollastonitin farklı boy:çap oranının kırılma tokluğuna olan etkisi III ve IV nolu karışımlar yardımıyla belirlenmiştir. IV nolu karışım grubunda da III nolu karışım grubuna paralel olarak artan vollastonitin (SV28) %6 içeriğine kadar iğnemesi parçacık morfolojisi sayesinde kırılma tokluğunu 7 ve 28 günde azaltmış, %9 içeriğinde ise kırılma tokluğunu artırmasına rağmen kontrolden daha düşük değer almıştır. Ayrıca, III ve IV nolu karışım grupları incelendiğinde daha yüksek boy:çap oranına sahip iğnemesi parçacık yapısıyla SV 16 vollastonitin kullanıldığı III nolu karışımların aynı vollastonit içeriği için IV nolu karışımlardan daha düşük kırılma tokluğu değerlerine sahip olduğu görülmektedir.

Artan UK ve azalan çimento içeriğinde (UK/çimento = 2,20) vollastonitin etkisini belirlemek amacıyla üretilen V nolu grupta, III nolu gruba benzer olarak artan SV 16 içeriğinin yüksek boy:çap oranına sahip iğnemesi parçacık yapısı sayesinde hem 7 hem

de 28 günde ECC matrisinin kırılma tokluğunu azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca Çizelge 4.2'den görüldüğü üzere, V nolu grubun karışımları aynı vollastonit içeriği için UK/çimento oranı 1,20 olan III nolu karışımlara göre daha düşük kırılma tokluğu değerlerine sahiptir. Bu nedenle, artan UK/çimento oranının matrisin tokluğunu azalttığı söylenebilir. Buna benzer olarak artan UK/çimento oranının sünekliği iyileştirmesinin yanı sıra matrisin tokluğunu azalttığını belirtmişlerdir (Şahmaran vd., 2012).

III nolu gruba göre, daha yüksek agrega tane büyüklüğünde, vollastonit mineralinin etkisinin araştırıldığı VI nolu karışım gruplarında III nolu karışım gruplarına benzer sonuçlar elde edilmiş olup, %6 SV16 içeriğine kadar matrisin tokluğu 7 ve 28 günde azalmıştır. Agrega tane büyüklüğünün ECC matrisine olan etkisini değerlendirmek için III ve VI nolu gruplar karşılaştırıldığında agrega tane boyutunun artmasının kırılma tokluğunun artmasına sebep olduğu bulunmuştur. Çatlak ucundaki agregaların çatlak ilerlemesini engellemesi, çatlağın agregalara rasgelerek yön değiştirmesi, agregaların birbirlerine sürtünerek çatlağın ilerlemesini engellemesi, agregaların çatlağın bir tarafından diğer tarafına yük aktarımında bulunması, çatlak ucuna rasgelen boşlukların çatlak ucu keskinliğini azaltması veya çatlağın dallanmasına neden olması gibi mekanizmalar betonda tokluk artışına neden olur (Akkaya vd., 2003). Bu nedenle, artan agrega tane büyüklüğünün kırılma tokluğu değerini arttırdığı sonucuna varılabilir (Özkan, 2017).

**Çizelge 4.2.** ECC matrislerinin kırılma tokluğu test sonuçları

Grup No	Karışımlar	7. Gün	28. Gün	
Kontrol (Grup I, II, III ve IV için)	SV%0-SV 28%0	0.476	0.555	
	I	SV%3_Ç	0.394	0.510
		SV%6_Ç	0.368	0.492
		SV%9_Ç	0.341	0.481
		SV%12_Ç	0.330	0.469
II	SV%3_UK	0.400	0.522	
	SV%6_UK	0.380	0.499	
	SV%9_UK	0.491	0.562	
	SV%12_UK	0.520	0.585	
III	SV%3_Ç-UK	0.388	0.501	
	SV%6_Ç-UK	0.333	0.480	
	SV%9_Ç-UK	0.354	0.500	
	SV%12_Ç-UK	0.486	0.567	
IV	SV 28%3_Ç-UK	0.397	0.516	
	SV 28%6_Ç-UK	0.356	0.505	
	SV 28%9_Ç-UK	0.390	0.510	
V	2.2_SV%0	0.359	0.386	
	2.2_SV%3_Ç-UK	0.334	0.369	
	2.2_SV%6_Ç-UK	0.303	0.354	
	2.2_SV%9_Ç-UK	0.323	0.371	
VI	1000_SV%0	0.485	0.638	
	1000_SV%3_Ç-UK	0.430	0.611	
	1000_SV%6_Ç-UK	0.422	0.596	
	1000_SV%9_Ç-UK	0.455	0.631	

#### 4.4.4 Eğilme performansı sonuçları

I, II, III, IV, V ve VI nolu gruplara ait 7 ve 28 günlük eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim değerleri Çizelge 4.3’de gösterilmiştir. Ayrıca I, II, III, IV, V ve VI nolu grupların grafikleri sırasıyla, Şekil 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 ve 4.12’de verilmiştir. Farklı ECC karışımlarının test sonuçları arasındaki karşılaştırmayı kolaylaştırmak için, bu şekillerde her iki eksen için aynı ölçekler kullanılmıştır. Çizelge 4.3’den ve Şekil 4.7’den görüldüğü gibi, I nolu karışım gruplarında artan SV16 içeriğine bağlı olarak, SV%3\_Ç, SV%6\_Ç, SV%9\_Ç ve SV%12\_Ç karışımlarının eğilme dayanımları kontrol karışımından 7. günde %4.0, %3.8, %2.0 ve %0.5 daha yüksek çıkmıştır. SV%3\_Ç ve SV%6\_Ç karışımlarının 28. gündeki eğilme dayanımı ise kontrol karışımından sırasıyla, %1.8 ve %0.5 oranlarında daha yüksektir. SV%9\_Ç ve SV%12\_Ç karışımlarının 28. gündeki eğilme dayanımları ise kontrol karışımından daha düşük bulunmuştur. 7 ve 28.

gündeki bu verilere göre, ECC karışımlarının eğilme dayanımı SV16 kullanım yüzdesi arttıkça azalmıştır. SV%3\_Ç (7 ve 28. gün), SV%6\_Ç (7 ve 28. gün), SV%9\_Ç (7. gün) ve SV%12\_Ç (7. gün) karışımlarının eğilme dayanımları basınç dayanımlarının aksine çok az da olsa kontrolden daha yüksek elde edilmiştir. Hughes (1981), gevrek bir malzeme olan betonu düktil bir hale getirmek için kullanılan liflerin, absorblanabilen enerji miktarını arttırdığını ve çatlak genişliğini kontrol altına aldığını, basınç dayanımına nazaran eğilme dayanımında daha büyük bir artış olduğunu vurgulamıştır. Ayrıca, SV16 mineralinin iğnemsiz parçacık yapısından dolayı bir lif gibi davranarak eğilme dayanımı gelişimine katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu nedenle, I nolu karışımların basınç dayanımı kontrolden daha düşük olmasına rağmen, eğilme dayanımları nispeten kontrolden yüksek çıkmıştır. Şekil 4.7'den ve Çizelge 4.3'ten görüldüğü üzere artan SV16 içeriği I nolu karışımların sehim değerlerini önemli derecede arttırmıştır. SV%3\_Ç, SV%6\_Ç, SV%9\_Ç ve SV%12\_Ç karışımlarının sehim değerleri kontrole göre 7 günde %19.0, %37.1, %50.5 ve %73.3 oranlarında ve 28. günde %11.7, %20.2, %22.6 ve %31.9 oranlarında artmıştır. Sehim değerlerindeki bu önemli artış, vollastonit mineralinin iğnemsiz (lifli) yapısı ve yüksek elastisite modülü (200 GPa) ile açıklanabilir (Mathur vd., 2007; Kalla vd., 2015; Mathur vd., 2007). Ayrıca bu çalışmada kullanılan SV16 mineralinin doğal vollastonite göre çok daha yüksek boy:çap oranına (maksimum 44:1) sahip olması mineralin tıpkı bir lif gibi davranmasını sağlamış ve bundan dolayı önemli süneklik artışına ulaşmıştır.

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.8'den görüldüğü üzere, II nolu ECC karışım gruplarının eğilme dayanımları basınç dayanımlarına benzer olarak hem 7 hem de 28 günde %6 SV16 içeriğine kadar artmış daha sonra azalmıştır. Bununla birlikte, SV%9\_UK karışımının hem 7 hem de 28 gündeki, SV%12\_UK karışımının ise 7 gündeki eğilme dayanımı SV%0-SV 28%0'dan daha yüksek çıkmıştır. SV%3\_UK, SV%6\_UK, SV%9\_UK ve SV%12\_UK karışımlarının kontrol karışımına göre, sırasıyla 7 gündeki eğilme dayanımları %5.3, %11.4, %6.4 ve %5.4 oranlarında ve 28 gündeki eğilme dayanımları %3.3, %8.4, %1.0 ve %0.6 oranlarında artmıştır. Bu karışımların 7 ve 28 gündeki sehim değerleri ise %6 SV16 içeriğinden sonra kontrolün altına düşmüştür. SV%3\_UK ve SV%6\_UK karışımlarının sehim değerleri kontrol karışımından sırasıyla, 7. gün için %14.3 ve %23.8 ve 28. gün için %7.0 ve %16.4 daha yüksektir. Ancak, SV%9\_UK ve SV%12\_UK karışımlarının sehim değerleri kontrol karışımına oranla 7. günde %0.4 ve %8.0 ve 28. günde %1.5 ve %11.1 daha düşüktür. % 9 SV 16 içeriğindeki süneklik

kaybı hem 7 hem de 28 gün için önemsiz denecek kadar azdır. Ancak, UK yerine SV kullanılması %9 SV16 içeriğinden sonra belli bir miktar süneklik kaybına yol açmaktadır. Sehim değerinde %9'dan sonra meydana gelen bu azalma, UK yerine kullanılan vollastonit konsantrasyonunun %12'ye kadar yükselmesi sonucunda SV16 mineralinin, matristeki bağı zayıflatması ile açıklanabilir (Wahab vd., 2017). Ayrıca, çimentonun UK'ya oranla daha rijit bir malzeme oluşturması nedeniyle çimento yerine SV16 kullanımı, UK yerine SV16 kullanımına göre daha yüksek süneklikte bir ECC elde edilmesini sağlamıştır (Şahmaran vd., 2012).

Çizelge 4.3 ve Şekil 4.9'da verilenlere göre, III nolu ECC karışım gruplarının eğilme dayanımları, hem 7. hem de 28. günde basınç dayanımlarına paralel olarak %6 SV16 içeriğine kadar artmış daha sonra azalmaya başlamış, ancak kontrolden daha yüksek çıkmıştır. SV%3\_UK, SV%6\_UK, SV%9\_UK ve SV%12\_UK karışımlarının eğilme dayanımları kontrol karışımına oranla sırasıyla, 7. günde %6.6, %12.0, %11.4 ve %10.3 oranlarında ve 28. günde %3.7, %8.2, %2.9 ve %1.7 oranlarında artmıştır. Çizelge 4.3 ve yüzde artış değerlerinden de anlaşılacağı üzere en yüksek eğilme dayanımı değerlerine (SV%6\_Ç-UK 28. gün hariç) III nolu karışımlar ulaşmıştır. Basınç dayanımında II nolu karışımların en yüksek değerleri vermesi ancak, eğilme dayanımında en yüksek değerlere III nolu karışımlarda ulaşılması şu şekilde açıklanabilir. III nolu karışımlarda UK/çimento oranı (1,20) kontrole eşit olduğu için SV16 mineralinin iğnemsiz parçacık yapısının, eğilmede-çekme deneyinde II nolu karışımlara göre daha belirgin bir etki oluşturduğu düşünülmektedir. Bunun için, yükleme sonrası ECC matrisinin çatlaması ve SV16 içeriğine bağlı olarak kırılmış yüzeyde meydana gelen değişimler incelendiğinde, SV16 ile güçlendirilmiş ECC matrisinin (UK/çimento =1,20) eğilme dayanımı ve sünekliği artmıştır (Mathur vd., 2007). SV%3\_UK, SV%6\_UK ve SV%9\_UK karışımlarının sehimi ise kontrol karışımına göre, sırasıyla, 7. günde %28.6, %56.2 ve %44.8 oranlarında ve 28. günde %18.1, %25.5 ve %20.2 oranlarında artmıştır. SV%12\_UK karışımının sehimi ise 7. ve 28. günde sırasıyla, %1.9 ve %9.6 oranlarında azalmıştır. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere I, II ve III nolu gruplar için özellikle %3 ve %6 SV içeriklerinde en yüksek sehim III nolu karışımlardan elde edilmiştir.

IV nolu grupta daha düşük boy:çap oranıyla (maksimum 30:1) SV28 vollastoniti, III nolu grupta olduğu gibi UK/çimento oranı 1,20 olacak şekilde çimento+uçucu kül

yerine maksimum sünekliğin %6 SV16 içeriğinde olduğu düşünülerek %3, %6 ve %9 oranlarında kullanılmıştır. IV nolu grubun verileri Çizelge 4.3 ve Şekil 4.10'da sunulmuştur. SV 28%3\_Ç-UK, SV 28%6\_Ç-UK ve SV 28%9\_Ç-UK karışımlarının eğilme dayanımları SV%0-SV 28%0 karışımına göre sırasıyla, 7 günde %2.0, %3.5 ve %2.5 oranlarında ve 28 günde %2.3, %3.5 ve %2.5 oranlarında artış göstermiştir. Yine aynı karışımların kontrol karışımına göre orta noktadaki sehim değerleri sırasıyla, 7. günde %16.2, %42.9 ve %27.8 oranlarında ve 28 günde %8.9, %15.5 ve %11.9 oranlarında artmıştır. Bu verilere göre III nolu gruba benzer olarak vollastonit artışı %6 SV içeriğine kadar 7 ve 28 günde eğilme dayanımını ve orta noktadaki sehim değerini arttırmış, %9 SV içeriğinde ise azaltmasına rağmen kontrolden daha yüksek değerler elde edilmiştir. Low and Beaudoin (1994) çimento-silis dumanı matrisine hacimsel olarak %2-15 oranlarında vollastonit eklenmesi sonucunda artan vollastonit dozajının eğilme dayanımı ve sünekliği önemli derecede artırdığını rapor etmişlerdir. Bunun yanı sıra III ve IV nolu karışım grupları kıyaslandığında, SV16 vollastonitine göre daha düşük boy:çap oranına sahip olan SV28 vollastonitiyle tasarlanan IV nolu karışım gruplarının aynı vollastonit içerikleri için hem değerler bazında hem de kontrole göre verilen yüzde değişimleri bazında III nolu karışım grubuna göre daha düşük eğilme dayanımına ve sünekliğe sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bilindiği üzere lif takviyesinin verimliliği boy:çap oranına, lifin hacimsel kullanım oranına ve liflerin matrisle bağ dayanımına bağlıdır (Dey vd., 2015; Nikonova vd., 2003). Bu nedenle yüksek boy:çap oranı sayesinde sahip olduğu yüksek iğnemsilik ile SV28 minerali ECC karışımlarının eğilme dayanımını ve sünekliğini 7 ve 28 günde arttırmış, ancak daha yüksek boy:çap oranıyla daha yüksek iğnemsiliğe sahip olan SV16 mineralinin ECC karışımlarının eğilme dayanımını ve sünekliğini hem 7 hem de 28 günde SV28'e göre daha yüksek oranda arttırmıştır. Bu bulgulara benzer olarak Norman ve Beaudoin (1993) Portland çimentosu esaslı bağlayıcıların güçlendirilmesi üzerine vollastonitin boy:çap oranının etkisini araştırdıkları çalışmalarında, daha büyük boy:çap oranına sahip olan vollastonit mikro fiberlerle takviye edilen çimento esaslı bağlayıcıların, daha küçük fiber boyutlarıyla hazırlanan benzer bağlayıcılardan daha yüksek süneklik sağladığını belirtmişlerdir.

V nolu grupta artan UK/çimento oranında SV16'nın etkisi ve III nolu gruba göre aynı vollastonit içeriklerinde meydana gelen değişim araştırılmış olup, bu gruba ait veriler Çizelge 4.3 ve Şekil 4.11'de sunulmuştur. 2.2\_SV%3\_Ç-UK, 2.2\_SV%6\_Ç-UK ve

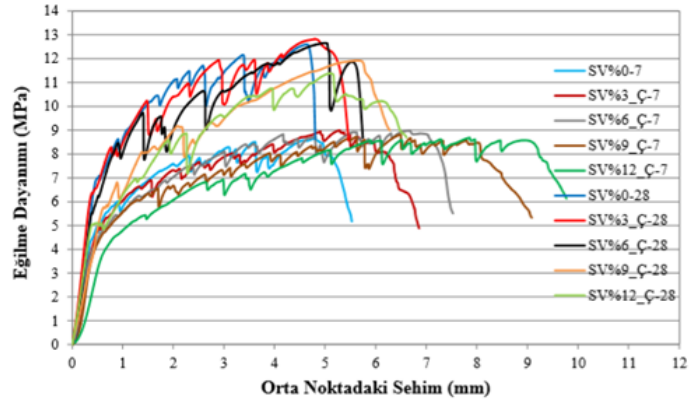
2.2\_SV%9\_Ç-UK karışımlarının eğilme dayanımları 2.2\_SV%0 karışımına göre sırasıyla 7 günde %1.3, %2.1 ve %0.6 oranlarında 28 günde ise %1.8, %6.2 ve %0.9 oranlarında artmış orta noktadaki sehim değerleri ise sırasıyla, 7 günde %9.4, %21,6 ve %16.5, 28 günde ise %7.9, %14.9 ve %8.6 oranlarında artmıştır. Ancak süneklik için belirlenen bu yüzde artışları III nolu karışımların aynı vollastonit içerikleri için belirlenen yüzde artışlarından çok daha düşüktür. Bu durumun V nolu karışımlarda kullanılan UK/çimento oranının III nolu karışımlarda kullanılan UK/çimento oranından yaklaşık 2 kat daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Önceki bölümlerde de açıklandığı gibi UK/çimento oranı aynı kalacak şekilde III ve V nolu karışımlardan çimento+uçucu kül azaltıldığı için V nolu karışımlarda azaltılan uçucu kül içeriği III nolu karışımlardan daha çok olmuştur. Uçucu külün sahip olduğu yüksek çekme kapasitesi nedeniyle uçucu kül oranının V nolu grupta daha fazla azaltılması süneklik değerlerinin yüzde artışının düşmesine sebep olmuştur (Şahmaran vd., 2012). Çizelge 4.3, Şekil 4.9 ve Şekil 4.11'den görüldüğü üzere, III ve V nolu gruplar aynı vollastonit içeriği için kendi aralarında kıyaslandığında, eğilme dayanımı açısından daha fazla çimento içeriğine sahip olan III nolu gruptaki karışımların, süneklik açısından ise yüksek uçucu kül içeriği sayesinde V nolu gruptaki karışımların daha yüksek performans sergilediği gözlemlenmiştir. UK kullanım oranının artmasıyla kompozitin eğilme dayanımının azalmasının ve sünekliğinin iyileşmesinin nedenleri; uçucu kül içeriğinin artmasıyla lif ve matris ara yüzeyindeki kimyasal bağın ve matrisin tokluğunun azalması ve çok düşük seviyelerde olan kimyasal bağın kopmasından sonra lif ve matris arasındaki ara yüz sürtünme bağının artması olarak açıklanabilir (Şahmaran ve Yücel, 2012).

VI nolu grupta artan agrega ortalama tane boyutunda SV16 vollastonitin etkisi ve III nolu gruba göre aynı vollastonit içeriklerinde meydana gelen değişim incelenmiş, bu gruba ait deney sonuçları Çizelge 4.3 ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir. 1000\_SV%3\_Ç-UK, 1000\_SV%6\_Ç-UK ve 1000\_SV%9\_Ç-UK karışımlarının eğilme dayanımları 1000\_SV%0 karışımına göre sırasıyla 7 günde %2.7, %6.9 ve %1.7 oranlarında 28 günde ise %1.9, %2.6 ve %1.3 oranlarında artmış, sehim değerleri ise sırasıyla, 7 günde %7.3, %11.0 ve %5.7 günde ise %4.0, %8.3 ve %1.6 oranlarında artmıştır. Ancak bu yüzde artışlar hem eğilme dayanımı hem de süneklik için aynı vollastonit içerikleri karşılaştırıldığında, daha ince agrega tane boyutuyla üretilen III nolu karışımlara göre oldukça düşüktür. Bu durum, vollastonitin matris içerisinde lif gibi davranarak sağladığı

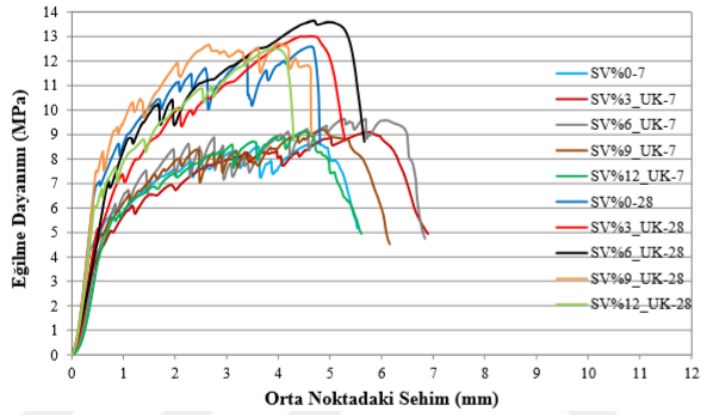
köprüleme özelliğini (Dey vd., 2015), daha ince agrega tane boyutuyla üretilen karışımlarda kompozitin daha kompakt yapısı sayesinde daha yüksek derecelere çıkardığı şeklinde açıklanabilir. Bu nedenle, SV16 vollastonitinin daha ince agrega tane boyutuna sahip olan III nolu grubun karışımlarından daha yüksek eğilme performansı sergilediği söylenebilir. Ayrıca, III ve V nolu gruplar aynı vollastonit içerikleri için karşılaştırıldığında daha büyük agrega tane boyutuna sahip olan V nolu grup karışımlarının sünekliliğinin azalması, özellikle büyük tane boyutunun artması ile kırılma yolunun dolambaçlılığının artması nedeniyle matris kırılma tokluğunun artmasına ve tam olarak düzenli lif dağılımının sağlanamamasına bağlanabilir (Şahmaran ve Yücel, 2012).

**Çizelge 4.3.** ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehim değerleri

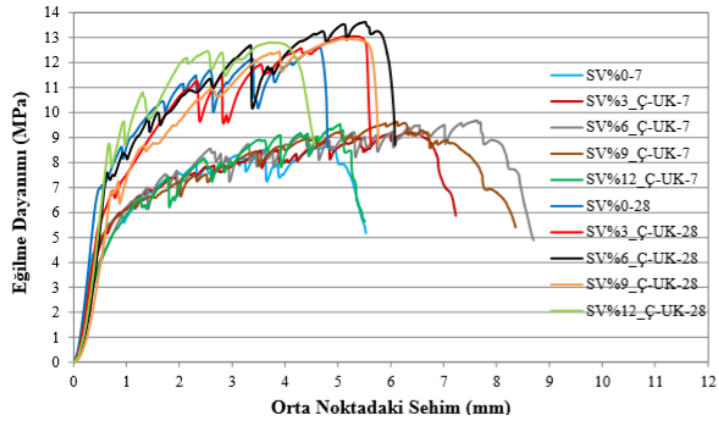
Grup No	Karışımlar	7. Gün		28. Gün	
		Orta Noktadaki Sehim (mm)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Orta Noktadaki Sehim (mm)	Eğilme Dayanımı (MPa)
<b>Kontrol (Grup I, II, III ve IV için)</b>	<b>SV%0-SV 28%0</b>	5.25	8.65	4.70	12.60
<b>I</b>	SV%3_Ç	6.25	9	5.25	12.83
	SV%6_Ç	7.2	8.98	5.65	12.66
	SV%9_Ç	7.9	8.82	5.76	11.93
	SV%12_Ç	9.1	8.69	6.20	11.39
<b>II</b>	SV%3_UK	6	9.11	5.03	13.02
	SV%6_UK	6.5	9.64	5.47	13.66
	SV%9_UK	5.23	9.2	4.63	12.72
	SV%12_UK	4.83	9.12	4.18	12.52
<b>III</b>	SV%3_Ç-UK	6.75	9.22	5.55	13.07
	SV%6_Ç-UK	8.2	9.69	5.90	13.63
	SV%9_Ç-UK	7.6	9.64	5.65	12.97
	SV%12_Ç-UK	5.15	9.54	4.25	12.81
<b>IV</b>	SV 28%3_Ç-UK	6.10	8.82	5.12	12.89
	SV 28%6_Ç-UK	7.50	8.95	5.43	13.25
	SV 28%9_Ç-UK	6.71	8.87	5.26	12.92
<b>V</b>	2.2_SV%0	6.95	7.10	5.71	9.92
	2.2_SV%3_Ç-UK	7.60	7.19	6.16	10.10
	2.2_SV%6_Ç-UK	8.45	7.25	6.56	10.54
	2.2_SV%9_Ç-UK	8.10	7.14	6.20	10.01
<b>VI</b>	1000_SV%0	5.10	7.80	4.45	11.50
	1000_SV%3_Ç-UK	5.47	8.01	4.63	11.72
	1000_SV%6_Ç-UK	5.66	8.34	4.82	11.80
	1000_SV%9_Ç-UK	5.39	7.93	4.52	11.65



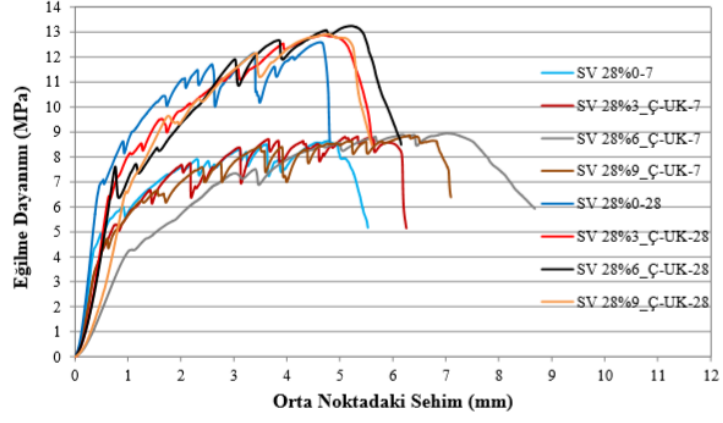
Şekil 4.7. I nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım eğrileri



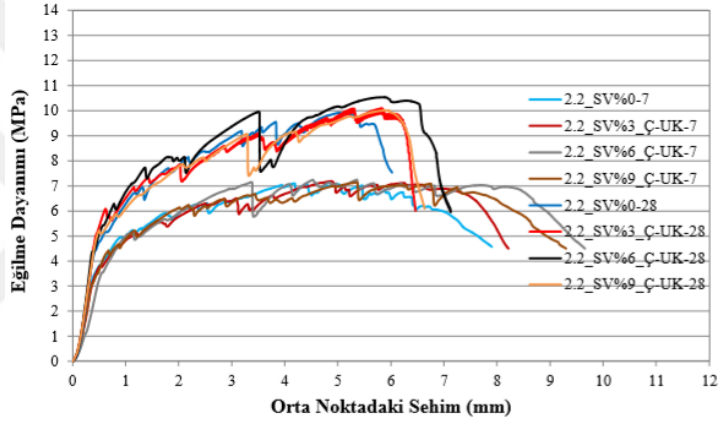
Şekil 4.8. II nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım eğrileri



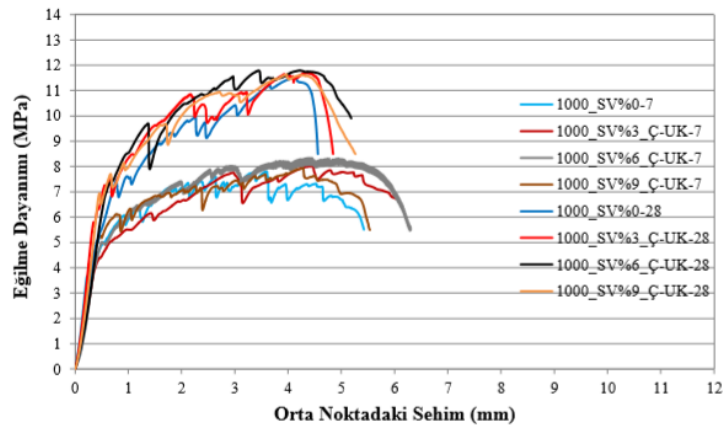
Şekil 4.9. III nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım eğrileri



Şekil 4.10. IV nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım eğrileri



Şekil 4.11. V nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım eğrileri



Şekil 4.12. VI nolu ECC karışımlarının eğilme dayanımı ve orta noktadaki sehım eğrileri

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Bu tez çalışması kapsamında sentetik vollastonit mineralinin üretimi ve bu mineralin ECC karışımlarının mekanik özellikleri üzerine olan etkilerinin sonuçları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur.

- Endüstriyel alan için önem arz eden vollastonit mineralinin ülkemizde yüksek boy:çap oranında sentetik olarak üretimi mevcut olmadığından, bu tez çalışmasında maksimum boy:çap oranı 44:1 olarak üretilen sentetik vollastonit ülkemiz ve endüstriyel alan için önem arz etmektedir.
- Doğal hammaddelerin kullanılmasıyla üretilen SV'lerde, farklı tane boyutları, farklı sentezleme saatleri ve farklı sinterleme sıcaklıkları ile oluşturulan kombinasyonların sonucu olarak toplam 36 adet SV mineralinin üretimi sağlanmıştır. Elde edilen bu vollastonitler incelendiğinde, en yüksek boy:çap oranına (44:1) sahip olan sentetik vollastonitin (SV16), sönmemiş kireç (CaO-2) ve silis tozu (Q-1) ile elde edilen karışımın 48 saat boyunca 200 °C'de sentezleme ve 1 saat boyunca 1000 °C'de sinterlenmesiyle üretildiği belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, üretimi sağlanan en yüksek ikinci boy:çap (30:1) oranına sahip sentetik vollastonit (SV 28) ise aynı hammaddelerle elde edilen karışımın 72 saat boyunca 200 °C'de sentezleme ve 1 saat boyunca 1000 °C'de sinterlenmesiyle üretildiği belirlenmiştir.
- Atık hammaddelerin kullanılarak üretildiği SV'ler incelendiğinde, istenilen iğnemsiz parçacık yapısının elde edilemediği görülmüştür. Fakat, sinterlenmiş mermer tozu ve silis dumanı kombinasyonundan elde edilen SV'de kısmen iğnemsiz parçacıklara rastlanıldığından dolayı, bu kombinasyon yüksek boy:çap oranlı SV'nin üretilebilmesi açısından oldukça ümit verici olduğu düşünülmektedir.
- Puzolanik aktivite deneyine tabi tutulan SV 16- SV 28 minerallerinin, yayılma çapı sonuçları değerlendirildiğinde, vollastonit mineralinin çimento esaslı kompozitlerin yayılmasını azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, bu durumun artan boy:çap oranı ile orantılı bir şekilde olduğu görülmüştür.
- Puzolanik aktivite deneyine tabi tutulan SV 16-28 minerallerinin aktivite indeks

sonuçları değerlendirildiğinde, Grup I karışımından SV 16 ve SV 28 karışımlarının 7 ve 28 gün sonunda sırasıyla %57.61-%54.23 ve %50.52-%46.05 değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Grup II karışımlarında ise, SV 16/SA ve SV 28/SA karışımlarının 7 ve 28 gün sonunda sırasıyla %91.73-%80.68 ve %93.18-%79.09 değerlerine sahip olduğu görülmüştür. Bu sonuçlar incelendiğinde, Grup I karışımlarının s/b oranının artmasından dolayı, ASTM C 618 standart aktivite indeks değerini (7 ve 28 gün için min %75) sağlamadığı belirlenmiştir. Herhangi bir standart doğrultusunda üretilmeyen Grup II karışımları ise ASTM C 618' in sınır değerlerini karşıladığı belirlenmiştir. Buna göre, vollastonit mineralinin SA ile kullanımının daha olumlu olabileceği görülmektedir.

- Kontrol, I, II ve III nolu ECC karışımlarının basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, I nolu karışım grubundaki basınç dayanımı değerleri lifli ve lifsiz karışımlar için hem 7 hem de 28 gün sonunda düzenli olarak azaldığı belirlenmiştir. Bu durum oluşmasındaki temel neden ise, artan SV 16 içeriği ve bununla birlikte azalan çimento içeriğine bağlı olarak, hem vollastonitin inert yapısı hem de artan UK/Ç oranından dolayı UK mineralinin bir kısmının reaksiyonda yer almaması bu dayanım kaybının temel nedenleri olarak düşünülmektedir. II nolu karışım gruplarında artan SV 16 içeriğine bağlı olarak lifli ve lifsiz ECC'lerin basınç dayanımı değerleri, 7. ve 28. günde %6 SV 16 içeriğine kadar artmış daha sonra azalmaya başlamış ancak yine de SV%9\_UK ve SV%12\_UK karışımlarının basınç dayanımları kontrolden daha yüksek çıktığı görülmüştür. UK yerine kullanılan vollastonit mineralinin ECC karışımlarının 7 günlük basınç dayanımına olan geliştirici etkisi mineralin lifli yapısı (iğnemsiz parçacık morfolojisi) ile açıklanabilir. Böylece mikro çatlaklar arasında bağ kurma özelliğine sahip olan vollastonit mikro fiberlerin, ara yüzeydeki mikro fiber/matris bağ dayanımını artırdığı söylenebilir.

III nolu karışım gruplarında, II nolu karışım gruplarına benzer olarak ECC'deki artan SV 16 oranı, lifli ve lifsiz ECC'lerin basınç dayanımı değerlerini %6 SV 16 içeriğine kadar artırmış, bu değerden sonra azaltmaya başlamasına rağmen, SV%0'a göre daha yüksek basınç dayanımı sağlamıştır. Kontrol ve I nolu karışım gruplarından yüksek çıkan III nolu karışım grubu, II nolu karışım grubundan düşük çıkmıştır. Bunun nedeni, azalan çimento içeriği ile açıklanabilir. Ayrıca, III nolu grupta elde edilen yüksek dayanımın nedeni ise,

UK'nin hidrasyonu sonucu oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyonu sağlanmış ve azalan UK yerine SV 16'nın kullanılması mikro fiber/matris bağ dayanımını arttırmasıyla açıklanabilir.

- I, II ve III nolu ECC karışımlarında SV%6 kullanımından sonra elde edilen basınç dayanımı değerleri, SV%9 ve SV%12 karışımlarında azalma gösterdiğinden dolayı IV, V ve VI nolu ECC karışımlarında SV%3, SV%6 ve SV%9 oranları kullanılmıştır. IV, V ve VI nolu ECC karışımlarının basınç dayanımı sonuçları değerlendirildiğinde, IV nolu karışım grubunda SV 28 minerali UKimento oranı 1,20 olacak şekilde imento+UK yerine kullanılmıştır. Bu karışım grubundan elde edilen sonuçlar III nolu karışımlara benzer olarak IV nolu karışımlar da kontrol karışımından daha yüksek sonuçlar vermiştir. Bu durum, sabit olan UKimento oranı (1.20) sayesinde hem UK'nin hidrasyonu sonucu oluşan  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyonu kontrol karışımıyla benzer şekilde sağlaması hem de azalan UK yerine SV 28 kullanımının mikro fiber/matris bağ dayanımını arttırması ile açıklanabilir. V nolu karışım grubunda ise, UKimento oranının 2.2 olması ve SV 16 mineralinin kullanılmasının bir sonucu olarak en yüksek basınç dayanımı değerleri III nolu gruba paralel olarak %6 SV 16 içeren karışımdan elde edilmiştir. Bu durum, artan SV içeriğinin %6 oranına kadar mikro fiber/matris bağ dayanımını arttırması, bu orandan sonra matrisi olumsuz etkilemesine rağmen kontrol karışımından daha yüksek basınç dayanımı vermesi ile açıklanabilir. VI nolu karışım grubunda, tane boyutu 0-1000  $\mu\text{m}$  olan silis kumu kullanılmış olup, SV 16 minerali UKimento oranı 1,20 olacak şekilde ikame edilmiştir. Bunun sonucunda en yüksek basınç dayanımının 7 ve 28 gün sonunda %6 SV 16 kullanımına kadar olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni olarak ise, silis kumunun sahip olduğu tane büyüklüğü ile açıklanabilir. Bilindiği gibi kullanılan agreganın inceliği arttıca daha kompakt ve sıkı bir iç yapı elde edilmektedir.
- ECC karışımlarının elastisite modülü değerleri incelendiğinde, karışım gruplarının sahip olduğu basınç dayanımı değerlerinin elastisite modülü değerleri ile paralellik gösterdiği belirlenmiştir. I nolu karışım grubunun elastisite modülü değerleri, kontrol karışımının elastisite modülü değerlerinden düşük olduğu görülmektedir. Bunun temel nedeni ise, azalan imento oranının bir sonucu olarak düşünülebilir. II, III ve V nolu karışım gruplarında ise, UK yerine SV 16'nın kullanılmasının ECC'nin elastisite modülünü arttırdığı ve bu artışın %6

SV 16 içeriğine kadar devam ettiği belirlenmiştir. Yüksek elastisite modülüne sahip olan SV 16 vollastonitinin çok yüksek boy:çap oranı sayesinde sahip olduğu mükemmel iğnemsiz parçacık morfolojisi ile dayanıma etkisini özellikle daha geç yaşlarda gösteren UK yerine kullanımının ECC'nin elastisite modülünü artırdığı düşünülmektedir. IV nolu karışım grubunda ise, elde edilen elastisite modülü değerlerinin %6 SV 28 kullanımında en yüksek değere ulaştığı ve daha sonra azaldığı belirlenmiştir. SV 16 kullanımına bağlı olarak elde edilen değerlerden daha düşük değerlerin elde edilmesinin nedeni ise, boy:çap oranı arttıkça vollastonitin artan iğnemselliği sayesinde açıklanabilir. VI nolu grup karışımında kullanılan ve tane boyutu 0-1000 µm olan silis kumu elastisite modülünü azalttığı söylenebilir.

- ECC karışımlarının kırılma tokluğu değerleri incelendiğinde, I nolu karışımların kırılma tokluğunun 7 ve 28 günde kontrol karışımından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni, SV 16 minerali çimento yerine kullanıldığı için azalan çimento oranıyla birlikte azalan hidrasyon ürünleri sebebiyle ECC matrisinin rijitliğinin azalması ile açıklanabilir. II nolu ECC karışımlarının kırılma tokluğu değerleri ise %6 SV 16 içeriğine kadar 7 ve 28 günde azalmış ancak bu değerden sonra kontrol karışımından daha yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni, UK içeriğinin azaltılması sonucu UK mineralinin, matrisin C-S-H jeline olan katkısının azaltılması olarak düşünülebilir. III nolu karışım grubunda da I ve II nolu karışım gruplarında gözlemlenen durumlar vardır. Ancak, bu karışım grubunda elde edilen değerleri diğerlerine göre oldukça düşüktür. Bu durum UK/çimento oranının (1,20) kontrolle eşit tutulması sonucu hidrasyon ürünlerinin oluşan miktarının kontrole benzer olmasının yanı sıra artan SV 16 minerali ile sağlanan lif etkisi ile de açıklanabilir. IV nolu karışım grubunda elde edilen değerler ise III nolu karışıma paralellik göstermektedir. Artan UK ve azalan çimento içeriğinde (UK/çimento = 2,20) vollastonitin etkisini belirlemek amacıyla üretilen V nolu grupta, III nolu gruba benzer olarak artan SV 16 içeriğinin yüksek boy:çap oranına sahip iğnemsiz parçacık yapısı sayesinde hem 7 hem de 28 günde ECC matrisinin kırılma tokluğunu azalttığı sonucuna ulaşılmıştır. III nolu gruba göre, daha yüksek agrega tane büyüklüğünde, vollastonit mineralinin etkisinin araştırıldığı VI nolu karışım gruplarında III nolu karışım gruplarına benzer sonuçlar elde edilmiş olup, %6 SV 16 içeriğine kadar matrisin tokluğu 7 ve 28 günde azalmıştır. Bunun nedeni ise, karışımda

kullanılan agrega tane boyutunun artmasının kırılma tokluğunun artmasına sebep olmasıdır.

- ECC karışımlarının eğilme performansları değerlendirildiğinde, I nolu karışım grubunun eğilme değerleri 7. günde kontrol karışımına göre yüksek çıkarken, 28. günde bu değerler SV%3 ve SV%6'lık karışımlarda artmış SV%9 ve SV%12'de ise azalmıştır. ECC karışımlarının eğilme dayanımı SV 16 kullanım yüzdesi arttıkça azalmıştır. SV 16 mineralinin iğnemsiz parçacık yapısından dolayı bir lif gibi davranarak uygun değer yüzdeye kadar (%6) eğilme dayanımı gelişimine katkı sağladığı düşünülmektedir. II nolu ECC karışım gruplarının eğilme dayanımları, basınç dayanımlarına benzer olarak hem 7 hem de 28 günde %6 SV 16 içeriğine kadar artmış daha sonra azalmıştır. Eğilme performansı değerinde %9'dan sonra meydana gelen bu azalma, UK yerine kullanılan vollastonit içeriğinin %12'ye kadar yükselmesi sonucunda SV 16 mineralinin, matristeki bağı zayıflatması ile açıklanabilir. III nolu ECC karışım gruplarının eğilme performansı, II nolu karışım grubundaki ile benzerlik göstermektedir fakat bütün karışımlar kontrol değerlerinden yüksektir. Bu durum, kontrol karışımındaki UK/çimento oranının (1.20) III nolu grupta da aynı olduğundan, SV 16'nın iğnemsiz parçacık yapısının eğilme performansına etkisinin II nolu karışımlara göre daha belirgin bir etki oluşturması ile açıklanabilir. IV nolu grupta daha düşük boy:çap oranına sahip olan SV 28 minerali kullanılmış ve bunun sonucunda III nolu karışım grubunda elde edilen benzer eğilme performans değerlerinin olduğu görülmüştür. Ancak, III nolu karışım grubu IV nolu karışıma göre daha iyi sonuç vermiştir. Bundaki temel neden ise, lif takviyesinin verimliliği boy:çap oranına, lifin hacimsel kullanım oranına ve liflerin matrisle bağ dayanımına bağlı olduğu düşünülmektedir. V nolu grupta ise artan UK/çimento oranında SV 16 vollastonitinin etkisi incelendiğinde, III nolu karışıma paralel fakat eğilme dayanımlarında daha düşük değerlerin elde edildiği belirlenmiştir. Bu durumun V nolu karışımlarda kullanılan UK/çimento oranının III nolu karışımlarda kullanılan UK/çimento oranından yaklaşık 2 kat daha fazla olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. VI nolu karışım grubu incelendiğinde ise, artan agrega ortalama tane boyutunda SV 16 vollastonitin etkisi incelenmiş ve III nolu karışım grubuna göre oldukça düşük değerlerin elde edildiği görülmüştür. Bu durum, vollastonitin matris içerisinde lif gibi davranarak sağladığı köprülendirme özelliğini, daha ince agrega tane boyutuyla

Üretilen karışımlarda kompozitin daha kompakt yapısı sayesinde daha yüksek derecelere çıkardığı şeklinde açıklanabilir.

- Bütün bu sonuçlar değerlendirildiğinde, yüksek boy:çap oranına sahip olan(SV 16) SV'nin bütün mekanik özellikler açısından değerlendirildiğinde, en ideal sonucun III nolu karışım grubunda elde edildiği belirlenmiştir.
- III nolu karışım grubunda azalan imento içeriğine rağmen sağlanan bu ideal sonuçlar, imento yerine kullanılması uygun olan SV'nin, hem imento maliyeti hem de çimentonun neden olduğu çevresel etki nedeniyle önemli bir bulgu olduğu düşünülmektedir.



## KAYNAKLAR

Akkaya, Y., Bayramov, F. ve Taşdemir, M.A., “Betonun kırılma mekaniği: tasarımda kullanılan mekanik özellikler ile kırılma parametreleri arasındaki bağıntılar”, *Türkiye Mühendislik Haberleri Sayı* 426-470, 2003.

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

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

ASTM C1437–15, “Standard test method for flow of hydraulic cement mortar”, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2015.

ASTM C311/C311M–13, “Standard test methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in portland-cement concrete”, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2013.

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 Standard E399, “Test method for plane-strain fracture toughness of metallic materials”, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2003.

Bache, H.H., “Densified cement ultra-fine particle-based materials”, *Report 40*, Aalborg Portland, Denmark, 35, 1981.

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

Beaudoin, J.J. and Low, N.M.P., “The flexural toughness and ductility of portland cement-based binders reinforced with wollastonite micro-fibres”, *Cement and Concrete Research* 24(2), 250–258, 1994.

Bisaillon, A., Rivest, M. and Malhotra, V.M., “Performance of high-volume fly ash concrete in large experimental monoliths”, *ACI Materials Journal* 91, 178-187, 1994.

Can, G., “Vollastonit yataklarının jeolojisi, madenciliği ve dünya üretimi”, *Jeoloji Mühendisliği* 39, 55-62, 1991.

Çelik, Ö., Yurter, G., Kan, S. ve Yeprem, A., “Farklı puzolanik katkıların çimento harçlarının mekanik özellikleri üzerine etkisi”, *Doğuş Üniversitesi Dergisi* 5(2), 147-154 (2004).

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

Demir, M., Erenoğlu, T., Ekim, H. and Taşdemir, M. A., “Effects of fineness and amount of fly ash on strength development of concrete”, *Fifth International Congresson Advances in Civil Engineering*, Istanbul, (2002).

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

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

Gökçe, A. ve Özturan, T., “Uçucu kül puzolanik aktivitesi ile ilgili bazı mevcut standartların değerlendirilmesi”, 4. Ulusal Beton Kongresi”, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası*, İstanbul, 30-31 Ekim – 1 Kasım 1996.

Hameed, R., Turatsinze, A., Duprat, F. and Sellier, A., “Metallic fiber reinforced concrete: effect of fiber aspect ratio on the flexural properties”, *ARPJ: 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.

Hughes, B.P., “Design of prestressed fiber reinforced concrete beams for impact”, *American Concrete Institute Materials Journal* 78(25),276-281, 1981.

IARC, “IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans”, 68, 283-305 1997.

ICL, “Imperial College London”, <http://www3.imperial.ac.uk>, 2012.

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

Kalla, P., Misra, A., Gupta, R.C., Csenteyi, 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.

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.

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.

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.

Karihaloo, B.L., “Fracture Mechanics and Structural Concrete”, *Longman Group Ltd.*, Essex, England, 1995.

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

Kim, Y.Y., Kong, H.J. and Li, V.C., “Design of engineered cementitious composite (ECC) suitable for wet-mix shotcreting” *ACI Materials Journal* 100(6), 511-518, 2003.

Kogel, J.E., Trivedi, N.C., Barker, J.M. and Krukowski, S.T., “Industrial Minerals & Rocks (7th Edition)”, *Published by Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.*, Colorado, 1507 p, 2006.

Kong, H.J., Bike, S. and Li, V.C., “Development of a self-compacting engineered cementitious composite employing electrosteric dispersion/stabilization”, *J. Cement and Concrete Composites* 25(3), 301-309, 2003.

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.

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” *İTÜ Matbaası*, Gümüşsuyu, 170 s, 1977.

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

Lepech, M.D. and Li, V.C., ‘‘Large scale processing of engineered cementitious composites’’, *ACI Materials Journal* July 2007.

Lepech, M.D., Li, V.C., Robertson, R.E. and Keoleian, G.A., ‘‘Design of green engineered cementitious composites for improved sustainability’’, *ACI Materials Journal* 105(6), 567-575, 2008.

Li V.C. and Wu, H.C., ‘‘Conditions for pseudo strain-hardening in fiber reinforced brittle matrix composites’’, *Applied Mechanics Review*, ASME, 45(8): 390-398, 1992.

Li V.C., Mishra, D.K. and Wu, H.C., ‘‘Matrix design for pseudo strain-hardening fiber reinforced cementitious composites’’, *RILEM Journal of Materials and Structures* 28, 586-595, 1995.

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. and Lepech, M.. ‘‘Crack resistant concrete material for transportation construction’’, *In TRB 83rd Annual Meeting*, Washington, D.C., Compendium of Papers CD ROM, Paper 04-4680, 2004.

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. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246)), 1992.

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., “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., “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., Lepech, M., Wang, S., Weimann, M. and Keoleian, G., “Development of green ECC for sustainable infrastructure systems” *In Proc., Int’l Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*, Beijing, China, K. Wang, ed., pp. 181-192, Iowa State Univ, 2004.

Lin, K., Chang, J., Chen, G., Ruan, M. and Ning, C., “A simple method to synthesize single-crystalline B-wollastonite nanowires”, *J. Cryst. Growth* 300(2), 267-271, 2007.

Lin, Z., Kanda, T. ve 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).

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

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. [https://doi.org/10.1016/0167-6636\(88\)90011-7](https://doi.org/10.1016/0167-6636(88)90011-7), 1988.

Mathur, R., Misra A.K. and Goel, P., “Marble slurry dust and wollastonite-inert mineral admixtures for cement concrete”, *Ind. Higw.*, 35(12), 41-46, 2007.

Mathur, R., Misra, A.K. and Goel, P., “Influence of wollastonite on mechanical properties of concrete”, *J. Sci. Ind. Res.* 66, 1029-1034, 2007a.

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

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

Nikonova, N.S., Tikhomirova, I.N., Belyakov, A.V. and Zakharov, A.I., “Wollastonite in silicate matrices”, *Glass Ceramics*, 60(9–10), 342–346, 2003.

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

NYCO, 2012. (<http://nycominerals.com/>)

Ohnemuller, Walter, Solf, Alexander, *U.S. Patent 3861935*, 1975.

Özbay, E., Şahmaran, 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.

Özcan, F., “Niğde bölgesinde üretilen hazır betonların elastisite modüllerinin belirlenmesi”, *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 7(1), 260-265, 2018.

Paul, F.K., “Mineral descriptions-wollastonite, optical mineralogy”, 4<sup>th</sup> ed., *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.

Pupurs, A., Krasnikovs, A. and Varna, J., “Energy release rate based fiber/matrix debond growth in fatigue”, *Mechanics of Advanced Materials and Structure*, 2012.

Qian, S., Li, V.C., “Simplified inverse method for determining the tensile strain capacity of strain hardening cementitious composites”, *Journal of Advanced Concrete Technology* 5: 235–246, 2007.

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

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

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.

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

Sahmaran, M. and Li, V.C., “Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC”, *Journal of Materials and Structures (RILEM)* 42(5), 593– 603, 2009.

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, 8189, 2014.

Soliman, A.M., 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., “Extrusion of ECC-material. in proc., high performance fiber reinforced cement composites”, 3 (*HPFRCC 3*), *H. Reinhardt & A. Naaman, eds.*, pp. 203-212. Chapman & Hull, 1999.

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.

Stults, M.D., Ranade, R., Li, V.C. and Rushing, T.S., “Mechanical effects of rice hush ash in ultra-high performance concretes: A matrix study, in advances in cement-based materials”, *Proc., International Conference on Advanced Concrete Materials*, Stellenbosch, S. Africa, Nov., 21-28. 2009.

Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T., and Kanda, T., “Flexural fatigue failure characteristics of an engineered cementitious composite and polymer cement mortars”, *JSCE J. Materials, Conc. Struc. Pavements*, 718(57):121-134, 2002.

Şahmaran, M. ve Yücel, H.E., “Sürdürülebilir karayolu üstyapı kaplamaları için çatlaksız ve sünek beton tasarımı”, *Gaziantep Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Programı (BAP)*, MF.10.09, 2010-2012.

Şahmaran, M., Yücel, H.E., Demirhan, S., Arık, M.T. and Li, V.C., “Combined effect of aggregate and mineral admixtures on tensile ductility of engineered cementitious composites”, *ACI Materials Journal* 627-638, 2012.

Şükrü Ö., “Bazalt lifli çimento esaslı kompozitlerin yapısal olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 2017.

Taşdemir, M.A. ve Bayramov, F., “Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı”, *İTÜ Dergisi Mühendislik* 1(2), 125-144, 2002.

Tatnall P.C., “Fiber-reinforced concrete” *In: Lamond, J.F. and Pielert, J.H., editors, Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials (STP 169D)*, ASTM International, West Conshohocken, 49, 578-594, 2006.

Topçu, İ.B. ve Canbaz, M., “Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri”, *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11-23, 2001.

Toutanji, H., Xua, B., Gilbert, J., Lavin, T., “Properties of poly (vinyl alcohol) fiber reinforced high-performance organic aggregate cementitious material: converting brittle to plastic”, *Construction and Building Materials* 24, 1-10, 2010.

Türk, K., Karataş, M., Turğut, P. ve Benli A., “Farklı tip ve miktarda puzolan içeren kendiliğinden yerleşen betonun dayanımı ve elastisite modülü arasındaki ilişki”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* 16(3), 247-253, 2010.

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

Virta, R.L., Wollastonite, *US Geological Survey Mineral Yearbook*, US, 1999.

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.

Wahab, R. A., Noor, M. A., Jamaludin S. M. and Ismail, K. N., “Effects of fly ash addition on compressive strength and flexural strength of foamed cement composites”, *Advanced Materials Research* Vol. 795 (2013), 664-668.

Wang, Li, V.C., “High-early-strength engineered cementitious composites”, *ACI Material Journal* 103(2), 97-105, 2006.

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

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

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

Wang, S., Li, V.C., “Engineered cementitious composites with high-volume fly ash”, *ACI Materials Journal* 104, 233–241, 2007.

Weimann, M.B. ve Li, V.C., “Hygral behavior of engineered cementitious composites (ECC)”, *International Journal of for Restoration of Buildings and Monuments* 9(5), 513-534, 2003.

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

Wu, H., Yang, J., Ma, H.W. and Wang, M.W., “Preparation of acicular wollastonite using hydrothermal and calcining method”, *Integrated Ferroelectrics* 146:144–153, 2013.

Yarusova, S.B., Gordienko, P.S., Sharma, Y.C., Perfilev, A.V., Kozin, A.V. “Industrial waste as raw material for producing synthetic wollastonite in russia”, *International Journal of Environmental Science and Development* 8(1), 2017.

Yazdani, A., Rezaie, H.R. and Ghassai, H., “Investigation of hydrothermal synthesis of wollastonite using silica and nano silica at different pressures”, *Journal of Ceramic Processing Research* 11(3), 348-353, 2010.

Zhu, L. and Sohn, H.Y., “Growth of 2M-wollastonite polycrystals by a partial melting and recrystallization process for the preparation of high-aspect-ratio particles”, *Journal of Ceramic Science and Technology* 3(4), 169-180, 2012.

Zhu, L., “Preparation of high-aspect-ratio particles through the high temperature growth of 2M-Wollastonite crystals”, PhD Thesis, *The University of Utah Graduate School*, Utah, 2013.



## ÖZGEÇMİŞ

Yasin KAYA 27.06.1995 tarihinde Samsun’da doğdu. İlkokul, ortaokul ve lise eğitimini Rize’de tamamladı. 2013 yılında kazandığı Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2017’de mezun oldu. Ağustos 2017 yılında ise Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü yüksek lisans programını kazandı. Nisan 2018 ve Ocak 2020 yılları arasında yürütücülüğünü Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL’in yaptığı ‘Sentetik Vollastonitin Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitlerde Lif Donatı Olarak Kullanılması’ adlı TÜBİTAK projesinde Proje Asistanı olarak görev yaptı.

## BU ÇALIŞMADAN ÜRETİLEN ESERLER

- YÜCEL, H.E., ÖZ H. Ö., **KAYA Y.**, and GÜNEŞ M., “The Effects of High Aspect Ratio Wollastonites on Standard Mortars Based on Pozzolanic Activity Test”, 1<sup>st</sup> International Conference on Environment, Technology And Management, 27-29 June, 2019, Niğde/TURKEY
- H.E. Yücel, H.Ö. Öz, O. Ersoy, M.Güneş, **Y. Kaya**, Production of Synthetic Wollastonite Mineral By Using Industrial Waste Materials, 2nd International Conference on Sustainable Building Materials, August 12-15, 2019 Eindhoven, The Netherlands