



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

VOLLASTONİT KATKILI YÜKSEK PERFORMANSLI
HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

MUHAMMET GÜNEŞ

Ocak 2018

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

VOLLASTONİT KATKILI YÜKSEK PERFORMANSLI
HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

MUHAMMET GÜNEŞ

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Yrd. Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ

Ocak 2018

Muhammet GÜNEŞ tarafından **Yrd. Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ** danışmanlığında hazırlanan “**Vollastonit Katkılı Yüksek Performanslı Harçların Mekanik ve Durabilite Özellikleri**” 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 : Yrd. Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



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



Üye : Yrd. Doç. Dr. Tamer DİRİKGİL, Erciyes 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...

Doç. Dr. Murat BARUT

MÜDÜR V.

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.


Muhammet GÜNEŞ

ÖZET

VOLLASTONİT KATKILI YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN MEKANİK VE DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

GÜNEŞ, Muhammet

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

:Yrd. Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ

Ocak 2018, 90 sayfa

Bu tezde, vollastonit katkılı yüksek performanslı harcın (YPH) taze, mekanik ve durabilite özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. İlk aşamada vollastonit mineralinin literatür çalışmaları dışında belirlenen özel bir yöntemle sentetik olarak üretimi yapılmış, ikinci aşamada ise sentetik vollastonit YPH üretiminde kullanılmıştır. Vollastonit katkılı yüksek performanslı harç (VYPH) üretimi 0.33 sabit su/bağlayıcı (çimento+vollastonit) oranıyla, 132±10 mm sabit bir yayılma çapıyla ve yüksek oranda su azaltıcı katkı (süper akışkanlaştırıcı) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, kontrol harcı sabit su/bağlayıcı oranı ile üretilmiş ve daha sonra sentetik vollastonit sırasıyla, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında her defasında çimentonun yerine ikinci bir bağlayıcı malzeme olarak ikame edilmiştir. Üretilen harçların sarsma tablasında yayılma çapı ölçülmüştür. Sonrasında, harçlara basınç ve eğilme testlerinin yanı sıra ultrasonik titreşim hızı, kılcal su geçirimsizliği ve hızlı klor geçirimsizliği testleri 28. ve 90. günlerde uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre, vollastonit miktarının artmasıyla yayılma çapı giderek azalmış, mekanik ve durabilite özellikleri %9'a kadar iyileşmiştir.

Anahtar Sözcükler: Dayanım, durabilite, harç, taze özellik, vollastonit, yüksek performans

SUMMARY

MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE MORTARS INCORPORATING WOLLASTONITE

GÜNEŞ, Muhammet

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assistant Professor Dr. Hatice Öznur ÖZ

January 2018, 90 pages

In this thesis, fresh, mechanical and durability properties of high performance mortar (HPM) incorporating wollastonite have been experimentally investigated. In the first stage, the wollastonite mineral was synthetically produced by a special method found outside of the literature studies and in the second stage, synthetic wollastonite was used in the production of HPM. The production of high performance mortar incorporating wollastonite (HPMW) was carried out with a constant water/binder (cement+wollastonite) ratio of 0.33 and a constant slump flow of 132 ± 10 mm by using a high range water reducing admixture (super plasticizer). Initially, the control mortar was produced with a constant water/binder ratio and then, synthetic wollastonite was substituted as a second binder material instead of cement in the ratios of 3%, 6%, 9% and 12%, respectively. Slump diameter of the mortars was measured in the flow table. Subsequently, compressive and flexural tests as well as ultrasonic pulse velocity, water sorptivity and rapid chlorine permeability tests were conducted at 28th and 90th days. According to the test results, the slump diameter gradually decreased and mechanical and durability properties improved up to 9% with the increase of wollastonite amount.

Keywords: Strength, durability, mortar, fresh property, wollastonite, high performance

ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, literatür çalışmaları dışında belirlenen özel bir yöntemle sentetik olarak üretimi gerçekleştirilen vollastonit mineralinin yüksek performanslı harcın taze, mekanik ve durabilite özellikleri üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Üretilen harçlar taze halde iken yayılma çapları, sertleşmiş harçlara ise standart kür şartlarında deneye tabi tutulduktan sonra 28. ve 90. deney günlerinde basınç ve eğilme testleri, ultrasonik titreşim hızı testi, kılcal su geçirimsizliği ve hızlı klor geçirimsizliği testleri uygulanmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre, çimento yerine kullanılan vollastonit miktarının artması yayılma çapının kısmen azalmasına neden olurken, mekanik ve durabilite özelliklerini her iki test yaşı için de iyileştirmiştir. Bu iyileşme %9 oranına kadar devam etmiş, %12 oranında ise azalma gözlemlenmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamın yürütülmesi esnasında, çalışmalarına yön veren, bilgi ve yardımlarını esirgemeyen ve bana her türlü desteği sağlayan çok kıymetli danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ'e en içten teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam esnasında yardımlarını, bilgilerini, deneyimlerini ve tecrübelerini esirgemeyen çok kıymetli bir diğer hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Hasan Erhan YÜCEL'e müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Sentetik vollastonit mineralinin üretim aşamasında her türlü yardımı sağlayan Sayın Doç. Dr. Orkun ERSOY'a teşekkürü bir borç bilirim. Bu tezin hazırlanması esnasında sık sık yardımlarına başvurduğum çok kıymetli İnş. Yük. Müh. ve aynı zamanda İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi-I Laboratuvarı sorumlusu Sayın Zekeriya KOYUNCU'ya minnet ve şükran duygularımı belirtmek isterim. Ayrıca, İnşaat Mühendisliği Bölümü Bölüm Sekreteri Sayın Fuat ÖZCAN'a ve Çimsa ve Niğtaş'a katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Bu tezi, sadece bu çalışmam boyunca değil, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi yönden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen canımdan çok sevdiğim babaannem Dilber GÜNEŞ'e, halam Dursun GÜNEŞ'e, dedem Duran GÜNEŞ'e, babam Nevzat GÜNEŞ'e, annem Nuray POLAT'a, kardeşlerime ve Merve Nur ÖZEL'e ithaf ediyorum.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
SUMMARY	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ	xiii
SİMGE VE KISALTMALAR	xv
BÖLÜM I GİRİŞ	1
BÖLÜM II YÜKSEK PERFORMANSLI BETON	4
2.1 Yüksek Performanslı Betonun Tanımı ve Kriterleri	4
2.2 Yüksek Performanslı Betonun Özellikleri	4
2.3 Yüksek Performanslı Betonun Kullanım Alanları	5
2.4 Yüksek Performanslı Beton Kullanımının Avantajları	6
2.5 Yüksek Performanslı Beton Kullanımının Dezavantajları	6
2.6 Yüksek Performanslı Betonda Kullanılan Malzemeler	7
2.6.1 Çimento	8
2.6.2 Beton karma suyu	8
2.6.3 Agregası	8
2.6.4 Süper akışkanlaştırıcı katkıları	9
2.6.5 Mineral katkıları	9
2.6.5.1 Silis dumanı	10
2.6.5.2 Uçucu kül	11
2.6.5.3 Yüksek fırın cürufu	13
2.6.5.4 Metakaolin	13
2.6.5.5 Cam tozu	14
2.6.5.6 Diğer mineral katkı malzemeleri	15

2.7 Vollastonitin Tanımı ve Özellikleri	15
2.7.1 Vollastonitin kullanım alanları	17
2.7.1.1 Plastik sanayi	17
2.7.1.2 Seramik sanayi	18
2.7.1.3 Metalurji sanayi	19
2.7.1.4 Boya ve kaplama sanayi	19
2.7.1.5 Asbest yerine kullanımı	19
2.7.1.6 Diğer sanayi uygulamaları	20
2.8 Vollastonit Rezervleri	20
2.8.1 Türkiye'deki vollastonit rezervleri	21
2.9 Doğal ve Sentetik Vollastonit	22
2.9.1 Doğal vollastonit	22
2.9.2 Sentetik vollastonit	23
2.9.2.1 Islak metot.....	23
2.9.2.2 Katı hal reaksiyonu metodu	23
2.9.2.3 Sıvı faz reaksiyonu metodu.....	24
2.10 Vollastonitin Beton ve Harç Üzerine Etkileri.....	25
BÖLÜM III DENEYSEL ÇALIŞMA	27
3.1 Sentetik Vollastonit Üretimi	27
3.2 Üretilen Malzemenin SEM, XRD ve XRF Sonuçları.....	32
3.3 YPH Tasarımında Kullanılan Malzeme ve Özellikleri.....	34
3.3.1 Çimento	34
3.3.2 Vollastonit	34
3.3.3 Süper akışkanlaştırıcı (SA) ve harç karışım suyu.....	35
3.3.4 İnce agregalar	36
3.4 YPH Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü	37
3.4.1 VYPH karışım oranları	37

3.4.2 VYPH üretim prosedürü.....	38
3.5 Deneysel Çalışmalar (Taze ve Sertleşmiş Harç Deneyleri).....	40
3.5.1 Taze harç deneyleri.....	40
3.5.1.1 Yayılma deneyi	40
3.5.1.2 Taze birim ağırlık deneyi.....	42
3.5.2 Sertleşmiş harç deneyleri.....	43
3.5.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık deneyi	43
3.5.2.2 Basınç deneyi.....	44
3.5.2.3 Eğilme deneyi	45
3.5.2.4 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi.....	45
3.5.2.5 Kılcal su geçirimsizliği deneyi.....	46
3.5.2.6 Hızlı klor geçirimsizliği deneyi.....	47
BÖLÜM IV BULGULAR VE TARTIŞMA.....	50
4.1 Yayılma Çapı.....	50
4.2 Taze Birim Ağırlık	54
4.3 Sertleşmiş Birim Ağırlık	55
4.4 Basınç Dayanımı	55
4.5 Eğilme Dayanımı.....	59
4.6 Ultrasonik Titreşim Hızı.....	62
4.7 Kılcal Su Geçirimsizliği	64
4.8 Hızlı Klor Geçirimsizliği	66
BÖLÜM V SONUÇLAR	70
KAYNAKLAR.....	74
ÖZ GEÇMİŞ	90

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. CaO ve SiO ₂ ağırlıkları.....	30
Çizelge 3.2. XRF Sonuçları	33
Çizelge 3.3. Çimento ve vollastonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri	35
Çizelge 3.4. Doğal kum ve kırma kumun özellikleri	36
Çizelge 3.5. VYPH karışım oranları (1 kg/m ³).....	38
Çizelge 3.6. Hızlı klor geçirimsizliği deneyi sınır değerleri	49



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Vollastonitin kristal yapısındaki değişim	25
Şekil 3.1. XRD Analizi	32
Şekil 3.2. Çimento ve vollastonitin elek analizi	35
Şekil 3.3. Doğal kum ve kırma kumun elek analizi	37
Şekil 4.1. VYPH karışımlarının yayılma çapları	54
Şekil 4.2. VYPH karışımlarının teorik ve taze birim ağırlık değerleri	54
Şekil 4.3. VYPH karışımlarının teorik ve sertleşmiş birim ağırlık değerleri	55
Şekil 4.4. VYPH karışımlarının basınç dayanımı değişimleri	58
Şekil 4.5. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre basınç dayanımındaki yüzde değişimleri	58
Şekil 4.6. VYPH karışımlarının 90 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımlarına göre yüzde değişimleri	58
Şekil 4.7. VYPH karışımlarının eğilme dayanımı değişimleri	61
Şekil 4.8. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre eğilme dayanımındaki yüzde değişimleri	61
Şekil 4.9. VYPH karışımlarının 90 günlük eğilme dayanımlarının 28 günlük eğilme dayanımlarına göre yüzde değişimleri	61
Şekil 4.10. VYPH karışımlarının ultrasonik titreşim hızı değişimleri	63
Şekil 4.11. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre ultrasonik titreşim hızındaki yüzde değişimleri	63
Şekil 4.12. VYPH karışımlarının 90 günlük ultrasonik titreşim hızlarının 28 günlük ultrasonik titreşim hızlarına göre yüzde değişimleri	63
Şekil 4.13. VYPH karışımlarının kılcal su geçirimliliği değişimleri	65
Şekil 4.14. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre kılcal su geçirimliliğindeki yüzde değişimleri	66
Şekil 4.15. VYPH karışımlarının 90 günlük kılcal su geçirimliliği değerlerinin 28 günlük kılcal su geçirimliliği değerlerine göre yüzde değişimleri	66
Şekil 4.16. VYPH karışımlarının hızlı klor geçirimliliği değişimleri	68
Şekil 4.17. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre hızlı klor geçirimliliğindeki yüzde değişimleri	69

Şekil 4.18. VYPH karışımlarının 90 günlük hızlı klor geçirimsizliği değerlerinin 28 günlük hızlı klor geçirimsizliği değerlerine göre yüzde değişimleri 69



FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Silis dumanı (a), uçucu kül (b), yüksek fırın cürufu (c), metakaolin (d) ve cam tozu (e) görüntüleri.....	15
Fotoğraf 2.2. Vollastonitin parçacık morfolojisi (NYCO Minerals, 2012)	17
Fotoğraf 3.1. Hidrotermal otoklav reaktörü.....	27
Fotoğraf 3.2. Kuvartz (a) ve bilyeli değirmen (b).....	28
Fotoğraf 3.3. Kireç taşı (a), kül fırını (b), sinterleme sonunda elde edilen CaO (c) ve öğütülerek elekten geçen SiO ₂ (d).....	29
Fotoğraf 3.4. 139.4 gr saf su, 67.296 gr CaO ve 72.096 gr SiO ₂	30
Fotoğraf 3.5. Bilyeli kap (a) ve otoklav için hazırlanan karışım (b)	30
Fotoğraf 3.6. Teflonun yerleştirildiği otoklav (a) ve etüv (b).....	31
Fotoğraf 3.7. Tobermorit	31
Fotoğraf 3.8. Tobermoritin kül fırına yerleştirilmesi (a) ve vollastonit (b).....	32
Fotoğraf 3.9. SEM Analizi.....	33
Fotoğraf 3.10. CEM I 42,5 R Portland çimentosu (a) ve sentetik vollastonit minerali (b)	34
Fotoğraf 3.11. SA'nın olduğu kap (a), süper akışkanlaştırıcı (b) ve su (c)	36
Fotoğraf 3.12. Doğal kum (a) ve kırma kum (b)	36
Fotoğraf 3.13. Karışımında kullanılan malzemeler (a) ve harç mikseri (b).....	39
Fotoğraf 3.14. Prizmatik numunelerin sarsma tablasında sıkıştırılması (a) ve silindir numunelerin sarsma tablasında sıkıştırılması (b).....	39
Fotoğraf 3.15. Prizmatik ve silindir numunelerin 24 saat kalıpta üzeri örtülü halde bekletilmesi (a) ve harç numunelerin kür havuzunda bekletilmesi (b)...	40
Fotoğraf 3.16. Yayılma tablası ve akış kalıbı	41
Fotoğraf 3.17. Birinci tabakanın şişlenmesi (a), kalıp yüzeyinin mala yardımıyla düzeltilmesi (b) ve kalıbın harçtan kaldırılması (c)	41
Fotoğraf 3.18. 15 saniyede yayılma tablasının 25 defa düşürülmesi (a) ve yayılma çapının ölçülmesi (b)	42
Fotoğraf 3.19. Silindir kabın boş ağırlığı (a) ve silindir kabın dolu ağırlığı (b).....	43
Fotoğraf 3.20. Prizmatik numunenin ağırlık tespiti	44

Fotoğraf 3.21. Eğilme deneyinden elde edilen 6 parça (a) ve basınç deneyi cihazı (b) .	44
Fotoğraf 3.22. Eğilme deneyinde kullanılan 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik numuneler (a) ve eğilme deneyi cihazı (b)	45
Fotoğraf 3.23. 16 cm uzunlukta UTH ölçümü.....	46
Fotoğraf 3.24. Etüvde kurutulan numuneler (a) ve silikonlanmış numuneler (b)	47
Fotoğraf 3.25. Kılcal su geçirimsizliği testi (a) ve kılcal su geçirimsizliği test düzeneği (b)	47
Fotoğraf 3.26. Vakum cihazı (a), hızlı klor geçirimsizliği test cihazı (b) ve hızlı klor geçirimsizliği test düzeneği (c)	48
Fotoğraf 4.1. VYPH0'ın yayılma çapı.....	51
Fotoğraf 4.2. VYPH3'ün yayılma çapı.....	52
Fotoğraf 4.3. VYPH6'nın yayılma çapı.....	52
Fotoğraf 4.4. VYPH9'un yayılma çapı.....	53
Fotoğraf 4.5. VYPH12'nin yayılma çapı.....	53

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
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
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
Na_2SiO_3	Sodyum silikat
SiO_2	Silisyum dioksit
SO_3	Kükürt trioksit
ZnO	Çinko oksit
cm	Santimetre
mm	Milimetre
μm	Mikrometre
s/b	su/bağlayıcı
s/ç	su/çimento
$\alpha-CaO.SiO_2$	α -vollastonit
$\beta-CaO.SiO_2$	β -vollastonit
$^{\circ}C$	Santigrat derece

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

BÖLÜM I

GİRİŞ

Beton diğer yapısal malzemelere kıyasla çok yönlülük, kullanılabilirlik ve ekonomi gibi birçok üstün avantaja sahip olan ve bu özellikleri sayesinde ülkemizde ve tüm dünyada yaygın olarak kullanılan kompozit bir yapı malzemesidir. Geçmişin ve günümüzün en önemli yapı malzemelerinden biri konumunda bulunan betonun gelecekte de yaygın kullanımının devam etmesi beklenmektedir. Betonun bu derecede yüksek ilgi görmesinin temel nedenleri, taze haldeyken istenilen şeklin verilebilmesi, uygun malzeme ve yöntemlerle çok yüksek basınç dayanımlarına ulaşabilmesi, korozyona uğramaması, yangına karşı dayanıklı olması, donatılarla aderansının iyi olması ve bünyesinde bulundurduğu malzemelerin ekonomik olmasıdır. Bu önemli özelliklerinden dolayı beton, bir yapıyı meydana getirmek için gerekli olan en önemli yapı malzemelerinden birisidir. Bu nedenle bir yapının istenilen performansı göstermesi özellikle betona bağlıdır. Ancak nüfus artışı, yaşam standartlarının yükselmesi, yapı teknolojisindeki ve kentsel dönüşüm projelerindeki ilerlemelerden dolayı geleneksel beton bazı durumlarda istenilen dayanım ve durabilite özelliklerini gösterememektedir. Artan talebin karşılanması ve istenilen beton özelliklerinin elde edilebilmesi için yapı sektöründeki araştırmacılar farklı beton türlerini tasarlamaya yönelmişlerdir (Binici vd., 2012; Gesoğlu vd., 2014; Hyeok-Jung vd., 2017; McGinnis vd., 2017; Ulusu vd., 2016). Yüksek Performanslı Beton (YPB), bu farklı beton türlerinin en önemlilerinden birisi olarak dikkat çekmektedir.

YPB istenilen dayanım koşulunu sağlamanın yanı sıra beklenen dayanıklılık koşulunu da sağlayan geleneksel betona kıyasla üstün özellikleri olan yüksek dayanımlı betonun özel bir türüdür. İçeriğinde bulunan kimyasal ve mineral katkılardan dolayı YPB'nin tasarımı ve üretimi, geleneksel betonun tasarımı ve üretiminden daha karmaşıktır. YPB'nin genel tasarım kriterlerine bakıldığında su/bağlayıcı oranının 0.35'den daha düşük olması istenir (Taşdemir vd., 2003). YPB'nin kullanım alanları giderek artmaktadır. Bu nedenle YPB'de kür şartına bağlı oluşan deformasyonların nedeni daha çok dikkat çekmeye başlamıştır. YPB'ler yüksek miktarda çimento içerdiklerinden dolayı geleneksel betona oranla daha yoğun ve homojen olmaktadır. Bu tip betonlarda hidrasyon süreci için gerekli su miktarı ortamda yeterli miktarda bulunmamaktadır.

Ayrıca, dışarıdan betona su girişi de betonun geçirimsiz karakterinden dolayı sağlanamamaktadır (Weber ve Reinhardt, 1997). YPB’de ortamdaki su miktarının eksikliği, çimento hamurunda zamana bağlı hacim değişimlerinin çok erken yaşta başlamasına neden olur (Sadouki ve Wittmann, 2001). Betondaki su miktarının fiziksel ve kimyasal nedenlerle azalması sonucu betonda oluşan deformasyonlar rötre olarak adlandırılmaktadır. Rötre hem taze betonda hem de sertleşmiş betonda meydana gelebilecek bir olaydır.

Beton üretimi için vazgeçilmez bir malzeme olan çimento, özellikle yaygın olarak kullanılan portland çimentosu, yüksek oranda enerji ve doğal kaynak tüketimine, CO₂ gazı yayılımına ve bu nedenle hava, su ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Söz konusu problemler sebebiyle betonda kullanılacak çimento miktarının azaltılmasına yönelik yapılan çalışmalar sonucunda çimento yerine belirli yüzdelerle kullanılarak betonda çimento ihtiyacını azaltan mineral katkı malzemeleri geliştirilmiştir. Hem malzeme maliyetini azaltmak hem de betonun uzun süreli dayanım ve durabilite özelliklerini geliştirmek için kullanılan mineral katkıların çimento yerine kullanılması ile hidrasyon ısı; buna bağlı olarak da termal çatlama ve büzülme ile ilgili problemler azaltılabilmektedir. Ayrıca mineral katkıları çimento üretimi neticesinde oluşan çevresel kirlilik etkisini azaltarak enerji kaynaklarını faydalı kullanmaya yardımcı olmanın yanı sıra sürdürülebilir bir yapı oluşmasına katkı sağlamaktadır (Kalla vd., 2015; Ransinchung ve Kumar, 2010; Sabet vd., 2013).

Silis dumanı, nano silika, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin, cam tozu, pirinç kabuğu külü, mermer tozu, doğal zeolit, kalker unu vb. mineral katkı malzemelerinin beton üretiminde kullanılması sonucunda hem çevresel yönden hem de betonun dayanım ve dayanıklılığı yönünden olumlu sonuçlar elde edildiği yapılan çalışmalarla sabittir. Örneğin; Sabet vd. (2013), doğal zeolit, silis dumanı ve uçucu kül kullanarak kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı beton üretmişlerdir. Sonuçlara göre çimento yerine betona eklenen bu mineraller betonun mekanik ve durabilite özelliklerini geliştirmiştir. Ayrıca Talah vd. (2015), %15 oranında mermer tozu kullanımının betonun mekanik özelliklerini ve klor iyonu geçirimsizliği gibi durabilite özelliklerini olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Betonun basınç dayanımı, çekme dayanımının yaklaşık olarak 10 katıdır. YPB'de dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin yanı sıra sünekliğin de sağlanması istenmektedir. Betonun eğilme dayanımındaki artışı elde edebilmek için farklı lif türleri ve mineral katkı malzemelerinin yanı sıra yeni tür malzemeler de kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan birisi de boyut olarak çimento parçacıklarının boyutuna benzer, kalsiyum, silisyum ve oksijenin bileşiminden oluşan bir kalsiyum meta silikat (CaSiO_3) olan vollastonittir (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013; Kalla vd., 2015; Ransinchung ve Kumar, 2010; Soliman ve Nehdi, 2012). Vollastonit, kalsit içeren kalker (CaCO_3 , kireç taşı) ve silikanın (SiO_2) yüksek sıcaklıkta genellikle sıcak magma içerisinde etkileşiminden oluşur (Paul, 1977; Ransinchung ve Kumar, 2010). Reaksiyon aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Paul, 1977):



Alüminyum, demir, magnezyum, manganez, potasyum ve sodyum gibi elementleri de yapısında bulduran vollastonit, teorik olarak %50'ye kadar CaO ve %55'e kadar SiO_2 'den oluşan özel bir mineraldir. Bu mineral kontak metamorfik kireçtaşları ve volkanik kayalarda apatit, andradit, diyopsit, epidot, granat, sfen, plajyoklas feldspat, tremolit, kalsit ve kuvarzla birlikte bulunmaktadır (Dumont, 2004; Kalla vd., 2015; Kogel vd., 2006; Sariiz, 1992). Doğal olarak oluşan bu özel mineral aynı zamanda sentetik olarak da üretilebilmektedir.

Bu tez çalışmasında, vollastonitin YPH'lerin taze, mekanik ve durabilite özelliklerine etkisinin deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, vollastonit minerali literatür çalışmaları dışında özel olarak belirlenen bir yöntemle sentetik olarak üretilmiştir. Bu üretim sürecinde kullanılan hammaddeler vollastonitin temel bileşenleri olan kalsit (CaCO_3) ve kuvarz kumudur (SiO_2). Vollastonit mineralinin üretim süreci bu çalışmanın birinci aşamasını oluşturmaktadır. İkinci aşamada ise ilk olarak 0.33 sabit su/bağlayıcı oranında kontrol harcı (VYPH0) üretilmiştir. Bu karışımda bağlayıcı malzeme olarak sadece çimento kullanılmıştır. Daha sonra sentetik vollastonit minerali %3, %6, %9 ve %12 oranlarında çimentonun yerine ikame edilerek YPH tasarımı gerçekleştirilmiştir. Üretilen harçların taze halde iken yayılma çapı, sertleşmiş halde iken ise basınç ve eğilme dayanımları, ultrasonik titreşim hızı, kılcal su geçirimsizliği ve hızlı klor geçirimsizliği değerleri 28. ve 90. günlerde belirlenmiştir. Ayrıca harçların taze ve sertleşmiş birim ağırlık değerleri de belirlenmiştir.

BÖLÜM II

YÜKSEK PERFORMANSLI BETON

2.1 Yüksek Performanslı Betonun Tanımı ve Kriterleri

İstikrarlı malzeme temini, dayanım, dayanıklılık ve ekonomi gibi birçok mühendislik özelliğine sahip olan beton inşaat sektöründe bina, yol, baraj, tünel, köprü ve daha birçok alt yapı ve üst yapı teknolojisinde çok yaygın kullanım alanı bulan özel bir yapı malzemesidir (Binici vd., 2012; Hyeok-Jung vd., 2017; Ulusu vd., 2016). Ancak geleneksel betonun dayanım ve dayanıklılık açısından performans eksikliği inşaat sektöründeki kullanım alanını kısıtlamaktadır. Bu nedenle mukavemetin yanı sıra durabilite açısından da üstün özelliklere sahip olan Yüksek Performanslı Beton (YPB) gibi özel beton türleri geliştirilmiştir. YPB, durabilite koşulunu da sağlayan yüksek dayanımlı betonun (YDB) çok özel bir türüdür (Taşdemir vd., 2003). Kolay işlenebilen ve yüksek dayanımlı olan bu betonun durabilite özelliğini de geliştirdiği belirlenmiş ve bu sayede önceden yüksek dayanımlı beton (YDB) olarak adlandırılan bu beton türünün adı yüksek performanslı beton (YPB) olarak değiştirilmiştir (Akman, 2003; Mailer, 1990). YPB'nin tanımı, zamana, kullanıldığı bölgeye ve yaygın olan üretim teknolojisine göre değişmektedir. Örneğin, 1950'li yıllarda standart silindir beton numunelerinin karakteristik basınç dayanımı 34 MPa olan betonlar "Yüksek Performanslı Beton" olarak tanımlanmaktadır. 1960'lı yıllarda ise ABD'de silindir dayanımı 41 MPa ile 52 MPa arasında olan betonlar ticari amaçla üretilmiştir. 1970'lerin ilk yıllarında ise bu betonların dayanımı 60 MPa'a kadar ulaşabilmiştir. Yakın geçmişte ise basınç dayanımı 80 MPa ile 100 MPa arasında değişen betonlar üretilmektedir. Çok yüksek dayanımlı agregalar kullanılarak üretilen betonlarda ise 250 MPa'lık basınç dayanıma ulaşabilmektedir (ACI Committee 363-R84, 1984; Larrad ve Mailer, 1991; Nilson, 1987; Pul vd., 2002; Swamy, 1985).

2.2 Yüksek Performanslı Betonun Özellikleri

YPB'nin dayanımı genel olarak çimento hamurunun boşluk yapısına, agreganın özelliğine ve agrega-çimento hamuru geçiş bölgesi özelliklerine bağlıdır. Bunlardan en

zayıfı olan geçiş bölgesi özellikleri su/çimento (s/ç) oranı düşürülerek ve aynı zamanda agreganın maksimum dane çapı küçültülerek iyileştirilebilir. Ancak; bu iki yaklaşımın belirli bir üst sınırı vardır. Bu sınırı aşmak için ise beton yapısında var olan ve kolay kırılma özelliği gösteren $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerinin oluşmasını önlemek gerekir. Bunların oluşumu ise puzzolan kullanılarak giderilir. Süper akışkanlaştırıcı kullanarak s/ç oranını düşürmek ve silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, cam tozu vb. aktif puzzolanlar kullanarak $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oluşumunun önlenmesi yüksek dayanımlı beton bileşiminin temelini oluşturmaktadır (Sümer ve Söyler, 2002).

ABD'deki Stratejik Otoyol Araştırma Programı'na (SHRP) göre Yüksek Performanslı Beton, dayanımı, durabilitesi ve su/bağlayıcı oranı bakımından aşağıdaki gibi tanımlanabilir (Taşdemir vd., 2003);

- Çok erken dayanımlı beton: 4 saatlik basınç dayanımı $\geq 17,5$ MPa; çok yüksek erken dayanımlı beton: 24 saatlik basınç dayanımı ≥ 35 MPa; çok yüksek dayanımlı beton: 28 günlük basınç dayanımı ≥ 70 MPa,
- Durabilite çarpanı ≥ 80 (donma-çözülmenin 300 tekrarından sonra),
- Su/bağlayıcı oranı $\leq 0,35$

Tüm bunlara ek olarak, YPB'deki minimum çimento dozajı 400 kg/m^3 olmalıdır.

2.3 Yüksek Performanslı Betonun Kullanım Alanları

Yüksek derecede dayanım ve dayanıklılık gibi özellikleri sayesinde çok geniş kullanım alanı bulan bu beton türü çok yüksek yapılar, nükleer depolama yapıları, petrol projeleri, deniz yapıları, açık deniz petrol platformları, aşınmaya dayanıklı yol betonları, ön germeli beton elemanlar, kabloları aderanslı öngerilmeli profiller, endüstriyel döşemeler, düzlemde yüksek basınca maruz plaka, baraj boşaltma kanalları, köprüler, kemerler vb. alanlarda kullanılmaktadır (Ali vd., 2016; Sümer ve Söyler, 2002). Ayrıca YPB, basınca çalışan yapı elemanlarında geleneksel betona kıyasla önemli avantajlara sahiptir. Özellikle kolonlarda, YPB kullanılmasıyla birlikte boyutlar küçülmekte, yapıya gelen toplam yükte azalma meydana gelmekte ve yapı içerisindeki kullanım alanları artmaktadır (Rashid vd., 2002). Ekonomik açıdan pahalı olan YPB'ler, ABD, Kanada, Japonya, Fransa ve İskandinav ülkelerinde kullanılmış ve önemli yapıların üretimi yapılmıştır (Aitcin, 1998; Akman, 2003).

2.4 Yüksek Performanslı Beton Kullanımının Avantajları

- YPB, üretiminde kullanılan yüksek oranda su azaltıcı katkı sayesinde yüksek işlenebilirliğe sahiptir.
- Düşük oranda su/bağlayıcı (s/b) ile tasarlandığı için porozitesi oldukça düşük olan bu beton türünün dayanım değeri oldukça yüksektir.
- YPB'ler oldukça gevrek bir malzeme gibi davranırlarsa da, donatı yardımı ile istenildiği kadar sünek elemanlar oluşturmak mümkündür (Sümer ve Söyler, 2002).
- Yine düşük s/b oranı sayesinde sahip olduğu geçirimsiz yapısı YPB'nin dayanıklılığını artırmaktadır.
- YPB'lerin sahip oldukları geçirimsiz yapıları sayesinde donma-çözülme direnci ve aşınma direnci de yüksektir (Akman, 2003).

2.5 Yüksek Performanslı Beton Kullanımının Dezavantajları

- YPB'lerin üretiminde ve ekonomisinde bir takım sorunlar vardır. Bu sorunların çözümü titiz bir kalite kontrolü, çok sayıda yeni araştırma, standart ve pazarlama çalışmaları ile çözümlenebilir.
- YPB'nin olumlu özelliklerini ve özellikle durabilite özelliklerini negatif yönde etkileyen en önemli etken rötredir. YPB'de zarar oluşturan rötreye klasik kuruma rötresi değil, otojen rötredir. Geleneksel betonlarda bu rötreye ihmal edilebilecek kadar düşük orandadır. Otojen rötreye kimyasal (bünyesel) rötreye ile içsel kuruma rötrelere toplamıdır. Kuruma rötresi dışa açık büyük kılcal boşluklardaki suyun buharlaşması sonucu oluşur. Buharlaşma borucuklardaki menisküslerin çapını küçültür, katı fazda çekme gerilmeleri artar ve katı faz büzülür böylece çimento hamurunda ağırlık kaybı meydana gelir. İçsel kurumada çimento hidrasyon için gerekli suyu büyük kılcal borucuklardan emerek sağlar. Böylece kuruma rötresinde olduğu gibi meydana gelen çekme gerilmelerinin etkisi ile katı faz büzülür. Su/bağlayıcı oranı çok düşük olan YPB'lerde büyük kılcal borucuklarda yeteri kadar su bulunmadığı için bu rötreye hidrasyonun başlangıcında büyük değerlere ulaşır. Ayrıca hidratlar iç ürün şeklinde tüm boşlukları tıkar ve geçirimsiz hale getirir. Üretim başlangıcından 24 saat sonra kuruma rötresinden

korunmak amacıyla uygulanacak su kürü de bu rötreyi önlemez ve YPB su içerisinde kalsa bile büzülür ve çatlayabilir (Akman, 2000; Akman, 2003).

- YPB üretiminde kullanılan çimento dozajı oldukça yüksektir. Bilindiği gibi çimento özellikle de portland çimentosu yüksek oranda enerji ve doğal kaynak tüketimine, CO₂ gazı yayılımına ve bu nedenle hava, su ve çevre kirliliğine neden olmaktadır. Bu nedenle YPB üretiminde silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkı malzemeleri kullanılmaktadır (Kalla vd., 2015; Ransinchung ve Kumar, 2010; Sabet vd., 2013).
- YPB'lerin yangına karşı dayanıklılıkları önemli bir tartışma konusudur. Betonarme bir yapıda beton, içerisindeki boşluk ve bu boşlukta serbest suyun hareketi sayesinde çeliği bir oranda yangından korur. Ancak su/bağlayıcı oranının 0.30'un altında olduğu betonlarda YPB'ler bu özel niteliğe sahip değildir (Akman, 2003; Noumowe vd., 1996).
- YPB'lerin alkali agregası reaksiyonu açısından durumu tartışma konusudur. Bu reaksiyonun başlayabilmesi için 3 temel unsur vardır. Bunlar; agregaların reaktif silis içermesi, betonun nemli-ıslak halde olması ve ara yüzey sıvısında alkali konsantrasyonunun yüksek olmasıdır. YPB'lerde su miktarı az ve çimento dozajı yüksek olmaktadır. Bunun sonucunda ara yüzey sıvısında çözülmüş alkali miktarı yüksek ve sıvı içerisindeki konsantrasyonu yüksek olacaktır. Bu durum YPB'de alkali-agrega oluşumuna sebebiyet verebilir (Akman, 2003).

2.6 Yüksek Performanslı Betonda Kullanılan Malzemeler

YPB tasarımı ve üretimi geleneksel beton yapımından daha karmaşıktır. Bunun sebebi içerisinde birden fazla bileşen (mineral ve kimyasal katkılar vs.) içermesidir. Bu malzemelerin fazlalığından dolayı dayanım sadece s/ç oranına bağlı değildir. YPB, yüksek dayanımlı agregası (iri ve ince), yüksek dozajda çimento (minimum çimento oranı 400 kg/m³), su, mineral ve kimyasal katkı malzemeleri kullanılarak üretilen özel bir betondur. YPB'nin üretiminde kimyasal katkı malzemeleri olarak süper akışkanlaştırıcılar, mineral katkı malzemeleri olarak ise silis dumanı, nano silika, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin, cam tozu, pirinç kabuğu külü, mermer tozu, doğal zeolit, kalker unu vb. katkı malzemelerinin kullanıldığı bilinmektedir (Ali vd., 2016; Henkensiefken vd., 2009a; Henkensiefken vd., 2009b; Sabet vd., 2013).

2.6.1 Çimento

Temel bir bağlayıcı olan çimento, beton ve harç üretimi için vazgeçilmez bir malzemedir. Çimento, su ile birleştiğinde çimento hamuru adı verilen plastik bir karışım ortaya çıkar. Çimento, su ile reaksiyona girdiği andan itibaren ekzotermik reaksiyonlar başlar ve bunun sonucunda çimento hamuru zamanla sertleşip dayanımı artan bir yapıya kavuşur. Çimento hamurunun göstermiş olduğu plastik davranışı nedeniyle taze betonu karıştırmak, kalıplara yerleştirmek ve sıkıştırmak mümkün olur. Çimento hamurunun sertleşmesiyle birlikte beton da zamanla sertleşerek dayanım kazanır. Yüksek dayanımlı beton için çimento seçiminde tam bir kalite program uygulayan üretici aranmalı, çimentonun fiziksel ve kimyasal deneyleri kullanıcı tarafından yapılmalıdır. 80-100 MPa mukavemet seviyesindeki beton üretimi için yüksek dayanımlı bir portland çimentosu gerekmektedir (Sümer ve Söyler, 2002). Bununla beraber, YBP'deki minimum çimento dozajı 400 kg/m^3 , su/bağlayıcı oranı ise 0.35'den daha düşük olmalıdır (Taşdemir vd., 2003).

2.6.2 Beton karma suyu

Karışım suyunun betonda iki önemli etkisi vardır. Bunlardan birincisi, çimentonun kimyasal reaksiyonu başlatması ile çimentonun hidrasyonunu tamamlayarak mukavemet kazandırmasıdır. İkincisi ise agrega ile çimento hamurunun birbirine yapışması için gerekli olan sudur. Bu suya 'işlenebilirlik suyu' denilmektedir. Beton özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek yabancı maddeleri içinde bulundurmayan bütün doğal kaynaklı sular beton üretiminde kullanılabilir (Şimşek, 2007).

2.6.3 Agrega

Yüksek dayanımlı beton elde etmek için agregaların, silt ve kil kirliliği içermemesi gerekir. Agreganın maksimum tane çapı süper akışkanlaştırıcı kullanıldığı durumlarda 25 mm, süper akışkanlaştırıcı kullanılmadığı durumlarda 10-16 mm olmalıdır. İyi bir aderans için kırma taş agrega kullanılması, şekli bozuk danelerin %5'i geçmemesi, düşük s/ç oranlı karışımlarda bir miktar su emen agrega seçilmesi, kaba agrega mekanik özelliklerinin yeterli düzeyde olması gerekmektedir. Ayrıca ince agrega olarak düşük s/ç oranları için kaba kum, yüksek dozda süper akışkanlaştırıcı kullanılacaksa ince bir kum

kullanılmalıdır. Kalker, kırma taş agrega kullanılması halinde doğal agregalara kıyasla %30-35 daha yüksek beton basınç dayanımları elde etmek mümkün olacaktır. Kalker kırma taşın çok iyi aderans sağladığı, agrega kırılma oranının ölçülmesi ile de kanıtlanmıştır (Sümer ve Söyler, 2002). Bu çalışmada harç üretimi yapılmış olup, ince agrega olarak doğal ve kırma kum kullanılmıştır. Kırma kum kırılmış tanelerden meydana gelen ince agregadır. Çakılın kırılması ile elde edilir. Doğal kum ise kırılmamış tanelerden meydana gelen ince agregadır (Çağlayan vd., 1999). Tüm bunlara ek olarak, YPH üretimi yapılarak elde edilen VYPH karışımlarından belirlenen taze, mekanik ve durabilite özellikleri sentetik vollastonit içeren YPB için bir temel olarak düşünülebilir.

2.6.4 Süper akışkanlaştırıcı katkılar

Son on yılda beton teknolojisinde meydana gelen en önemli gelişmelerden biri süper akışkanlaştırıcıların yaygın olarak kullanılmaya başlanması ve bunun getirdiği yüksek mukavemet olmuştur. Bu tür katkılar, çimento ve mineral katkıların su içinde topaklanmasını engelleyip daneleri dağıtarak, ancak çok miktarda su ile elde edebileceğimiz dispersiyonu az miktarda su ile ve betona herhangi bir yan etki vermeksizin elde etmemizi sağlamaktadır. Bu katkıların çimento+mineral katkı malzemesi ağırlığının %0.3-0.6'sı oranında kullanılması karışım suyunu %30 ve hatta daha fazla miktarlarda azaltmaya olanak sağlamaktadır. Bunun yanında süper akışkanlaştırıcılar, ısı çatlaklar oluşmadan büzülme ve sünme gibi problemleri de azaltmaktadır. Pratikte süper akışkanlaştırıcı kullanımının sağladığı fayda betonun daha işlenebilir olması dolayısı ile betonarme çeliğinin sık olduğu kesimlerde kolay bir yerleştirme ve iyi bir kompakte sağlamaktır. Süper akışkanlaştırıcılar kimyasal bileşimlerine göre, yoğun melamin formaldahid sülfonatlar, yoğun naftalin formaldahid sülfonatlar, modifiye edilmiş linyosülfonatlar ve bu üçüne çökme kaybını önleyici maddeler karıştırılarak üretilenler olarak dört ayrı sınıfa ayrılmaktadır (Sümer ve Söyler, 2002).

2.6.5 Mineral katkılar

Mineral katkılar, betonun bazı özelliklerini iyileştirmek veya betona yeni özellikler kazandırmak amacıyla çimento yerine kullanılan özellikle aktif silis içeriği yüksek olan, ince öğütülmüş malzemelerdir. Mineral katkılar çimento yerine kullanıldıklarından

dolayı çimentonun sebep olduğu doğal kaynak tüketimini azaltmakla birlikte CO₂ yayılımını da önemli ölçüde düşürmektedirler. Örneğin, Yang vd. (2014), yaptıkları çalışmada, beton içerisinde, %15-20 oranında kullanılan çimento esaslı malzemelerin portland çimentosu üretimiyle çok yakından ilişkili olan CO₂ yayılımında önemli bir azalma sağladığını göstermişlerdir. Blankendaal vd. (2014) tarafından yapılan çalışmanın sonucuna göre, beton karışımlarda uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi çimento esaslı bağlayıcıların kullanımı, çimento üretiminden dolayı oluşan olumsuz çevresel etkiyi %39'a kadar azaltabilmektedir. Ayrıca aktif silis içeriği yüksek olan mineral katkıları, su ve çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)₂ kristallerini, içeriğindeki silisle bağlayarak C-S-H jellerini oluşturmakta ve betona veya harca ek dayanım kazandırmaktadır. Bu nedenle, beton veya harç içerisinde, silis dumanı, nano silika, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin, cam tozu, pirinç kabuğu külü, mermer tozu, doğal zeolit, kalker unu gibi aktif puzzolanlar kullanılarak Ca(OH)₂ oluşumunun önlenmesi yüksek dayanımlı beton bileşiminin temelini oluşturmaktadır (Sümer ve Söyler, 2002).

2.6.5.1 Silis dumanı

Silis dumanı mineraline ait bir görsel Fotoğraf 2.1'de sunulmuştur. Süper incelikte tamamlayıcı bir çimento malzemesi olan silis dumanı, 1 µm'den daha az ortalama bir parçacık boyutuna sahip olan ve çimento parçacıkları arasında mikro-dolgu olarak rol alan mineral bir katkı malzemesidir (Liu ve Wang, 2017; Soliman ve Tagnit-Hamou, 2017; Zhang vd., 2011). Silis dumanı, silikon metali ya da ferrosilikon üreten endüstri sayesinde üretilir. Yüksek derecede puzolanik aktivitesinden dolayı çimento yerine silis dumanının eklenmesi hidratasyon ürünlerinin miktarını artırır ve Ca(OH)₂'nin önemli bir miktarını tüketmektedir. Böylece sertleşmiş durumdaki pastanın gözenek yapısını ve betonun ara yüzey geçiş bölgesini geliştirebilmektedir (Liu ve Wang, 2017; Shi vd., 2015; Zhang vd., 2016a). Bu nedenle, silis dumanı içeren betonun dayanımı ve dayanıklılığı çimentolu betonunkinden daha yüksektir (Liu ve Wang, 2017; Youm vd., 2016; Zhang vd. 2016b). Bununla birlikte, silis dumanı beton karışım sürecinde, kolay bir şekilde dağılmayan, 10 µm'den daha büyük parçacıklar halinde toplanma eğilimindedir (Diamond vd., 2004; Liu ve Wang, 2017). Silis dumanının fiziksel doldurma etkisi ve puzolanik aktivitesi sertleşmiş pastanın zayıflığını azaltırken, silis dumanının bir araya toplanması sertleşmiş pastanın zayıflamasına neden olabilir (Ji ve Cahyadi, 2003; Liu ve Wang, 2017; Zhang vd. 2016b). Yüksek dayanımlı beton tamamlayıcı malzeme olarak

silis dumanının kullanılmasıyla üretilebilir. ACI komitesi (ACI Committee 234, 1987), raporunda betonda silis dumanının kullanım sınırları ve çeşitli uygulamalarını sunmuştur. 28 günlük basınç dayanımı 100 MPa ve daha yüksek olan çok yüksek dayanımlı betonlar, tamamlayıcı çimento malzemesi olarak silis dumanının kullanılmasıyla üretilebilmektedir. Yogendran vd. (1991) yüksek dayanımlı betonların dayanım özelliklerindeki ilerlemeye göre en uygun silis dumanı kullanım seviyesinin %15 olduğunu tespit etmişlerdir (28 günlük basınç dayanımı 50 ile 70 MPa aralığında). Tamamlayıcı çimento malzemesi olarak silis dumanı içeren betonun basınç dayanımındaki maximum ilerleme 7 ve 28 günlük kür periyodunda meydana gelmektedir (Detwiler ve Mehta, 1989; Siddique vd., 2017). Zhou vd. (1995) daha yüksek su/bağlayıcı oranı ile üretilen yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanının çimento yerine %10-15 seviyelerinde kullanılmasının basınç dayanımı üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir (28 günlük basınç dayanımı 80 ve 115 MPa aralığında). Yu vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada ise nano-silikanın içermiş olduğu yüksek miktardaki silis içeriği sayesinde Ultra YPB'nin dayanımını artırdığını göstermişlerdir. Ayrıca silis dumanı kullanımı betonun durabilite özellikleri üzerinde harika bir etkiye sahiptir. Silis dumanının kullanılmasıyla birlikte, betonun porozite ve klor iyonu geçirimsizliği değerleri önemli derecede azalma göstermiştir (Cwirzen ve Penttala, 2005; Igarashi vd., 2005; Khan, 2003; Poon vd., 2006; Ramezani pour ve Malhotra, 1995; Song vd., 2010; Toutanji ve Bayasi, 1999). Son olarak, silis dumanı diğer puzolanik malzemelerle kıyaslandığında puzolanik aktivitesi daha yüksektir ve yüksek spesifik yüzey alanından dolayı daha verimli bir şekilde beton dayanımını geliştirebilir. Tüm bu nedenlerden dolayı silis dumanı yüksek dayanımlı beton tasarımında büyük bir öneme sahiptir (Senff vd., 2012; Yazıcı vd., 2010; Wang vd., 2017).

2.6.5.2 Uçucu kül

Uçucu kül mineraline ait bir görsel Fotoğraf 2.1'de gösterilmiştir. Enerji üretim tesislerinin ince bir atık malzemesi olan ve bu tesislerdeki katı atıkların büyük miktarlarını içeren uçucu kül, kömürün yakılmasından sonra elde edilir. Bu mineral genellikle puzolanik özelliğe sahiptir ve beton dayanımının gelişmesine katkı sağlamaktadır (Abbas vd., 2017; Munir vd., 2016; Oner vd., 2005). Uçucu külün betona eklenmesi sadece çimento ve ince agrega miktarını azaltmaz aynı zamanda su tüketimini de azaltır. Uçucu kül, betonun işlenebilirliğini, geçirimsizliğini ve modifikasyonunu

geliştirirken, hidrasyon ısısını ve ısıl genişmesini azaltmaktadır (Dinakar vd., 2008; Ukwattage vd., 2013; Wang vd., 2017). Bu önemli faydalarından dolayı bu mineral birçok araştırma ve projede yaygın olarak kullanılmıştır. Daha ince parçacıklarıyla uçucu kül yüksek dayanımlı beton üretiminde tamamlayıcı çimento malzemesi olarak silis dumanı yerine kullanılabilir. Sınıflandırılmış ince uçucu kül parçacıkları içeren harmanlanmış çimento pastası, sıradan uçucu kül içeren Portland çimento hamuru ve çimento hamuruyla kıyaslandığı zaman daha düşük bir ortalama gözenek çapı elde edilebilir (Chindapasirt vd., 2005; Wang vd., 2017). Choi vd. (2012), Chindapasirt vd. (2005) ve diğer birçok araştırmacı (Aydın vd., 2010; Givi vd., 2008; Obla vd., 2003; Subramaniam vd., 2005; Xie vd., 2002) daha ince uçucu kül parçacıkları içeren harmanlanmış çimento hamurlarında, harçlarda ve betonlarda daha yüksek basınç dayanımı bulunduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca belirtilen sonuçlara göre ultra ince uçucu kül içeren beton, ultra ince uçucu külün artan yüzey alanı ve daha küçük parçacık boyutundan dolayı daha uzun süreli durabiliteye ulaşabilmektedir (Shaikh ve Supit, 2015; Xie vd., 2002). Son olarak silis dumanı içeren betona kıyasla ultra ince uçucu kül içeren betonun otojen büzülmesinde önemli azalmalar ve daha yüksek bir büzülme çatlak direnci gözlemlenmiştir (Haque ve Kayalı, 1998; Hossain vd., 2007; Subramaniam vd., 2005; Xie vd., 2002).

Uçucu küller kimyasal kompozisyonlarına göre değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır. Son yıllarda geniş kabul gören sınıflandırma yöntemi uçucu külün içerdiği analitik CaO miktarına dayanmaktadır. Buna göre, CaO miktarı %10'un altında olan uçucu küller düşük kireçli ya da düşük kalsiyumlu, %10'un üstünde olan uçucu küller ise yüksek kireçli ya da yüksek kalsiyumlu uçucu küller olarak isimlendirilmektedir. ASTM C618'e (2015) göre uçucu küller iki geniş kategoriye ayrılmaktadır (Ünal ve Uygunoğlu, 2004).

1. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürlerden elde edilip;
 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%70$ şartını sağlayan küllerdir,
2. C sınıfı küller ise genelde linyitler ve yarı bitümlü kömürlerden elde edilip;
 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%50$ şartını sağlayan küllerdir.

Silikoaluminöz küller ASTM F sınıfına dâhildir. Silikokalsik uçucu küllerin kimi F sınıfı kimi C sınıfına, sülfokalsik uçucu küllerin birçoğu ise C sınıfına girerler (Ünal ve Uygunoğlu, 2004).

2.6.5.3 Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu mineraline ait bir görsel Fotoğraf 2.1’de verilmiştir. Yüksek fırın cürufu, demir üretmek için kullanılan yüksek fırınlardan elde edilen bir yan üründür. Yüksek fırın cürufu, durabiliteyi geliştirmek, yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton üretmek ve bunlarla birlikte çevresel ve ekonomik faydalar sağlamak için Portland çimentosunun yerine tamamlayıcı bir çimento malzemesi olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Ulubeyli ve Artır, 2015). Ulubeyli ve Artır (2015) yüksek fırın cürufunun geleneksel betonun işlenebilirliğini, mekanik özelliklerini ve kimyasal direncini artırmak için kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca Douglas vd. (1987) yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen betonların gelişen durabilite, işlenebilirlik ve ekonomik faydalar dâhil birçok avantaja sahip olduğunu rapor etmişlerdir. YPB üretiminde öğütülmüş yüksek fırın cürufu kullanılması ekonomik ve çevresel sorunlar açısından büyük öneme sahiptir. Bununla birlikte öğütülmüş yüksek fırın cürufu YPB’nin işlenebilirliğini ve dayanımını artırırken hidrasyon ısını, geçirimsizliğini ve porozitesini azaltır (Atis ve Bilim, 2007; Bijen, 1996; Shi vd., 2009). Aitcin (1998), yapmış olduğu çalışmada optimum bir performans elde edebilmek için bağlayıcı kütlelerinin %20’si yerine yüksek fırın cürufu kullanılmasını tavsiye etmiştir.

2.6.5.4 Metakaolin

Metakaolin mineraline ait bir görsel Fotoğraf 2.1’de sunulmuştur. Metakaolin genellikle 500-800 °C sıcaklıkta kaolinit kili kalsinasyonu (doğal kaolinin ısıtılması ve öğütülmesiyle) elde edilmektedir (Sabir vd., 2001; Shen vd., 2017; Siddique, 20017; Sujjavanich vd., 2017; Suwanapruk vd., 2003). Kaolinitten amorf mineral faza dönüşür ve bu mineral puzolanik hale gelmektedir (Cabrera ve Rojas, 2001; Ramezani pour ve Jovein, 2012; Sabir vd., 2001; Shen vd., 2017). Böylece doğal kaolinin ısıtılması ve öğütülmesiyle üretilen iyi ve etkili bir puzolanik malzeme oluşmaktadır (Sabir vd., 2001; Sujjavanich vd., 2017; Suwanapruk vd., 2003). Metakaolin çoğunlukla hidrasyon esnasında çimentodan çözülen $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girmektedir. Kristal ürünlerle birlikte ek C-S-H jelleri oluşmaktadır. Bu durum başlıca metakaolin/ $Ca(OH)_2$ oranına ve kür etme sıcaklığına bağlıdır (Bai vd., 2000, Murat, 1983; Shen vd., 2017). Önceki araştırmalar incelendiğinde bu mineralin, betonun mekanik dayanımını (Courard vd., 2003), gözenek yapısını (Coleman ve Page, 1997; Poon vd., 2001) kimyasal atağa karşı

direncini (Siddique, 2007) ve durabilitesini (Badogiannis ve Tsivilis, 2009; Morsy, 2005; Siddique ve Klaus, 2009) geliştirdiği görülmektedir. Ayrıca tamamlayıcı çimento malzemeleri arasında metakaolin kullanılarak üretilen beton, silis dumanıyla üretilen betonla aynı oranda yüksek dayanım ve durabiliteye ulaşmak için büyük bir öneme sahiptir. Bununla birlikte parçacık boyutu, silis dumanınınkinden daha büyüktür. Bu nedenle metakaolin silis dumanına göre daha az su ihtiyacına, daha iyi işlenebilirliğe ve daha az plastik atlağa sebep olmaktadır (Caldarone, 2008; Shen vd., 2017]. Silis dumanı sürekli artan talepten dolayı daha yüksek maliyete sahiptir (Shen vd., 2017; Tafraoui vd., 2009). Bu nedenlerden dolayı metakolin yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı beton için kaliteyi artıran en önemli katkılardan biri olarak dşnlebilir. Shen vd. (2017) buhar krl yüksek dayanımlı betonda metakaolin etkisini araştırmışlardır. Bu çalışmaya göre, çimentonun hidrasyonu metakaolinin varlığından dolayı hızlanmaktadır. C-A(S)-H jellerinde silisyum yerine alüminyum elde edilebilir ve $Ca(OH)_2$ tkutilir. Bu durum yüksek dayanımlı betonun dayanımını artırırken, ortalama gözenek çapını, toplam porozitesini düşürür ve betonun hacim genleşmesini azaltmaktadır (Shen vd., 2017). Tafraoui vd. (2016) metakaolinin ultra yüksek performanslı betonun oksijen difüzyonu geçirirliğini, klor iyonu geçirirliğini ve karbonatlaşmasını azalttığını belirtmişlerdir.

2.6.5.5 Cam tozu

Cam tozu mineraline ait bir görsel Fotoğraf 2.1'de gösterilmiştir. Betonun dayanım ve dayanıklılığını artırmak ve çevresel problemleri azaltmak için çimento yerine kullanılan bir diğer önemli mineral katkı malzemesi cam tozudur. Cam amorf bir yapıya ve yüksek silis (SiO_2) içeriğine sahiptir (Vijayakumar vd., 2013). Cam tozunun parçacık boyutu 0.075 mm ya da 0.038 mm'den daha az olduğu zaman, cam tozu puzolanik özellik gösterir ve istenilen dayanım ve dayanıklılığı elde etmek için beton ya da harca katkı sağlar (Soliman ve Tagnit-Hamou, 2016; Vijayakumar vd., 2013). Ayrıca daha önceki çalışmalara göre, alkali silika reaksiyonuna katkı sağlamaz (Vijayakumar vd., 2013). Son zamanlarda, cam tozunun parçacık boyutu dağılımı ve kimyasal kompozisyonu sayesinde beton ya da harç içerisinde alternatif bir tamamlayıcı malzeme ve ultra ince bir doldurucu olarak kullanılması için bazı yaklaşımlar yapılmıştır (Soliman ve Tagnit-Hamou, 2016). Orhan ve şahin (2016), öğütülmüş atık cam tozu içeren betonun basınç dayanımının geç yaşlarda, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklarda kontrol betonunun basınç dayanımına göre bir artış gösterdiğini rapor etmişlerdir. Sahip olduğu önemli özellikleri sayesinde cam tozu

YPB üretiminde de kullanım alanı bulmaktadır. Ali vd. (2016) atık cam tozuyla üretilen yüksek dayanımlı betonun, silis dumanıyla üretilen yüksek dayanımlı betona göre yüksek sıcaklıktaki mukavemetinin daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir.



Fotoğraf 2.1. Silis dumanı (a), uçucu kül (b), yüksek fırın cürufu (c), metakaolin (d) ve cam tozu (e) görüntüleri

2.6.5.6 Diğer mineral katkı malzemeleri

Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve cam tozu dışında pirinç kabuğu külü, mermer tozu, doğal zeolit ve kalker unu gibi diğer birçok mineral katkı malzemesi vardır. Ancak bu mineraller diğerleri kadar yaygın kullanım alanına sahip değildir. Bu nedenle bu mineraller üzerine yapılan çalışmalar sınırlıdır. Tüm bu mineral katkı malzemelerinin haricinde özellikle sahip olduğu iğnemsiz parçacık yapısıyla dikkat çeken, bir kalsiyum meta silikat (CaSiO_3) olan, doğal olarak oluşan ve aynı zamanda sentetik olarak da üretilen özel bir mineral daha vardır. Bu mineral bu çalışmanın da temel konusu olan vollastonit mineralidir. Bu mineral ayrı bir başlık altında detaylı olarak incelenmiştir.

2.7 Vollastonitin Tanımı ve Özellikleri

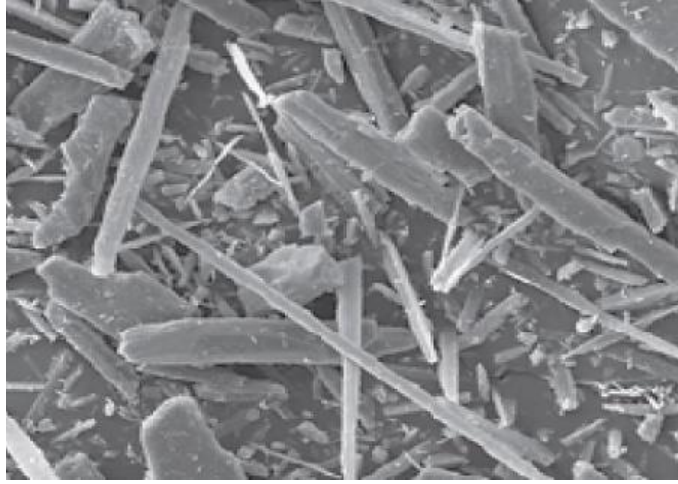
Teorik olarak %50'ye kadar CaO ve %55'e kadar SiO_2 'den oluşan vollastonit, alüminyum, demir, magnezyum, manganez, potasyum ve sodyum gibi elementleri de yapısında bulunduran özel bir mineraldir. Vollastonit, kalsit içeren kalker (CaCO_3 , kireç taşı) ve silikanın (SiO_2) yüksek sıcaklıkta genellikle sıcak magma içinde etkileşiminden oluşan bir kalsiyum meta silikattır (CaSiO_3) (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013; Kalla vd., 2013; Paul, 1977; Ransinchung ve Kumar, 2010; Soliman ve Nehdi, 2012). Bu mineral, kontak metamorfik kireç taşları ve volkanik kayalarda apatit, andradit, diyopsit, epidot, granat, sfen, plajyoklas feldspat, tremolit, kalsit ve kuvarzla birlikte bulunmaktadır

(Dumont, 2004; Kalla vd., 2013; Kogel vd., 2006; Sariiz, 1992). Vollastonitin oluşum mekanizması ise aşağıdaki gibi ifade edilebilir (Paul, 1977):



Doğal olarak oluşan aynı zamanda sentetik olarak da üretilebilen vollastonit minerali, metalik olmayıp iğnemi (iğne uçlu) kristal bir yapıya ve yüksek elastisite modülüne sahip, alkalın (pH 9.8), inert ve beyaz renkli bir mineraldir. Bazen krem, gri ya da çok soluk yeşil bir renge sahiptir. Özgül ağırlığı 2.9 civarında olan bu malzemenin Mohr skalasına göre sertliği 4.5-5 arasındadır. (Ciullo, 1996; Kalla vd., 2013; Kogel vd., 2006; Ransinchung ve Kumar, 2010; Soliman ve Nehdi, 2012). Bu mineralde, bireysel parçanın uzunluğu yaklaşık olarak 0.05-2.0 mm arasında ve enine boyutu yaklaşık olarak 10-100 µm arasında değişebilmektedir (Low ve Beaudoin, 1993). Doğal genleşme sıcaklık katsayısı $11.8 \times 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ 'dir. Bu özel mineral, $\beta\text{-CaO.SiO}_2$ ve $\alpha\text{-CaO.SiO}_2$ olmak üzere iki formda bulunur. $\beta\text{-CaO.SiO}_2$ doğal olarak ortaya çıkmaktadır ve $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar kararlıdır. $\alpha\text{-CaO.SiO}_2$ formdaki vollastonit ise $1150\text{-}1540 \text{ }^\circ\text{C}$ değerleri arasında kararlıdır ve yalancı vollastonit olarak adlandırılır. Yalancı vollastonit doğal olarak ortaya çıkmaz fakat sık sık eriyik ve cüruf olarak bulunur (Zhu vd., 2014).

Kırma ve öğütme işlemleri esnasında, vollastonitin sahip olduğu, kendine özgü dilinim özelliklerinden dolayı, iğne şekilli parçacıklar meydana gelir. Yüksek mukavemeti sağlayan temel etken de bu parçacık morfolojisidir. Yaygın bir kullanım alanına sahip olan vollastonit minerali, seramik karolarda; refrakterlerde, plastiklerin gerilme direncinin geliştirilmesinde büzülme çatlaklarının azalması için, diş bakımı kauçuk, duvar panosu vb. uygulamalarda, boyalarda kötü hava koşullarında oluşan aşınmaya karşı direnci önlemek için pH tamponu olarak kullanılır. Fotoğraf 2.2'de seramik uygulamalar için kullanılan bir vollastonitin parçacık morfolojisi verilmiştir. Parçacıkların iğnemselliği boy/çap oranı ile ifade edilir (Kogel vd., 2006; Ransinchung vd., 2009; Ransinchung ve Kumar, 2010).



Fotoğraf 2.2. Wollastonitin parçacık morfolojisi (NYCO Minerals, 2012)

2.7.1 Wollastonitin kullanım alanları

Sanayideki kullanım tarihi oldukça kısa olan wollastonit mikro lifleri 1950 yılına kadar sanayi piyasasında görülmemiştir. Ancak wollastonit mikro liflerin ilavesi ile seramik üzerinde, dayanım artışı ve diğer bazı özellikleri geliştirme gibi önemli ilerlemeler görülmüştür. Bu önemli avantajları sayesinde, plastik, seramik, metalurji, boya ve asbest ürünleri sanayisini kapsayan diğer sanayilerde sürekli olarak kullanılmıştır. 1999 yılında dünya çapında kullanılan wollastonit miktarı tahmini olarak 575000-625000 ton aralığındadır. Wollastonit minerali, plastik sanayinde; %37 oranında, seramik sanayinde; %28 oranında, metalurji sanayinde; %10 oranında, boya sanayinde; %10 oranında, sürtünme ürünlerinde; %9 oranında ve farklı sanayilerde; %6 oranında kullanım alanı bulmaktadır (Virta, 1999).

2.7.1.1 Plastik sanayi

Büyük bir pazara sahip olan plastik sanayisi, wollastonit mineralinin en fazla uygulama alanı bulduğu endüstridir (Degryse ve Elsen, 2003). Wollastonit üretimi tamamlanmış malzemelerin özelliklerine katkı sağladığı için plastik dolgu malzemesi pazarında diğer beyaz dolgu malzemeleriyle rekabet içerisinde. Bu sanayide bir dolgu malzemesi olarak wollastonitin popülerliği kimyasal saflık, ısıl kararlılık, ısıl iletkenlik, düşük su emme, düşük reçine gereksinimi gibi takviye edici özelliklerine bağlı olmaktadır (IARC, 1997). Wollastonit ilavesi sayesinde en yüksek kalitede dolgu malzemeleri elde

edilmektedir. Dolgu malzemelerine beyazlık ve yüksek parlaklık kazandırmasının yanı sıra bu ürünlerin çekme, çarpma ve eğilme özelliklerinin de gelişmesine katkı sağlamaktadır. Aşınma direncini ve kaymayan zemin döşemesindeki sürtünmeyi artıran bir mineral katkı malzemesidir. Vollastonit, talk ya da karbonat dolgu malzemeleriyle kıyaslandığında çok düşük su emilimine sahiptir ve reçine karışımlarından etkilenmez. Plastik yüzeyindeki düşük su emilimi sayesinde suya ve lekelenmeye karşı direnç kazandırır. Düşük elektrik iletkenliği yalıtkan plastiklerin üretimine olanak sağlamaktadır (Springer, 1994).

2.7.1.2 Seramik sanayi

Vollastonit; seramik karolarda, sağlık gereçlerinde, sofraya eşyalarında ve sanatsal ürünlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Seramik karolarda genellikle duvar karosunda kullanılmaktadır. Duvar karosu, vollastonit ilavesiyle birlikte dayanım, boyutsal homojenlik, düşük küçülme ve eğilme, düşük nem yayılımı ve hızlı pişme gibi avantajlar kazanmaktadır (Kogel vd., 2006).

Vollastonit, pişirilmemiş kil bünyelerini, yüksek hızlı presleme tekniği ve iğnemsiz yapısı sayesinde daha dayanıklı hale getiren, pişmemiş karoların nem çıkışına yardımcı olmasının yanı sıra nem genişlemesinin tekrarlanmasını azaltan, pişmiş ürünü deformasyondan kurtaran özel bir mineraldir. Sahip olduğu yüksek darbe direnci sayesinde kırılmayı azaltır. Duvar karosu yüzeyine iyi akustik özellikler kazandırır. Düşük ısıl genişleme katsayısına sahip olması sayesinde bünyesindeki diğer minerallerin çoğu zaman neden olduğu küçülmeyi önlemeyi sağlar. CO₂ yayılımının çok düşük (%1 seviyesinin altında) olması sayesinde geleneksel bünye mineralleri ile karşılaştırıldığında çok avantajlı bir durum oluşturur. Düşük gaz içeriği ile sırt yüzeyindeki beneklerin (pinhol) azalmasını sağlar ve ergime esnasındaki kabarmayı azaltır. Alkali elementler ya da safsızlıklar bulundurmadığından dolayı mükemmel bir izolatör olan, düşük bir sinterleme sıcaklığına (991-1196 °C) sahip olan ve ürüne beyazlık ve parlaklık kazandıran bu mineral, seramik ürünlerin mineralojik ve kimyasal özellikleri üzerinde yukarıda anlatılan özellikler gibi birçok olumlu etkiye sahiptir (Springer, 1994).

2.7.1.3 Metalurji sanayi

Metalurjik uygulamalarda, vollastonit genellikle düşük boy/çap oranıyla ya da toz (45 ya da 75 µm) boyutlarında kullanılır (Kogel vd., 2006). Düşük sıcaklıklarda ergime özelliğine sahip olan vollastonit, bu özelliği sayesinde sac yapımında uygulanan sürekli döküm işlemi için önemli bir mineraldir. Ayrıca bu özel mineral, cüruf şartlandırıcı olarak da kullanılmaktadır (Kogel vd., 2006).

2.7.1.4 Boya ve kaplama sanayi

Kaplamalarda, yüksek parlaklıktaki vollastonitin kullanımına, ilk kez Amerika Birleşik Devletleri pazarında (1950'lerin başlarında) başlanmıştır. Bu mineralin iğnemsiz yapısı, boya kaplamalarının mekanik mukavemetini, kötü hava şartlarında aşınmaya karşı direncini artırmaktadır. Ayrıca çatlak, kılcal çatlak ve zamanla oluşabilecek diğer problemlere karşı çok iyi direnç sağlamaktadır (IARC, 1997). Vollastonit minerali beyaz rengi (çok safken), düşük yağ absorpsiyonu, yüksek pH'larda (9.9) kararlı oluşu ve iyi ıslatma kabiliyeti gibi özelliklerinden dolayı, renk, akışkanlık ve küf direnci gibi özelliklerin gerektiği kaplamalarda tercih edilmektedir. Son zamanlarda, dış cephede kullanılan hem yağ hem de su bazlı emülsiyon boyalarında ve lateksler ile yol işaretleme boyalarında katkı ve dolgu malzemesi olarak kullanıldığı gözlemlenmektedir (IARC, 1997). Boya dolgu malzemesi olarak kullanılan bu mineral, beyaz renk ve parlaklık özellikleri sayesinde solgun boyalara açık parlak renk kazandıran bir katkıdır. Vollastonitin süspansiyonlardaki kuvvetli bazik özelliğine sahip olması iyi bir metal astar boyası bileşeni olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Polivinil asetat boyalarında asetik asit zamanla ayrışır ancak vollastonit takviyesiyle asitli ortamlarda boyayı korur ve stabilize eder. Vollastonit katkılı dış cephe boyaları, kendi kendini temizleme özelliğine sahiptir. Özel tane yapısı ile hava şartlarına karşı direnci artırır (Andrews, 1970; Fattah, 1994; Springer, 1994).

2.7.1.5 Asbest yerine kullanımı

Asbest yaygın olarak beton boru dökümünde mekanik mukavemet kazandırmak için kullanılır. Sağlık risklerinden kaynaklanan nedenlerden dolayı ABD ve Avrupa'da asbestin yerine vollastonit kullanılmaktadır. Yüksek boy/çap oranlı vollastonitin uzun

dilinim parçacıkları asbestin yerini alabilir (Springer, 1994). Son 20 yılda, vollastonitin çimento üretiminde, bazı sürtünmeli ürünlerde ve ateşe dayanıklı duvar levhası üretiminde kısa lifli asbest yerine kullanımını giderek artmıştır.

Vollastonit yaygın olarak iç ve dış mekanların duvar levhası uygulamalarında, çatı kiremitleri, kayraklar, özel şekilli yalıtım malzemeleri ve dış cephe kaplamalarının yanı sıra refrakter dışındaki yüksek ısıya dayanıklı yalıtkan levha uygulamalarında da kullanılan bir mineraldir.

Vollastonit fren pistonu, fren balatası ve debriyajlar gibi sürtünmeli ürünlerin üretiminde önemli bir katkı malzemesidir. Kuzey Amerika'da, sürtünmeli ürünlerin formulasyonunda kullanılan asbestin yerine, vollastonit (yüksek boy/çap oranlı) ve fiberler (metalik ile organik) kullanılmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nin dışındaki ülkelerde, vollastonit, contalardaki asbest yerine de kullanılmaktadır (IARC, 1997).

2.7.1.6 Diğer sanayi uygulamaları

Vollastonit, düşük miktarlarda, cam ve fiberglas endüstrisinde, enerji tüketimini azaltmak için kireçtaşı ve silika yerine katılmaktadır. Ek olarak, aşındırıcılarda, kaynak elektrotlarında, toprak şartlandırıcı ve bitki gübresi olarak, kağıtta dolgu malzemesi olarak ve yol malzemesi olarak kullanılmaktadır. Vollastonitin yeni bir kullanım alanı da sentetik kemik implantlarıdır. Kemik kayıplarında kullanılan bu implantlar β -vollastonit (genelde α -vollastonitten sentetik olarak üretilmiş form) içermektedir. Bu implantlar, kemik dokusuyla hızlı bir şekilde güçlü bağlar kurduğu için, omur protezlerinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Haner ve Çuhadaroğlu,2013).

2.8 Vollastonit Rezervleri

Önemli bir katkı malzemesi olan vollastonit mineralinin büyük rezervleri küresel vollastonit üretiminin çoğunu oluşturan Çin, Hindistan, Finlandiya, Meksika, İspanya, Birleşik Devletler, Avustralya ve Güney Afrika'dadır. Türkiye, Kanada, Şili, Kenya, Nabıbya, Sudan, Tajikistan ve Özbekistan ise önemli vollastonit kaynaklarına sahip olan ülkelerdir (Virta, 2011). Daha önceleri Türkiye'de üretimi yapılan vollastonit uzun süredir üretilmemektedir. Vollastonitin dünyada yıllık ortalama üretim miktarı 500.000-

600.000 ton aralığındadır. Çok sayıdaki kendine özgü özellikleri sayesinde vollastonit kullanımı, gün geçtikçe birçok uygulama alanında yaygınlaşmaktadır (Kogel vd., 2006).

Dünya görünür vollastonit rezervleri tahmini 90 milyon ton civarındayken, muhtemel rezervleri tahmini 270 milyon ton civarındadır. Ancak çoğu büyük yatak, tetkik edilmediği için rezerv miktarı kesin olarak bilinmemektedir (Virta, 2011; Virta, 2012). 1990 yılına göre kullanım alanı ve tüketim miktarı hızla artış gösteren vollastonitin 2010 yılındaki üretimi yaklaşık olarak % 48'lik bir artış göstermiştir. Ayrıca dünya vollastonit üretimi verileri incelendiğinde, son yıllara kadar birçok ülkede vollastonit üretiminin olmadığı da görülmektedir (Virta, 2011).

2.8.1 Türkiye'deki vollastonit rezervleri

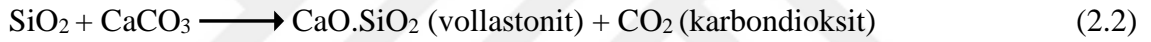
Vollastonit doğal kaynaklar sayesinde Türkiye'de sentetik olarak üretilebilecek olan bir malzemedir. Bu minerali üretebilmek için gerekli olan kalsit (CaCO_3) ve kuvarz kumu (SiO_2) gibi malzemeler ülkemizde yaygın olarak bulunmaktadır. Kuvarz kumu, granit türü kayaların ayrışması sonucu oluşan 2 mm'den küçük kuvarz (SiO_2) tanecikleridir. Sentetik olarak kuvarsitin öğütülmesi ile de elde edilebilir. Türkiye'de bulunan kuvarz kumu potansiyelinin yaklaşık 730 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. Türkiye'de başlıca kuvarz kumu bölgeleri İstanbul (Şile, Çatalca, Beykoz, Yalova), Tekirdağ (Saray - Safaalan), Zonguldak (Merkez - Kozlu - Virancık, Mekez - Kardeşler - Kokurdan) ve Sinop'tur (Kurşun ve İpekoğlu, 1995). Karbonatlı kayaları oluşturan kalsit mineralinin kimyasal yapısı %95-97 oranında CaCO_3 'tür. Çeşitli şekillerde kristal halde bulunur (rombaeder, skalenöeder şeklinde kristallenir). Camsı parlaklıkta, renksiz saydam yapıdadır. Kolay öğütülür ve beyaz renkli bir toz elde edilir. Sertliği Mohr skalasına göre 3, yoğunluğu ise 2.6-2.7 civarındadır. Ülkemizde kalsit adı ile üretilen mineral karbonatlı kayaların (kireç taşları, mermer, tebeşir) ana mineralidir (Akkaya ve Kesler, 2012). Türkiye'de mevcut en iri kristalli kalsit oluşum yerlerinden birisi Marmara Bölgesi ve Çanakkale Karabiga Bölgesidir. Granit kontağında oluşan kalsit yatakları yüksek beyazlıktadır ve öğütülmesi kolaydır. Fakat Ege Bölgesi ve Niğde'de bulunan oluşumlara göre beyazlığı daha düşüktür. Bunların dışında Anadolu'nun hemen her bölgesinde kalsit oluşumuna rastlamak mümkündür. Özellikle Niğde Bölgesinde son 10 yıl içerisinde çok hızlı üretim artışı yapan kalsit ocakları bulunmaktadır ve 10 milyon ton civarında rezerve sahiptir. Ancak çıkarılan kalsit yukarıda belirtilen birçok sektörde kullanılmasına rağmen

yapı sektöründe kullanımı bulunmamaktadır. Diğer bir deyişle kalsit beton içerisinde direkt olarak kullanıldığında beton performansını olumsuz etkilemektedir. Akkaya ve Kesler (2012) tarafından uçucu kül, silis dumanı ve mikro kalsit kullanılarak yapılan çalışmada, mikro kalsitli betonlarda işlenebilirlik kaybı ve priz hızlandığı görülmüştür. Erken yaş dayanım gelişimi uçucu kül ve silis dumanı katkılı betonlardan daha hızlı olmakla beraber ileri yaş dayanım değerindeki artış ve sülfat hasarına direnci düşüktür.

2.9 Doğal ve Sentetik Vollastonit

2.9.1 Doğal vollastonit

Magmatik kayalar ile kalkerlerin kontaktlarında ısı metamorfizma ürünü olarak meydana gelen vollastonitin oluşumu aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013).



Kuvartz ve kalsit, kararlı bir birleşmeyi düşük sıcaklıklarda oluşturur. Reaksiyon sıcaklığın yaklaşık 400-450 °C'ye yükselmesiyle başlamaktadır. Bu reaksiyon $1 \cdot 10^5$ Pa atmosfer basınç altında gerçekleşir ve kalsit veya kuvartz eriyiği bitinceye kadar devam etmektedir. Vollastonit formasyonu ile CO₂ yayılımı basıncı yükseltir ve bunun sonucu olarak reaksiyonun devam edebilmesi için yüksek sıcaklığa olan ihtiyaç daha da artmaktadır (950 °C'ye kadar olabilir). Bu sırada, CO₂ gazının doğal kırık ve çatlak zonlarına kaçma eğilimi basınç azalmasına sebep olmaktadır. Bu basınç düşmesi ile reaksiyon düşük sıcaklıklarda devam etmektedir. Fakat basınç yükseldiğinde reaksiyon sıcaklığında aniden artma gözlenmez. Aksine reaksiyon ve kalsit oluşumu gerçekleşir. Vollastoniti oluşturan diğer sebep ise nadiren yüksek miktarda karbon içeriği olan ergimiş kayadan (magma) vollastonitin direkt kristalleşmesidir. Bu magmaların kökeni tartışmalıdır. Ancak geçerli olan düşünce, magmanın muhtemelen alt kabuk ve üst manto kökenli olmasıdır (Andrews, 1970; DPT, 2001; Fattah, 1994; Kogel vd., 2006; Virta, 2001).

2.9.2 Sentetik vollastonit

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

2.9.2.1 Islak metot

Islak metot genellikle 200 °C'den daha düşük sıcaklıklarda ve yüksek basınç eşliğinde uygulanmaktadır. Bu metot başlangıç karışımının uygun bir kroze içerisinde eritilerek bir araya getirilmesi şeklinde gelişmektedir (Zhu, 2013). Mevcut 3 metot arasından ıslak metot kullanılarak en yüksek boy:çap oranına sahip vollastonit üretilebilir. Fakat, bu üretim yönteminde, genellikle yüksek saflığa sahip çözücüler (sitrik asit) ya da inorganik tuzlar $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ hammadde olarak kullanılmaktadır (Lin vd., 2007). Sitrik asit çevre ve sağlık sorunlarına neden olurken inorganik tuzlar ise daha pahalı ve daha az esnek vollastonit üretilmesine sebep olur. Bu nedenle bu metotta geri dönüştürülmüş malzeme kullanılmaz (Zhu, 2013). NaOH çözeltisi ile $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ çözeltisi karıştırılarak elde edilen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ süspansiyonu (CTAP+TEOS+ H_2O)'ya katılarak beyaz süspansiyon oluşturulur. Beyaz süspansiyon paslanmaz çelik içerisinde 180 °C sıcaklıkta 30 saat bekletildikten sonra oda sıcaklığında soğutulur. Filtrelenip yıkanmasının ardından 60 °C'de 72 saat kurutularak toz haline getirilir. Elde edilen toz 2 saat boyunca 800 °C'lik fırında yakılarak vollastonite dönüştürülür.

2.9.2.2 Katı hal reaksiyonu metodu

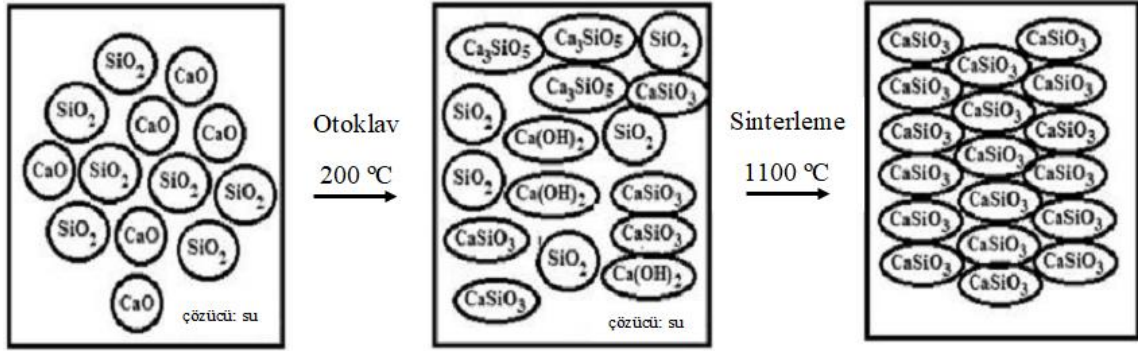
Katı hal reaksiyonu metodu, 800 °C üzerindeki sıcaklıklarda silikanın kalsiyum oksit veya kalsiyum karbonat ile reaksiyona girmesine dayanır. Bu metot, silis dumanı, kalsit, mermer tozu, doğal silisyumlu karbonatlar ve atık maddeleri faydalı hale getirir. Ancak genel olarak elde edilen ürünlerde iğnemsiz kristal yapı oluşmaz (Zhu, 2013).

Silikoferrokrom, kuvarz tozu ve diatomit SiO₂ kaynağı olarak kullanılır ve CaO kaynağı olan mermer tozu ile bilyeli değirmene koyulur. Kuru presten geçirilerek 900-1100 °C sıcaklıkta 4 saat boyunca sinterlenir ve düşük boy:çap oranına sahip vollastonit elde edilir.

2.9.2.3 Sıvı faz reaksiyonu metodu

Sıvı faz reaksiyonu metodu geri dönüşümlü materyaller kullanılarak yüksek boy:çap oranına sahip vollastonit üretmek için en ümit verici deney metodudur (Zhu, 2013). %50 SiO₂ + %30 CaO + %20 ZnO ya da %55 SiO₂ + %26 CaO + %13 ZnO + %2 MgO + %13 Al₂O₃ karışımları yüksek sıcaklığa dayanıklı platin kaplar içerisinde eritilerek, çekme yoluyla 1 mm çapında çubuklar haline getirilir. Böylece lifli kristal yapıya sahip vollastonit oluşturulur. Sıvı faz reaksiyon metodu ile iğnemsiz kristal yapıya sahip vollastonit üretilebilir ama reaksiyon için gerekli olan sıcaklık 1400 °C'den fazladır. Aynı zamanda deney sırasındaki şartları sağlamak diğer metotlara göre daha zordur. Bu metotta kullanılan sıvı faz asidik SiO₂ ve bazik CaO'nun 1:1 molar karıştırılmasıyla elde edilir ve farklı amaçlar için kullanılmak üzere bazı metal oksitler ilave edilir. Isıya dayanıklı kaplar metal oksitlerden üretildiği için içerisinde konulan malzeme ile tepkimeye girebilir. Bu sebeple kirlilik ve korozyon gibi problemler oluşur. 1400 °C sıcaklık üzerinde yapılacak bu tür deneylerde platin kap kullanılması gereklidir.

Verilen bilgilerden yola çıkarak, vollastonit üretimi için kullanılan her üç üretim metodunun da avantajları ve dezavantajları vardır. Uygulamalarda kullanmaya değer sentetik vollastonit üretim metodunun bulunması durumunda, endüstriyel alanda kullanılan doğal vollastonitin yerini zamanla sentetik vollastonitin alacağı düşünülmektedir. Bu nedenle özel bir üretim yöntemi belirlenmiş olup sinterleme işlemi sonucunda vollastonitin kristal yapısındaki değişim Şekil 2.1'de sunulmuştur.



Şekil 2.1. Vollastonitin kristal yapısındaki değişim

2.10 Vollastonitin Beton ve Harç Üzerine Etkileri

Soliman ve Nehdi (2014), vollastonit mikro fiberler içeren ultra YPH'nin işlenebilirliğinin kontrol harcından daha az olduğunu belirtmişlerdir. Daha yüksek vollastonit mikro fiber içeriğinin daha düşük işlenebilirliğe yol açtığını tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, Mathur vd. (2007a), vollastonit mineralinin betonun işlenebilirliğini azalttığını ve akışkanlaştırıcı kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir. Ayrıca Mathur vd. (2007a), vollastonit kullanımıyla beraber betonun basınç ve eğilme dayanımı değerlerinin arttığını tespit etmişlerdir. Buna paralel olarak, Kumar ve Ramujee (2017), çimento yerine kullanılan vollastonit mineralinin, harcın basınç dayanımını geliştirdiğini ve klor iyonu geçirimsizliğini önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Buna ek olarak, Soliman ve Nehdi (2012), vollastonit minerali arttıkça; mineralin içerdiği mikro fiberler sayesinde, basınç dayanımının arttığı, büzülme gerilmesinin azaldığı ve çatlığa karşı direncin arttığı (yüksek performans için en önemli unsurlardan biri) fakat eğilme dayanımında önemli bir iyileşmenin görülmediği sonucuna ulaşmışlardır. Bununla birlikte, betonun su emme, kuruma büzülmesi ve aşınma kaybı azalmış, donma çözülme direnci ve sülfata karşı durabilite özelliklerinde gelişme elde edilmiştir.

Ransinchung vd. (2009), %15'e kadar vollastonit ve %7,5'a kadar mikro silika kullanımının, mikro yapının gelişmesi ve gözenek boşluğundaki azalmadan dolayı, betonun su sızdırmazlığını önemli derecede geliştirdiğini belirtmişlerdir. Yine aynı çalışmada, Ransinchung vd. (2009), vollastonit ve mikro silikanın klor iyonu penetrasyonuna karşı direncin artmasını sağlayarak sertleşmiş betonun mikro yapısını düzenlediklerini tespit etmişlerdir. Kalla vd., (2015) SEM ve MIP sonuçlarına göre %15'e kadar vollastonit kullanımının, gözenekli ve sıkıştırılmış beton mikro yapısını azalttığını

belirtmişlerdir. Ransinchung ve Kumar (2010) ise %82.5 çimento, %10 vollastonit ve %7.5 oranında mikro silika kullanılmasıyla en yüksek basınç dayanımı değerlerini elde etmiştir. Wahab vd. (2017), harç üretiminde, vollastoniti çimento yerine kullanmışlar ve %10 vollastonit içeriğinin, eğilme dayanımı için sınır değer olduğunu tespit etmişlerdir. Kalla vd. (2013), vollastonit ve uçucu kül kombinasyonunu kullanarak yaptıkları çalışmada vollastonitin betonun basınç dayanımını, basınçlı su geçirimsizliğini ve klorür difüzyonunu olumlu yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Misra vd. (2011), çimento yerine kullanılan vollastonit mineralinin hava geçirimsizliği indeksini (basınç/dakika) iyileştirdiğini belirlemişlerdir.

Literatür çalışmaları sonuçlarına bakıldığında, her vollastonitin beton üzerinde farklı etkileri olduğu görülmektedir. Dolayısıyla doğal veya sentetik olarak elde edilen her vollastonit çeşidine bağlı olarak betonun mekanik ve durabilite özellikleri değişebilmektedir.

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada literatür çalışmalarından farklı bir yöntem kullanılarak üretilen sentetik vollastonitin YPH'nin taze, mekanik ve durabilite özellikleri üzerine etkilerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada sentetik vollastonit üretimi gerçekleşmiş, ikinci aşamada ise üretilen sentetik vollastonit, YPH üretiminde kullanılarak, YPH'lerin taze, mekanik ve durabilite özellikleri belirlenmiştir.

3.1 Sentetik Vollastonit Üretimi

Sentetik vollastonit üretimi, otoklav ve sinterleme yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu üretim yöntemi üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar; mekanokimyasal süreç, hidrotermal süreç ve sinterleme sürecidir. Hidrotermal otoklav tekniği (Fotoğraf 3.1) nem, basınç ve sıcaklık ile daha iyi kristal yapının oluşmasını sağlamaktadır.



Fotoğraf 3.1. Hidrotermal otoklav reaktörü

İlk olarak, SiO₂ küçük parçalara ayrılarak bilyeli değirmen içerisinde 350 RPM dönüş hızı ile 30 dakika öğütülerek toz haline getirildikten sonra elde edilen ürün 60 no'lu elekten elenerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Kuvartz ve bilyeli değirmene ait görseller Fotoğraf 3.2'de sunulmuştur.



Fotoğraf 3.2. Kuvartz (a) ve bilyeli değirmen (b)

Kireç taşı (CaCO₃), dakikada 40 °C artacak ve 1100 °C'de 1 saat bekleyecek şekilde ayarlanmış olan kül fırında sinterlenerek sönmemiş kireç (CaO) elde edilmiştir.



Kireç taşı, kül fırını, sinterleme sonunda elde edilen CaO ve öğütülerek elekten geçen SiO₂'ye ait görseller Fotoğraf 3.3'de gösterilmiştir.



a



b



c



d

Fotoğraf 3.3. Kireç taşı (a), kül fırını (b), sinterleme sonunda elde edilen CaO (c) ve öğütülerek elekten geçen SiO₂ (d)

CaO ve SiO₂ 1:1 mol oranında olacak şekilde karıştırılmış ve karışımın ağırlığı kadar saf su eklenmiştir. Doç. Dr. Orkun Ersoy'la beraber yaptığımız karışım hesabı ile her malzemeden ne kadar kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Kullanılacak her bir karışımda 67.296 gr CaO, 72.096 gr SiO₂ ve 139.4 gr saf su kullanacağı tespit edilmiştir. Minerallere ve suya ait görseller Fotoğraf 3.4'de ve minerallerin 1 mol'e karşılık gelen ağırlıkları da Çizelge 3.1'de verilmiştir.



Fotoğraf 3.4. 139.4 gr saf su, 67.296 gr CaO ve 72.096 gr SiO₂

Çizelge 3.1. CaO ve SiO₂ ağırlıkları

1 mol CaO	56.08 gr
1 mol SiO ₂	60.08 gr

Bilyeli kaba konulan malzemeler bilyeli değirmene güvenli bir şekilde yerleştirilir. Bilyeli değirmen 250 RPM hızında 30 dakika boyunca karıştırılır. Bu işlem mekanokimyasal etkileşimi sağlayacaktır. Elde edilen karışım teflon içerisine koyularak otoklava yerleştirilip 200 °C’de 24 saat boyunca bekletilir. Bilyeli kap ve otoklav için hazırlanan karışıma ait görseller Fotoğraf 3.5’de, teflonun yerleştirildiği otoklav ve etüve ait görseller ise Fotoğraf 3.6’da sunulmuştur.



a

b

Fotoğraf 3.5. Bilyeli kap (a) ve otoklav için hazırlanan karışım (b)



a



b

Fotoğraf 3.6. Teflonun yerleştirildiği otoklav (a) ve etüv (b)

24 saat sonunda otoklav fırından çıkarılarak oda sıcaklığına gelene kadar dışarıda bekletilmiştir. Otoklav açıldığında sertleşmiş bir halde tobermorit (kalsiyum silikat hidrat minerali) elde edilmiştir. Tobermorite ait görsel Fotoğraf 3.7’de gösterilmiştir. Tobermorit, mikrodalga fırına konulup, neminden kurtarılmış, patlatma işlemi ile otoklavdan çıkarılmıştır. Otoklav içerisinden çıkarılan numune NİĞTAŞ’a götürülerek öğütülmüş 40 no’lu kare gözlü elekten elenerek sinterleme için hazır hale getirilmiştir.



Fotoğraf 3.7. Tobermorit

Yaklaşık 250 gram öğütülmüş tobermorit porselen kaplar içerisinde kül fırınına koyulur. Kül fırını dakikada 40 °C artarak, 1100 C°’de 1 saat bekleyecek şekilde ayarlanmıştır. Sinterleme süreci üretimin katı hal reaksiyonunu oluşturmaktadır. Sinterleme süreci bu

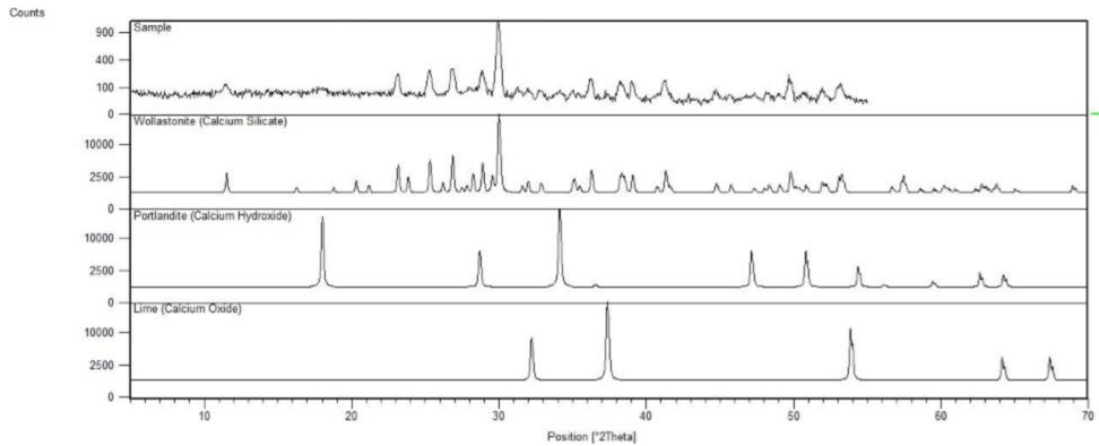
şekilde tamamlandıktan sonra vollastonit nemden uzak bir ortamda ağzı kapalı numune torbası içerisinde muhafaza edilmiştir. Tobermoritin kül fırına yerleştirilmesi ve vollastonite ait görseller Fotoğraf 3.8’de verilmiştir.



Fotoğraf 3.8. Tobermoritin kül fırına yerleştirilmesi (a) ve vollastonit (b)

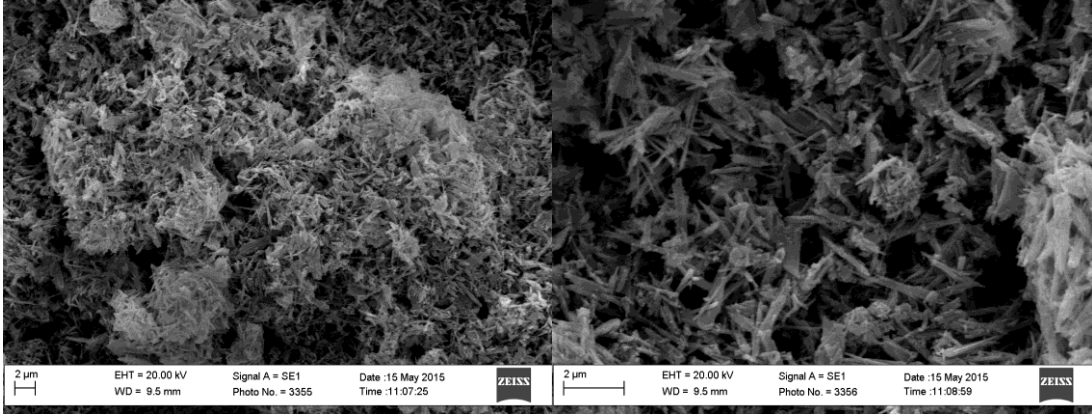
3.2 Üretilen Malzemenin XRD, SEM ve XRF Sonuçları

Şekil 3.1’de verilen XRD sonuçlarında görüldüğü üzere, orta ölçekli pikler beta vollastonit, büyük ölçekli pikler ise alfa vollastonit izlerini göstermektedir. Şekilden de görüldüğü üzere, analizi yapılan malzemenin, vollastonit ile benzer piklere sahip olması sebebiyle vollastonit olduğu kesinleşmiştir.



Şekil 3.1. XRD Analizi

Fotoğraf 3.9’da verilen SEM analizi sonuçlarına göre iğnemsî parçacık yapısının oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu özel mineral iğnemsî yapısı sayesinde sentetik kemik implantlarında kullanılmaktadır. Yani insan sağlığına da faydalıdır. Kemik kayıplarında kullanılan bu implantlar β -vollastonit içermektedir. Bu implantlar, kemik dokusuyla hızlı bir şekilde güçlü bağlar kurduğu için, omur protezlerinde etkili bir şekilde kullanılmaktadır (Haner ve Çuhadaroğlu,2013).



Fotoğraf 3.9. SEM Analizi

Yapılan XRF analizi sonrasında ise Çizelge 3.2’de görüldüğü gibi üretilen vollastonitin %55.53 oranında CaO ve %40.14 oranında SiO₂ bileşenlerini barındırdığı belirlenmiştir.

Çizelge 3.2. XRF Sonuçları

Bileşen	% Miktar	% Sapma
CaO	55.530	0.250
SiO ₂	40.140	0.250
MgO	2.550	0.080
Al ₂ O ₃	0.801	0.040
Na ₂ O	0.363	0.018
Fe ₂ O ₃	0.300	0.015

Sonrasında ASTM C618’e (2015) göre hazırlanan ve çimento yerine ağırlıkça %20 oranında vollastonit kullanılarak üretilen çimento harçları üzerinde sarsma tablası ile su miktarı belirlenerek puzolonik aktivite testi yapılmıştır. Sentetik vollastonitin betonda mineral katkı malzemesi olarak kullanımına yönelik yapılan ön çalışma neticesinde

puzolanik aktivite değeri ASTM C618 (2015) standardında belirlenen minimum %75 seviyesinin üzerinde bir değer olarak %81 olarak belirlenmiştir. Bu nedenle üretilen sentetik vollastonitin betonda katkı malzemesi olarak kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır.

3.3 YPH Tasarımında Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

3.3.1 Çimento

TS EN 197-1 (2002) standardına uygun CEM I 42,5 R tipi Normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait görsel Fotoğraf 3.10.'da, çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3.'de, elek analizi ise Şekil 3.2.'de gösterilmiştir.

3.3.2 Vollastonit

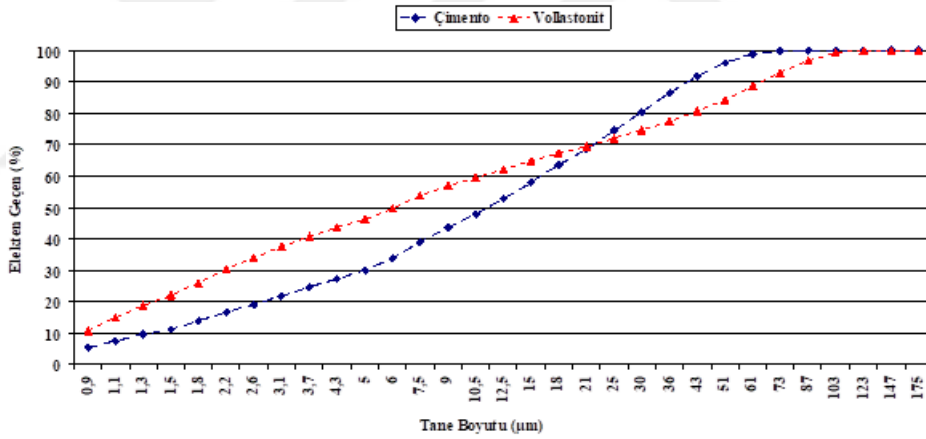
Kireç taşının (CaCO_3) sinterlenmesi ile oluşan CaO diğer adıyla sönmemiş kireç ve SiO_2 (silis) minerallerinin hammadde olarak kullanıldığı özel bir yöntem sonucunda üretilen sentetik vollastonit, çimento tamamlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Sentetik vollastonite ait görsel Fotoğraf 3.10.'da, sentetik vollastonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3.'de, elek analizi ise Şekil 3.2.'de sunulmuştur.



Fotoğraf 3.10. CEM I 42,5 R Portland çimentosu (a) ve sentetik vollastonit minerali (b)

Çizelge 3.3. Çimento ve vollastonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Analiz (%)	Çimento	Vollastonit
CaO	62.58	55.53
SiO ₂	20.25	40.14
Al ₂ O ₃	5.31	0.801
Fe ₂ O ₃	4.04	0.30
MgO	2.82	2.55
SO ₃	2.73	-
K ₂ O	0.92	-
Na ₂ O	0.22	0.363
Kızdırma Kaybı	2.96	-
Özgül Ağırlık	3.15	3.09
İncelik Modülü (m ² /kg)	326	-



Şekil 3.2. Çimento ve vollastonitin elek analizi

3.3.3 Süper akışkanlaştırıcı (SA) ve harç karışım suyu

Özgül ağırlığı 1,07 olan polikarboksilik eter tipi yüksek oranda su azaltıcı bir süper akışkanlaştırıcı, istenilen işlenebilirliği elde etmek için tüm karışımlarda kullanılmıştır. Kullanılan süper akışkanlaştırıcı eski adı glenium 51 olan masterglenium 51'dir. Vollastonitin işlenebilirliğe olan etkisini tam olarak belirleyebilmek için tüm karışımlarda aynı oranda süper akışkanlaştırıcı (22.5 kg/m³) kullanılmıştır. YPH karışımında karışım

suyu olarak ise içilebilir nitelikteki çeşme suyu kullanılmıştır. Süper akışkanlaştırıcıya ve harç karışım suyuna ait görseller Fotoğraf 3.11.'de gösterilmiştir.



Fotoğraf 3.11. SA'nın olduğu kap (a), süper akışkanlaştırıcı (b) ve su (c)

3.3.4 İnce agregalar

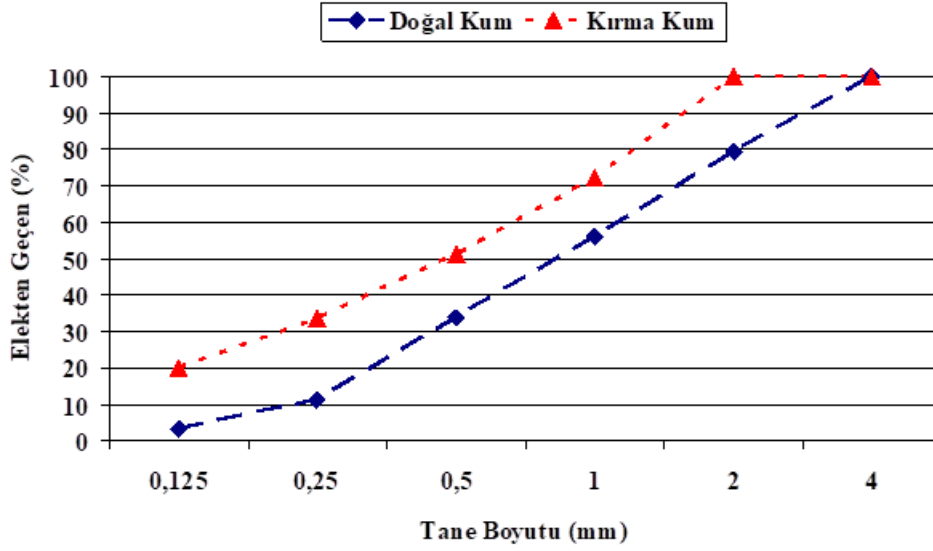
Karışımlarda ince agrega olarak doğal kum ve kırma kum kullanılmıştır. Bu agregalar Niğde iline aittir. İnce agregalara ait görseller Fotoğraf 3.12'de ve agregaların fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.4'de, elek analizi ise Şekil 3.3'de sunulmuştur.



Fotoğraf 3.12. Doğal kum (a) ve kırma kum (b)

Çizelge 3.4. Doğal kum ve kırma kumun özellikleri

İnce Agregalar	Doğal Kum	Kırma Kum
Tane Boyutu	0-4 mm	0-2 mm
Özgül Ağırlık	2.67	2.63



Şekil 3.3. Doğal kum ve kırma kumun elek analizi

3.4 YPH Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü

3.4.1 VYPH karışım oranları

Bu çalışmada su/bağlayıcı oranı 0.33 olarak sabit tutulan 5 farklı YPH üretilmiştir. Bu harçlara ait karışım oranları Çizelge 3.5’de sunulmuştur. Karışımlardaki toplam bağlayıcı içeriği (çimento+vollastonit) 500 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Yayılma çapındaki değişimleri net olarak belirleyebilmek için süper akışkanlaştırıcı miktarı da sabit tutulmuştur. İlk olarak kontrol karışımı (VYPH0), hiç vollastonit eklenmeksizin bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılması sonucu üretilmiştir. Diğer karışımlarda ise, sentetik vollastonit, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Buna bağlı olarak VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 olarak isimlendirilen YPH karışımları elde edilmiştir.

Çizelge 3.5. VYPH karışım oranları (1 kg/m³)

Karışım	(S/B)	Su	Çimento	Vollastonit	Doğal Kum	Kırma Kum	SA
VYPH0	0.33	165	500	0	1254,60	529,63	22,5
VYPH3	0.33	165	485	15	1254,43	529,56	22,5
VYPH6	0.33	165	470	30	1254,26	529,49	22,5
VYPH9	0.33	165	455	45	1254,08	529,41	22,5
VYPH12	0.33	165	440	60	1253,91	529,34	22,5

3.4.2 VYPH üretim prosedürü

Harçlar standart bir harç karıştırma mikseri yardımıyla ASTM C305-12'ye (2017) uygun olarak karıştırılmıştır. YPH üretimiyle ilgili bazı görseller Fotoğraf 3.13, Fotoğraf 3.14 ve Fotoğraf 3.15'de sunulmuştur. Karıştırma işlemi aşağıdaki sırayla gerçekleştirilmiştir.

- Tüm karıştırma suyu ve SA kabın içine konulur,
- Bağlayıcı malzemeler (çimento+vollastonit) suya eklenir sonra mikser çalıştırılır ve 30 saniye boyunca düşük hızda (140±5 r/dak) karıştırılır,
- Doğal kum ve kırma kum diğer bir 30 saniyede karışıma yavaşça eklenir,
- Mikser durdurulur, orta hıza (285±10 r/dak) geçilir ve 30 saniye karıştırılır,
- Mikser tekrar durdurulur ve 90 saniye bekletilir. Bu aralığın ilk 15 saniyesi boyunca mikserin kenarlarında hızla kazıma yapılarak yan tarafında toplanmış olabilecek harç, mikserin içindeki harca eklenir ve kalan 75 saniye mikser kabının üzeri bir havlu ile kapatılır ve bekleme alınır,
- Orta hızda (285±10 r/dak) 60 saniye karıştırılarak karıştırma işlemi tamamlanır.

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra harcın belirli bir miktariyle sarsma tablası yardımıyla yayılma deneyi yapılmıştır. Yayılma deneyi için kullanılan bu harç tekrar mikser konulup orta hızda (285±10 r/dak) 60 saniye daha karıştırılmıştır. Tüm bu işlem adımlarının sona ermesiyle birlikte, karışımlar kalıplara dökülmüş ve vibrasyonla (sarsma tablası yardımıyla) sıkıştırılmıştır.

Basınç, eğilme ve ultrasonik titreşim hızı deneyleri için her karışımdan 40x40x160 mm boyutlarında toplam altı tane prizmatik numune alınmış olup bunların yarısı 28. günde yarısı ise 90. günde test edilmiştir. Kılcal su geçirimsizliği ve hızlı klor geçirimsizliği deneyleri için her karışımdan 100x200 mm boyutlarında 4 tane silindir numune alınmış olup, bunların 2'si 28. günde, kalanı ise 90. günde test edilmiştir. Alınan silindir

numunelerin her birinden 50 mm uzunluğunda 3 adet parça, kesim işlemiyle birlikte elde edilmiştir. Böylece kılcal su geçirimsizliği ve hızlı klor geçirimsizliği deneyleri için her test yaşında 3'er adet numune elde edilmiştir. Taze birim ağırlık, alınan silindir numuneler kullanılarak, sertleşmiş birim ağırlık ise 28. günde prizmatik numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Hazırlanan numunelerin yüzeyleri nemli bir bez yardımıyla örtülerek su kaybının önlenmesi sağlanmıştır. Daha sonra, numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak kür havuzuna konulmuş ve deney gününe (28. ve 90. gün) kadar bekletilmiştir.



a

b

Fotoğraf 3.13. Karışımında kullanılan malzemeler (a) ve harç mikseri (b)



a

b

Fotoğraf 3.14. Prizmatik numunelerin sarsma tablasında sıkıştırılması (a) ve silindir numunelerin sarsma tablasında sıkıştırılması (b)



a

b

Fotoğraf 3.15. Prizmatik ve silindir numunelerin 24 saat kalıpta üzeri örtülü halde bekletilmesi (a) ve harç numunelerin kür havuzunda bekletilmesi (b)

3.5 Deneysel Çalışmalar (Taze ve Sertleşmiş Harç Deneyleri)

3.5.1 Taze harç deneyleri

3.5.1.1 Yayılma deneyi

YPH'lerin yayılma çapları ASTM C1437-15'e (2017) göre belirlenmiştir. Bu deneye ait görüntüler Fotoğraf 3.16, Fotoğraf 3.17 ve Fotoğraf 3.18'de sunulmuştur. Deney standardına göre, yaklaşık 25 mm kalınlığında bir harç tabakası akış kalıbına konmuş ve 20 kez şişlenmiştir. Sonra kalıbın tamamı harçla doldurularak 25 mm kalınlığındaki birinci tabakaya uygulanan işlemin aynısı uygulanmıştır. Kalıbın yüzeyi mala yardımıyla düzeltilmiştir. Karıştırma işlemi tamamlandıktan 1 dakika sonra harç kalıptan çıkarılmıştır. Aynı anda kronometre çalıştırılarak yayılma tablasının kolu yardımıyla yayılma tablası, 15 saniyede 25 defa düşürülmüştür. Bu işlemin ardından kumpas yardımıyla harcın yayılma çapı ölçülerek deney tamamlanmıştır.



a

Fotoğraf 3.16. Yayılma tablası ve akış kalıbı



a

b

c

Fotoğraf 3.17. Birinci tabakanın şişenmesi (a), kalıp yüzeyinin mala yardımıyla düzeltilmesi (b) ve kalıbın harçtan kaldırılması (c)



a

b

Fotoğraf 3.18. 15 saniyede yayılma tablasının 25 defa düşürülmesi (a) ve yayılma çapının ölçülmesi (b)

3.5.1.2 Taze birim ağırlık deneyi

YPH numunelerinin taze haldeki birim ağırlığını belirlemek amacıyla 10 cm çapında ve 20 cm uzunluğunda silindir kalıplar kullanılmıştır. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.19’da gösterilmiştir. İlk olarak silindir kalıp boş halde tartılmış daha sonra 3 aşamada sarsma tablasında sıkıştırma işlemi yapıldıktan sonra kalıbın yüzeyi mala yardımıyla düzeltilmiştir. Kalıp dolu haliyle tekrar tartılmıştır. Kalıbın dolu ve boş ağırlığı arasındaki fark silindirin hacmine bölüldükten sonra YPH’lerin taze haldeki birim ağırlıkları belirlenmiştir. Bu deney için 4 adet silindir kalıp kullanıldığı için nihai sonuç 4 numunenin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.



a

b

Fotoğraf 3.19. Silindir kabın boş ağırlığı (a) ve silindir kabın dolu ağırlığı (b)

3.5.2 Sertleşmiş harç deneyleri

3.5.2.1 Sertleşmiş birim ağırlık deneyi

YPH numunelerinin sertleşmiş haldeki birim ağırlıklarını belirlemek için 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılmıştır. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.20'de sunulmuştur. Bu deney sadece 28. günde 3 numune üzerine uygulanmıştır. Numuneler kür havuzundan çıkartılıp hava ortamında kurutulduktan sonra ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra ağırlıklar numune hacmine bölünmüştür. 3 numunenin ortalaması alınarak sertleşmiş harcın birim ağırlığı tespit edilmiştir.



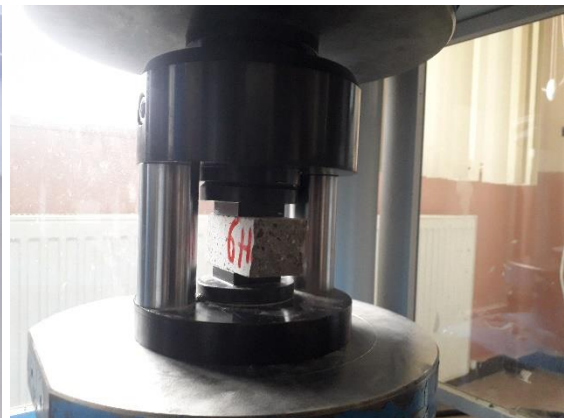
Fotoğraf 3.20. Prizmatik numunenin ağırlık tespiti

3.5.2.2 Basınç deneyi

YPH'lerin basınç dayanımı ASTM C349-14'e (2017) göre belirlenmiştir. Basınç deneyine ait görseller Fotoğraf 3.21'de gösterilmiştir. Basınç deneyi, eğilme dayanımını belirlemek için kullanılan 4x4x16 cm boyutlarındaki prizma numunelerden elde edilen parçalar kullanılarak 28. ve 90. günde yapılmıştır. Dolayısıyla her bir test yaşı için 6 parça kullanılmıştır. Numunelere 0.9 kN/s yükleme hızı uygulanmıştır. Numunelerin basınç dayanımı elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir.



a



b

Fotoğraf 3.21. Eğilme deneyinden elde edilen 6 parça (a) ve basınç deneyi cihazı (b)

3.5.2.3 Eğilme deneyi

VYPH numunelerinin eğilme dayanımı ASTM C348-14'e (2017) göre belirlenmiştir. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.22'de sunulmuştur. Eğilme deneyi hem 28. günde hem de 90. günde 4x4x16 cm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca numunelere 0.2 kN/s yükleme hızı uygulanmıştır. Her iki test yaşı için 3 adet prizmatik numune kullanılmıştır. Numunelerin eğilme dayanımı 3 numunenin ortalaması alınarak hesaplanmıştır. Son olarak bu deney yöntemi yardımıyla eğilmeyi test etmek için kullanılan harç prizmalarının ayrılan kısımları ASTM C349-14 (2017) test metoduna paralel olarak basınç dayanımının belirlenmesi için kullanılabilir.



Fotoğraf 3.22. Eğilme deneyinde kullanılan 4x4x16 cm boyutlarında prizmatik numuneler (a) ve eğilme deneyi cihazı (b)

3.5.2.4 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi

Tahribatsız bir deney yöntemi olan ultrasonik titreşim hızı deneyi inşaat mühendisliğinde kullanılan çok yaygın bir tekniktir. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.23'de gösterilmiştir. Bu deney metodu uygulama açısından çok basittir. UTH deneyi ultrasonik dalganın numunenin bir ucundan diğer ucuna ilk varış süresini ölçmektedir. UTH, ASTM C597-16'ya (2016) göre uygulanan standart bir ASTM deneyidir. Standart, betonun veya harcın göreceli kalitesinin ve bazı kusurlarının (boşluklar, çatlaklar ve onarımlarının etkinliği vb.) değerlendirilmesine olarak sağlamaktadır. UTH testleri 4x4x16 cm boyutlarında, 3 prizmatik harç numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu test 28. ve 90. günde harcın 16 cm'lik kısmına uygulanmıştır. Bir numuneden 4 adet olmak üzere

toplamda her test yaşı için her bir karışımdan 12 adet okuma alınmıştır. Daha sonra bu 12 değerin ortalaması deney sonucu olarak tespit edilmiştir.



Fotoğraf 3.23. 16 cm uzunlukta UTH ölçümü

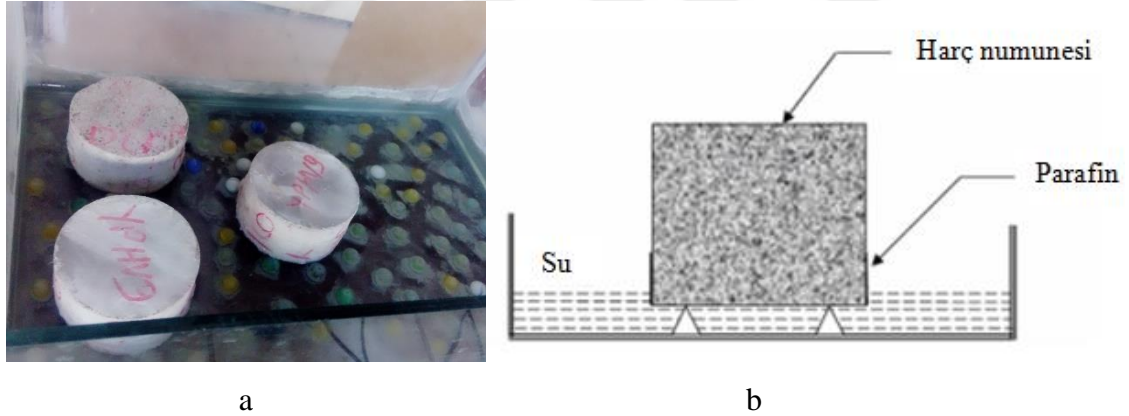
3.5.2.5 Kılcal su geçirimliliği deneyi

Kılcal su geçirimliliği deneyi, 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda üretilen silindir numunelerden kesilen, 100 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda 3 adet numune üzerinde uygulanmıştır. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.24 ve Fotoğraf 3.25’de sunulmuştur. Deneyden önce numuneler 24 saat boyunca $100\pm 5^{\circ}\text{C}$ ’lik bir etüvde kurutulmuştur. Daha sonra numunelerin su emmeye bırakılacak yüzeylerinin yan tarafları su geçirimliliğini engellemek için silikon (parafin) kullanılarak kaplanmıştır. Çevresi silikon ile kaplanmış deney numuneleri, tabanları ince bir su tabakasıyla temas içinde olacak şekilde küçük bir havuz içerisine yerleştirilmiştir. Kılcal su geçirimliliği değerleri, suyun yaklaşık olarak 5 mm altında kalan bilyeler üzerinde ölçülmüştür. İlk olarak, numuneler kuru halde tartılmıştır. Daha sonra su içerisine bırakılan numunelerin ağırlıkları sırasıyla, 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64. dakikalarda numunelerin ıslak yüzeyi kuru bir bezle kurulandıktan sonra

tartılmıştır. Dolayısıyla kılcal su geçirimsizliği, birim kesit alanı başına harcın zamanla emdiği su miktarıyla değerlendirilmiştir. Deney tüm karışımlara 28. ve 90. günde uygulanmıştır. Her iki test yaşı için de 3 adet numune kullanılmış olup, sonuçlar ortalama alınarak belirlenmiştir.



Fotoğraf 3.24. Etüvde kurutulan numuneler (a) ve silikonlanmış numuneler (b)

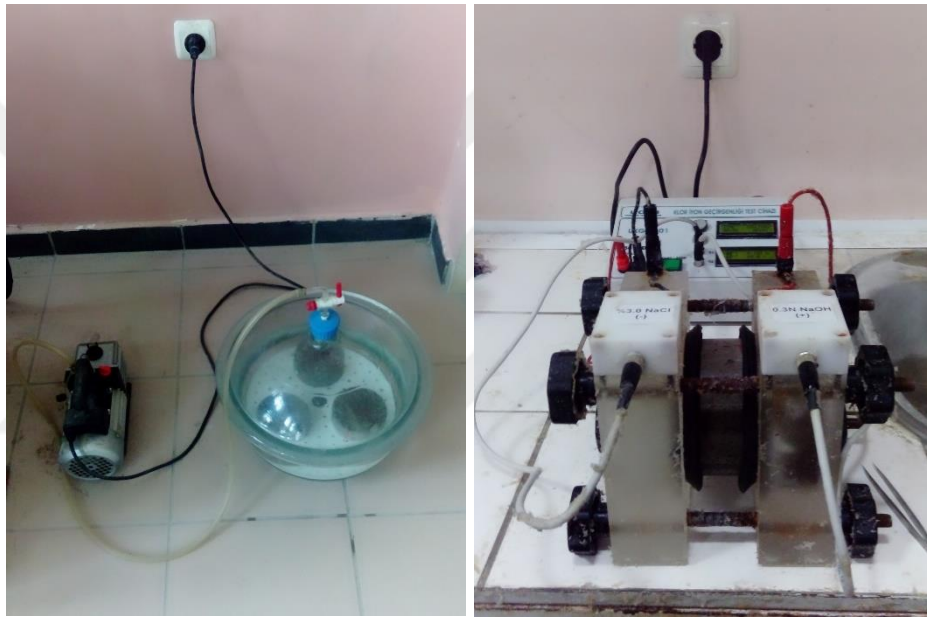


Fotoğraf 3.25. Kılcal su geçirimsizliği testi (a) ve kılcal su geçirimsizliği test düzeneği (b)

3.5.2.6 Hızlı klor geçirimsizliği deneyi

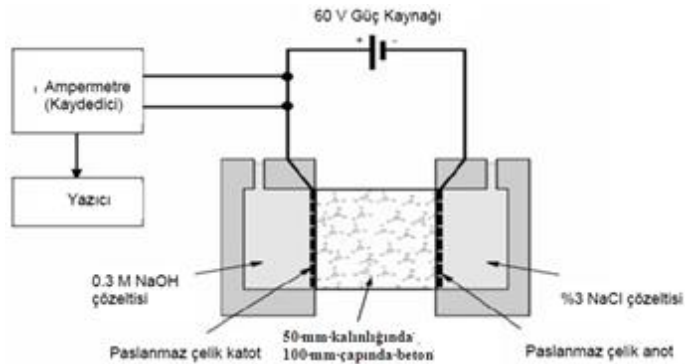
Hızlı klor geçirimsizliği deneyi beton veya harcın elektriksel iletkenliği esasına dayanır. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.26'da gösterilmiştir. Deney, 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda üretilen silindir numunelerden kesilen, kalınlığı 50 mm ve çapı 100 mm olan silindir numuneler üzerinde ASTM C1202 (2012) standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu standarda göre geçen elektriksel yük miktarı (Coulombs) ve buna karşılık gelen derecelendirme Çizelge 3.6'da sunulmuştur. ASTM C1202 (2012)

standardına göre, numuneler 2 saat boyunca vakumda bekletilerek içindeki havanın alınması sonucu suya doymun hale getirilmiştir. Numuneler vakumdan çıkarıldıktan sonra bir tarafında 0.3 NaOH ve diğer tarafında %3 NaCl çözeltisi bulunan deney hücresi içerisine yerleştirilmiştir. Ardından 60 V sabit potansiyel fark uygulanarak harç diskten geçen elektrik akım şiddeti miktarı belli aralıklarla kaydedilir. 6 saat süren deney sonunda, numuneden geçen toplam akım, akım-zaman grafiği altında kalan alan hesaplanarak (Coulombs) belirlenir. Hızlı klor geçirimliliği deneyi hazırlanan silindir numuneleri üzerinde (3 adet) 28. ve 90. günlerde gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar bu 3 numunenin ortalaması alınarak tespit edilmiştir.



a

b



c

Fotoğraf 3.26. Vakum cihazı (a), hızlı klor geçirimliliği test cihazı (b) ve hızlı klor geçirimliliği test düzeneği (c)

Çizelge 3.6. Hızlı klor geçirimliliği deneyi sınır değerleri

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

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışmanın bu kısmında YPH'nin, taze özelliğini belirlemek için uygulanan yayılma deneyinin ve YPH'nin, taze ve sertleşmiş birim ağırlık deneylerinin sonuçları yorumlanmaktadır. Ayrıca 28. ve 90. günlerde YPH'ye uygulanan basınç ve eğilme deneylerine ek olarak ultrasonik titreşim hızı deneyi, kılcal su geçirimsizliği ve hızlı klor iyonu geçirimsizliği deneylerinden elde edilen sonuçlar da literatür bilgileri ışığında değerlendirilmiştir.

4.1 Yayılma Çapı

VYPH karışımlarından ölçülen yayılma çapları Fotoğraf 4.1, Fotoğraf 4.2, Fotoğraf 4.3, Fotoğraf 4.4 ve Fotoğraf 4.5'de sunulmuştur. Bu sonuçların grafik halindeki sunumu ise Şekil 4.1'de gösterilmiştir. VYPH0, VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 karışımlarının yayılma çapları fotoğraflarda ve şekilde de görüldüğü gibi sırasıyla, 140.35, 138.49, 134.34, 126.31 ve 124.60 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, çimento yerine ikame edilen vollastonit mineralinin kullanım yüzdesi arttıkça yayılma çapı azalmıştır.

Ransinchung ve Kumar (2010) tarafından yapılan çalışmada, %100 normal portland çimentosu ve %100 vollastonit içeren iki ayrı karışımın normal kıvamı için gereken suyun sırasıyla %32 ve %65 olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, kullanılan vollastonit yüzdesi arttıkça süper akışkanlaştırıcının miktarının da arttığını tespit etmişlerdir. Dolayısıyla vollastonit minerali işlenebilirliği azaltmaktadır. Bağlayıcı malzemelerin kıvamı ve işlenebilirliği malzemenin tipine ve inceliğine bağlı olmaktadır (Ganesan vd., 2007; Rao, 2003; Temiz vd., 2007). Vollastonit normal portland çimentosundan daha ince bir malzeme olduğu için daha yüksek yüzey alanına sahiptir. Bu nedenle çimentoyla aynı normal kıvamı ve işlenebilirliği elde etmek için vollastonit içeren karışımlar daha fazla suya ihtiyaç duymaktadır (Ransinchung ve Kumar, 2010). Ayrıca Mathur vd. (2007a), vollastonit mineralinin betonun işlenebilirliğini azalttığını ve akışkanlaştırıcı kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir.

Soliman ve Nehdi (2014), vollastonit mikro fiberler içeren ultra YPH'nin işlenebilirliğinin kontrol harcından daha az olduğunu ve daha yüksek vollastonit mikro fiber içeriğinin daha düşük işlenebilirliğe yol açtığını tespit etmişlerdir. Bu durum vollastonit mineralinin iğnemsî yapısından dolayı mikro fiberlerin artan kenetlenmesine bağlanabilir (Tatnall, 2006). Bu nedenle, işlenebilirlikteki bu azalma, yerleştirilme esnasında vibrasyon uygulanmasına ya da daha yüksek miktarda süper akışkanlaştırıcı kullanılmasına yol açabilmektedir (Ransinchung ve Kumar, 2010; Tatnall, 2006).



Fotoğraf 4.1. VYPH0'ın yayılma çapı



Fotoğraf 4.2. VYPH3'ün yayılma çapı



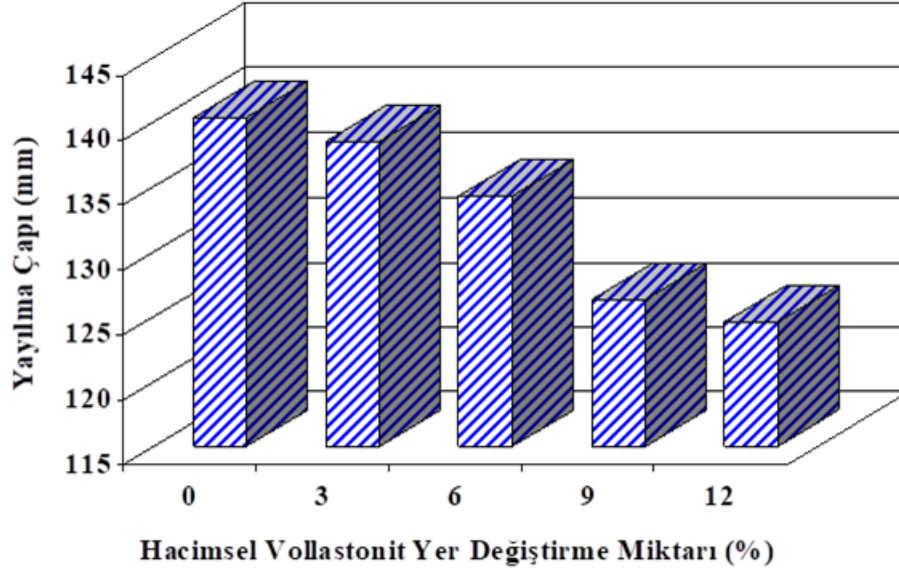
Fotoğraf 4.3. VYPH6'nın yayılma çapı



Fotoğraf 4.4. VYPH9'un yayılma çapı



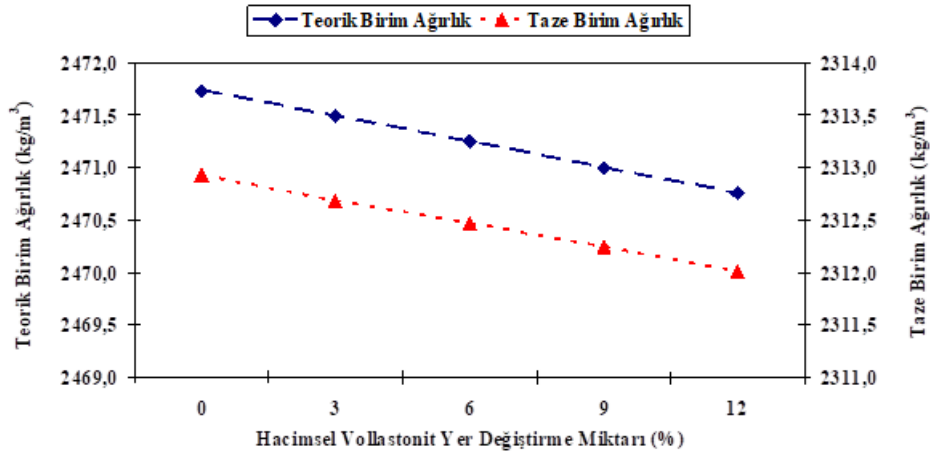
Fotoğraf 4.5. VYPH12'nin yayılma çapı



Şekil 4.1. VYPH karışımalarının yayılma çapları

4.2 Taze Birim Ağırlık

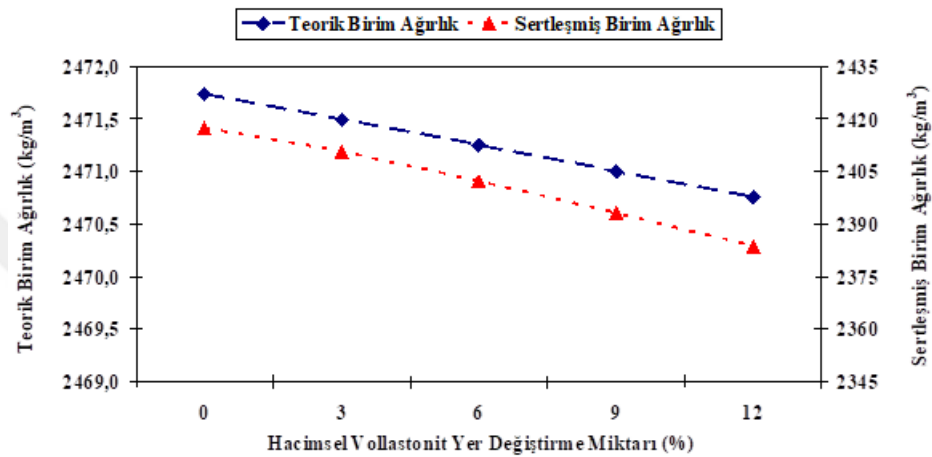
VYPH'lerin teorik birim ağırlıkları ve taze birim ağırlıklarına ait grafik Şekil 4.2'de verilmiştir. VYPH0, VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 karışımalarının teorik birim ağırlıkları sırasıyla 2471.735, 2471.489, 2471.244, 2470.998 ve 2470.752 kg/m³ olarak belirlenmiştir. VYPH0, VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 karışımalarının taze birim ağırlıkları ise sırasıyla 2312.92, 2312.68, 2312.46, 2312.24 ve 2312.01 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere harçların taze haldeki birim ağırlıkları teorik birim ağırlıklarından daha düşüktür. Tüm karışımalar için taze birim ağırlıklar, teorik birim ağırlıklara göre yaklaşık olarak %6.43 oranında azalma göstermiştir.



Şekil 4.2. VYPH karışımalarının teorik ve taze birim ağırlık değerleri

4.3 Sertleşmiş Birim Ağırlık

VYPH karışımlarına ait teorik ve sertleşmiş birim ağırlıkların karşılaştırıldığı grafik Şekil 4.3’de sunulmuştur. %0, %3, %6, %9 ve %12 karışımlarının sertleşmiş birim ağırlıkları 28. gün için sırasıyla, 2417.122, 2410.365, 2402.213, 2392.995 ve 2383.635 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Sonuçlara göre, beklenildiği üzere sertleşmiş birim ağırlık teorik birim ağırlıktan daha düşük çıkmaktadır.



Şekil 4.3. VYPH karışımlarının teorik ve sertleşmiş birim ağırlık değerleri

4.4 Basınç Dayanımı

VYPH’lerin basınç dayanımı değişimleri ve kontrol harcına göre basınç dayanımındaki yüzde değişim verileri sırasıyla, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’de grafiksel olarak gösterilmiştir. Basınç dayanımı YPH için anahtar bir özellik olarak düşünülmektedir. Harç karışımları sentetik vollaştonitin çimentoyla yer değiştirme yüzdesine bağlı olarak 0, 3, 6, 9 ve 12 olarak gösterilmiş olup, 28. ve 90. gündeki değerleri Şekil 4.4’den görülmektedir. VYPH0, VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 karışımlarının 28. gündeki basınç dayanımları sırasıyla, 64.33, 66.44, 68.85, 69.43 ve 67.84 MPa iken 90. gündeki basınç dayanımları ise sırasıyla, 82.49, 83.76, 85.06, 86.55 ve 79.56 MPa olarak belirlenmiştir. Test sonuçlarından açıkça anlaşılacağı üzere her iki test yaşı için vollaştonit miktarı arttıkça YPH’lerin basınç dayanımı artmakta ve bu artış %9 vollaştonit içeriğine kadar (%9 dâhil) devam etmektedir. Bu çalışmaya paralel olarak, Mathur vd. (2007a), vollaştonit mineralinin betonun basınç dayanımını artırdığını belirlemişlerdir. Buna ek olarak, Soliman ve Nehdi (2014) tarafından yapılan çalışmada vollaştonit mikro

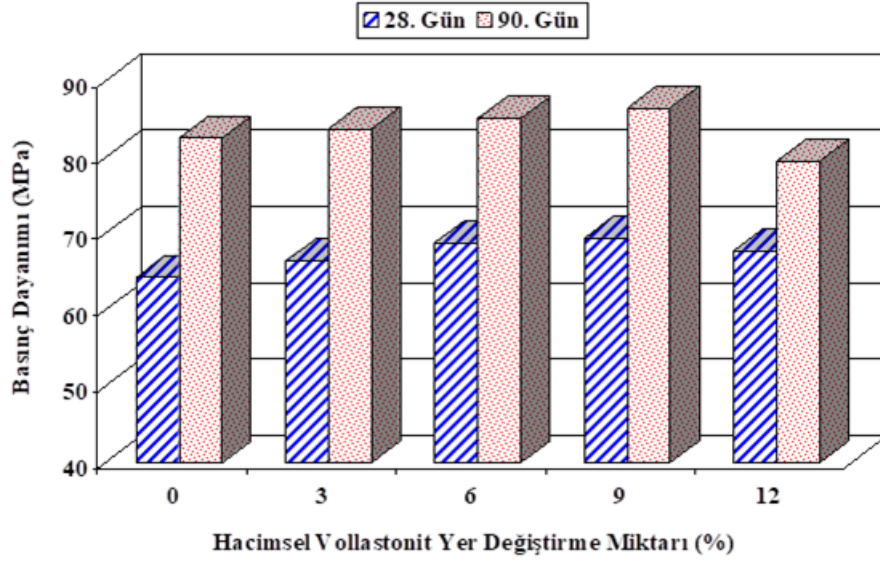
fiberlerinin kullanım oranının artmasıyla daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca, Soliman ve Nehdi (2012) vollastonit mineralinin ultra yüksek performanslı betonun çok erken yaştaki dayanımını da iyileştirdiğini göstermişlerdir. Kalla vd. (2013) ise vollastonit ve uçucu kül kombinasyonunu kullanarak yaptıkları çalışmada vollastonitin betonun basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Şekil 4.4'den görüldüğü üzere, %12 vollastonit içeriğinde, 28. günde elde edilen basınç dayanımı değeri VYPH9 karışımından daha az olmasına rağmen kontrol harcından daha yüksektir. 90. günde ise VYPH12 için elde edilen basınç dayanımı değeri kontrol harcından daha azdır. Kumar ve Ramujee (2017), çimento yerine kullanılan vollastonit mineralinin hem 28. hem de 56. günde %10 seviyesine kadar harcın basınç dayanımını geliştirdiğini, %15 vollastonit içeriğinde ise bu gelişimin azaldığını belirlemişlerdir. %15 vollastonit içeriğinde basınç dayanımı %5 ve %10 seviyesinden daha düşük olmasına rağmen kontrol harcından daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, Kalla vd. (2015), 3 farklı su/bağlayıcı (0.45, 0.50 ve 0.55) oranı kullanarak yaptıkları çalışmada, 0.45 ve 0.55 su/bağlayıcı oranlarında %10 vollastonit içeriğine kadar (%10 dâhil) basınç dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. %15 ve daha fazla vollastonit içeriğinde ise elde edilen basınç dayanımının kontrol harcından daha az olduğunu belirlemişlerdir. 0.50 su/bağlayıcı oranında ise %10 vollastonit içeriğinde basınç dayanımının azalmaya başladığı %15 ve daha fazla vollastonit içeriği için basınç dayanımının kontrol harcından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Tüm bu sonuçlar 90. gün için belirlenmiş olup, 7. ve 28. gün için de benzer sonuçların bulunduğu belirtilmiştir.

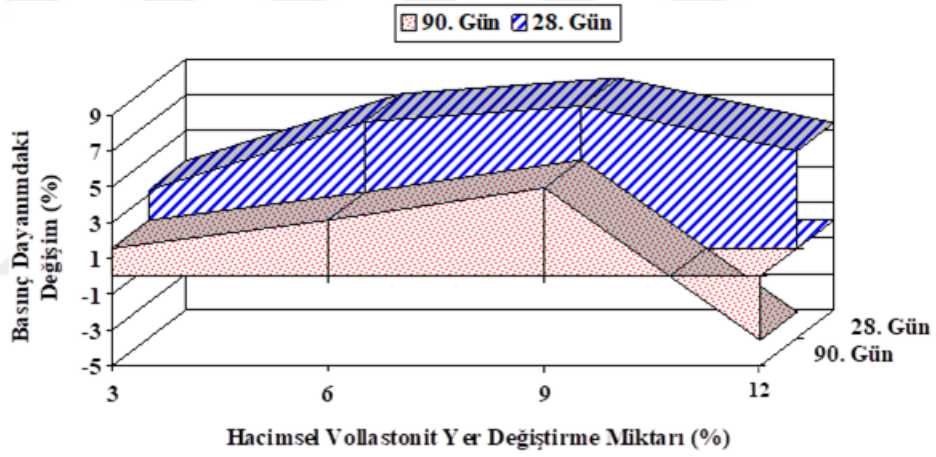
Vollastonit mineralinin basınç dayanımına yüzde olarak etkisi, Şekil 4.5'de grafiksel olarak sunulmuştur. VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 karışımlarının, VYPH0 karışımına göre yüzde değişimleri, 28. gün için sırasıyla, 3.28, 7.03, 7.93 ve 5.46 olarak, 90. gün için ise sırasıyla, 1.54, 3.12, 4.92 ve -3.55 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre sadece 90. günde VYPH12 karışımının dayanımı kontrol harcına göre olumsuz yönde etkilenmiştir. Harçların 90. gündeki gelişimlerini (28. güne göre) incelemek amacıyla sunulan Şekil 4.6'da ise yüzde artış oranları, 28.23, 26.07, 23.54, 24.66 ve 17.28 olarak belirlenmiş olup, yüzde artışlardaki en yüksek değer, kontrol harcından elde edilmiştir. Ayrıca bu değere en yakın gelişim değerinin ise VYPH9 karışımından elde edildiği görülmektedir. Bilindiği gibi daha uzun hidrasyon periyodu daha yüksek basınç

dayanımına yol açan daha yüksek matris dayanımı sağlamasının yanı sıra hidrasyon ürünleri beton ya da harç içerisindeki gözenek boşluklarını doldurabilmektedir (Chan ve Li, 1997; Kalla vd., 2013; Soliman ve Nehdi, 2012). Ayrıca hidrasyon ürünleri, mikro fiber/matris bağı ve daha yüksek yük taşıma kapasitesi sayesinde mikro çatlaklar arasında köprü kurarak basınç dayanımını geliştirmektedir. Dolayısıyla kür süresi betonun ve harcın basınç dayanımını doğrudan etkiler ve kür süresi arttıkça basınç dayanımı artmaktadır (Chan ve Li, 1997; Soliman ve Nehdi, 2012).

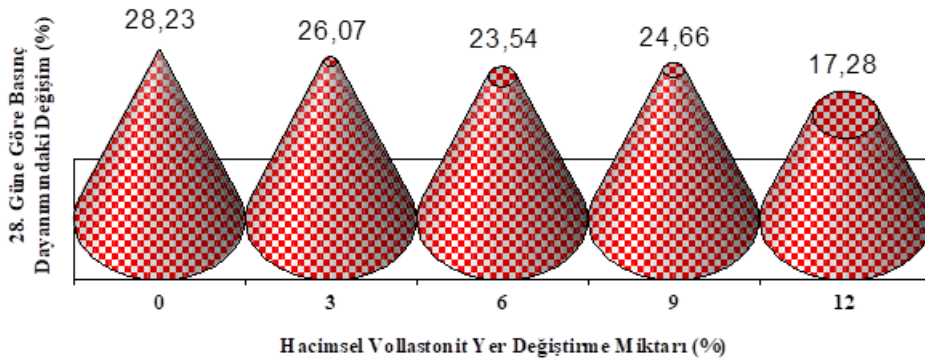
Vollastonit mineralinin her iki test yaşı için basınç dayanımına olan geliştirici etkisi mineralin lifli yapısı (iğnemsî parçacık morfolojisi) ile açıklanabilmektedir (Kumar ve Ramujee, 2017). Ayrıca, Şekil 3.2'deki elek analizi verilerinden görüldüğü üzere vollastonit minerali çimentoya göre daha ince bir tanecik yapısına sahiptir. Dolayısıyla çimento matrisi içerisine vollastonit ikamesiyle birlikte gözenek hacminde (0.5-0.1 µm) büyük bir daralma olduğu düşünülmektedir (Mathur vd., 2007a). Bundan dolayı vollastonit mineralinin kullanılmasıyla birlikte, 28. ve 90. günde vollastonitin çevresindeki geçiş bölgesinin, vollastonitin doldurucu etkisi ile beraber, mikro yapıdaki (çok küçük gözenekler) yoğunluğu artarken daha kompakt bir harç oluşmuştur (Mathur vd., 2007a; Wahab vd., 2017). Ayrıca bu artış, mikro çatlaklar arasında bağ kurma özelliğine sahip olan vollastonit mikro fiberlerin, ara yüzeydeki mikro fiber/matris bağı dayanımının bir fonksiyonunu oluşturması ile açıklanabilmektedir (Banthia ve Sheng, 1996; Hameed vd., 2009; Soliman ve Nehdi, 2014). Bu özel mineralin %12 oranında kullanımı karışımın basınç dayanımının düşmeye başlamasına neden olmuştur. Bu durum vollastonitin çimentoyla yer değiştirme oranının % 9'a kadar matris yapısını yoğunlaştırması, %12'de ise matrisle olan bağı zayıflamaya başlaması ile ifade edilebilmektedir (Wahab vd., 2017).



Şekil 4.4. VYPH karışımlarının basınç dayanımı değişimleri



Şekil 4.5. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre basınç dayanımındaki yüzde değişimleri



Şekil 4.6. VYPH karışımlarının 90 günlük basınç dayanımlarının 28 günlük basınç dayanımlarına göre yüzde değişimleri

4.5 Eğilme Dayanımı

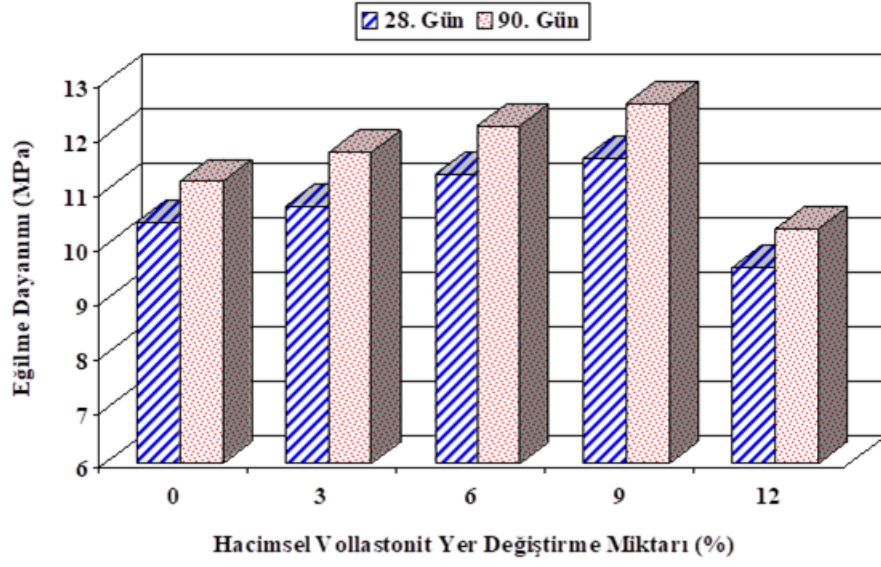
Harç karışımları, sentetik vollastonitin çimentoyla yer değiştirme yüzdesine bağlı olarak 0, 3, 6, 9 ve 12 olarak gösterilmiş olup, 28. ve 90. gündeki eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.7’de, 28. ve 90. gündeki eğilme dayanımındaki yüzde değişim değerleri (kontrol harcına göre) ise Şekil 4.8’de sunulmaktadır. %0, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında vollastonit içeriğine sahip olan VYPH karışımlarının, 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla, 10.43, 10.73, 11.3, 11.6 ve 9.6 MPa olarak belirlenmiştir. Aynı karışımların, 90 günlük eğilme dayanımları ise sırasıyla, 11.17, 11.7, 12.2, 12.6 ve 10.3 MPa olarak belirlenmiştir. Elde edilen verilere göre, her iki test yaşı için vollastonit içeriğinin artmasıyla birlikte VYPH karışımlarının eğilme dayanımları artmıştır. Bu sonuçlara paralel olarak, Soliman ve Nehdi (2012), ultra YPH karışımlarında vollastonit mikro fiberlerin varlığının mikro fiberler olmaksızın tasarlanan kontrol karışımına kıyasla eğilme dayanımı karakteristiklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, Mathur vd. (2007a), tarafından beton üzerinde yapılan çalışmada vollastonitin betonun eğilme dayanımını geliştirdiği belirtilmiştir.

%9 vollastonit içeriğine kadar (%9 dâhil) eğilme dayanımı artarken, %12 vollastonit içeriğinde eğilme dayanımı azalmıştır. Bu azalma sonucunda, VYPH12’nin eğilme dayanımı hem 28. hem de 90. günde kontrol harcına göre daha az çıkmıştır. Kalla vd. (2015), 3 farklı su/bağlayıcı (0.45, 0.50 ve 0.55) oranı kullanarak yaptıkları çalışmada, 0.45 ve 0.55 su/bağlayıcı oranlarında %10 vollastonit içeriğinde eğilme dayanımının azalmaya başladığını, %15 ve daha fazla vollastonit içeriği için eğilme dayanımının kontrol harcından daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, 0.50 su/bağlayıcı oranında ise %10 vollastonit içeriğine kadar (%10 dâhil) eğilme dayanımının arttığı, %15 ve daha fazla vollastonit içeriğinde ise elde edilen eğilme dayanımının kontrol harcından daha az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Wahab vd. (2017), harç üretiminde, vollastoniti çimento yerine %10, %20 ve %30 oranlarında kullanmışlar ve %20 ve %30 için sonuçların olumsuz olduğunu gözlemlemişlerdir. %10 vollastonit içeriğinde ise 2. gündeki eğilme dayanımının kontrole göre daha az olduğunu ancak 28. gündeki eğilme dayanımının kontrole çok yakın olduğunu tespit etmişlerdir.

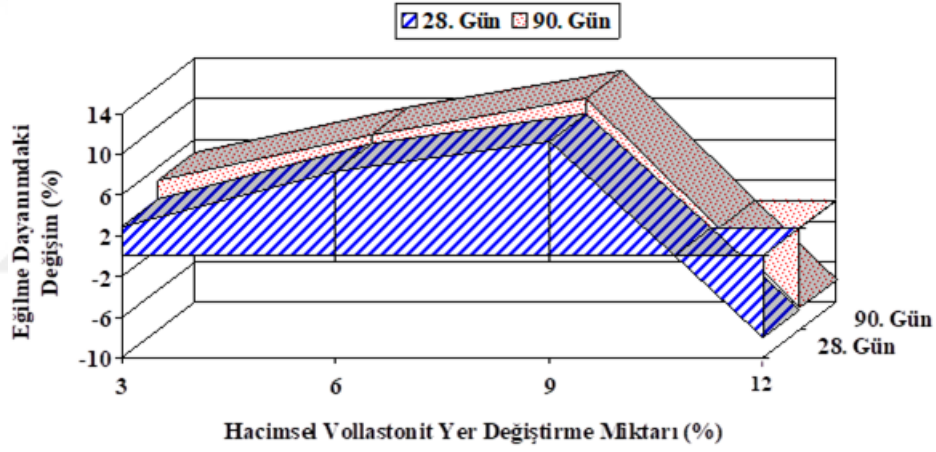
%3, %6, %9 ve %12 oranlarında vollastonit içeriğine sahip olan VYPH karışımlarının, Şekil 4.8’de kontrol karışımına oranla verilen değişim değerleri 28. gün için sırasıyla,

%2.88, %8.34, %11.22 ve %-7.96 olarak tespit edilmiştir. Aynı oranlar için 90 günlük değişim verileri ise sırasıyla, %4.74, %9.22, %12.80 ve %-7.79 olarak tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre 90. gündeki eğilme dayanımı verileri, 28. güne göre daha iyi yüzde artışlar vermiştir. Dolayısıyla vollastonitin eğilme dayanımı üzerindeki geliştirici etkisi 90. günde daha belirgindir. Şekil 4.9'da ise kür etkisinin VYPH üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla harçların 28. güne kıyasla 90. gündeki gelişimleri incelenmiştir. Bu değişimler %7.09, %9.04, %7.96, %8.62 ve %7.29 olarak tespit edilmiştir. Kür süresinin artmasına bağlı olarak gelişen eğilme dayanımı, hidrasyon ürünlerinin harç içerisindeki gözenek boşluklarını doldurması ile ifade edilebilir (Kalla vd., 2013).

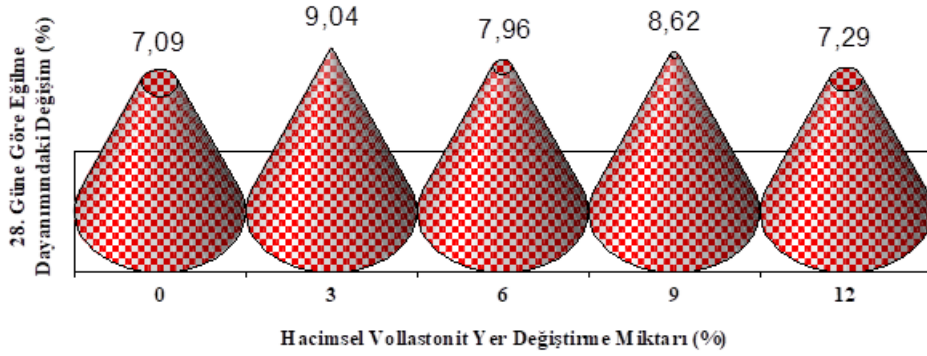
Test sonuçları vollastonit mineralinin YPH'nin eğilme dayanımını geliştirdiğini ve bu gelişimin %9 vollastonit içeriğine kadar devam ettiğini göstermektedir. Eğilme dayanımındaki bu artış, vollastonit mineralinin lifli (iğnemsî) yapısı ve yüksek elastisite modülü (200 GPa) ile açıklanabilir (Kalla vd., 2015; Mathur vd., 2007a; Mathur vd., 2007b). Yük sonrası çimento matrisinin çatlaması ve vollastonit içeriğine bağlı olarak kırılmış yüzeyde meydana gelen değişimler incelendiğinde, vollastonit ile güçlendirilmiş çimento matrisinin sünekliği ve eğilme mukavemeti artmıştır (Mathur vd., 2007a). Bununla birlikte, vollastonit minerali, daha yüksek bir yük taşıma kapasitesine ulaşarak mikro çatlaklara köprü kuran mikro fiber yeteneğine sahiptir (Ding ve Kusterle, 2000; Hamoush vd., 2010; Soliman ve Nehdi, 2012; Soliman ve Nehdi, 2014). Böylece vollastonit kullanım yüzdesinin artmasıyla birlikte 28. ve 90. günlerde eğilme dayanımı artmıştır. Eğilme dayanımı değerlerinde, %12 vollastonit içeriğinde meydana gelen azalmanın nedeni ise vollastonit konsantrasyonunun %12'ye kadar yükselmesi sonucunda vollastonit mineralinin, matristeki bağı zayıflatması ile açıklanabilir (Wahab vd., 2017).



Şekil 4.7. VYPH karışımlarının eğilme dayanımı değişimleri



Şekil 4.8. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre eğilme dayanımındaki yüzde değişimleri



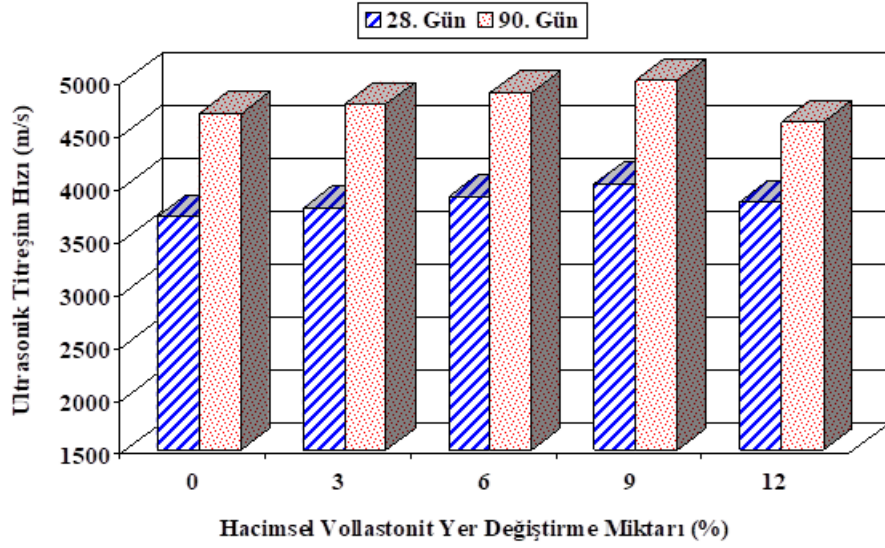
Şekil 4.9. VYPH karışımlarının 90 günlük eğilme dayanımlarının 28 günlük eğilme dayanımlarına göre yüzde değişimleri

4.6 Ultrasonik Titreşim Hızı

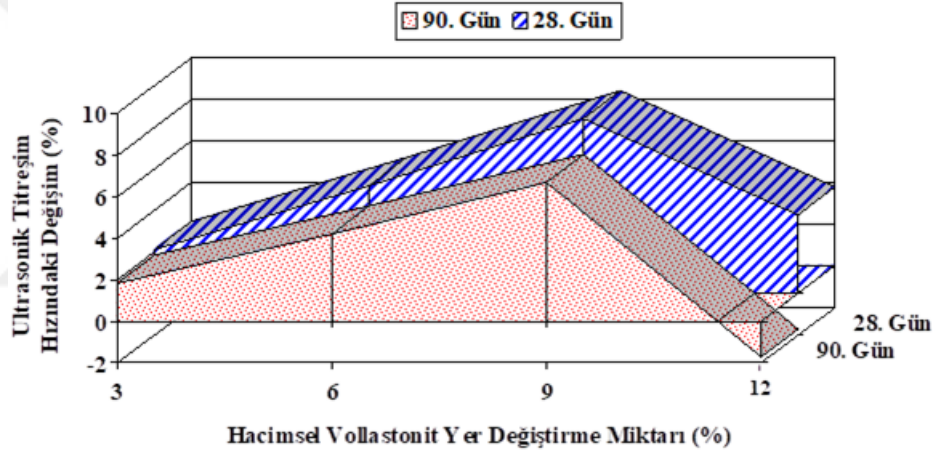
Ultrasonik titreşim hızı değerleri m/s cinsinden ölçülerek belirlenmiş olup, VYPH karışımlarının UTH verileri ve UTH'deki yüzde değişim değerleri (kontrol harcına göre) sırasıyla, Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de, grafiksel olarak sunulmuştur. Şekil 4.12'de ise 28. gündeki değerlere oranla, 90. gündeki yüzde değişim değerleri verilmiştir. VYPH'lerin UTH değerleri, basınç dayanımına paralel olarak değişmiştir. VYPH'lerin UTH değerleri, 3704-4990 m/s arasında değişmiş ve test yaşının artmasıyla birlikte artmıştır. Şekil 4.10'da sunulan sonuçlara göre harç karışımlarının test yaşı ve vollastonitin yer değiştirme seviyesiyle VYPH'lerin UTH değerleri arasında açık bir ilişki vardır. Vollastonit içeriğinin artması %9 seviyesine kadar UTH değerini artırmış, %9'dan sonra (%12 yer değiştirme seviyesi için) her iki test yaşı (28 ve 90) için de bu değer azalmıştır. UTH değeri, 28. günde, VYPH0 karışımında en düşük değerini alırken (3704 m/s), en yüksek değerine (4990 m/s) 90. günde, VYPH9 karışımında ulaşmıştır.

Malhotra'ya (1976) göre UTH ölçümünden elde edilen değer 3660-4580 m/s aralığında ise bu sonuç "iyi durum" olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, tüm karışımlar için 28 günlük UTH verileri "iyi durum" olarak düşünülebilir. Şekil 4.11'den görüldüğü gibi, UTH değerindeki en yüksek yüzde farklılık 28. günde VYPH9 karışımında %8.40 olarak belirlenmiştir. Bu değerdeki en düşük yüzde değişim ise 90. günde VYPH12 karışımından %-1.71 olarak elde edilmiştir. Şekil 4.12 yardımıyla test yaşının VYPH üzerindeki etkisi yüzdesel olarak açıkça görülmüş olup, test yaşı arttıkça kür etkisine bağlı olarak UTH değerleri gelişmiştir. Bu gelişim, VYPH0, VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 için sırasıyla, %26.30, %25.93, %25.07, %24.28 ve %19.61 olarak tespit edilmiştir. Bilindiği gibi kür süresi arttıkça, hidrasyon ürünlerinin artmasıyla birlikte, harç ve betonun performans özellikleri iyileşmektedir (Chan ve Li, 1997).

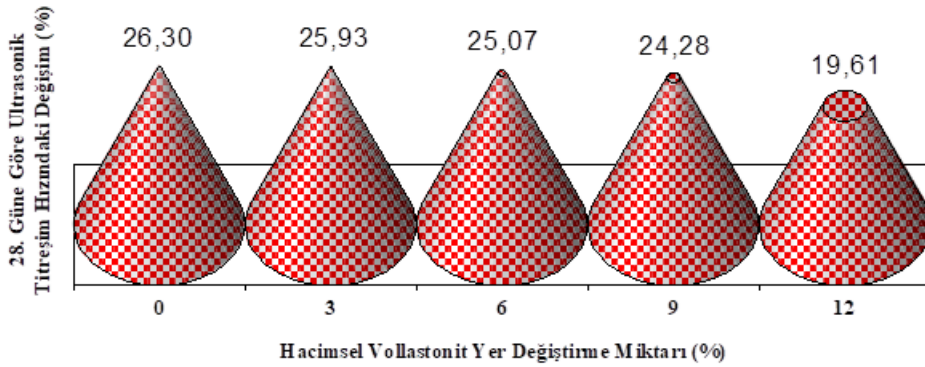
Vollastonit mineralinin UTH üzerindeki bu geliştirici etkisi, bu mineralin çimentoya göre daha ince bir parçacık boyutuna sahip olması sayesinde harca kazandırdığı doldurucu etki ile açıklanabilir. Bu doldurucu etki sayesinde, %9 vollastonit içeriğine kadar (VYPH9 dâhil) daha yoğun ve daha kompakt bir matris bağı oluşmuş olup, gözenek süreksizliği sağlanmıştır (Mathur vd., 2007a; Wahab vd., 2017). VYPH12 karışımında UTH değerlerinde meydana gelen azalmanın nedeni ise vollastonit içeriğinin %12'ye kadar yükselmesi sonucunda bu mineralin, matristeki bağı zayıflatmasıdır (Wahab vd., 2017).



Şekil 4.10. VYPH karışımlarının ultrasonik titreşim hızı değişimleri



Şekil 4.11. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre ultrasonik titreşim hızındaki yüzde değişimleri



Şekil 4.12. VYPH karışımlarının 90 günlük ultrasonik titreşim hızlarının 28 günlük ultrasonik titreşim hızlarına göre yüzde değişimleri

4.7 Kılcal Su Geçirirliği

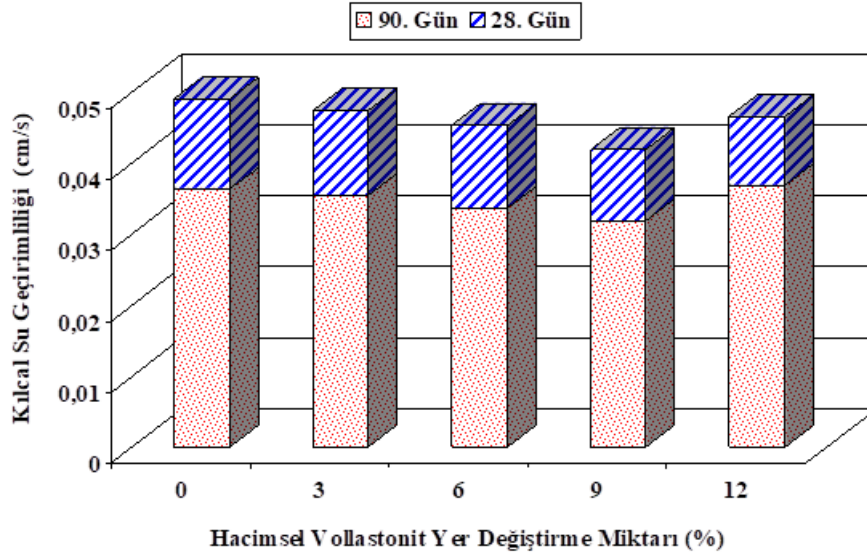
En önemli durabilite deneylerinden biri olan kılcal su geçirirliği deneyi, beton ya da harcın su geçirirliğini belirlemek amacıyla uygulanan bir deney yöntemidir. Kullanılan agreganın tip, boyut ve boşluk yapısı, çimento esaslı mineral katkıları ya da kimyasal katkıların varlığı, üretilen beton ya da harcın karışım oranları, beton ya da harç içerisindeki hava boşluklarının hacmi ve gözenek yapısı gibi bazı önemli durumlar malzemenin (beton ya da harç) su geçirirliğini etkiler (Güneyisi vd., 2015). VYPH karışımlarının 28. ve 90. gündeki kılcal su geçirirliği değerleri Şekil 4.13’de sunulmuştur. Vollastonit içeren harçların kontrol harcına göre, kılcal su geçirirliği değerlerindeki yüzde değişim verileri ise Şekil 4.14’de gösterilmiştir. Beklenildiği gibi numunelerin test yaşı ve vollastonit kullanım yüzdesi kılcal su geçirirliği değerlerini etkilemektedir.

Şekil 4.13’de verilen değerlere göre 28 günlük kılcal su geçirirliği değerleri 0,0419 cm/s ile 0.0490 cm/s arasında iken 90 günlük kılcal su geçirirliği verileri ise 0.0318 cm/s ile 0,0369 cm/s aralığında değişmektedir. Bu sonuçlara göre %9 vollastonit içeriği optimum sonuçları veririrken, VYPH12’de ise kılcal su geçirirliği artmıştır. Vollastonit içeren tüm karışımlar (VYPH12, 90. gün hariç) kontrol harcından daha az geçirirliğe sahiptir. Benzer şekilde, Şekil 4.14’de sunulan yüzde azalmalara bakıldığında hem 28. hem de 90. günde en iyi sonuçların VYPH9’dan elde edildiği açıkça görülmektedir. Bu değerler 28. ve 90. gün için sırasıyla, %14.49 ve %12.40 olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara paralel olarak, Mathur vd. (2007a) vollastonitin betonun su emme yüzdesini azalttığını belirlemişlerdir. Bununla birlikte, Kalla vd. (2015), vollastonit içeren beton üzerinde yaptıkları porozite deneyinde, genel olarak %10 vollastonit içeriğinin sınır değer olduğunu, özellikle bu değerden sonra betonun porozite değerinin arttığını göstermişlerdir. Ayrıca, Kalla vd. (2013), vollastonit ve uçucu kül kombinasyonunu kullanarak tasarladıkları betonun, basınçlı su geçirirliği değerlerinin iyileştiğini belirlemişlerdir. Misra vd. (2011) ise çimento yerine kullanılan vollastonit mineralinin hava geçirirliği indeksini (basınç/dakika) geliştirdiğini ve bu sebeple iyi koruyucu bir kalite gösterdiğini belirtmişlerdir.

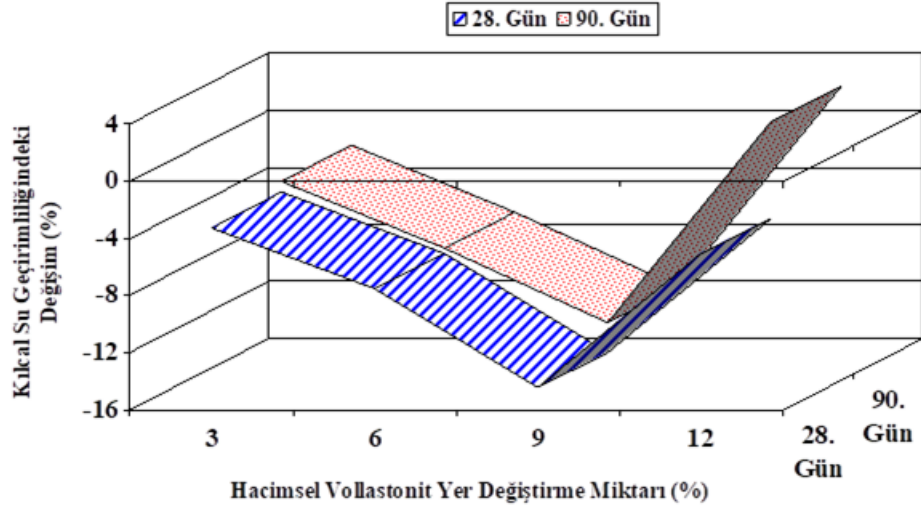
Karışımların 28. güne oranla 90. gündeki yüzde değişimlerinin verildiği Şekil 4.15’de kür süresinin etkisi açıkça görülmektedir. Bu değişim tüm karışımlar için olumlu yönde olup,

yüzde azalma oranları, %20.65 ile %25.92 aralığında değişmektedir. Bilindiği gibi kür süresi arttıkça malzemenin (beton ya da harç) durabilite özelliği gelişir. Ransinchung vd. (2009), su içerisinde bırakılan beton küplerin su emme yüzdesinin nemli kür süresi arttıkça azaldığını belirlemişlerdir. Bu nedenle, kür etme yaşının artmasıyla birlikte geçirimsizlik boşluklarında azalma meydana gelir ve uzun süreli iyileşme sağlanır.

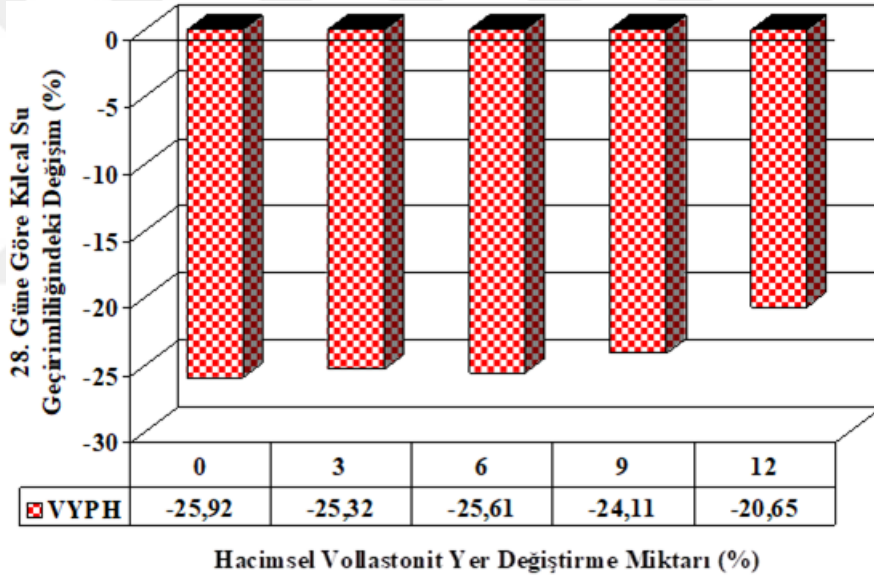
28. ve 90. günde belirlenen kılcal su geçirimsizliği değerlerine göre vollastonit minerali YPH'nin geçirimsizliğini azaltmıştır. Bilindiği gibi, durabilite özelliklerinin belirlendiği yüzeyin çimento matrisi bileşenlerinin mikro yapı özellikleri büyük ölçüde yüzey bölgesinin gözenek yapısı tarafından belirlenir (Mathur vd., 2007a). Sonuçlara göre gözenek yapısı önemli ölçüde vollastonit tarafından düzenlendiği için basınç dayanımı arttıkça kılcal su geçirimsizliği azalır. Vollastonit minerali, doldurucu etkisi sayesinde sistemdeki gözenekleri azaltıp harcın mikro yapısının yoğunlaşmasını sağlayarak, malzemenin su emmesini azaltır ve çimento sisteminde gözenek süreksizliği sağlar (Kalla vd., 2015; Mathur vd., 2007a; Ransinchung vd., 2009). Bu süreksizlik vollastonitin sıvıların normal basınca ulaşamayacakları gözenek yapısını oluşturmasıyla sağlanır (Mathur vd., 2007a). %12 vollastonit içeriğinde meydana gelen artış ise vollastonitin ara yüzey geçiş bölgesindeki matris bağını zayıflatmasıyla açıklanabilir (Wahab vd., 2017).



Şekil 4.13. VYPH karışımlarının kılcal su geçirimsizliği değişimleri



Şekil 4.14. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre kılcal su geçirimsizliğindeki yüzde değişimleri



Şekil 4.15. VYPH karışımlarının 90 günlük kılcal su geçirimsizliği değerlerinin 28 günlük kılcal su geçirimsizliği değerlerine göre yüzde değişimleri

4.8 Hızlı Klor Geçirimsizliği

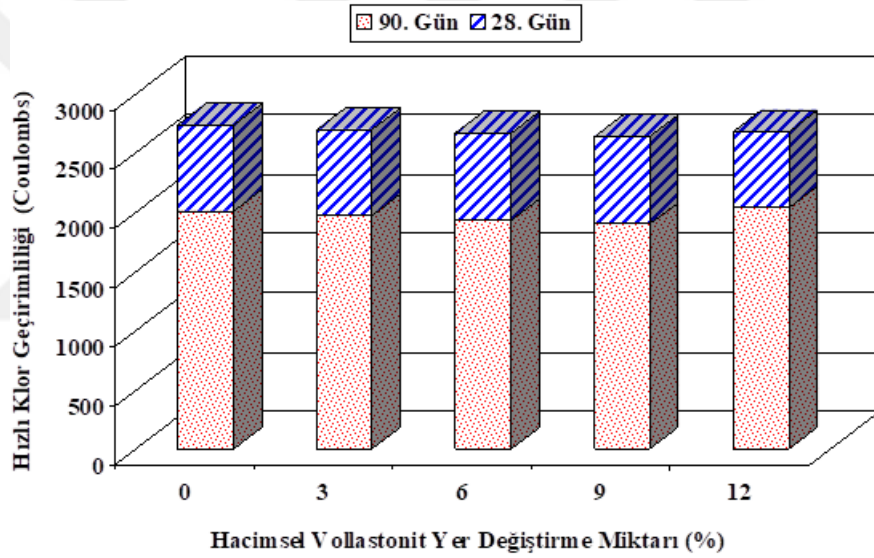
Sentetik wollastonit mineralinin çimentoyla yer değiştirme seviyesine göre, VYPH karışımlarının klor iyonu geçirimsizliği değerleri Coulombs (C) cinsinden Şekil 4.16’da, klor iyonu geçirimsizliği değerlerindeki yüzde azalmalar ise Şekil 4.17’de verilmiştir. Şekil 4.16’dan görüldüğü üzere 28. gündeki en yüksek klor iyonu geçirimsizliği değeri VYPH0 karışımından ve 90. gündeki en yüksek klor iyonu geçirimsizliği değeri ise VYPH12

karışımından elde edilmiş olup, bu değerler sırasıyla, 2732 C ve 2041 C olarak belirlenmiştir. 28. ve 90. günlük klor iyonu geçirimsizliği sırasıyla 2637 C ve 1942 C olan, VYPH9 karışımı ise her iki test yaşında da en düşük klor iyonu geçirimsizliği değerlerini sağlamıştır. Şekil 4.17’de verilen kontrol karışımına göre yüzde değişimler ve Şekil 4.18’de sunulan 28. güne göre 90. gündeki yüzde gelişimler, vollastonit içeriğinin ve test yaşının artmasının klor iyonu geçirimsizliğini azalttığını açıkça göstermiştir. VYPH9 karışımının klor iyonu geçirimsizliği, kontrol harcına göre 28. ve 90. günde sırasıyla, %3.48 ve %3.29 olarak tespit edilmiştir. Yine bu karışımın 28. güne göre 90. gündeki yüzde azalması %26.36 olarak belirlenmiş olup, kontrol harçından sonra en yüksek gelişim bu harçtan elde edilmiştir. Kumar ve Ramujee (2017), vollastonitin klor iyonu geçirimsizliğini önemli ölçüde azalttığını tespit etmişlerdir. Buna ek olarak, Ransinchung vd. (2009), vollastonit ve mikro silikanın klor iyonu penetrasyonuna karşı direncin artmasını sağlayarak sertleşmiş betonun mikro yapısını düzenlediklerini tespit etmişlerdir. Ayrıca, Kalla vd. (2013), vollastonit ve uçucu kül kombinasyonunu araştırdıkları çalışmalarında vollastonitin klorür difüzyonunu olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

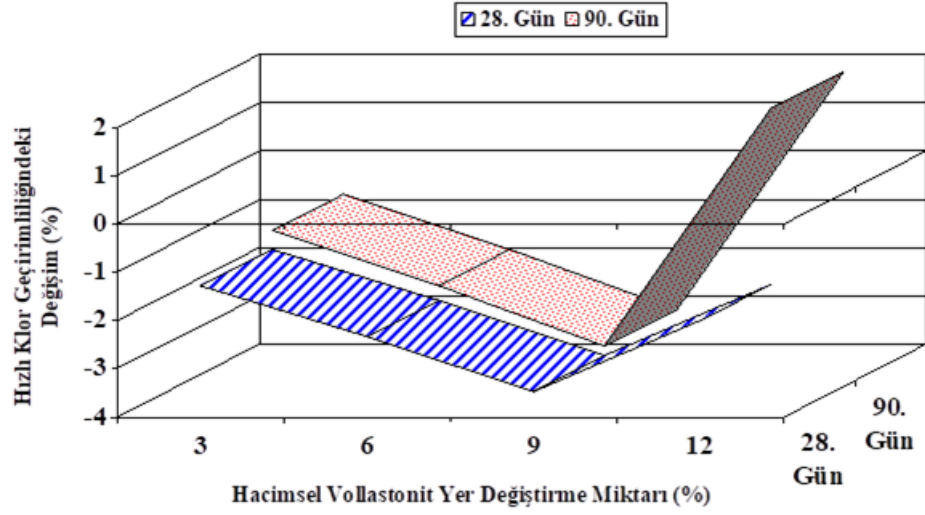
VYPH12 karışımında ise klor iyonu geçirimsizliği hem 28. hem de 90. gün için artmış olup, 90. günde belirlenen en yüksek klor iyonu geçirimsizliği ise VYPH12 karışımında tespit edilmiştir. Buna paralel olarak, Kalla vd. (2015), farklı su/bağlayıcı içeriği kullanarak yapmış oldukları çalışmada, vollastonit mineralinin, klorür difüzyonunu %10 yer değiştirme seviyesine kadar azalttığını, %15 seviyesinden sonra artırdığını belirlemişlerdir. ASTM C 1202 (2012) test standardına göre, klor iyonu geçirimsizliği, elde edilen C değeri, 0-1000 C aralığında ise çok düşük, 1000-2000 C aralığında ise düşük, 2000-4000 C aralığında ise orta ve 4000 C’den daha büyük ise yüksektir. Bu standarda göre, bütün VYPH karışımlarının 28 günlük değerleri orta derecede klor iyonu geçirimsizliğine, 90 günlük verileri ise VYPH0 ve VYPH12 hariç düşük klor iyonu geçirimsizliğine sahiptir. Bu nedenle, tasarlanan VYPH harçlarının tamamı inşaat endüstrisinde, çeşitli klor atağı riski olan yapılar için önleyici olarak düşünülebilir.

Hızlı klor geçirimsizliği deney sonuçlarından anlaşıldığı gibi vollastonit minerali %9 seviyesine kadar (%9 dâhil), YPH’nin durabilite performansını olumlu yönde etkilemiştir. Bu gelişimdeki etkenlerden biri, vollastonit mineralinin doldurucu etkisi sayesinde durabiliteye olan olumlu etkisi olarak düşünülebilir (Ransinchung vd., 2009).

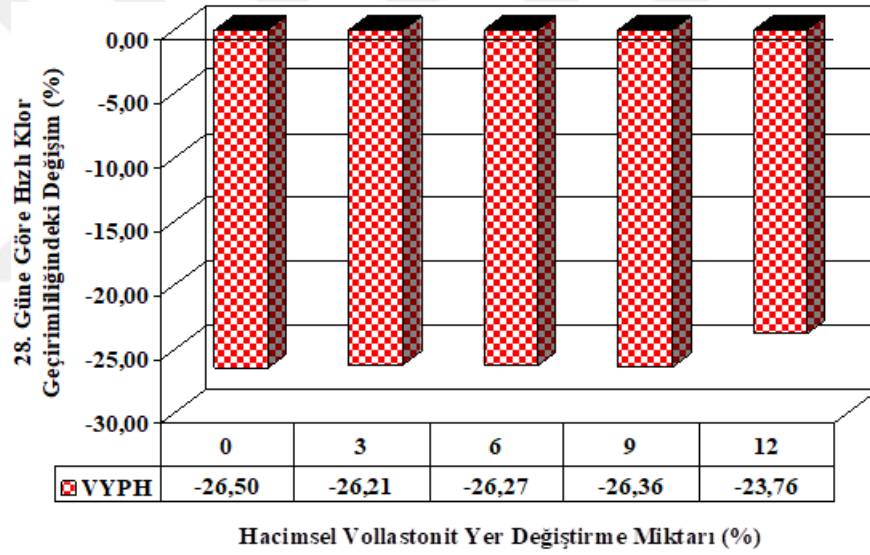
Diğer etken ise vollastonitin çevresindeki geçiş bölgesi oluşumunun çimento reaksiyon ürünlerinin çökmesiyle açıklanabilir. Vollastonit ikamesi CH formasyonu ve matris geçirirliliğine ek olarak çimento hidrasyonunun varlığını ve oranını etkileyebilir. Ara yüzeydeki çökmeden dolayı matristeki CH azalması harcın geçirirliliğini azaltır. Bu durum, vollastonit içermeyen karışımlara oranla sınırlı miktarda hidrasyona neden olabilir ve vollastonitin gözenekliliği azaltmasını açıklayabilir (Mathur vd., 2007a). Ayrıca VYPH12 karışımında meydana gelen azalma vollastonitin belli bir orandan sonra ara yüzey geçiş bölgesindeki bağı zayıflatmasıyla açıklanabilir (Wahab vd., 2017). Kür süresine bağlı olarak VYPH'lerin azalan klor iyonu geçirirliliklerinin nedeni ise uzun süreli kürün, devam eden hidrasyona katkı sağlaması ile açıklanabilir (Kalla vd., 2013; Ransinchung vd., 2009).



Şekil 4.16. VYPH karışımlarının hızlı klor geçirirliliği değişimleri



Şekil 4.17. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre hızlı klor geçirirliliğindeki yüzde değişimleri



Şekil 4.18. VYPH karışımlarının 90 günlük hızlı klor geçirirliliği değerlerinin 28 günlük hızlı klor geçirirliliği değerlerine göre yüzde değişimleri

BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu tez kapsamında geliştirilip özel bir yöntemle üretilen sentetik vollastonitin yüksek performanslı harç üzerine etkilerinin taze, mekanik ve durabilite özellikleri açısından değerlendirilmesi yapılmış olup aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kullanılan vollastonit yüzdesinin artmasıyla beraber yayılma çapı azalmıştır. Bu durumun temel nedenleri; vollastonit mineralinin iğnemsî parçacık yapısı ve çimentodan daha ince tanecik yapısına sahip olmasıdır.
- Taze birim ağırlık değerleri, vollastonit yüzdesi arttıkça teorik birim ağırlığa bağlı olarak kısmen azalmış ve teorik birim ağırlıktan daha az çıkmıştır.
- Sertleşmiş birim ağırlık değerleri yine teorik birim ağırlığa bağlı olarak vollastonit miktarı arttıkça azalırken teorik birim ağırlıktan daha düşük çıkmıştır.
- Basınç ve eğilme dayanımı kür yaşı ve vollastonit yüzdesi arttıkça artmıştır. Basınç ve eğilme değerlerindeki artış %9 vollastonit içeriğine kadar devam etmiş, %12 oranında ise azalma göstermiştir. Vollastonitin %9 oranında çimento yerine kullanılması sonucunda, kontrol harcına oranla 28. ve 90. gündeki basınç dayanımı değerinin yüzde değişimi sırasıyla, %7.93 ve %4.92 olarak tespit edilirken eğilme dayanımındaki yüzde değişimler sırasıyla, %11.22 ve %12.80 olarak belirlenmiştir. Bu özel mineralin her iki test yaşı için basınç ve eğilme dayanımlarına olan geliştirici etkisi mineralin lifli yapısına (iğnemsî parçacık morfolojisine) bağlanabilir. Eğilme dayanımındaki artışın bir diğer önemli nedeni ise vollastonitin yüksek elastisite modülüne (200 GPa) sahip olması ile açıklanabilir. Bunlara ek olarak, vollastonit minerali, daha yüksek bir yük taşıma kapasitesine ulaşarak mikro çatlaklara köprü kuran mikro fiber yeteneğine sahiptir. Böylece YPH'nin basınç ve eğilme dayanımları gelişmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı değerlerinde, %12 vollastonit içeriğinde meydana gelen azalmanın nedeni ise vollastonit konsantrasyonunun %12'ye kadar yükselmesi sonucunda bu mineralin, matristeki bağı zayıflatması ile açıklanabilir.
- Vollastonit mineralinin kullanılmasıyla birlikte, 28. ve 90. günde vollastonitin çevresindeki geçiş bölgesinin mikro yapıdaki (çok küçük gözenekler) yoğunluğunun artmasıyla birlikte daha kompakt bir YPH oluşmuştur. Bu nedenle

basınç dayanımına paralel olarak UTH değerleri gelişmiştir. Bu gelişim VYPH9 için 28. ve 90. günde kontrol harcına oranla %8.40 ve %6.67 olarak tespit edilmiştir. Bu özel mineralin %12 oranında kullanımı ise UTH değerinin azalmaya başlamasına neden olmuştur. Bu durum vollastonitin çimentoyla yer değiştirme oranının %9'a kadar matris yapısını yoğunlaştırması, %12'de ise matrisle olan bağın zayıflamaya başlaması ile açıklanabilir. Son olarak, tüm karışımlar için 28 günlük UTH değerlerinin, "iyi durum" olarak değerlendirilen 3660-4580 m/s aralığında olduğu belirlenmiştir.

- Kılcal su geçirimsizliği ve hızlı klor geçirimsizliği değerleri kür yaşı ve kullanılan vollastonit miktarının artmasıyla azalmıştır. Bu azalma %9 vollastonit içeriğine kadar devam etmiş ancak %12 oranında artmıştır. Tüm karışımlar ve her iki test yaşı için belirlenen kılcal su geçirimsizliği değerleri 0.0318-0.0490 cm/s aralığında iken hızlı klor geçirimsizliği değerleri 1942-2732 C aralığındadır. Bilindiği gibi, bu iki durabilite deneyinin belirlendiği yüzeyin, çimento matrisi bileşenlerinin mikro yapı özellikleri, büyük ölçüde yüzey bölgesinin gözenek yapısı tarafından belirlenir. Dolayısıyla geçirimsizlikte sağlanan bu gelişmenin temel nedeni, vollastonit mineralinin, çimentoya göre daha ince tanecik boyutuna sahip olması ile açıklanabilir. Ayrıca vollastonit ikamesi CH formasyonu ve matris geçirimsizliğine ek olarak çimento hidrasyonunun varlığını ve oranını etkileyebilir. Dolayısıyla ara yüzeydeki çökeltmeden dolayı matristeki CH azalması harcın geçirimsizliğini azaltır. Bu durum, vollastonit içermeyen karışımlara oranla sınırlı miktarda hidrasyona neden olabilir ve vollastonitin, gözenekliliği azaltmasını açıklayabilir. ASTM C 1202 (2012) standardına göre, bütün VYPH karışımlarının 28 günlük değerleri orta derecede klor iyonu geçirimsizliğine, 90 günlük verileri ise VYPH0 ve VYPH12 hariç, düşük klor iyonu geçirimsizliğine sahiptir. Bu nedenle, tasarlanan VYPH karışımlarının tamamı yapı endüstrisinde, çeşitli klor atağı riski olan yapılar için önleyici olarak düşünülebilir.
- 90. gündeki performans özelliklerinin 28. güne göre daha yüksek çıkması kür etkisinin harca ve betona olan iyileştirici etkisi ile açıklanabilir. Bilindiği üzere hidrasyon ürünleri beton ya da harç içerisindeki gözenek boşluklarını doldurabilir. Buna ek olarak, daha uzun hidrasyon periyodu daha iyi mekanik ve durabilite özelliklerine yol açan daha yüksek matris dayanımı sağlar. Ayrıca kür etkisi, mikro fiber/matris bağı ve daha yüksek yük taşıma kapasitesi sayesinde mikro çatlaklar arasında köprü kurarak performans özelliklerini geliştirir.

Dolayısıyla kür süresi betonun ve harcın mekanik ve durabilite özelliklerini doğrudan etkiler ve kür süresi arttıkça bu özellikler gelişir. Bu bilgilere ek olarak kontrol karışımına göre belirlenen 28. ve 90. gündeki gelişim yüzdeleri incelendiğinde, eğilme dayanımı hariç diğer mekanik ve durabilite özellikleri 90. günde, 28. güne göre daha az gelişim göstermiştir. Buna rağmen en olumlu sonuçların elde edildiği VYPH9 karışımı kontrol karışımına göre her iki test yaşı için 5 MPa civarında bir gelişim göstermiştir (basınç dayanımı açısından). Eğilme dayanımı için kontrol karışımına göre 90. gündeki gelişim 28. güne göre daha yüksektir.

- Türkiye’de bulunan kuvarz kumu potansiyelinin yaklaşık 730 milyon ton olduğu ve Anadolu’nun hemen her bölgesinde kalsit oluşumuna rastlamanın mümkün olduğu bilinmektedir. Özellikle Niğde Bölgesinde son 10 yıl içerisinde çok hızlı üretim artışı yapan kalsit ocakları bulunmaktadır ve 10 milyon ton civarında rezerve sahiptir. Ancak çıkarılan kalsitin yapı sektöründe kullanımı bulunmamaktadır. Diğer bir deyişle kalsit beton içerisinde direkt olarak kullanıldığında beton performansını olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla ülkemizde oldukça önemli bir miktarda rezervi bulunan bu iki mineralin (kalsit ve kuvarz), vollastonit mineralinin temelini oluşturduğu ve vollastonitin de YPH’nin mekanik ve durabilite performansına olumlu bir etki gösterdiği görülmüştür. Böylece bu iki mineral kullanılarak vollastonitin sentetik üretimi yapıp, YPH içerisinde kullanılması hem yapı sektörüne katkı sağlayacak hem de bu iki önemli rezervin kullanılmasını sağlayacaktır.
- Bu çalışma vollastonit katkılı yüksek performanslı harçların özelliklerinin belirlenmesinde başlangıç oluşturmaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma kapsamında verilen karışım oranlarından faydalanılarak VYPH’lerin eğilme parametreleri (kırılma tokluğu, kırılma enerjisi vb.) ve boyutsal stabilite özellikleri (serbest rötre ve kısıtlanmış rötre) de başka bir çalışmada ayrıca belirlenebilir.
- Yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, vollastonit kullanım oranının hem mekanik açıdan hem de durabilite özellikleri açısından %9’da en iyi sonuçları verdiği, ancak %12 seviyesinde sonuçların olumsuz yönde değiştiği görülmüştür. Bu nedenle optimum vollastonit kullanım yüzdesinin belirlenmesi amacıyla vollastonitin çimento yerine %10 ve %11 oranlarında kullanılarak aynı testlerin uygulanması düşünülebilir.

- Vollaştonit mineralinin üretim süreci oldukça uzun bir zaman almaktadır. Bu problemin giderilebilmesi için çalışma içerisinde YPH'ye olan önemli katkıları belirtilen bu mineralin çimento üretiminde vollaştonit katkılı çimento olarak yer alması gerekmektedir.
- Tüm bunlara ek olarak, özel bir yöntemle üretimi gerçekleştirilen, sentetik vollaştonit mineralinin, mekanik ve durabilite özellikleri açısından, YPH içerisindeki olumlu etkilerinin belirlendiği bu tez, sentetik vollaştonit içeren YPB üretimi için de bir temel olarak düşünölebilir.



KAYNAKLAR

Abbas, S., Saleem, M.A., Kazmi S.M.S. and Munir M.J., ‘‘Production of sustainable clay bricks using waste fly ash: Mechanical and durability properties’’, *J. Build. Eng.* 14, 7-14, 2017.

ACI Committee 363-R84, ‘‘State-of-the art report on high strength concrete’’, *ACI Journal* 364-410, 1984.

ACI Committee 234, ‘‘Guide for the use of silica fume in concrete (ACI 234R)’’, *ACI Mater. J.* 92(4), 437–440, 1987.

Aitcin, P.C., High performance concrete, *E. & F.N. Spon*, London, New York, 1998.

Akkaya, Y. ve Kesler, Y.E., ‘‘Mikro kalsit katkısının betonun işlenebilirliğine, mekanik özelliklerine ve dayanıklılığına etkisi’’, *İMO Teknik Dergi* 384, 6051-6061, 2012.

Akman, M.S., ‘‘Yüksek performanslı betonlarda otojen rötre’’, *SIKA Teknik Bülten* 2000(4), 3-9, 2000.

Akman, M.S., ‘‘Yüksek performanslı betonların teknolojisi, özellikleri, sorunları, geleceği’’, *TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri* 427, 2003.

Ali, M. H., Dinkha, Y. Z. and Haido, J. H., ‘‘Mechanical properties and spalling at elevated temperature of high performance concrete made with reactive and waste inert powders’’, *Eng. Sci. Tech. Int. J.* 2016.

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

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

ASTM C1437-15, Standard test method for flow of hydraulic cement mortar, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2017.

ASTM C305-12, Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2017.

ASTM C348-14, Standard test method for flexural strength of hydraulic-cement mortars, *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2017.

ASTM C349-14, Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure), *American Society for Testing and Materials, ASTM International*, West Conshohocken, United States, 2017.

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

ASTM C618, 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.

Atis, C.D. and Bilim, C., “Wet and dry cured compressive strength of concrete containing ground granulated blast-furnace slag”, *Build. Environ.* 42, 3060–3065, 2007.

Aydın, S., Karatay, C. and Baradan, B., “The effect of grinding process on mechanical properties and alkali-silica reaction resistance of fly ash incorporated cement mortars”, *Powder. Technol.* 197, 68-72, 2010.

- Badogiannis, E. and Tsivilis, S., “Exploitation of poor Greek kaolins: durability of metakaolin concrete”, *Cem. Concr. Compos.* 31(2), 128–133, 2009.
- Bai J., et al., “Strength development in concrete incorporating PFA and metakaolin”, *Mag. Concr. Res.* 52(3), 153–162, 2000.
- Banthia, N. and Sheng, J., “Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites”, *Cem. Concr. Compos.* 18(4), 251-269, 1996.
- Binici, H., Durgun, M.Y., Rızaoğlu, T. and Koluçolak, M., “Investigation of durability properties of concrete pipes incorporating blast furnace slag and ground basaltic pumice as fine aggregates”, *Sharif Univ. Tech.* 19 (3), 366-372, 2012.
- Bijen, J., “Benefits of slag and fly ash”, *Constr. Build. Mater.* 10, 309–314, 1996.
- Blankendaal, T., Schuur, P. and Voordijk, H., “Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach”, *J. Clean. Pro.* 66, 27-36, 2014.
- Cabrera, J. and Rojas, M.F.A., “Mechanism of hydration of the metakaolin–lime– water system”, *Cem. Concr. Res.* 31(2), 177–182, 2001.
- Caldarone, M.A., High-strength concrete: a practical guide, *CRC Press*, USA, 2008.
- Chan, Y.W. and Li V.C., “Age effect on the characteristics of fiber/cement interfacial properties” *J. Mater. Sci.* 32(19), 5287-5292, 1997.
- Chindapasirt, P., Jaturapitakkul, C. and Sinsiri, T., “Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste”, *Cem. Concr. Compos.* 27, 425-428, 2005.
- Choi, S.J., Lee, S.S. and Monteiro, P.J.M., “Effect of Fly ash fineness on temperature rise, setting, and strength development of mortar”, *ASCE. J. Mater. Civil. Eng.* 24, 499-505, 2012.

Ciullo, P.A., *Industrial Minerals and Their Uses*, **Noyes Publications**, New Jersey, 1996.
Courard L., et al., “Durability of mortars modified with metakaolin”, **Cem. Concr. Res.** 33(9), 1473–1479, 2003.

Coleman, N. and Page, C., “Aspects of the pore solution chemistry of hydrated cement pastes containing metakaolin”, **Cem. Concr. Res.** 27(1), 147–154, 1997.

Cwirzen, A. and Penttala, V., “Aggregate–cement paste transition zone properties affecting the salt–frost damage of high-performance concretes”, **Cem. Concr. Res.** 35, 671–679, 2005.

Çağlayan, M., Haberveren, S., İpekoğlu, B. ve Kurşun, İ., “Beton yapımında kullanılan agregaların özellikleri ve örnek bir kuruluş (İSTON)”, **2. Ulusal Kırma Taş Sempozyumu**, İstanbul, Türkiye, s.69-79, 1999.

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

Detwiler, R.J. and Mehta, P.K., “Chemical and physical effects of silica fume on the mechanical behavior of concrete”, **ACI Mater. J.** 86, 609–614, 1989.

Diamond, S., Sahu, S. and Thaulow, N., “Reaction products of densified silica fume agglomerates in concrete”, **Cem. Concr. Res.** 34, 1625–1632, 2004.

Dinakar, P., Babu, K.G. and Santhanam, M., “Durability properties of high volume fly ash self-compacting concretes”, **Cem. Concr. Res.** 30(10), 880–886, 2008.

Ding, Y. and Kusterle, W., “Compressive stress-strain relationship of steel fiber-reinforced concrete at early-age”, **Cem. Concr. Res.** 30(10), 1573-1579, 2000.

Douglas, E., Wilson, H. and Malhotra, V. M., “Production and Evaluation of New Source of Ground Granulated Blast Furnace Slag”, **Cement, Concrete and Aggregates** 10, 75-87, 1987.

DPT, Devlet Planlama Teşkilatı, *Madencilik özel ihtisas komisyonu raporu*, 2611, 204, 2001.

Dumont, M., Wollastonite, *Canadian Minerals Yearbook*, Kanada, 2004.

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

Ganesan, K., Rajagopal, K. and Thangavel, K., “Rice hush ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete”, *Constr. Build. Mater.* 22(8), 1675-1683, 2007.

Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Ozturan, T., Öz, H.Ö. and Asaad, D.S., “Self-consolidating characteristics of concrete composites including rounded fine and coarse fly ash lightweight aggregates”, *Composites: Part B* 60, 757-763, 2014.

Givi, A.N., Rashid, S.A., Aziz, F.N.A. and Salleh, M.A.M., “Assessment of the effects of rice husk ash particle size on strength, water permeability and workability of binary blended concrete”, *Constr. Build. Mater.* 24, 2145-2150, 2008.

Güneyisi, E., Gesoglu, M., Azez, O.A. and Öz, H.Ö., “Physico-mechanical properties of self-compacting concrete containing treated cold-bonded fly ash lightweight aggregates and SiO_2 nano-particles”, *Constr. Build. Mater.* 101, 1142-1153.

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

Hamoush, S., Abu-Lebdeh, T., Cummins, T. and Zornig, B., “Pullout characterizations of various steel fibers embedded in very high-strength concrete”, *Am. J. Eng. Appl. Sci.* 3(2), 418-426, 2010.

Haner, S. ve Çuhadaroğlu, D., “Wollastonit: Bir Gözden Geçirme”, *Jeoloji Mühendisliği Dergisi* 37(1), 63-82, 2013.

Haque, M.N. and O. Kayali, “Properties of high-strength concrete using a fine fly ash”, *Cem. Concr. Res.* 28, 1445-1452, 1998.

Henkensiefken, R., Bentz, D., Nantung, T. and Weiss, J., “Volume change and cracking in internally cured mixtures made with saturated lightweight aggregate under sealed and unsealed conditions”, *Cem. Concr. Compos.* 31, 427-437, 2009a.

Henkensiefken, R., Castro, J., Bentz, D., Nantung, T. and Weiss, J., “Water absorption in internally cured mortar made with water-filled lightweight aggregate”, *Cem. Concr. Compos.* 39, 883-892, 2009b.

Hossain, A.B., Islam, S. and Copeland, K.D., “Influence of ultrafine fly ash on the shrinkage and cracking tendency of concrete and the implications for bridge decks”, *in: Transportation Research Board Annual Meeting 2007*, Transportation Research Board, Paper #07- 0022, Washington, 2007.

Hyeok-Jung, K., Sang-Min, P., Subbiah, K. and Seung-Jun, K., “Durability performance evaluation of concrete containing TDFA (Tire Derived Fuel Ash)”, *Constr. Build. Mater.* 133, 376-386, 2017.

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

Igarashi, S.I., Watanabe, A. and Kawamura, M., “Evaluation of capillary pore size characteristics in high-strength concrete at early ages”, *Cem. Concr. Res.* 35, 513–519, 2005.

Ji, Y.J. and Cahyadi, J.H., “Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes”, *Cem. Concr. Res.* 33, 1543–1548, 2003.

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

Kalla, P., Rana, A., Chad, Y.B., Misra, A. and Csetenyi, L., “Durability studies on concrete containing wollastonite”, *J. Clean. Pro.* 87, 726-734, 2015.

Khan, M.I., “Isoresponses for strength, permeability and porosity of high performance mortar”, *Build. Environ.* 38, 1051–1056, 2003.

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

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

Kurşun, İ. ve İpekoğlu, B., “Türkiye kuvars kumu potansiyeline genel bir bakış”, *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye, 21-22 Nisan, 1995.

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.

Larrad, F. ve Mailer, Y., “Yüksek performanslı beton”, *II. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, Türkiye, s.76-113, 1991.

Liu, J. and Wang, D., “Influence of steel slag-silica fume composite mineral admixture on the properties of concrete”, *Powder Technol.* 320, 230-238, 2017.

Low, N.M.P. and Beaudoin, J.J., “The Effect of Wollastonite Micro-Fibre Aspect Ratio on Reinforcement of Portland Cement-Based Binders”, *Cem. Concr. Res.* 23, 1467-1479, 1993.

Mailer, Y., “Présentation du projet national: voies nouvelles du matériau béton, Les bétons à hautes performances du matériau à l’ouvrage”, *Presses de l’école Nationale Des Ponts et Chaussées*, Paris, s.15-19, 1990.

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

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., “Marble slurry dust and wollastonite-inert mineral admixtures for cement concrete”, *Ind. Higw.* 35(12), 41-46, 2007b.

McGinnis, M.J., Davis, M., de la Rosa, A., Weldon, B.D. and Kurama, Y.C., “Strength and stiffness of concrete with recycled concrete aggregates”, *Constr. Build. Mater.* 154, 258-269, 2017.

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

Morsy, M.S., “Effect of temperature on hydration kinetics and stability of hydration phases of metakaolin-lime sludge-silica fume system”, *Ceramics – Silikaty* 49(4), 237–241, 2005.

Munir, M.J., Qazi, A.U., Kazmi, S.M.S., Khitab, A., Ashiq, S.Z. and Ahmed, I., “A literature review on alkali silica reactivity of concrete in Pakistan”, *Pak. J. Sci.* 68(1), 53–62, 2016.

Murat, M., “Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. I. Preliminary investigation on metakaolinite”, *Cem. Concr. Res.* 13(2), 259–266, 1983.

Nilson, A.H., “Design implications of current research on high-strength concrete”, **ACI SP-87**, Detroit: American Concrete Institute, 85-109, 1987.

Noumowe, A.N., Clastres, P., Delvicki, G. and Costaz, J.-L., “Thermal stresses and water vapor pressure of high performance concrete at high temperature”, *Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, Paris, s.561-570, 1996.

NYCO Minerals, <http://nycomineral.com/>, 2012.

Obla, K.H., Hill, R.L., Shashiprakash, S.G. and Perebatova, O., “Properties of concrete containing ultra-fine fly ash”, *ACI. Mater. J.* 100, 426-433, 2003.

Oner, A., Akyuz, S., and Yildiz, R., “An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete”, *Cem. Concr. Res.* 35(6), 1165–1171, 2005.

Orhan, E. ve Şahin, M., “Öğütülmüş atık cam tozu katkılı betonun basınç dayanımına yüksek sıcaklığın etkisi”, *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi* 5(1), 61-70, 2016.

Paul, F.K., Mineral descriptions-Wollastonite, Optical Mineralogy, 4th ed., *Mc Graw Hill*, New York, 1977.

Poon C.-S., et al., “Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes”, *Cem. Concr. Res.* 31(9), 1301–1306, 2001.

Poon, C.-S., Kou, S.C. and Lam, L., “Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete”, *Constr. Build. Mater.* 20, 858–865, 2006.

Pul, S., Hüsem, M. ve Öztekin, E., “Eğilme etkisindeki yüksek performanslı betonarme kesitlerde gerilme bloğu parametreleri”, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 6(3), 128-134, 2002.

Ramezani pour, A.A. and Malhotra, V.M., “Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume”, *Cement Concr. Compos.* 17, 125–133, 1995.

Ramezani pour, A. and Jovein, H.B., “Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes”, *Constr. Build. Mater.* 30, 470–479, 2012.

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

Ransinchung, G.D. and Kumar, B., “Investigations on pastes and mortars of ordinary portland cement admixed with wollastonite and microsilica”, *J. Mater. Civ. Eng.* 22(4), 305-313, 2010.

Rao, G.A., “Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars”, *Cem. Concr. Res.* 33(11), 1765-1770, 2003.

Rashid, M.A., Mansur, M.A. and Paramasivam, P., “Correlations between mechanical properties of high-strength concrete”, *J. Mater. Civ. Eng.* 14(3), 203–238, 2002.

Sabet, F.A., Libre, N.A. and Shekarchi, M., “Mechanical and durability properties of self consolidating high performance concrete incorporating natural zeolite, silica fume, and fly ash”, *Constr. Build. Mater.* 44, 175-184, 2013.

Sabir, B.B., Wild, S. and Bai, J., “Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review”, *Cem. Concr. Res.* 23(6), 441–454, 2001.

Sadouki, H. and Wittmann, F.H., “Numerical Investigations on damage in cementitious composites under combined drying and shrinkage and mechanical load”, *4th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures (Framcos)*, In: de Borst et al. (Eds), Cachan, France, s.95-98, 2001.

Sarız, K., “Endüstriyel Hammadde Yatakları ve Madenciliği”, *Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları* 1992.

Senff, L., Hotza, D., Lucas, S., Ferreira, V.M. and J.A. Labrincha, “Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars”, *Mater. Sci. Eng.* 532, 354-361, 2012.

Shen, P., Lu, L., Chen, W., Wang, F. and Hu, S., “Efficiency of metakaolin in steam cured high strength concrete”, *Constr. Build. Mater.* 152, 357-366, 2017.

Shi, C.J., Wang, D.H., Wu, L.M. and Wu, Z.M., “Silica fume had a positive effect on the early compressive strength of the mixtures due to its high pozzolanic activity and small particles”, *Cem. Concr. Compos.* 61, 44–52, 2015.

Shaikh, F.U.A. and Supit, S.W.M., “Compressive strength and durability properties of high volume fly ash (HVFA) concretes containing ultrafine fly ash (UFFA)”, *Constr. Build. Mater.* 82, 192-205, 2015.

Shi, H., Xu, B.w. and Zhou, X.C., “Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete”, *Constr. Build. Mater.* 23, 1980–1985, 2009.

Siddique, R., “Waste materials and by-products in concrete”, *Springer Science & Business Media* 2007.

Siddique, R. and Klaus, J., “Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review”, *Appl. Clay Sci.* 43(3), 392–400, 2009.

Siddique, R., Jameel, A., Singh M., Barnat-Hunek D., Kunal, Ait-Mokhtar, A., Belarbi, R. and Rajor, A., “Effect of bacteria on strength, permeation characteristics and micro-structure of silica fume concrete”, *Constr. Build. Mater.* 142, 92-100, 2017.

Soliman, A.M. and Nehdi, M.L., “Effect of natural wollastonite microfibers on early-age behavior of UHPC” *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (7), 816-824, 2012.

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

Soliman, N.A. and Tagnit-Hamou, A., “Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – towards ecofriendly concrete”, *Constr. Build. Mater.* 125, 600-612, 2016.

Soliman, N.A. and Tagnit-Hamou, A., “Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: filling the micro gap”, *Constr. Build. Mater.* 139, 374–383, 2017.

Song, H.W., Pack, S.W., Nam, S.H., Jang, J.C. and Saraswathy, V., “Estimation of the permeability of silica fume cement concrete”, *Constr. Build. Mater.* 24, 315–321, 2010.

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

Subramaniam, K.V., Gromotka, R., Shah, S.P., Obla, K. and Hill, R., “Influence of ultrafine fly ash on the early age response and the shrinkage cracking potential of concrete”, *J. Mater. Civ. Eng.* 17, 45-53, 2005.

Sujjavanich, S., Suwanvitaya, P., Chaysuwan, D. and Heness, G., “Synergistic effect of metakaolin and fly ash on properties of concrete” *Constr. Build. Mater.* 155, 830-837, 2017.

Suwanapruk, J., Sujjavanich, S. and Punyanusornkij, C., “Impact of low sulfate metakaolin on strength and chloride resistance of cement mortar and high strength concrete”, in: *Proceeding: The 2nd International Structural and Construction Engineering Conference*, Rome, Italy, s.1759–1764, 2003.

Sümer, M. ve Söyler, B., “Yüksek dayanımlı beton üretiminde çimento ve süper akışkanlaştırıcı beton katkı maddelerinin etkinliği”, *SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* 6(3), 15-20, 2002.

Swamy, R.N., “High-strength concrete - Material properties and structural behavior”, *ACI SP-87*, Detroit: American Concrete Institute, 119-146, 1985.

Şimsek, O., Beton ve Beton Teknolojisi, 2. baskı, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, 2007.

Tafraoui A., et al., “Metakaolin in the formulation of UHPC”, *Constr. Build. Mater.* 23(2), 669–674, 2009.

Tafraoui, A., Escadeillas, G. and Vidal, T., “Durability of the ultra high performances concrete containing metakaolin”, *Constr. Build. Mater.* 112, 980-987, 2016.

Talah, A., Kharchi, F. and Chaid, R., “Influence of marble powder on High Performance Concrete behavior”, *Procedia Eng.* 114, 685-690, 2015.

Taşdemir, M.A., Bayramov, F. ve Yerlikaya, M., “Geleneksel ve Yüksek Performanslı Çelik Donatılı Betonlar”, *TMH – Türkiye Mühendislik Haberleri* 426, 2003.

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.

Temiz, H., Kose, M.M. and Koksall, S., “Effects of portland composite and composite cements on durability of mortar and permeability of concrete”, *Constr. Build. Mater.* 21(6), 1170-1176, 2007.

Toutanji, H.A. and Bayasi, Z., “Effect of curing procedures on properties of silica fume Concrete”, *Cem. Concr. Res.* 29, 497–501, 1999.

TS EN 197-1, Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, 2002.

Ukwattage, N.L., Ranjith, P.G. and Bouazza, M., “The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon)”, *Fuel* 109, 400–408, 2013.

Ulubeyli, G.C. and Artır, R., “Sustainability for Blast Furnace Slag: Use of Some Construction Wastes”, *Procedia - Social and Behavioral Sciences* 195, 2191 – 2198, 2015.

Ünal, O. ve Uygunoğlu, T., Osman ÜNAL, “Soma termik santral atığı uçucu külün inşaat sektöründe değerlendirilmesi”, *Türkiye 14 Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı*, Zonguldak, Türkiye, s.311-321, 2-4 Haziran, 2004.

Vijayakumar, G., Vishaliny, H. and Govindarajulu, D., “Studies on glass powder as partial replacement of cement in concrete production”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering* 3(2), 153-157,2013.

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

Virta, R.L., “Wollastonite”, In Minerals yearbook, U.S. Geological Survey, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/wollastonite/myb1-2010-wolla.pdf>, 2011.

Virta, R.L., “Wollastonite”, In Minerals yearbook, U.S. Geological Survey, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/wollastonite/myb1-2011-wolla.pdf>, 2012.

Ulusu, H., Aruntas, H. Y. and Gencil, O., “Investigation on characteristics of blended cements containing pumice”, *Constr. Build. Mater.* 118, 11-19, 2016.

Yang, K.H., Jung, Y.B., Cho, M.S. and Tae, S.H., “Effect of supplementary cementitious materials on reduction of CO₂ emissions from concrete”, *J. Clean. Pro.* <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.03.018>.

Yazıcı, H., Yardımcı, M.Y., Yigiter, Y., Aydın, S. and S. Türkel, “Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag”, *Cem. Concr. Compos.* 32, 639-648, 2010.

Yogendran, V., Langan, B.W. and Ward, M.A., Hydration of cement and silica fume paste, *Cem. Concr. Res.* 21, 691–708, 1991.

Youm, K.S., Moon, J., Cho, J.Y. and Kim, J.J., “Experimental study on strength and durability of lightweight aggregate concrete containing silica fume”, *Constr. Build. Mater.* 114, 517–527, 2016.

Yu, R., Spiesz, P. and Brouwers, H.J.H., “Effect of nano-silika on the hydration and microstructure development of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with a low binder amount”, *Constr. Build. Mater.* 65, 140-150, 2014.

Zhang, T.S., Yu, Q.J., Wei, J.X., Zhang, P.P. and Chen, P.X., “A gap-graded particle size distribution for blended cements: analytical approach and experimental validation”, *Powder Technol.* 214, 259–268, 2011.

Zhang, Z.Q., Zhang, B. and Yan, P.Y., “Hydration and microstructures of concrete containing raw or densified silica fume at different curing temperatures”, *Constr. Build. Mater.* 121, 483–490, 2016a.

Zhang, Z.Q., Zhang, B. and Yan, P.Y., “Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete”, *Constr. Build. Mater.* 105, 82–93, 2016b.

Zhou, F.P., Barn, B.I.G. and Lydon, F.D., “Fracture properties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates”, *Cem. Concr. Res.* 25(3), 543–552 1995.

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.

Zhu, L.Z., Sohn, H.Y. and Bronson, T.M., “Flux growth of 2M-wollastonite crystals for the preparation of high aspect ratio particles”, *Ceramics International* 40, 5973-5982, 2014.

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

Wang, W., Lu, C., Li, Y. and Li, Q., “An investigation on thermal conductivity of fly ash concrete after elevated temperature exposure”, *Constr. Build. Mater.* 148, 148-154, 2017.

Wang, Q., Wang, D. and Chen, H., “The role of fly ash microsphere in the microstructure and macroscopic properties of high-strength concrete”, *Cem. Concr. Compos.* 83, 125-137, 2017.

Weber, S. and Reinhardt, H.W., “A new generation of high performance concrete: Concrete with autogenous curing”, *Advanced Cement Based Materials* 6, 59-68, 1997.

Xie, Y.J., Liu, B.J., Yin, J. and Zhou, S.Q., “Optimum mix parameters of high-strength self-compacting concrete with ultrapulverized fly ash”, *Cem. Concr. Res.* 32, 477-480, 2002.

ÖZ GEÇMİŞ

Muhammet GÜNEŞ 03.01.1993 tarihinde Nevşehir’de doğdu. İlk, orta ve lise öğretimini Nevşehir’de tamamladı. 2010 yılında girdiği Gümüşhane Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden Haziran 2014’de bölüm birinciliğiyle mezun oldu. 2015 yılında Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesine Araştırma Görevlisi olarak atandı. Yine aynı yılın Mart ve Eylül ayları arasında Boğaziçi Üniversitesinde yabancı dil (ingilizce) eğitimi aldı. 2016 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi’ne yüksek lisans öğrenimini almak üzere görevlendirildi.



