



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

DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI  
HARÇ ÜZERİNE ETKİLERİ

BEYTULLAH MALKOÇ

Ocak 2020



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

DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI  
HARÇ ÜZERİNE ETKİLERİ

BEYTULLAH MALKOÇ

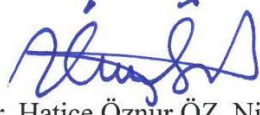
Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ

Ocak 2020

**Beytullah MALKOÇ** tarafından **Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ** danışmanlığında hazırlanan “**Doğal Vollastonitin Yüksek Performanslı Harç Üzerine Etkileri**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **İnşaat Mühendisliği** Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.



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



Üye : Doç. Dr. Hatice ÇITAKOĞLU, Erciyes Üniversitesi, Mühendislik  
Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü



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

**ONAY:**

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

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

**Prof. Dr. Murat BARUT**  
**MÜDÜR**

## TEZ BİLDİRİMİ

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

  
Beytullah MALKOÇ

## ÖZET

### DOĞAL VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇ ÜZERİNE ETKİLERİ

MALKOÇ, Beytullah

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman

:Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ

Ocak 2020, 72 sayfa

Bu çalışma kapsamında doğal vollastonit yüksek performanslı harçta değişen oranlarda çimento ile yer değiştirilerek doğal vollastonitin yüksek performanslı harçta dayanım ve kalıcılık üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Yüksek performanslı harç üretim aşamasında su/bağlayıcı oranı sabit tutularak vollastonit minerali %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında karışıma eklenmiştir. Ayrıca su azaltıcı katkı maddesi olan süper akışkanlaştırıcı vasıtasıyla karışımın akıcılığı sağlanmıştır. Üretim aşamasında ilk etapta karışımda vollastonit kullanılmadan kontrol harcı üretilmiş, sonraki üretim aşamalarında ise yukarıdaki oranlarda vollastonit minerali çimento ile yer değiştirecek şekilde karışıma ilave edilmiştir. Üretilen numuneler bir günlük kalıplama süresinin ardından kür havuzlarına alınmıştır. Basınç, eğilme ve ultrasonik titreşim hızı testleri 3., 7., 28 ve 90. günlerde yapılırken, kılcal su geçirimsizliği ve gaz geçirimsizliği deneyleri 28. ve 90. günde ölçülmüştür. Bu deneylerden elde edilen sonuçlara göre %3 vollastonit içeren karışımlarda tüm deneyler için performansta iyileşme gözlenmiştir. %6 vollastonit içeriğine sahip karışımlarda ise kontrol harcına oranla daha iyi sonuçlar alınırken %3 vollastonit içeren karışıma göre performansta azalmalar gözlenmiştir. Vollastonit kullanımıyla performansta yaşanan iyileşmenin sebebi bu mineralin sahip olduğu iğnemsiz yapı ve yüksek elastisite modülüyle açıklanabilir.

*Anahtar Sözcükler:* Vollastonit, yüksek performanslı harç, yüksek dayanım, durabilite

## SUMMARY

### THE EFFECTS OF NATURAL WOLLASTONİTE ON HIGH PERFORMANCE MORTARS

MALKOÇ, Beytullah

Niğde Ömer Halisdemir University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Hatice Öznur ÖZ

January 2020, 72 pages

In this study, the effects of natural wollastonite on the strength and permanence of high performance concrete (HPC) were investigated. In the high performance mortar production, wollastonite mineral was added to the mixture at 3%, 6%, 9%, 12% and 15% by keeping the water/binder ratio constant. In addition, the workability of the mixture was achieved by means of the superplasticizer, a water reducing admixture. In the first stage of the production, control mortar was utilized without using wollastonite in the mixture. After one day of molding, the samples were taken to curing ponds. Compressive, flexural and ultrasonic pulse velocity tests were conducted at 3,7, 28 and 90 days while sorptivity and gas permeability test were measured at 28 and 90 days. According to the obtained results of these experiments, the performance increment of mixture containing 3% wollastonite was observed for all experiments. Considering the mixtures containing 6% wollastonite, better results was obtained as against the control group where the decrement in performance is observed with the comparison of the mixture containing 3% wollastonite. The improvement of the performance with the use of wollastonite can be explained with it's acicular structure and high modulus of elasticity.

*Keywords:* Wollastonite, high performance mortar, high strength, durability

## ÖN SÖZ

Bu yüksek lisans çalışmasında, doğal vollastonit mineralinin yüksek performanslı harç üzerine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda üretilen harç numunelerinin taze halde iken yayılma çapları ölçülmüş, sonrasında kalıplanarak kür havuzuna alınan numuneler 3., 7., 28. ve 90. günlerde basınç, eğilme ve ultrasonik titreşim hızı testlerine tabi tutulmuş, aynı zamanda 28. ve 90. günlerde ise kılcal su geçirimsizliği ve gaz geçirimsizliği deneyleri yapılmıştır. Elde edilen test sonuçlarına göre, çimento yerine kullanılan vollastonit miktarının artmasıyla yayılma çapında az da olsa düşüş yaşanırken diğer testlerde olumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Yüksek lisans tez çalışmamın planlanması, yürütülmesi ve oluşumunda bilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirmeleriyle çalışmalarımı şekillendiren çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Çalışmam esnasında her türlü yardım ve araştırmamın tamamlanmasında kıymetli katkılarından dolayı çok kıymetli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan Erhan YÜCEL'e müteşekkir olduğumu ifade etmek isterim. Çalışmalarımın tüm aşamalarında bana her türlü desteğini esirgemeyen ve birçok konuda yardımına başvurduğum Arş. Gör. Muhammet GÜNEŞ'e teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmam boyunca her türlü yardım ve katkılarından dolayı Proje As. Yasin KAYA'ya teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca bu tezin hazırlanmasında yardımlarından dolayı İnş. Yük. Müh. ve aynı zamanda İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi-I Laboratuvarı sorumlusu Sayın Zekeriya KOYUNCU'ya minnet ve şükran duygularımı belirtmek isterim.

Bu tezi, çalışmalarım ve tüm hayatım boyunca bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme ve çalışmalarımın ve hayatımın her aşamasında bana destek olan, varlığıyla bana güç veren çok kıymetli Merve EVRENSEL'e ithaf ediyorum.

## İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	v
ÖN SÖZ.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ.....	xii
SİMGE VE KISALTMALAR.....	xiii
BÖLÜM I.....	1
BÖLÜM II.....	5
2.1 Yüksek Performanslı Betonun Tanımı.....	5
2.2 Yüksek Performanslı Betonun Özellikleri.....	6
2.3 Yüksek Performanslı Betonun Kullanım Alanları.....	7
2.4 Yüksek Performanslı Beton İçeriğinde Kullanılan Malzemeler.....	7
2.4.1 Çimento.....	8
2.4.2 Beton karışım suyu.....	8
2.4.3 Agregası.....	9
2.4.4 Kimyasal katkıları.....	9
2.4.5 Mineral katkıları.....	11
2.4.5.1 Silis dumanı.....	12
2.4.5.2 Uçucu kül.....	14
2.4.5.3 Yüksek fırın cürufu.....	16
2.4.5.4 Cam tozu.....	16
2.4.5.5 Diğer mineral katkı malzemeleri.....	17
2.5 Vollastonitin Tanımı ve Özellikleri.....	17
2.5.1 Vollastonitin mineralojisi, fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	18
2.6 Vollastonit Üretimi.....	20
2.6.1 Vollastonit oluşumu.....	20
2.6.2 Sentetik vollastonit.....	21
2.7 Vollastonitin Kullanım Alanları.....	22
2.7.1 Seramik sanayi.....	22

2.7.2 Plastik sanayi.....	23
2.7.3 Boya ve kaplama sanayi .....	24
2.7.4 Diğer sanayi uygulamaları .....	24
2.8 Vollaistonit Rezervleri .....	25
2.8.1 Dünyada vollaistonit rezervleri .....	25
2.8.2 Türkiye'deki vollaistonit rezervleri.....	26
2.9 Vollaistonitin Beton ve Harç �zerine Etkileri.....	27
BÖLÜM III.....	29
3.1 YPH Tasarımında Kullanılan Malzeme ve özellikleri .....	29
3.1.1 Çimento.....	29
3.1.2 Vollaistonit .....	29
3.1.3 Süper akışkanlaştırıcı (SA) ve harç karışım suyu .....	30
3.1.4 Agrega .....	30
3.2 YPH Karışım Oranları ve �retim Prosedürü .....	31
3.2.1 VYPH karışım oranları.....	31
3.2.2 VYPH �retim aşamaları .....	32
3.3 Deneysel alışmalar .....	34
3.3.1 Yayılma deneyi .....	34
3.3.2 Sertleşmiş birim ağrlık tespiti .....	35
3.3.3 Basınç deneyi .....	36
3.3.4 Eğilme deneyi.....	37
3.5.2 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi.....	38
3.5.3 Kılcal su geçirimliliği deneyi.....	39
3.5.4 Gaz geçirimliliği deneyi.....	41
BÖLÜM IV.....	43
4.1 Yayılma apı.....	43
4.2 Sertleşmiş Birim Ağrlık .....	47
4.3 Basınç Dayanımı .....	48
4.4 Eğilme Dayanımı .....	51
4.6 Ultrasonik Titreşim Hızı .....	53
4.7 Kılcal Su Geçirimliliği .....	54
4.8 Gaz Geçirimliliği.....	56
BÖLÜM V .....	59
KAYNAKLAR .....	62



## ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. Vollaştonit mineraline ait bazı özellikler.....	20
Çizelge 3.1. Çimento ve vollaştonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	29
Çizelge 3.2. Kuvartz kumunun tane boyutu ve özgül ağırlık değerleri.....	30
Çizelge 3.3. VYPH karışım oranları.....	30



## ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Tarihsel süreçte betonun su/çimento-dayanım ilişkisi.....	6
Şekil 2.2. Değişik oranlarda silis dumanı içeren harç örneklerinin 28 günlük basınç dayanımları.....	13
Şekil 2.3. Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi.....	14
Şekil 2.4. Değişik oranlarda uçucu kül içeren harç örneklerinin basınç dayanımı zaman ilişkisi.....	15
Şekil 2.5. 1990 yılı dünya vollastonit üretimi.....	25
Şekil 2.6. 2010 yılı dünya vollastonit üretimi.....	26
Şekil 3.1. Gaz geçirimliliği test düzeneği.....	40
Şekil 4.1. VYPH karışımlarının yayılma çapları.....	46
Şekil 4.2. VYPH karışımlarının sertleşmiş birim ağırlık değerleri.....	47
Şekil 4.3. VYPH karışımlarının basınç dayanımı değişimleri.....	49
Şekil 4.4. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre basınç dayanımındaki yüzde değişimleri.....	49
Şekil 4.5. VYPH karışımlarının eğilme dayanımı değişimleri.....	51
Şekil 4.6. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre eğilme dayanımındaki yüzde değişimleri.....	51
Şekil 4.7. VYPH karışımlarının ultrasonik titreşim hızı değişimler.....	52
Şekil 4.8. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre ultrasonik titreşim hızındaki yüzde değişimleri.....	53
Şekil 4.9. VYPH karışımlarının kılcal su geçirimliliği değişimleri.....	54
Şekil 4.10. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre kılcal su geçirimliliğindeki yüzde değişimleri.....	55
Şekil 4.11. VYPH karışımlarının gaz geçirimliliği değişimleri.....	56
Şekil 4.12. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre gaz geçirimliliğindeki yüzde değişimleri.....	56

## FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Vollastonitin parçacık morfolojisi (NYCO, 2012).....	19
Fotoğraf 3.1. CEM I 42,5 R Portland çimentosu (a), ve vollastonit minerali (b).....	28
Fotoğraf 3.2. Karışımda kullanılan malzemeler (a) ve harç mikseri (b).....	32
Fotoğraf 3.3. Silindir numunelerin (a) ve prizmatik numunelerin kalıplanmış hali (b).....	32
Fotoğraf 3.4. Yayılma tablası ve akış kalıbı.....	33
Fotoğraf 3.5. Tabakaların şişlenmesi (a), harç yüzeyinin mala yardımıyla düzeltilmesi (b) ve akış kalıbının harçtan ayrılması (c).....	33
Fotoğraf 3.6. Yayılmasını tamamlamış harç (a) ve kumpas yardımıyla yayılma çapının tespiti (b).....	34
Fotoğraf 3.7. Sertleşmiş birim ağırlık tespitinde kullanılan prizmatik numuneler.....	35
Fotoğraf 3.8. Eğilme deneyinden elde edilen 6 adet numune (a) ve numunenin basınç deneyi cihazına yerleştirilmiş hali (b).....	36
Fotoğraf 3.9. Numunenin deney cihazına yerleştirilmesi (a) deneyin tamamlanmış hali (b) ve deney sonucu elde edilen 6 adet numune (c).....	37
Fotoğraf 3.10. UTH deney cihazı ve deneyde kullanılan numune.....	38
Fotoğraf 3.11. Numunelerin etüvde kurutulması (a) ve numune yüzeyinin silikonlanması (b).....	39
Fotoğraf 3.12. Kılcal su geçirimsizliği test düzeneği (a) ve numunelerin tartılması (b)...	39
Fotoğraf 3.13. Dijital basınç ölçer (a), geçirgenlik hücresi (b) ve numunenin hücreye yerleştirilmiş hali (c).....	41
Fotoğraf 4.1. VYPH0'ın yayılma çapı.....	43
Fotoğraf 4.2. VYPH3'ün yayılma çapı.....	43
Fotoğraf 4.3. VYPH6'nın yayılma çapı.....	44
Fotoğraf 4.4. VYPH9'un yayılma çapı.....	44
Fotoğraf 4.5. VYPH12'nin yayılma çapı.....	45
Fotoğraf 4.6. VYPH15'in yayılma çapı.....	45

## SİMGE VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$Al_2O_3$	Alüminyum trioksit
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat (Kireç taşı)
$CaO$	Kalsiyum oksit
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum hidroksit
$CaSiO_3$	Kalsiyum meta silikat (Vollastonit)
C-S-H	Kalsiyum-silika-hidrat
CO	Karbon monoksit
$CO_2$	Karbon dioksit
$Na_2O$	Sodyum oksit
$SiO_2$	Silisyum dioksit
$SO_3$	Kükürt trioksit
$Fe_2O_3$	Demir trioksit
$MgO$	Magnezyum oksit
$K_2O$	Potasyum oksit
S	Kükürt
m	Metre
cm	Santimetre
mm	Milimetre
$\mu m$	Mikrometre
kg	Kilogram
g	Gram
ml	Mililitre
Pa	Pascal
GPa	Gigapascal
s/b	su/bağlayıcı
s/ç	su/çimento
$^{\circ}C$	Santigrat derece

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
ASTM	Amerikan Deneş ve Malzeme Birliği
IARC	Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı
NOHSC	Avustralya Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği
SA	Süper Akışkanlaştırıcı
TS	Türk Standartları
UTH	Ultrasonik Titreşim Hızı
VYPH	Vollastonit Katkılı Yüksek Performanslı Harç
YDB	Yüksek Dayanımlı Beton
YPB	Yüksek Performanslı Beton
YPH	Yüksek Performanslı Harç

# BÖLÜM I

## GİRİŞ

Kompozit bir yapı malzemesi olan beton günümüzde birçok farklı sektör ve alanda kullanılmaktadır. Gelişen dünya şartları ve artan insan ihtiyaçlarıyla beraber her alanda olduğu gibi yapı alanında da daha dayanıklı, daha fonksiyonel ve daha uzun ömürlü elemanlara olan ihtiyaç artmaktadır. Bir yapı malzemesi olarak beton geçmişten günümüze vazgeçilmez bir üretim aracı olmuştur. Her dönem gelişen şartlarla birlikte beton da dayanım, kalıcılık, farklı çevresel etkilere karşı daha yüksek performans elde edebilme gibi konularda sürekli bir gelişim göstermiştir. Öyle ki bir zamanlar horasan harcında yumurta akı ile dayanım arttırılmaya çalışılırken bu gün geldiğimiz noktada katı ve sıvı halde birçok katkı malzemesi beton performansının iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Bu iyileştirmeler yapılırken kimi zaman bağlayıcı kimi zaman agrega yerine değişen oranlarda farklı malzemeler kullanılarak mekanik ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesi birincil hedef olmuştur. Bu hedef kapsamında çağımızda yüksek performanslı beton tanımı literatürdeki yerini çoktan almış ve bu konudaki çalışmalar bir hayli artmıştır. Yüksek performanslı betonun üretim aşamaları dikkate alındığında bir takım zorlu süreçler yaşansa da uzun vadede ve dayanım ve kalıcılık yönünden bakıldığında artı yönleri göz ardı edilemeyecek kadar fazla olmaktadır.

Beton üzerine yapılan çalışmalara bakıldığında günümüzde birçok farklı beton tasarımın yapıldığı görülmektedir. Bu tasarımlarda kimi zaman yalnız mekanik özellikleri iyileştirme ön plana çıkarken kimi zaman deniz tuzu veya farklı kimyasallara karşı beton direncini arttıracak kalıcılık özelliklerinin iyileştirilmesi ana etken olmaktadır. Betonda hem mekanik hem de durabilite özelliklerinin iyileştirilmesinin amaçlandığı yüksek performanslı beton ise bu farklı beton tasarımları arasında araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir. Bugün yüksek dayanımlı betonun özel bir türü olan yüksek performanslı betonla ilgili birçok çalışma yürütülmektedir.

Yüksek performanslı beton üretiminde esas amaç basınç ve eğilme gibi mekanik özellikleri arttırmanın yanında sünme, rötne ve donma çözünme gibi dayanıklılık kriterlerini de maksimum düzeyde iyileştirmektir. Tüm bu mekanik ve durabilite özelliklerini sağlamanın yolu düşük su/bağlayıcı oranını koruyabilmekten geçmektedir.

Bu oranı korumak için beton içeriğine koyulacak kimyasal ve mineral katkı malzemeleriyle birtakım müdahaleler yapılmaktadır. Su/bağlayıcı oranının düşürülmesiyle beton işlenebilirlik yeteneği düşmekte bunun bir sonucu olarak farklı kimyasallar kullanılarak bu yeteneğin betona kazandırılması zorunlu hale gelmektedir. Bu aşamalar göz önüne alındığında yüksek performanslı beton üretimi normal betona göre çok daha karmaşık bir hal almaktadır. Yüksek performanslı betonun tasarımı dikkate alındığında su/bağlayıcı oranını 0.35 ve daha küçük oranlarda tutmak gerekmektedir (Taşdemir vd., 2003). Günümüz koşullarında yüksek performanslı betona ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Bu sebeple yapılan araştırmalarda yüksek performanslı betonda bakım koşullarından dolayı oluşan değişimlerin incelenmesi büyük yer kaplamaya başlamıştır. Kaçınılmazdır ki yüksek performanslı beton içeriğinde büyük oranda çimento barındırır ve beton içeriğindeki bu çimentonun hidrate olması için gereken su ortamda bulunmaz. Yüksek performanslı betonda normal betonda olduğu gibi dış ortamdan da betona su girişi yüksek performanslı betonun geçirimsiz yapısından ötürü sağlanamaz. (Weber ve Reinhardt, 1997). Sadouki ve Wittmann'a (2001) göre yüksek performanslı beton içeriğindeki su miktarının azlığı sebebiyle çimento hamurundaki hacimsel deformeler daha erken yaşlarda başlamaktadır.

Şüphesiz ki çimento beton tasarımında vazgeçilemez bir unsurdur. Ancak çimento üretim aşamaları göz önüne alındığında yüksek miktarda enerji gerektirdiği ve birçok çevresel sorunu beraberinde getirdiği görülecektir. Bu sorunları göz ardı edemeyen araştırmacılar beton içerisinde çimento kullanımını azaltacak, belirli oranlarda çimento yerine kullanılabilir malzemelerin arayışı içine girmiştir. Yapılan araştırmalarla bulunan veya elde edilen mineral katkı malzemeleri beton içerisinde kullanılarak beton performansı konusunda birçok noktada iyileştirme sağlanmıştır. Mekanik ve durabilite özelliklerine birçok faydası olan bu minerallerin belli oranlarda çimento ile yer değiştirmesi ile hidrasyon ısı ve hidrasyon ısıyla ortaya çıkan bazı olumsuzluklarda minimize edilmektedir. Ayrıca kimi yapılarda ihtiyaç duyulan betonun ancak yüksek maliyetlerle elde edilebildiği durumlarda mineral katkılar kullanılarak maliyetler aşağı çekilmekte ve bu katkıların kullanılmasıyla azalan çimento üretimi sonucu enerji kaynaklarının kullanımı farklı yönlere kaydırılabilmekte daha çevreci bir mekanizma oluşabilmektedir (Kalla vd., 2015; Ransinchung ve Kumar, 2010; Sabet vd., 2013).

Çağımızda birçok mineral katkı malzemesinin beton üretiminde kullanıldığını görmekteyiz ve bu katkıların beton içerisinde kullanılmasıyla betonun performans özelliklerinin olumlu yönde etkilendiğini yapılan çalışmalar göstermektedir. Örneğin bu çalışmalardan birinde doğal zeolit, silis dumanı ve uçucu kül belli oranda çimento yerine kullanılarak betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri iyileştirilmiş ve kendiliğinden yerleşen yüksek performanslı beton üretimi yapılmıştır (Sabet vd., 2013). Ayrıca Talah vd. (2015), yaptıkları çalışmada mineral katkı olarak mermer tozu kullanmış, mermer tozunun betonda dayanımı arttırdığı ayrıca klor iyonu geçirimsizliğini azalttığı sonucuna ulaşmışlardır.

Yukarıda da görüldüğü gibi değişik mineral katkı maddelerinin betonun dayanım ve durabilite özelliklerine etkileri araştırılmaktadır; vollastonit minerali de beton performans özelliklerine etkisi yönünden birçok araştırmaya konu olmaktadır. Vollastonit boyut açısından çimento boyutuna yakın kalsiyum, silisyum ve oksijenin bileşiminden oluşan bir kalsiyum meta silikattır (CaSiO<sub>3</sub>) (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013; Kalla vd., 2015; Ransinchung ve Kumar, 2010; Soliman ve Nehdi, 2012). Vollastonit minerali, kalsit içeren kalker (CaCO<sub>3</sub>, kireç taşı) ve silikanın (SiO<sub>2</sub>) yüksek değerdeki sıcaklıklarda sıcak magma içerisinde değişiminden oluşmaktadır (Paul, 1977; Ransinchung ve Kumar, 2010). Reaksiyonu aşağıdaki gibi gösterebiliriz (Paul, 1977):



Vollastonit mineralinin teorik olarak kimyasal bileşenleri, % 48.3 CaO ve %51.7 SiO<sub>2</sub>'den meydana gelmektedir ve ender olarak saf durumda bulunur. Genelde potasyum, alüminyum, magnezyum, manganez, demir ve stronsiyum elementleriyle bir arada bulunur. Saf vollastonit parlak ve beyazdır. Safsızlığın tipine göre gri, krem, kahverengi vb. renklerde olabilir (Sarız, 1992; Virta, 2001; Dumont,2004; Kogel vd., 2006). Vollastonit kırılma ve öğütülme işlemleri sırasında, kendine özgü dilinim özelliklerinden dolayı, iğneye benzeyen parçacıklar meydana gelir. Ürünlere yüksek dayanım sağlayan bu parçacık morfolojisi olmaktadır (Kogel vd., 2006). Doğal yollarla oluşmuş vollastonit mineralini incelediğimizde metalik bir yapıda olmadığını, iğneye benzeyen (iğne uçlu) kristal bir yapıya sahip olduğunu ve alkali özellik gösterdiğini (pH 9.8) doğada saf halde beyaz renkli olarak bulunduğunu görebiliriz (Ciullo, 1996; Kogel vd. 2006).

Bu tez çalışmasında, doğal vollastonit mineralinin yüksek performanslı harçların taze, dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerine etkisinin deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, harçların üretim aşamasında vollastonit minerali %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek harca eklenmiştir. Ayrıca karşılaştırma yapabilmek adına bağlayıcı olarak yalnızca çimento kullanılan 0.35 sabit su/bağlayıcı oranına sahip bir kontrol harcı (VYPH0) üretilmiştir. Üretilen harçların taze haldeki özelliklerini incelemek amacıyla yayılma çapları ölçülmüş, sertleşmiş haldeki performans özelliklerini incelemek amacıyla ise basınç ve eğilme dayanımları ile ultrasonik titreşim hızı deneyleri 3., 7., 28. ve 90. günlerde; kılcal su geçirimliliği ve gaz geçirimliliği deneyleri ise 28. ve 90. günlerde yapılarak elde edilen değerler karşılaştırılmıştır.



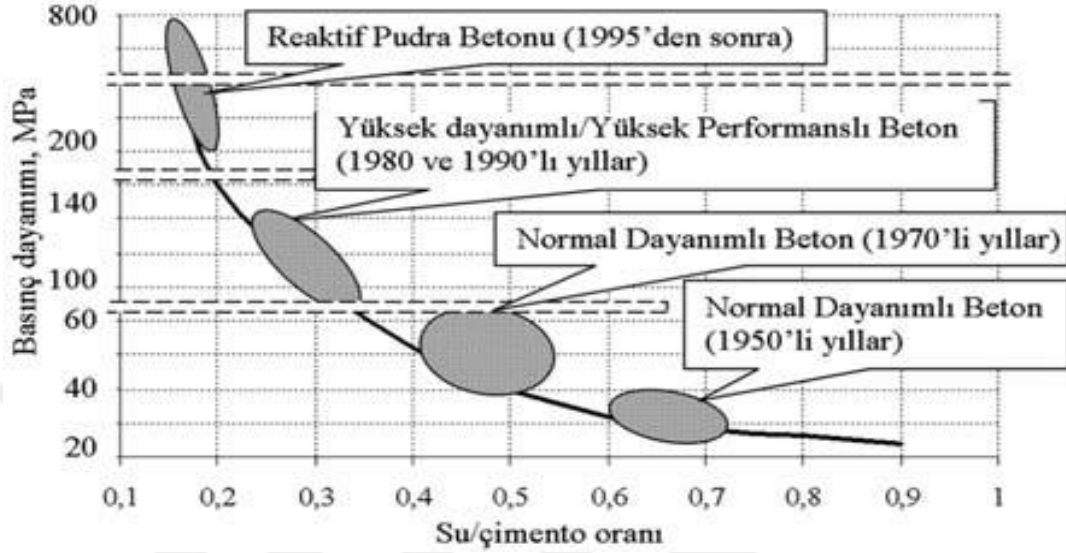
## BÖLÜM II

### YÜKSEK PERFORMANSLI BETON

#### 2.1 Yüksek Performanslı Betonun Tanımı

Beton elde edilmesi kolay, mühendislik açıdan istenen dayanım ve ekonomiklik özelliklerini sağlayan ve ister alt yapı olsun ister üst yapı olsun inşaat sektörünün birçok alanında kendine kullanım alanı bulan; üretim ve malzeme temini yönünden üretici ve kullanıcılarını tatmin eden, yıllardır sektördeki yerini koruyan ve sürekli gelişim içinde olan bir yapı malzemesidir (Binici vd., 2012; Hyeok-Jung vd., 2017; Ulusu vd., 2016). Yüksek performanslı beton ise her betonda olduğu gibi çimento ve agrega dışında kimyasal ve mineral katkılara ihtiyaç duyulan böylece su/çimento oranının çok aşağılara çekilebildiği ve basınç dayanımının 100 N/mm<sup>2</sup> seviyelerine kadar arttırıldığı halde işlenebilirliğini koruyan özel bir beton türüdür (Sümer ve Söyler, 2002). Gelişen çağımız şartlarıyla beraber yapı sektöründeki gelişmelerde kaçınılmaz olmuştur. Yapı alanında yaşanan bu gelişmelerle beraber sektörün vazgeçilmez bir unsuru olan betonda yeni gelişme ve üretim yöntemlerinin üretilmesini zorunlu hale getirmektedir. Bu gün birçok araştırmacı artık normal beton kalıplarını kırarak dayanım ve dayanıklılık açısından daha yüksek performans sağlayan beton üretimi arayışındadır. Böylece ortaya Yüksek Performanslı Beton (YPB) kavramı çıkmıştır. YPB basınç ve eğilme gibi mekanik özelliklerde üstün performansının yanında dayanıklılık koşullarını da sağlayan özel bir yüksek dayanımlı beton (YDB) türüdür (Taşdemir vd., 2003). Yapılan çalışmalar ve geliştirilen yöntemlerle birlikte yüksek dayanımlı beton (YDB) daha işlenebilir ve dayanıklılık yönünden de daha üstün özelliklere sahip bir hale kavuşmuş böylece yüksek dayanımlıbeton (YDB) yüksek performanslı beton (YPB) olarak adlandırılmaya başlanmıştır (Akman, 2003; Mailer, 1990). Halen gelişmekte olan YPB teknolojisi üretim şartlarına, üretildiği zaman ve mekâna göre farklı isimlendirmelerde alabilmektedir. Örneğin, 1950'lerde günümüzde normal dayanımlı beton olarak kabul ettiğimiz 34 MPa basınç dayanımına sahip betonlar “Yüksek Performanslı Beton” olarak değerlendirilmekteydi. 1960'lı yıllara gelindiğinde ise ticari amaçlarla 41 MPa ile 52 MPa arasında basınç dayanımına sahip betonlar üretilmiştir. Bundan sonraki 10 yıllık süreçte ise bu basınç dayanımlarının 60 MPa'a kadar çıkarılması sağlanmıştır. Günümüze geldiğimizde ise yüksek performanslı beton olarak basınç dayanımları 80

MPa ile 100 MPa arasında değişen beton üretimi yapılabilmektedir. (ACI Committee 363-R84, 1984; Larrad ve Mailer, 1991; Nilson, 1987; Pul vd., 2002; Swamy, 1985). Şekil 2.1’de tarihsel süreçte beton dayanımının su/çimento oranıyla değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Tarihsel süreçte betonun su/çimento-dayanım ilişkisi (Taşdemir vd. 2003)

## 2.2 Yüksek Performanslı Betonun Özellikleri

YPB dayanımını etkileyen birçok farklı özellik bulunur. Bu özellikler beton karışımında kullanılan malzemelere bağlı olduğu kadar bu malzemelerin birbiriyle olan etkileşimine de bağlıdır. Beton karışımında kullanılan agrega çapı, çimento cinsi ve mineral katkı oranı beton dayanımını doğrudan etkileyen unsurlardır. Ayrıca çimento hamurundaki boşluk oranı ve agrega ile çimento hamuru arasındaki bağlanma kuvveti özelliklerine bağlı olarak dayanım değişme gösterebilmektedir. Bu konularla ilgili beton dayanımında performans artışı için su/çimento oranı düşürülebilir veya karışımında kullanılacak agreganın dane çapı düşürülerek performans artışı sağlanabilir. Tahmin edileceği üzere beton karışım ve malzeme oranlarında yapılacak değişimlerin bir alt veya üst sınırı bulunur. Bu sınırları koruyamamak karışım performansını olumsuz yönde etkileyerek istenen sonucun alınmasını engelleyecektir. Bu noktada beton dayanımında istenen sonucun elde edilmesi için farklı tür malzemeler yardımıyla beton karışımları tasarlanmaktadır. Örneğin su/çimento oranı düşürülerek yüksek dayanım elde etmek istenen bir betonda süper akışkanlaştırıcı kullanılarak düşük su/çimento oranında betonun işlenebilirliği sağlanabilir. Silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, cam

tozu gibi mineral katkı maddeleri de yüksek performanslı betonda kullanılan diğer katkı maddelerine örnek gösterilebilir (Sümer ve Söyler, 2002).

### **2.3 Yüksek Performanslı Betonun Kullanım Alanları**

Gelişen dünya şartları ile beraber yapı sektörü de birçok alanda gelişme göstermiş ve eskiye nazaran daha dayanıklı yapılar tesis etme ihtiyacı doğmuştur. Yapı alanında kullanılan ana bileşenlerden olan beton sektörü de bu ihtiyaca cevap verebilmek adına her geçen gün gelişimini devam ettirmektedir. 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. yapılar yüksek beton dayanımına ihtiyaç duyulan yapılardır. Görüldüğü üzere YPB oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir (Ali vd., 2016; Sümer ve Söyler, 2002). Ayrıca YPB, yüksek basınç dayanımı gerektiren yapılarda kullanım açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Özellikle basınç yönünde çalışan bir yapı elemanı olan kolonda, YPB kullanımı kolon boyutlarını daha küçük tasarlamaya el vermekte böylece yapı içerisindeki yaşanılabilir alanlar artmakta ve toplam yapı ağırlığı da azalmaktadır. (Rashid vd., 2002).

### **2.4 Yüksek Performanslı Beton İçeriğinde Kullanılan Malzemeler**

Tahmin edileceği üzere YPB tasarım ve elde edilmesi normal beton üretimine kıyasla çok daha karışık ve zaman alan bir süreçtir. YPB içerisinde normal betondan farklı olarak birçok değişik kimyasal ve mineral katkı malzemesi bulunmaktadır. Beton içerisine giren bu malzemelerin artmasıyla beton dayanımı yalnız su/çimento oranına bağlı olarak değişmez. YPB, yüksek dozajda çimento oranının yanında kullanılan agregasında yüksek dayanımlı olması gereken ve çeşitli kimyasal ve mineral katkı malzemelerinin kullanıldığı özel bir beton türüdür. YPB'nin üretiminde kimyasal katkı malzemesi olarak istenilen işlenebilirliği yakalamak adına 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).

### **2.4.1 Çimento**

Çimento beton ve harç tasarımı için vazgeçilemez bir bağlayıcı malzeme olarak görev yapmaktadır. Temel bir bağlayıcı olan çimento, beton ve harç üretimi için vazgeçilmez bir malzemedir. Çimentonun su ile kimyasal reaksiyona girmesi sonucu çimento hamuru olarak adlandırılan ve plastik özellik gösteren bir karışım meydana gelir. Çimentonun su ile birleşmesiyle birlikte dışarı ısı veren bir reaksiyon başlar ve bu reaksiyon sonucu oluşan çimento hamuru zamanla sertleşerek dayanım kazanan bir yapı oluşturur. Taze haldeki beton karışımlarında çimento hamuru işlenebilir haldedir bu sayede betonun karıştırılması kalıplara yerleştirilmesi ve kalıba yerleşen karışımın çeşitli yöntemlerle sıkıştırılması mümkün hale gelir. Taze haldeki beton içerisindeki çimento tanecikleri su ile birleşerek prizini tamamlar böylece sertleşen çimento hamuru zamanla betona dayanım kazandırır. Beton üretiminde ana materyallerden olan çimento hiç şüphesiz YPB üretiminde de vazgeçilmez bir malzemedir. Doğal olarak YPB üretiminde kullanılacak çimento kalite şartlarından ödün vermeyen, fiziksel ve kimyasal özellikleri yönünden gereken standartları kullanıcıya eksiksiz sunan bir çimento olmalıdır. 100 MPa'a kadar basınç dayanım değerlerini sağlayan bir beton için dayanımı yüksek portland çimentosu kullanmak bu dayanıma ulaşmak için gereken temel şart olacaktır (Sümer ve Söyler, 2002).

### **2.4.2 Beton karışım suyu**

Beton karışımında kullanılan su basit bir beton karışım malzemesi gibi görülmese de karışım suyunun betonda çok önemli iki işlevi bulunmaktadır. Bu işlevlerden ilki bilindiği üzere kimyasal reaksiyonlarla çimento tanelerinin hidrate olmasını sağlamak ve bu hidrasyonun zamanla tamamlanmasını sağlayarak betona gereken dayanımı kazandırmaktır. Beton karışım suyunun ikinci önemli işlevi ise beton içerisindeki agrega ile çimento hamuru arasında bağlayıcılık görevinde bulunmaktır. Betonda bu işlevi yerine getiren su 'işlenebilirlik suyu' olarak adlandırılmaktadır. Karışım suyu kullanımında dikkat edilecek en önemli husus kullanılan suyun fiziksel ve kimyasal olarak yabancı maddelerden arındırılmış olmasıdır (Şimşek, 2007).

### 2.4.3 Agregada

Beton karışımında kullanılan agregada tamamen yabancı maddelerden arındırılmalıdır. Normal dayanımlı betona kıyasla yüksek dayanım beklenen betonlarda ise agregada içeriğinde silt ve kil gibi yabancı maddeler tamamen temizlenmiş olmalıdır. Agregada dane çapı da beton performansını etkileyen bir unsur olarak karışımıza çıkar. YPB karışımlarında eğer süper akışkanlaştırıcı kullanılacaksa maksimumum dane çapı 25 mm'yi geçmemeli, süper akışkanlaştırıcı kullanılmaması durumunda ise 10-16 mm bazında kalmalıdır. Ayrıca düzgün şekilli olmayan agregaların oranı %5'ten fazla olmamalıdır. Düşük su/çimento oranına sahip YPB'de ince agregada için yapılacak seçim kaba kumdan yana, eğer bu karışımda kullanılacak süper akışkanlaştırıcı miktarı fazla miktarda olacaksa bu sefer kullanılacak ince agregada seçimi ince kumdan yana olmalıdır. Betonda kullanılacak agregada türünün kırma taş agregada veya doğal agregada olması durumu da beton basınç dayanımını etkileyen bir unsurdur. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki kırma taş agregada kullanılan betonların basınç dayanım değerleri, normal agregada kullanılan beton karışımlarına göre %30-35 daha yüksek değerler vermektedir. Bir diğer agregada türü olan kalker kırma taş agreganın ise beton içerisinde daha iyi aderans sağladığı bilinmektedir (Sümer ve Söyler, 2002). Bu çalışma kapsamında üretilen karışımlar harç karışımı olarak elde edilmiş ve kaba agregada kullanılmamıştır. İnce agregada olarak ise kuvarz kumu kullanılmıştır. Kullanılan kuvarz kumu sırasıyla 0-0.4, 0.6-1.2 ve 1.2-2.5 mm tane çapına sahip olmakla birlikte ince, orta ve iri olarak sınıflanarak ölçümleri yapılmış ve YPH karışımlarında kullanılmıştır.

### 2.4.4 Kimyasal katkıları

Betonda gerek işleme ve yerine yerleştirme gerekse uzun vadede bazı özellikleri olumlu yönde değiştirmek amacıyla kullanılan, su içerisinde çözünerek beton karışımı içerisinde homojen dağılım gösteren, karışımda kullanılan çimento oranına göre %5'ten fazla olmayan maddelere kimyasal katkı adı verilmektedir. Kimyasal katkı maddeleri beton karışımı içine ilk üretim aşamasında eklenebildiği gibi üretimi tamamlanmış ancak henüz yerine yerleştirilmemiş beton içerisine eklenerek de kullanılabilir. Bu ekleme işlemi sadece katkı maddesini eklemek suretiyle yapılabildiği gibi katkı maddesinin su ile karıştırılıp daha sonra beton karışımına eklenmesi yoluyla da yapılabilir. Su azaltıcı, su tutucu, hava sürükleyici, korozyon önleyici, priz

hızlandırıcı/geciktirici, geçirimsizlik sağlayan katkılar, renklendirici katkılar vs. özelliklere sahip birçok türde kimyasal katkı çeşitleri mevcuttur. Bir beton karışımında bu katkı türlerinden birden çok çeşidi bir arada kullanılacaksa mutlaka bu katkı maddelerinin birbiriyle uyumu ve beton karışımında meydana getireceği etki değerlendirmeye alınmalıdır. Özellikle günümüzde betonda yüksek dayanıma olan ihtiyaç sürekli artmaktadır. Yüksek dayanımlı beton üretiminde şüphesiz en önemli faktörlerden bir tanesi su/çimento oranının düşük tutulmasıdır. Ancak bu oranının düşük olması beton dayanımına olan olumlu etkisi kadar beton işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Tam bu noktada devreye giren kimyasal katkı maddeleri düşük su/çimento oranlarında yüksek işlenebilirlik sağlanmasına katkı sağlamaktadır. Bu noktada akışkanlaştırıcı olarak adlandırılan kimyasal katkılar yoğun şekilde kullanılmaktadır. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddeleri normal, süper ve hiper akışkanlaştırıcı olarak üç grupta toplanmıştır. Örneğin aynı su/çimento oranına sahip bir betonda bu akışkanlaştırıcı türlerinin kullanımı ile beton işlenebilirliği sırasıyla artış göstermektedir (Sümer ve Söyler, 2002).

Ülkemiz genelinde kimyasal katkı kullanımıyla ilgili yapılan araştırmalar göstermiştir ki en çok kullanılan kimyasal katkı türü olarak karşımıza çıkan kimyasal katkı akışkanlaştırıcılardır. Akışkanlaştırıcı katkı maddelerinin kullanılması sonucu bu kimyasal katkı türünün beton karışımlarında işlenebilirliği arttırdığı ve betonda su/çimento oranını azalttığı tespit edilmiştir. Beton karışımlarında kullanılan akışkanlaştırıcı katkı ile betonda kullanılan su miktarı %20'lere varan oranda azalma göstermiştir. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı su/çimento oranını düşürmek, aynı zamanda beton işlenebilirliğini korumak, böylece daha yüksek dayanımlı beton elde etmek ve beton karışımı içerisindeki çimento miktarını azaltarak hidrasyon ısısını daha düşük seviyelere çekmek gibi amaçlarla kullanılmaktadır. İlk olarak 1930'lu yıllarda geliştirilmeye başlayan kimyasal akışkanlaştırıcı katkıların temelini oluşturan lignosülfonat maddesidir. 1960'lı yıllara gelindiğinde ise sülfonatlı naftalin polimer esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı geliştirilmiştir. 1990'lardan sonra ise tüm bu çalışmalar son noktaya gelmiş ve beton tasarımında yeni bir dönem başlamıştır. Taze betonun üretiminin tamamlanıp döküm yapılacağı yere ulaşınca kadar geçen zaman içerisinde betonda kıvam kaybı oluşmakta bu kaybın telafisi için su kullanılmasıyla da beton özellikleri özellikle beton dayanımı olumsuz olarak etkilenmektedir. Bu sebeple beton karışımı içerisinde çimento ve su miktarını değiştirmeden yani beton basınç

dayanımını düşürmeden üretilen betonun yerine yerleştirilinceye kadar akıcı bir kıvamda dolayısıyla kolay işlenebilir olması sağlanmalıdır. Taze betonda bu akıcılık ve işlenebilirliğin sağlanabilmesi için akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları kullanılmaktadır.

Kimyasal katkı kullanımı, beton karışımında su/çimento oranının sabit tutulmasıyla su ve çimento miktarını azalttığı için ekonomik yönden de fayda sağlamaktadır. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılarak üretilen betonlarda eğer uygun katkı miktarı seçilmezse işlenebilirlik ve betonda ayrışma gibi problemlerle karşılaşılabilir. Betonun donma-çözülme dayanıklılığını arttırmak için kullanılan hava sürükleyici kimyasal katkıların beton içindeki etkinliği, betonun donma-çözülme olayına maruz kaldığı oranda artmaktadır. Betonarme yapılarda donatı korozyonunun önüne geçmek için betona eklenen kimyasal katkıların, donatı ömrünü arttırdığı yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır. Priz hızlandırıcı ve priz geciktirici kimyasal katkıları, hava şartları döküm süresi gibi faktörlere göre priz süresinin değiştirilmesine olanak sağlamaktadır. Özellikle soğuk havalarda yapılan beton dökümlerinde ve püskürtme beton uygulamalarında, geri tepme kaybını minimize edebilmek için priz hızlandırıcı kimyasal katkıları kullanılmaktadır. Renklendirici kimyasal katkı maddeleri ise, priz süresini geciktirmekte, işlenebilirliği bir miktar arttırmakta, rötreyi azaltmakta ve eğilme dayanımını olumlu etkilerken basınç dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir (Topçu vd., 2006).

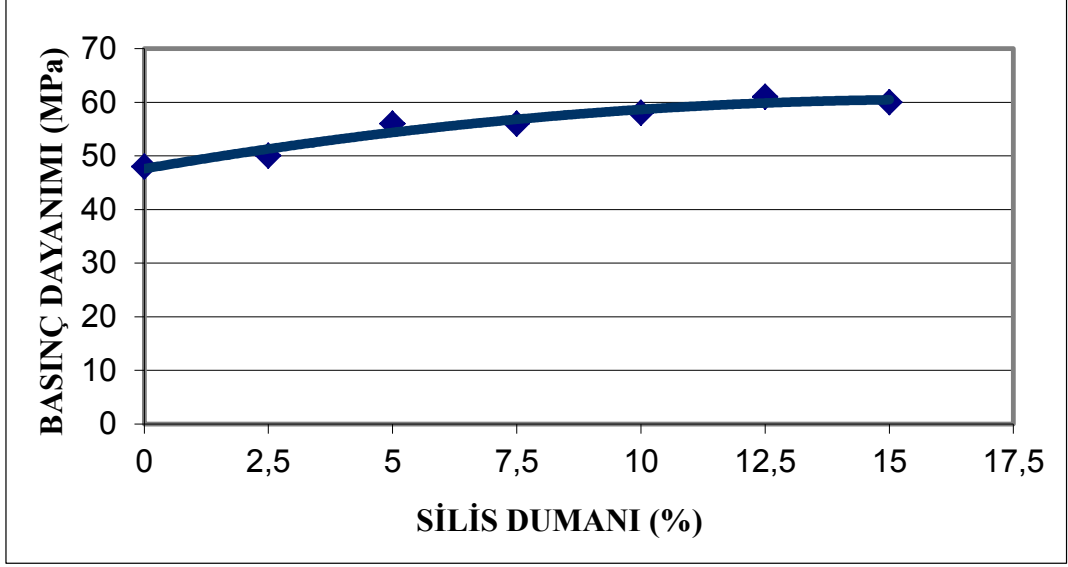
#### **2.4.5 Mineral katkıları**

Beton üretim aşamasında mineral katkıları belli oranlarda çimento ile yer değiştirilerek betonun çevresel etkilere karşı gücünün artırılması, daha ekonomik bir beton üretiminin sağlanması ve beton dayanım ve dayanıklılığının artırılmasında vazgeçilmez unsurlardan biri haline gelmiştir (Gesoğlu vd., 2007). Mineral katkı ince öğütülmüş, aktif silis içeriği oldukça yüksek, betonda mevcut özellikleri olumlu yönde değiştirmek veya betona kullanım amacı ve çevresel şartlara uygun yeni özellikler kazandırmak amacıyla beton karışımı içerisinde kullanılan malzemelerdir. Mineral katkıları beton karışımında belli oranda çimento ile yer değiştirmektedir. Böylece çimento üretimiyle oluşan doğal kaynak tüketiminin ve çimento üretimiyle alakalı CO<sub>2</sub> gazı salımının önüne geçilebilmektedir. Örneğin, Yang vd. (2014), yaptıkları çalışmada, beton üretim aşamasında %15-20 oranlarında kullandıkları mineral katkı maddeleri sayesinde

CO<sub>2</sub> yayılımında gözle görülür bir azalmanın olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca aktif silis içeriği yüksek olan mineral katkıları, su ve çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan Ca(OH)<sub>2</sub> kristallerini, içeriğindeki silisle bağlayarak C-S-H jellerini oluşturmada böylece üretilen beton veya harç daha yüksek dayanım değerlerine ulaşabilmektedir. Bu durum göstermektedir ki, beton veya harç üretim aşamasında kullanılan, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, tras cam tozu, taş unu gibi mineral katkı malzemeleri yüksek dayanım ve dayanıklılığa sahip bir beton üretimi için vazgeçilmez bir katkı malzemesi olarak karşımıza çıkacaktır (Sümer ve Söyler, 2002).

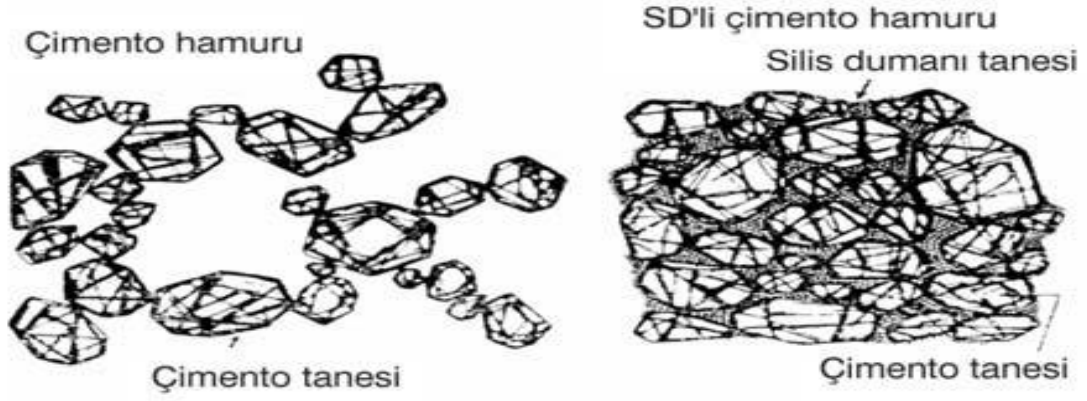
#### **2.4.5.1 Silis dumanı**

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların ferro krom tesislerinde üretimi esnasında ortaya çıkan gazın hızla soğutulup yoğunlaştırılmasıyla oluşan ve %85-%98 oranlarında silis içeren amorf yapıya sahip çok ince taneciklerden meydana gelen malzemeye yoğunlaştırılmış silis dumanı veya kısaca silis dumanı adı verilmektedir. Silis dumanı amorf yapıya sahip olması, çimentodan yaklaşık yüz kat daha ince taneli bir malzeme olması ve büyük oranda SiO<sub>2</sub> içermesinden dolayı kusursuz bir puzolanik malzeme olarak tanımlanabilir. Diğer puzolanik malzemeler gibi, su ile birlikte Ca(OH)<sub>2</sub> ile birleşerek bağlayıcı özellik kazanmaktadır. Silis dumanı beton karışımlarında kullanılırken genellikle %10 oranında çimento ile yer değiştirmektedir. Silis dumanının çok ince taneli olması ve yüksek miktarda SiO<sub>2</sub> içermesi nedeniyle betonda gerek erken yaşta gerekse nihai olarak yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılmaktadır. Silis dumanının çok ince tanelerden meydana geliyor oluşu, taze betonda kıvamı azaltmakta dolayısıyla işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemekte, betonun su ihtiyacını artırmaktadır. Bu nedenle, yüksek dayanımlı beton üretimi için mineral katkı maddesi kullanılıyorsa eğer ayrıca su azaltıcı veya akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddesi de kullanılmalıdır (Sarıbıyık, 2007). Silis dumanı çimentodan 100 kat daha ince olmakla birlikte diğer puzolanlardan farklı olarak erken dayanımı arttırmakta, çok ince olduğu için su ihtiyacını ve hidrasyonu ısısını da arttırmaktadır (Yazıcı vd., 2010). Şekil 2.2’de değişik oranlarda silis dumanı içeren harç örneklerinin 28 günlük basınç dayanımları görülmektedir. Şekil 2.2’den de görüleceği üzere silis dumanı oranındaki artışla birlikte beton basınç dayanımı da artmaktadır.



**Şekil 2.2.** Değişik oranlarda silis dumanı içeren harç örneklerinin 28 günlük basınç dayanımları (Yazıcı, 2010)

ACI komitesi (ACI Committee 234, 1987), raporunda betonda silis dumanının kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalarda 28 günlük basınç dayanımı 100 MPa ve daha yüksek olan çok yüksek dayanımlı betonların üretimi ancak silis dumanının kullanımıyla mümkün olabilmektedir. Yine Yogendran vd. (1991) tarafından yapılan çalışmalarda 28 günlük basınç dayanım değerlerinin 50-70 MPa olduğu durumlardaki silis dumanı oranının %15 olduğu görülmüştür. Yapılan bir başka çalışmada ise yüksek su/bağlayıcı oranına sahip yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı %10-15 seviyelerinde çimento ile yer değiştirilmiş 28 günlük basınç dayanım değerlerinin 80 ile 115 MPa aralığında olduğu görülmüştür (Zhou vd., 1995). Betonda durabilite özellikleri açısından da silis dumanı bir çok olumlu etki göstermektedir. Beton karışımında silis dumanı kullanılması sonucu betonun porozite ve klor iyonu geçirimsizliği değerlerinde büyük oranda iyileşme gözlenmiştir (Cwirzen ve Penttala, 2005; Igarashi vd., 2005; Khan, 2003; Poon vd., 2006; Ramezani pour ve Malhotra, 1995; Song vd., 2010; Toutanji ve Bayasi, 1999). Şekil 2.3'te silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi görülmektedir.

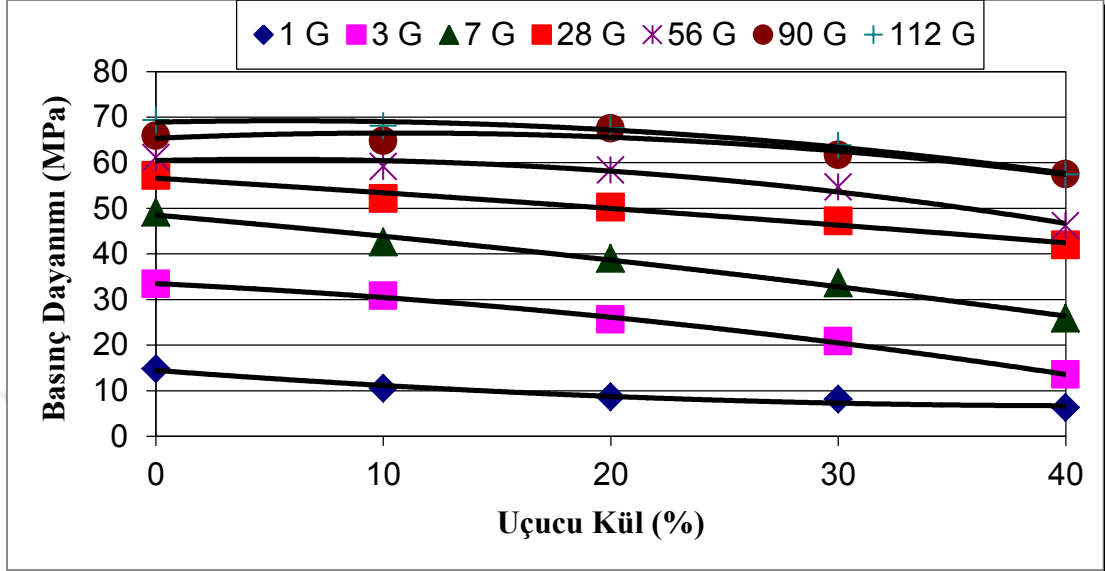


Şekil 2.3. Silis dumanının çimento hamurundaki boşlukları doldurma etkisi (Hijorth, 1983)

#### 2.4.5.2 Uçucu kül

Yakıt olarak kömür kullanılan elektrik santrallerinde atık malzeme olarak ortaya çıkan küllerin yaklaşık %75-%80'i, gazlarla birlikte bacadan çıkma eğilimi gösteren çok ince taneli küllerdir. Bu küllere uçucu kül denilmektedir. Gazlarla birlikte büyük miktarlarda külün dışarı çıkması durumunda, termik santralin çevresi kısa sürede küllerle kaplanacağından, bacadan dışarıya çıkan küller bir takım elektrostatik veya elektromekanik yöntemler vasıtasıyla tutulmakta ve kül toplayıcı silolarda biriktirilmektedir. Silisli ve alüminli amorf yapıda oldukları ve çok ince taneli olarak elde edildiklerinden dolayı uçucu küller de diğer ince taneli puzolanlar gibi puzolanik özellik göstererek su bulunan ortamda kalsiyum hidroksitle birleşerek hidrolik bağlayıcı özellik kazanmaktadır. Bu nedenle puzolanlı çimento üretiminde hem de betonda mineral katkı maddesi olarak kullanılabilir. Beton katkı maddesi olarak kullanıldığında beton karışımı içerisinde oldukça büyük oranlarda kullanılabilir. Öyle ki beton karışımı içinde yer alan uçucu kül miktarı çimento ağırlığının %50'sine kadar çıkabilmektedir. (Sarıbiyık, 2007). Uçucu külün puzolanik özelliği dolayısıyla çimento üretimi ve betonda mineral katkı malzemesi olarak kullanımı oldukça yaygındır. Dünyada yılda açığa çıkan uçucu kül miktarının 450 milyon ton olduğu tahmin edilmekte ve bunun sadece %6'sı çimento ve beton üretiminde kullanılmaktadır. Ülkemizde ise bir yılda açığa çıkan uçucu kül miktarı 15 milyon ton civarındadır. Sıcak havalarda yapılan beton dökümlerinde, baraj gibi kütle beton dökümü yapılan durumlarda ve sülfat, deniz suyu gibi çevresel etkilere karşı beton dayanıklılığının korunacağı durumlarda uçucu kül içeren çimento veya uçucu külün mineral katkı olarak

kullanımı bu gibi durumların dezavantajlarını ortadan kaldırmaya yardımcı olmaktadır (Yazıcı vd., 2010). Şekil 2.4'te değişik oranlarda uçucu kül içeren harç örneklerinin basınç dayanımı zaman ilişkisi gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Değişik oranlarda uçucu kül içeren harç örneklerinin basınç dayanımı zaman ilişkisi (Yazıcı, 2010)

Uçucu külün betona karışımına eklenmesiyle çimento ve ince agrega miktarı azaldığı gibi betonun su tüketimi de azalır. Uçucu kül, betonda işlenebilirlik ve geçirimsizliği olumlu yönde etkilerken hidrasyon ısısını da düşürmektedir. (Dinakar vd., 2008; Ukwattage vd., 2013; Wang vd., 2017). Bu şekilde birçok olumlu etkisinden ötürü bu mineral katkı maddesi beton sektöründe yoğun olarak kullanım alanı bulmaktadır. Silis dumanı ile kıyaslandığında daha ince taneli bir yapıya sahip olan uçucu kül yüksek dayanımlı beton üretiminde tamamlayıcı çimento malzemesi olarak silis dumanı yerine kullanılabilir. Ayrıca uçucu kül parçacıkları sınıflandırılarak kendi halinde uçucu kül parçacıkları içeren karışıma göre daha düşük gözenek çapı elde edilebilir (Chindaprasirt vd., 2005; Wang vd., 2017).

Uçucu küller kimyasal özelliklerine göre değişik şekilde gruplandırılmaktadır. ASTM C618 standardına göre uçucu küller F ve C sınıflarına ayrılır. Bu sınıflandırma uçucu külün içerdiği CaO oranına göre yapılmaktadır. F sınıfı uçucu küller, %10'un altında CaO yüzdesine sahiptir ve düşük kireçli olarak da adlandırılmaktadır. F sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğe sahiptir. C sınıfı uçucu küller ise %10'un üstünde CaO

yüzdesine sahiptir ve yüksek kireçli uçucu kül olarak da adlandırılmaktadır. C sınıfı uçucu küller puzolanik özelliğin yanı sıra bağlayıcı özelliğe de sahiptir (Ünal ve Uygunoğlu, 2004).

#### **2.4.5.3 Yüksek fırın cürufu**

Demir cevherinden demir üretilmesi esnasında yüksek sıcaklığın etkisiyle kok kömüründe bulunan karbon elementi ile demir oksit içeriğindeki oksijen birleşir böylece CO ve CO<sub>2</sub> gazları oluşarak yakma işleminin gerçekleştiği fırını terk eder. Geride, eriyik durumda demir ve eriyik durumda olan CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO ve S gibi yabancı maddeler kalır. Demirin yoğunluğu, bu yabancı maddelerin yoğunluğundan daha yüksek olduğu için, eriyik durumundaki demir, fırının en alt bölümünde ve eriyik durumdaki diğer maddeler ise demirin hemen üzerinde yer almaktadır. Demir ve geriye kalan diğer yabancı maddeler ayrı çıkışlardan dışarı alınır. Demirden geriye kalan bu yabancı maddeler topluluğuna yüksek fırın cürufu denilmektedir (Sarıbiyık, 2007). Yüksek fırın cürufu, demir üretimi esnasında ortaya çıkan bir yan üründür. Bu mineral katkı maddesi betonda durabilite koşullarını iyileştirmek, yüksek dayanıma sahip beton elde etmek ve ekonomik yönden yarar sağlamak amacıyla Portland çimentosu yerine tamamlayıcı bir çimento malzemesi olarak yoğun olarak kullanılmaktadır. Ayrıca yüksek fırın cürufu, betonun işlenebilirliğini arttırmak, mekanik ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek için kullanılacak bir katkı maddesidir (Ulubeyli ve Artır, 2015). Aitcin'e (1998) göre yüksek fırın cürufundan maksimum performans alabilmek için çimento yerine kullanılacak yüksek fırın cürufu yüzdesi %20 olmalıdır.

#### **2.4.5.4 Cam tozu**

Beton dayanım ve dayanıklılığını iyileştirmek ve çevresel problemlere karşı betonun koruma gücünü iyileştirmek amacıyla kullanılan başka bir mineral katkı maddesi de cam tozudur. Cam içerisinde yüksek oranda silis bulunduran amorf yapıda bir malzemedir (Vijayakumar vd., 2013). Cam tozunun beton veya harç içeriğinde kullanılabilmesi için 0.038 mm'den daha küçük boyutta olması gerekir böylece cam tozu puzolanik özellik göstererek beton için gerekli dayanım ve dayanıklılık şartını sağlayabilir (Soliman ve Tagnit-Hamou, 2016; Vijayakumar vd., 2013). Günümüzde yapılan çalışmalarda, cam tozunun parçacık boyutu dağılımı ve kimyasal kompozisyonu sayesinde beton ya da

harç içerisinde alternatif bir tamamlayıcı ve beton içeriğindeki ince boşlukları doldurucu bir malzeme olarak kullanılmasına yönelik yaklaşımlar mevcuttur (Soliman ve Tagnit-Hamou, 2016). Orhan ve Şahin (2016), yaptıkları çalışmalarda beton içeriğine eklenen öğütülmüş atık cam tozu sayesinde beton basınç dayanımının geç yaşlarda, 600 °C ve 900 °C sıcaklıklarda kontrol betonunun basınç dayanımına göre bir artış olduğunu tespit etmişlerdir. Sahip olduğu bu önemli özellikleriyle cam tozu yüksek performanslı beton üretiminde önemli bir rol oynamaktadır. Ali vd. (2016) tarafından yapılan çalışmalarda atık cam tozuyla üretilen betonların, silis dumanı kullanılarak üretilen betona göre yüksek sıcaklıktaki mukavemetinin daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

#### **2.4.5.5 Diğer mineral katkı malzemeleri**

Betonda yüksek dayanım sağlamak, çevresel etkilere karşı beton performansını iyileştirmek veya betonunu yerine yerleştirilmesi aşamasında ortaya çıkan bazı problemleri gidermek amacıyla kullanılan birçok mineral katkı malzemesi bulunmaktadır. Bunlardan silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve cam tozunun betonda kullanımı ve betona etkilerine yukarıda değinilmiştir. Bu mineral katkı malzemelerine ilaveten pirinç kabuğu külü, metakaolin, mermer tozu, doğal zeolit ve kalker unu gibi daha birçok mineral katkı malzemesi bulunmaktadır. Tüm bu mineral katkı maddelerinin beton performansı üzerine etkileri ile ilgili çalışmalar sürekli bir gelişim halinde devam etmektedir. Üzerinde deneysel çalışmaların yapıldığı ve bu tezinde konusu olan bir diğer katkı maddesi ise vollastonit mineralidir. Doğal olarak elde edilebildiği gibi kimyasal olarak da üretilen ve bir kalsiyum meta silikat ( $\text{CaSiO}_3$ ) olan vollastonit minerali iğnemsî bir parçacık yapısına sahiptir. Vollastonit mineralinin sahip olduğu bu iğnemsî parçacık yapısı araştırmacıları bu mineral üzerinde yoğunlaştırmıştır.

#### **2.5 Vollastonitin Tanımı ve Özellikleri**

Kimyasal olarak laboratuvarlarda üretilbildiği gibi doğal olarak da oluşan vollastonit minerali, metal özellik göstermeyen, iğnemsî, (iğne uçlu) kristal yapıda, bazik özellik barındıran, pH değeri 9.8 olan ve doğada beyaz renkte bulunan bir mineral türüdür (Ciullo, 1996; Kogel vd. 2006). Vollastonit kalsiyum, silisyum ve oksijenin

birleşiminden oluşan bir kalsiyum meta silikattır. Bu mineral ismini William Hyde Wollaston'dan almaktadır. Vollastonit, dünya üzerinde çeşitli sektörlerde kullanılan metalik olmayan bir mineral çeşididir. 1970'li yıllara kadar dekoratif amaçlı bir kayaç olarak kullanılan vollastonit, 1980'lerden bu yana kendine seramik, plastik, kauçuk, boya, kaplama, metalurji gibi birçok sektörde kullanım alanı bulmaya başlamıştır (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Vollastonit mineralinin sahip olduğu kendine has bölünme özellikleri sebebiyle, kırılım veya öğütülme işlemleri sırasında levha şeklinde ya da iğne şeklinde kırılma gösterdiği tespit edilmiştir. Bu şekilde oluşan tane şeklinin yapının yüksek dayanımda olmasına katkı sağlıyor olması vollastonit mineralini birçok sektörel alanda önemli noktalara taşımıştır. Ayrıca Avustralya Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği (NOHSC) ve Uluslararası Kanseri Araştırma Ajansı'nın (IARC) yaptığı araştırmalarda, herhangi bir kanser yapıcı etkiye sahip olmadığı anlaşılmıştır. Bu nedenle vollastonit diğer endüstriyel mineral ve fiber malzemelerin yerine kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Vollastonit, kalsit içeren kalker ( $\text{CaCO}_3$ , kireç taşı) ve silikanın ( $\text{SiO}_2$ ) yüksek sıcaklıklarda genellikle sıcak magma içinde etkileşiminden oluşan bir kalsiyum meta silikattır ( $\text{CaSiO}_3$ ) (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013; Kalla vd., 2013; Paul, 1977; Ransinchung ve Kumar, 2010; Soliman ve Nehdi, 2012). Vollastonitin kimyasal oluşum mekanizması ise aşağıdaki gibi formülize edilebilir:

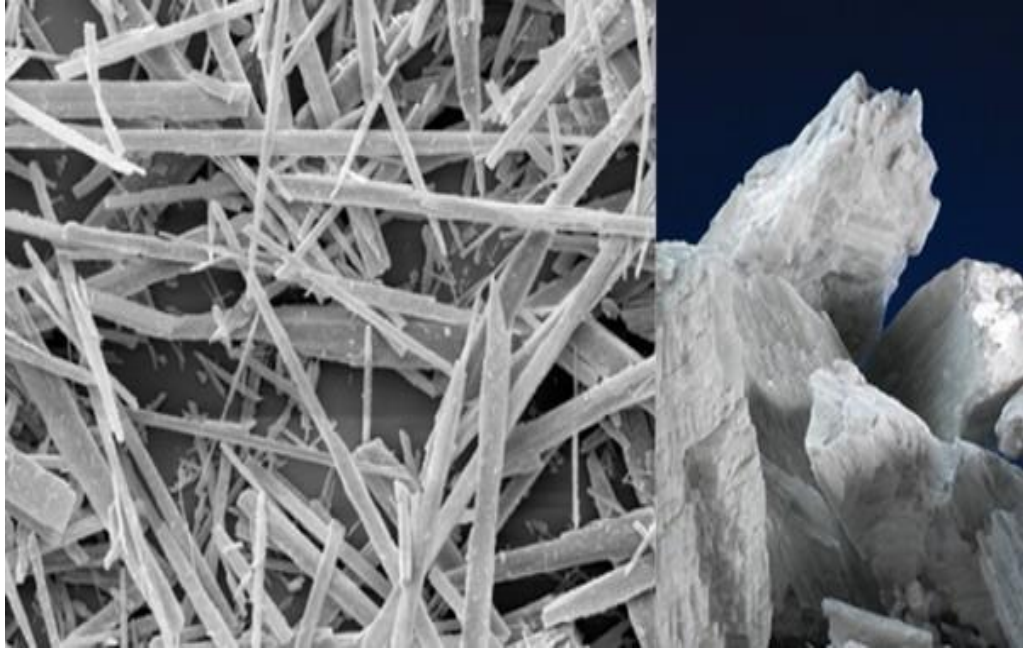


Doğal olarak oluşan aynı zamanda sentetik olarak da üretilebilen vollastonit minerali, metalik olmayıp iğnemsî (iğne uçlu) kristal bir yapıya ve yüksek elastisite modülüne sahip, alkalik (pH 9.8), inert ve beyaz renkli bir mineraldir. Beyaz renkli olmasının yanında krem, gri ya da çok soluk yeşil bir renge sahip olduğu durumlara da rastlanmaktadır. Özgül ağırlığının  $2.9 \text{ g/cm}^3$  civarında olduğu bilinen bu mineralin Mohr skalasına göre sertliği 4.5-5 arasındadır. (Ciullo, 1996; Kalla vd., 2013; Kogel vd., 2006; Ransinchung ve Kumar, 2010; Soliman ve Nehdi, 2012).

### **2.5.1 Vollastonitin mineralojisi, fiziksel ve kimyasal özellikleri**

Vollastonit minerali, yassı kristal, lifsel dokulu ve dilinimli bir yapıya sahiptir. Çarpık

sekizyüzlüsel koordinasyon gösteren kalsiyum (Ca) atomları kimyasal zincirler ile bağlanmaktadır. Vollastonit kristalleri birbirine paralel doğrultuda dizilmiş, genel olarak masif, lifsel topluluklar halindedir (Kumbasar, 1977). Teorik olarak bileşenleri, % 48.3 CaO ve %51.7 SiO<sub>2</sub>'den oluşan vollastonit minerali magnezyum, manganez, demir ve stronsiyum içerebilmektedir ve nadiren saf olarak bulunabilmektedir (Sarıiz, 1992; Virta, 2001; Dumont,2004; Kogel vd., 2006). Bu mineral genel manada tepkimeye katılmayan bir maddedir ancak hidroklorik asit veya güçlü inorganik asitlerde ayrışması mümkün olabilmektedir (Kogel vd., 2006). Bireysel parçanın enine boyutu yaklaşık olarak 10-100 µm değişebilir ve uzunluğu yaklaşık olarak 0.05- 2.0 mm arasında değişebilir.(Low ve Beaudoin.,1993). Vollastonit mineralinin kırılması ve öğütülmesi esnasında, bu mineral kendine has bir şekilde bölünme özelliği gösterir ve bunun bir sonucu olarak iğnemsel parçalar meydana gelir. Vollastonit minerali kullanılarak elde edilen ürünlere yüksek dayanım özelliği kazandıran bu parçacık morfolojisidir (Kogel vd., 2006). Fotoğraf 2.1'de vollastonit mineraline ait parçacık morfolojisi görülmektedir.



**Fotoğraf 2.1.** Vollastonitin parçacık morfolojisi (NYCO, 2012)

Doğada saf halde bulunan vollastonit parlak ve beyaz renktedir ancak saf olarak bulunmadığı durumlarda safsızlıkların tipine ve çokluğuna bağlı olarak gri ve griye yakın tonlarda, kahverengi, solgun yeşil veya kırmızı renkte bulunabilmektedir (Virta,

2001). Ticari olarak kullanım alanı bulan vollastonit 85-95 aralığında G.E. (General Electricreflectometer) parlaklık değerinde bulunur. Vollastonit mineralinin kullanım yerlerinin belirlenmesinde, 1000 °C sıcaklıkta ısı verildiğinde bünyesinden ayrılan malzemeler başka bir özelliğini teşkil eder. Ticaret malzemesi olarak kullanılan vollastonitten elde edilmiş malzemeler 0.5-2.0 değerlerinde kızdırma kaybına (LOI) sahip olmaktadır. (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Çizelge 2.1’de vollastonit mineraline ait bazı özellikler listelenmektedir.

**Çizelge 2. 1.** Vollastonit mineraline ait bazı özellikler (Anon, 2001; Kogel vd., 2006)

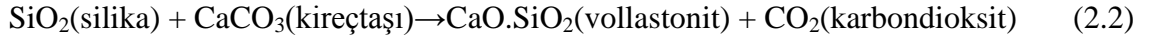
Kristal Sistem	Monoklinik veya Triklirik
Kristal Yapısı	Bıçak şekilli kütleler: iğnemsî
Renk	Beyaz, krem, gri ya da uçuk yeşil
Çizgi Rengi	Beyaz
Parlaklık	İnci gibi camsı
Mohs Sertliği	4,5–5,0
Özgül Ağırlık	2,87–3,09
Ergime Noktası	1540 °C
Suda Eriyebilirliği	0.0095 gr/100 ml
Termal Genleşme Katsayısı (mm/mm/°C)	$6,5 \times 10^{-6}$
Ateş Kaybı (1000 °C)	0,5–2 %
pH	10–11

## 2.6 Vollastonit Üretimi

### 2.6.1 Vollastonit oluşumu

Magma yerkabuğundan yükselir, bu yükselme sırasında etrafını çevreleyen taşlarla etkileşim halinde olur ve böylece bu taşlarla reaksiyona girerek reaksiyondan etkilenerek çıkar. Bu taşlarda görülen değişikliğin en önemli nedeni magmanın neden olduğu aşırı sıcaklıktır. Dolayısıyla içerisinde kil ve şist bulunduran kısımlar bünyesinde bulunan suyu kaybeder ve kısmen pişerler, kalker bulunan kısımlar ise değişime uğrayarak mermerleşir. Magmadan gelen sıcaklığın etkisiyle kayaçlar birtakım kimyevi değişimlere ve fiziksel erimelere açık hale gelmektedir. Öyle ki magmadan

kaynaklanan sıvı karışımlar ve buhar halinde bulunan malzemeler yantaşlar ile tepkimeye girerek başka malzemelerin oluşmasına zemin hazırlar (Çoğulu, 1973; Genç, 1992). Magma kökenli kayaç ve kalkerlerin birbirleriyle olan etkileşimleri sonucu ısının da etkisiyle bir değişim maddesi olarak meydana gelen vollastonitin kimyasal formülü aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013).



Yukarıda kimyasal formülasyonu gösterilen reaksiyonun gerçekleşebilmesi için sıcaklığın 400 ile 450 °C'ye kadar yükselmesi gerekmektedir. Bu reaksiyon 105 Pa atmosfer basınç altında gerçekleşir ve kalsit veya kuvars eriyiği bitinceye kadar devam eder. Vollastonit minerali ile birlikte CO<sub>2</sub> oluşumu basıncın yükselmesine sebep olur ve bunun sonucu olarak reaksiyonun devam edebilmesi için yüksek sıcaklığa olan ihtiyaç daha da artmaktadır. Bu sırada, CO<sub>2</sub> gazının doğal kırık ve çatlak bölgelere sızma eğilimi basınç azalmasına sebep olur. Bu basınç düşmesi ile reaksiyon düşük sıcaklıklarda devam edebilmektedir. Fakat basınç yükseldiğinde reaksiyon sıcaklığında ani bir artış gözlenmediği gibi reaksiyon ve kalsit oluşumu beraber gerçekleşir. Vollastoniti oluşturan diğer bir neden ise nadiren de olsa yüksek miktarda karbon içeriği olan ergimiş magmadan vollastonitin direkt olarak kristalleşmesidir. Bu magmaların kökeni tartışmalıdır ancak geçerli olan düşünce, magmanın muhtemelen alt kabuk ve üst manto kökenli olduğu yönündedir (Andrews, 1970; Fattah, 1994; DPT, 2001; Virta, 2001; Kogel vd., 2006).

### 2.6.2 Sentetik vollastonit

ABD, Almanya ve Rusya'nın da aralarında olduğu birçok ülke sentetik vollastonit üretimi gerçekleştirmektedir. Üretilen meta silikatlar genellikle su ihtiva eder ve bünyesinde su bulundurmayan meta silikatların hiçbirisi doğal vollastonitle aynı kristal yapıda bulunmaz. Danimarka vollastonitin elde edilmesinde ana madde olarak tebeşir ve kumu kullanılır. Bu kalsiyum meta silikat "Synopal" olarak adlandırılmakta ve ticari alanda kullanılmaktadır. İtalya'da ise yapay olarak üretilen vollastonit minerali "Wollanita" diye adlandırılır ve Danimarka'dakine benzer bir yöntemle üretimi yapılır. Bu şekilde elde edilen ve "Wollanita" olarak adlandırılan malzeme yol kaplaması, aşındırma etkisi olan malzeme olarak ve seramik ürünlerde kullanılmaktadır (Anon,

1991; Can, 1991). Kalsit, diyopsit ve granat gibi mineraller ile beraber 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 iğnemi kristal yapı dikkate alındığında sentetik vollastonitin iğnemi kristal yapısı doğal vollastonitinki kadar iyi olmayabilir.

## **2.7 Vollastonitin Kullanım Alanları**

Vollastonit mineralinin ticari anlamda kullanılması günümüze yakın zamanlarda gerçekleşmiştir. Öyleki 1950'li yıllara kadar vollastonitin ticari olarak kullanımı olmamıştır. Ancak ilerleyen zamanlarda özellikle seramik üzerinde kullanımıyla birlikte seramikte dayanım artışına ve diğer bazı özellikler üzerinde gelişim sağladığı görülmüştür. Bu özelliklerin keşfedilmesi ile birlikte vollastonit plastik, metalurji, boya ve asbest ürünleri sanayisini de kapsayan diğer alanlarda da kullanılmaya başlanmıştır. 1999 yılında dünya çapında kullanılan vollastonit miktarı tahmini olarak 575000-625000 ton aralığındadır. Değişik sanayi dallarında kullanılan vollastonit minerali, plastik sanayinde %37 oranında, seramik sanayinde %28 oranında, metalurji ve boya sanayinde %10 oranında, sürtünme ürünlerinde; %9 oranında ve farklı sanayilerde; %6 oranında kullanım alanı bulmaktadır (Virta, 1999).

### **2.7.1 Seramik sanayi**

Vollastonit çoğunlukla seramiklerde, sağlık malzemelerinde, sofr gereçlerinde ve sanat eşyalarında yaygın olarak kullanılır. Vollastonit mineralinin seramiklerde kullanılmasıyla homojen bir boyut, seramik boyutlarında meydana küçülmede azalma, eğilmeye karşı daha fazla direnç, dayanımda artış, nem dengesinin düzenlenmesi ve pişirim işleminin daha kolay olması gibi avantajlar sağlanabilir (Kogel vd., 2006). Vollastonit, seramik ürünlerin mineralojik ve kimyasal özellikleri üzerinde birçok katkı sağlamaktadır:

1. Pişmemiş kil kısımların çok daha hızlı şekilde sıkıştırılmasına büyük oranda katkı sağlar.
2. Pişirilmemiş halde bulunan karoların bünyesinde bulunan nemin hızlı bir şekilde

tahliye edilmesini sağlar.

3. Pişirilmiş malzemelerde şekil değiştirmenin önüne geçilmesine yardımcı olur ve darbelere karşı malzeme direncini artırır.
4. Vollaştonit kullanılan duvar kaplamalarında ses yankılanmalarının minimize edilmesine yardım eder.
5. Vollaştonit mineralinin sahip olduğu küçük ısıl genişleme sayesinde kullanılacak malzemelerde meydana gelebilecek boyutsal küçülmelerin önlenmesine katkı sağlar.
6. Vollaştonit mineralinin karbon dioksit yayma potansiyelinin az miktarda olması çevresel olarak olumlu bir durumdur.
7. Vollaştonit diğer minerallere nazaran az miktarda gaz içermesi sayesinde üretilen malzemelerin üst kısmında oluşabilecek lekelerin büyük oranda önüne geçilebilir. Ayrıca yine vollaştonit mineralinin sahip olduğu bu özellik yüzeyde meydana gelebilecek kabarcıkların önlenmesine yardım eder.
8. Vollaştonit minerali kullanılarak üretilen seramikler dışardan gelebilecek etkileri büyük oranda absorbe etme yeteneği kazanır.
9. Üretilen seramik malzemede oluşabilecek matlığın giderilmesine yardımcı olur (Springer., 1994).

### **2.7.2 Plastik sanayi**

Büyük bir pazara sahip olan plastik sanayisi, vollaştonit mineralinin en fazla uygulama alanı bulduğu sanayi kollarından bir tanesidir (Degryse ve Elsen, 2003). Özellikle plastik dolgu sektöründe yoğun şekilde kullanılmaktadır. Vollaştonitin üretimi tamamlanmış malzemelerin özelliklerini iyileştirme noktasında gösterdiği performans bu sektördeki yerini sağlamlaştırmıştır. Vollaştonitin bu sanayide diğer dolgu malzemelerinin yerini almasında kimyasal saflık, ısıl kararlılık, ısıl iletkenlik, düşük su emme, düşük reçine gereksinimi gibi iyileştirici özelliklerinin bulunması etkili olmuştur (IARC, 1997). Vollaştonit mineralinin ilavesiyle birlikte çok yüksek kalitede dolgu malzemeleri üretilebilmektedir. Vollaştonit dolgu malzemelerine yüksek parlaklık kazandırmasının yanında bu ürünlerin çekme, çarpma ve eğilme özelliklerinin de gelişmesine katkı sağlamakta ve beyazlık vermektedir. Ayrıca vollaştonit aşınma direncini ve kaymayan zemin döşemelerinde sürtünmeyi artıran bir mineral katkı malzemesidir (Springer, 1994).

### **2.7.3 Boya ve kaplama sanayi**

Vollastonit ilk defa Amerika Birleşik Devletlerinde kaplama alanında kullanılmıştır. Kullanılan bu vollastonit yüksek derecede parlaklığa sahiptir. Boya kaplamalarında vollastonit kullanımıyla birlikte boya kaplamalarının dayanım ve kötü hava koşullarında aşınma direncinde artma, kılcal çatlaklara ve oluşabilecek diğer problemlere karşı performans artışı gözlenmiştir. (IARC, 1997). Vollastonit minerali saf halde beyaz renkte olması, düşük yağ emilimine sahip oluşu, yüksek pH değerlerinde kararlı bir davranış sergilemesi ve büyük ölçüde ıslatma yeteneğine sahip olması gibi özelliklerinden ötürü, renk veya akışkanlığın korunması ve yüzeyde küfe karşı koruma sağlanması gereken kaplamalarda özellikle tercih edilmektedir. Ayrıca son yıllarda, dış cephede kullanılan boyalarda ve otoyollarda yol çizgilerinin belirlenmesinde kullanılan ürünlerde katkı vazifesi görmektedir (IARC, 1997). Boya dolgu işlevi gören bu mineral, boyanın beyazlaşması ve parlaklaşmasına katkıda bulunması sebebiyle soluk renkteki boyalara parlaklık kazandıran bir katkı olarak göze çarpmaktadır. Vollastonitin boya kullanımında bir diğer avantajı ise asidik özellik göstermemesi sayesinde metallerin boyama işleminden önce astar olarak kullanılabilmesidir. Dış ortama açık durumda bulunan yerlerde kullanılan boyalarda vollastonitin boyada katkı maddesi olarak kullanılması sonucu kullanılan boya, kendini temizleyen bir özelliğine sahip olmakla beraber vollastonitin sahip olduğu özel tane yapısı sayesinde olumsuz hava şartlarında boya direnci artar (Andrews, 1970; Fattah, 1994; Springer, 1994).

### **2.7.4 Diğer sanayi uygulamaları**

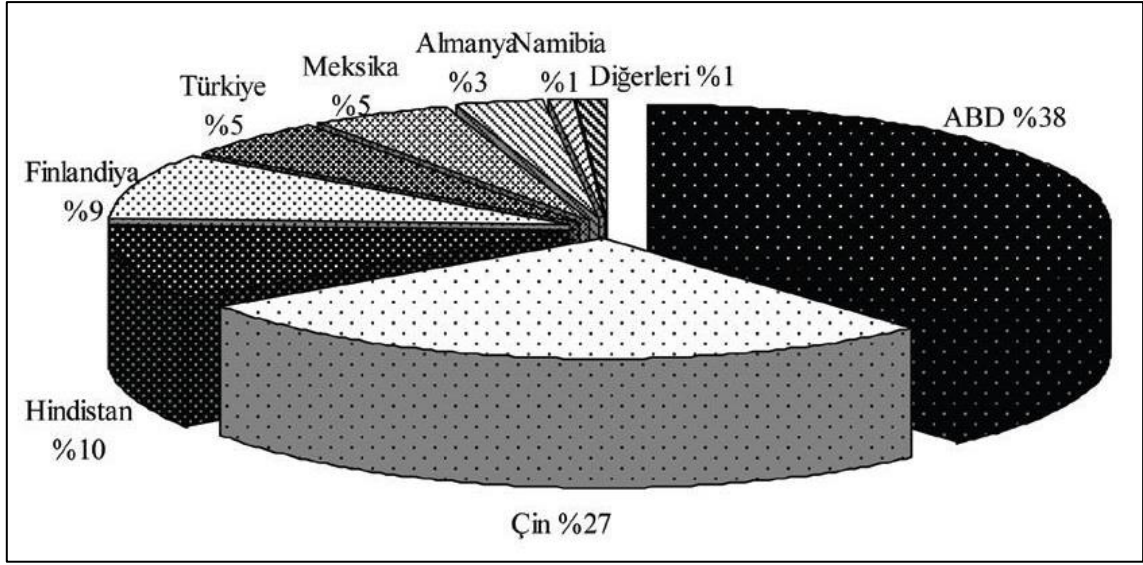
Vollastonit minerali yukarıda anlatılan sanayi kolları dışında daha birçok sanayi kolunda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Örneğin; düşük sıcaklıklarda erime özelliği sayesinde sac yapımında sürekli döküm işlemleri için önemli bir katkı malzemesidir. Beton boru dökümünde kullanılan ve çeşitli sağlık riskleri taşıyan asbest yerine de vollastonit minerali kullanılmaktadır. Yine az oranda olsa da, cam üretim işlemlerinde daha az enerji kullanımı sağlanmak adına vollastonit kullanılmaktadır. Ayrıca tüm bunlara ilaveten, aşındırma işlevi gören malzemelerde, kaynak elektrotlarında, ağaç ve bitkilerde gübre yerine, kağıt üretiminde dolgu maddesi olarak ve yol kaplamalarında kullanım alanı bulmaktadır. Son yıllarda keşfedilen kullanım alanlarından biri ise yapay kemik implantlarıdır. Kemik kaybı olan hastalarda kullanımı

mümkün olan bu implantlar kemiğe mükemmel bir şekilde adapte olduğundan dolayı özellikle omur protezlerinde yaygın bir kullanım alanı bulmaktadır (Haner ve Çuhadaroğlu,2013).

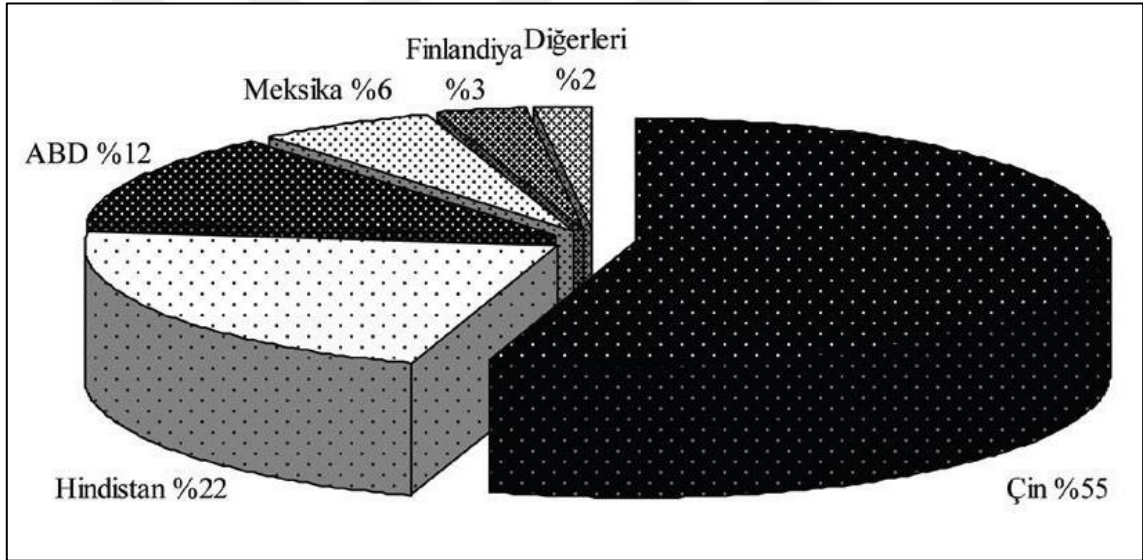
## **2.8 Vollaştonit Rezervleri**

### **2.8.1 Dünyada vollaştonit rezervleri**

Vollaştonit rezervlerinin büyük çoğunluğunun bulunduğu ve vollaştonit üretiminde başı çeken ülkeler Çin, Hindistan, Finlandiya, Meksika, İspanya, Birleşik Devletler, Avustralya ve Güney Afrika'dadır. Türkiye, Kanada, Şili, Kenya, Nabibya, Sudan, Tacikistan ve Özbekistan ise önemli vollaştonit yataklarına sahip olan ülkeler arasında yer almaktadır (Virta, 2011). Vollaştonit mineralinin dünyada yıllık ortalama üretim miktarı 500.000-600.000 ton aralığında olduğu bilinmektedir. Ayrıca birçok kendine özgü özellikleri olan vollaştonit mineralinin kullanım alanı gün geçtikçe genişlemektedir (Kogel vd., 2006). Dünya bulunan vollaştonit rezervlerinin 90 milyon ton civarında olduğu tahmin edilmekte ve muhtemel rezervler ise tahmini olarak 270 milyon ton civarındadır. Vollaştonit bulunduran birçok yatak tetkik edilemediğinden dolayı günümüzde vollaştonit mineralinin toplam rezerv miktarı hakkında kesin bilgi bulunamamaktadır (Virta, 2011; Virta, 2012). Şekil 2.5 ve Şekil 2.6'ya göre, vollaştonit mineralinin on yıllık süreçte gerek kullanım alanı gerekse tüketimi büyük oranda artmıştır. Öyleki 2010 yılındaki üretim artışının % 48 oranında olduğu görülmektedir (Virta,2011).



Şekil 2.5. 1990 yılı dünya vollastonit üretimi (366.000 ton) (Springer, 1994)



Şekil 2.6. 2010 yılı dünya vollastonit üretimi (540.000 ton) (Virta, 2011; Alexandra, 2011)

### 2.8.2 Türkiye'deki vollastonit rezervleri

Türkiye vollastonit minerali yönünden kaliteli vollastonit yataklarına sahip ülkelerden birisidir. Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü kayıtlarında yer alan ülkemizde tespit edilmiş vollastonit rezervleri Bursa (muhtemel rezerv 1.078.600 ton), Balıkesir (mümkün rezerv 500.000 ton) ve Çanakkale'de yer almaktadır (DPT, 2001). Fakat ülkemizde bu minerale ait rezervler hakkında ayrıntılı bir çalışma olmadığından

bu vollastonit yataklarının ekonomikliği ve kullanılabilir olması konusunda kesin bir bilgi elde edilememektedir. Kalemaden firması küçük üretici olarak ülkemizde vollastonit üretimi yapan kuruluşlardan biridir (Kogel vd., 2006). Yukarıda anlatılan rezervler ve üretimler dışında vollastonit bileşenleri açısından kalsit ( $\text{CaCO}_3$ ) ve silis ( $\text{SiO}_2$ ) kaynakları ülkemizde yaygın olarak bulunmaktadır. Bu sayede bu bileşenler kullanılarak sentetik vollastonit üretimi yapılabilmektedir.

## 2.9 Vollastonitin Beton ve Harç Üzerine Etkileri

Çok ince ve iğnemsiz bir yapıya sahip olan vollastonit minerali iğnemsiz partikül yapısından dolayı betonda işlenebilirliği olumsuz etkilerken mekanik performansı artırması ve betonun durabilite özelliklerini iyileştirmesi yönünden beton katkı malzemesi olarak kullanılabilmesi görülmektedir. Yapılan çalışmalarda vollastonit içeren ultra YPH karışımlarının işlenebilirliği kontrol harcına göre düşmüş, vollastonit miktarına paralel olarak bu düşüşün arttığı gözlenmiştir (Soliman ve Nehdi, 2014). Yapılan bir diğer çalışmada yine vollastonit kullanımıyla birlikte beton işlenebilirliğinin azaldığı ve kimyasal akışkanlaştırıcı katkıların kullanılması gerektiği belirtilmiştir. Bununla birlikte vollastonit mineralinin beton basınç ve eğilme dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir (Mathur vd., 2007a). Kumar ve Ramujee (2017), tarafından yapılan çalışmada ise çimento ile belirli oranlarda yer değiştiren vollastonit mineralinin, harcın basınç dayanımını arttırdığı ve klor iyonu geçirimsizliğini önemli ölçüde azalttığını tespit edilmiştir. %10 oranında çimento ile vollastonit mineralinin yer değiştirdiği bir betona uygulanan beton basınç testinde basınç dayanımının %30 seviyesinde arttığı görülmüştür. Ayrıca klor iyonu geçirimsizliği değerlerinde vollastonit oranının %15 seviyesine kadar olduğu durumlarda olumlu yönde gelişim görülmüştür. Yapılan bir başka çalışmada ise beton karışımında vollastonit yüzdesinin artmasıyla basınç dayanımının arttığı, büzülme gerilmesinin azaldığı ve betonun çatlaklara karşı direncinin arttığı ancak eğilme dayanımında kayda değer bir iyileşmenin olmadığı tespit edilmiştir (Soliman ve Nehdi, 2012). Wahab vd. (2017), harç üretiminde, vollastoniti çimento yerine kullanmışlar ve %10 vollastonit içeriğinden sonraki oranlarda betonun eğilme dayanımında bir artış olmadığını belirtmişlerdir.

Ransinchung vd. (2009), tarafından yapılan çalışmalarda ise beton karışımında %15'e kadar vollastonit ve %7,5'a kadar mikro silika kullanılmasıyla, mikro yapının gelişmesi

ve gözenek boşluğundaki azalmadan dolayı, betonun su sızdırmazlığının hissedilir derecede azaldığını göstermişlerdir. Ayrıca vollastonit ve mikro silikanın klor iyonu penetrasyonuna karşı beton direncini geliştirerek sertleşmiş betonun mikro yapısını düzenlediği belirtilmiştir. Ransinchung ve Kumar (2010) ise %82.5 çimento, %10 vollastonit ve %7.5 oranında mikro silika kullanılmasıyla en yüksek basınç dayanımı değerlerini elde etmiştir. Kalla vd. (2013), tarafından yapılan çalışmada da vollastonit ve uçucu kül içeren beton karışımlarına uygulanan deneylerde vollastonit mineralinin betonun basınç dayanımını arttırdığı, basınçlı su geçirimsizliğini ve klor iyonu geçirimsizliğini ise azalttığı görülmüştür.



## BÖLÜM III

### DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada doğal vollastonitin YPH'nin taze, mekanik ve durabilite özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla doğal vollastonit, YPH üretiminde su/bağlayıcı (çimento+vollastonit) oranı sabit tutularak belirli oranlarda çimento ile yer değiştirilmiş ve YPH'lerin taze, mekanik ve durabilite özellikleri belirlenmiştir.

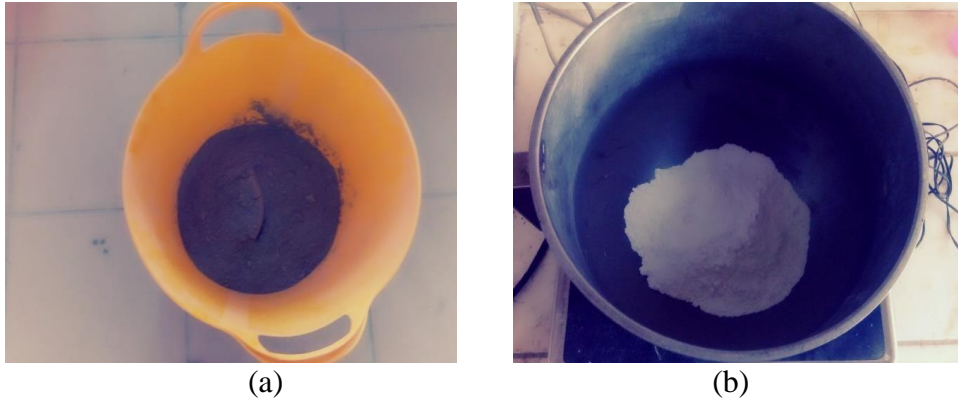
#### 3.1 YPH Tasarımında Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

##### 3.1.1 Çimento

TS EN 197-1 (2002) standardına uygun CEM I 42,5 R tipi Normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait görsel Fotoğraf 3.1.'de, çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1.'de gösterilmiştir.

##### 3.1.2 Vollastonit

Kalsiyum, silisyum ve oksijen bileşiminden oluşan bir metasilikat olan doğal vollastonit çimento ile birlikte bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Doğal vollastonite ait görsel Fotoğraf 3.1.'de, doğal vollastonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.1.'de gösterilmektedir.



**Fotoğraf 3.1.** CEM I 42,5 R Portland çimentosu (a) ve vollastonit minerali (b)

**Çizelge 3.1.** Çimento ve vollastonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Kimyasal Analiz (%)	Çimento	Vollastonit
CaO	62.58	45.689
SiO <sub>2</sub>	20.25	52.613
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.31	0.429
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.04	0.18
MgO	2.82	0.266
SO <sub>3</sub>	2.73	-
K <sub>2</sub> O	0.92	0.093
Na <sub>2</sub> O	0.22	0.142
Kızdırma Kaybı	2.96	-
Özgül Ağırlık	3.15	2.82
Blaine İnceliği (m <sup>2</sup> /kg)	326	-

### 3.1.3 Süper akışkanlaştırıcı (SA) ve harç karışım suyu

Özgül ağırlığı 1,07 olan polikarboksilik eter tipi yüksek oranda su azaltıcı etkiye sahip bir katkı maddesi olan süper akışkanlaştırıcı, düşük su/bağlayıcı oranından dolayı işlenebilirliği azalan harç karışımında işlenebilirliği arttırmak amacıyla bütün karışımlara aynı oranda eklenmiştir. Süper akışkanlaştırıcının tüm karışımlarda aynı oranında kullanılmasının ana sebebi doğal vollastonitin karışımlarda işlenebilirliğe etkisini net olarak belirleyebilmektir. YPH karışımında karışım suyu olarak ise temiz kabul edilen çeşme suyu kullanılmıştır.

### 3.1.4 Agregata

Karışımlarda agregata olarak kuvarz kumu kullanılmıştır. YPH karışımlarında kullanılan bu kuvarz ince, orta ve kalın olarak üç sınıfta gruplanmıştır. Bu gruplamaya ait tane çapları ve özgül ağırlık değerleri Çizelge 3.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 3.2.** Kuvartz kumunun tane boyutu ve özgül ağırlık değerleri

Agrega	İnce Kuvartz	Orta Kuvartz	İri Kuvartz
Tane Boyutu	0-0.4 mm	0.6-1.2 mm	1.2-2.5 mm
Özgül Ağırlık	2.65	2.65	2.65

### 3.2 YPH Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü

#### 3.2.1 VYPH karışım oranları

Bu çalışmada su/bağlayıcı oranı 0.35 olarak sabit tutulan 6 farklı YPH üretilmiştir. Bu harçlara ait karışım oranları Çizelge 3.3'te sunulmuştur. Karışımlardaki toplam bağlayıcı içeriği (çimento+vollastonit)  $550 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Yayılma çapındaki değişimleri net olarak belirleyebilmek için süper akışkanlaştırıcı miktarı ( $12.5 \text{ kg/m}^3$ ) da sabit tutulmuştur. Karışımlarda agrega olarak kullanılan kuvartz kumları ince, orta ve iri olarak gruplanmış ve kendi içinde sırasıyla %45, %35 ve %20 oranlarında karışıma eklenmiştir. İlk olarak kontrol karışımı (VYPH0), hiç vollastonit eklenmeksizin bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılması sonucu üretilmiştir. Diğer karışımlarda ise, doğal vollastonit, %3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Buna bağlı olarak VYPH3, VYPH6, VYPH9, VYPH12 ve VYPH15 olarak isimlendirilen YPH karışımları elde edilmiştir.

**Çizelge 3.3.** VYPH karışım oranları ( $1 \text{ kg/m}^3$ )

Karışım	(S/B)	Su	Çimento	Vollastonit	İnce Kuvartz	Orta Kuvartz	İri Kuvartz
VYPH0	0.35	192.5	550	0	748.55	582.20	332.69
VYPH3	0.35	192.5	533.5	16.5	747.82	581.64	332.37
VYPH6	0.35	192.5	517	33	747.10	581.08	332.04
VYPH9	0.35	192.5	500.5	49.5	746.38	580.51	331.72
VYPH12	0.35	192.5	484	66	745.65	579.95	331.40
VYPH15	0.35	192.5	467.5	82.5	744.93	579.39	331.08

### 3.2.2 VYPH üretim aşamaları

Harçlar standart bir harç karıştırma mikseri yardımıyla ASTM C305-12'ye (2017) uygun olarak karıştırılmıştır. YPH üretimiyle ilgili bazı görseller Fotoğraf 3.2 ve Fotoğraf 3.3'te sunulmuştur. Karıştırma işlemi aşağıdaki sırayla gerçekleştirilmiştir.

- İnce, Orta ve İri kuvarz mikserde karıştırılarak homojen bir karışım elde edilir,
- Karışım suyu ve SA ayrı bir kap içerisinde birbirine karıştırılır,
- Bağlayıcı malzemeler olan çimento ve vollastonit kuvarz üzerine eklenir ve bir miktar su SA karışımıyla beraber 45 saniye boyunca düşük hızda ( $140\pm 5$  r/dak) mikserde karıştırılır,
- Karışım işleminin hemen akabinde mikser kabının yüzeylerinde harç bulaşıkları varsa bunlar harca ilave edilir ayrıca mikserin yetişemediği alt kısımlar içinde elle karıştırma yapılır,
- Son olarak mikser yine düşük hızda 60 saniye boyunca karıştırılarak bir önceki maddedeki işlemler tekrarlanır ve karıştırma işlemi tamamlanır.

Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra harcın belirli bir miktarıyla sarsma tablası yardımıyla yayılma deneyi yapılmıştır. Yayılma deneyi için kullanılan bu harç tekrar mikserde konulup 60 saniye daha karıştırılmıştır. Tüm bu işlem adımlarının sona ermesiyle birlikte, karışımlar mümkün olan en kısa sürede kalıplara alınmış ve sarsma tablası yardımıyla vibrasyon uygulanarak üç aşamada sıkıştırılmıştır. 24 saatlik kalıplama süresinin ardından numuneler kür havuzuna alınmıştır. Bu işlem tüm VYPH karışımlarına uygulanmıştır. Basınç, eğilme ve ultrasonik titreşim hızı deneyleri için her karışımdan 3., 7., 28. ve 90. günde deneye tabi tutulmak üzere  $40\times 40\times 160$  mm boyutlarında toplam on iki adet prizmatik numune alınmıştır. Kılcal su geçirimsizliği deneyi için  $100\times 200$  mm boyutlarında iki adet silindirik numune ve gaz geçirimsizliği deneyi için ise her karışımdan  $150\times 300$  mm boyutlarında 1 adet silindirik numune alınmıştır. Alınan silindirik numunelerden  $100\times 200$  mm boyutlarındaki numuneden çapı 100 mm uzunluğu 50 mm olacak şekilde 6'şar adet numune kesim işlemiyle birlikte elde edilmiştir. Bu numuneler 28. ve 90. günde kılcal su geçirimsizliği deneyinde kullanılmak üzere tekrar kür havuzuna alınmıştır.  $150\times 300$  mm boyutlarındaki silindirik numunelerden ise çapı 150 mm uzunluğu 50 mm olacak şekilde 4'er adet numune elde edilmiştir. Bu

numunelerde yine 28. ve 90. günde gaz geçirimsizliği deneyi uygulanmak üzere kür havuzuna alınmıştır. Ayrıca 28. günde prizmatik numuneler kullanılarak sertleşmiş birim ağırlık belirlenmiştir.



(a)

(b)

**Fotoğraf 3.2.** Karışımında kullanılan malzemeler (a) ve harç mikseri (b)



(a)

(b)

**Fotoğraf 3.3.** Silindir numunelerin (a) ve prizmatik numunelerin kalıplanmış hali (b)

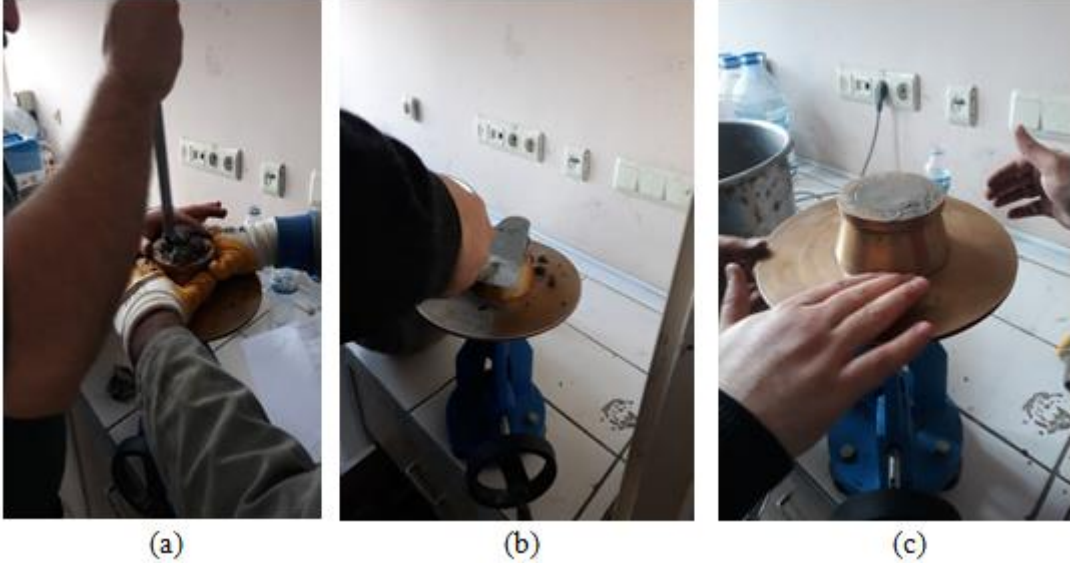
### 3.3 Deneysel Çalışmalar

#### 3.3.1 Yayılma deneyi

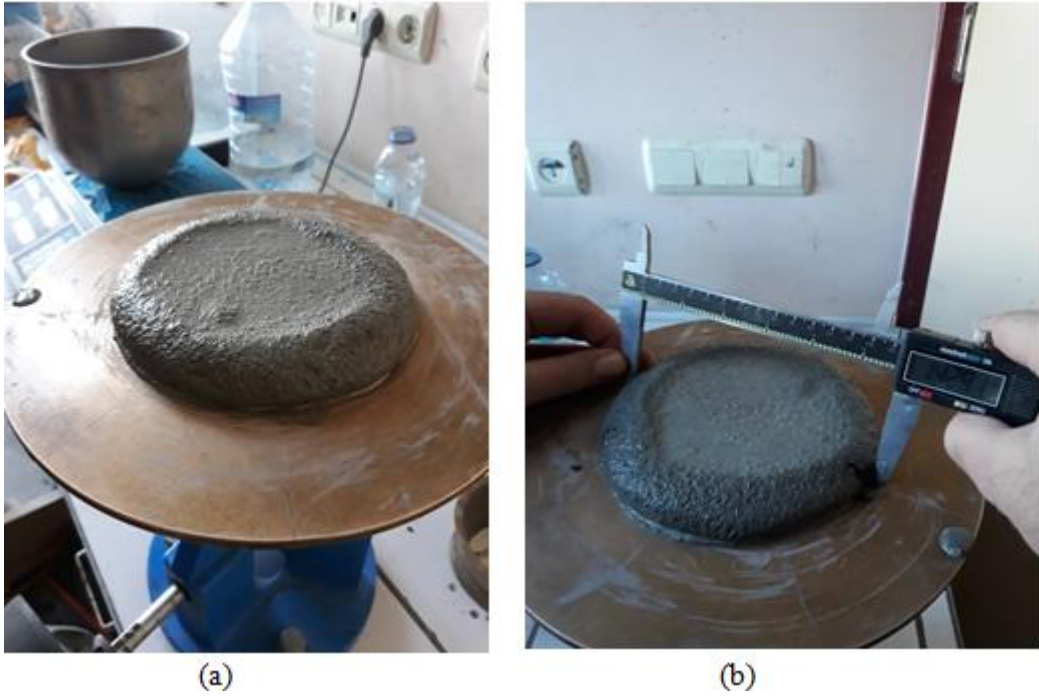
YPH'lerin yayılma çapları ASTM C1437-15'e (2017) göre belirlenmiştir. Bu deneye ait görüntüler Fotoğraf 3.4, Fotoğraf 3.5 ve Fotoğraf 3.6'da gösterilmektedir. Deney standartlarına uygun olarak akış kalıbı iki aşamalı olarak harç ile doldurulmuş ve her aşamada harç içerisinde boşlukların giderilmesi amacıyla 20 kez şişleme işleme yapılmıştır. Daha sonra akış kalıbı üzerinde kalan fazla harç alınarak akış kalıbıyla aynı seviyede olacak şekilde yüzey bir mala yardımıyla düzeltilmiştir. Düzeltme işleminin hemen ardından akış kalıbı hızlıca çekilip alınmış, 15 saniye içerisinde ve periyodik olarak yayılma tablasının 25 kez düşürülmesi sağlanmıştır. Bu şekilde yayılmasını tamamlayan harcın bir kumpas yardımıyla farklı noktalardan olacak şekilde çapının ölçülmesiyle deney sona ermiştir.



**Fotoğraf 3.4.** Yayılma tablası ve akış kalıbı



**Fotoğraf 3.5.** Tabakaların şişlenmesi (a), harç yüzeyinin mala yardımıyla düzeltilmesi (b) ve akış kalıbının harçtan ayrılması (c)



**Fotoğraf 3.6.** Yayılmasını tamamlamış harç (a) ve kumpas yardımıyla yayılma çapının tespiti (b)

### 3.3.2 Sertleşmiş birim ağırlık tespiti

YPH numunelerinin sertleşmiş haldeki birim ağırlıklarını tespit etmek için 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılmıştır. Bu deneyde kullanılan

prizmatik numunelere ait görsel Fotoğraf 3.7’de sunulmuştur. Bu deney tüm YPH karışımları üzerinde ve her deney günü için (3., 7., 28. ve 90. günler) 3 adet prizmatik numune kullanılarak yapılmıştır. Numuneler kür havuzundan alınarak hava ortamında kurumaya bırakılmış sonrasında her bir numunenin ağırlığı belirlenmiştir. Daha sonra bulunan bu değerler numune hacmine bölünerek sertleşmiş birim ağırlık tespiti yapılmıştır. Son olarak ayrı ayrı birim ağırlıkları bulunan bu 3 numunenin ortalaması alınarak sertleşmiş birim ağırlığı tespiti yapılmıştır.



**Fotoğraf 3.7.** Sertleşmiş birim ağırlık tespitinde kullanılan prizmatik numuler

### **3.3.3 Basınç deneyi**

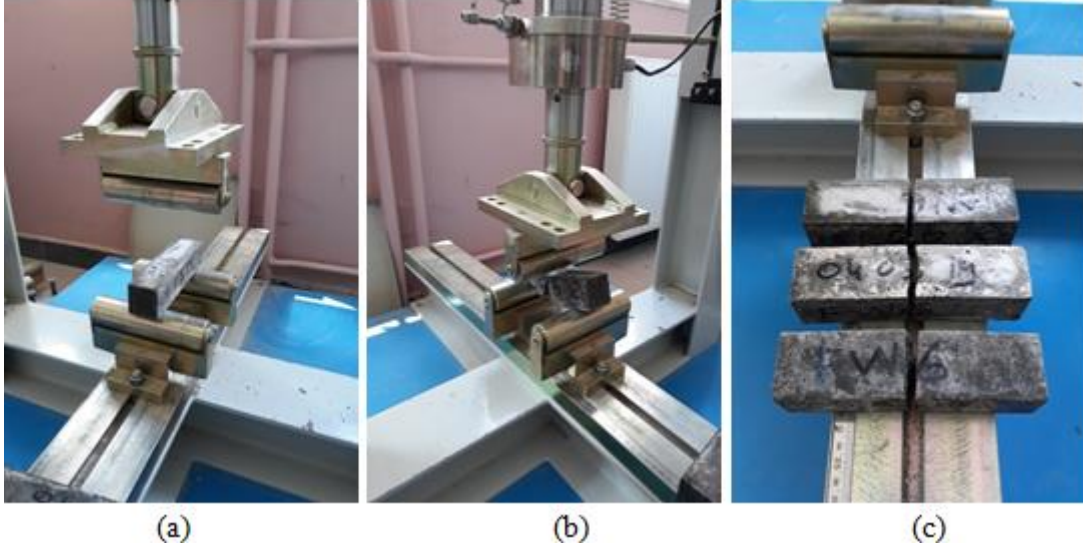
YPH’lerin basınç dayanımı ASTM C349-14’e (2017) göre belirlenmiştir. Basınç deneyine ait görseller Fotoğraf 3.8’de gösterilmiştir. Basınç deneyi, eğilme dayanımını belirlemek için kullanılan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma numunelerden her bir parçanın kırılmasıyla oluşan iki parçaya, toplamda 6 adet numune üzerinde 3., 7., 28. ve 90. günde yapılmıştır. Numunelere 2.4 kN/s yükleme hızı uygulanmıştır. Bu deneylerden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak basınç dayanımı tespit edilmiştir.



**Fotoğraf 3.8.** Eğilme deneyinden elde edilen 6 adet numune (a) ve numunenin basınç deneyi cihazına yerleştirilmiş hali (b)

### 3.3.4 Eğilme deneyi

VYPH numunelerinin eğilme dayanımı ASTM C348-14'e (2017) göre belirlenmiştir. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.9'da sunulmuştur. Eğilme deneyi 3., 7., 28. ve 90. günde 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılarak yapılmıştır. Numunelere uygulanan yükleme hızı 0.050 kN/s olarak seçilmiştir. Tüm VYPH karışımları için 3'er adet numune deneye tabi tutulmuş bu 3 numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak eğilme dayanımı tespit edilmiştir. Ayrıca eğilme deneyi sonucu elde edilen 6 adet parça ASTM C349-14 (2017) test metoduna uygun olarak basınç dayanımı testinde kullanılacaktır.



**Fotoğraf 3.9.** Numunenin deney cihazına yerleştirilmesi (a) deneyin tamamlanmış hali (b) ve deney sonucu elde edilen 6 adet numune (c)

### 3.5.2 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi

UTH, ASTM C597-16'ya (2016) göre uygulanan standart bir ASTM deneyidir. UTH deneyi ultrasonik dalganın numunenin bir ucundan diğer ucuna ilk varış süresini ölçmektedir. Bu değer aşağıdaki denklem yardımıyla bulunur:

$$V_p = (S / t) \quad (3.1)$$

Denklemden gösterilen  $V_p$ : Ses üstü dalga hızı (m/s),  $S$ : Numunenin uzunluğu (boyu) (mm),  $t$ : Ultrasonik dalganın bir yüzeyden diğerine ulaşana kadar geçen zamanı ( $\mu s$ ) ifade etmektedir. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.10'da gösterilmiştir. Bu deney vasıtasıyla harç numunelerindeki boşluk, çatlak vb. kusurlar hakkında fikir sahibi olunabilir. UTH testleri 40x40x160 mm boyutlarında, 3 prizmatik harç numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. UTH testi 3., 7., 28. ve 90. günde 40x40x160 mm boyutlarındaki 3 prizmatik numune üzerinde ve uygulama harcın 160 mm'lik kısmına olacak şekilde yapılmıştır. Her numuneden 2 adet olmak üzere toplam 6 adet okuma alınmış, bu değerlerin ortalaması alınarak deney sonucu belirlenmiştir.



**Fotoğraf 3.10.** UTH deney cihazı ve deneyde kullanılan numune

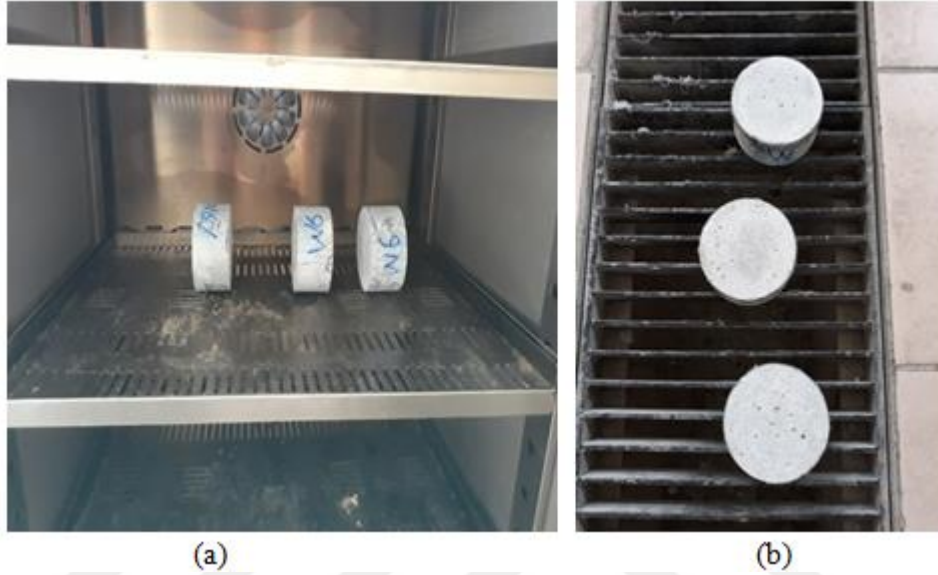
### 3.5.2 Kılcal su geçirimsizliği deneyi

Kılcal su geçirimsizliği deneyi, 100 mm çapında ve 200 mm uzunluğunda üretilen silindirik numunelerden kesilen, 100 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda 3 adet numune üzerinde uygulanmıştır. Değişen zaman dilimlerinde meydana gelen sızma miktarı aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır:

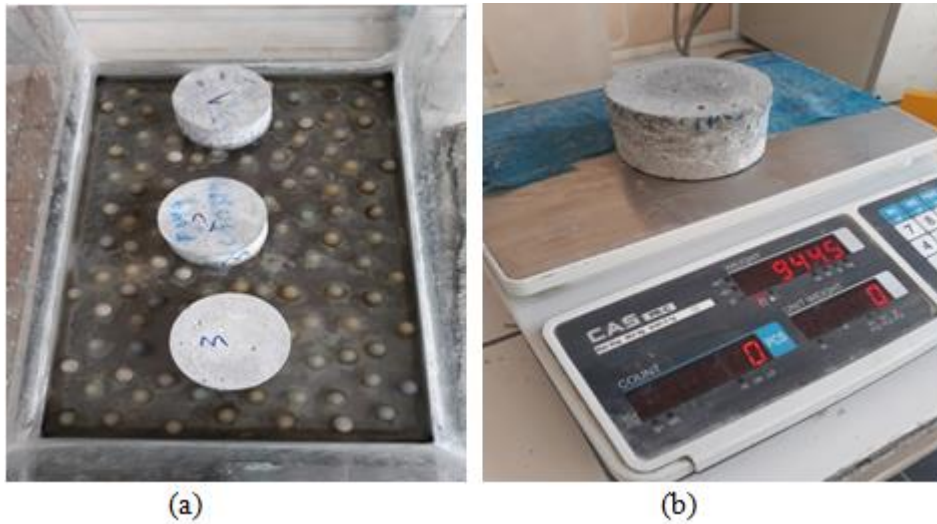
$$I = S'\sqrt{t} \quad (3.2)$$

Denklemden gösterilen I: Kümülatif sızmayı (mm), S': Kılcallık katsayısını ( $\text{mm}/\text{dk}^{1/2}$ ), t: Zamanı (dk) göstermektedir. Bu deneye ait görseller Fotoğraf 3.11 ve Fotoğraf 3.12'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 geçirimsizliğini 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 geçirimsizliği değerleri, suyun yaklaşık olarak 5 mm altında kalan bilyeler üzerinde ölçülmüştür. İlk olarak, numuneler kuru halde tartılmıştır. Daha sonra su içerisine bırakılan numunelerin

ağırlıkları sırasıyla, 1, 4, 9, 16, 25, 36, 49 ve 64. dakikalarda numunelerin ıslak yüzeyi kuru bir bezle kurulandıktan sonra tartılmıştır. Dolayısıyla kılcal su geçirimliliği, birim kesit alanı başına harcın zamanla emdiği su miktarıyla değerlendirilmiştir. Deney tüm karışımlara 28. ve 90. günde uygulanmıştır. Her iki test yaşı için de 3 adet numune kullanılmış olup, sonuçlar ortalama alınarak belirlenmiştir.



**Fotoğraf 3.11.** Numunelerin etüvde kurutulması (a) ve numune yüzeyinin silikonlanması (b)



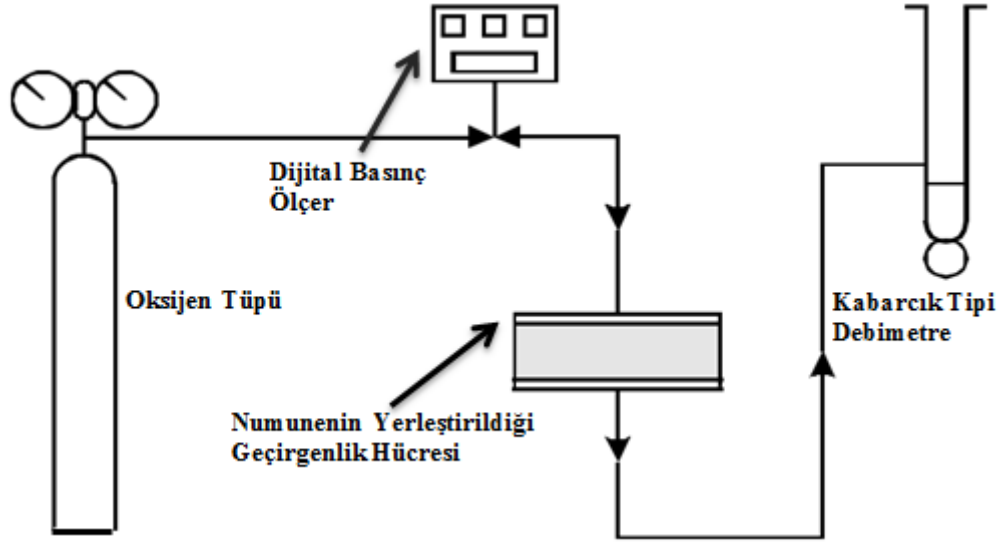
**Fotoğraf 3.12.** Kılcal su geçirimliliği test düzeneği (a) ve numunelerin tartılması (b)

### 3.5.3 Gaz geçirimliliği deneyi

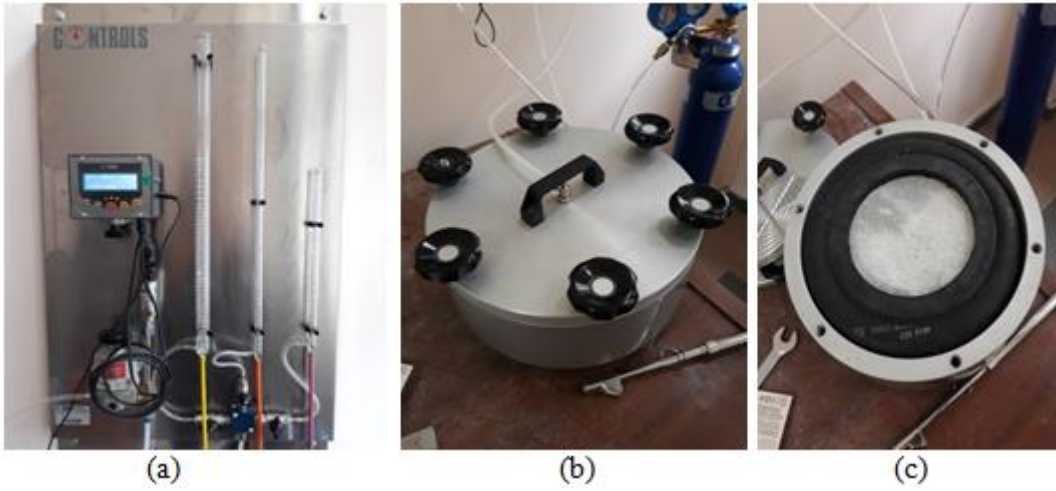
Gaz geçirimliliği deneyi 150 mm çapında 50 mm kalınlığındaki  adet numune üzerinde uygulanmıştır. Deneyde kullanılacak numunelerin 24 saat boyunca etüvde kurutulmasına müteakip hava almayacak şekilde izole edilmiş ve bu şekilde iki saat bekletilmiştir. Bu deney belirli bir basınç altında numune üzerinde yer değiştiren havanın hızını ölçmeye dayanmaktadır. Gaz geçirimliliği katsayısı  $K_a$  aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanmıştır:

$$K_a = \frac{2P_2QL\mu}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (3.3)$$

Denklemdede gösterilen  $K_a$ : Gaz geçirimliliği katsayısı ( $m^2$ ),  $P_1$ : Giriş gaz basıncı ( $N/m^2$ ),  $P_2$ : ıkış gaz basıncı ( $N/m^2$ ),  $A$ : Numunenin kesit alanı ( $m^2$ ),  $L$ : Numunenin yüksekliği ( $m$ ),  $\mu$ : Oksijenin viskozitesi ( $2,02 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ ) ve  $Q$ : Hacim akış oranıdır. Deney düzeneği; numunenin yerleştirildiği geçirgenlik hcreti, dijital basınç ölçer, kabarcık tipi debimetre (akış tüpü) ve oksijen tüpünden meydana gelmektedir. Bu deney için 150 mm çapındaki 50 mm kalınlığındaki numune geçirgenlik hcretine yerleştirilir ve hücre kapağı kapatılır daha sonra bir kompresör yardımıyla 750 kPa'a kadar numuneyi çevreleyen lastiğin havayla dolması sağlanır. Oksijen tüpü açılarak hava akışının gerçekleşmesi sağlanır ve dijital basınç ölçer 150 kPa değerine ayarlanır. Son olarak kabarcık tipi debimetrede oluşan kabarcıkların kademeler arasındaki yer değiştirme süresi ölçülür ve deney tamamlanmış olur. Bu şekilde 250 kPa ve 300 kPa değerleri içinde okumalar alınır. Her basınç değerine için  değer ölçülür bu değerlerin ortalaması alınarak numunenin gaz geçirimliliği değerine belirlenmiş olur. Bu deney tüm VYPH karışımları için 28. ve 90. günlerde  numune üzerinde yapılmıştır. şekil 3.1'de gaz geçirimliliği deneyi test düzeneği ve Fotoğraf 3.13' te bu deneye ait görseller sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Gaz geçirimliliği test düzeneği



Fotoğraf 3.13. Dijital basınç ölçer (a), geçirgenlik hücresi (b) ve numunenin hücreye yerleştirilmiş hali (c)

## BÖLÜM IV

### BULGULAR VE TARTIŞMA

Tezin bu kısmında YPH'nin, taze özelliğini belirlemek için uygulanan yayılma çapı deneyi ve 28. günde belirlenen sertleşmiş birim ağırlık deneyi sonuçları ile 3., 7., 28. ve 90. günlerde YPH numunelerine uygulanan basınç ve eğilme deneylerine ek olarak ultrasonik titreşim hızı deneyi, kılcal su geçirimsizliği ve gaz geçirimsizliği deneylerinden elde edilen sonuçlar literatür bilgileri de dikkate alınarak yorumlanmıştır.

#### 4.1 Yayılma Çapı

VYPH karışımlarından ölçülen yayılma çapları Fotoğraf 4.1, Fotoğraf 4.2, Fotoğraf 4.3, Fotoğraf 4.4, Fotoğraf 4.5 ve Fotoğraf 4.6'da sunulmuştur. Bu sonuçların grafik halindeki sunumu ise Şekil 4.1'de gösterilmiştir. VYPH0, VYPH3, VYPH6, VYPH9, VYPH12 ve VYPH15 karışımlarının yayılma çapları fotoğraflarda ve şekilde de görüldüğü gibi sırasıyla, 154.15, 148.44, 147.01, 142.92, 140.31 ve 138.82 mm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlara göre, çimento ile belli oranlarda yer değiştiren vollastonit mineralinin kullanım yüzdesi arttıkça yayılma çapının azaldığı gözlenmektedir. Ransinchung ve Kumar (2010) tarafından yapılan bir çalışmada, bağlayıcı olarak tamamen çimento içeren ve tamamen vollastonit içeren iki ayrı harç numunesi incelenmiş ve bu karışımlarda normal kıvam için gerekli olan karışım suyu yüzdeleri çimento için %32, vollastonit için %65 olarak belirlenmiştir. Çimento ile vollastonitin yer değiştirildiği durumlarda ise vollastonit yüzdesinin artması kıvam yönünden süper akışkanlaştırıcı katkıya olan ihtiyacı da arttırmıştır. Yapılan bu çalışmalardan ve bu tez kapsamında elde edilen sonuçlardan vollastonit mineralinin işlenebilirliği azalttığı görülmektedir. Betonda kıvam ve işlenebilirlik bağlayıcı malzemelerin tipine ve inceliğine bağlıdır (Ganesan vd., 2007; Rao, 2003; Temiz vd., 2007). Vollastonit normal portland çimentosundan daha ince bir malzemedir dolayısıyla 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). Bu tez kapsamında yapılan çalışmada YPH karışımlarında vollastonit yüzdelerinin artmasına karşın su ve süper akışkanlaştırıcı miktarı sabit tutulmuştur. Artan vollastonit yüzdesine karşın su ve süper akışkanlaştırıcının miktarının sabit

tutulması YPH karışımlarında yayılma çapındaki düşüşün bir nedeni olarak görülebilir.



**Fotoğraf 4.1.** VYPH0'ın yayılma çapı



**Fotoğraf 4.2.** VYPH3'ün yayılma çapı



**Fotoğraf 4.3.** VYPH6'nın yayılma çapı



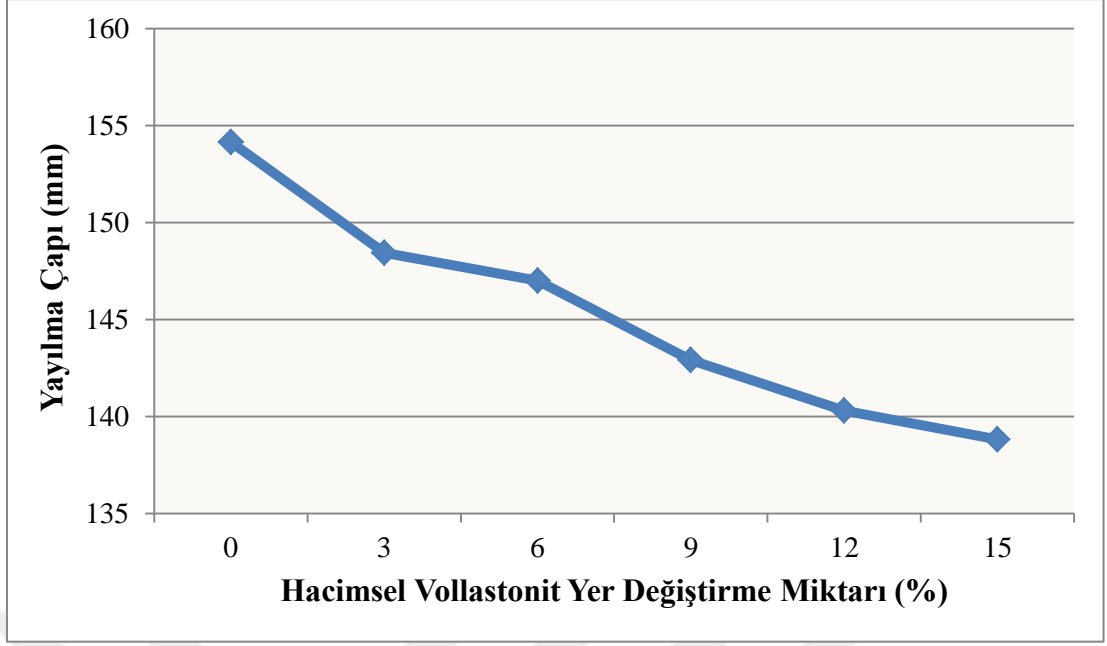
**Fotoğraf 4.4.** VYPH9'un yayılma çapı



**Fotoğraf 4.5.** VYPH12'nin yayılma çapı



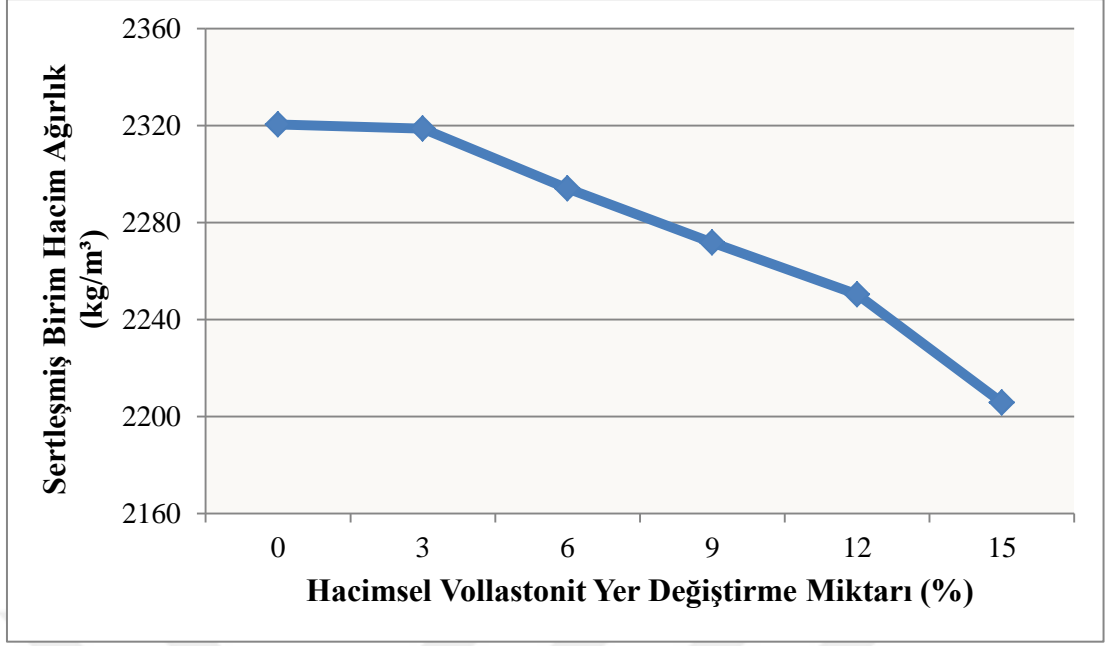
**Fotoğraf 4.6.** VYPH15'in yayılma çapı



**Ŗekil 4.1.** VYPH karışımlarının yayılma çapları

#### 4.2 Sertleşmiş Birim Ağırlık

VYPH karışımlarına ait sertleşmiş birim ağırlıkların gösterildiği grafik Ŗekil 4.2’de sunulmuştur. %0, %3, %6, %9, %12 ve %15 karışımları için sertleşmiş birim ağırlık değerleri 28. günde 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Her karışım için 3 adet numunenin ağırlıkları ölçülmüş bulunan değerlerin ortalaması alınarak bu değer numune hacmine bölünerek sertleşmiş birim ağırlık tespit edilmiştir. 28. gün için bu değerler sırasıyla, 2320.57, 2318.75, 2294.14, 2271.74, 2250.39 ve 2205.73 kg/m<sup>3</sup> olarak llmŝtir. Grafikten de grldğnzere vollaştonit yüzdesi arttıķça sertleşmiş birim ağırlık değeri düŝmektedir.



Şekil 4.2. VYPH karışımlarının sertleşmiş birim ağırlık değerleri

### 4.3 Basınç Dayanımı

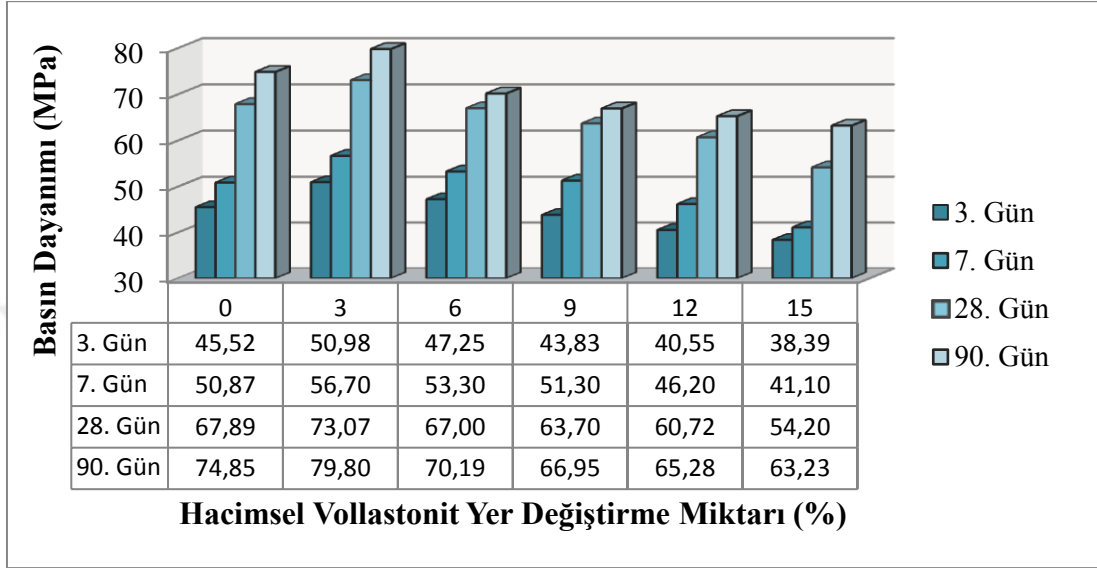
VYPH'lerin basınç dayanımı değişimleri ve kontrol harcı olan VYPH0 karışımına göre basınç dayanımındaki yüzde değişim verileri sırasıyla, Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te grafiksel olarak gösterilmektedir. Tahmin edileceği üzere basınç dayanımı yüksek performanslı betonda sağlanması gereken ana kriterlerden bir tanesidir. Bu karışımlarda vollastonit yüzdesi 0, 3, 6, 9, 12 ve 15 olarak uygulanmıştır. VYPH karışımlarına ait basınç dayanımı deneyleri 3., 7., 28. ve 90. günlerde yapılmıştır. Şekil 4.3'te VYPH karışımlarının basınç dayanımları doğal vollastonitin çimento ile yer değiştirme yüzdesine bağlı olarak gösterilmiştir. Kontrol karışımı olan VYPH0 karışımının 3., 7., 28. ve 90. gün deneylerinden elde edilen sonuçlar sırasıyla 45.52, 50.87, 67.89 ve 74.85 MPa'dır. %3 oranında vollastonit içeren VYPH3 karışımında ise bu değerler 50.98, 56.70, 73.07 ve 79.80 MPa'dır. VYPH6 karışımında ölçülen değerler ise 47.25, 53.30, 67.00 ve 70.19 MPa olmuştur. Görüldüğü üzere vollastonit yüzdesinin %3'ten %6'ya çıkarıldığı VYPH6 karışımının basınç dayanımları kontrol harcı olan VYPH0'a göre yüksek ancak %3 vollastonit içeren VYPH3 karışımına göre daha düşük çıkmaktadır. Aşağıdaki grafiklerden ve bu değerlerden anlaşılacağı üzere VYPH karışımlarının basınç dayanımı vollastonit yüzdesinin %3 olduğu durumda artmakta sonraki yüzdelerde ise azalmaktadır. Mathur vd. (2007a), yaptıkları çalışmada vollastonit

mineralinin betonun basınç dayanımını artırdığını belirlemişlerdir. Ayrıca, Soliman ve Nehdi (2012) vollastonit mineralinin ultra yüksek performanslı betonun çok erken yaştaki dayanımını da iyileştirdiğini göstermişlerdir. Bu tez kapsamında yapılan deneylerde de 3. günde ölçülen basınç dayanım değerleri bu çalışmalardaki bilgiler ile paralellik göstermektedir.

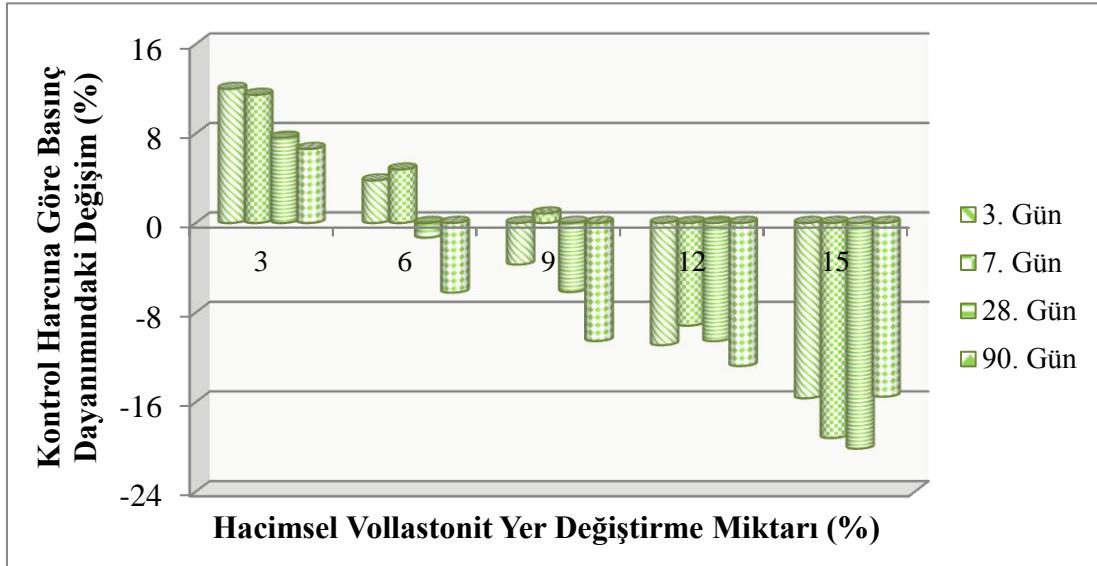
Kumar ve Ramujee (2017), %10 ve %15 oranlarında vollastonit mineralini çimento ile yer değiştirdikleri çalışmada 28. ve 56. günde ölçtükleri basınç dayanım değerlerinde, vollastonit içeriğinin %10 olduğu karışımlarda basınç dayanımında artış, %15 olan karışımlarda ise azalma olduğunu görmüşlerdir. %15 vollastonit içeriğine sahip karışımın dayanım değeri %10 vollastonit içeren karışıma göre düşük çıkmasına karşın kontrol harcından daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Bir diğer çalışmada ise Kalla vd. (2015), 3 farklı su/bağlayıcı (0.45, 0.50 ve 0.55) oranı kullanılarak elde edilen karışımlarda 0.45 ve 0.55 su/bağlayıcı oranlarında %10 vollastonit içeriğine kadar basınç dayanımının olumlu yönde etkilendiğini tespit etmişlerdir. %15 ve daha fazla vollastonit içeren karışımlarda ise basınç dayanımın kontrol harcından daha düşük değerler aldığı belirlenmiştir. Bu tez kapsamında yapılan çalışmada ise vollastonit içeriğinin %3 olduğu karışımlarda basınç dayanımının arttığı görülmüştür. %6 oranında doğal vollastonit içeren karışımda ise %3 karışımına göre dayanımda düşüş olmasına karşın %6 vollastonit içeriğine sahip karışıma ait basınç dayanım değerleri kontrol harcına ait basınç dayanım değerlerinden daha yüksektir.

Vollastonit mineralinin basınç dayanımına yüzde olarak etkisi, Şekil 4.4'te grafiksel olarak sunulmuştur. VYPH3, VYPH6, VYPH9, VYPH12 ve VYPH15 karışımlarının, VYPH0 karışımına göre yüzde değişimleri, 3. gün için sırasıyla, 11.99, 3.80, -3.71, -10.92 ve -15.66 olarak, 7. gün için sırasıyla, 11.46, 4.78, 0.85, -9.18 ve -19.21 olarak tespit edilmiştir. 28. gün için 7.63, -1.31, -6.17, -10.56 ve -20.16 olmuştur. 90. gün ise bu değişimler 6.61, -6.23, -10.55, -12.79 ve -15.52 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlardan da görülmektedir ki VYPH karışımlarında kontrol harcına göre 3. günde %3 ve %6, 7., 28. ve 90. günlerde ise %3, %6 ve %9 vollastonit yüzdelinde artış, vollastonit oranının %12 ve %15 olduğu karışımlarda ise basınç dayanımında azalma meydana gelmektedir. Beton içerisinde gerçekleşen hidrasyon olayı uzun süreler boyunca devam eden bir olaydır. Beton hidrasyon süresi arttıkça beton içerisindeki boşluklar dolmakta ve beton basınç dayanımı artmaktadır. Dolayısıyla beton ve harçların kür süresi ile basınç

dayanımı doğru orantılı olmaktadır. (Chan ve Li, 1997; Kalla vd., 2013; Soliman ve Nehdi, 2012). Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmada da Şekil 4.4'ten de görüleceği üzere tüm VYPH karışımlarında kür süresi arttıkça basınç dayanımında da artış olmuştur.



Şekil 4.3. VYPH karışımlarının basınç dayanımı değişimleri



Şekil 4.4. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre basınç dayanımındaki yüzde değişimleri

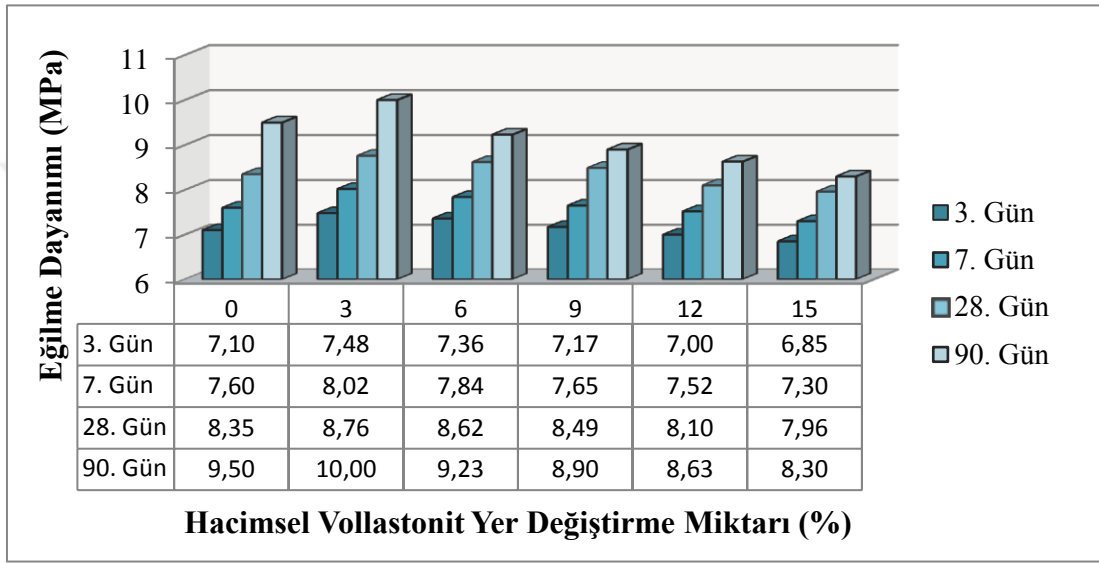
#### 4.4 Eğilme Dayanımı

VYPH karışımları, doğal vollastonitin çimentoyla yer değiştirme yüzdesine bağlı olarak 0, 3, 6, 9, 12 ve 15 olarak gösterilmiş olup, 3., 7., 28. ve 90. gündeki eğilme dayanımı değerleri Şekil 4.5'te, kontrol harcına göre 3., 7., 28. ve 90. gündeki eğilme dayanımlarındaki yüzde değişim değerleri ise Şekil 4.6'da sunulmaktadır. VYPH karışımlarının vollastonit yüzdelere göre 3 günlük eğilme dayanımları sırasıyla, 7.10, 7.48, 7.36, 7.17, 7.00 ve 6.85 MPa olarak ölçülmüştür. 7 günlük eğilme dayanımları 7.60, 8.02, 7.84, 7.65, 7.52 ve 7.30 MPa olmuştur. 28 günlük dayanımlarda 8.35, 8.76, 8.62, 8.49, 8.10 ve 7.96 MPa eğilme dayanımı değerleri alınmıştır. Son olarak 90 günlük eğilme dayanımı değerleri ise 90.50, 10.00, 9.23, 8.90 ve 8.63 olarak ölçülmüştür. Yukarıda sunulan bu değerlere göre VYPH karışımlarında vollastonit içeriğinin %3 ve %6 olduğu durumlarda eğilme dayanımında artış olduğu görülmektedir. Soliman ve Nehdi (2012), yaptıkları çalışmada ultra YPH karışımlarında vollastonit minerali içeren karışımların vollastonit olmadan üretilen karışıma oranla eğilme dayanımının pozitif yönde değiştiğini göstermişlerdir. Ayrıca Mathur vd. (2007a), tarafından yapılan testlerde vollastonit mineralinin beton eğilme dayanımının artmasına katkı sağladığı tespit edilmiştir.

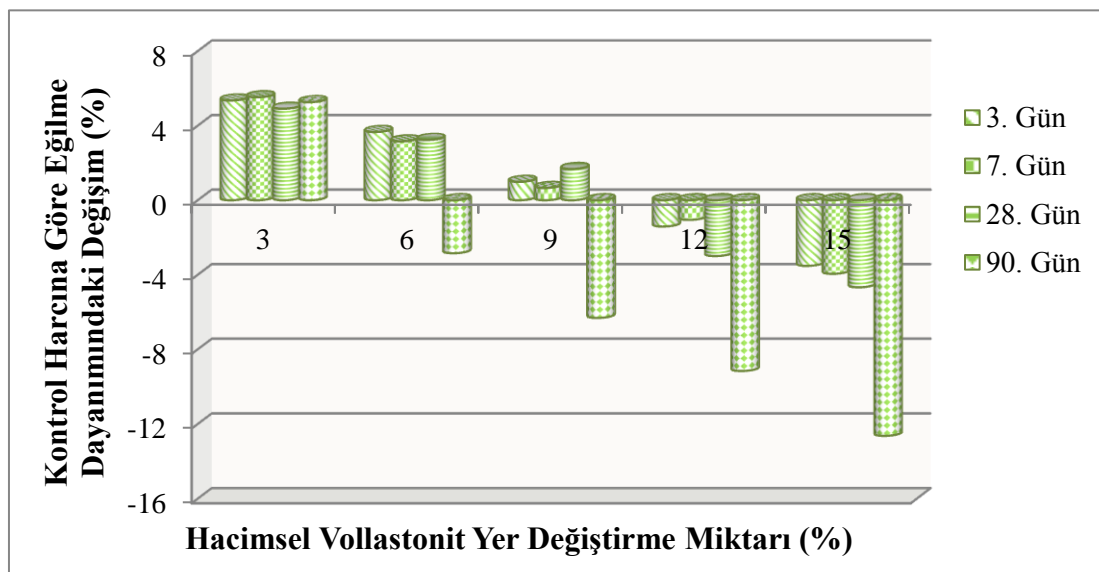
%3, %6, %9, %12 ve %15 oranlarında vollastonit içeriğine sahip olan VYPH karışımlarının, Şekil 4.6'da kontrol karışımına oranla verilen yüzde değişim değerleri 3. gün için sırasıyla, yüzde 5.35, 3.66, 0.99, -1.41 ve -3.52 olmuştur. 7. gün için bu değerler 5.53, 3.16, 0.66, -1.05 ve -3.95 olarak ölçülmüştür. 28. günde 4.91, 3.23, 1.68, -2.99 ve -4.67 değerleri alınmıştır. 90. günde ise bu yüzdelik değişimler 5.26, -2.84, -6.32, -9.16 ve -12.63 olmuştur. Bu sonuçlara göre 3., 7. ve 28. günlerde %9'a kadar vollastonit içeriğine sahip karışımların eğilme dayanım değerleri kontrol harcından daha yüksek olmakta %12 ve %15 vollastonit içeren karışımların eğilme dayanımı ise kontrol harcından düşük çıkmaktadır. 90. gündeki eğilme dayanım değerlerine bakıldığında ise %3 vollastonit içeren karışım kontrol harcına göre daha iyi değer vermektedir. Diğer vollastonit içeren karışımların eğilme dayanım değerleri kontrol harcından daha düşük çıkmaktadır.

Yapılan bu çalışmanın deney sonuçlarına göre doğal vollastonit minerali eğilme dayanımını olumlu yönde etkilerken özellikle 90 günlük numunelerden alınan eğilme dayanımı verilerinde %3'ten fazla vollastonit içeriğine sahip numunelerde eğilme

dayanımı olumsuz etkilenmiştir. %3 vollastonit içeren karışımda eğilme dayanımında meydana gelen artışın sebebini vollastonit mineralinin iğnemsî bir yapıya sahip olması ve yüksek elastisite modülü ile (200 GPa) açıklayabiliriz (Kalla vd., 2015; Mathur vd., 2007a; Mathur vd., 2007b). Eğilme dayanımında diğer vollastonit içeriğine sahip karışımlarda meydana gelen azalma ise harç içeriğinde vollastonit miktarının artmasıyla birlikte karışımda su-bağlayıcı reaksiyonunun olumsuz etkilenmesi olarak açıklanabilir (Wahab vd., 2017).



Şekil 4.5. VYPH karışımlarının eğilme dayanımı değişimleri

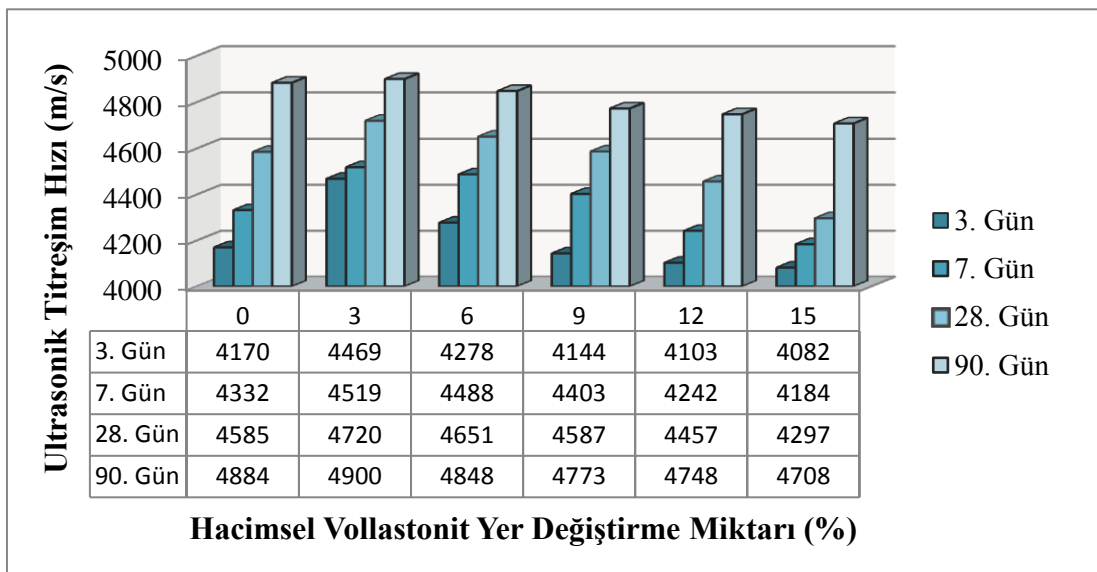


Şekil 4.6. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre eğilme dayanımındaki yüzde değişimleri

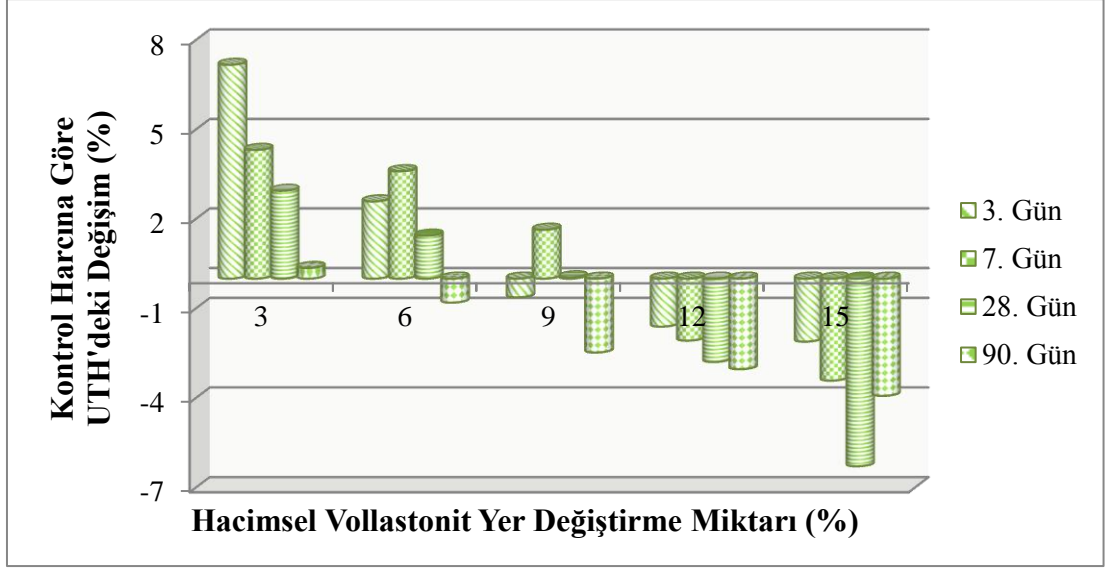
#### 4.6 Ultrasonik Titreşim Hızı

Ultrasonik titreşim hızı (UTH) değerleri m/s cinsinden belirlenmiştir. VYPH karışımlarının UTH verileri Şekil 4.7’de ve kontrol harcına göre UTH’deki yüzde değişim değerleri de Şekil 4.8’de gösterilmektedir. Kontrol harcı olan VYPH0 karışımının UTH değerleri 3., 7., 28. ve 90. gün için sırasıyla 4170, 4332, 4585 ve 4884 olmuştur. %3 vollastonit içeren karışımda ise bu değerler 4469, 4519, 4720 ve 4900 olarak gerçekleşmiştir. %6 oranında vollastonit içeren karışımdan alınan değerler kontrol karışımına göre yüksek olmakla beraber %3’lük karışımdan daha düşük değerler vermiştir. %9 ve daha fazla vollastonit içeren karışımlarda ise kontrol karışımından daha düşük değerler alınmıştır. Bu değerlere bakıldığında basınç dayanımında elde edilen değerlere paralel olarak artış ve azalışların olduğu görülmektedir.

Vollastonit mineralinin %3 oranında çimento yerine kullanılmasıyla UTH meydana gelen olumlu etkinin sebebi olarak doğal vollastonit mineralinin çimentoya oranla daha ince bir parçacık boyutuna sahip olması ve böylece harç karışımı içerisindeki boşlukları doldurma etkisi görülebilir. Bu doldurucu etki sayesinde karışımda oluşan bağların daha sıkı ve daha yoğun olması sağlanmıştır. Vollastonit içeriğinin artmasıyla UTH’de ortaya çıkan olumsuzluğun sebebi olarak ise vollastonit oranının yükselmesiyle bu bağın zayıflaması görülebilir (Wahab vd., 2017).



Şekil 4.7. VYPH karışımlarının ultrasonik titreşim hızı değişimleri



Şekil 4.8. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre ultrasonik titreşim hızındaki yüzde değişimleri

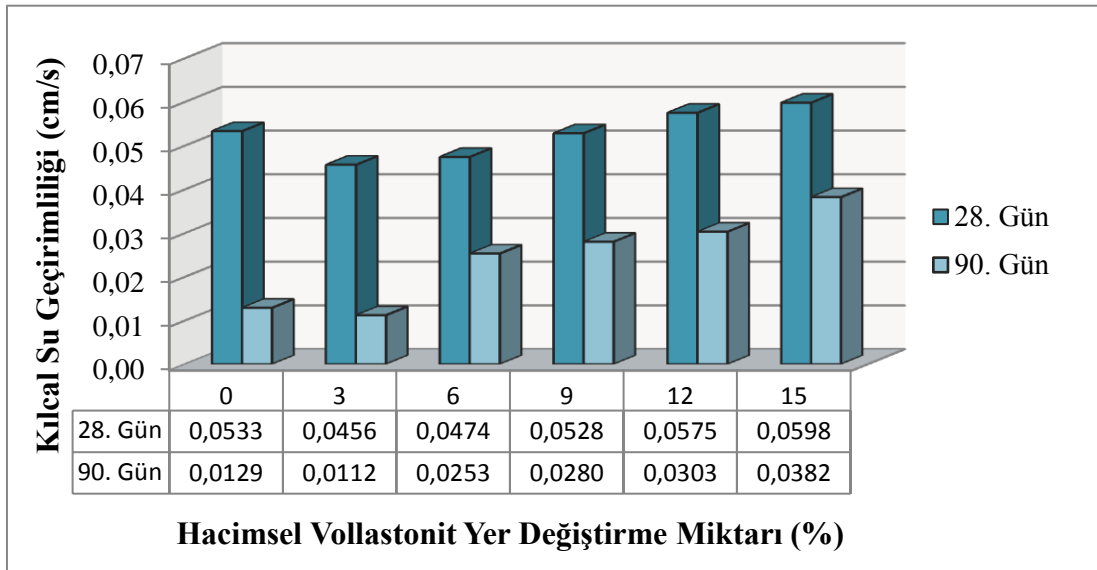
#### 4.7 Kılcal Su Geçirirliği

VYPH karışımlarının kılcal su geçirirliği değerleri Şekil 4.9'da, kontrol harcına göre kılcal su geçirirliliğinde meydana gelen yüzde değişimler ise Şekil 4.10'da sunulmaktadır. Şekil 4.9 incelendiğinde 28. ve 90. deney günleri için %3 wollastonit içeriğine sahip VYPH karışımında olumlu sonuç alınırken diğer VYPH karışımlarında kılcal su geçirirliliği değerlerinde artış gözlenmektedir. %0 wollastonit içeren VYPH0 karışımının kılcal su geçirirliliği değerleri 28.ve 90. günler için sırasıyla 0.0533 cm/s ve 0.0129 cm/s olurken; %3 wollastonit içeren VYPH3 karışımında bu değerler 0.0456 cm/s ve 0.0112 cm/s olarak ölçülmüştür. %6 oranında wollastonit içeren VYPH6 karışımında da 0.0474 cm/s ve 0.0253 cm/s değerleri alınmıştır. Görüldüğü üzere 90. deney gününe ait değerlerde %6 wollastonit içeren karışımında kılcal su geçirirliliği olumsuz etkilenmiştir. Yani VYPH karışımları üzerinde yapılan kılcal su geçirirliliği deneylerinde %3 wollastonit içeriğine sahip karışımında olumlu sonuç alınırken diğer VYPH karışımlarında olumsuz sonuçlar elde edilmiştir. Öyleki kontrol karışımına oranla VYPH3 karışımında 28. ve 90. günler için sırasıyla %14 ve %13 oranında kılcal su geçirirliliğinde azalma gözlenmiştir Buradan da anlaşılacağı üzere geçirimsizliğin en az olduğu karışım %3 wollastonit içeren VYPH3 karışımı olmuştur. Bu sonuçlar doğrultusunda Mathur vd. (2007a) tarafından yapılan çalışmada ise wollastonit mineralinin betonda su emme oranını azalttığı ortaya konmuştur. Ayrıca Kalla vd.

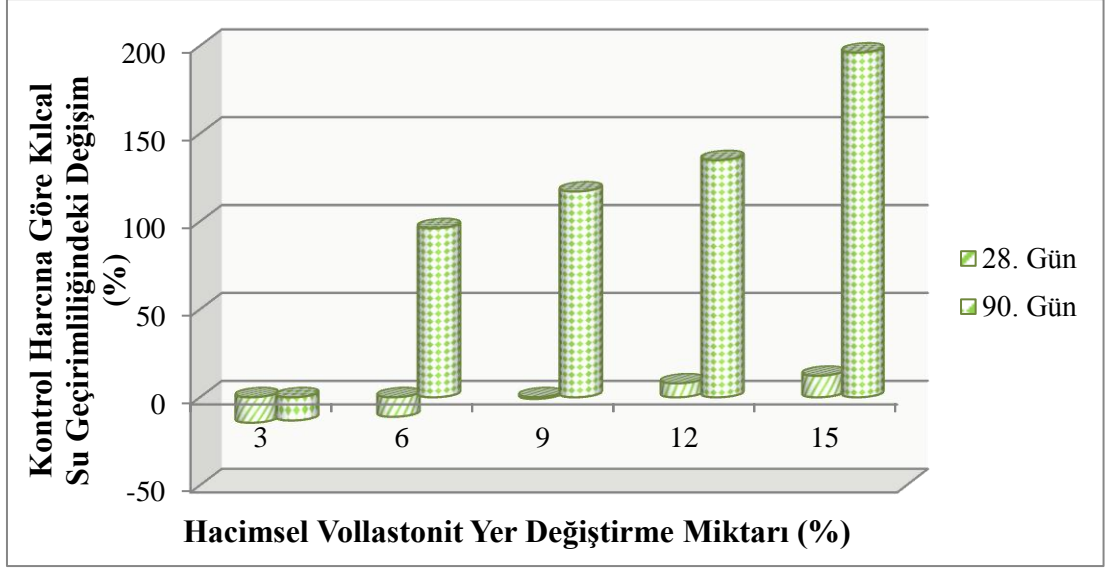
(2015), tarafından yapılan porozite deneylerinde vollastonit mineralinin betonda porozite değerini düşürdüğü ve %10 vollastonit içeriğinden sonra bu düşüşün olumsuz etkilendiği ortaya konulmuştur.

Karışımların 28. ve 90. güne ait kılcal su geçirimsizliği değerlerinin gösterildiği Şekil 4.9'da kür süresinin etkisi açıkça görülmektedir. 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 yapılan kılcal su geçirimsizliği deneylerinden elde edilen değerlere bakıldığında doğal vollastonit mineralinin YPH karışımlarının geçirimsizliğini azalttığı gözlenmektedir. Doğal vollastonit minerali harç veya beton karışımlarında gözenek yapısını düzenleyerek karışım içerisindeki boşlukların dolmasına yardımcı olur ve böylece kılcal su geçirimsizliğinin azalmasında büyük rol oynar. Vollastonit mineralinin sahip olduğu doldurucu etki sayesinde karışım içerisindeki gözenekler azalır ve böylece karışımın su emme kapasitesi düşer (Kalla vd., 2015; Mathur vd., 2007a; Ransinchung vd., 2009).



Şekil 4.9. VYPH karışımlarının kılcal su geçirimsizliği değişimleri



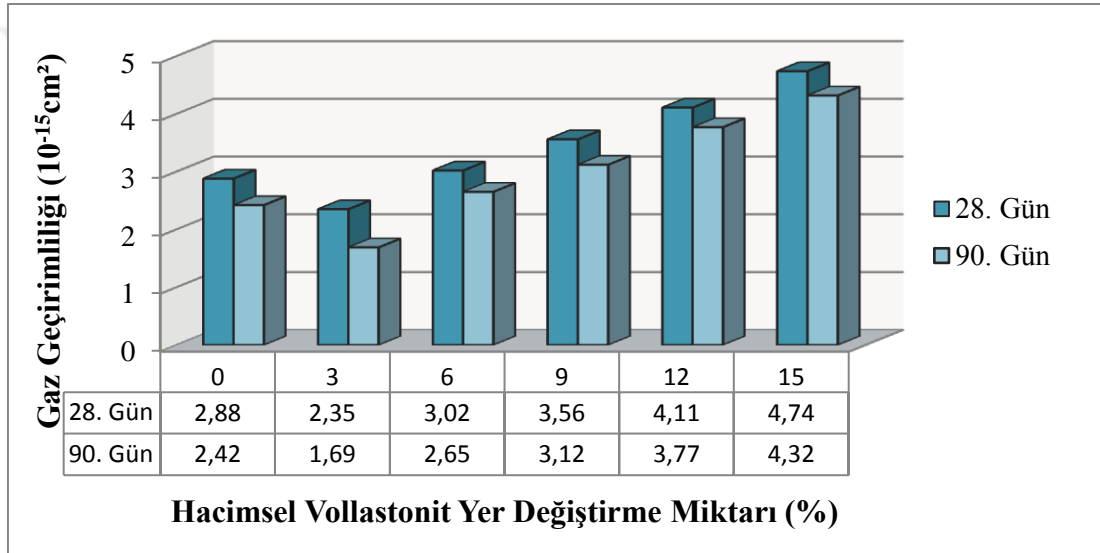
Şekil 4.10. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre kılcal su geçirimsizliğindeki yüzde değişimleri

#### 4.8 Gaz Geçirimsizliği

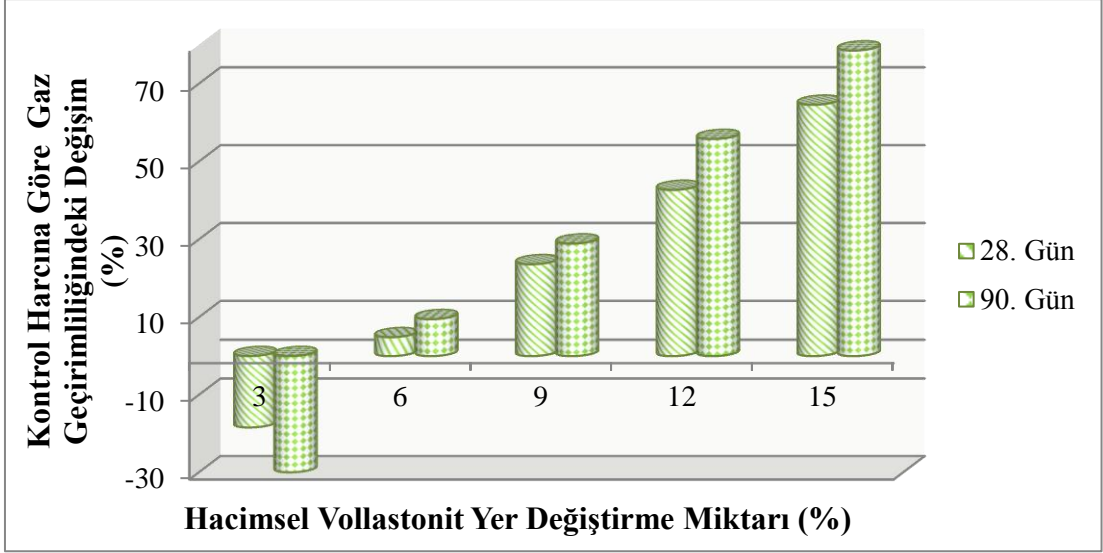
Doğal wollastonit minerali kullanılarak elde edilen VYPH karışımlarına ait gaz geçirimsizliği değerleri Şekil 4.11’de, wollastonit miktarına bağlı olarak gaz geçirimsizliğinde meydana gelen yüzde değişimler ise Şekil 4.12’de gösterilmektedir. VYPH0 karışımı için 28. ve 90. gündeki gaz geçirimsizliği değerleri sırasıyla 2.88 ve  $2.42 \cdot 10^{-15} \text{cm}^2$  olarak ölçülmüştür. VYPH3 karışımı için bu değerler sırasıyla 2.35 ve  $1.69 \cdot 10^{-15} \text{cm}^2$  olmuştur. %6 wollastonit içeren VYPH6 karışımında ise 28. ve 90. deney yaşında ölçülen değerler sırasıyla 3.02 ve  $2.65 \cdot 10^{-15} \text{cm}^2$  olarak gerçekleşmiştir. Görüldüğü üzere %3 wollastonit içeren VYPH3 karışımının gaz geçirimsizliği kontrol harcına oranla azalmaktadır. Yani doğal wollastonit minerali gaz geçirimsizliğinin azalmasına katkıda bulunmaktadır. Öte yandan %6 wollastonit içeriğine sahip karışımda gaz geçirimsizliği olumsuz yönde etkilenmekte %9, %12 ve %15 wollastonit içeriğine sahip karışımlarda bu olumsuzluk artarak devam etmektedir. Ayrıca bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere test yaşının artmasıyla birlikte gaz geçirimsizliği değerleri azalmaktadır.

%3 oranında doğal wollastonit minerali içeren VYPH3 karışımında gaz geçirimsizliği değerinin azaldığı dolayısıyla doğal wollastonit mineralinin YPH karışımlarında geçirimsizliği azalttığı görülmüştür. Doğal wollastonit minerali harç veya beton

karışımlarında gözenek yapısını düzenleyerek karışım içerisindeki boşlukların dolmasına yardımcı olur ve böylece gaz geçirimsizliği değerinin azalmasında büyük rol oynar. Bu azalma doğal vollastonit mineralinin doldurucu etkisiyle açıklanabilir (Kalla vd., 2015; Mathur vd., 2007a; Ransinchung vd., 2009). Ayrıca VYPH6 ve sonraki VYPH karışımlarında meydana gelen olumsuz etki vollastonitin belli bir orandan sonra ara yüzey geçiş bölgesindeki bağı zayıflatmasıyla açıklanabilir (Wahab vd., 2017). Kür süresinin artmasıyla gaz geçirimsizliğinde meydana gelen azalma ise karışım içerisinde devam eden hidratasyonun kür süresinin artmasıyla olumlu yönde etkilenmesiyle açıklanabilir (Kalla vd., 2013; Ransinchung vd., 2009).



Şekil 4.11. VYPH karışımlarının gaz geçirimsizliği değişimleri



Şekil 4.12. VYPH karışımlarının kontrol karışımına göre gaz geçirimsizliğindeki yüzde değişimleri

## BÖLÜM V

### SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında doğal vollastonit mineralinin yüksek performanslı harç üzerine etkileri araştırılmış olup üretilen harç karışımlarının taze, mekanik ve durabilite özellikleri değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Kullanılan vollastonit yüzdesinin artmasıyla beraber yayılma çapı azalmıştır. Öyleki üretilen VYPH karışımlarının yayılma çapları sırasıyla mm cinsinden 154, 148, 147, 143,140 ve 139 olarak ölçülmüştür. Bu durumun temel nedenleri; vollastonit mineralinin iğnemsiz parçacık yapısı ve çimentodan daha ince tanecik yapısına sahip olmasıdır.
- Sertleşmiş birim hacim ağırlık değerleri, vollastonit yüzdesinin artmasına paralel olarak azalmış ve bu değerler sırasıyla  $\text{kg/m}^3$  cinsinden 2321, 2319, 2294, 2272, 2250 ve 2206 olarak ölçülmüştür.
- Basınç ve eğilme dayanımı kür süresinin artmasıyla artmış 3., 7., 28. ve 90. günlerde yapılan deneylerde deney yaşına paralel basınç ve eğilme dayanımı değerleri olumlu yönde gelişim gösterdiği gözlenmiştir. Ayrıca tüm deney yaşları için %3 vollastonit içeriğinde basınç ve eğilme dayanımında artış gözlenmiştir. %3 vollastonit içeren karışımın basınç dayanımında meydana gelen yüzde değişimler 3., 7., 28. ve 90. günler için sırasıyla yüzde 11.99, 11.46, 7.63 ve 6.61 olurken eğilme dayanımında bu değişimler 5.35, 5.53, 4.91 ve 5.26 olarak gerçekleşmiştir. %6 vollastonit içeren VYPH6 karışımında ise basınç ve eğilme dayanımı azalmakla birlikte kontrol harcına göre daha yüksek değerler elde edilmiştir. Diğer vollastonit yüzdelere sahip VYPH karışımlarında ise basınç ve eğilme dayanımında azalma meydana gelmiştir. Doğal vollastonit mineralinin basınç ve eğilme dayanımına olan olumlu etkisi doğal vollastonitin lifli yapısına (iğnemsiz parçacık morfolojisine) dayandırılabilir. Ayrıca vollastonit mineralinin yüksek elastisite modülüne (200 GPa) sahip oluşu da eğilme dayanımındaki artışın bir diğer nedeni olarak görülebilir. %3'ten daha fazla vollastonit içeren VYPH karışımlarında basınç ve eğilme dayanımında meydana gelen düşüşün sebebi vollastonit mineralinin matristeki bağı zayıflatmasıyla açıklanabilir.

- VYPH karışımlarına uygulanan ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneylerinde %3 oranında vollastonit içeriğine sahip karışımda UTH değerlerinde gelişme gözlenmiştir. Öyleki kontrol harcına göre 3., 7., 28. ve 90. günlerde yapılan UTH deneylerindeki yüzde değişimler sırasıyla 7.17, 4.32, 2.94 ve 0.36 olarak gerçekleşmiştir. %6 vollastonit içeriğine sahip karışımda UTH değerlerinde düşüş olmakla beraber kontrol harcına göre yüksek değerler elde edilmiştir. Diğer vollastonit içeren karışımlarda ise UTH değerleri olumsuz etkilenmiştir. %3 vollastonit içeriğine sahip karışımda UTH değerlerindeki gelişim vollastonit mineralinin matris bağını güçlendirmesi; artan vollastonit yüzdesiyle UTH değerlerinin düşmesi ise matris bağının zayıflaması ile açıklanabilir.
- 28. ve 90. günlerde uygulanan kılcal su geçirimliliği deneylerinde %3 vollastonit içeren karışım değerlerinde azalma gözlenmiştir. Kontrol harcına oranla kılcal su geçirimliliğindeki azalma 28. ve 90. günler için sırasıyla yüzde 14.45 ve 13.18 olarak gerçekleşmiştir. VYPH karışımlarına uygulanan gaz geçirimliliği deneylerinde ise %3 vollastonit içeren karışımın kontrol harcına göre gaz geçirimliliği değerlerinde meydana gelen yüzde azalma 28. ve 90. günler için sırasıyla 18.4 ve 30.16 olarak ölçülmüştür. Hem UTH hem de gaz geçirimliliği deneylerinde elde edilen sonuçlara göre %3 vollastonit içeren karışımlarda olumlu yönde gelişme gözlenirken; %6 ve daha fazla oranda vollastonit minerali içeren karışımlarda bu gelişme olumsuz yönde olmuştur. Her iki deney için %3 vollastonit içeriğine sahip karışımlarda meydana gelen olumlu etkinin nedeni olarak doğal vollastonit mineralinin çimentoya göre daha ince tanecik boyutuna sahip olması ve böylece karışım içerisinde doldurucu etkide bulunması görülebilir.
- VYPH karışımlarında kür süresi arttıkça tüm deneyler için elde edilen olumlu sonuçlar gelişme göstermiştir. Bu gelişme kür süresinin harç ve betona olan olumlu etkisiyle açıklanabilir. Kür süresine paralel devam eden hidrasyon etkisiyle karışım içerisindeki gözenek boşlukları azalmaktadır. Böylece daha iyi mekanik ve durabilite özellikleri elde edilebilmektedir. Dolayısıyla kür süresi betonun ve harcın mekanik ve durabilite özelliklerini doğrudan etkilemekle birlikte kür süresinin artmasıyla birlikte bu özellikler gelişme göstermektedir.
- Bu tez kapsamında doğal vollastonit mineralinin YPH karışımlarında kullanılmasıyla birlikte karışımların mekanik ve durabilite özelliklerinde

meydana gelen olumlu etkiler belirlenmiştir. Bu kapsamda doğal vollastonit minerali YPB üretimi için de kullanılabilir bir mineral katkı malzemesi olarak görülebilir.



## KAYNAKLAR

ACI Comitee 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.

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.

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.

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.

Chindaprasirt, 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.

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.

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.

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

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.

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.

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

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.

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.

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”, *7<sup>th</sup> 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.

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

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: voises nouvelles du matériau béton, Les bétons à hautes performances du materiau à l’ouvrage”, *Presses de l’ecole 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.

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.

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

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

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, 4<sup>th</sup> 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.

Ramezaniapour, 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.

Ramezaniapour, 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.

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.

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

Sarıbıyık, M., “Beton Katkı Maddeleri”, Sakarya Üniversitesi, 2007.

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.

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.

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

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.

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.

Topçu, İ.B., Canbaz, M. ve Karakurt, C., “Beton Üretiminde Kimyasal Katkı Kullanımı”, *Politeknik Dergisi-Sayı:1* 59-63, 2006

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.

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.

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.

## ÖZ GEÇMİŞ

Beytullah MALKOÇ Adana'nın Saimbeyli ilçesinde 01.04.1991 tarihinde doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini tamamladıktan sonra 2010 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başladı. 2014 yılında lisans eğitimini tamamlamasına müteakip özel sektörde bir müddet çalıştıktan sonra 2016 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi'nde yüksek lisans eğitimine başladı.



