



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

YAPAY VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN
BOYUTSAL STABİLİTE VE KIRILMA PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

YUNUS SEVER

Ekim 2020

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

YAPAY VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN
BOYUTSAL STABİLİTE VE KIRILMA PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

YUNUS SEVER

Yüksek Lisans Tezi

Danışman

Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ

Ekim 2020

Yunus SEVER tarafından **Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ** danışmanlığında hazırlanan “**Yapay Vollaistonitin Yüksek Performanslı Harçların Boyutsal Stabilite ve Kırılma Parametreleri Üzerine Etkisi**” adlı bu çalışma jürimiz tarafından Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : 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 V.

TEZ BİLDİRİMİ

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

Yunus SEVER

ÖZET

YAPAY VOLLASTONİTİN YÜKSEK PERFORMANSLI HARÇLARIN BOYUTSAL STABİLİTE VE KIRILMA PARAMETRELERİ ÜZERİNE ETKİSİ

SEVER, Yunus

Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi

Fen Bilimler Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilimdalı

Danışman : Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ

Ekim 2020, 119 Sayfa

Bu tez çalışmasında, yapay vollastonitin yüksek performanslı harçların (YPH) boyutsal stabilite ve kırılma parametreleri üzerine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kontrol karışımına ek olarak, çimento yerine ağırlıkça %3, 6, 9 ve 12 oranlarında vollastonit kullanarak YPH karışımları üretilmiştir. Üretilen harç karışımlarının su/çimento oranı 0.33 olarak belirlenmiştir. Basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik titreşim hızı 3., 7., 28. ve 90. günlerde, kırılma parametreleri 28. ve 90. günlerde sertleşmiş harç numuneleri üzerinde deneysel olarak belirlenmiştir. Harç numunelerin boyutsal stabilitesinin belirlenmesi için, kuruma büzülmesi ve kısıtlanmış rötre deneyleri 60 günde gerçekleştirilmiştir. Deneysel sonuçları çimento yerine %9 oranına kadar vollastonit ikamesinin YPH'ların basınç, eğilme ve ultrasonik titreşim hızı ve kırılma parametreleri üzerine olumlu etkisinin olduğunu göstermiştir. Ayrıca, %9 ikame oranına kadar vollastonit içeriği, YPH'ların kuruma büzülmesini ve kısıtlanmış rötre çatlaklarını azaltmıştır.

Anahtar Sözcükler: vollastonit, ultrasonik titreşim hızı, yüksek performanslı harç, kırılma tokluğu, kuruma büzülmesi ve kısıtlanmış rötre

SUMMARY

THE EFFECT OF SYNTHETICAL WOLLASTONITE ON DIMENSIONAL STABILITY AND FRACTURE PARAMETERS OF HIGH-PERFORMANCE MORTAR

SEVER, Yunus

Niğde Ömer Halisdemir University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Doc. Hatice Öznur ÖZ

October 2020, 119 pages

In this thesis, the effects of artificial wollastonite on the dimensional stability and fracture parameters of high performance mortars (YPH) were investigated experimentally. In addition to the control mortar with low water/cement (0.33), YPHs were produced by adding 3, 6, 9 and 12% wollastonite instead of cement by weight. Compressive strength, flexural strength and ultrasonic pulse velocity were tested experimentally on the 3rd, 7th, 28th and 90th days, and the fracture parameters were obtained on the 28th and 90th days. In order to determine the dimensional stability of YPHs, drying shrinkage and restrained shrinkage tests were performed during 60 days. As a result of the experimental studies, it was concluded that when wollastonite was used up to 9% instead of cement in YPHs, wollastonite had a positive effect on the compressive, flexural and ultrasonic pulse velocity and fracture parameters. However, the drying and restrained shrinkage of YPHs had a reduction for YPHs with wollastonite content up to 9%.

Keywords: wollastonite, ultrasonic pulse velocity, high performance mortar, fracture toughness, drying shrinkage, restrained shrinkage

ÖN SÖZ

Bu tez çalışmasında, literatür çalışmaları dışında belirlenen özel bir yöntemle öğütülen vollastonit minerali yüksek performanslı harç (YPH) üretiminde kullanılmıştır. Sertleşmiş haldeki harç numunelerine standart kür şartları uygulandıktan sonra prizmatik numuneler 3., 7., 28. ve 90. günlerdeki deney yaşında; basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ultrasonik titreşim hızı deneyleri yapılarak belirlenmiştir. Kırılma parametreleri, 28. ve 90. günlerdeki deney yaşında test edilmiştir. Harçların boyutsal stabilitesinin belirlenmesi için; kuruma büzülmesi ve kısıtlanmış rötre deneyleri yapılarak numunelerdeki çatlakların yeri, zamanı, çatlak genişliği tespiti yapılmış ve 60 günde deneysel çalışma tamamlanmıştır. Gerçekleşen deneysel çalışmalara göre, çimento yerine ikame edilen vollastonit miktarının artması ile yayılma çapında azalma olurken; basınç, eğilme, ultrasonik titreşim hızı değerleri ile kırılma parametreleri ve boyutsal stabilite özelliklerinde kayda değer bir iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca, kuruma büzülmesi ve kısıtlanmış rötre değerlerinde azalma görülmüştür.

Bu tez çalışma konusunun belirlemede yardımcı olan ve bilimsel çalışma, araştırma ve düşünce fikrini aşıl原因an değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Hatice Öznur ÖZ'e çok teşekkür ederim. Deneysel çalışmam boyunca bilgi birikimini benimle paylaşan ve desteklerini esirgemeyen Sayın Arş. Gör. Muhammet GÜNEŞ'e ve yardım ve desteklerinden dolayı Sayın İnş. Müh. Çağlar Eren Gür'e ve İnşaat Mühendisliği Bölümü öğrencilerinden Sayın Halil İbrahim Demir'e teşekkür ederim.

Eğitim ve öğrenim hayatım boyunca her zaman yanımda olan değerli aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	vi
SUMMARY	vii
ÖN SÖZ.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ	xv
BÖLÜM I	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM II	4
VOLLASTONİT	4
2.1 Vollastonitin Tanımı ve Özellikleri.....	4
2.2 Vollastonit Mineralin Oluşum Durumu	5
2.3 Vollastonitin Mineralojisi, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	6
2.4 Vollastonitin Üretimi.....	8
2.4.1 Sentetik vollastonit üretimi	8
2.5 Vollastonitin kullanım alanları.....	10
2.5.1 Seramik sanayi	11
2.5.2 Plastik sanayi	12
2.5.3 Boya ve kaplama sanayi.....	13
2.5.4 Diğer sanayi uygulamaları	14
2.6 Vollastonit Rezervleri	14
2.6.1 Dünyada vollastonit rezervleri	14
2.6.2 Türkiye'deki vollastonit rezervleri	17
2.7 Vollastonitin Beton ve Harç Üzerine Etkileri.....	17
2.8 Yüksek Performanslı Beton	19
2.8.1 Yüksek Performanslı Betonun Tanımı	19
2.8.2 Yüksek Performanslı Betonun Özellikleri.....	21
2.8.3 Yüksek Performanslı Betonun Kullanım Alanları	23
2.8.4 Yüksek Performanslı Beton Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları ..	24

2.8.5 Yüksek Performanslı Beton İçeriğinde Kullanılan Malzemeler	26
2.8.5.1 Çimento	27
2.8.5.2 Beton karışım suyu.....	28
2.8.5.3 Agregalar	28
2.8.5.4 Süper Akışkanlaştırıcı Katkılar.....	29
2.8.6 Mineral katkıları	30
2.8.6.1 Silis dumanı.....	32
2.8.6.2 Uçucu kül	34
2.8.6.3 Yüksek fırın cürufu	36
2.8.6.4 Metakaolin	37
2.8.6.5 Cam tozu	38
2.8.6.6 Diğer mineral katkı malzemeleri.....	39
2.9 Betonun Kırılma Mekanizması	40
2.9.1 Betonda Kırılma Süreci.....	41
2.9.2 Betonun kırılma mekanizması ile ilgili modeller.....	42
2.9.2.1 Fiktif çatlak modeli.....	42
2.9.2.2 Boyut etkisi modeli	43
2.9.2.3 İki parametrelilik modeli.....	44
2.10 Elastisite Modülü	44
2.11 Betonda Rötme Olayı	45
BÖLÜM III.....	50
DENEYSEL ÇALIŞMA	50
3.2 YPH Tasarımında Kullanılan Malzeme ve Özellikleri.....	50
3.2.1 Çimento	50
3.2.2 Sentetik Vollastonit Üretimi.....	50
3.2.3 Süper Akışkanlaştırıcı (SA) ve harç karışım suyu	53
3.2.4 İnce agregalar	54
3.3 YPH Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü	55
3.3.1 VYPH karışım oranları	55
3.3.2 VYPH üretim prosedürü	56
3.3.2.1 Basınç ve eğilme deneyi	59
3.3.2.2 Kırılma tokluğu deneyi	61

3.3.2.3 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi.....	63
3.3.3 Sertleşmiş YPH'lerin Boyutsal Stabilite Özelliklerinin Ölçülmesi	64
3.3.3.1 Kuruma büzülmesi	64
3.3.3.2 Kısıtlanmış rötre.....	64
BÖLÜM IV	68
BULGULAR VE TARTIŞMA	68
4.1 Basınç Dayanımı	68
4.2 Eğilme dayanımı	70
4.3 Ultrasonik titreşim hızı	72
4.4 Elastisite Modülü ve Kırılma Parametreleri	73
4.5 Kuruma Büzülmesi.....	75
4.6 Kısıtlanmış Rötre	77
BÖLÜM V	79
SONUÇLAR	79
KAYNAKLAR.....	81
ÖZGEÇMİŞ	101

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Vollaştonite ait belli başlı fiziksel özellikler (Anon, 2001; Kogel vd., 2006)	8
Çizelge 2.2. Dünyada vollaştonit üretiminin ton bazında yıllara göre dağılımı (India Minerals Yearbook, 2019)	15
Çizelge 2.3. Bazı Yönetmeliklere Göre Yüksek Performanslı Beton Dayanım Sınırları (Pul, 1999).....	20
Çizelge 3.4. CaO ve SiO ₂ 1 mol ağırlıkları.....	51
Çizelge 3.5. Çimento ve vollaştonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	53
Çizelge 3.6. Doğal kum ve kırma kumun özellikleri.....	54
Çizelge 7.....	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.
Çizelge 3.8. VYPH 1 kg/m ³ karışım hesabı	56
Çizelge 4.9. Kısıtlanmış rötre çatlak genişlikleri ve sayıları	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Asiküler wollastonit (Chan vd., 2019).....	4
Şekil 2.2. Vollastonit kristali (ICL, 2012).....	5
Şekil 2.3. Vollastonitin mikroskop altındaki görüntüsü (Namwoll, 2020)	7
Şekil 2.4. Vollastonitin kristal yapısındaki değişim.....	10
Şekil 2.5. 1990 yılı dünya vollastonit üretimi (366.000 ton) (Springer, 1994)	16
Şekil 2.6. 2010 yılı dünya vollastonit üretimi (540.000 ton) (Virta, 2011; Alexandra, 2011)	16
Şekil 2.7. Başlıca vollastonit üretilen yatakların konumu (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013)	16
Şekil 2.8. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Taşdemir ve Bayramov, 2002).....	21
Şekil 2.9. Arayüzey- Geçiş Bölgesi (Yazıcı vd., 2016).....	23
Şekil 2.10. Beton karma suyu.....	28
Şekil 2.11. Cam tozu (Keskin vd., 2018)	39
Şekil 2.12. Betonun Eğilme Yükleme Altındaki Davranışı.....	42
Şekil 2.13. Boyut etkisi modeline göre önerilen numune geometrisi (Yılmaz-Çetin, 2015)	44
Şekil 2.14. Halka testi yerleşim planı ve kesit görünüşü (ASTM C-1581, 2004)....	47
Şekil 2.15. Kuruma Büzülmesinin Çimento Tanecikleri Arasında Oluşturduğu Kuvvet Mekanizması (Holt, 2001)	48
Şekil 2.16. Kısıtlanmamış rötrede boy çatlak ilişkisi (Raoufi vd., 2011)	49
Şekil 3.17. YPH üretiminde kullanılan malzemelerin tane boyut dağılımları	52
Şekil 3.18. Harç numunesi üzerinde 3 noktalı eğilme testi.....	62
Şekil 3.19. Kısıtlanmış rötre halka örneği planı (Karagüller ve Yatağan, 2018).....	65
Şekil 4.20. VYPH karışımlarının basınç dayanımları	70
Şekil 4.21. VYPH karışımlarının eğilme dayanımları	72
Şekil 4.22. VYPH karışımlarının ultrasonik titreşim hızı değerleri	73
Şekil 4.23. VYPH karışımlarının elastisite modülü değerleri	74
Şekil 4.24. VYPH karışımlarının kırılma tokluğu değerleri	74
Şekil 4.25. VYPH karışımlarının kırılma enerjisi değerleri.....	75

Şekil 4.26. VYPH karışımlarının kuruma büzülmesi	76
Şekil 4.27. VYPH karışımların kuruma büzülmesi kütle kaybı	76
Şekil 4.28. VYPH karışımları kısıtlanmış rötre	77



FOTOĞRAF VB. MALZEMELER DİZİNİ

Fotoğraf 2.1. Endüstriyel puzolanlar(Engin, 2014).....	31
Fotoğraf 2.2. Mineral katkıların kimyasal kompozisyonu (Engin, 2014)	32
Fotoğraf 2.3. Farklı renklerdeki silis dumanı (Kosmatka vd., 2002).....	33
Fotoğraf 3.4. CEM I 42,5 R Portland çimentosu (a) ve yapay vollastonit (b).....	52
Fotoğraf 3.5. Bilyeli jet değirmen (a), numene haznesi (b) ve yapay vollastonit (c)	53
Fotoğraf 3.6. Süperakışkanlaştırıcı kabı (a), süperakışkanlaştırıcının elektronik terazide tartılması (b) ve karışım suyu(c)	54
Fotoğraf 3.7. Doğal kum (a) ve kırma kum (b).....	55
Fotoğraf 3.8. Karışımda kullanılan malzemeler için kullanılan kaplar (a) ve yapay vollastonitin tartılması (b)	58
Fotoğraf 3.9. Silindirik numunenin sarsma tablasında sıkıştırılması (a) ve mikserle karışım suyu ve süperakışkanlaştırıcının eklenmesi (b)	58
Fotoğraf 3.10. Prizmatik numune kalıpları (a) ve silindirik numune kabı (b)	59
Fotoğraf 3.11. Harç numune kalıplarının 24 saat muhafazaya alınması (a) ve harç numuneleri üzerinin örtülmesi (b)	59
Fotoğraf 3.12. Eğilme deneyi sonucunda elde edilen parçalar (a) ve basınç dayanımın belirlenmesi için deney cihazına yerleştirilen numune parçası (b)	60
Fotoğraf 3.13. Eğilme deneyinde kullanılan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler (a) ve eğilme deneyi cihazı (b)	61
Fotoğraf 3.14. Çentik oluşturulan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler (a), bilgisayara bağlı deney cihazı (b) ve numunenin deney cihazına yerleştirilmesi	63
Fotoğraf 3.15. 160 mm'lik numunede UTS deneyi uygulaması.....	64
Fotoğraf 3.16. Numunelerin konulduğu ortam (a) ve numunedeki çatlakların özel mikroskop ile ölçülmesi (b)	66
Fotoğraf 3.17. 60. günde, SV0' ın çatlak durumu (a) ve SV3' ün çatlak durumu (b)	66

Fotoğraf 3.18. 60. günde, SV6' nin çatlak durumu (a) ve SV9' un çatlak durumu (b)	67
Fotoğraf 3.19. SV12' nin 19. gündeki çatlak durumu (a) ve 60. gündeki çatlak durumu	67

SİMGE VE KISALTMALAR

Simgeler	Açıklama
Al_2O_3	Alüminyum oksit
$CaCO_3$	Kalsiyum karbonat (Kireç taşı)
CaO	Kalsiyum oksit
$Ca(OH)_2$	Kalsiyum hidroksit
$Ca(NO_3)_2$	Kalsiyum nitrat
$CaSiO_3$	Kalsiyum meta silikat (Vollastonit)
C-A(S)-H	Kalsiyum-alüminyum(silika)-hidrat
C-S-H	Kalsiyum-silika-hidrat
CO_2	Karbon dioksit
E	Elastisite Modülü
G_{IC}	kırılma enerjisi
Fe_2O_3	Demir oksit
H_2O	Su
K_2O	Potasyum oksit
K_{IC}	Kırılma Tokluğu
MgO	Magnezyum oksit
Na_2O	Sodyum oksit

NaCl	Sodyum klorür
NaOH	Sodyum hidroksit
Na ₂ SiO ₃	Sodyum silikat
PP	Polipropilen
SiO ₂	Silisyum dioksit
SV	Sentetik Wollastonit
SO ₃	Kükürt trioksit
ZnO	Çinko oksit
cm	Santimetre
mm	Milimetre
nm	Nanometre

μm	Mikrometre
s/b	su/bağlayıcı
s/ç	su/çimento
$\alpha\text{-CaO.SiO}_2$	α -vollastonit
$\beta\text{-CaO.SiO}_2$	β -vollastonit
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece

Kısaltmalar

ABD

ACI

ASTM

RPM 1

SA

SHRP

TS

VYPH

YDB

YPB

YPH

UTS

XFEM

SHPB

KBE

UYPB

Açıklama

Amerika Birleşik Devletleri

Amerikan Beton Enstitüsü

Amerikan Deney ve Malzeme Birliği

Dakika İçerisinde Gerçekleştirilen Dönüş/Devir Sayısı

Süper Akışkanlaştırıcı

Stratejik Otoyol Araştırma Programı

Türk Standartları

Vollastonit Katkılı Yüksek Performanslı Harç

Yüksek Dayanımlı Beton

Yüksek Performanslı Beton

Yüksek Performanslı Harç

Uluslararası Test Cihazı

Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yönetmi

Split Hapkinson Basınç Çubuğu

Kuruma Büzülmesi Engelleyicisi

Ultra Yüksek Performanslı Beton

BÖLÜM I

GİRİŞ

Beton, geçmişten günümüze kadar sürekli kendini yenileyen ve geniş bir kullanım alanına sahip olan önemli bir yapı malzemesidir. Bu malzemenin dış ortam şartlarına ve kimyasal etkilere karşı dayanıklı, uzun ömürlü, üretimi kolay ve ekonomik olmasıdır (Şimşek 1997). Bilindiği üzere betonun mekanik özellikleri oldukça iyi olmasına rağmen çekme mukavemeti zayıftır. Beton taze haldeyken işlenebilirliği kolay, basınç dayanımı yüksek, yangına karşı dayanıklı, donatıyla iyi bir aderans sağlaması ve çeliği korozyona karşı koruması gibi birçok önemli özelliklerinden dolayı yapıyı oluşturan ekonomik bir yapı malzemesidir. Günümüzde yaşam standartının yükselmesi, teknolojik gelişmelerin hızlanması, hizmet ömrü tamamlanmış düzensiz yapı stoğunun dayanıksız yapıların kentsel dönüşüm çalışması bünyesinde yıkılarak bunların yerine yeni yapıların inşa edilme gereksiniminin doğması gibi bazı durumlardan dolayı geleneksel beton yeterli dayanım ve durabilite özelliklerini sağlayamamaktadır. Bundan dolayı yapı sektöründeki araştırmacılar ve bilim insanları farklı beton türleri için bilimsel çalışma yapmaya yönelmişlerdir (Yazıcı, 2017; Binici vd., 2012; Gesoğlud., 2014; Hyeok-Jung vd., 2017; McGinnis vd., 2017; Ulusu vd., 2016). Bu çalışmalar sonucunda geleneksel beton türünden farklı olan Yüksek Performanslı Beton (YPB), mühendislik, durabilite ve mekanik mukavemet özellikleri açısından en önemli beton türlerinden biridir. Bu beton türü geleneksel betondan farklı olarak süperakışkanlaştırıcı ve mineral katkı malzemeleri ikame edilmesi ile tasarlanıp üretilen beton türüdür. Beton ve harçlarda çimento yerine belli oranlarda aktif silis içeriği yüksek olan uçucu kül, yüksek fırın cürufu (YFC), pirinç kabuğu külü, andezit ve mermer tozu, silis dumanı, doğal zeolit, kalker unu, ve cam tozu gibi aktif puzzolanların karışımlarda kullanılmasıyla yüksek dayanım sağlanmakta ve $Ca(OH)_2$ kristallerin oluşumu engellenmiş olmaktadır. Ayrıca, hidrasyon sonucu C-S-H jellerin oluşumu ile betona ek dayanım ve dayanıklılık kazandırmıştır (Sümer ve Söyler, 2002). Çeşitli doğal ve kimyasal mineral katkı türlerin su/çimento oranını düşürmenin dışında hidrasyon ürünlerinin morfolojisi üzerinde ve hidrasyon hızı üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır.

Yüksek dayanımlı beton (YDB) ile yüksek performanslı betonun (YPB) kırılma mekaniğini ve dinamik etkilerini incelemek, yapıların dayanım, durabilite ve

performanslarını bilmek açısından çok önemlidir. Kırılma mekaniği, var olan çentik, çatlak ve boşluk çevresindeki gerilme ve şekil değiştirmeleri inceleyen bir bilim dalıdır. Betonun kırılma parametrelerinin tespit edilmesinde öncelikle betonun nasıl bir malzeme olduğunu bilinmesi gerektirmektedir. Heterojen ve yarı gevrek malzeme özelliğine sahip olan beton, yük altında olmasa bile içerisindeki boşluk ve mikro boşluklar olmasından dolayı lineer elastik özellik gösterir. Kırılma enerjisi ve kırılma tokluğu, reaktörlerde, depreme dayanıklı yapılarda, askeri amaçlı yapılar, çevre ve iklim şartlarında yıpranmaya maruz yapılar gibi maliyeti yüksek yapılarda çok önemli bir yere sahiptir. Bu tür yapılarda çatlakların nerede, nasıl oluştuğu ve çatlağın ne şekilde ilerleyeceğini kırılma mekaniğinin temel inceleme konularındandır. Betona 1960'lı yıllarda Lineer Elastik Kırılma Mekaniğinin (LEKM) uygulanmasına rağmen betonun heterojen ve yarı gevrek bir malzeme olmasından dolayı bu yöntemin uygulanmayacağı görülmüştür ve bu yöntemin yerine Nonlineer Kırılma Mekaniği Modelleri oluşturulmuştur (Akkaya vd., 2003).

Yüksek performanslı beton kalıba yerleştirilirken homojen bir şekilde kalıbı doldurulabilmesi için agrega, çimento ve su dışında, viskoziteyi düzenleyici özellik ve işlenebilirliği sağlayan süper akışkanlaştırıcı gibi kimyasal katkı maddelerinin kullanılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Düşük su/bağlayıcı (0.33) oranı ile tasarlanan YPB'ler, hem performansı artırmak hemde çimento ile yer değiştirilerek kullanıldığında ve çevreye verdikleri zararı ve iklimsel değişim üzerindeki olumsuz etkisini azaltmak amacıyla katkı malzemelerin kullanılması hedeflenmiştir. Bu katkı malzemelerinden birisi de vollastonittir. Vollastonit sahip olduğu iğnemsî morfolojik yapısından dolayı YPB'lerin enerji yutma kapasitesini artıracığı düşünülmektedir.

Verilen bilgiler ışığında bu tez çalışmada yapay vollastonitin yüksek performanslı harçların (YPH) mekanik dayanımı, kırılma parametreleri ve boyutsal stabilite üzerindeki etkilerinin deneysel olarak araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla, ilk aşamada yapay vollastonit minerali literatür çalışması dışında belirlenen yöntemle üretilmiştir. Daha sonra üretilen yapay vollastonit minerali, kontrol karışımı dışında %3, %6, %9 ve %12 oranlarında çimento yerine ikame edilerek yüksek performanslı harç (YPH) üretilmiştir. Üretilen harçların taze haldeki yayılma çapları, sertleşmiş haldeki numuneler üzerinde basınç, eğilme dayanımları ve ultrasonik titreşim hızı değerleri 3., 7., 28. ve 90. günlerde uygulanmıştır. Sertleşmiş harç numunelerin 28. ve 90. günlerde kırılma parametreleri

elde edilmiştir. Boyutsal stabilite için; kuruma büzülmesi ve kısıtlanmış rötre deneyleri ile sertleşmiş harç numunelerin üzerinde meydana gelen atlaklığın yeri, zamanı ve çatlak genişliği 60 gün boyunca özel bir mikroskop ile numune yüzeyleri incelenerek meydana gelen değişimler belirlenmiştir.

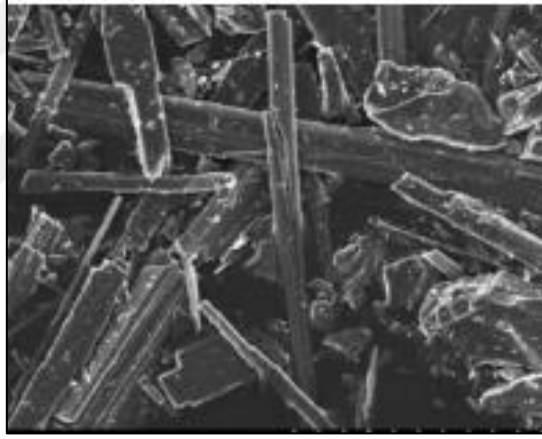


BÖLÜM II

VOLLASTONİT

2.1 Vollaistonitin Tanımı ve Özellikleri

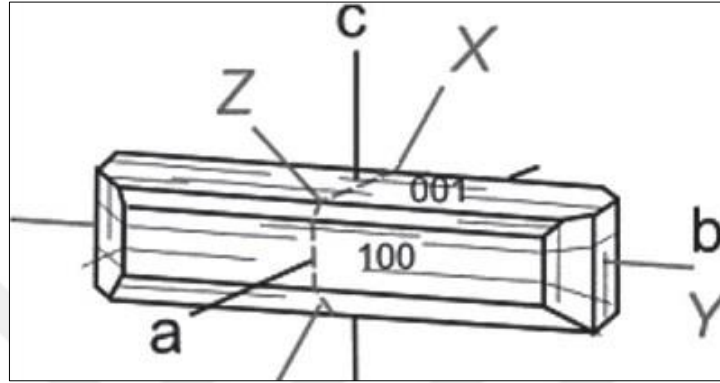
Vollaistonit, teorik bileşimi % 48,5 CaO ve % 51,7 SiO₂' den oluşan bir kalsiyum metasilikattır (CaO.SiO₂ ya da CaSiO₃). İki yönlü mükemmel dilim özelliği ile iğnemi parçacıklardan oluşan saf halde genelde beyaz renkli lifsi görünümde olan doğal bir mineral katkı malzemesidir. Yüksek sıcaklığa dayanıklı, mekanik direnci yüksek, boşlukları doldurucu yapıda, iyi bir yalıtkan ve düşük sıcaklıklarda sinterleşebilme özelliğinde ve genelde kristal boyu tane çapı ile 7-8/1 oranında olan doğal mineral katkı malzemesidir (Güler ve Polat, 2018).



Şekil 2.1. Asiküler wollastonit (Chan vd., 2019)

Bu mineral ismini William Hyde Wollaston'dan almıştır. pH değeri 9.8 olan metalik olmayan bir mineral türü olan vollaistonit minerali kimyasal olarak laboratuvarlarda üretilmektedir (Ciullo, 1996; Kogel vd. 2006). Vollaistonit minerali, 1970' li yıllara kadar dekoratif amaçla kullanılmış, daha sonra Uluslararası Kanser Araştırma Ajansı'nın (IARC) ve Avustralya Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği (NOHSC) tarafından yapılan bilimsel çalışma raporu sonucunda kanserojen etkisi bulunmadığında dolayı endüstriyel mineral ve fiberlerin yerine başarılı bir şekilde kullanılmıştır. 1980'lerden itibaren; plastik, kauçuk, seramik, boya, metalürji gibi çok geniş bir kullanım alanına sahiptir (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Önemli yapısal özelliği itibari ile başta seramik endüstrisi,

plastiklerde ve boya malzemelerinde ve sırlarda ergitici olarak ayrıca termal yalıtkanlarda, elektriksel yalıtkanlarda ve metal ergiticilerde kullanılmaktadır (Ciullo 1996, Dumont 2004, Haner ve Çuhadaroglu 2013, McLemore 2006, Sariiz 1992, Springer 1994, Virta 2001). Şekil 2.2.' de kristal yapısı sunulan vollastonit minerali, ikizler {100} düzlemi birleşim yapısında bulunmaktadır (Kumbasar,1977).



Şekil 2.2. Vollastonit kristali (ICL, 2012)

Özgül ağırlığının 2.8- 3.1 civarında olduğu bilinen bu mineralin Mohr skalasına göre sertliği 4.5- 5.0 arasındadır (Ciullo, 1996; Kalla vd., 2013; Kogel vd., 2006; Ransinchung ve Kumar, 2010; Soliman ve Nehdi, 2013).

2.2 Vollastonit Mineralin Oluşum Durumu

Yerkabuğundaki magma yükselmekte ve bu yükselme aşamasında magma etrafını çevreleyen taşlarla etkileşim halinde olmaktadır. Böylece bu taşlarla reaksiyona girmesiyle etkilenen bir mekanizma meydana gelmektedir. Bu taşların maruz kaldığı değişimlerin en büyük sebebi magmadan gelen yüksek sıcaklıktır. Bu duruma örnek vermek gerekirse, killi şistli kısımlar bünyesinde bulunan suyu kaybeder ve kısmen pişerler, kalker bulunan kısımlar ise değişime uğrayarak mermerleşirler. Magmanın kontak kayaçlarda kimyasal etkileşim ile meydana gelen erimeler sonucunda yeni elementler oluşmaktadır. Meydana gelen yeni elementlerle birlikte marn ve killerden amfibol ve kalkerlerden silikat meydana gelmektedir. Magmanın oluşumu sırasında diğer mineraller üzerinde getirdiği etkiler sonucu kontak metamorfizmayı (değme başkalaşımı) oluşturur. Diğer mineral taşlar; skarn, marn ve killer ise amfibollü kayaçlara dönüşürler. Vollastonitin kristal oluşumu ile ilgili iki tür poliformu açıklamak gerekirse, vollastonitin

düşük sıcaklıkta oluşması ve pseudo-wollastonitin ise yüksek sıcaklık sonucu oluşumudur. Minerolojik kabul esaslarına göre, yüksek sıcaklık oluşumu ile x-wollastonit ($x\text{-CaSiO}_3$), düşük sıcaklık oluşumu ile B-wollastonit (B-CaSiO_3) ile ifade edilmektedir. Çimento endüstrisindeki adlandırmaya göre yüksek sıcaklıkta oluşuma $x\text{-CaSiO}_3$, düşük sıcaklık oluşumlu wollastonite ise B-CaSiO_3 olarak adlandırılmaktadır. Öyle ki, x ve B simgelerinin kullanılmasıyla belirsizlikler meydana getirdiğinden bu simgelerin kullanımından kaçınılması gerekmektedir. Isıl metamorfizma ile kalkerlerin kontaklarında magmatik kayaç ürünü olarak meydana gelen wollastonitin kimyasal formülü aşağıdaki şekilde gösterilmektedir (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013).

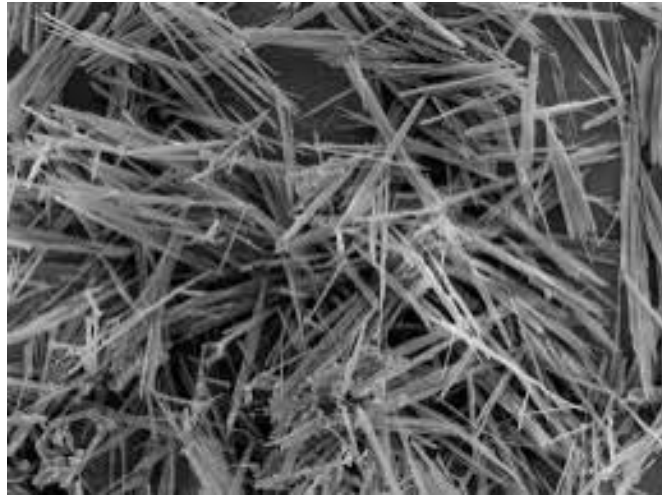


Yukarıda kimyasal formülasyonu gösterilen reaksiyonun gerçekleşebilmesi için sıcaklığın 400 ile 450 °C'ye kadar yükselmesi gerekmektedir. Bu reaksiyon $1 \cdot 10^5$ Pa'lık atmosfer basıncı altında meydana gelmekte ve kalsit veya kuvars eriyiği bitinceye kadar devam etmektedir. Wollastonit minerali ile birlikte oluşan CO_2 bileşiği daha yüksek basınçta oluşması nedeniyle reaksiyonun gerçekleşmesi için yüksek sıcaklık gerekli olmaktadır. Reaksiyonun devamı için CO_2 gazının çatlak ve kırık bölgelere sızma eğilimi basınç azalmasına sebep olmaktadır. Bu basınç düşmesi ile reaksiyon düşük sıcaklıklarda devam edebilmektedir. Fakat basınç yükseldiğinde reaksiyon sıcaklığında ani bir artış gözlenmediği gibi reaksiyon ve kalsit oluşumu beraber gerçekleşmektedir. Wollastoniti oluşturan diğer bir neden ise nadiren de olsa yüksek miktarda karbon içeriği olan ergimiş magmadan wollastonitin direkt olarak kristalleşmesidir. Magmanın alt kabuk ve üst manto olduğu bilinmektedir; ancak magmanın kökeni tartışmalıdır (Andrews, 1970; Fattah, 1994; DPT, 2001; Virta, 2001; Kogel vd., 2006).

2.3 Wollastonitin Mineralojisi, Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Wollastonit minerali, yassı kristal, lifsel dokulu ve dilinimli bir yapıya sahiptir. Çarpık sekizyüzlüsel koordinasyon gösteren kalsiyum (Ca) atomları kimyasal zincirler ile bağlanmaktadır. Wollastonit kristalleri birbirine paralel doğrultuda dizilmiş, genel olarak masif, lifsel topluluklar halindedir (Kumbasar, 1977). Jeolojik olarak bazı kayaç ve mineraller ile birlikte bulunur; kontak metamorfizma ürünü olarak skarn ve granit

zonlarında ve kireçtaşlarında meydana gelmektedir. Kireçtaşlarına silikat, demir ve alüminyum ve manganez dönüşümleri sonucunda skarnlar meydana gelmektedir. Bunun sonucunda silikat yada magmadan veya kireçtaşından kalsitin meydana gelmesi ile vollastonit minerali oluşmaktadır (Kogel vd., 2006; Haner ve Çuhadaroğlu, 2012). Vollastonit minerali aslında kimyasal olarak tepkimeye katılmayan bir maddedir; ancak hidroklorik asit veya güçlü inorganik asitlerde ayrışması ile mümkün olabilmektedir (Kogel vd., 2006). Bireysel parçanın enine boyutu yaklaşık olarak 10-100 µm boyutunda iken uzunluğu ise yaklaşık olarak 0.05- 2.0 mm arasında değişkenlik gösterebilmektedir (Low ve Beaudoin, 1993). Vollastonit minerali yapısından dolayı değirmende kırılma ve öğütme sırasında kendine özgü dilinim özellikleri oluşmaktadır ve bu yapısından dolayı iğnemsisi(iğne uçlu) parçacıklar meydana gelmektedir. Vollastonit minerali kullanılarak elde edilen ürünlere yüksek dayanım özelliği kazandıran bu parçacık morfolojisidir. Boy/çap oranı parçacığın iğnemselliği onların boy/çap oranı ile ifade edilir. Vollastonit düşük boy/çap oranlı (genel olarak 5:1 ya da daha az) ve yüksek boy/çap oranlı (genellikle 12:1 ya da daha çok) olarak kabul edilmektedir. Başka bir ifadeyle, çapları 2.5 µm'den küçük ve 40 µm'den daha büyük aralıklarda olabilmektedir (Kogel vd., 2006). Şekil 2.3.'te vollastonit mineraline ait parçacık morfolojisi görülmektedir.



Şekil 2.3. Vollastonitin mikroskop altındaki görüntüsü (Namwoll, 2020)

Doğada saf halde bulunan vollastonit parlak ve beyaz renktedir ancak saf olarak bulunmadığı durumlarda safsızlıkların tipine ve miktarına göre gri, krem, kahverengi, soluk yeşil ya da kırmızı renklere bulunabilmektedir (Virta, 2001). Ticari alanda kullanılan yapay vollastonit mineralli 0.5–2.0 aralığında kızdırma kaybına ve 85-95%

arasında parlaklık özelliğini genellikle G.E. (General Electric reflectometer) alanında bulunmaktadır. Parlak özelliğin belirlenmesinde Hunter metodu da kullanılmaktadır. Vollaştonit mineralin yüksek sıcaklıkta (1000 °C'ye kadar) ısıtılması ile bünyesinden uzaklaşan uçucu madde miktarı uygulama alanın belirlenmesinde önemli bir özelliktir (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Çizelge 2.1'de vollaştonite ait belli başlı özellikleri aşağıda belirtilen sunulmuştur.

Çizelge 1.1. Vollaştonite ait belli başlı fiziksel özellikler (Anon, 2001; Kogel vd., 2006)

Özgöl Ağırlık	2,8 - 3,01 gr/cm ³
Sertlik (Mohs skalasına göre)	4,5 – 5
Molekül Ağırlığı	116 gr
Kristal Yapısı	İğne yada bıçak şekilli kristal agregolarından oluşan kitleler
Nem içeriği	maksimum % 4
Rengi	Beyaz. Bazen krem, gri ya da uçuk yeşil
Çizgi Rengi	Beyaz
Parlaklığı	İnci gibi camsı
pH	10 – 11
Kırılma indeksi	(a = 1.616 – 1.640), (b = 1.628 – 1.650) ve (g = 1.631 – 1.653)
Ergime Noktası	1540 °C
Pseudovollaştonit(trikilik sistem)	1200 °C (yüksek sıcaklık oluşumu)
Suda Eriyebilirliği	0.0095 gr / 100 ml
Termal Genleşme Katsayısı (mm/mm/°C)	6,5 * 10 ⁻⁶
Ateş Kaybı	0,5 – 2 %

2.4 Vollaştonitin Üretimi

2.4.1 Sentetik vollaştonit üretimi

ABD, Almanya ve Rusya'nın da aralarında olduğu birçok ülke yapay vollaştonit üretimi gerçekleştirmektedir. Üretilen meta silikatlar genellikle su ihtiva emekte olup susuz

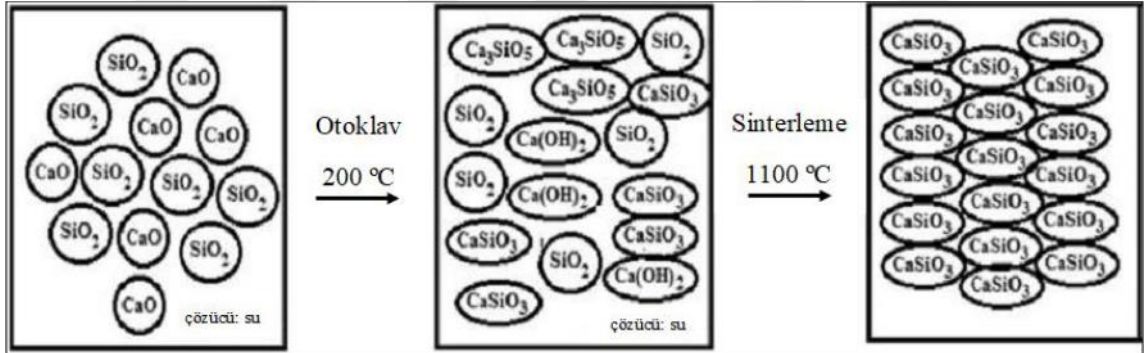
tiplerinin hiç biri doğal vollastonitin kristal yapısında değildir. Danimarka’da tebeşir ve kumdan sentetik vollastonit (kalsiyum metasilikat) üretilmektedir. Üretilmiş olan sentetik vollastonit “Synopal” olarak isimlendirilmiş ve ticari olarak birçok alanda kullanılmaktadır. İlk olarak dolomit ve çamur karışımı halde bulunmakta olan kum ve tebeşir 1560 °C ısıtılması ile kavrulmaktadır. Katılaştıktan sonra tekrar eleme işleminden geçirildikten sonra ikinci defa 1250 °C sıcaklıkta tekrar kavrulur. Bu çalışma sonucunda %50 vollastonit içeren beyaz renkli bir malzeme elde edilir. Bu elde edilen beyaz renkli malzeme “Wollanita” diye adlandırılır ve Danimarka’dakine yakın bir metod ile tebeşir, silis kumu ve dolomit malzemeleri kullanılmasıyla üretimi yapılmaktadır. Bu şekilde elde edilen ve “Wollanita” olarak adlandırılan malzeme yol kaplaması ve seramik alanında genişçe 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 iğnemsiz kristal yapı dikkate alındığında sentetik vollastonitin iğnemsiz kristal yapısı doğal vollastonitinkine kadar iyi olmayabilir.

Sentetik vollastonit üretiminde üç farklı türde metod bulunmaktadır. Bunlardan birincisi Islak metottur. Bu metod ile yüksek boy: çap oranına sahip vollastonit üretimi 200 °C’den daha düşük sıcaklık ve yüksek basınç uygulanarak karışım uygun bir kap içinde eritilerek vollastonit üretilmektedir. İkincisi, Katı Hal Reaksiyon metodu; bu yöntemde 800 °C’den daha yüksek sıcaklıkta silikanın kalsiyum oksit veya kalsiyum karbonat ile reaksiyona girmesi ile oluşur. Bu yöntemde iğnemsiz kristal yapı oluşmaz daha çok atıl durumda olan kalsit, silis dumanı, mermer tozu ve silisyum içerikli doğal mineralleri faydalı hale getirir (Zhu, 2013). Son olarak üçüncü yöntem ise Sıvı Faz Reaksiyon Metotudur. Bu metod ile yüksek boy: çap oranına sahip vollastonit üretilbildiğinden kullanımı daha yaygın metotlardan biridir. 1400°C üzerinde sıcaklıkta iğnemsiz kristal yapıya sahip vollastonit üretilir. Ancak yüksek sıcaklığa dayanıklı platin kablarn kullanılması gerekmektedir. %50 SiO₂ + %30 CaO + %20 ZnO ya da %55 SiO₂ + %26 CaO + %13 ZnO + %2 MgO + %13 Al₂O₃ karışımları platin kaplar içerisinde eritilerek iğnemsiz(lifli) kristal yapıda ve çekme yoluyla 1 mm çapında çubuklar elde edilir. Böylece iğnemsiz formda vollastonit üretimi gerçekleşir (Zhu, 2013). Vollastonit kristal yapısı ile ilgili görsel Şekil 2.4’ te sunulmuştur.

Yücel ve Özcan (2019) tarafında yapılan bir çalışmada, kalsit (CaCO_3) ve kuvars (SiO_2) minerali kullanılarak sentetik vollastonit (SW) üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen sentetik vollastonit minerallin YPH'lar üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Göktaş ve Erdemoğlu (2014) tarafından yapılan çalışmada, aşırı öğütme koşuluyla mekanik olarak aktifleştirilmiş atık mermer sanayi toz atıkları ve kuvars tozu karışımları kullanılarak yapay vollastonit (CaSiO_3) üretimi yapılmıştır. Mermer tozu ve kuvars tozu aşırı öğütme sonundaki davranışlarının gözlemlenmek üzere, bilyeli jet değirmen kullanılarak tek başına ve karışım halinde öğütme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Boldyrev (2004) göre, aşırı öğütme metalürjik süreç öncesi uygulanmış olan ön çalışma işlemi ile malzeme inceliği arttıkça yeni tane yüzeyleri oluşmakta, malzeme yarı- kararlı bir duruma geçmekte ve mekanik aktivasyon ve reaktifliğinde artış meydana gelmektedir.

Yapay kalsiyum silikat yapımında kullanılan çeşitli oranlarda karıştırılmış Afyon İsehisah Mermer kalkınma Kooperatifi'nin (Afyon- Türkiye) atık havuzundan temin edilen beyaz mermer tozu numuneleri kurutularak ve Eczacıbaşı- ESAN' dan temin edilen kuru haldeki endüstriyel kuvars tozu örneği kullanılmıştır (Göktaş, 2013).



Şekil 2.4. Vollastonitin kristal yapısındaki değişim

2.5 Vollastonitin kullanım alanları

Vollastonit dünya çapında endüstriyel öneme sahiptir. Bu mineralin birçok kullanım alanı bulunmaktadır; seramik (frits, sıhhi tesisat ve fayans), sürtünme ürünleri (öncelikle fren balataları), metalürjik uygulamalar (akı ve saç kremi), boya (mimari ve endüstriyel boyalar), plastik ve kauçuk pazarları (termoplastik ve termoset reçineler ve elastomer bileşikleri) ve çeşitli kullanımlar (yapıştırıcılar, beton, cam ve sızdırmazlık ürünleri dahil)

gibi geniş kullanım alanlarına sahiptir (Curry, 2019). Plastik ve kauçuk uygulamalarının 2009 yılında ABD satışlarının % 25 ile % 35'ini oluşturduğu ve bunu % 20 ile % 25 ile seramik izlediği; boya, % 10 ile % 15; metalurjik uygulamaları, % 10 ile % 15; sürtünme ürünleri, % 10 ile % 15 ve çeşitli, % 10 ile % 15 seramik uygulama alanları bulunmaktadır. Muhtemelen dünya genelinde vollastonit satışlarının % 30 ile % 40'ını, ardından satışların % 30 ile % 35' ini oluşturan polimerler (plastik ve kauçuk) ve satışların % 10 ile % 15' ini oluşturmaktadır. Geriye kalan satışlar inşaat, sürtünme ürünleri ve metalurjik uygulamalar içindir (wikipedia, 2020).

Bunlarla birlikte çeşitli alanlardaki uygulamaları; plastik (% 37), seramik (% 28), metalurjik uygulamalar (% 10), boya (% 10), sürtünme ürünleri (% 9) ve diğer yerlerde (% 6) kullanılmaktadır (Virta, 2003). Vollastonit mineralinin kullanımı birçok ülkelerdeki özgü kullanım uygulamaları bulunmaktadır. Örneğin, Çin'de vollastonit, diğer uygulamaların yanı sıra kaliteli kâğıt hamuru üretiminde kullanılmaktadır (Anony-Mous, 2003). Kurutma işleminden sonra ince tane boyutunda öğütülme işlemine tabi tutulur ve bu işlem sonucunda numunelerin % 51-53 SiO₂, % 43-45 CaO, % 0.5 Al₂O₃, % 0.2 Fe₂O₃, % 0.3 MgO içeren -50+200 mesh büyüklüğünde olacak şekilde ambalajlanarak paketlenir (MTA, 2020).

2.5.1 Seramik sanayi

Seramik sanayisinde kullanımının faydalı olacağı düşünülen kalsiyum meta silikat olan mineral vollastonittir (Göktaş ve Erdemoğlu, 2012). Seramiklerde kullanılması 1993 yılında yaklaşık 150.000 ton seviyesine ulaşılmıştır. Seramik üretiminde ve seramik mamulün belirli özelliklerinin iyileştirmesinde ve düzenlenmesinde vollastonit minerali tüketilmektedir. Bu mineral katkı kullanılmasıyla sıhhi tesisat ve çini malzemelerde; çatlamayı, kırılmayı, sıkıştırmayı engelleyerek ısı genleşmesi önüne geçilmektedir. Vollastonit minerali sayesinde seramiklerde kuruma hızlanır, nemlilik azalır ve yüksek dayanımlı olmasını sağlanmaktadır. Vollastonit, nemlilik kaynaklı genişlemeleri en az seviyeye indirirken, ayrıca kurumayı hızlandırır, aynı zamanda kuruma süreci kısa olduğunda yakıtta tasarruf sağlanmaktadır (DPT, 2001). Bu tüketim oranı dünya vollastonit üretiminin % 42'sine tekabül etmektedir. Seramik sektöründe vollastonit en fazla duvar ve yer karosu bünyelerinde ve sırlarında, az miktarda da sağlık gereçleri, toprak ürünleri ve özel uygulamalarda kullanılmaktadır (IARC, 1997). Seramiklerde, vollastonit

ateşleme sırasında büzülme ve gaz oluşumunu düşürür, ateşleme gücünü artırır, ateş sırasında parlaklığı korur, hızlı ateş etmeyi sağlar, ev delme, çatlama ve sır kusurlarını azaltır. İçinde metalurjik uygulamalar, vollastonit kaynak için bir akı, kalsiyum oksit için bir kaynak, bir cüruf koşullandırıcı ve çeliğin sürekli dökümü sırasında erimiş metalin yüzeyini korumaktadır (Curry, 2019).

Vollastonit, pişmemiş karoların nem çıkışına yardımcı olur, dolayısıyla nem genişlemesi tekrarlanmasını azaltır ve böylece ürün deformasyondan kurtulur ve yüksek darbe direnci karşı kırılmayı azaltmaktadır. Vollastonit mineralinin CO₂ yayılımının çok düşük (% 1'in altında) olmasıyla çevre ve iklim üzerinden olumsuz etkisinin azaltılmış olmasıyla ile geleneksel bünye mineral ile kıyaslandığında çok avantajlıdır. Ayrıca gaz içeriğinin düşük olması ile sırların yüzeyindeki beneklerin (pinhol) azalmasını ve düşük sinterleme sıcaklığı (991 – 1196 °C) ergime esnasında kabarmayı azaltır. İğnemsî yapısı sayesinde, pişirilmemiş kil bünyelerini, yüksek hızlı presleme tekniğinde dayanıklılık, ürüne beyazlık, parlaklık ve kaplama malzemelerin yüzeylerinde iyi bir akustik özellik sağlamaktadır. Düşük ısıl genleşme katsayısına sahiptir. Bu özelliği, bünyesindeki diğer minerallerin çoğu zaman neden olduğu küçülmeyi önlemektedir. Böylece vollastonitin seramikler üzerinde birçok kimyasal ve minerolojik yönden birçok olumlu katkısı bulunmaktadır (Springer, 1994). 2000 yılında verilmiş bir patentte, vollastonitin kurutulmuş haldeki sağlık gereçlerinde darbe direncini %40'dan daha fazla artırdığı vifrikasyon sıcaklığını düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır (Kogel vd., 2006; Robinson ve Craing, 2000).

2.5.2 Plastik sanayi

Büyük bir pazara sahip olan plastik sanayisi, vollastonit mineralinin en fazla uygulama alanı bulduğu sanayi kollarından bir tanesidir (Degryse ve Elsen, 2003). Özellikle plastik dolgu sektöründe yoğun şekilde kullanılmaktadır. Vollastonitin üretimi tamamlanmış malzemelerin özelliklerini iyileştirme noktasında gösterdiği performans bu sektördeki yerini sağlamlaştırmıştır. Vollastonitin 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). Vollastonit mineralinin ilavesiyle birlikte çok yüksek kalitede dolgu malzemeleri üretilmektedir. Vollastonit dolgu malzemelerine yüksek parlaklık kazandırmasının

yanında bu ürünlerin çekme, çarpma ve eğilme özelliklerinin de gelişmesine katkı sağlamakta ve beyazlık vermektedir. Ayrıca vollastonit aşınma direncini ve kaymayan zemin döşemelerinde sürtünmeyi artıran bir mineral katkı malzemesidir. Yapay vollastonit plastik sanayisinde daha çok kullanılan mineral katkı malzemesidir. Plastik ve kauçuklarında daha az su emilimi, ısındığında yumuşamayan sertleşen, nemlilik genişlemesini optimuma indirger, kurumayı hızlandırır, karbonat dolgu malzemelerine kıyasla lekenlenmeye karşı daha etkili ve astara ısı ile yumuşayan düşük viskoziteye sahip, düşük dielektrik özellik göstermesinden dolayı plastik alanında katkı olarak kullanılmaktadır. Plastiklerde dolgu katkı maddesi olarak %95 vollastonit kullanılmakla birlikte parlaticı özelliği ile %90 oranında kullanılmaktadır. Doğal vollastonit suni kösele (poliüretan), lastik, sakız ve değişik kauçukların üretiminde kullanılmaktadır (MTA, 2020).

2.5.3 Boya ve kaplama sanayi

Vollastonit ilk defa Amerika Birleşik Devletleri'nde 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 gözlemlenmiştir (IARC, 1997). Vollastonit minerali saf halde beyaz renkte olması, düşük yağ emilimine sahip oluşu, yüksek pH(9.8) değerlerinde kararlı bir davranış sergilemesi ve iyi derecede ıslatma kabiliyeti gibi özelliklere sahip olmasından dolayı, renk, akışkanlık ve küf direnci gibi özelliklerin sağlanması gereken kaplamalarda özellikle tercih edilmektedir. Ayrıca son yıllarda, dış cephede kullanılan boyalarda ve lateksler ile yol işaretleme boyalarında katkı ve dolgu malzemesi olarak kullanıldığı görülmektedir (IARC, 1997). Seramik endüstrisinden sonra en çok boya ve kaplama alanında kullanılmaktadır. Vollastonitin çubuksu ve düşük yağ emilimi özelliğinden dolayı genellikle binalarda yapı malzemesi olarak boya ve kaplamalarda, beyaz ve renkli boyaların elde edilmesinde, astar, yağlı ve emsiyon boyalarda kullanılmaktadır. Küflenmeye karşı dayanıklı olmakla birlikte asidik ortamlar için uygundur (MTA, 2020). Dolgu malzemesi olarak kullanılan bu mineral, beyaz renk ve boyaya parlaklık katması sayesinde solgun boyalara açık parlak renk kazandıran bir katkı olarak göze çarpmaktadır. Vollastonitin boya kullanımında bir diğer avantajı ise kuvvetli bazik özelliği sayesinde iyi bir metal astar boyası bileşeni olarak kullanılmasını sağlamasıdır.

Polivinil asetat boyalarında asetik asit zamanla ayrışır ancak vollastonit takviyesiyle asitli ortamlarda boyayı korur ve stabilize etmektedir. Vollastonit katkılı dış cephe boyaları, kendi kendini temizleme özelliğine sahip olmakla beraber vollastonitin sahip olduğu özel tane yapısı sayesinde olumsuz hava şartlarında boya direncini artırır (Andrews, 1970; Fattah, 1994; Springer, 1994).

2.5.4 Diğer sanayi uygulamaları

Vollastonit minerali yukarıda anlatılan sanayi kolları dışında daha birçok sanayi kolunda katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Örneğin; düşük sıcaklıkların erimesiyle sac imalinde ve diğer döküm işlerinde kullanılan değerli mineral katkı malzemesidir. Beton boru dökümünde, sağlık arasında riskli olan asbest yerine kullanılmaktadır. Yine düşük miktarlarda cam ve fiberglas endüstrisinde, kireçtaşı ve silika yerine kullanılmasıyla enerji tüketimini azaltmak için kullanılmaktadır. Ayrıca tüm bunlara ilaveten, aşındırıcılarda, kaynak elektrotlarında, toprak şartlandırıcı ve bitki gübresi olarak, kâğıtta dolgu malzemesi olarak ve yol malzemesi olarak da kullanım alanı bulmaktadır. En son kullanım alanlarından bir diğeri ise sentetik kemik implantlarıdır. Kemik implantlarında ve özellikle diş protezlerinde yaygın bir şekilde kullanımı bulunmaktadır (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013). Vollastonit ayrıca inşaat döşeme ve duvar kaplamalarında, ateşe dayanıklı mamul imalinde, yapışkanlarda, sulayıcılarda, abrazif disk imalinde ve elektrik izolatörlerinde kullanılır (MTA, 2020).

2.6 Vollastonit Rezervleri

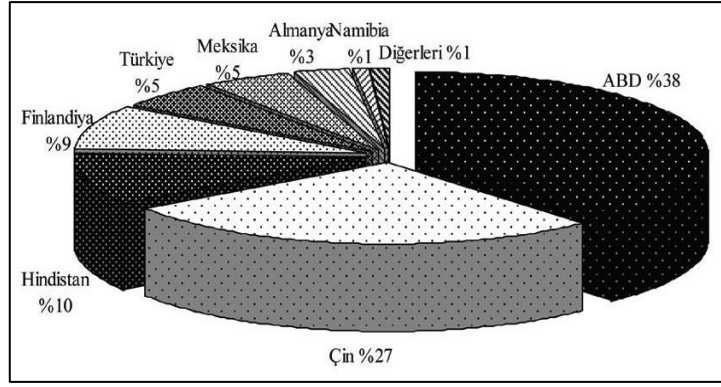
2.6.1 Dünyada vollastonit rezervleri

Vollastonit mineralinin dünyada yıllık ortalama üretim miktarı 500.000-600.000 ton aralığında olduğu bilinmektedir. Ayrıca birçok kendine özgü özellikleri olan vollastonit mineralinin kullanım alanı gün geçtikçe genişlemektedir (Kogel vd., 2006). Vollastonit üretimi Ağustos 2019'a kadar yeni konutların inşası ile birlikte 2018 yılına göre biraz azalma görülmüştür. Vollastonitin inşaat; yapııştırıcılar, çimento levha, seramik karo, boyalar, sıva ve duvar kaplaması gibi pazar alanındaki kullanımı azalmıştır. Vollastonitin kullanıldığı büyük pazarların çoğunu demir ve çelik oluşturmaktadır. Sürtünme ürünlerinde ve plastiklerde vollastonit içeren motorlu taşıt ve parçaların üretimi ve

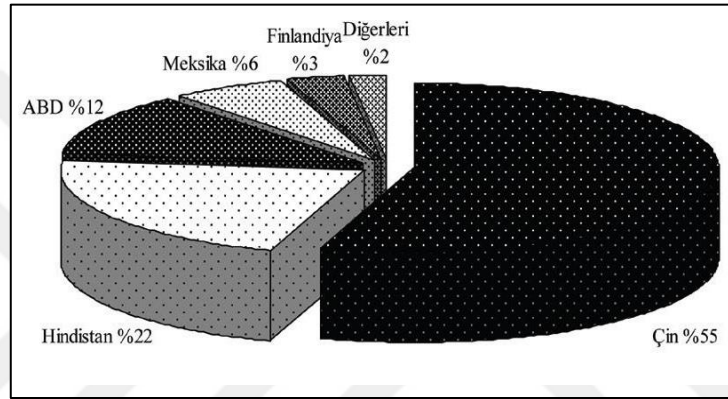
kauçuk bileşenler azaltılmış; plastik üretimi azalmış; kauçuk üretimi azalmış; ancak birincil demir ve çelik ürünleri artmıştır. Küresel olarak, seramikler, polimerler (plastik ve kauçuk gibi), boya ve kaplamaların birçoğunun üretiminde wollastonit kullanılmaktadır. Diğer alanlarda az miktarda wollastonit; çeşitli inşaat ürünleri, sürtünme malzemeleri, metalürjik uygulamaları ve kâğıt üretiminde kullanılmaktadır. Dünyada wollastonit satışlarının 850.000 ila 900.000 ton aralığında olduğu tahmin edilmektedir. En çok üretiminin Amerika Birleşik Devletlerinde olduğu düşünülmektedir, ikinci sırada Çin yer almasıyla birlikte, birçok yatak tetkik edilemediğinden dolayı günümüzde wollastonit mineralinin toplam rezerv miktarı hakkında kesin bilgi bulunamamaktadır (Curry, 2019). Şekil 2.5 ve Şekil 2.6 incelendiğinde, 1990 yılına göre kullanım alanı ve tüketim miktarında hızlı bir artış gözlenen wollastonit mineralinin 2010 yılındaki üretimi yaklaşık olarak %48 oranında bir artış göstermiştir (Virta, 2011). Dünyadaki wollastonit rezervleri 100 milyondan fazladır; ancak henüz doğru rezerv tahminleri yapılmadan araştırılmıştır. Büyük wollastonit yatakları başta Çin, Finlandiya, Hindistan, Meksika ve Amerika Birleşik Devletleri'dir. Daha küçük ancak önemli miktarda üretim yapan diğer ülkeler ise; Kanada, Şili, Kenya, Namibya, Güney Afrika, İspanya, Sudan, Tacikistan, Türkiye ve Özbekistan'dır. Wollastonit yatakların konumu Şekil 2.7' de sunulmuştur. 2016 yılında Çin, 1.10 milyon ton üretim ile wollastonit 0.15 milyon tonla Hindistan ve 0.05'e sahip ABD milyon ton diğer büyük üreticilerdir. Ülke çapında 2015-2017 yıllarında wollastonit üretimi Çizelge 2.2' de sunulmuştur (India Minerals Yearbook, 2019).

Çizelge 2.2. Dünyada wollastonit üretiminin ton bazında yıllara göre dağılımı (India Minerals Yearbook, 2019)

Ülkeler	2015	2016	2017
Çin	1000000	1100000	1100000
Finlandiya	10000	10000	10.000
Hindistan	175348	166186	153049
Meksika	57451	63683	87562
İspanya	17700	13553	19135
ABD	70000	60000	50000
Avustralya	2428	1797	1749



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



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



Şekil 2.7. Başlıca wollastonit üretilen yatakların konumu (Haner ve Çuhadaroğlu, 2013)

2.6.2 Türkiye'deki vollastonit rezervleri

Türkiye vollastonit minerali yönünden kaliteli vollastonit yataklarına sahip ülkelerden birisidir. Maden Tetkik Arama (MTA) Genel Müdürlüğü kayıtlarında yer alan verilere göre Türkiye'de yılda yaklaşık 500-1000 ton vollastonit minerali girişi olmaktadır. Ülkemiz Kırşehir- Kaman ilçesinde kalsit+vollastonit rezervi yaklaşık 800.000 ton civarında olduğu düşünülmektedir. Bununla birlikte Yozgat ilinde Kale ilçesinde kurulacak endüstriyel seramik üretimi için kalsit+vollastonit rezervlerinin bulunma ihtimalinin de olabileceği düşünülmektedir (DPT, 2019). Bununla birlikte, Bursa ve Çanakkale illerinde muhtemel rezerv alanları sırasıyla 1.078.600 ve 500.000 ton civarında olduğu düşünülmektedir (DPT, 2001). Ayrıca, ülkemizde mermer atık tozlarının seramik kaplaması üretiminin hammaddesi olabileceği bünyesinde kalsiyum silikat(vollastonit) mineralini bulundurması ile yapay vollastonit üretiminde kullanılabilmesi düşünülmektedir (Güler ve Polat 2018). Ülkemizde bu konuda araştırmalar hız kazanacağı bilinmektedir, ancak işletilmeyen vollastonit rezervlerine yönelik çalışmalar hız kazanacaktır. Özellikle son on beş yılda endüstriyel alanda çok geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Vollastonit yatakları hakkında detaylı bir çalışma olmadığından ekonomikliği ve kullanılabilir olması konusunda kesin bir bilgi elde edilememektedir. Bundan dolayı küçük üretici olarak ülkemizde vollastonit üretimi yapan kuruluşlar bulunmaktadır (Kogel vd., 2006). Yukarıda anlatılan rezervler ve üretimler dışında vollastonit bileşenleri açısından kalsit (CaCO_3) ve silis (SiO_2) kaynakları ülkemizde yaygın olarak bulunmaktadır. Bu sayede bu bileşenler kullanılarak sentetik vollastonit üretimi yapılabilmektedir.

2.7 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). Özcan, (2017) tarafında sentetik vollastonit üretildikten sonra %3, %6, %9, %12 ve %15 oranında üretilen 5 farklı harç karışımı üzerinde yapılan deneysel çalışmada harçların

mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür. %9 oranda vollastonit kullanıldığında en yüksek eğilme ve basınç değeri elde edilmiştir. 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 seviyelerinde 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'e kadar mikro silika kullanılmasıyla, mikro yapının gelişmesi ve gözenek boşluğundaki azalmadan dolayı, betonun su sızdırmazlığını 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 etmişlerdir. Kalla vd. (2013), yapılan çalışmada da vollastonit ve uçucu kül içeren beton karışımlarına uygulanan deneylerde vollastonit mineralinin betonun basınç dayanımını arttırdığı, su geçirimsizliğini ve klor iyonu geçirimsizliğini ise azalttığı görülmüştür.

2.8 Yüksek Performanslı Beton

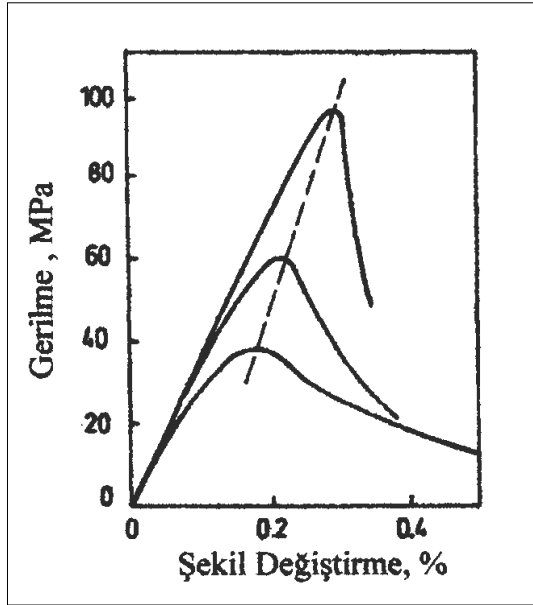
2.8.1 Yüksek Performanslı Betonun Tanımı

Beton inşaat sektöründe yol, hava alanı, köprü, baraj, tünel, galeri ve savunma yapıları gibi birçok altyapı ve üstyapı alanında kullanılmakta ve modern tesislerde üretimi oldukça hızlı gerçekleşen ve malzemelerin temini kullanıcılar tarafında kolay elde edilebilen, dayanım ve dayanıklılık özellikleri sağlayan yıllardır yapı sektöründeki yerini muhafaza eden ve sürekli bir gelişim içinde olan ekonomik ve mühendislik açısından çok önemli bir yapı malzemesidir (Binici vd., 2012; Hyeok-Jung vd., 2017; Ulusu vd., 2016). Fakat geleneksel betonun durabilite ve mukavemeti bakımından kendisinden beklenen performansı yetersiz olduğundan yapı sektöründe kullanım alanını sınırlamaktadır. Bu sebeple hem mukavemeti hem de durabilitesi oldukça yüksek değerlere ulaşan, üstün performans özelliğine sahip bulunan Yüksek Performanslı Beton (YPB) gibi özel beton çeşitleri geliştirilmiştir (Taşdemir vd., 2003). YDB ile YPB kavramları birbirine yakın gibi görünse de farklı durumları tanımlamaktadırlar. Yüksek dayanımlı betonda(YDB) amaçlanan performans kriteri basınç dayanımıdır. Dolayısıyla yüksek performanslı beton basınç dayanımından ötedir. Yüksek performanslı beton (YPB) ise; sünme, rötne, elastisite modülü, yangına karşı direnç, yüksek erken dayanım, tokluk, aşınma direnci vb birçok performansa göre tasarımı yapılan betondur. Bazı yönetmeliklere göre yüksek performanslı beton dayanım sınırları Çizelge 2.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3. Bazı Yönetmeliklere Göre Yüksek Performanslı Beton Dayanım Sınırları (Pul, 1999)

Yönetmelik	En Küçük Basınç Dayanımı(MPa)	En Büyük Basınç Dayanımı(MPa)	Numune Tipi
TS 500	50	-	Ø = 150 mm, h=300 mm silindir
ACI 318-89	62-69	100	Ø = 150 mm, h=300 mm silindir
CEB-FIP (MC90)	60	80	Ø = 150 mm, h=300 mm silindir
DIN 1045	55	115	a=150 mm küp
BS 8110	60	110	a=150 mm küp

Beton teknolojisinde son zamanlarda çok önemli gelişmeler kaydedilmiştir. Yüksek Dayanımlı ve/veya Kendiliğinden Yerleşen Beton kullanmanın ekonomik ve ergonomik avantajlarının belirlenmesi amacıyla birçok çalışma yürütülmektedir (Akçagözoglu, 2001). Sadece 30 yıl önce betonarme yapılarda kullanılan betonun basınç mukavemeti en fazla 40 MPa idi (Alexander, 1993). Böyle bir beton, küp basınç dayanımları 200-800 MPa arasında, çekme dayanımları 25-150 MPa arasında ve kırılma enerjileri ise yaklaşık 30000 J/m² olan yüksek performanslı modern betonlarla kıyaslandığında, şu anda gerçekten oldukça düşük dayanımlı malzeme olarak kabul edilebilmektedir (Walraven, 1999). Yüksek dayanımlı betonlarda gerilme düşüşü eksenel şekil değiştirme kapasiteleri artmakta ve tepe noktası geçildikten sonra gerilme düşüşü ani olmakta ve daha gevrek kırılmaktadır. Şekil 2.8' de elastisite modülündeki bağıl artışın basınç dayanımındaki bağıl artıştan daha az olduğunu da göstermektedir. Yüksek dayanımlı betonlar için, en yüksek gerilmeye kadar yutulan bağıl enerji daha düşük dayanımlı betonlarınkinden düşüktür. Bu durum aşağıda açıklanmaktadır (Taşdemir vd., 1998).



Şekil 2.8. Tek eksenli basınç altında normal ve yüksek dayanımlı betonlarda gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Taşdemir ve Bayramov, 2002)

Bugün dünya koşullarında, inşaat sektöründe büyük ilerlemeler ve gelişmeler meydana gelmiştir. İnşaat sektörü alanında bu ilerleyiş ve gelişmeler betonun üretim yöntemlerinin geliştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Betondaki gelişmeler sonucunda Yüksek Performanslı Beton (YPB) kavramı ortaya çıkmıştır. YPB dayanım ve dayanıklılık özellikleri ile birlikte basınç ve eğilme gibi durabilite ve mekanik özellikleriyle üstün performans sağlayan özel bir beton olan Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) türüdür (Taşdemir vd., 2003).

Betonlar dayanımlarına göre sınıflandırıldıklarında normal, yüksek dayanımlı ve ultra yüksek dayanımlı olarak üzere üç gruba ayrılmaktadır. Dayanımı C50/60 ve aşağısı normal dayanımlı, C50/60 üzeri yüksek dayanımlı ve 150 N/mm² ve yukarı olan ultra yüksek dayanımlı beton olarak tanımlanmaktadır.

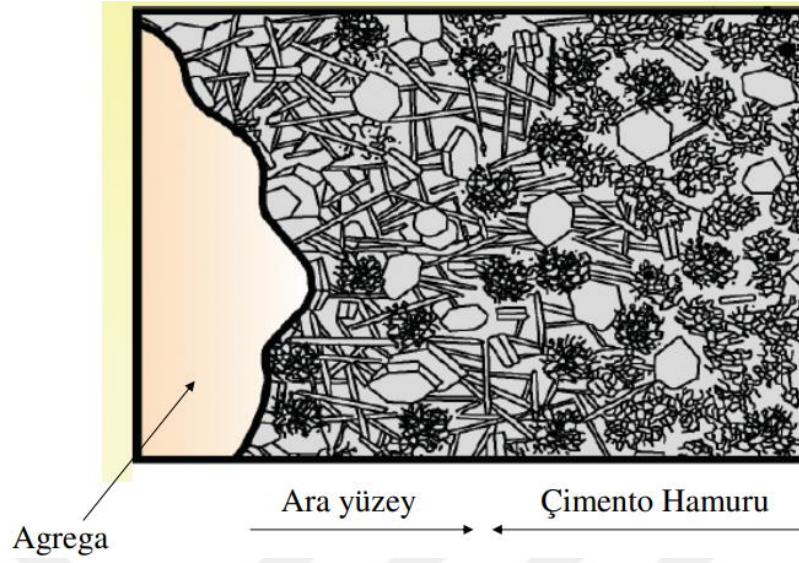
2.8.2 Yüksek Performanslı Betonun Özellikleri

Yüksek Performanslı Beton (YPB) dayanımını etkileyen birçok farklı karakteristik malzeme özelliği bulunmaktadır. Beton üretiminde kullanılan ve dayanımda çok önemli rol oynayan malzemelerin; çimento cinsine, agrega tane çapına, mineral katkı oranına, akışkanlaştırıcı türüne ve miktarına, karışım suyuna, agrega-çimento taneleri arasındaki

etkileşime ve çimento taneleri arasındaki boşluk yapısına bağlıdır. Aynı zamanda bu malzemelerin birbirleriyle olan etkileşiminde bağlıdır. Belirli sınır değerleri içerisinde kalmak koşuluyla maksimum agrega tane çapı küçültülerek ve su/çimento (s/ç) oranı düşürülerek YPB'nin dayanımında iyileştirme sağlanmış olur. Beton yapısında var olan ve kolay kırılma özelliği gösteren $\text{Ca}(\text{OH})_2$ kristallerin oluşmasını önlemek için; betona süperakışkanlaştırıcı ilave edilerek su/çimento (s/ç) oranını düşürülerek ve uçucu kül veya silis dumanı gibi aktif puzzolanlar kullanılarak önlenmiş olur ve böylece yüksek performanslı beton temeli oluşturulmuş olur. Beton içerisindeki çimento hamurundaki boşluk oranı ve agrega ile çimento hamuru arasındaki bağ kuvvetleri arasındaki etkileşime bağlı olarak dayanım üzerinde değişim gösterebilmektedir. Yüksek dayanımın yanı sıra yüksek durabilite ve düşük porozite ile tanımlanan malzemedir. Geleneksel betondan farklı olarak içerisindeki su/çimento oranı düşük ve yeni nesil süperakışkanlaştırıcı, ince agrega, silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, cam tozu vb. malzemelerde yüksek performanslı betonda kullanılan diğer bazı katkı malzemelerindedir (Sümer ve Söyler, 2002). Agrega ile çimento hamuru temas yüzeyi güçlendirilerek yüksek basınç dayanımı ve enerji yutma kapasitesi yüksek geçirimsiz bir beton elde edilir. Yüksek performanslı betonun tanımı, zamanla, kullanılan bölge ve üretim şartlarına göre farklılık gösterebilmektedir. Sonuç itibariyle yüksek performanslı beton durabilite koşulundan ödün vermeden, su/bağlayıcı oranı maksimum 0,35 olan, minimum 400 kg/m^3 çimento dozajı ile istenen dayanım özelliklerini sağlayan beton olarak tanımlanabilmektedir (Taşdemir vd., 2003).

Yüksek dayanımlı beton, içerisinde kullanılan esas malzemelerin aynı kalması koşuluyla yeni nesil süperakışkanlaştırıcı eklenerek, su/çimento oranını 0,20 dolayında düşürülerek ve ince malzeme oranı artırılarak az boşluklu bir yapı ve yüksek dayanım elde edilmektedir. Yüksek katlı binalardaki artışa bağlı olarak yapılan araştırma ve geliştirmeler sonucunda sürekli kendini yenileyen ve geliştiren beton teknolojisinin basınç dayanımının 100 MPa değerlerine ulaşıldığı ve bununla birlikte işlenebilirlik ve durabilite özelliklerini muhaza edildiği özel bir beton türüdür (Sümer ve Söyler, 2002). Şekil 2.9.' da görüldüğü gibi çimento hamurunun bir süre sonra hidrate olmasıyla özellikle arayüzeydeki boşluklar azalır ve betonun yük altındaki oluşması muhtemel mikroçatlaklar kontrol altına alınarak mukavemeti sağlanır. Aynı zamanda arayüzeyin kuvvetlendirilmesiyle agreganın mukavemeti ve elastik özellik önem kazanmaktadır. Betondaki bağlayıcı optimizasyonu sağlamak için silis dumanı gibi çok ince taneler

kullanılmakta ve maksimum doluluk elde edilmeye çalışılmaktadır (Yazıcı vd., 2016).



Şekil 2.9. Arayüzey- Geçiş Bölgesi (Yazıcı vd., 2016)

2.8.3 Yüksek Performanslı Betonun Kullanım Alanları

Dünyada YPB ile yapımı tamamlanmış ve yapılması muhtemel birçok yapının tasarımının yanı sıra kullanılan betonun erken yüksek dayanım, işlenebilme, kesme dayanımı, zamana bağlı şekil değiştirme, aşınma ve çarpma, donma ve çözülme direnci gibi özelliklerin çok iyi sağlanmış olması gerekmektedir. Yapı alanında kullanılan bu beton türü eskiye nazaran daha dayanıklı yapıların inşa edilmesinde ve inşaat sektörünün ihtiyacına cevap verebilecek düzeyde her geçen gün gelişmeye devam etmekte ve birçok alanda kullanılmaktadır. Çevresel etkilere karşı uzun dayanıklılık gerektiren yapılarda, nükleer yapılar, özel temeller, kanalizasyon yapıları, tüneller, petrol projeleri, deniz yapıları, köprüler, prefabrikasyon elemanlar, beton-çelik kompozit yapılar, aşınmaya dayanıklı yol betonları, ön germeli beton elemanlar, kabloları aderanslı öngerilmeli profiller, endüstriyel döşemeler, düzlemde yüksek basınca maruz plaka, baraj boşaltma kanalları, kemerler vb. yapılar yüksek beton dayanımına gerektiren önemli yapılardır. Sonuç itibarıyla YPB oldukça geniş bir kullanım alanına sahiptir (Ali vd., 2016; Sümer ve Söyler, 2002). Bununla birlikte YPB, yüksek basınç dayanımı gerektiren yapılarda kullanım açısından büyük avantajlar sunmaktadır. Örneğin, Amerika'daki Trump World Tower, Çin'deki Central Plaza, Tayvan'daki Taipei 101, Bahreyn'deki Burj Al Khalifa gibi dünyanın en yüksek ve en dayanıklı yapılarında kullanılan "Yüksek Dayanımlı C80

Beton” Türkiye’de ilk kez 2014 yılında Spine Tower’ da kullanılmıştır. Gün geçtikçe gelişen, sanayileşen ve kalabalıklaşan günümüz kentlerinde artan kimyasal ve çevre şartlarına karşı daha etkili ve yapı ömrünü uzatmada büyük avantaj sağlamaktadır. Özellikle kolon – döşeme ve döşeme perde gibi önemli bağlantı noktalarında yük transferi için yüksek dayanımlı beton deprem dayanıklılığını artırmaktadır. Özellikle eksenel yük altında çalışan bir yapı elemanı olan kolonlarda, YPB kullanımı kolon boyutlarını daha küçük tasarlamaya el vermekte böylece yapı içerisindeki kullanışlı alanlar artmakta ve toplam yapı ağırlığıda azalmaktadır (Rashid vd., 2002). Bu beton türü ekonomik olmaması ile birlikte ABD, Kanada, Japonya, Fransa ve İskandinav ülkelerin birçok önemli yapı alanın inşasında kullanılmıştır (Aitcin, 1998; Akman, 2003).

2.8.4 Yüksek Performanslı Beton Kullanımının Avantajları ve Dezavantajları

- YPB’lerin bir çok avantajlı özelliği bulunmaktadır, bunlar; yüksek dayanım, yüksek erken dayanım, yüksek elastisite modülü, yüksek dayanıklılık, uzun servis ömrü, donma-çözülme direnci, tokluk ve darbe direnci, yüksek aşınma direnci, boyutsal stabilite, kolay yerleşebilirlik ve ayrışma direncidir (Yazıcı vd., 2016).
- Su/çimento oranı azalınca çimento taneleri birbirine yaklaşır, kapiler boşluk oranı düşer ve sistemde daha az su olduğu için CSH oluşumu için iyon konsantrasyonu kısa sürede artmaktadır. Az boşluklu CSH çimento taneleri arasında köprü oluşturur, bu nedenle su/çimento oranı düşünce dayanım kazanma hızı da artar (Yazıcı vd., 2016). Çimento partikülleri birbirlerine yakın ve iyi bağlı oldukları için su hareketi azalır CSH daha iyi gelişir.
- YPB, üretiminde kullanılan süperakışkanlaştırıcı sayesinde düşük su/çimento oranına ve yüksek işlenebilirlik ve dayanıma sahip olmaktadır.
- YPB’ler gevrek bir davranış gösterirler. Bundan dolayı beton içerisine donatı konulmasıyla sünek bir davranış sağlamak mümkündür (Sümer ve Söyler, 2002).
- Düşük s/b oranı ve az boşluklu olması sayesinde sahip olduğu geçirimsiz yapısı YPB’ nin dayanıklılığını artırmaktadır. Aynı zamanda geçirimsizlik yapısı sayesinde donma- çözünme direnci ve aşınma direnci de yüksektir (Akman, 2003).

- YBP'ler genellikle düşük s/ç oranı sayesinde erken dayanım, daha erken kalıp sökme ve yapı elemanlarında daha hızlı kullanım potansiyeli sağlamaktadır (Okamura and Ouchi 2004).
- YPB'lerin alkali-agrega reaksiyonu karşı üstün özellik göstermekte, karbonatlaşmanın oranın geleneksel betona oranla çok düşük seviyelerde kaldığı ve kullanılan silis dumanı ile elektrik iletkenliğinin azaldığı ve dolayısıyla da donatı korozyonunu azalttığı göstermiştir (Larrard ve Malier, 1991).
- Yüksek performanslı betonun geleneksel betona göre gevrek kırılması en önemli dezavantajlarından birisidir. Bu sakınca betonarme yapılarda sargı donatısı kullanılarak kısmen giderilmiştir.
- Filler gibi çok ince taneli malzemeler beton ve harç dayanımında çok önemli iyileştirmeler sağlamakta ve çimento hamuru ve agreda arayüzeyini geliştirdiği yapılan çalışmalar sonucunda belirtilmiştir. Betonda kullanılan silis dumanı su gereksinimini artırmakla birlikte akışkanlığı olumlu yönde etkilemektedir. Başlangıçtaki yüksek hidratasyon reaktivitesi, hem hidratasyon ısısını hem de toplam rötrenin artmasına neden olmaktadır (Rao, 2001; Mazloom et al., 2004; Al-Amoudi et al., 2006; Jo et al., 2007; Kadri et al., 2009).
- Son on yılda yapılan birçok bilimsel araştırma sonucunda çimentonun hidratasyonuna katılmayan, ancak taze betonun reolojisi açısından gerekli fazla suyun dayanım ve dayanıklılık üzerindeki olumsuz etkilerinin olduğunu göstermiştir (Sümer ve Söyler, 2002).
- YPB'nin durabilite özelliklerini olumsuz etkileyen en önemli faktörlerden bir taneside rötredir. Bu bildiğimiz klasik rötreden farklı olan otojen rötredir. Kimyasal (bünyesel) rötre ile içsel kuruma rötresi sonucu otojen rötre oluşmaktadır. Hidratasyon için gerekli olan suyun kılcal borucuklardan emilmesi sonucu çekme gerilmelerin artması ve hidratasyonun başlangıç değerlerinden çok büyük değerlere ulaşması sonucu oluşan rötredir. Bununla birlikte iç hidratlar tüm boşlukları doldurmasıyla geçirimsiz hale gelir. Her ne kadar beton üretimden itibaren 24 saat su kürene tabi tutulsa da bu rötreyi engelleyemez ve su kürenden bile büzülür ve çatlama meydana gelebilir (Akman, 2000; Akman, 2003).

- Yüksek dayanımlı beton normal betona göre daha gevrektr bundan dolayı kırılması ani olmaktadır. Ayrıca su- çimento oranını belli bir değır altına düşürüldükten sonra beton işlenebilirliğinde problemler ortaya çıkmakta ve yüksek katlara beton pompalanamamaktadır. Bu durumda YPB beton elde edebilmek ve işlenebilirliği de sağlayabilmek için geleneksel betona kıyasla çok fazla oranda akışkanlaştırıcı ve priz geciktirici malzemeler kullanmayı zorunlu kılmaktadır. Böylece kimyasal malzemeler kullanılmadan yüksek dayanımlı beton elde etmek pek mümkün olmamaktadır (Fırat ve Ağca, 2012).
- Betonarme yapılarda kullanılan geleneksel beton ve Ultra yüksek performanslı betonların kullanıldığı eğilme etkisinde betonarme yapı elemanların davranışlarında ve donatı sınır değırlerinde oldukça yüksek değırler elde edildiğı görülmüştür. Fakat basınç ve sargı donatı oranı vb. parametrelerin süneklilik değırı yönetmelikte tasarım değırleri geleneksel betonarme için geçerli iken Ultra yüksek performanslı betonarme için geçerli olmamaktadır (Bırol ve Yavaş, 2018).
- Yüksek performanslı betonların yangına karşı dayanıklılıkları tartışılmıştır. Geleneksel betonarmede su/çimento oranı yüksek olmasından dolayı beton yapıda boşluk kaldığında suyun hareketi bu boşluklardan sağlanmakta ve belli bir oranda yangına karşı korumaktadır. Yüksek Performanslı betonda su/çimento oranı 0.30' ların altında olduğundan dolayı donatıyı yangına karşı koruma özelliğı geçerli olmamaktadır (Akman, 2003; Noumowe vd., 1996).

2.8.5 Yüksek Performanslı Beton İçeriğinde Kullanılan Malzemeler

Yüksek performans beton ve/veya yüksek dayanımlı beton süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkıların gelişmeleri ile birlikte betonların vazgeçilmez bir bileşeni haline gelen silis dumanı, uçucu kül, nano silika yüksek fırın ve cürufu metakaolin gibi ekonomik değırı önemli olan malzemeler haline gelmiştir (Yeğınobalı, 2002). Dünyada özellikle yüksek dayanımlı beton üretimi için bağlayıcı rolü üstlenen silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin gibi malzemelerin kullanımı giderek artmaktadır. Puzolanik özellikteki bu malzemler kalsiyum hidroksitle sulu ortamda birleştğinde hidrolik bağlayıcılık özelliğı göstermektedir (Erdoğan, 2007). Puzolanik maddelerin kullanılması ile birlikte hidrasyon ısısı düşmekte, çimento hamuru ve agrega arasında oluşan kılcal boşluklar azalmakta ve bunun sonucunda çimento hamuru ile agrega arasındaki aderansın

artmasını sağlayarak beton dayanımında artış sağlamaktadır ve betonda çatlak oluşmasını engellemektedir (Fırat ve Ağca, 2012).

YPB tasarımı ve üretimi normal beton üretiminden farklı daha karışık ve zaman alan bir süreçtir. YPB'nin dayanımı yalnız su/çimento oranına bağlı olarak değişmez normal betondan farklı olarak birçok değişik kimyasal ve mineral katkı malzemesi ilave edilmesiyle sağlanmaktadır. YPB'nin üretiminde yüksek dozajda çimento oranının yanında agregasında yüksek dayanımlı olduğu ve bununla birlikte kimyasal katkı malzemesi olarak istenilen işlenebilirliği sağlamak için; süperakışkanlaştırıcılar, 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 kullanılmasıyla elde edilmektedir (Ali vd., 2016; Henkensiefken vd., 2009a; Henkensiefken vd., 2009b; Sabet vd., 2013).

2.8.5.1 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 ısıveren bir reaksiyon başlar ve bu reaksiyon sonucu oluşan çimento hamuru zamanla sertleşerek dayanım kazanan bir yapı kazanır. 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 kullanarak bu dayanıma ulaşılması gerekmektedir (Sümer ve Söyler, 2002).

2.8.5.2 Beton karışım suyu

TS EN 206' ya göre karma suyu TS EN 1008'e uygun olmalıdır. Beton karışım suyunun temel olarak iki temel işlevi vardı. Birincisi, beton karışım suyu hidratasyon adı verilen kimyasal reaksiyonu oluşmasını başlatmakta ve beton bünyesindeki boşluk yapısını belirleyerek betonun dayanım ve dayanıklılığını sağlamaktadır. İkincisi ise agrega ile çimento hamurunun birbirine yapışması için gerekli olan işlenebilirlik suyudur. Kimyasal reaksiyon için gerekli su miktarı, betonun işlenebilirliği için yetersizdir. Bu sebeple karışım suyu olarak kullanılan su miktarı, hidratasyon için gerekli su miktarı üzerinde olmaktadır (Erdoğan, 1995). İçilebilir özellikteki her su kullanılmakla beraber diğer sularında ön deneyler yapılarak kaliteli beton üretiminde kullanılabilir. İşlenebilirlik suyu betona zarar verebilecek her türlü fiziksel ve kimyasal maddelerden arındırılmış olmasıdır (Şimşek, 2007). Beton karışım suyuna ait görsel Şekil 2.10' da sunulmuştur.



Şekil 2.10. Beton karma suyu

2.8.5.3 Agrega

Yapı betonlarında 63 mm' yi ve doğal ve yapay malzemelerde 100 mm' yi geçmeyen dane büyüklüğünde olan kırılmış veya kırılmamış organik olmayan doğal veya yapay malzemedan oluşan bir yığındır (Erdoğan, 1995; TSE 706, 2 1980). Tüm mühendislik yapılarında betonun ana malzemesi olan agregalar genellikle betonun % 60- % 80' ini meydana getirmektedir (Baradan, 2004). Yüksek performanslı kaliteli bir beton elde etmek için kullanılacak agreganın aşağıdaki bazı özelliklere sahip olması gerekmektedir (Şimşek, 2003).

- Agregalar suyun etkisiyle yumuşayıp dağılmayacaktır.
- Aşınmaya karşı dirençli, standartlara ve kullanım amacına uygun boyutta ve tane büyüklüğü sahip olmalıdır.
- Betona zarar verebilecek silt ve kil gibi yabancı maddeler agrega yapısında bulundurmamalıdır.
- Kırma taş agrega düşük su/çimento oranında bir miktar su emme özelliğine sahip olmalıdır.
- Agregalar çimento bileşenleriyle zararlı bileşikler meydana getirmeyen özelliklere sahip olup, korozyona karşı donatıyı korumalıdır.

Beton basınç dayanımında kırma taş agrega kullanılması durumunda doğal agregaya göre beton mukavemetinde %30-35 daha yüksek basınç dayanımlar elde edildiği kanıtlanmıştır (Sümer ve Söyler, 2002). Agrega tanelerin şekli çok önemlidir çünkü taze betonun işlenebilirlik özelliğini, fiziksel ve kimyasal özellikleri ve su ihtiyacı gibi birçok özelliğini etkilemektedir. Beton içerisindeki agregaların %50' den fazla kusur içermemelidir. Bu sebeple seçilecek agregalar betonun özelliklerini olumsuz yönde etkilemeyecek şekilde yüzeyi temiz olmalı yapısında organik madde ve kil, silt vb. ince maddeler yapısında bulunmamalıdır (Topçu vd., 2006).

2.8.5.4 Süper Akışkanlaştırıcı Katkılar

Günümüzde geniş kullanım alanına sahip olan yeni nesil süper akışkanlaştırıcılardan en çok naftalin ve melamin esaslı olanlar kullanılmaktadır. Betona hem yüksek oranda işlenebilirliği sağlamakta hem de su kesme özelliği kazandırır ve uzun süre akışkanlığını kaybetmeden, ayrışmadan ve titreşim gerektirmeden yerleşebilen betonlar elde etme imkânı sağlamaktadır (Çavdar ve Sağlam, 1998). Sualtı betonlarında artan kayma eşiği ve viskoziteyi kendi ağırlığı altında su/çimento oranını arttırmadan akışkanlığını arttırmak yani kayma eşiğini düşürmek için kullanılmaktadır (Sonebi ve Khayat, 2001). Süper akışkanlaştırıcı katkıları kimyasal yapılarına göre 3 gruba ayrılabilir.

1. Modifiye linyosülfonatlar,

2. Sodyum naftalen (veya melamin) sülfonat-formaldehit polikondanseleri (NFS veya (MSF) ve
3. Karboksilat (veya hidroksi karboksilat) tuzları (Yıldırım vd., 2003).

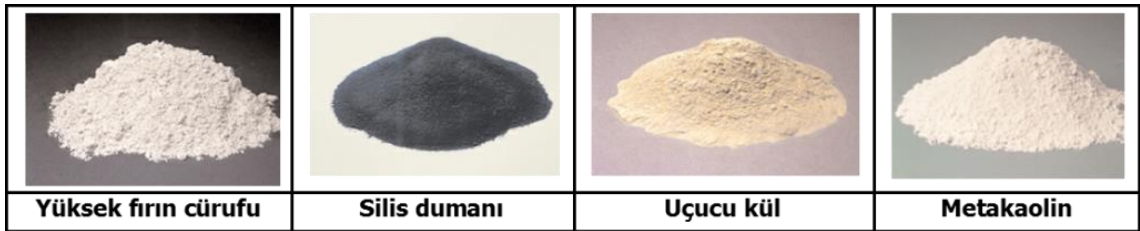
Birinci grup sülfonatlı naftalin formaldehit (SNF) veya sülfonatlı melamin formaldehit (SMF) bileşiklerinden oluşur. İkinci grup ise polikarbonat grubu olarak adlandırılır. Bunlar polikarboksilat polimerler ve poliakrilatlardan meydana gelir. Üçüncü grup akışkanlaştırıcılar, kimyasal yapılarında farklı anodik ve kutupsal fonksiyon grubuna örnek olabilir (Doğan, 2000). Süperakışkanlaştırıcılar, ısıl çatlaklar oluşmadan sünme ve büzülme problemlerini azaltmaktadır ve mineral katkıların su içinde topaklanmayı önlemektedir. Bununla birlikte betonun işlenebilirliği artmakta donatının sık olduğu bölgelerde kolay bir yerleşme ve iyi kompasite sağlamaktadır (Sümer ve Söyler, 2002).

2.8.6 Mineral katkılar

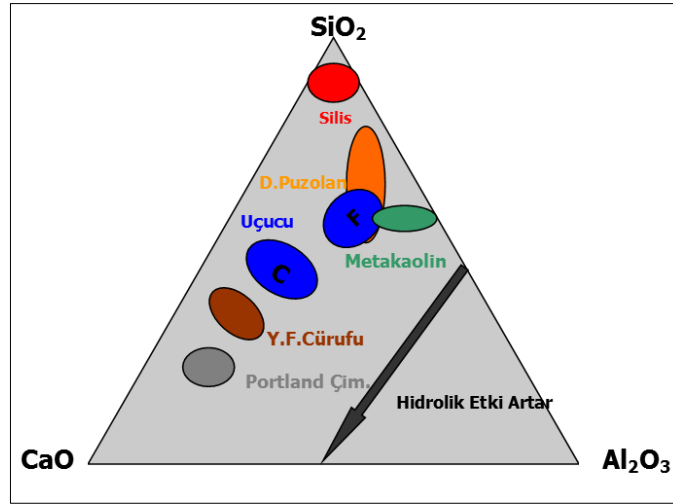
Mineral katkılar, betona özel nitelik kazandırmak, betonun durabilite ve dayanım özelliklerini geliştirmek, beton performansını artırmak, fiziksel ve kimyasal özelliklerini geliştirmek için kullanılan ince bir şekilde öğütülmüş olarak üretilen aktif silis içeriği yüksek olan mineral malzemelerdir. Mineral katkıların kimyasal kompozisyonu Şekil 2.11' de ve endüstriyel mineral katkı malzemeleri Fotoğraf 2.1.'de sunulmuştur. Bu katkıların kullanılmasıyla birlikte çimento üretiminden kaynaklı havaya salınan karbondioksit gazı (CO₂) emisyonunu azaltmak ve doğal kaynakların tüketilmesini azaltmak ve betonun ekonomik olmasını sağlamak için mineral katkılar kullanılır. Örneğin, Ceylan ve Dayraz, (2019) tarafında yapılan çalışmada andezit tozunun uçucu küller gibi betonda mineral katkı olarak kullanılabileceği araştırmışlardır. Bu araştırma sonucunda, beton içerisine andezit tozu farklı çimento dozajlarda yer değiştirilerek karışımlar hazırlanmış 28. ve 90. günlerde test edilmiştir. C40/50 dayanım sınıfı için, %10 oranında andezit tozu kullanıldığında C40/50 betonunda yaklaşık 20 kg, tasarruf sağlandığı görülmüştür. Diğer beton sınıfları için, C55/67 betonunda kullanıldığında 46 kg ve C70/85 betonunda kullanıldığında 52 kg çimento tasarrufu olacağını yapılan çalışma sonucunda belirtilmişlerdir. Böylece andezit tozunun uçucu küller gibi mineral katkı olarak betonda kullanılabileceği görülmüştür.

Son yıllarda beton ve harçlarda birçok mineral katkı malzemesi kullanılmıştır. Mineral katkılardan aktif silis içeriği yüksek olanlar çimento ve su ile reaksiyonları sırasından hidrasyon sonucu oluşan C-S-H jelleri betona ek dayanım ve dayanıklılık sağlamaktadır. Bundan dolayı aktif silis içeriği yüksek olan uçucu külle, yüksek fırın cürufu (YFC), pirinç kabuğu külü, andezit ve mermer tozu, silis dumanı, doğal zeolit, kalker unu, cam tozu gibi aktif puzolanlar kullanılmasıyla Ca(OH)_2 kristallerin oluşmasının önlenmesi beton ve harç üretimde yüksek dayanım kazandırmaktadır (Sümer ve Söyler, 2002). Betonda, Yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi aktif silis içeriği yüksek olan bu bağlayıcıların çimento yerine kullanılması durumunda CO_2 emisyonundan kaynaklı oluşan olumsuz çevre faktörlerinin %39 oranında azaltılabileceği yapılan çalışmada belirtmişlerdir (Blankendaal vd., 2014).

Günümüzde betonda en çok kullanılan bağlayıcı özellikteki portland çimentosundan dolayı dünyaya yayılan CO_2 gazı salınımı yaklaşık %8'ini bulmaktadır (Andrew, 2018). Hem ekonomik değildir hemde çevresel ve iklim değişikliği üzerinden olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu sebeple çevresel ve olumsuz etkileri en aza indirmek ve aynı zamanda betonda durabilite ve dayanım özelliklerini geliştirmek için çimentoya yakın özellikler gösteren uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu mineral katkı malzemeleri kullanılmaktadır (Duan vd., 2013).



Fotoğraf 2.1. Endüstriyel puzolanlar(Engin, 2014)



Fotoğraf 2.2. Mineral katkıların kimyasal kompozisyonu (Engin, 2014)

2.8.6.1 Silis dumanı

Silis dumanı, %80-85 oranında amorf yapıda bulunan, silis metal ve ferrosilis alaşım üretiminde sonucu yan ürün olarak ortaya çıkan ve SiO_2 içermekte olan bir katkı malzemesidir. Silis dumanı ile ilgili görsel Fotoğraf 2.2’ de sunulmuştur. Beton ve çimento üretiminde kullanımına uygun olan mikro-dolgu vazifesi gören yüksek derecelerde puzolanik özellikte bulunan mineral katkı malzemesidir (Malhotra, vd., 1986; Giner, vd., 2011). Diğer mineral katkı malzemelerle karşılaştırıldığında, belirgin yüzey alanına sahip ve puzolanik aktivitesi yüksek olmasından dolayı betonun dayanımı üzerinde iyileştirici özellikte olacağı düşünülmektedir. Yüksek dayanımlı beton ve yüksek performanslı beton üretiminde çok önemli bir yere sahiptir. (Senff vd., 2012; Yazıcı vd., 2010; Wang vd., 2017). Silis dumanı içeren bir beton karışımı çalışmasında %6 ve %12 silis dumanı kullanılmış ve daha sonra klor içeren bir ortamda elektriksel dirençlere karşı artışta bulunması ve kimyasal ortamlarda kullanılabilmesini gözlemlemişlerdir (Dotto vd., 2004; Müller, 2004). Bir çalışmada silis dumanının çimento yerine %5 oranında kullanılması ile betonda erken dayanım sağladığı, ancak 180 günlük basınç dayanımları incelendiğinde betondaki silis dumanı ikame edilmesinin basınç dayanımını azalttığını gözlemlemişlerdir (Pala vd., 2007). Betondaki basınç dayanımına neden olan silis dumanının topraklanması ve bu nedenle bağlayıcı özelliğın zayıflamasından kaynaklandığı (Pedro vd., 2017; Zhang vd, 2016a; Zhang vd.2016b; Yan, 2016). Bununla birlikte betonda, silis dumanının %4 ile %5 oranında kullanıldığında

hidratasyona uğramasına ve %5' den daha yüksek miktarda kullanıldığında ise hidratasyona olayına girmediğinin belirtmişlerdir (Bhattacharya ve Harish, 2018). Diğer bir çalışmada betonda kullanılan agreganın cinsine, çimentonun tipine silis dumanı kullanım miktarına ve oluşturulan karışımın kür süresine bağlı olarak silis dumanın beton basınç dayanımında %30 oranında artış görüldüğü ve buna bağlı olarak betonun çekme ve eğilme dayanımında da artış görüldüğünü tespit etmişlerdir. Bununla birlikte silis dumanın betonda kimyasal ataklara karşı ve korozyona karşı direncinin iyi olduğu, büzülme, sünme, geçirgenliği ve ısıl genleşmeyi azalttığını belirtilmişlerdir (Panjehpour vd., 2011; Chung, 2002).

Yüksek performanslı beton ve yüksek dayanımlı betonda silis dumanı boşlukları doldurucu ve tamamlayıcı özellikte olduğunda beton üretiminde kullanılabilir. ACI komitesi (ACI Committee 234, 1987), raporunda kullanım sınırlarına bağlı olarak 28 günlük beton basınç dayanımların 100 MPa değerine ulaşıldığı görülmüştür. Yüksek dayanımlı beton üretiminde hem basınç dayanımında artış sağladığı hem de betonda doldurucu özellikte tamamlayıcı bir malzeme olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan bir çalışmada %8 oranında daha fazla silis dumanı betonda kullanıldığında geçirimsizliğin azalmadığı görülmüştür. Bu sebeple betonda %8 oranından daha fazla silis dumanının kullanılarak betonun durabilitesinin sağlanabileceğini incelemişlerdir (Song vd., 2010). Silis dumanının betonda %2, %4, %6, %8 ve %10 oranlarında kullanımını araştırılmış ve betonun pH değerinin %8 oranında silis dumanı kullanıldığı zaman azalmadığı ve %8' den daha fazla silis dumanı kullanıldığı zaman ise klor bağlama kapasitesine etki edilmediğini göstermişlerdir (Muralidharan vd., 2008).



Fotoğraf 2.3. Farklı renklerdeki silis dumanı (Kosmatka vd., 2002)

2.8.6.2 Uçucu kül

Uçucu kül, taş kömürü veya linyit kömürün termik santrallerde yakılması sonucu ortaya çıkan camsı, küçük, oyuk yapılı, tane boyutu 0,01-200 µm aralığında, çimento inceliğinde ve yoğunluğu 2,1 ile 2,6 g/cm³ arasında değişen, yuvarlak şekilli, gri renkli ve bacalarda elektro-filtreler aracılığıyla tutulan atık maddelerdir. Uçucu kül, görsel olarak Fotoğraf 2.1' de sunulmuştur.

Aydın ve Yazıcı, (2007) tarafından yapılan bir çalışmada beton karışımında çimento yerine %30'dan fazla uçucu kül kullanıldığında uzun bir süre sonra betonun performans dayanımında önemli derecede azalmaların meydana geldiğini söylemişlerdir. Niş, (2019) tarafından yapılan bir çalışmada uçucu küllü betonun yapısında CaO miktarının düşük olması sayesinde kontrol betonununa göre kimyasal etkilere karşı dirençli olmasını sağlamıştır. Uçucu külün beton performansı üzerinde etkisi değerlendirildiğinde aynı orandaki su/çimento kullanılması durumunda dayanım ve durabilite açısından önemli derecede etkisinin olduğunu göstermişlerdir. Yapılan başka bir çalışmada ise, uçucu kül beton karışımında çimento yerine %15, %25, %33, %42, %50 ve %58 oranlarında kullanılmış olup daha sonra yapılan basınç dayanımı deneylerinde uçucu kül yaklaşık %40'a kadar kullanıldığında basınç dayanımında artış sağlandığı, daha yüksek oranda kullanıldığında ise basınç dayanımında azalmaların olduğunu belirlemişlerdir. Beton yapılar, özellikle yeraltı ve deniz suyu altında inşa edilen yapılar, sodyum sülfat ve magnezyum sülfat riski altındadır. Beton ve harçta çimento karışımlarında uçucu kül ve silis dumanı çimento ile yer değiştirilerek kullanıldığında ve uçucu küllü betonların sülfatlara karşı direnci üzerinde daha etkili olduğunu göstermişlerdir (Sinsiri ve Teeramit, 2005). Portland çimentosu, dünyada inşaat endüstrisinde hızla gelişme gösteren beton ve harç yapımında her yıl tonlarca üretimi olan bir yapı malzemesidir. Üretimi sırasında karbondioksit (CO₂) oluşumu nedeniyle doğal kaynakların azalmasına, küresel ısınma, çevre ve iklim değişimi üzerinde olumsuz etkisi bulunmaktadır. Bu nedenle CO₂ emisyonunu azaltılarak bertaraf etmek için çimento yerine alternatif malzemeler üzerine araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalardan biride kömür santralin bir yan ürünü olan ve endüstriyel bir atık uçucu külün kısmi olarak çimento ile yer değiştirilerek betonda kullanılmışlardır. Uçucu kül betonda uzun zamandır yaygın olarak kullanılmasına

rağmen, önceki çalışmalar kullanılan uçucu külün kaynağına ve özelliklerine bağlı olarak sonuçları değişmektedir. Wankhede ve Fulari, (2014) tarafında yapılan bir çalışmada % 10 ve % 20 uçucu kül içeren betonun basınç dayanımı artırdığı, %30 oranında uçucu kül betonda kullanıldığında ise basınç dayanımında azalma olduğunu göstermişlerdir. Bansal ve ark, (2015) göre betonda % 20 ve % 30 oranında uçucu kül içeren betonun basınç dayanımının normal betonudan yaklaşık %11 ve %19 daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Li ve Zhao, (2003) %25 uçucu kül ve %15 granül yüksek fırın cürufu kombinasyonu içeren beton karışımının özellikleri incelendiğinde betonun hem kısa hem de uzun vadeli özelliklerini geliştirmiştir. Betonun işlenebilirliğini sağlandığını ve sülfatlara karşı dirençli olduğunu göstermişlerdir. Uçucu külün puzolanik özelliğinden dolayı çimento yerine genelde %30'u oranında kullanıldığında betonun geçirimsizliğini azalttığını belirtmişlerdir. Betonda uçucu kül mineralinin kullanılmasıyla birlikte çimento, ince agrega ve su tüketiminde bir miktar azalma sağlar. Bununla birlikte betonun geçirimsizliğini ve ısısal genişmesini azaltırken aynı zamanda işlenebilirliğini kolaylaştır ve daha kompakt bir beton oluşmasını sağlamaktadır (Dinakar vd., 2008; Ukwattage vd., 2013; Wang vd., 2017).

ACI 211'e (2005) göre, yüksek dayanımlı betonlarda uçucu külün çimento yerine %15 ile %25' i arasında kullanılması tavsiye edilmektedir. Uçucu külün %30-%40 oranlarında kullanımı betonun basınç dayanımı 180.güne kadar arttırdığı belirtilmiş ve aynı betonun klorür difüzyonu %100 çimento içeren betona göre önemli miktarda azalmıştır (Siddique, 2003). Başka bir çalışmada ise uçucu küllü betonlarda porozitenin erken yaşlarda arttığını fakat ortalama gözenek çapının azalmasından dolayı (uçucu külün çimentodan ince olması) uçucu küllü betonların geçirimsizliğinin daha az olduğu belirtilmiştir (Torii ve Kawamura, 1995).

Uçucu kül, çimento hidratasyon ürünü olan $Ca(OH)_2$ ile tepkimeye girmesi sonucunda C-S-H jelinin oluşumunu sağlamakla birlikte betonun durabilitesi üzerinden olumsuz etkisi bulunan $Ca(OH)_2$ miktarının azalması sağlayarak betonda faydalı olmaktadır. Bu sebeple uçucu kül gibi mineral katkıların kullanılmasındaki en önemli etkenlerden biridir. Bununla birlikte, ultra ince uçucu kül içeren betonun silis dumanı içeren betona nazaran otojen büzülmesinde önemli miktarda engellediği ve betonun büzülme çatlama karşı daha dirençli olduğunu, ayrıca plastik rötre çatlak oluşumunu engellediğini belirtmişlerdir (Haque ve Kayalı, 1998; Hossain vd., 2007; Subramaniam vd., 2005; Xie vd., 2002).

Tulga ve Kılınç, (2018) tarafından yapılan çalışmada uçucu kül kullanarak 4 farklı dayanım sınıfında beton karışımı üretilmiştir. Her bir beton sınıfı için kontrol betonu, uçucu kül içeren beton ve uçucu kül içermeyen beton üretilmiştir. %20 oranında uçucu kül, çimento yerine kullanılmış olup, numuneler 3., 7., 28. ve 56. günlerin sonunda basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Betonlarda uçucu kül kullanımı 3, 7 ve 56 günlük basınç dayanımları kontrol numunesine oranla artırmış, fakat 28 günlük basınç dayanımında düşüş görüldüğünü gözlemlemişlerdir.

2.8.6.3 Yüksek fırın cürufu

Yüksek fırın cürufu (YFC), demir-çelik tesislerindeki yüksek fırınlarda demir üretimi esnasında açığa çıkan eriyik halde bulunan bir yan üründür. Bu atık ürünün öğütülmesi için aniden soğutulmuş granüle hale getirilmesi gerekmektedir. Bu öğütülen malzeme çimentoya ilave edilip kullanıldığı gibi betonada ayreten eklenip kullanılabilir. Yüksek fırın cürufu (YFC) ait görsel Fotoğraf 2.1' de sunulmuştur. Douglas vd. (1987) tarafından yapılan bir çalışmada yüksek fırın cürufu kullanılarak üretilen betonların çimento kullanımına nazaran daha ekonomik olduğu ve aynı zamanda betonun işlenebilirliğini, dayanım ve durabilite gibi özelliklerini geliştirdiğini ifade etmişlerdir. Aitcin (1998), göre beton karışımında yüksek fırın cürufu çimento ağırlığının %20'si oranında kullanıldığında uygun değerde bir performans elde edilebileceğini belirtmişlerdir. Yüksek fırın cürufun betonda kullanıldığında sülfatlara karşı betonun durabilite özelliklerini pozitif yönde geliştirdiği için kullanılması gereken cürufun çimentonun ağırlığının en az %50' si kadar olması gerektiği önerilmiş ve bununla birlikte cüruftaki alümina kullanım oranının %11' de daha az olması gerektiğini belirtmişlerdir (Tokyay, 2013). Yapılan bir çalışmada YFC, çimento ağırlığının %0, %30, %50, %65 ve %80 oranlarında kullanılarak beton basınç dayanımları incelenmiştir. Yapılan incelemede çimento ağırlığının %50' sine kadar cüruf kullanımının basınç dayanım kaybının az olduğu ancak %50' den daha fazla oranda kullanıldığında basınç dayanımında ciddi düşüşlerin olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada aynı zamanda betonların donma-çözülme performansları incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda %50 oranından daha fazla cüruf kullanıldığında betonun donma-çözülme performansının düştüğü görülmüş ve %80 oranında cüruf bulunan beton karışımının en düşük donma- çözülme direncine sahip olduğunu belirtmişlerdir (Topçu ve Canbaz, 2007). Yüksek fırın cürufu, yüksek dayanımlı ve yüksek performanslı betonda

kullanılmasıyla birlikte doğal kaynakların tüketimi azalmış olur hem çevre ve iklim değişimleri üzerindeki etkisi azaltılmış hem de betonun durabilitesinin geliştirilmesine olanak sağlamasıyla birlikte çimentonun yaygın bir şekilde kullanılması azaltılmış olur. Bununla birlikte betonun mekanik ve durabilite özelliklerinin geliştirilmesinde de YFC kullanılması gerektiğini belirtmişlerdir (Ulubeyli ve Artır, 2015).

2.8.6.4 Metakaolin

Metakaolin, 700 -1000 °C sıcaklık aralıklarında kaolin mineralinin dehidrokalsinasyonu sonucu oluşan geleneksel bir malzemedir (Kaya vd., 2016). Metakaolin görsel olarak Fotoğraf 2.1' de ve kimyasal kompozisyonu Şekil 2.11' de gösterilmiştir. Puzolanik yapıdaki bu mazleme çimento harcında 1960' da ve 1990' da betonda yüksek dayanım ve dayanıklılık sağladığı için kullanılmaya başlanmıştır (Barness ve Bensted, 2001). Metakaolin genellikle doğal kaolinit kilinin ısıtıldıktan sonra elde edilmektedir (Sabir vd., 2001; Shen vd., 2017; Suwanapruk vd., 2003). Metakaolin özellikle yüksek performanslı harçlarda ve geopolimer malzeme üretiminde kullanılabilen puzolanik bir malzemedir. Metakaolin içeren geopolimerler basınç dayanımları portland çimentolu betonların basınç dayanımlarından daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Kumar and Revathi 2016). Kaolin yüksek hızda kalsinasyonu uğrarsa daha düzensiz metakaolin meydana geleceğini belirtmişlerdir (Castelein et al. 2001).

Görhan, (2020) tarafında yapılan çalışmada kaolin kili farklı sıcaklıklarda metakaoline dönüştürülmüş ve daha sonra metakaolin içeren geopolimer harçların üretiminde kullanılmıştır. Harçlar 40x40x160 mm kalıplara dökülmüş vibrasyon uygulanmış ve yüzeyi düzleştirildikten sonra laboratuvar tipi etüvde 24 saat 90°C kür edilmiştir. Daha sonra basınç dayanımları belirlenmiştir, en yüksek basınç dayanımı 59.7 MPa olarak 700 °C'de kalsine edilen metekaolinden elde edilirken en düşük basınç dayanımı 27.8 MPa ile 900°C'de elde edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta metakaolinin amorf yapısının bozulmasından dolayı basınç dayanımından düşüş görüldüğünü ifade etmişlerdir. Yapılan birçok araştırmada çimentoya göre daha ince tanecik yapısına sahip olan metakaloin (MK) çimentonun mekanik, durabilite ve fiziksel özelliklerini iyileştirdiği ifade etmişlerdir (Figueiredo vd., 2014). Yapılan bir çalışmada hidrasyon sonucu oluşan portlanditin (Ca (OH)₂) bağlamasının harç ve betonun durabilitesi üzerinde olumsuz etki oluşturduğunu belirtmişlerdir. Son yıllarda önemli bir araştırma konusu olan metakaolin,

beton ve harçlarda portlandit ile birlikte oluşturduğu tepkime sonucunda durabilite özelliklerinin iyileştirildiği ve basınç dayanımında da önemli derecede artış sağlandığını belirtmişlerdir (Tevrizci, 2010).

Türkel ve Tevrizci, (2020) tarafında hazırlanan bir harç karışımında çimentonun bir kısmı yerine % 0, 2.5, 5.0, 7.5, 10.0, 12.5, 15.0 ve 20.0' si oranlarında metekaolin kullanılarak harç karışımlarına ikame edilmiş ve iki gruptaki harç karışımların mekanik ve durabilite özellikleri incelenmiştir. İlk grup harç karışımların yayılma çapının 110-120 mm arasında olacak şekilde su/bağlayıcı oranı değiştirilmiştir. İkinci grup için ise su/bağlayıcı oranı 0.5 olarak belirlenip aynı yayılma değeri için süperakışkanlaştırıcı ikame edilerek kullanılmıştır. Bu çalışma sonunda harçlarda kullanılan metakaolin ve süperakışkanlaştırıcının mekanik özelliklerini pozitif yönde etkilediği ve harçların klor geçirimsizliği ve alkali silica reaksiyonu (ASR) kaynaklı harçlardaki genleşme problemini önemli derecede azalttığını tespit etmişlerdir.

2.8.6.5 Cam tozu

Cam tozu, %100 geri dönüşüm camın elenip değirmenlerde öğütülmesiyle oluşan bir katkı malzemesidir. Cam tozu mineraline ait bir görsel Şekil 2.12' de gösterilmiştir. Dünyada %7 oranında çimento üretiminden kaynaklı karbondioksit (CO₂) gazı yayılımının azaltılması, çevresel ve iklim koşulların korunması amacıyla çimento yerine kısmi olarak puzolanik özellikteki cam tozunu kullanılmıştır. Yapılan araştırma sonucunda cam tozunun yüksek silis içeriği (SiO₂) ve amorf yapıda olmasından dolayı betonun ve harçların dayanıklılık ve durabilite gibi özelliklerini iyileştirmesine katkı sağlayacak önemli bir mineral katkı malzemesi olduğunu belirtmişlerdir (Vijayakumar vd., 2013).

Öz, (2017) tarafında yapılan bir çalışmada, çimentoya %5, %10, %15 ve %20 oranlarında atık cam tozu ilave edilerek beton numuler üretmişlerdir. Üretilen beton numunlerin taze haldeki durabilite ve sertleşmiş haldeki basınç ve eğilme dayanımı gibi mekanik özellikleri incelenmiştir. Cam tozunun betonun mekanik ve durabilite özellikleri üzerinde pozitif yönde etkilerin olacağı kanaatine varmışlardır. Ayrıca bu endüstriyel atıkların geri dönüşümünün ekonomik yönden yüksek maliyetli olacağını belirtmişlerdir.

Atık cam tozlarının puzolanik özellikte olması, 0.005 mm boyutunda öğütülerek özellikle

çimentoya eklenti olarak kullanılması ve aktif silis içeriğine sahip olmasından dolayı hidrasyon olayı sırasında porlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ile tepkimesi sonucu C-S-H jelini oluşturması gibi birçok avantajlı özelliğinden dolayı beton ve harçlarda dayanım ve dayanıklılık özelliklerini artırdığını belirtmişlerdir (Omran ve Tagnit-Hamou, 2016; Shao vd., 2000; Shi vd., 2005; Shayan ve Xu-Value, 2005).

Cam tozunun ince parçacık yapısından dolayı doldurucu özellikte olması ve puzolanik olarak kullanılabilir olması sayesinde %10, %15 ve %20 oranlarda çimento yerine ikame edilmiş, 7. ve 28. günlerde basınç dayanımları incelenmiştir. 7 günlük numunelerde basınç dayanımlarında artış olmadığı, 28. günde basınç dayanımından artış olduğu görülmüştür. Bu sebeple beton ve harçların üretiminde atık cam tozunun kullanılabilirliğini ve basınç dayanımında %20 oranında artış görüldüğünü belirtmişlerdir (Keskin vd., 2018).



Şekil 2.11. Cam tozu (Keskin vd., 2018)

2.8.6.6 Diğer mineral katkı malzemeleri

Son yıllarda yaygın bir şekilde beton ve harçlarda belli oranlarda veya tamamen çimento yerine kullanılan mineraller katkı bulunmaktadırlar. Bunlar; uçucu kül, silis dumanı, cam tozu, andezit tozu, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve mermer tozu dışında kalker unu, pirinç kabuğu, volkanik kül, doğal zeolit, diatomlu toprak, pişirilmiş kil ve taşunu başlıca bilinen mineral katkı malzemeleridir. Bu mineral katkı malzemelerinden taşunu puzolanik özellikte değildir. Bütün bu mineral katkı malzemeleri dışında kalan çok az bilinen doğal ve yapay olarak üretilen özellikle iğnemsiz yapıyla ön plana çıkan kalsiyum, silisyum ve oksijenden oluşan bir metasilikat (CaSiO_3) olan vollastonit mineralidir. Bu tez çalışmasında kontrol numunesi dışında %3, %6, %9 ve %12 oranlarda çimento yerine ikame edilerek harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen harç numuneleri ile

ilgili detaylı çalışma deneysel çalışma başlığı altında verilmiştir. Bu özel mineral ayrı bir başlık altında ele alınarak detaylı bir şekilde incelenmiştir.

2.9 Betonun Kırılma Mekanîği

Kırılma Mekanîği Bilimi malzemede var olan çentik, çatlak ve boşluk gibi gerilme yığılmasını artıran kusurları ve bunlara bağlı olarak meydana gelen hasarları inceler. Beton ve betonarme yapıların mühendislikteki en önemli konulardan biride malzemelerin mekanik mukavemetidir. Malzemelerin dayanımı, kullanıldıkları yapı ve mekanik mukavemet özelliklerinin çok iyi bilinmesi mühendislik açısından hayati önem taşımaktadır. Malzemeler akma yoluyla değil kırılma denilen gevrek davranış sonucu dayanımlarını yitirmektedir. Beton ve betonarme yapılarda gevrek kırılma can ve mal kaybı açısından oldukça tehlikeli bir davranış biçimidir. Bu yapılarda göçme meydana gelmeden taşıyıcı elemanlarda çatlak ve veya çatlaklar oluşabilmekte ve malzeme yumuşama nedeniyle dayanım kaybetmektedir. Kırılma parametreleri kullanılarak gerçekçi bir analiz yapılmasına ihtiyaç duyulmaktadır. Betonda kullanılan agrega cinsi, su/çimento oranı (W/C), çimento dozu, kalıba yerleştirilmesi, sıkıştırılması, kür ve bakım şartları betonun dayanımını ve kırılma parametrelerini etkileyen en önemli özelliklerdir (Alyamaç ve İnce, 2007).

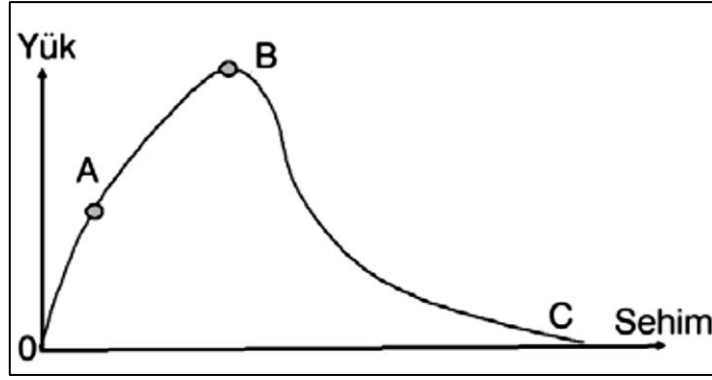
Harç, kırılma parametrelerini ve yapı hizmet performansını önemli ölçüde etkileyecek ve böylece inşaat mühendislerinin dikkatini her zaman üzerine çekecektir. Bu konuda birçok araştırma yapılmıştır (Hou vd., 2017). Kaplan (1961), beton kırılma analizinde doğrusal elastik kırılma mekanîğini uygulanmıştır. Bazant (1987), çatlak bant modeline dayanarak betonda çatlamanın boyut etkisini araştırılmıştır. Issa vd. (2000), tarafında çeşitli boyutlarda ve toplam altı tane geometrik özellikte benzer beton numunesi üzerinde deneyler yaparak beton kırılmasının boyut etkisi üzerinde çalışmışlardır. Appa vd. (2002), tarafından kırılma enerjisi ve yüksek dayanımlı betonun yumuşama davranışı üzerine araştırmalar yapılmış ve iri taneli agrega büyüklüğünün beton kırılma enerjisi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Yapılan bu çalışmalar sonucunda agrega tane büyüklüğü arttıkça kırılma enerjisinin arttığını gözlemlemiştir. Karihaloo vd. (2004), dayanımın boyut etkisi, bileşen boyutunun artmasıyla daha belirgin olduğunu göstermektedir. Dong vd. (2006), beton disk numunesinin dinamik kırılmasını test etmek için Split Hopkinson Basınç Çubuğu (SHPB) cihazını kullanmışlardır. Deng vd. (2012), kumtaşı kullanılarak

üretileen harç numunelerin kırılma tokluğunu üç noktalı eğilme testlerine dayanarak belirlemeye çalışmışlardır. Hou vd. (2017), tarafından kaplama malzemelerinin çatlak yayılımını Faz Alan Yöntemini kullanarak incelemişlerdir.

Son zamanlarda, altyapı malzemelerini incelemek için daha yeni teoriler ve teknikler kullanılmıştır. Mevcut araştırmalar temelinde harç numunelerin analizinde statik ve dinamik kırılma tokluğu testleri ve harç numunelerinin analizine odaklanmıştır. Bununla birlikte, numune kalınlığına göre harç kırılma tokluğu üzerine yapılan araştırmalar çok azdır. Ayrıca, harç numunesinde farklı kalınlıklara göre çatlak yayılımının sayısal simülasyonu konusu da araştırmanın eksikliklerinden biridir. Bu problemleri çözmek için, farklı su / çimento oranına ve kalınlığına göre bağılı olarak harç numunesinin kırılma tokluğu, üç noktalı eğilme deneyi kullanılarak belirlenmiştir (Huang vd., 2017).

2.9.1 Betonda Kırılma Süreci

Beton, herhangi bir yük uygulamadan önce içyapısında mikro çatlakların bulunması heterojen içyapı düzeninde olmasındandır. Betonu davranışı incelendiğinde en küçük yükler altında elastik davranış göstermesi, yapısında boşluklar ve mikro çatlaklar bulunan beton heterojen ve yarı gevrek bir malzemedir (O-A arası, Şekil 2.13). Bu bölgedeki şekil değiştirmeler ve gerilmeler orantılı olarak artar ve yük kaldırıldığında şekil değiştirmeler eski haline döner. Yük-sehim eğrisinde A noktasındaki elastik sınır geçilir, mikroçatlak ve boşluklara yük transferini aktarır ve lineer olma özelliğini yitirir. Agrega ve çimento hamuru ara yüzeyindeki boşluk ve mikro çatlakların büyümesi sonucu kalıcı şekil değiştirmeler oluşur. Oluşan bu çatlaklar enerji harcandığı için yük- sehim eğrisi nonlinear bir şekilde artış gösterir (A-B arası, Şekil 2.13). Bu bölgede mevcut çatlakların genişlemesiyle birlikte yeni çatlaklar da meydana gelir. Meydana gelen şekil değiştirmeler, tepe yükü civarında (B noktası) kırılmanın gerçekleşeceği düzlemde birikmeye başlar (şekil değiştirme yerelleşmesi). Çatlakların ilerlemesine paralel olarak şekil değiştirmeler artar yük taşıma kapasitesi aşılr. Buna paralel olarak yük taşıma kapasitesinin aniden sıfırlanmasının önüne geçilmiş olunur ve beton tepe yükü düzeyinden sonra tokluk kazandırır. B-C bölgesinde şekil değiştirme yumuşaması görülür. Bundan dolayı beton, yarı gevrek bir malzeme olarak değerlendirilir (Taşdemir vd., 2003).



Şekil 2.12. Betonun Eğilme Yüklemesi Altındaki Davranışı

Çatlak ilerleme süreci, Genişletilmiş Sonlu Elemanlar Yöntemi (XFEM) kullanılarak görselleştirilir. Harç numunesinin kalınlığının, harç çatlama performansını etkileyeceği ve yeni ortaya çıkan sayısal araç XFEM'in, harç numunesinin kırılma özelliklerini karakterize edebildiğini göstermiştir (Hou vd., 2017)

2.9.2 Betonun kırılma mekaniği ile ilgili modeller

Kırılma parametrelerinin belirlenmesinde yaygın olarak üç model kullanılmaktadır. Bunlar: a) Fiktif Çatlak Modeli (FÇM) (Hillerborg, 1976), b) Boyut Etkisi Modeli (Bazant, 1984) ve c) İki Parametrelili Modeldir (Jenq ve Shah, 1985) olmak üzere üçe ayrılır (Taşdemir vd., 2003). Betonun kırılma parametrelerin belirlenmesinde kullanılan diğer bir yöntem ise, Nonlineer Kırılma Mekaniğidir. CEB-FIP 90 Model Code (1991) tarafından hazırlanan model ile betonun kırılma enerjisi ve karakteristik boyu ile ilgili tasarım ve kodlarda yer almaktadır. Birçok araştırmacı, çatlak ucundaki gerilme yığılmalarını ve çatlak ucunda oluşan enerji harcamasına neden olan bölge ile ilgili çalışmalarda bulunulmuştur. Oluşan çatlağın beton yapısı ve türüne bağlı değişken boyutlarda ve şekilde olabileceğini belirtmişlerdir (Karihaloo, 1995).

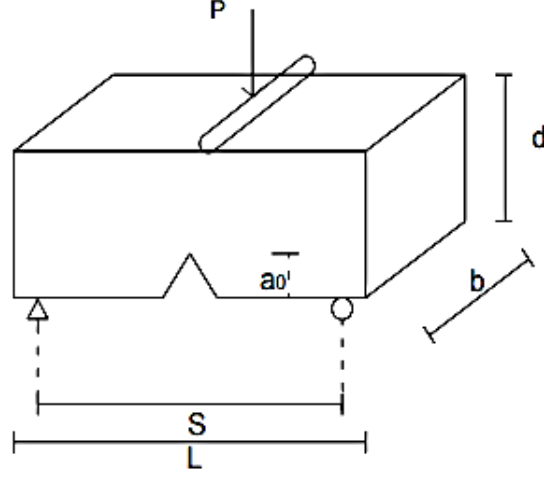
2.9.2.1 Fiktif çatlak modeli

Hillerborg (1976) tarafından tavsiye edilen bu model ile kırılma süreci bölgesi ve bir uçtan diğer uca yük transferi yapan bir çatlak uzantısı olarak uygulanan bir modeldir. Çentikli kiriş numunler üzerinde uygulanarak elde edilen üç noktalı eğilme deneyi ile

yük-toplam şekil değiştirme eğrisi çizilir. Elde edilen bu eğri ile elastik şekil değiştirmeler çıkarıldıktan sonra kalan yük-çatlak genişliği eğrisi elde edilebilir. Elde edilen bu eğri altında kalan alan kullanılarak kırılma enerjisi hesaplanabilmektedir (RILEM TC 50-FMC). Bu yöntem sayısal analizde kullanılması ve uygulaması kolay olan bir yöntemdir. Kirişin orta noktasında meydana gelen sehimin ölçülebilmesi için yük sıfırlanana kadar deneyin hasas bir şekilde yapılması gerekmektedir. Kırılma enerjisi, bir tek parametre ile belirlenmesi kırılma enerjisinin doğru olarak belirlenmesinde sağlıklı bir sonuca ulaşılmaz. Kırılma enerjisinde hesaplanan karakteristik boy ile çimento esaslı kompozitlerde mikro düzeydeki çatlakların belirlenmesinde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır (Bache, 1986).

2.9.2.3 Boyut etkisi modeli

Bazant ve Kazemi (1990) tarafından önerilmiş bir modeldir. Bu model için farklı üç boyuttaki numunler üzerinde uygulanmaktadır. Farklı geometrik boyutlarda olan benzer ve orantılı çentik boyutlarına sahip kirişlerde üç noktalı eğilme deneyi uygulanmaktadır (RILEM TC 89-FMT). Bu model ile kritik tepe yükü ve iki adet kırılma parametresi hesaplanabiliyor. Bunlardan birincisi kritik enerji salıverilme hızı, G_f (kırılma tokluğu), ikincisi de kırılma süreci bölgesi uzunluğu, c_f 'dir. Ayrıca tepe yükü kullanılarak iki parametre hesaplanabildiği için avantajlı bir modeldir. RILEM, (1990) tarafından tavsiye edilen boyut etkisi yöntemi ile betonun kırılma parametreleri belirlenebilir ve kırılma özellikleri incelenebileceğini belirtmişlerdir. Boyut etkisi modelin temeli, Bazant ve Pfeiffer (1987) tarafından ortaya konulmuştur. Bu yöntem ile üç nokta eğilme deneyinde kullanılan kirişlerde iyi sonuçlar vermekte ve değişik boyutta ve çentikli kirişler tavsiye edilmektedir. Şekil 2.14' te gösterildiği gibi bir sabit mafsal ile iki kayar mafsalı kiriş sistemine uygulanmaktadır. Mesnetler arası mesafeler ve kiriş sonu arasındaki mesafeler titiz bir şekilde ayarlanmalıdır. Aksi takdirde, kirişte çatlama ve hasarlara yol açabilir (Yılmaz-Çetin, 2015).



Şekil 2.13. Boyut etkisi modeline göre önerilen numune geometrisi (Yılmaz-Çetin, 2015)

2.9.2.4 İki parametrelı model

İki parametrelı modelde yükleme-boşaltma sırasında yük-çatlak genişliğinin titiz bir şekilde incelenerek ölçülmesini gerektiren bir metottur. Bu metod ile farklı boyutlarda numuneler kullanılmasına gerek kalmadan üç noktalı eğilme deneyi ile yük-çatlak genişliği eğrisinin tepe yükü noktasında yükleme-boşaltma yapılarak uygulanan bir metottur (Jeng ve Shah, 1985). İki Parametrelı Model Jeng ve Shah (1985), tarafından önerilen bu modelde farklı boyutlu numuneler kullanılmasına gerek yoktur. Çentikli kirişte üç noktalı eğilme deneyi uygulanarak, yük- çatlak genişliği eğrisinin tepe yükü noktasında yükleme-boşaltma yapılır. Başlangıçtaki yük-çatlak genişliği ilişkisini ifade eden eğiminin yükleme-boşaltma ile nasıl azaldığı hesaplanır. Buradan etkin çatlak uzunluğu yardımıyla iki adet kırılma parametresi hesaplanır (RILEM TC 89-FMT, 1990). İki parametrelı modelde, yükleme-boşaltma sırasında yük-çatlak genişliği ilişkisinin hassas bir şekilde ölçülmesini gerektirmektedir.

2.10 Elastisite Modülü

Betonun yük altındaki şekil değiştirmelerin bir ölçüsü olup malzemenin uzamasına karşılık gelen gerilme olarak tanımlanmaktadır. Basınç dayanımı ile elastisite modülü doğrudan birbirleriyle bağlantılıdır. Elastisite modülü hesaplanmasında üç tür yöntem bulunmaktadır. Başlangıç, teğet ve sekant modülü olup ilgili şartnamelere genellikle

%40-%50 dayanıma karşılık gelen sekant modülüne göre tanımlanmaktadır (Duran vd., 2017). Vollaştonit minerali iğnemiş yapışından dolayı yüksek elastisite modülü değerine sahiptir. Buna dayanılı olarak vollaştonit minerali ile üretilen YPH basınç ve eğilme dayanımının yüksek olduğunu belirtmişlerdir (Öz ve Güneş, 2018).

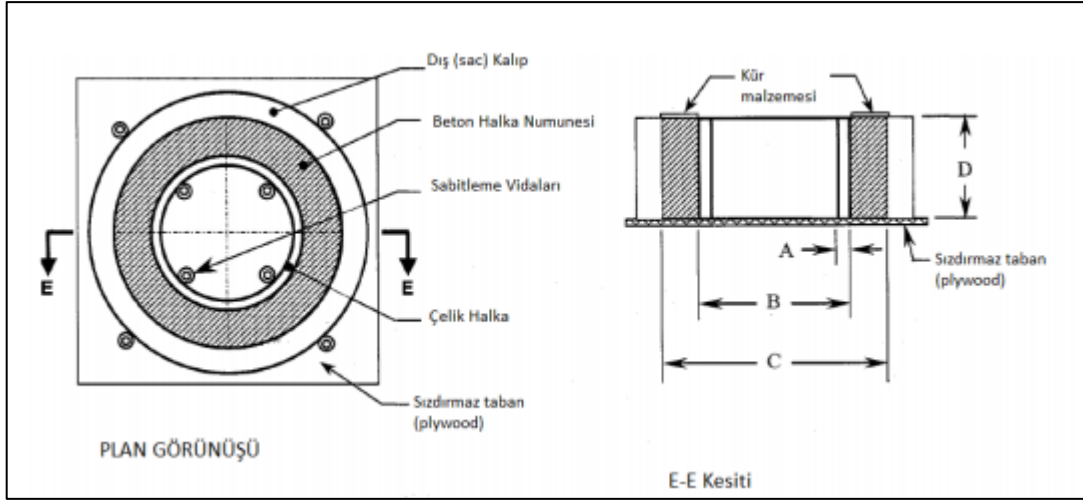
Özcan, (2017) göre yüksek dayanımlı betonların elastisite modülünde yüksek olduğu ve basınç dayanımı ile elastisite modülü arasında sıkı bir ilişki olduğunu ifade etmişlerdir. Normal dayanımlı olan C20, C25 ve C30 beton sınıfların ve yüksek dayanımlı betonlar için 1 yıllık ve 28 günlük deney yaşı incelediğinde yüksek dayanımlı C40 ve C50 beton sınıfların elastisite modülünün daha yüksek olduğu belirtmişlerdir.

2.11 Betonda Rötire Olayı

Betondaki yapısal, çevresel faktörlere bağlı olarak ve çimento hidratasyonu sırasında betondaki su kaybından dolayı meydana gelen hacim değişimlerine rötire denir. Rötire olayı sırasında çimento matrisindeki çekme kuvvetlerinden dolayı zorlamalardan kaynaklı büzölmeler meydana gelir. İnşaat yapıların genelinde rötire olayı betonun yerleşimi ve prizini alma sürecinde ortaya çıkması ile birlikte gerçekte ise, rötire çimento ile suyla birlikte başlayan bir süreçtir (Holt, 2001). Rötireyi etkileyen temel faktörler agrega/çimento oranı, ince malzeme miktarı ve cinsi, su/çimento oranı ile çimento cinsi ve miktarı özellikle çevre faktörleri, rüzgâr ve sıcaklık gibi etkenler rötireyi büyük ölçüde etkiler. Beton prizini alıp sertleşdikten sonra serbest halde bulununan suyunu kaybetmesiyle meydana gelen çatlaklar kuruma rötiresi adlandırılmaktadır. Aynı zamanda çimento tanecikleri arasındaki boşlukların oluşturduğu basınç kaynaklıdır. Kuruma rötiresinin oluşumunu etkileyen üç temel unsur bulunmaktadır; basınç, kılcallık ve açığa çıkan enerjideki değişimdir. Kuruma rötiresi, ortam şartlarına ve kür süresine bağlı olarak 1 günlük süre zarfında bile ani değişiklik gösterebilmektedir. Bu ani değişiklik betonun toplam rötiresini olumsuz bir şekilde etkilemektedir. Betonun plastik rötiresi uzun koşullarda sabit kalırken kuruma rötiresi ilk 1 gün içerisinde beton numunenin kür ve ortam koşullarına göre ani değişiklik gösterebilmektedir (Holt, 2001). Ortamın nemi, betonun kendi neminden az ise, nemin fazla olduğu taraftan buharlaşma kuru olan tarafa geçişi sağlayacaktır. Bu nedenle betonda mikro düzeyde büzölme oluşacaktır, oluşan bu olaya “kuruma rötiresi” denir (Briffaut vd., 2010). Betonda kuruma rötiresinin oranı suyun buharlaşma hızından çok beton içerisindeki suyun difüzyon hızıyla ilgilidir. Çünkü betonun yüzeyine yakın kısımlardaki su, havadaki nemle çabucak dengeye ulaşırken iç

bölgedeki nem dengesi, betonun difüzyona müsaade hızıyla ilişkili olacaktır (Şekil 2.16) (Raoufi vd., 2011). Boşluk çapı azaldıkça rötre derecesi artmaktadır. Ortamdaki rutubet azaldıkça kapiler boşluklardaki basınç dış yüzeyde 10 MPa'dan 100 MPa değerine ulaşabileceğini belirtmişlerdir (Holt, 2001).

Kadıoğlu, (2006) tarafında rötre azaltıcı katkı maddeleri kullanarak yapılan çalışmada, rötre azaltıcı katkı mazlemeleri kullanarak oluşturulan karışımlardaki rötre çatlakların, kontrol numunlerine göre daha az olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte rötre azaltıcı katkı içeren beton karışımların basınç dayanımı katkısız numunlere göre daha düşük olduğu ve katkılı ve katkısız beton karışımı numunelerin elatisite modülleri arasında ciddi derece farkların bulunduğu sonucuna ulaşmışlardır. Aynı zamanda katkılı harç numunelerde ağırlık kayıpları fazla olmalarına rağmen meydana gelen rötre çatlakların daha az olduğunu ifade etmişlerdir. ASTM C 1581' de, Şekil 2.15.' da gösterilen halka numuneler beton karışımları dökülmüştür kısıtlanmış rötre deneyi belirlenmeye çalışılmıştır. Kısıtlanmış rötre ile betonarme elemanlarda çatlakların yeri, zamanı ve genişliği halka deneyi kullanılarak belirlenebileceği yapılan araştırmalar göstermiştir. Bu beton numunelerde rötreden kaynaklı oluşan çatlaklar, çekme dayanımı karakteristikleri ve çatlak zamanı laboratuvar koşullarında belirlenebilmektedir. Aynı zamanda hidratasyon ısısı kaynaklı oluşan kuruma büzülmesi çatlakların potansiyel durumu ve meydana gelen deformasyonlar standartlara uygun olarak belirlenebilmektedir (ASTM C-1581, 2004). Deneyde çatlama zamanı birim boyda meydana gelen şekil değiştirmelerin ölçülmesi ile tespit edilerek belirlenebilmektedir (Briffaut vd., 2010).



Şekil 2.14. Halka testi yerleşim planı ve kesit görünüşü (ASTM C-1581, 2004)

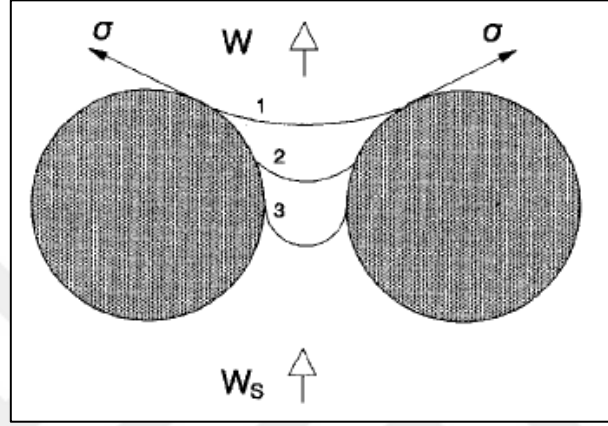
Briffaut vd., (2010) tarafında halka kalıplar kullanılarak hazırlanan betonarme içerisindeki donatı ve derzlerin genişlikleri ve çatlak genişlikler, birden fazla oluşan çatlakların durumu ve çatlakların genişlemesi simülasyon yöntemi ile belirlediklerini ifade etmişlerdir.

Özcan ve Atış, (2017) tarafında yapılan bir çalışmada silis dumanı katkılı harçların rötre özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Harç karışımlarına Portland çimentosu yerine ağırlık bazında %10, 15, 20 ve 40 oranında silis dumanı ilave edilerek hazırlanan harç karışımların su/bağlayıcı oranları 0.25, 0.30, 0.40, 0.50 ve 0.60 olacak şekilde hazırlanmıştır. Bu numunelerin kuruma rötresi, silis dumanı katkılı harçlarda silis dumanı oranına ve su/bağlayıcı oranına bağlı olarak etkilendiğini göstermişlerdir. Su/bağlayıcı oranının 0,25 ve 0,30 olduğu harçlarda, %40 silis dumanı ilavesi hariç %10, 15 ve 20 silisdumanı ikame oranlarında rötreyi azaltıcı yönde etki görüldüğünü, ayrıca su/bağlayıcı oranın artması silis duman içerikli karışımlarda rötreyi daha az oranda etkilemiş olduğunu belirtmişlerdir.

Aghabaglou ve İlhan (2017) tarafından yapılan çalışmada kuruma büzülme davranışlarını incelemek amacı ile her seri için üçer adet 25x25x285 mm prizmatik numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak 48 saat boyunca sıcaklığı 20°C suda kürlenmiştir. Daha sonra kür havuzundan çıkarılıp sıcaklığı 20±3°C ve bağıl nemi %50 olan bir odada bekletilmiştir. Bu ortamda prizmatik numunelerin boy değişimi denklem 2’ de gösterildiği gibi ASTM C 596-01 (2017)’e göre

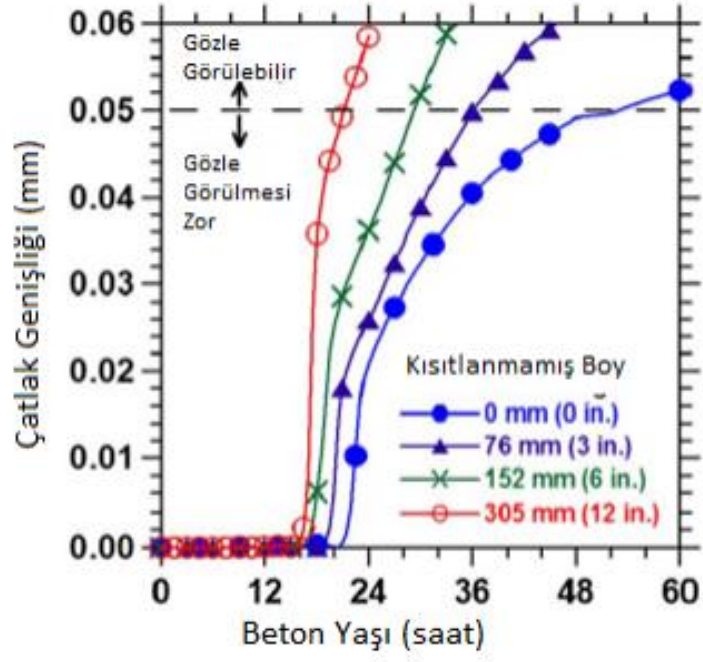
hesaplanmıştır. Burada, S numunenin büzülme yüzdesini, L_1 kür havuzundan çıkarıldıktan sonra başlangıç ölçüm değerini, L geçen günlere göre periyodik ölçüm değerini, L_0 efektif ölçüm boyunu ifade etmektedir (Aghabaglou ve İlhan, 2017). Harçların kısıtlanmamış rötredeki boy-çatlak ilişkisi Şekil 3.10'da sunulmuştur.

$$S = \frac{L_1 - L}{L_0} \quad (2)$$



Şekil 2.15. Kuruma Büzülmesinin Çimento Tanecikleri Arasında Oluşturduğu Kuvvet Mekanizması (Holt, 2001)

Raoufi vd., (2011) yaptıkları çalışmada, Şekil 2.17' de görüldüğü gibi çatlak uzunlukları ve çatlak oluşumu kısıtlanmış uzunluklar arttıkça meydana geldiği ve aynı zamanda çatlakların oluşumu ve sayısının arttığını gözlemlemişlerdir. Beton yaşı ilerledikçe yeni meydana gelen kılcal çatlakları gözlemlenmiş olup 0.05 mm üzeri büyük olan çatlakların görülebileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 2.16. Kısıtlanmamış rötrede boy çatlak ilişkisi (Raoufi vd., 2011)

BÖLÜM III

DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu tez çalışmasında daha önce yapılan çalışmalardan farklı olarak üretilen vollastonit mineralinin YPH'nin boyutsal stabilite ve kırılma parametreleri üzerine etkileri araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla ilk etapta vollastonit minerali elde edildikten sonra bilyeli jet değirmende öğütülmüş, ikinci etapta ise elde edilen vollastonit minerali YPH üretimde kullanılarak, YPH'lerin sertleşmiş haldeki basınç ve eğilme dayanımları, ultrasonik titreşim hızı, boyutsal stabilite ve kırılma parametreleri üzerine olan etkileri incelenmiştir.

3.2 YPH Tasarımında Kullanılan Malzeme ve Özellikleri

3.2.1 Çimento

TS EN 197-1 (2002) standardına uygun CEM I 42,5 R tipi Normal Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri ile ilgili kısım Çizelge 3.2'de sunulmuştur.

3.2.2 Sentetik Vollastonit Üretimi

Senetik vollastonit üretimi için, sinterleme ve otoklav yöntemi kullanılmıştır. İlk aşamada, silisyumdioksit veya silikat (SiO_2) küçük taneler halinde parçalandıktan sonra bilyeli jet değirmende dakikada 350 RPM dönüş hızıyla 30 dakika boyunca mikro tane düzeyinde öğütüldükten sonra 250 μm (60 nolu) göz açıklığı olan elekten geçirilerek hazırlanmıştır.

İkinci aşamada ise; sinterleme metodu ile kireç taşı (CaCO_3) kül fırınında sıcaklık dakikada 40 °C artırılarak ve 1100 °C' ye kadar 1 saat boyunca fırında bekletilen numune sinterlenerek sönmemiş kireç (CaO) üretilmiştir. Bu üretimin gerçekleşme formülasyonu aşağıdaki denklemde (3.1) ifade edilmiştir. Sinterleme aşamasında kireç malzemesi ile birlikte karbondioksit (CO_2) gazı elde edilmiştir.



Birinci ve ikinci aşama sonucunda elde edilen SiO₂ ve CaO 1:1 mol oranında karıştırılmış ve karışımın ağırlığı kadar saf su ilave edilmiştir. Karışım hesabı için, hangi malzemeden ne kadar kullanılacağı ile ilgili olarak; Sayın Doç. Dr. Orkun Ersoy ve Güneş, (2018) tarafında yapılan deneysel çalışma sonucunda her karışım için 67.296 gr kireç (CaO), 72.096 gr silisyumdioksit (SiO₂) ve 139.4 gr saf su kullanılacağı hesaplanmıştır. 1 mola karşılık gelen kireç ve silika bileşiklerinin ağırlıkları Çizelge 3.1' de sunulmuştur.

Çizelge 3.4. CaO ve SiO₂ 1 mol ağırlıkları

1 mol CaO	56.08 gr
1 mol SiO ₂	60.08 gr

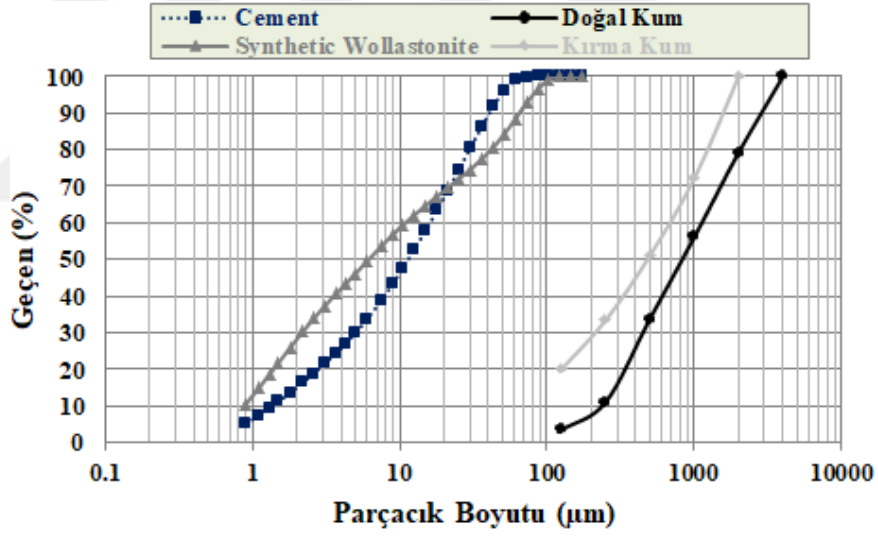
Bu malzemeler belirlenen oranlarda karıştırılarak emniyetli bir şekilde değirmene yerleştirilmiştir. Mekanokimyasal etkileşimi sağlamak için, karışım değirmende 250 RPM hızda 30 dakika boyunca karıştırılır. Bu etkileşim sonucu elde edilen ürün teflon kaba konularak otoklav fırınına yerleştirilip 200 °C'de 24 saat boyunca bekletilir. Bu süre sonunda otoklav fırından çıkarılıp oda sıcaklığında bekletilmiştir. Bu şekilde sertleşmiş halde bulunan tobermorit (kalsiyum silikat hidrat) minerali elde edilmiştir. Tobermorit, mikrodalga fırına içerisine konularak nemden korunmuş ve daha sonra patlatma işlemi uygulanarak otoklav fırından çıkarılan malzeme NİĞTAŞ'a götürülerek 425 µm (40 nolu) göz açıklığı olan elekten elenmiştir. Bu eleme işlemi sonrası malzeme sinterlemeye hazır hale getirilmiştir. Sinterleme işlemi için porsenel kaplara yaklaşık 250 gr tobermorit konulup kül fırını yerleştirilmiş ve dakikada 40 °C artarak, 1100 C°'de 1 saat bekletilmiştir. Sinterleme süreci tamamlandığında elde edilen ürün katı hal reaksiyonunu oluşturduğu görülmüştür. Buna dayanılarak elde edilen ürünün vollastonit olduğu kanaatine varılmıştır. Üretilen yapay vollastonit harç karışımında kullanılmak üzere nemden uzak ve ağız kilitli poşet içerisinde muhafaza edilmiştir. Fotoğraf 3.1'de sunulmuş görselde harç karışımı için belirlenen ağırlıklarda tartılan çimento ve yapay vollastonit kaba konulmuştur.



a

b

Fotoğraf 3.4. CEM I 42,5 R Portland çimentosu (a) ve yapay vollastonit (b)



Şekil 3.17. YPH üretiminde kullanılan malzemelerin tane boyut dağılımları

Yapay vollastonit minerali bilyeli jet değirmende öğütmek için, aşağıda gösterilen bilyeli jet değirmen, haznedeki vollastonit ve numune haznesi Fotoğraf 3.4'te sunulmuştur.



a

b

c

Fotoğraf 3.5. Bilyeli jet değirmen (a), numene haznesi (b) ve yapay vollastonit (c)

Çizelge 3.5. Çimento ve vollastonitin fiziksel ve kimyasal özellikleri

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

3.2.3 Süper Akışkanlaştırıcı (SA) ve harç karışım suyu

Yeni nesil süperakışkanlaştırıcı ve eski adıyla MasterGlenium 51 olarak bilenen su azaltıcı ve işlenebilirliği kolaylaştıran erken nihai dayanım ve dayanıklılık sağlayan polikarboksilik eter tipi sıvıdır. SA kullanılarak harç karışımına işlenebilirlik sağlanmıştır. Yüksek performanslı harç (YPH) için kullanılan karışım suyu içilebilir nitelikteki çeşme suyudur. Fotoğraf 3.5’de sunulan malzemeler sırasıyla

süperakışkanlaştırıcı kabı ve karışımda kullanılacak süperakışkanlaştırıcı ve karışım suyunun elektronik tartıda ölçülmesi ile ilgili görsel sunulmuştur.



a

b

c

Fotoğraf 3.6. Süperakışkanlaştırıcı kabı (a), süperakışkanlaştırıcının elektronik terazide tartılması (b) ve karışım suyu(c)

3.2.4 İnce agregalar

İnce agrega olarak doğal kum ve kırma kum kullanılmıştır. Doğal kum Nevşehir iline ve kırma kum Niğde iline aittir. Aşağıda ince agreganın fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.3' te, ince agrega olarak kullanılacak olan doğal ve kırma kuma ait görseller ise Fotoğraf 3.6 'da sunulmuştur.

Çizelge 3.6. Doğal kum ve kırma kumun özellikleri

İnce Agregası	Doğal Kum	Kırma Kum
Tane Boyutu	0-4 mm	0-2 mm
Özgül Ağırlık	2.69 gr/cm ³	2.65 gr/cm ³



a

b

Fotoğraf 3.7. Doğal kum (a) ve kırma kum (b)

3.3 YPH Karışım Oranları ve Üretim Prosedürü

3.3.1 VYPH karışım oranları

Yapılan deneysel çalışmada su/bağlayıcı (s/b) 0.33 olarak sabit tutularak 3 farklı seri karışım ve 15 farklı yüksek performanslı harç (YPH) üretilmiştir. Karışımda kullanılacak malzemelerin miktarları Çizelge 4.4' te gösterildiği gibidir. Her bir seri için karışımdaki toplam bağlayıcı miktarı (çimento+vollastonit) 500 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı karışımlarda aynı miktarda kullanılarak yayılma çapındaki değişimleri ölçülerek tespit edilmiştir. İlk aşamada sadece çimento bağlayıcı malzeme olarak kullanılarak ve vollastonit minerali kullanmadan hazırlanan kontrol karışımı beton mikserinde karıştırılmış daha sonra kalıplara dökülmüştür. Daha sonra diğer karışımların her biri için yapay vollastonit minerali sırasıyla %3, %6, %9 ve %12 oranlarda çimento ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Yapay vollastonit mineralin karışımdaki içeriğine göre adlandırılmış olan karışım isimleri sırasıyla; VYPH3, VYPH6, VYPH9 ve VYPH12 olacak şekilde belirlenmiş ve yüksek performanslı harç (YPH) karışımları oluşturulmuştur.

Çizelge 3.7. VYPH 1 kg/m³ karışım hesabı

1 kg/m ³ Karışım Hesabı							
Karışım	(S/B)	Su	Çimento	Vollastonit	Doğal Kum	Kırma Kum	HRWRA
SV0	0.33	165	500	0	1249.82	527.61	22.5
SV3	0.33	165	485	15	1249.79	527.60	22.5
SV6	0.33	165	470	30	1249.76	527.59	22.5
SV9	0.33	165	455	45	1249.73	527.57	22.5
SV12	0.33	165	440	60	1249.70	527.56	22.5

3.3.2 VYPH üretim prosedürü

ASTM C305-12 (2017) standardına uygun olarak harçlar bir mikser yardımıyla karıştırılmıştır. Harç karışımında kullanılacak doğal ve kırma kum ve vollastonit miktarının elektronik terazide tartılması ve kalıplara konulması; Fotoğraf 3.7' de, karışımın mikserde karıştırılması ve karışım suyunun eklenmesi; Fotoğraf 3.8' de, harç karışımının konulacağı silindirik ve prizmatik kalıp numunelerin hazırlanması; Fotoğraf 3.9' da ve hazırlanan karışımların kalıplara yerleştirilip ve vibrasyona tabi tutularak sıkıştırılması, yüzeyin düzleştirildikten sonra tezgah üzerine konulması ve hızlı nem kaybının önlenmesi için altına ıslak bez ve üstünün naylon örtü ile kapatılması; Fotoğraf 3.10'de sunulmuştur. YPH' nin üretimi için doğal kum, kırma kum ve çimento miktarları tartılmış, sonra boş bir kaba aktarılmıştır. Daha sonra mikserde karıştırılmaya başlandıktan 15 saniye sonra karışım suyu ve süperakışkanlaştırıcı (SA) kaba eklenmiştir. Çalışmaya müteakiben karıştırma aşağıdaki sıralama takip edilmiştir:

- ❖ Süperakışkanlaştırıcı ve karışım suyun tamamı kaba ilave edilip karışım orta hızla (285 ±10 r/dak) 45 saniye karıştırılmıştır.
- ❖ Mikser durdurulup mikser kabın kenarında toplanmış harçlar hızlıca malayla kazıma yapılarak toplanmış ve malayla karıştırılmıştır.
- ❖ Mikser çalıştırılıp karışım orta hızla (285 ±10 r/dak) 105 saniye karıştırılmıştır.

- ❖ Mikser durdurulup mikser kabın kenarında toplanmış harçlar hızlıca malayla kazıma yapılarak toplanmış ve karıştırılmıştır.
- ❖ Mikser çalıştırılıp karışım orta hızla (285 ± 10 r/dak) 105 saniye karıştırılmıştır.
- ❖ Yayılma deneyi için yeterli miktarda harç alınarak sarsma tablasına konulmuş ve deney yapılmıştır.
- ❖ Harç imalatı için ilk etapta kalıplar yarı seviyesine kadar doldurulmuş ve vibrasyona tabi tutulmuştur. İkinci etapta ise kalıpların tamamı doldurularak son kez vibrasyona tutularak sıkıştırılmış ve sonra kalıp yüzeylerindeki harç fazlalıkları mala ve spatula gibi aletlerle alınarak yüzey düzleştirilmiştir.

Basınç, eğilme, kırılma tokluğu ve ultrasonik titreşim hızı deneyleri için 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik kalıp numuneler kullanılmıştır. Harç numuneleri kalıplara döküldükten 24 saat sonra kalıptan çıkarılarak kür havuzuna konulmuş ve deney gününe kadar bekletilmiştir. Basınç, eğilme ve ultrasonik titreşim hızı deneyleri 3., 7., 28. ve 90. günlerde yapılmıştır. Kırılma tokluğu deneyi, 28. ve 90. günlerde gerçekleştirilmiştir.

Kuruma büzülmesi deneyi için 25x25 mm'lik en kesite sahip, uzunluğu 280 mm olan prizmatik numuneler kullanılmıştır. Prizmatik numuneler, harç üretiminden hemen sonra 20 °C sıcaklık ve %100 bağıl nemli bir ortamda 24 saat kür edilmiştir. Sonrasında ASTM C 157'ye uygun olarak 23 ± 2 °C ve 50 ± 5 bağıl neme sahip kür kabininde 60 gün bekletilmişlerdir. Bu süre içerisinde serbest rötre numunelerinden boy değişimleri belirli periyotlarda ölçülmüştür. Kısıtlanmış rötre deneyi 140 mm yüksekliğinde 280 mm çapında halka deneyi ile tespit edilmiştir. Serbest rötre deneyinde olduğu gibi kısıtlanmış rötre deneyinde de, harç numuneleri üretimden hemen sonra 20 °C sıcaklık ve %100 bağıl nemli bir ortamda 24 saat kür edilmiştir. Daha sonra dış kalıpları çıkartılan halka numunelerin üst yüzeyleri silikon ile sıvanıp kapatıldıktan sonra ASTM C 157'e uygun olarak kuruma ortamına 23 ± 2 °C ve 50 ± 5 bağıl neme sahip kür ortamına bırakılmışlardır. Halka numuneler üzerinde oluşan çatlakların zamanı tespit edilip çatlak genişliğinin kür süresi ile gelişme durumu tespit edilmiştir.



a

b

Fotoğraf 3.8. Karışımda kullanılan malzemeler için kullanılan kaplar (a) ve yapay vollastonitin tartılması (b)



a

b

Fotoğraf 3.9. Silindirik numunenin sarsma tablasında sıkıştırılması (a) ve mikserde karışım suyu ve süperakışkanlaştırıcının eklenmesi (b)



a

b

Fotoğraf 3.10. Prizmatik numune kalıpları (a) ve silindirik numune kabı (b)



a

b

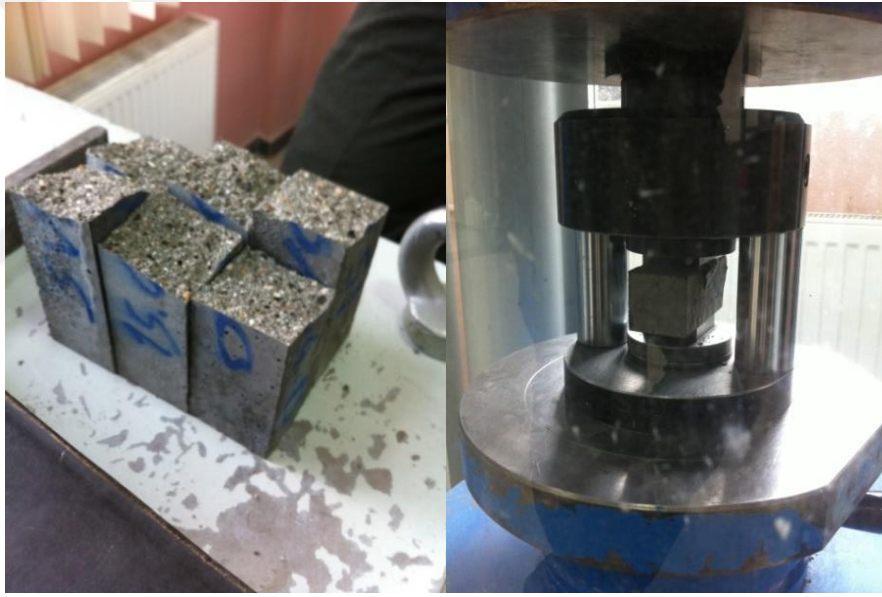
Fotoğraf 3.11. Harç numune kalıplarının 24 saat muhafazaya alınması (a) ve harç numuneleri üzerinin örtülmesi (b)

3.3.2.1 Basınç ve eğilme deneyi

Basınç dayanımı deneyi ASTM C349-1'e (2017) standardına göre belirlenmiştir. Deneye ait görsel Fotoğraf 3.11'de görülmektedir. Bu deney için eğilme deneyinde kullanılan 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numunelerden elde edilen parçalar kullanılarak 3, 7, 28 ve 90. günlerde belirlenmiştir. Harç numunelerine basınç deney cihazında uygulanan yükleme hızı 2.4 kN/s uygulanmıştır. Bu şekilde her bir test yaşı

için 6 adet numunenin kırılması gerçekleşmiştir. Basınç deneyi, 6 adet numunenin basınç dayanımlarının ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Eğilme deneyi, Fotoğraf 3.12’de gösterildiği şekildedir. Yapay vollastonit içeren yüksek performanslı harçların eğilme dayanımı ASTM C348-14’e (2017) göre belirlenmiştir. Bu deney 3, 7, 28 ve 90. günlerde belirlemek için 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılarak yapılmıştır. Deneydeki numunelere uygulanan yükleme hızı 0.05 kN/s olarak uygulanmıştır. Bu deneyde her seri için 3 adet numune kullanılmış ve eğilme dayanımı 3 numunenin ortalaması alınarak belirlenmiştir. Eğilme deneyi sonucunda elde edilen 6 adet numune parçası basınç deneyinde kullanılmıştır. Bu test metoduna dayanarak basınç dayanımı belirlenmiştir.



a

b

Fotoğraf 3.12. Eğilme deneyi sonucunda elde edilen parçalar (a) ve basınç dayanımının belirlenmesi için deney cihazına yerleştirilen numune parçası (b)



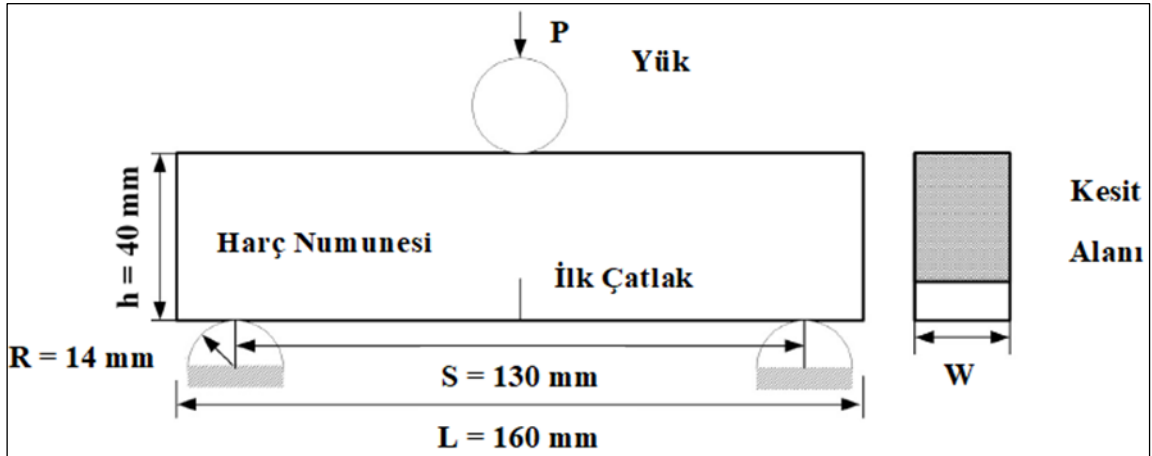
a

b

Fotoğraf 3.13. Eğilme deneyinde kullanılan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler (a) ve eğilme deneyi cihazı (b)

3.3.2.2 Kırılma tokluğu deneyi

Kırılma tokluğu deneyinin belirlenmesi için Makine Mühendisliği Metal Şekillendirme Laboratuvarında bulunan Uluslararası Test Cihazı (UTS) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Vollastonit minerali %0, %3, %6, %9 ve %12 oranında kullanılarak hazırlanan 5 seri harç numuneleri test yaşına kadar standart küre tabii tutulmuştur. Her bir seride 3 adet numune üzerinde yapı mekaniği laboratuvarında bulunan uluslararası test cihazında üç noktalı eğilme deneyi ile kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi belirlenmeye çalışılmıştır. Üç noktalı eğilme deneyi, Şekil 3.2' de deney yapılması ile ilgili kısım Fotoğraf 3.13' de sunulmuştur. Ayrıca bu deney Y. Huang vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada belirtildiği şekilde uygulanmıştır. Test cihazında 40x40x160 mm boyutundaki prizmatik numuneler kullanılmıştır. Eğilme yükleme verileri cihazın bağlı olduğu bilgisayar tarafından kaydedilmiştir. Yük- deplasman kontrolü yapılan çalışma üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, UTS cihazı sorunsuz çalıştırılır ve ikinci olarak, yük belirli bir değere ulaşır ve belirli bir süre bu değerde kalır; üçüncü aşama ise harç numunesi kırılana kadar artan bir şekilde yükleme aşama aşama artmaktadır. Kırılma tokluğu denklem (1) ve denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem (3) ise harcın kırılma enerjisini elde etmek için kullanılmıştır.



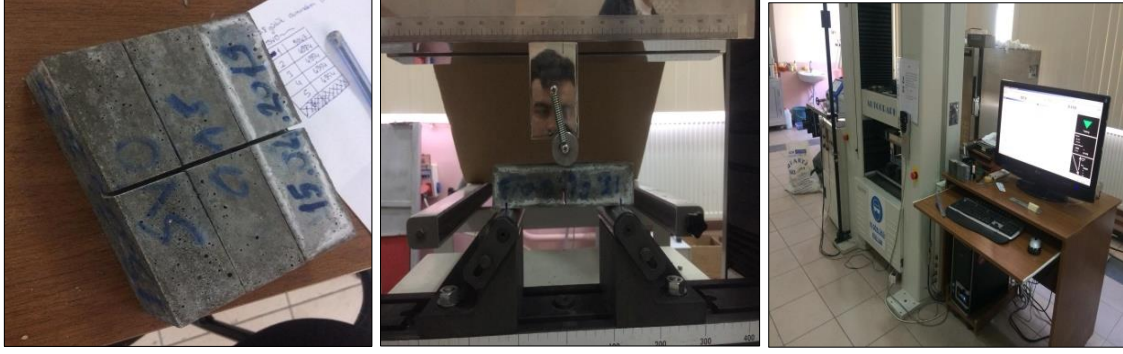
Şekil 3.18. Harç numunesi üzerinde 3 noktali eğilme testi

$$(1) K_{IC} = f\left(\frac{a}{h}\right) \frac{F_{max}S}{Wh^{3/2}}$$

$$(2) f\left(\frac{a}{h}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{h}\right)^{1/2} \left[1.99 - \left(\frac{a}{h}\right)\left(1 - \frac{a}{h}\right) \times \left(2.15 - \frac{3.93a}{h} + 2.7\frac{a^2}{h^2}\right)\right]}{2\left(1 + \frac{2a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}}$$

$$(3) G_{IC} = \frac{(1-\nu^2)K_{IC}^2}{E}$$

K_{IC} ; harcın kırılma tokluğu, a ; başlangıç çatlak uzunluğu, h ; numune yüksekliği, W ; numune kalınlığı, L ; numune uzunluğu, $f(a/h)$ değeri; çatlak uzunluğu ve numune yüksekliği ile ilgilidir, G_{IC} ; kırılma enerjisi, E ; elastisite modülü ve ν ; poisson oranıdır.



a

b

c

Fotoğraf 3.14. Çentik oluşturulan 40x40x160 mm boyutlarındaki prizmatik numuneler (a), bilgisayara bağlı deney cihazı (b) ve numunenin deney cihazına yerleştirilmesi

3.3.2.3 Ultrasonik titreşim hızı (UTH) deneyi

İnşaat mühendisliğinde kullanılmı yaygın bir deney metodudur. Uygulaması kolay, yapısal elemanda hasar meydana getirilmeden uygulandığı ve hızlı sonuç alındığı için bu metot tercih edilmektedir. Deneye ait görseller Fotoğraf 3.14'te sunulmuştur. UTH, ASTM C597-16'ya (2016) göre uygulanan standart bir deney yöntemidir. Betonun veya harcın göreceli kalitesinin ve bazı kusurlarının (boşluklar, çatlaklar ve onarımlarının etkinliği vb.) değerlendirilmesine olanak sağlamakla birlikte hızlı, pratik ve kolay uygulanan bir deney metottur. Bu deney ile numunenin bir ucundan diğer ucuna uygulanan ultrasonik dalganın varış süresi ölçülmektedir. UTH deneyi basınç ve eğilme dayanımını belirlemek için alınan, 40x40x160 mm boyutlarındaki, 3 prizmatik harç numunesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu test 28. ve 90. günlerde harcın 160 mm'lik uzun kenar tarafından uygulanmıştır. Bir numuneden 3 adet olmak üzere toplamda her test yaşı için her bir karışımdan 9 adet okuma alınmış bu verilerin ortalaması alınması ile deney sonuçları belirlenmiştir.



Fotoğraf 3.15. 160 mm'lik numunede UTS deneyi uygulaması

3.3.3 Sertleşmiş YPH'lerin Boyutsal Stabilite Özelliklerinin Ölçülmesi

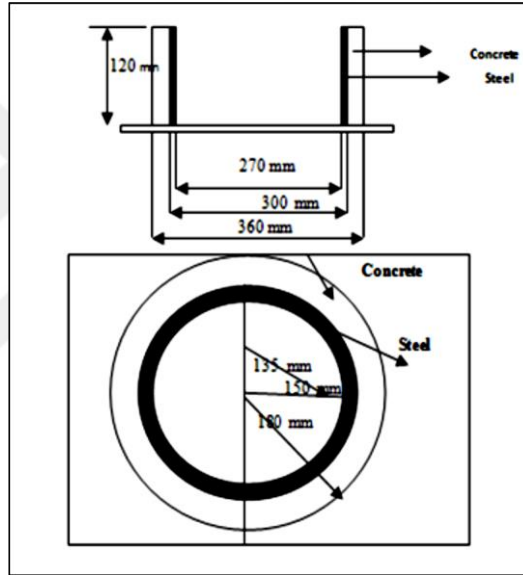
3.3.3.1 Kuruma büzülmesi

Kuruma büzülmesi deneyi için 25x25 mm'lik en kesite sahip, uzunluğu 280 mm olan prizmatik numuneler kullanılmıştır. Üretilen harç numunelerin nem kaybını önlemek için numune kalıpların altına ıslak bez konulduktan sonra üstü naylon örtü ile kapatılmıştır. Harç numuneleri kontrol numuneleri dışında vollastonit içeriğine göre sırasıyla %3, 6, 9 ve 12 oranlarda üretilmiştir. Üretilen harç numuneri yüzde yüz nemli ortamda 24 saat kür edildikten sonra referans boylar ölçmek için, ASTM C 157'ye (2017) uygun olarak 23 ± 2 °C ve 50 ± 5 bağıl neme sahip kabine alınır ve boy değişimleri ekstansometre ile ağırlık kayıpları ise terazi ile 60 gün boyunca ölçülmüştür.

3.3.3.2 Kısıtlanmış rötre

Halka kalıplar, taban kısmı, iç halka ve dış halka olmak üzere üç kısımdan oluşmaktadır. Halka numnesi Şekil 3.3'te görüldüğü gibi iç çapı 270 mm, dış çapı 360 mm, iç çapı 300 mm ve yüksekliği 120 mm olan çelik halka etrafına 30 mm kalınlığında beton üretilip dökülmüştür. Harç kalıplara üç aşamada doldurulmuş olup her aşamada vibrasyona tabi tutularak sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıbın tamamına

harç dökülerek iki dakika vibrasyona tabi tutularak harcın iyi bir şekilde kalıba yerleşmesi sağlanmıştır. Numuneler ilk 24 saat nem kaybını önlemek için uygun kür ortamında bekletilmiştir. Daha sonra numuneler kalıptan çıkarılıp yüzeylerin tamamına silikon sürülerek sıvandığıktan sonra kurumaya bırakılmıştır. Bundan sonra numuneler 23 ± 2 °C ve % 100 bağıl nemde tutulmuştur. Ölçümlerde çatlakların kaçınılmaz günde oluştuğu ve oluşan çatlakların genişliği özel mikroskop ile ölçülüp tespit edilmiştir. Bu ölçümler toplam 60 günde incelenmiştir. Numunelerin konulduğu oda ve numundeki çatlak ölçümüne ait görsel Fotoğraf 4.14’de gösterilmiş olup SV12’nin 19. gündeki ve SV0, SV3, SV6 ve SV9 ve SV12 numunelerinin 60 günde meydana gelen çatlaklar Fotoğraf 3.15, 3.16 ve 3.17’de görülmektedir.



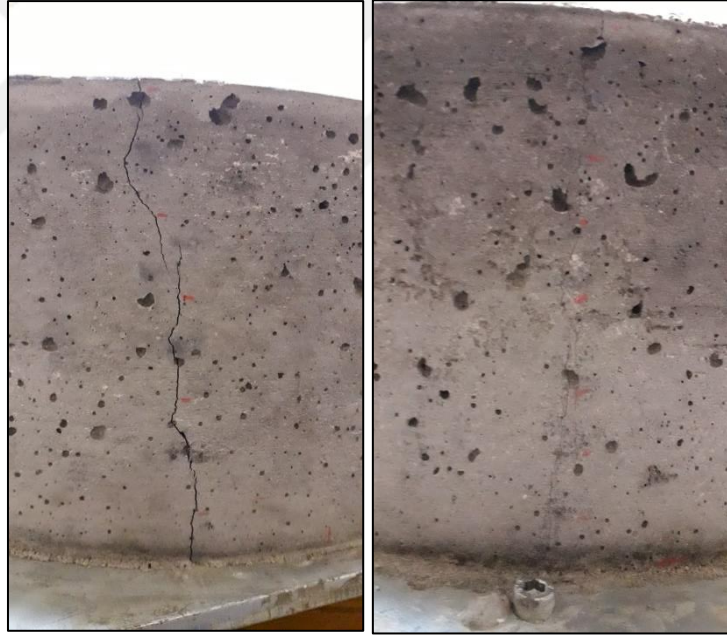
Şekil 3.19. Kısıtlanmış rötre halka örneği planı (Karagüller ve Yatağan, 2018)



a

b

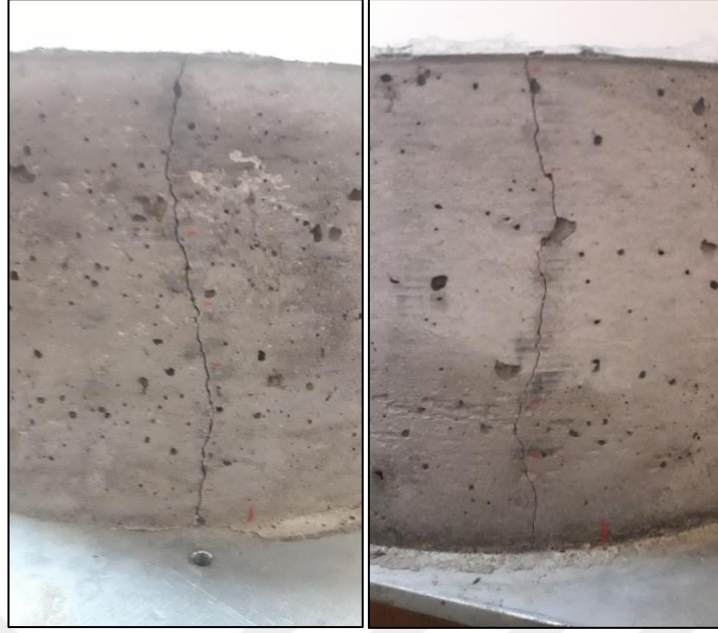
Fotoğraf 3.16. Numunelerin konulduğu ortam (a) ve numunedeki çatlakın özel mikroskop ile ölçülmesi (b)



a

b

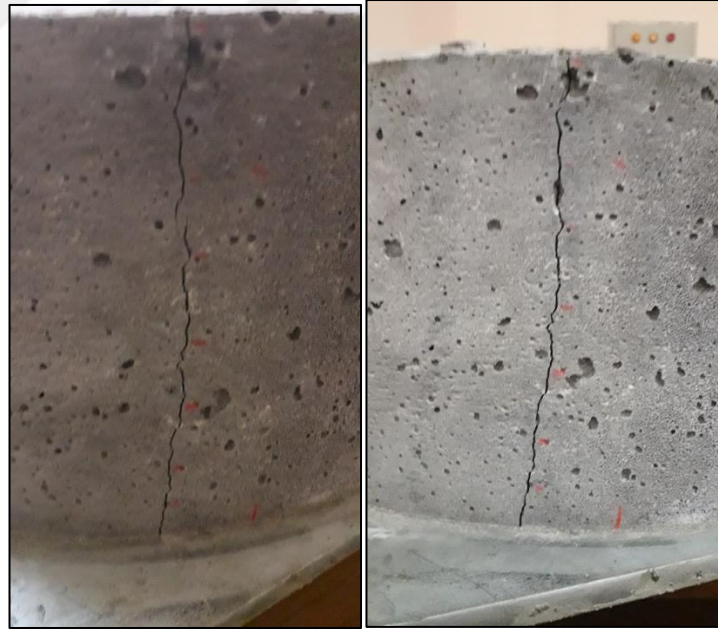
Fotoğraf 3.17. 60. günde, SV0'ın çatlak durumu (a) ve SV3'ün çatlak durumu (b)



a

b

Fotoğraf 3.18. 60. günde, SV6' nın çatlak durumu (a) ve SV9' un çatlak durumu (b)



a

b

Fotoğraf 3.19. SV12' nin 19. gündeki çatlak durumu (a) ve 60. gündeki çatlak durumu

BÖLÜM IV

BULGULAR VE TARTIŞMA

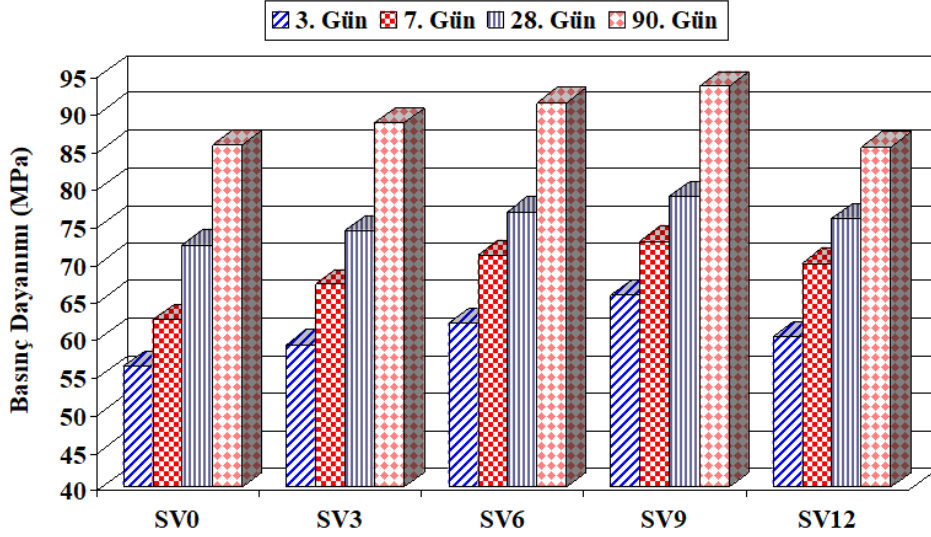
4.1 Basınç Dayanımı

YPH karışımlarının basınç dayanımı değişimleri Şekil 4.1’de grafiksel olarak gösterilmiştir. SV0, SV3, SV6, SV9 ve SV12 karışımlarının, 3. gündeki basınç dayanımları sırasıyla, 56.14, 58.98, 61.80, 65.59 ve 60.05 MPa ve 7. gündeki basınç dayanımları sırasıyla, 62.30, 67.00, 70.88, 72.81 ve 69.89 MPa olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde YPH’lerin 28. gündeki basınç dayanımları sırasıyla, 72.33, 74.17, 76.65, 78.69 ve 75.77 MPa ve 90. gündeki basınç dayanımları sırasıyla, 85.53, 88.47, 91.13, 93.35 ve 85.28 MPa olarak tespit edilmiştir. Test sonuçlarından açıkça anlaşılacağı üzere 4 test yaşı için de vollastonit miktarı arttıkça YPH’lerin basınç dayanımı artmakta ve bu artış %9 vollastonit içeriğine kadar (%9 dâhil) devam etmektedir. Bu çalışmaya paralel olarak, Mathur vd. (2007a), vollastonit mineralinin betonun basınç dayanımını artırdığını belirlemişlerdir. Buna ek olarak, Soliman ve Nehdi (2014) tarafından yapılan çalışmada vollastonit mikro fiberlerin kullanım oranının artmasıyla daha yüksek basınç dayanımı değerlerine ulaşılmıştır. Ayrıca, Soliman ve Nehdi (2012) vollastonit mineralinin ultra yüksek performanslı betonun çok erken yaştaki dayanımını da iyileştirdiğini göstermişlerdir. Kalla vd. (2013) ise vollastonit ve uçucu kül kombinasyonunu kullanarak yaptıkları çalışmada vollastonitin betonun basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini belirtmişlerdir.

Şekil 5.1’den görüldüğü üzere, %12 vollastonit içeriğinde, 3., 7., 28. ve 90. günlerde elde edilen basınç dayanımı değerleri VYPH9 karışımından daha az olmasına rağmen kontrol harcından daha yüksektir. Kumar ve Ramujee (2017), çimento yerine kullanılan vollastonit mineralinin hem 28. hem de 60. günde %10 seviyesine kadar harcın basınç dayanımını geliştirdiğini, %15 vollastonit içeriğinde ise bu gelişimin azaldığını belirlemişlerdir. %15 vollastonit içeriğinde basınç dayanımı %5 ve %10 seviyesinden daha düşük olmasına rağmen kontrol harcından daha yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte, Kalla vd. (2015), 3 farklı su/bağlayıcı (0.45, 0.50 ve 0.55) oranı kullanarak yaptıkları çalışmada, 0.45 ve 0.55 su/bağlayıcı oranlarında %10 vollastonit içeriğine kadar (%10 dâhil) basınç dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. %15 ve daha fazla vollastonit

içeriğinde ise elde edilen basınç dayanımının kontrol harcından daha az olduğunu belirlemişlerdir. 0.50 su/bağlayıcı oranında ise %10 vollastonit içeriğinde basınç dayanımının azalmaya başladığı %15 ve daha fazla vollastonit içeriği için basınç dayanımının kontrol harcından daha düşük olduğu belirlenmiştir. Tüm bu sonuçlar 90. gün için belirlenmiş olup, 7. ve 28. günler için de benzer sonuçların bulunduğu belirtilmiştir.

Vollastonit mineralinin YPH'nin hem erken hem de geç yaş basınç dayanımına olan geliştirici etkisi mineralin lifli yapısı (iğnemsî parçacık morfolojisi) ile açıklanabilmektedir (Kumar ve Ramujee, 2017). Ayrıca, vollastonit minerali, çimentoya göre daha ince bir tanecik yapısına sahiptir. Dolayısıyla çimento matrisi içerisine vollastonit ikamesiyle birlikte gözenek hacminde (0.5-0.1 µm) büyük bir daralma olduğu düşünülmektedir (Mathur vd., 2007a). Bundan dolayı vollastonit mineralinin kullanılmasıyla birlikte, 3., 7., 28. ve 90. günde vollastonitin çevresindeki geçiş bölgesinin, vollastonitin doldurucu etkisi ile beraber, mikro yapıdaki (çok küçük gözenekler) yoğunluğu artarken daha kompakt bir harç oluşmuştur (Mathur vd., 2007a; Wahab vd., 2017). Ayrıca bu artış, mikro çatlaklar arasında bağ kurma özelliğine sahip olan vollastonit mikro fiberlerin, ara yüzeydeki mikro fiber/matris bağ dayanımının bir fonksiyonunu oluşturması ile açıklanabilmektedir (Banthia ve Sheng, 1996; Hameed vd., 2009; Soliman ve Nehdi, 2014). Bu özel mineralin %12 oranında kullanımı karışımın basınç dayanımının düşmeye başlamasına neden olmuştur. Bu durum vollastonitin çimentoya yer değiştirme oranının % 9'a kadar matris yapısını yoğunlaştırması, %12'de ise matrisle olan bağın zayıflamaya başlaması ile ifade edilebilmektedir (Wahab vd., 2017).



Şekil 4.20. VYPH karışımlarının basınç dayanımları

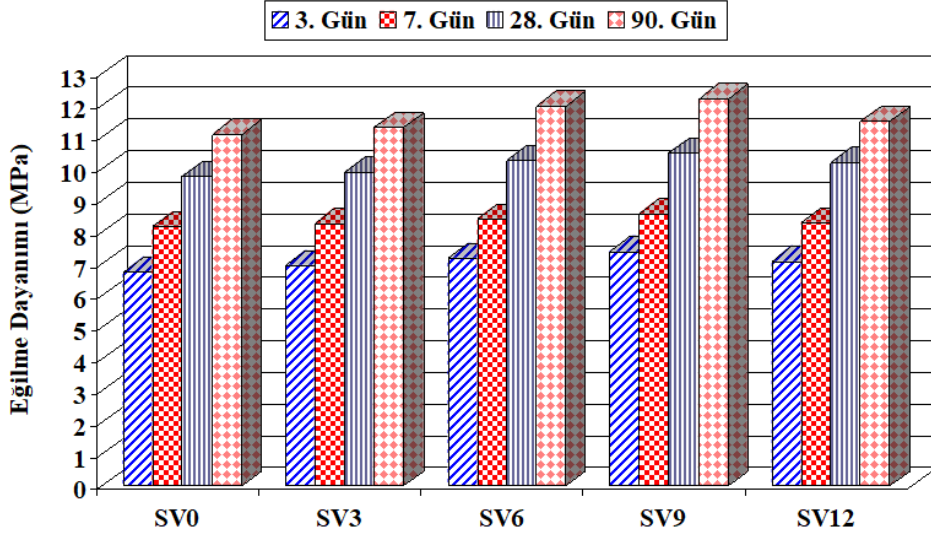
4.2 Eğilme dayanımı

Harç karışımlarının 3., 7., 28. ve 90. günlerdeki eğilme dayanımı değerleri, yapay vollastonitin çimentoyla yer değiştirme yüzdesine bağlı olarak Şekil 4.2'de sunulmaktadır. %0, %3, %6, %9 ve %12 oranlarında vollastonit içeriğine sahip olan VYPH karışımların, 3 günlük eğilme dayanımları sırasıyla, 6.75, 6.97, 7.20, 7.40 ve 7.10 MPa ve 7 günlük eğilme dayanımları sırasıyla, 8.20, 8.28, 8.43, 8.60 ve 8.30 MPa olarak belirlenmiştir. Aynı karışımların, 28 günlük eğilme dayanımları sırasıyla, 9.77, 9.90, 10.27, 10.50 ve 10.20 MPa ve 90 günlük eğilme dayanımları ise sırasıyla, 11.10, 11.30, 11.97, 12.20 ve 11.50 MPa'dır. Elde edilen verilere göre, YPH karışımlarının hem erken hem de geç yaş dayanımları için vollastonit içeriğinin artmasıyla birlikte karışımların eğilme dayanımları artmıştır. Bu sonuçlara paralel olarak, Soliman ve Nehdi (2012), ultra YPH karışımlarında vollastonit mikro fiberlerin varlığının mikro fiberler olmaksızın tasarlanan kontrol karışımına kıyasla eğilme dayanımı karakteristiklerini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Bununla birlikte, Mathur vd. (2007a), tarafından beton üzerinde yapılan çalışmada vollastonitin betonun eğilme dayanımını geliştirdiği belirtilmiştir.

%9 vollastonit içeriğine kadar (%9 dâhil) eğilme dayanımı artarken, %12 vollastonit içeriğinde eğilme dayanımı azalmıştır. Kalla vd. (2015), 3 farklı su/bağlayıcı (0.45, 0.50 ve 0.55) oranı kullanarak yaptıkları çalışmada, 0.45 ve 0.55 su/bağlayıcı oranlarında %10 vollastonit içeriğinde eğilme dayanımının azalmaya başladığını, %15 ve daha fazla vollastonit içeriği için eğilme dayanımının kontrol harcından daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Bununla birlikte, 0.50 su/bağlayıcı oranında ise %10 vollastonit içeriğine

kadar (%10 dâhil) eğilme dayanımının arttığı, %15 ve daha fazla vollastonit içeriğinde ise elde edilen eğilme dayanımının kontrol harcından daha az olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Wahab vd. (2017), harç üretiminde, vollastoniti çimento yerine %10, %20 ve %30 oranlarında kullanmışlar ve %20 ve %30 için sonuçların olumsuz olduğunu gözlemlemişlerdir. %10 vollastonit içeriğinde ise 2. gündeki eğilme dayanımının kontrole göre daha az olduğunu ancak 28. gündeki eğilme dayanımının kontrole çok yakın olduğunu tespit etmişlerdir.

Test sonuçları vollastonit mineralinin YPH'nin eğilme dayanımını geliştirdiğini ve bu gelişimin %9 vollastonit içeriğine kadar devam ettiğini göstermektedir. Eğilme dayanımındaki bu artış, vollastonit mineralinin lifli (iğnemsî) yapısı ve yüksek elastisite modülü (200 GPa) ile açıklanabilir (Kalla vd., 2015; Mathur vd., 2007a; Mathur vd., 2007b). Yük sonrası çimento matrisinin çatlaması ve vollastonit içeriğine bağlı olarak kırılmış yüzeyde meydana gelen değişimler incelendiğinde, vollastonit ile güçlendirilmiş çimento matrisinin sünekliği ve eğilme mukavemeti artmıştır (Mathur vd., 2007a). Bununla birlikte, vollastonit minerali, daha yüksek bir yük taşıma kapasitesine ulaşarak mikro çatlaklara köprü kuran mikro fiber yeteneğine sahiptir (Ding ve Kusterle, 2000; Hamoush vd., 2010; Soliman ve Nehdi, 2012; Soliman ve Nehdi, 2014). Böylece vollastonit kullanım yüzdesinin artmasıyla birlikte 3., 7., 28. ve 90. günlerde eğilme dayanımı artmıştır. Eğilme dayanımı değerlerinde, %12 vollastonit içeriğinde meydana gelen azalmanın nedeni ise vollastonit konsantrasyonunun %12' ye kadar yükselmesi sonucunda vollastonit mineralinin, matristeki bağı zayıflatması ile açıklanabilir (Wahab vd., 2017).

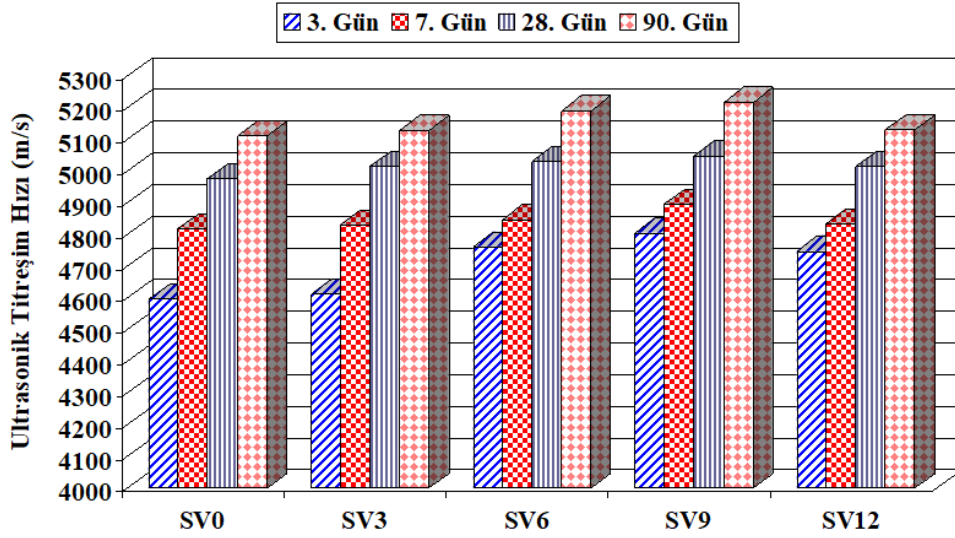


Şekil 4.21. VYPH karışımlarının eğilme dayanımları

4.3 Ultrasonik titreşim hızı

Ultrasonik titreşim hızı (UTH) değerleri m/s cinsinden ölçülerek belirlenmiş olup, VYPH karışımlarının UTH verileri Şekil 4.3’ te, grafiksel olarak sunulmuştur. VYPH’lerin UTH değerleri, basınç dayanımına paralel olarak değişmiştir. VYPH’lerin UTH değerleri, 4596-5217 m/s arasında değişmiş ve test yaşının artmasıyla birlikte artmıştır. Vollaştonit içeriğinin artması %9 seviyesine kadar UTH değerini artırmış, %9’dan sonra (%12 yer değiştirme seviyesi için) 4 test yaşı için de bu değer azalmıştır. UTH değeri, 3. günde, VYPH0 karışımında en düşük değerini alırken (4596 m/s), en yüksek değerine (5217 m/s) 90. günde, VYPH9 karışımında ulaşmıştır.

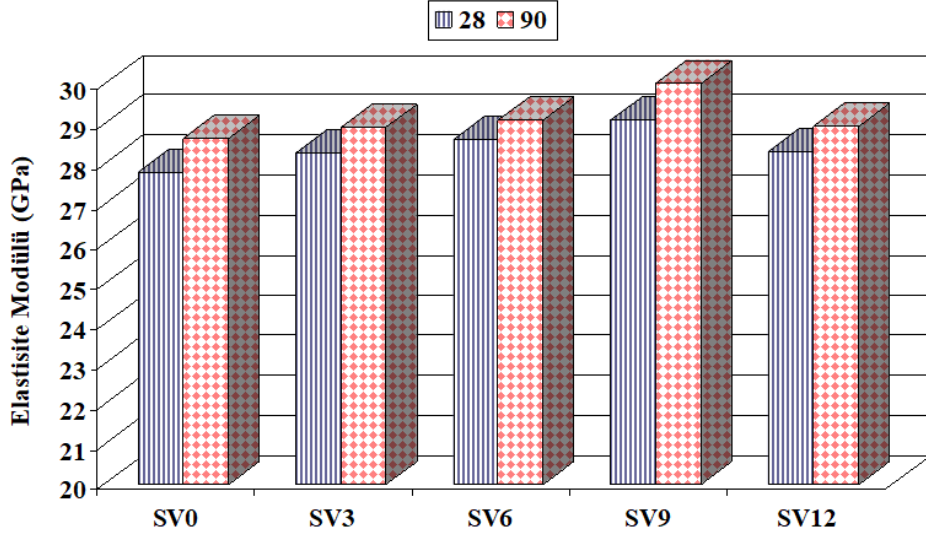
Malhotra’ya (1976) göre UTH ölçümünden elde edilen değer 4580 m/s’den yüksek ise bu sonuçlar “mükemmel” olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, tüm karışımlar için UTH verileri “mükemmel” olarak düşünülebilir. Vollaştonit mineralinin UTH üzerindeki bu geliştirici etkisi, bu mineralin çimentoya göre daha ince bir parçacık boyutuna sahip olması sayesinde harca kazandırdığı doldurucu etki ile açıklanabilir. Bu doldurucu etki sayesinde, %9 vollaştonit içeriğine kadar (VYPH9 dâhil) daha yoğun ve daha kompakt bir matris bağı oluşmuş olup, gözenek süreksizliği sağlanmıştır (Mathur vd., 2007a; Wahab vd., 2017). VYPH12 karışımında UTH değerlerinde meydana gelen azalmanın nedeni ise vollaştonit içeriğinin %12’ ye kadar yükselmesi sonucunda bu mineralin, matristeki bağı zayıflatmasıdır (Wahab vd., 2017).



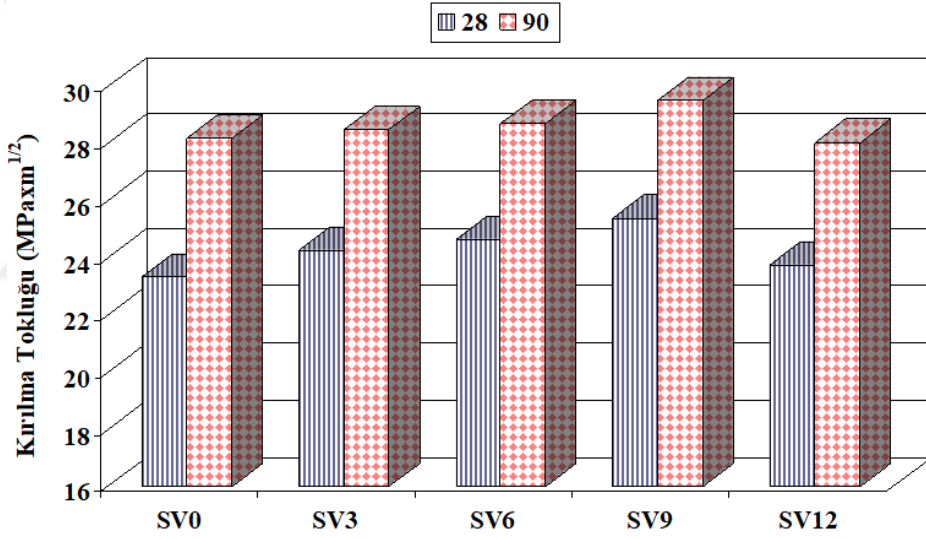
Şekil 4.22. VYPH karışımlarının ultrasonik titreşim hızı değerleri

4.4 Elastisite Modülü ve Kırılma Parametreleri

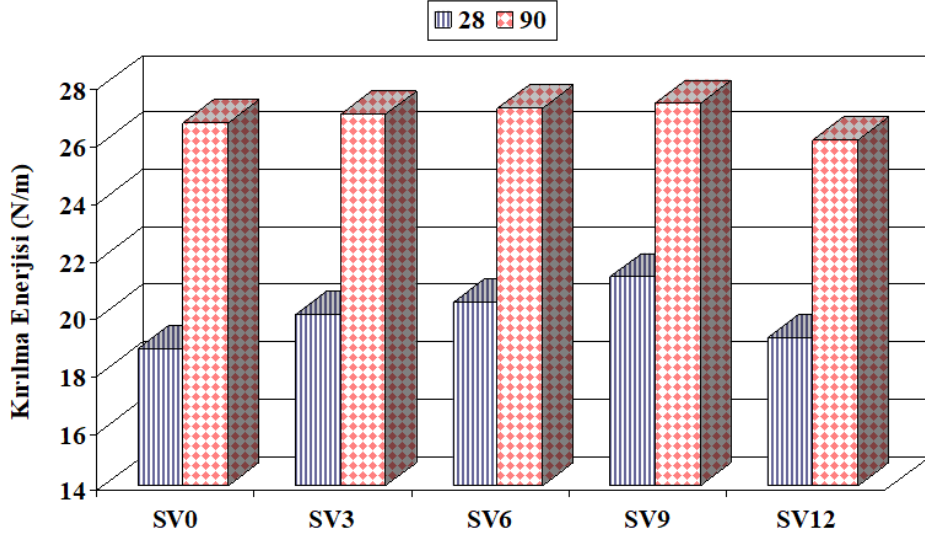
YPH karışımlarının 28. ve 90. günlerdeki, elastisite modülü, kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi değerleri sırasıyla, Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6'da sunulmuştur. YPH'lerin elastisite modülü değişimlerinin basınç dayanımına paralel olduğu ve en yüksek elastisite modülünün hem 28 hem de 90 gün için SV9 karışımına ait olduğu tespit edilmiştir. Karışımların kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi değerlerinin de SV içeriğinin artmasına bağlı olarak arttığı ve en yüksek değerlerin SV9 karışımından elde edildiği belirlenmiştir. Yüksek içnemselliğinin yanı sıra yüksek elastisite modülüne sahip olan SV mineralinin (200 GPa) bu özellikleri ile YPH'nin elastik sınırını artırdığı söylenebilir. Ayrıca bir lif gibi davrandığı önceki çalışmalarla (Öz ve Güneş, 2020; Yücel ve Özcan, 2019;) ispatlanan bu mineralin kırılma tokluğu deneyinde açılan ilk çatlaktan sonra yük uygulama sürecinde üzerine gelen yükü bir başka SV'ye aktardığı ve bu sayede YPH'nin kırılma tokluğu ve enerjisini artırdığı söylenebilir (Lawler vd., 2003).



Şekil 4.23. VYPH karışımlarının elastisite modülü değerleri



Şekil 4.24. VYPH karışımlarının kırılma tokluğu değerleri

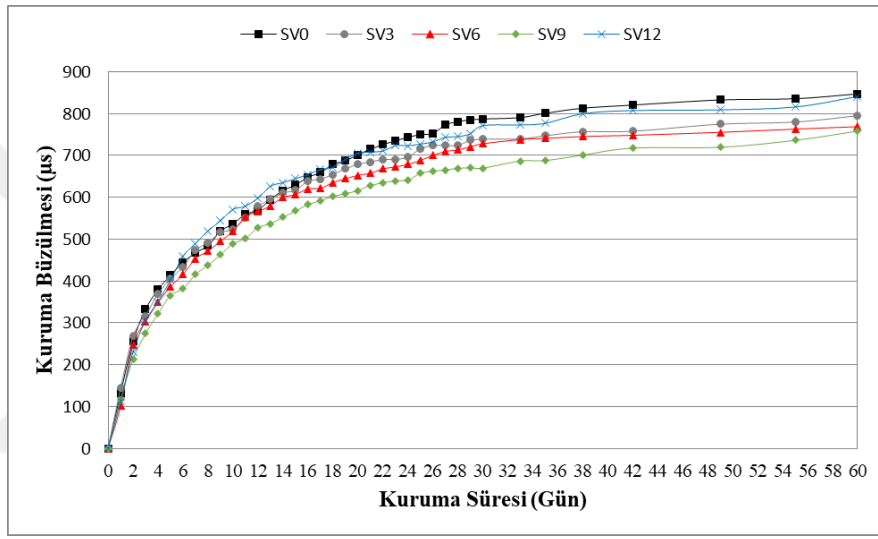


Şekil 4.25. VYPH karışımlarının kırılma enerjisi değerleri

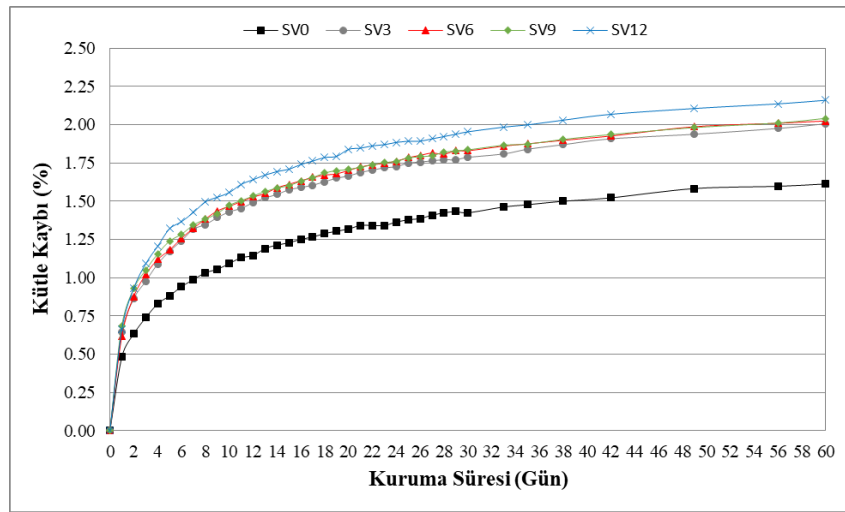
4.5 Kuruma Büzülmesi

YPH'lerin 60 günlük kuruma büzülmesi ve kütle kaybı değişimleri sırasıyla, Şekil 4.7 ve 4.8' de sunulmuştur. 60 günün sonunda en yüksek kuruma rötresi 846,8 μs ile SV0 karışımından elde edilirken, en düşük kuruma rötresi 757,9 μs ile SV9 karışımından elde edilmiştir. Şekil 4.7' deki genel eğilim, SV mineralinin, serbest kuruma büzülmesi deformasyonunu önemli ölçüde azaltabildiğini kanıtlamıştır. Bununla birlikte, SV12 karışımı YPH'nin kuruma büzülmesinin arttığı, ancak bu artışa rağmen SV0 karışımından daha düşük bir kuruma büzülmesi deformasyonuna sahip olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.8'den görüldüğü gibi YPH karışımlarının % kütle kaybı değerleri SV kullanım miktarı arttıkça artmış ve 60 günün sonundaki en yüksek kütle kaybı % 2,20 ile SV12 karışımından elde edilirken, en düşük kütle kaybı ise % 1,60 ile SV0 karışımından elde edilmiştir. Bununla birlikte, SV3, SV6 ve SV9 karışımlarının nihai kütle kayıplarının (%2) birbirine eşit olduğu tespit edilmiştir. Kuruma büzülmesi, nem kaybından dolayı beton/harç hacmindeki azalmadır (Soliman ve Nehdi, 2014). Ancak, mevcut çalışmadaki bilgilere göre % kütle kaybını kısmen artıran SV minerali, kuruma büzülmesini azaltmıştır. Bu nedenle, bu durum, vollastonit mikro-fiberlerin sağladığı gözenek yapısının süreksizliğiyle açıklanabilir (Soliman ve Nehdi, 2014). Wahab vd. (2017) vollastonitin kuruma rötresine etkisini araştırdıkları çalışmalarında, harç karışımı içerisinde vollastoniti çimento ve kum yerine ayrı ayrı %10, %20 ve %30 oranlarında kullanmışlardır. Sonuçlara göre, her iki deneme için de vollastonit miktarı arttıkça harç

karışımlarında uzunluk değişikliğinde azalma gözlemlenmiştir (Wahab vd., 2017). Mathur vd. (2007a) çimento/kumun kısmi ikamesi olarak vollastonit mikro-fiberlerin ve uçucu külün aynı kombinasyonunu kullanmışlar ve kuruma rötresinde azalma olduğunu tespit etmişlerdir. Hamedanimojarrad (2012) ve Galea vd. (2012) bir katkı maddesi olarak 4 µm parçacık büyüklüğünde toz vollastonit kullandıkları çalışmalarında vollastonit konsantrasyonunun artırılmasının kuruma rötresi miktarını azalttığını rapor etmişlerdir. Soliman ve Nehdi (2014), toplam büzülme sonuçlarının genel eğiliminin, artan vollastonit mikro-fiber içeriği ile toplam büzülmede aşamalı bir azalmayı gösterdiğini belirtmişlerdir.



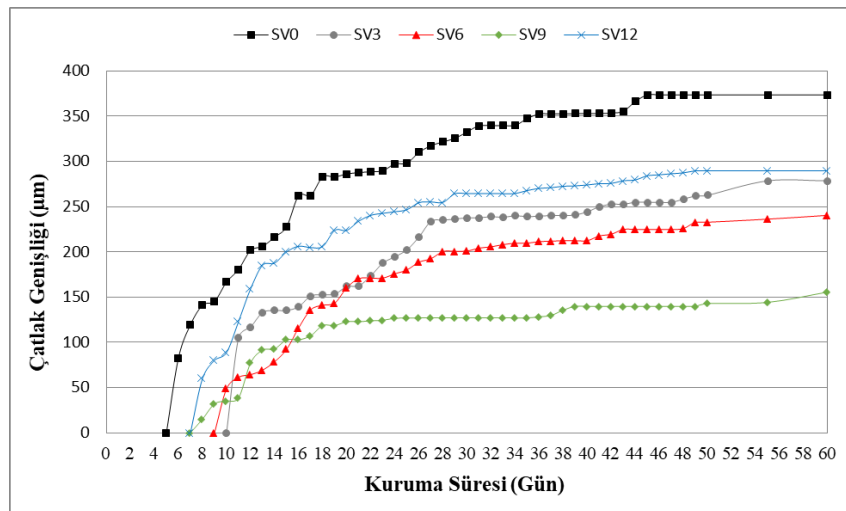
Şekil 4.26. VYPH karışımlarının kuruma büzülmesi



Şekil 4.27. VYPH karışımlarının kuruma büzülmesi kütle kaybı

4.6 Kısıtlanmış Rötire

Kısıtlanmış rötire numuneleri için ortalama bir çatlak genişliğinin tipik gelişimi Şekil 4.9’da verilmiştir. Ayrıca, her bir karışıma ait çatlak özellikleri Çizelge 4.1’de listelenmiştir. Şekil 4.9’da görüldüğü gibi, SV minerali arttıkça YPH’nin ortalama çatlak genişliği azalmıştır. Bununla birlikte, SV12’nin ortalama çatlak genişliği, SV9’a kıyasla bir miktar artmış, ancak yine de SV0, SV3 ve SV6 karışımlarından daha düşük çıkmıştır. Başka bir deyişle, SV mineralinin YPH’de oluşan toplam çatlak sayısını ve ortalama çatlak genişliğini %9 içeriğine kadar azalttığı Çizelge 4.1’de verilen listeden görülmektedir. Benzer şekilde, Asar vd. (2009) vollastonitin ultra yüksek performanslı betonda oluşan kısıtlanmış rötire çatlaklarını azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca, Soliman ve Nehdi (2013), ultra yüksek performanslı betonda çimento yerine %0, %4 ve %12 oranlarında ikame edilen vollastonit mikrofiberlerin çatlaklara karşı direnci artırdığını rapor etmişlerdir. Bilindiği üzere mikro-fiberler, genellikle mikro-çatlakları köprüler ve böylece çatlak genişliğinde azalmaya yol açarlar (Lawler vd., 2003; Soliman ve Nehdi, 2014). Bu bilgiye paralel olarak, iğnemsiz parçacık morfolojisine sahip olan SV mineralinin, bu özelliği sayesinde mikro-çatlaklara köprü kurarak YPH’de bir çatlak oluştuğunda, bu çatlak köprülediği ve mikro-fiber özelliğinden dolayı daha fazla açılmasını önlediği söylenebilir.



Şekil 4.28. VYPH karışımları kısıtlanmış rötire

Çizelge 4.7. Kısıtlanmış rötre çatlak genişlikleri ve sayıları

Karışımlar	Çatlak Genişliği (μm)	Çatlak Sayısı
	Ortalama	
SV0	374	2
SV3	279	3
SV6	240	3
SV9	156	3
SV12	290	3



BÖLÜM V

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında Yapay Vollaistonitin Yüksek Performanslı Harçların Boyutsal stabilite ve Kırılma Parametreleri Üzerine Etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla basınç, eğilme, ultrasonik titreşim hızı ve kırılma tokluğu deneyleri ile dayanım kriterleri tespit edilirken kuruma büzülmesi ve kısıtlanmış rötre deneyleri ile meydana gelen çatlakların yeri ve zamanı belirlenerek boyutsal stabilite özellikleri de belirlenmiştir. Yapılan bu deneysel çalışmaya dayanarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Son yıllarda vollaistonit mineralinin sağlığa zararlı olan tremolit ve serpantin asbest mineralleri yerine kullanılabilir olması bu mineral malzemeye olan ilginin gün geçtikçe artmasına olanak sağlamıştır.
- Vollaistonit mineralinin türüne bağlı olarak yapılan araştırma çalışmaları sonuçları incelendiğinde, her vollaistonitin beton üzerinde farklı etkileri olduğu görülmektedir. Dolayısıyla doğal veya sentetik olarak elde edilen vollaistonitin çeşidine bağlı olarak betonun kırılma parametreleri ve boyutsal stabilite özellikleri değişebilmektedir.
- Yapılan bu tez çalışmasında, basınç ve eğilme dayanımları %9 oranındaki vollaistonit içeriğine kadar artış sağladığı görülmüştür. Karışımın %12 oranındaki vollaistonit içeriğinde ise basınç ve eğilme dayanımı değerlerinde azalma olduğu saptanmıştır. Vollaistonit mineralin iğnemsisi yapısı, düşük su/çimento(0.33) oranı, çimento taneleri ile agrega taneleri arasındaki güçlü bağ kuvvetlerin oluşması dayanım kriterlerini olumlu etkilemiştir. Ayrıca vollaistonit mineralinin yüksek elastisite modülüne (200 GPa) sahip olmasından dolayı da eğilme dayanımında artışı sağlamıştır.
- Kırılma tokluğu ve kırılma enerjisi değerleri deney yaşına ve vollaistonit yüzdesine bağlı olarak artmıştır. Bu artış en fazla %9 oranında vollaistonit

içeriğindeki SV9 karışımında görülmüştür. Kırılma tokluğu ve kırılma enerjisinin 28. ve 90. günlerde, SV9 karışımın kontrol numunesine göre sırasıyla %16.13; % 28.46 oranlarında artış görülmüştür. Numunenin yük altında kırılmadan önce yükü başka SV'lere transfer etmesi, vollastonitin iğnemi morfolojik yapısı ve yüksek elastisite modülüne (200 GPa) sahip olması YPH'lerde bu artışı sağlamıştır.

- YPH'larda kısıtlanmış rötre ve kuruma büzülmesi davranışı açısından incelendiğinde diğer karışımlara kıyasla çatlak oluşumu ve kuruma büzülmesini azaltan optimum değer %9 oranındaki vollastonit içeriğindeki SV9 karışımında görülmüştür. İlk çatlak 5. günde kontrol numunesinde, vollastonit içeren karışımdaki ise 7. günde SV9 ve SV12 karışımlarında oluşmuştur. İlk çatlak SV3 ve SV6 karışımlarında 9. ve 10. günlerde olmasına rağmen çatlak genişliği en az SV9 (156 µm) karışımında ölçülmüştür. Vollastonit minerali, YPH'lerin çatlak oluşumunu geciktirdiği ve çatlak genişliğini minimuma indirmiş olduğu tespit edilmiştir.
- Ülkemizdeki vollastonit rezervlerinin değerlendirilmesi, çoğaltılması ve standartlara uygun olarak işletilerek inşaat sektörüne kazandırılması, ekonomik açıdan yapı sektörüne önemli katkılar sağlayacaktır. Ayrıca, vollastonitin çimento yerine belirli oranlarda kullanılmasıyla çimento üretiminden kaynaklı sera gazı yayılımına neden olan CO₂ oranı azalacak, böylece çimento tüketiminin azalmasıyla çevre ve iklim üzerindeki olumsuz etkisi de önlenmiş olacaktır. Beton sektöründe çimento yerine vollastonit gibi katkı malzemelerinin kullanımının sağlanarak YPH'ları performans kriterlerini artırmasının yanı sıra sürdürülebilir çevreye de olumlu katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

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

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

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

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

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

Akkaya, Y. ve Kesler, Y.E., “Mikro Kalsit Katkısının betonun İşlenebilirliğine, Mekanik Özelliklerine ve Dayanıklılığına Etkisi”, *İMO Teknik Dergi* 384, 6051-6061, 2012.

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

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

Akyüncü V. ve Cihan M., B., “Bazalt Tozu Katkılı Harçların Mekanik ve Geçirimlilik Özelliklerinin Araştırılması” Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Çorlu Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çorlu Kampüsü, Tekirdağ, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 21(2), 697-707, 2019.

Ali M.A. ve İlhan M., “Büzülme engelleyici katkıların harç karışımlarının basınç dayanımına, su emmesine ve kuruma-büzülmesine etkisi”, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22 (2), 417~426, 2018.

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 C-1581, “Standard Test Method for Determining Age at Cracking And Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar And Concrete Under Restrained Shrinkage”, *ASTM*, U.S.A., 2004.

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

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

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

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

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

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

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

Badogiannis, E. and Tsivilis, S., “Exploitation of poor Greek kaolins: durability of metakaolin concrete”, *Cem. Concr. Compos.* 31(2), 128–133, 2009.

Bai J., et al., “Strength development in concrete incorporating PFA and metakaolin”, *Mag. Concr. Res.* 52(3), 153–162, 2000.

Banthia, N. and Sheng, J., “Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites”, *Cem. Concr. Compos.* 18(4), 251-269, 1996.

Baradan, B., “Yapı Malzemesi II”, *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi*, Genişletilmiş 7. Baskı, İzmir, 221-222 s., 2004.

Baradan, B., Yazıcı, H. ve Ün, H. “Beton ve Betonarme Yapılarda Kalıcılık”, *1st ed. Türkiye Hazır Beton Birliği*, 2010.

Barnes, P. ve Bensted, J., “Structure and Performance of Cements”, *Second Edition. CRC Press, 584s*, London, 2001.

Bijen, J., “Benefits of slag and fly ash”, *Constr. Build. Mater.* 10, 309–314, 1996.
Blankendaal, T., Schuur, P. and Voordijk, H., “Reducing the environmental impact of concrete and asphalt: a scenario approach”, *J. Clean. Pro.* 66, 27-36, 2014.

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.

Bonavetti, V.L. and Irassar, E.F., “The effect of stone dust content in sand”, *Cem. Concr. Res.*, 24, pp. 580-590, 1994.

Briffaut W., Benboudjema M., Torrenti J.M, Nahas G., “A *thermal active restrained shrinkage ring test to study the early age concrete behaviour of massive structures*”, s4-30., 2010.

Cabrera, J. and Rojas, M.F.A., “Mechanism of hydration of the metakaolin–lime– water system”, *Cem. Concr. Res.* 31(2), 177–182, 2001.

Ciullo, P.A., “Industrial Minerals and Their Uses”, *Noyes Publications. New Jersey*, 607 p. 1996.

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

Caldarone, M.A., High-strength concrete: a practical guide, *CRC Press*, USA, 2008.

Çavdar Z., Sağlam A.R., “*Sika Teknik Bülten*”, Sayı:3, 1998.

Ceylan, H. ve Davraz, M., “Atık Andezit Tozu ve Uçucu Küllerin Betonda Kullanımının Karşılaştırılması”, *Doğ Afet Çev Derg; Cilt:5, Sayı:1*, 2019.

Chan J., X., Wong J., F., Hassan A., Mohamad Z., “Mechanical Properties of Wollastonite Reinforced Thermoplastic Composites: A Review”, *Polymer Composites*. 2020;41: 395–429, 2019.

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.

Choi, S.J., Lee, S.S. and Monteiro, P.J.M., “Effect of Fly ash fineness on temperature rise, setting, and strength development of mortar”, *ASCE. J. Mater. Civil. Eng.* 24, 499-505, 2012.

Ciullo, P.A., *Industrial Minerals and Their Uses*, *Noyes Publications*, New Jersey, 1996.

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

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.

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

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

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

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

Doğan Ü.A., “Yeni Kuşak Süperakışkanlaştırıcıların Harç ve Beton Özelliklerine Etkisi” , *Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 2000.

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

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

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

DUR, A., “Silis Dumanı ve Süperakışkanlaştırıcı Katkılı Çimento Harçlarının Özellikleri”, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, Ankara, 93s, 2003.

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.

Güler, T., Polat, E., “MERMER MADENCİLİĞİNDE ÇEVRESEL YAKLAŞIMLAR”, **MUĞLA BÜYÜKŞEHİR BELEDİYESİ KÜLTÜR YAYINLARI – 6**, Akademik Yayın Dizisi: 1 MUĞLA, 2018.

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

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

Görhan, G., “Farklı Sıcaklıklarda Sinterlenmiş Metakaolin Esaslı Geopolimer Harç Özelliklerinin Araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 015601 (83-89), 2020.

Güler, T. ve Polat, E. “Mermer Madenciliğinde Çevresel Yaklaşımlar”, **Muğla Büyükşehir Belediyesi Kültür Yayınları-6**, Akademik yayım dizisi: 1, Muğla, 2018.

Güneş, M., “Vollastonit katkılı yüksek performanslı harçların mekanik ve durabilite özellikleri”, *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, 2018.

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

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

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

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

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

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

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

Holt E. E., “*Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete*, *VTT Building and Transport*”, s9-31., 2001.

Holt E.E., “Early Age Autogenous Shrinkage of Concrete”, Publication of Technical Research Centre of Finland, 446: pp184. Retrieved from <http://www.vtt.fi/inf/pdf/publications/2001/P446.pdf>, 2001.

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

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.

Indian Minerals Yearbook 2018, “WOLLASTONITE”, Government of India Ministry of Mines, Indian Bureau of Mines Indira Bhavan, Civil Lines, *NAGPUR – 57th Edition*, 440 001, 2019.

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

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

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

Keskin, Ü.S., Çöğürtçü, M.T., ve Uzun, M., “Cam Tozunun Basınç Dayanımına Etkisi”, *Beykent Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Cilt Sayı:11/2, 2018.

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

Khyaliya, R.K., Kabeer, K.I.S.A. and Vyas A.K. ., “Evaluation of strength and durability of lean mortar mixes containing marble waste” *Constr. Build. Mater.*, 147, pp. 598-607, 2017.

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

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

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

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

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

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

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

Mailer, Y., “Presentation du projet national: voies nouvelles du materiau beton, Les betons a hautes performances du materiau a l’ouvrage”, *Presses de l’ecole Nationale Des Ponts et Chaussees, Paris*, s.15-19, 1990.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Niş, A., “Mineral katkılı betonların kimyasal durabilitesinin toplam bağlayıcı miktarı ve eşdeğer su/çimento parametreleriyle beraber incelenmesi”, *BAUN Fen Bil. Enst. Dergisi*, 21(1), 459-473, (2019).

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

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

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

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

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

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

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

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

Pozo-Antonio, J.S., “Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate”, *Constr. Build. Mater.*, 77, pp. 472-478, 2015.

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

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.

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.

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.

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

Raoufi K., Pour-Ghaz M., Poursaei A., Weiss J., “Restrained Shrinkage Cracking in Concrete Elements: Role of Substrate Bond on Crack Development”, *Journal of Materials Civil Engineering ASCE*, June 2011, s3-8., 2011.

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

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

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

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

Sarıöz, K., “Endüstriyel Hammaddeler ve Madencilik”, *Anadolu Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Yayınları*, 1992.

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

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

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

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

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

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

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

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

Şimsek, O., “*Beton ve Beton Teknolojisi*”, 2. Baskı, Seçkin Yayıncılık, Ankara, 2007.

Soliman A.M., “Early-age shrinkage of ultra highperformance concrete: mitigation and compensating mechanisms”, *Doktora Tezi, Western Ontario Üniversitesi*, 2011.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Tafraoui, A., Escadeillas, G. and Vidal, T., ‘‘Durability of the ultra high performances concrete containing metakaolin’’, *Constr. Build. Mater.* 112, 980-987, 2016.

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

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

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

Temiz, H., Kose, M.M. and Koksal, S., ‘‘Effects of Portland composite and composite cements on durability of mortar and permeability of concrete’’, *Constr. Build. Mater.* 21(6), 1170-1176, 2007.

Topal, A. ve Şengöz, B., ‘‘Agrega Boyutu ve Köşeliliğinin Alkali-Silis Reaksiyonu Üzerine Etkisi’’, *9 Eylül Üniversitesi*, İzmir, 2011.

Topçu, İ., B. ve Canbaz, M., ‘‘Eskişehir Bölgesi Agregalarının Özellikleri’’, *IV. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, Bildiriler Kitabı*, Aralık, İstanbul, 257-263, 2006.

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

Transportation Research Board, *Paper 07- 0022*, Washington, 2007.

TS 706 EN 12620+A1, “*Beton Agregaları*”, TSE., Ankara, 2009.

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

Tulga, İ. Ve Kılınc, K., “Uçucu Kül Kullanımının Farklı Dayanım Sınıflarındaki Betonların Mekanik ve Durabilite Özellikleri Üzerindeki Etkisi”, *Kırklareli University Journal of Engineering and Science* 4-2 212-236, 2018.

Türk, K., Karataş, M., Tuğut, P. ve Benli, A. “Farklı Tip ve Miktarda Puzolan İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Dayanımı ve Elastisite Modülü Arasındaki İlişki”, *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 16, Sayı 3, Sayfa 247-253, 2010.

Türkel, S., ve Tevrici, M.M., “Metakaolin ve Akışkanlaştırıcı Katkı Kullanımının Harçların Mekanik Performansına ve Bazı Durabilite Özelliklerine Etkileri”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19(1), 40-46, 2015.

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.

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

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”, 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.

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

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

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.

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.

Wikimedia Commons Has Media Related To “Wollastonite”, *Oxford University MSDS Sheet*, 2020.

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

Yalçınkaya Ç., Yazıcı H., “Effects of ambient temperature and relative humidity on early-age shrinkage of UHPC with high-volume mineral admixtures”, *Constr. Build. Mater.* 144, 252-259, 2017.

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

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

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

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

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

Yücel H.E. ve Özcan S. “Çimento mukavemet özellikleri ve mikroyapısal özellikleri yeni bir ile üretilen sentetik wollastonit içeren harçlar teknik”, *İnşaat ve Yapı Malzemeleri*, 223, 165–176, 2019.

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

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

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

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

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

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

ÖZGEÇMİŞ

Yunus SEVER, ilk, orta ve lise öğrenimini Adıyaman'da tamamladı. 2006 yılında Adıyaman Üniversitesi İnşaat Teknolojisi Bölümünde Haziran 2008 yılında bölüm birinciliğiyle mezun oldu. 2012 yılında Nevşehir Üniversitesi'nde İnşaat Teknikeri olarak göreve başladı. 2017 yılında Aksaray Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde mezun oldu. 2017 yılında Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesinde Yüksek Lisans Öğrenimine başladı. 2018 yılında Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesinde İnşaat Mühendisliği görevine başladı.

