

**T.C.
YOZOK BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**GENLEŞTİRİLMİŞ VERMİKÜLİT TOZU İLE
MODİFİYE EDİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN
YÜKSEK SICAKLIK DİRENÇLERİ**

Turan NAZLI

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL**

Yozgat 2018

**T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

Yüksek Lisans Tezi

**GENLEŞTİRİLMİŞ VERMİKÜLİT TOZU İLE
MODİFİYE EDİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN
YÜKSEK SICAKLIK DİRENÇLERİ**

Turan NAZLI

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL**

**Bu çalışma, Yozgat Bozok Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi
tarafından 6601-FBE/17-112 kodu ile desteklenmiştir.**

Yozgat 2018

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Tezli Yüksek Lisans Programı 70110710007 numaralı öğrencisi Turan NAZLI'nın hazırladığı “**Genleştirilmiş Vermikülit Tozu ile Modifiye Edilmiş Çimento Esaslı Harçların Yüksek Sıcaklık Dirençleri**” başlıklı tezi ile ilgili tez savunma sınavı, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri gereğince 27/12/2018 Perşembe günü saat 14:00'da yapılmış, tezin onayına oy çokluğu / oy birliğiyle karar verilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Okan KARAHAN

Jüri Üyesi (Danışman) : Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Yuşa ŞAHİN

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun ..10.../...01.../19 tarih ve ..2... sayılı Enstitü Yönetim Kurulu Kararı ile onaylanmıştır.

..10.../...01.../2019'

Prof. Dr. Mustafa SACMACI
Müdür



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1. Harçlar	3
2.1.1. Harcın Tarihçesi	5
2.1.2. Harç Üretim Yöntemi.....	5
2.1.3. Harçta Bulunması Gereken Özellikler	6
2.1.4. Harçların Sınıflandırılması.....	7
2.1.5. Yapılarda Harç Kullanımın Yeri ve Amacı	7
2.2. Harçların Dayanımına Etki Eden Faktörler.....	8
2.2.1. Çimento ile ilgili faktörler.....	8
2.2.2. Agrega ile ilgili faktörler.....	9
2.2.3. Karışım suyu ile ilgili faktörler	10
2.2.4. Mineral katkı maddeleri ile ilgili faktörler.....	11
2.2.5. Deney yöntemi ile ilgili faktörler	12
2.3. Vermikülit	12
2.3.1 Başlıca Vermikülit Çeşitleri	15
2.3.1.1. Kil Vermikülitler	15
2.3.1.2. Otijenik Vermikülit	16
2.3.1.3. Metamorfik Vermikülit	16
2.3.1.4. Makroskopik Vermikülit	17
2.3.2. Vermikülitin Dünyada ve Türkiye’deki Mevcut Durumu	18
2.3.3. Genleştirilmiş Vermikülitin Üretim Yöntemi	21
2.3.4. Vermikülitin Özellikleri	24
2.3.4.1. Fiziksel Özellikleri	24

2.3.4.2. Kimyasal Özellikleri	26
2.3.5. Vermikülitin Kullanım Alanları	27
2.3.5.1. Hafif Beton ve Harçlar	28
2.3.5.2. Sıcaklığa Dayanıklı Sıva	28
2.3.5.3. Isı ve Ses Yalıtımı	29
2.3.5.4. Yangından Korunma	30
2.3.5.5. Yüksek Sıcaklık İzolasyonu	30
2.3.5.6. Su Yalıtımı	31
2.3.5.7. Isı ve Ses Yalıtım Levhaları	31
2.4. Yüksek Sıcaklık	32
2.4.1. Yüksek Sıcaklık Kaynakları	32
2.4.2. Beton ve Harçlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi	33
3. DENEYSSEL ÇALIŞMA	37
3.1. Kullanılan Malzemeler	37
3.1.1. Çimento	37
3.1.2. Agregası	40
3.1.3. Karışım Suyu	42
3.2. Karışım Oranları ve Üretim	42
3.2.1. Numune Üretimi	44
3.3. Deneysel Yöntemler	46
3.3.1. Taze Harç Deneyleri	46
3.3.1.1. Birim Ağırlık Deneyi	46
3.3.1.2. Yayılma Tablası Deneyi	46
3.3.2. Numunelerin Sıcaklık Etkisi Uygulaması	46
3.3.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri	47
3.3.3.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Deneyleri	47
3.3.3.2. Eğilme Dayanımı Tayini	48
3.3.3.3. Basınç Dayanımı	49
3.3.2.4 Ultrases Geçiş Hızlarının Belirlenmesi	50
4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	51
4.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık	54
4.2. Su Emme	61

4.3. Porozite	67
4.4. Ultrases Geçiş Hızı.....	73
4.5. Eğilme Dayanımı	79
4.6. Basınç Dayanımı	85
5. SONUÇLAR	91
KAYNAKLAR	93
ÖZGEÇMİŞ	122



GENLEŞTİRİLMİŞ VERMİKÜLİT TOZU İLE MODİFİYE EDİLMİŞ ÇİMENTO ESASLI HARÇLARIN YÜKSEK SICAKLIK DİRENÇLERİ

Turan NAZLI

**Yozgat Bozok Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi**

2018; Sayfa: 98

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

ÖZET

Bu tez genleştirilmiş vermikülit tozunun belirli oranlarda ince agrega ile yer değiştirmesi ile üretilecek harçların yüksek sıcaklığa karşı dirençlerinin araştırılmasını kapsamaktadır. Harç karışımlarında vermikülit tozu %0, %15, %30 ve %45 oranlarda ince agrega ile yer deđiŐtirmiŐtir. Bu Şekilde üretilen portland ve kalsiyum alimünat çimento esaslı harçlar 28 gün boyunca standart kür uygulandıktan sonra laboratuvar Őartları altındaki, ayrıca 300 °C, 600 °C, ve 900 °C’de sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki fiziksel ve mekaniksel özellikleri belirlenmiştir. Numuneler üzerinde birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, ultra ses hızı ve mekanik dayanımların belirlenmesi için basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır.

Genleştirilmiş vermikülit tozunun portland veya alüminatlı çimentolu standard harçlarda bileşim malzemesi olarak kullanımı ile yangına dayanıklı çimento esaslı kompozit yapı malzemesi üretilebileceği, ayrıca yapılarda kullanılan ısı yalıtım sıvalarında ince malzeme bileşeni olarak kullanılabileceği sonucuna varılmıştır.

HIGH TEMPERATURE RESISTANCE OF MORTARS MODIFIED WITH EXPANDED VERMICULITE POWDER

Turan NAZLI

**Yozgat Bozok University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering
Master of Science Thesis**

2018; Page: 98

Thesis Supervisor: Professor Fuat KÖKSAL

ABSTRACT

This thesis concerns the investigation of mortars, produced by using expanded vermiculite powder as a replacement of fine aggregate, at high temperatures. In mortar mixes, expanded vermiculite powders are replaced with fine aggregate as percentages of 0%, 15%, 30% ve 45%. Specimens produced were first kept in standard curing until 28 days, and then physical and mechanical tests were made on specimens subjected to 300 °C, 600 °C, ve 900 °C and, also on specimens under laboratory ambient temperature (reference specimens). Physical properties tests such as unit weight, water absorption, porosity, ultrasound velocity and also compression and flexural tests for mechanical properties were made on specimens.

It can be concluded that cement based fired-resistant composites by using expanded vermiculite powder as an ingredient in mortars can be produced and expanded vermiculite powder can be used as a fine aggregate in thermal isolation mortars.

TEŞEKKÜR

Her Őeyden önce gerek yüksek lisans eğitimim süresince ve gerekse tüm tez çalışmalarımın başından sonuna her aşamasında bilgi ve tecrübeleri ile her konuda yardımcı olan değerli hocam Sayın Prof. Dr. Fuat KÖKSAL'a en içten teşekkürlerimi sunmak isterim.

Yüksek lisans eğitim süresi boyunca üzerimde emekleri bulunan Yozgat Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde görevli değerli hocalarıma, eğitim sürem boyunca sağladıkları kolaylıklardan dolayı Yozgat İl Özel İdaresi Proje ve Yapım İşleri Bürosunda çalışan tüm iş arkadaşlarıma ve Büro Yöneticimiz Sayın İzzet GÖK'e, deneysel çalışmalarımın tamamında yardımcı olan İnş. Müh. Kübra KILIÇ'a, İnş. Yük. Müh. Eyüp TAŐKAN'a ve laboratuvar görevlisi Hayrullah GÜLER'e teşekkür ederim.

Hayatımın her aşamasında maddi manevi her konuda tüm desteklerini esirgmeden sunan sevgili eşim Demet AKTÜRK NAZLI'ya rahmetli babam Duran NAZLI'ya, sevgili annem Sultan NAZLI'ya sonsuz teşekkür ederim.

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. Harçların yapıdaki kullanılma yerleri [14].....	8
Tablo 2.2. Ticari Değerleri Olan Vermikülitlerin Kimyasal Analizleri [34]	13
Tablo 2.3. Dünyada Bulunan Mevcut Vermikülit Rezervleri Dağılımı (ton)[39].....	18
Tablo 2.4. Dünyadaki Vermikülit Üretimi [41].....	19
Tablo 2.5. Vermikülitin Tane Boyu Dağılımına Göre Sınıflandırılması [29].....	25
Tablo 2.6. Amerika’da Kullanılan Saf Vermikülitin Tane Boyu ve Yoğunluğuna Göre Sınıflandırılması [36]	25
Tablo 2.7. Amerika’da Kullanılan, Saf Vermikülitin Elekten Geçen Miktarı ve Yoğunluğuna Göre Sınıflandırılması [30].	26
Tablo 2.8. Tipik Vermikülitin Kimyasal Analizi [45].....	27
Tablo 3.1. CEM I 42,5 R Tipi Çimento Özellikleri	38
Tablo 3.2. Alüminatlı Çimento Özellikleri.....	39
Tablo 3.3. Genleştirilmiş Vermikülit Tozu Tane Boyutu Dağılımı	41
Tablo 3.5. Portland Çimentosu ve Alüminatlı Çimento için harç karışım miktarları	43
Tablo. 4.1. Numunelerin Kuru Birim Ağırlık Deney Sonuçları.....	55
Tablo. 4.2. Numunelerin Su Emme Deney Sonuçları	61
Tablo. 4.3. Numunelerin Porozite Deney Sonuçları.....	67
Tablo. 4.4. Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları Deney Sonuçları.....	73
Tablo. 4.5. Numunelerin Eğilme Dayanımları Deney Sonuçları	79
Tablo 4.6. Numunelerin Basınç Dayanımları Deney Sonuçları	85

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Binalarda ısı köprüleri (a: iki yapı elemanı arası, b: yapı elemanı ile taşıyıcı eleman arası) [15].....	5
Şekil 2.2. İşlenmemiş Ham Vermikülit [32].....	13
Şekil 2.3. Isıya Tabi Tutulmuş Vermikülit [32].....	14
Şekil 2.4. Kil Vermikülit [36].....	15
Şekil 2.5. Metamorfik Vermikülitin Mikro Yapısı [36]	17
Şekil 2.6. Vermikülitin Dünyada Kullanım Alanları [41]	20
Şekil 2.7. Vermikülitin Üretim Aşamaları [44]	22
Şekil 2.8. Düşey Fırında Vermikülitin Genleştirilmesi [45].....	22
Şekil 2.9. Genleştirilmiş Vermikülit Üretiminde Kullanılan Eğimli Fırın [45].....	23
Şekil 2.10. Genleştirilmiş Vermikülit Üretiminde Kullanılan Döner Fırın [45].....	23
Şekil 2.11. Genleştirilmiş Vermikülit Üretiminde Kullanılan Toroidal Fırın [45]....	24
Şekil 2.12. Vermikülitin Hafif Beton Uygulaması [47].....	28
Şekil 2.13. Vermikülitin Sıva Uygulaması [47]	29
Şekil 2.14. Vermikülitin Çatı Yalıtım Uygulaması [47].....	29
Şekil 2.15 Vermikülitin Yangından Koruma Uygulamaları [47]	30
Şekil 2.16. Vermikülitin Üretiminde İzolasyon Malzemesi Uygulaması [47]	30
Şekil 2.17. Vermikülitin Su Yalıtımı Uygulaması [47]	31
Şekil 2.18. Vermikülitin Isı Yalıtım Uygulaması [47]	31
Şekil 3.1. İnce Agreganın Tane Dağılım	40
Şekil 3.2. Çalışmada Kullanılan Genleştirilmiş Vermikülit Tozu	41
Şekil 3.3. Genleştirilmiş Vermikülit Tozu Tane Boyutu Dağılımı Eğrisi	42
Şekil 3.4. 24 Saat Kalıpta Bekletilen Numuneler	45
Şekil 3.5. 28 Günlük Numuneler	45
Şekil 3.6. Yayılma Tablası Deney Aleti	46
Şekil 3.7. Eğilme Deney Düzeneği	48
Şekil 3.8. Basınç Dayanımı Deney Düzeneği	49
Şekil 3.9. Ultra Ses Geçiş Hızının Belirlenmesi	50
Şekil 4.1. Numunelerin 300 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu.....	51

Şekil 4.2. Numunelerin 600 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu.....	52
Şekil 4.3. Numunelerin 900 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu.....	52
Şekil 4.4. Numunelerin 300 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu.....	53
Şekil 4.5. Numunelerin 600 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu.....	53
Şekil 4.6. Numunelerin 900 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu.....	54
Şekil 4.7. %0 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Kuru Birim Ağırlığın Değişimi	56
Şekil 4.8. %15 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Kuru Birim Ağırlığın Değişimi	57
Şekil 4.9. %30 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Kuru Birim Ağırlığın Değişimi	58
Şekil 4.10. %45 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Kuru Birim Ağırlığın Değişimi	59
Şekil 4.11. Numunelerin Kuru Birim Ağırlığının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento)	60
Şekil 4.12. Numunelerin Kuru Birim Ağırlığının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento)	60
Şekil 4.13. %0 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Su Emme Oranın Değişimi	62
Şekil 4.14. %15 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Su Emme Oranın Değişimi	63
Şekil 4.15. %30 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Su Emme Oranın Değişimi	64
Şekil 4.16. %45 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Su Emme Oranın Değişimi	65
Şekil 4.17. Numunelerde Su Emme Oranın Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento)	66
Şekil 4.18. Numunelerde Su Emme Oranın Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento)	66
Şekil 4.19. %0 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Porozitenin Değişimi...	68
Şekil 4.20. %15 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Porozitenin Değişimi..	69
Şekil 4.21. %30 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Porozitenin Değişimi..	70

Şekil 4.22. %45 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Porozitenin Değişimi..	71
Şekil 4.23. Numunelerde Porozitenin Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento).....	72
Şekil 4.24. Numunelerde Porozitenin Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento).....	72
Şekil 4.25. Vermikülitli Numunelerin Ultrases Geçiş Hızının Sıcaklığa Bağlı Değişimi	74
Şekil 4.26. %15 Vermikülit Oranlı Numunelerin Ultrases Geçiş Hızının Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....	75
Şekil 4.27. %30 Vermikülit Oranlı Numunelerin Ultrases Geçiş Hızının Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....	76
Şekil 4.28. %45 Vermikülit Oranlı Numunelerin Ultrases Geçiş Hızının Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....	77
Şekil 4.29. Numunelerin Ultrases Geçiş Hızlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento).....	78
Şekil 4.30. Numunelerin Ultrases Geçiş Hızlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento)	78
Şekil 4.31. Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Eğilme Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi	80
Şekil 4.32. %15 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Eğilme Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi	81
Şekil 4.33. %30 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Eğilme Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi	82
Şekil 4.34. %45 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Eğilme Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi	83
Şekil 4.35. Numunelerin Eğilme Dayanımlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento).....	84
Şekil 4.36. Numunelerin Eğilme Dayanımlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento)	84
Şekil 4.37. Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Basınç Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....	86

Şekil 4.38. %15 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Basınç Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi	87
Şekil 4.39. %30 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Basınç Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi	88
Şekil 4.40. %45 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Basınç Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi	89
Şekil 4.41. Numunelerin Basınç Dayanımlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento)	90
Şekil 4.42. Numunelerin Basınç Dayanımlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alimünatlı Çimento)	90

KISALTMALAR LİSTESİ

ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ACI	: Amerikan Beton Enstitüsü
AÇ	: Alüminatlı Çimento
ASTM	: Amerikan Malzeme Testleri Birliği
BHA	: Birim Hacim Ağırlık
EN	: Avrupa Standardı
MTA	: Maden Teknik ve Arama
MPa	: Megapaskal
PÇ	: Portland Çimento
RPC	: Reaktif Pudra Betonu
RILEM	: Uluslararası Yapı Malzemeleri, Sistemler ve Yapılar Laboratuvarları ve Uzmanları Birliği
SD	: Silis Dumanı
TS	: Türk Standardı
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton
E	: Elastik Modül
YFC	: Yüksek Fırın Cürufu
V_s	: Ultrases Geçiş Hızı
V_v	: Vermikülit Oranı
Σ_b	: Basınç Dayanımı
σ_e	: Eğilme Dayanımı
S/Ç	: Su / Çimento oranı
Y.Y.	: Yüzyıl

1. GİRİŞ

Tarihte karşımıza çıkan ilk harç uygulamaları kil harçları olarak bilinmektedir. Harçlar, bağlayıcı malzeme endüstrisinin gelişimiyle Mısır'da alçı, Roma'da kireç ve puzzolanik, Osmanlılarda Horasan, XVIII. y.y. Avrupa'sında çimento harçları olarak yapıdaki uygulama alanına girmiştir [1].

Yapıların durabilite problemine neden olan yüksek sıcaklığın beton ve beton yapı elemanlarına olan etkisinin araştırılması 1920 yıllarına kadar varmaktadır [2-3]. Yapılan çalışmalarda yangın esnasında ve akabinde yapı malzemelerinin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğünün anlaşılması hedeflenmiştir [4]. Yapı ve malzemelerine zarar veren veya hasara yol açan yüksek sıcaklık kaynakları, yangın, özel üretimlerden dolayı endüstri fırın bacalarında görülen sıcaklık ve nükleer reaktörler olarak gösterilebilir [5].

Yüksek sıcaklık etkisi altındaki yapı elemanlarının fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişimler oluşmaktadır. Bu değişiklikler, betonun çatlamasına, parçalanmasına, dağılmasına, elastisite modülü ile basınç dayanımının azalmasına, çeliklerde ise akma dayanımı, düktilite ve çekme dayanımında azalmalara neden olduğu bilinmektedir [6]. Farklı beton tiplerinin yüksek sıcaklık etkisiyle farklı davranışlar sergilemesinde beton yapısındaki çimento tipi, agrega çeşidi, çimento-agrega arasındaki aderans ve çevresel faktörler etkili olmaktadır [4].

Sertleşmiş çimento hamurunda sıcaklığın artmasıyla ilk olarak serbest su kaybı yaşanırken bunu fiziksel olarak absorbe edilen suyun kaybı izler ve son olarak hidrasyon ürünlerinin kimyasal bağ suyu kaybolur. Bununla birlikte beton yapısındaki çimento hamurunun büzülmesi ve agrega tanelerinin genişlemesinden dolayı betonda dayanımın azalmasına neden olan mikro çatlaklar oluşur. Daha yüksek sıcaklıklarda çimento hamurundaki sönmüş kirecin dehidratasyonu veya agregada meydana gelen fiziksel/kimyasal dönüşümler dayanım kayıplarının daha fazla olmasına neden olur [7].

Normal betonun birim ağırlığının düşürülmesiyle yapı yükünün azalması, kesitlerin küçülmesi, kullanılan donatının azalması, düşük emniyet gerilmeli zeminlerde yapı yapılabilmesi gibi avantajlara sahip olan hafif betonların ısı iletkenlikleri normal betona göre oldukça düşüktür [8-10]. Yüksek sıcaklık altında oluşan kimyasal ve fiziksel değişimler beton taşıyıcılar üzerinde dıştan içe doğru, sıcaklık etkisine ve etkiye zamanına bağlı olarak görülmektedir. Yapılan çalışmalar yangına maruz betonarme taşıyıcı elemanlarda dayanım kaybının dıştan içe doğru artış gösterdiğini ve kabuk diye adlandırabileceğimiz bir bölgenin oluştuğu göstermektedir [11]. Buradan, hafif betonlarda sıcaklığın artışıyla oluşacak dayanım kaybının daha az olacağı görülmektedir. Normal betona göre hafif betonlar daha yüksek yangın direncine sahiptirler [12].

Bu çalışma, yangına dayanıklı bir malzeme olan geliştirilmiş vermikülit tozunun ince agrega ile yer değiştirmesi durumunda harçların yüksek sıcaklık altındaki dirençlerindeki değişikliklerin araştırılmasını kapsamaktadır. Çalışma deneysel ve deney sonuçlarının analizi ve değerlendirilmesi olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Deneysel çalışmada farklı oranlarda geliştirilmiş vermikülit tozunun ince agrega ile yer değiştirmesi ile üretilen normal veya yüksek °C alümina çimento esaslı harçların laboratuvar sıcaklığında, ayrıca 300 °C, 600 °C, ve 900 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki bazı fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmasını içermektedir. Çalışmada 2 farklı çimento, 3 farklı geliştirilmiş vermikülit/ince agrega oranı ve 4 farklı sıcaklık etkisi bağımsız değişken olarak alınmıştır. Deneysel çalışma sonunda elde edilecek deney sonuçları karşılaştırılarak yüksek sıcaklık direnci için en uygun karışım oranları belirlenecektir.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Harçlar

Tarihi eserlerin yapımında ve sonrasında işlevlerinde kullanılan harç ve sıvalar halen günümüz yapılarında kullanılan en önemli yapı elemanlarıdır. Bununla birlikte harç ve sıvalar dönemlerinin yapı teknolojisi hakkında az da olsa önemli bilgiler verebilecek belgesel kaynaklar bulundurmaktadır. Geleneksel yapı malzemelerinin çoğunda olduğu gibi harç ve sıva malzemeleri de yapıların yapıldığı zamana, yöreye, yapım tekniğine, yapının kullanım amacına göre çeşitlilikler göstermektedir [1].

Harç, belirli oradalarda bağlayıcı malzeme, dolgu malzemesi ve suyun karıştırılması ile oluşturulan katılaşma özelliğine sahip hamurdur [13]. Diğer bir tanımlama ile harç; kum, bağlayıcı malzeme, su ve kullanım amacına göre gerekli ise katkı malzemelerinin belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşan geçirimsizlik, doluluk, aderans, mukavemet ve dış etkilere dayanıklılık gibi özelliklere sahip inorganik hamurdur [14].

Hafif örgü harçlarının hacimce %70 gibi büyük bir bölümünü agrega oluşturduğundan dolayı harçların performansını agregaların kalitesi büyük oranda etkilemektedir. Bu doğrultuda agrega seçimi ne kadar iyi yapılırsa harcın kalitesinin de o derecede artacağı aşikârdır. TS 2717'de (Harç kumları) örgü harç agregası; harç yapımında kullanılmak üzere çimento ve su karışımından oluşan bağlayıcı malzeme ile birlikte bir araya getirilen, organik olmayan, doğal veya yapay malzemenin genellikle 4 mm'yi aşmayan büyüklüklerdeki kırılmamış veya kırılmış agregalar olarak tanımlanmıştır [15].

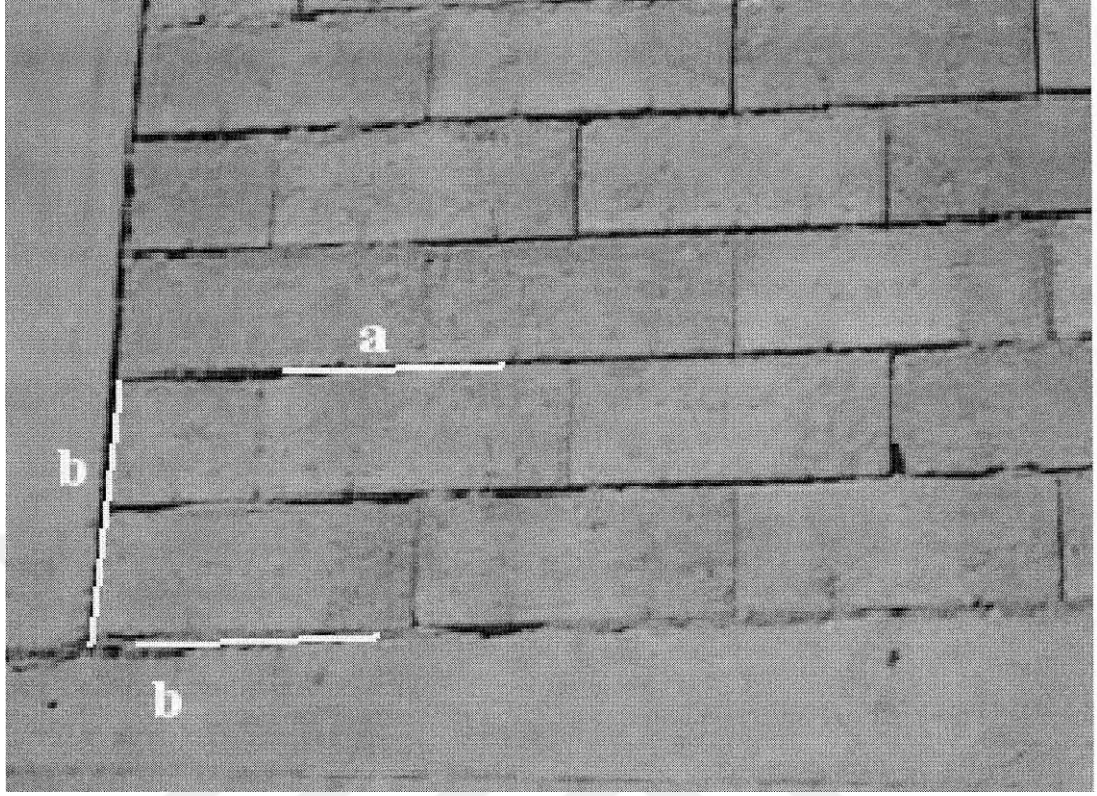
Bir yapının dışındaki sıcaklık etkilerinden korunması, yapıyı çevreleyen yapı elemanlarının ısı depolama özelliği ile doğrudan bağlantılıdır. Yapı elemanlarının ısı depolama kabiliyetleri, ısı geçirgenlik dirençleri ile belirlenir. Isı geçirgenlik direnci ise kullanılan malzemelerin cinsine, kalınlığına ve ısı iletkenlik katsayısına bağlı olarak farklılıklar göstermektedir [14].

Isı yalıtımı iki farklı sıcaklıktaki ortamlara arasında ısı geçişini azaltmak için yapılan uygulamalardır. Bu uygulamalar yapılarda ısı kayıplarının olduğu dış duvarlar, çatı ve bina tabanına ısı yalıtım malzemelerinin tatbiki ile yapılmaktadır. Isı yalıtımlı bina yalıtımsız binaya kıyasla daha az ısı kaybına uğradığından dolayı ısınma için tüketilen yakıt miktarında tasarruf sağlanmaktadır [15].

Katı malzemelerin gözenek büyüklükleri, gözenek derecesi ve gözeneklerinin dağılımı ile birlikte içerisinde barındırdığı nem miktarı ısı iletkenliklerini etkilemektedir. Katı malzemelerin gözeneklerinde hapsediği durgun havanın ısı iletkenlik değeri düşüktür. Bununla birlikte malzemelerdeki gözenek sayısı arttıkça malzemenin birim hacim ağırlığında azalmalar gözlenmektedir. Malzemelerin bu özellikleri ısı iletkenlik değerinin azalmasına neden olur. Düzensiz dağılmış büyük gözenekli yapı malzemelerinin ısı iletkenliği, düzenli dağılmış küçük hava gözenekli yapı malzemelerine oranla daha fazladır. Bir yapı malzemesinin ısı iletkenliği, malzeme meydana getiren maddelerin yapısına ve cinsine (anorganik, doğal-organik ve suni-organik) bağlıdır [16].

Isı yalıtım malzemeleri yapılarda ısısal konfor sağladığından günümüzde hemen hemen her binada kullanılır. Bununla beraber önceden yapılmış binaların duvarlarına iç ve/veya dışına yalıtım malzemeleri ile kaplama yapılarak ısı yalıtım sağlanabilmektedir.

Binaların taşıyıcı elemanlarını oluşturan kolon, kiriş ve yapı elemanlarını birleştiren örgü harçların bünyesindeki normal agregalar ısı yalıtımını sağlamadığından yapıda ısı köprüleri oluşturur. Oluşan ısı köprülerini engellemek için beton ve örgü harçlarının yapımında hafif agregalar kullanarak ısı yalıtımını sağlanır [15]. Şekil 2.1 de ısı köprüsüne örnek bir fotoğraf gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Binalarda ısı köprüleri (a: iki yapı elemanı arası, b: yapı elemanı ile taşıyıcı eleman arası) [15]

2.1.1. Harç Tarihçesi

Harçların tarihçesi incelendiğinde ilk olarak kil harç uygulamalarına rastlanmaktadır. Harç yapısındaki bağlayıcı malzeme endüstrisinin gelişimi ile Mısır'da alçı, Roma'da kireç ve puzzolanik, Osmanlılarda Horasan, XVIII. y.y. Avrupa'sında ise çimento harçları yapılarıdaki uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır [1].

2.1.2. Harç Üretim Yöntemi

Harçlar uygulanacağı yerlere göre hacimce veya ağırlıkça önceden belirlenen miktarda kum ve bağlayıcı malzemenin karıştırılması ve bu karışıma hidrasyon ile işlenebilme özelliğini sağlayacak olan yeterli miktarda su ilave edilip tekrar karıştırılmasıyla meydana gelen yapı malzemesidir. Harçlara ihtiyaca göre gerekirse katkı maddeleri ve mineral esaslı boya pigmenti ilave edilebilir [14].

2.1.3. Harçta Bulunması Gereken Özellikler

Harçların; basınç mukavemeti, aderansı, doluluğu, geçirimsizliği, katılaştırken hacmin değişimi göstermemesi, aşınmaya ve dış etkilere karşı direncinin yüksek olması bünyesinde bulundurması gereken özellikler olarak değerlendirilir. Harçların bu özelliklerinden bazıları kullanım alanına göre diğerlerinden daha çok öneme sahip olabilir. Harçların özelliklerini ise bağlayıcının miktarı ve cinsi, agreganın seçimi ve granülometresi, karışım suyunun cinsi ve miktarı ile işçiliğin kalitesi (karıştırma, yerleştirme, taşıma, bakım) önemli derecede etkilemektedir. Harçlarda bulunması gereken özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir [1].

- i. Harcın mekanik özelliği; harç yapısındaki agregaların granülometresi, su/çimento (s/ç) oranı ve bağlayıcı malzemenin norm mukavemeti, harcın mekanik özelliklerine etki etmektedir [1].
- ii. Harcın doluluğu; harçların mukavemeti, dış etkilere karşı dayanımı, geçirimsizliği gibi çoğu özelliğini kazandıran en önemli faktör harcın doluluk oranıdır. Harçların doluluğu ancak granülometre kurallarına uyulmasıyla elde edilebilir [1].
- iii. Harcın geçirimsizliği; harçların geçirimsizliğini arttıran en önemli faktörler, agrega granülometresinin iyi ayarlanamaması ve içerisinde fazla miktarda su bulundurmasıdır. Geçirimsizliği engellemek için çimento hamurunda rötreyi arttırmayacak şekilde bağlayıcı malzeme oranını arttırmak veya parafin, tras, kauçuk, bitüm, silis tozu, kalsiyum klorür, balmumu, sabun, sika gibi katkı malzemeleri kullanılabilir. Ancak kalsiyum klorür harca %1'den fazla katıldığında rötreyi %50-100 arasında arttırdığından fazla katılmamalıdır. Çimento ve puzolanik harçların geçirimsizliği diğer türlere göre fazladır [1].
- iv. Harcın aderansı; harç içerisindeki bağlayıcı malzemenin uygulandığı yüzeyin özelliği ve pürüzlülüğü ile bağlantılı değişen yapışma gücüne harcın aderansı denir. Plastik kıvamda bulunan harcın aderansı taze ve kurumuş haldeki harçların adersansından yüksektir [1].
- v. Harcın hacim değişikliği; harçta meydana gelen kimyasal reaksiyonlar bağlayıcı malzemenin cinsine göre değişiklik göstermekte olup bu reaksiyonlar da hacim

değişikliğine yol açmaktadır. Örneğin; yağlı kireç harçlarının CO₂ (karbondioksit) ile reaksiyonunda haciminde artma görülürken çimento harçlarında ise hidrasyon sonrasında haciminde azalma (rötre) olur. Rötreden kaynaklı çatlaklar harcın geçirimsizliğini artırırken ve mukavemetini düşürücü etki oluşturmaktadır. Çimento harçlarında rötre etkisinin azaltılması için karışımda çimento oranının azaltılması, kumun çoğaltılması, parafin veya havadan nem çekici tuzlar eklenmesi ve katılaştıktan sonra iki hafta kadar nemli ortamda bekletilmesi gerekmektedir [1].

- vi. Harçta dış etkilere dayanıklılık; taze harçlarda reaksiyonlar ve çeşitli nedenlerle ısı derecelerinin düşmesi harçların katılaşmasını geciktirmekte, artması ise hızlandırmaktadır. Taze harç katılaşması sırasında güneş ve rüzgar etkilerine maruz kaldığında su kaybı oluşur ve harcın katılaşması için gerekli olan hidrasyon engellenir. Gerekli hidrasyonun sağlanabilmesi için harç yüzeyleri nemli ortamda tutulmalıdır. Çimento harçlarının uygulama sıcaklığı minimum +6°C olmalıdır. Soğuğa maruz kalan harçlarda don etkisi oluşur ve bu etki alüminatlı çimento kullanılan harçlar dışında diğer harçlarda harç yapısına zararlıdır. Çimento harçlarına soğuk ortamda %2- %3 oranında CaCl₂ (Kalsiyum Klorür) katmak faydalıdır [1].

2.1.4. Harçların Sınıflandırılması

Harçlar bağlayıcı malzeme içeriğine ve kullanım alanlarına göre iki grupta sınıflandırılırlar. Harçların içeriğindeki bağlayıcı malzeme çeşidine göre kil, kireç, alçı, çimento, melez harçlar; kullanım alanlarına göre de sıva harçları, duvar harçları, badana, serbest ve şap şeklinde sınıflandırılır [14].

2.1.5. Yapılarda Harç Kullanımının Yeri ve Amacı

Yapıda harç kullanımının temel amacı, yapı bileşenlerini meydana getiren elemanların, birbirleri ile olan bağlantısını sağlamak ve bir bütün oluşturmaktadır. Böylece, bileşene gelen basınç yüklerinin dağılımını gerçekleştiren harç, bileşenin esnemesine de yardımcı olur. Taş veya tuğladan yapılmış olan çoğu yapının kaim duvarlarında kullanılmış olan harçlar, sınırlı basınç dayanımına sahip olsa da, bunun

bir harç için oldukça doyurucu olduğu bilinmektedir. Harç kullanımının diğer bir sebebi ise, yapı elemanlarını dış havanın bozucu etkilerinden korumaktır [17].

Duvar harçları, kargir elemanları birleştirmek ve yatay yükleri almak amacı ile hazırlanan çimento, kireç veya melez harçlarıdır. Taşıyıcı duvarlarda 300 kg/m^3 dozajlı, korozif etkilerde $400\text{-}600 \text{ kg/m}^3$ dozajlı, taşıyıcı niteliği çok önemli olmayan yerlerde melez ve taşıyıcı niteliği yanında su etkisinin de bulunmadığı yerlerde ise kireç harçları ($250\text{-}300 \text{ kg/m}^3$) kullanılır. Duvar harçlarında genellikle ince kum tercih edilir [14]. Harçların yapıda kullanım yerlerine örnekler tablo 2.1.'de gösterilmiştir.

Tablo 2.1. Harçların yapıdaki kullanılma yerleri [14]

Özelliği	Kullanılma Yeri	Harç Çeşidi
Aderans, Kolay işlenebilme	Tavan, duvar sıvası	Kireç, melez harç
Mukavemet, Geçirimsizlik	Zemin kaplaması, tecrit, şap	Çimento harcı
Sudan zarar görebilecek yüzeyler, Dekoratif işler	İç sıva, süsleme	Alçı harçları

2.2. Harçların Dayanımına Etki Eden Faktörler

2.2.1. Çimento ile ilgili faktörler

Latince “Caementum” kelimesinden gelen çimento kil ve doğal kalker taşların yüksek sıcaklıkta pişirilmesiyle oluşan klinkerin, az miktarda (%3-%6 oranında) alçıtaşı ile birlikte çok ince parçacıklar haline gelecek şekilde öğütülmesi sonucu oluşan ve su ile karıştırıldığında bağlayıcı özellik kazanan hidrolik bağlayıcı bir maddedir [18].

İnsanların yaşamları boyunca sürekli kullandıkları ev, okul, iş yeri, spor tesisleri, karayolları, havaalanları, demir yolları, enerji üretimi için kurulan barajlar, termik santraller ve daha çoğu yapılarda beton ve harç gibi yapı malzemelerini sıklıkla kullanmaktadır. Yapıların önemli parçalarından olan beton ve harçların kullanım

alanlarına göre çoğu özelliğinde etkin paya sahip çimento hakkında çok sayıda araştırma yapılmaktadır [18].

Betonda çimento oranı arttıkça zorlamaların çimento hamurunda oluşturduğu gerilmeler azalır ve buna bağlı olarak betonun basınç dayanımı artar. Ancak bu ifadeden çimento oranının istenildiği kadar arttırılabilmesi anlamı çıkarılmamalıdır. Çünkü çimento oranı fazla olduğunda betonun rötresi artar ve beton büyük ölçüde dayanımını kaybeder. Çoğu araştırmacı yüksek dayanımlı beton elde etmek için dozajın 550 kg/m^3 'den az olması gerektiğini belirtmiştir [19].

Çimento taneleri inceldikçe özgül alanı artar ve bağlayıcı malzemenin dayanım kazanması hızlanarak 3, 7, 28 ve 90 günlük dayanımlarında artış gözlemlenir. Fakat pratikte bu durumun son dayanıma etkisi fazla olmamaktadır [20].

2.2.2. Agregalar ile ilgili faktörler

Agrega, beton ve harçların yapımında kullanılan çimento ve su karışımıyla oluşan bağlayıcı maddeyle bir araya getirilen, organik olmayan, kum, çakıl, kırmataş gibi doğal kaynaklı veya genişletilmiş kil, YFC (Yüksek Fırın Cürufu) gibi yapay kaynaklı olan taneli malzemedir [21].

Harçlarda kullanılan agregalar kaba ve ince olmak üzere iki grupta incelenir. Yapılara kullanılan kaba agregalar "çakıl" veya "mıcır", ince agregalar ise "kum" olarak adlandırılır. İki grubu birbirinden ayırmak için agregaların tane büyüklüğü olarak 4 mm boyutu referans alınır ve 4mm'den büyük boyuttaki tanelerden oluşan kısım "kaba agregalar", 4 mm'den küçük boyuttaki tanelerden oluşan kısım ise "ince agregalar" olarak isimlendirilmektedir [15].

Betonu oluşturan yapı malzemelerinden bir olan agreganın kalitesi betonun dayanımından doğrudan etkilemektedir. Doğal ortamdaki kum ve çakıl ocaklarından elde edilen agregalar sathi tabakalar altındaki kayaların parçalanmasıyla taş ocaklarından da elde edilmektedir. Elde edilmesi ekonomik olan doğal kum ve çakıl taşları genellikle akarsu yataklarında, buzul yataklarında ve alüvial deltalarda bulunurlar [22].

Agregaların su emme özellikleri boşluk yapıları ile ilişkilidir. Boşluk yapısı fazla olan agregaların su emme kapasitesi artarken, dayanımı yüksek olan agregalarda ise su emme kapasitesi daha düşüktür. Taze betonun hidratasyonu sırasında gerekli olan suyun bir kısmı su emme özelliği yüksek olan agrega tarafından emildiğinden betonun dayanımında azalma oluşur. Özellikle s/ç oranının düşük olduğu betonlarda bir miktar su ilave edilerek bu durumun önüne geçilmek istenir. Ancak bu durum betonun s/ç oranının artırdığından betonun dayanımının düşmesine sebep olur [23].

2.2.3. Karışım suyu ile ilgili faktörler

Çimento ardı ardına hidratasyon, katılaşma ve sertleşme eylemlerini gerçekleştirmesinin ardından dayanım kazanmaya başlamaktadır. Su ile çimentonun kimyasal reaksiyonuyla hidratasyon oluşmaktadır. Bu nedenle beton karışımında suyun miktarı, kalitesi ve bileşimi betonun kalitesi açısından önemlidir [24].

Beton karışım suyunda, betonu kimyasal açıdan etkileyecek, dayanımının düşmesine sebep olacak ve hizmet süresini azaltacak iyonların bulunmaması gerekir. Karışım suyundaki sülfat içeriği SO_3 iyonunun, %0,2'yi aşmaması koşuluyla kullanılabilir [25].

Karışım suları çoğunlukla içilebilir su olarak ifade edilir. İçme suyu beton karışımında kullanıldığında genellikle olumsuz sonuçlar elde edilmese de bunun genelleme yapılması doğru değildir. Çünkü su içerisindeki şeker ve gaz miktarının fazla olması içilebilirliğine engel olmayabilir fakat karışım için kullanımı zararlı olabilmektedir. Bunun tam aksine içmek için uygun olmayan ancak beton karışımı için uygun olan sular da bulunmaktadır [22].

Beton karışım suyu asit reaksiyonda bulunmamalıdır. Karışım suyunun içeriğinde agresif karbonik asit, amonyum tuzları, mangan bileşikleri, yağlar, serbest klor, organik maddeler ve endüstri atıkları bulunmamalıdır. Ayrıca içeriğindeki tuz miktarı ve madeni tuz miktarı sırasıyla en fazla 15 g/l ile 2 g/l yi geçmemelidir [26].

S/ç oranının betonun dayanımı üzerindeki etkisi büyüktür. Beton karışımına suyun katılmasının üç sebebi vardır. Bunlar, çimentonun kimyasal reaksiyonunun gerçekleşmesi, çimento hamuru ile agrega arasındaki bağı sağlamak ve taze betonun işlenebilir olması içindir. Çimento hamurunun hidratasyonundan sonra işlenebilirliğin

artması için ilave edilen su beton yapısından zamanla buharlaşarak ayrılması sonucu betonda boşluklar oluşur. Oluşan boşluklar betonun dayanımının düşmesine sebep olmaktadır. Dolayısıyla s/ç oranının artması betonun dayanımını olumsuz etkilemektedir. Suyun az olması durumunda ise de çimento hamurunun tam hidrasyonu sağlanamadığından beton dayanımını tam sağlayamayacaktır. Bu nedenle karışımların su oranlarının ayarlanması son derecede önemlidir [22].

2.2.4. Mineral katkı maddeleri ile ilgili faktörler

Mineral katkıların harçların dayanıklılığını arttırıcı özelliklerinin en başında boşluk yapısını iyileştirerek harcın geçirimsizliğini azaltması gelir. Betonların ve harçların fiziksel özelliklerinden olan kılcallık veya geçirimsizlik malzemenin dayanıklılığını büyük ölçüde belirlemektedir. Beton karışımındaki bağlayıcı malzeme miktarı, agreganın granülometrik dağılımı, su içeriği ve kür koşulları gibi çeşitli faktörler betonun geçirimsizliğini etkilemektedir [22].

Mineral katkı malzemeleri tedarik edildikleri kaynaklara göre üç grupta toplanabilir.

- i. Doğal malzemeler (volkanik tüfler, traslar, diatomlu topraklar ve taşmı)ii. Endüstrilerde yan ürün olarak elde edilen malzemeler (silis dumanları, uçucu küller, YFC).
- iii. Isıl işleme tabi tutulmuş malzemeler [27].

Mineral katkı malzemeleri betonu oluşturan temel malzemelerle birlikte karıştırılarak beton harcı oluşturulmaktadır. Çoğu uygulamada karışımdaki çimento miktarı azaltılıp yerine ince taneli katkı malzemesi ilave edilmektedir. [27].

Beton yapımında kullanılan mineral katkı malzemelerinin geçirimsizliğe olan katkısı, dayanıma olan katkısından daha fazladır [28]. Günümüzde betonda kullanılan mineral katkı malzemeleri çimento hamurundaki boşlukları azaltmasının yanı sıra agrega ile arasındaki zayıf bölgeyi de güçlendirmektedir. Böylelikle geçirimsiz ve dayanıklı betonlar üretilmektedir [28].

2.2.5. Deney yöntemi ile ilgili faktörler

Beton deneylerinde küçük numune boyutlarının tercihi ve yükleme hızının artırılması genellikle beton dayanımının yüksek çıkmasına sebep olmaktadır. Numunelerin nem miktarında ise kuru numune ıslak numuneye kıyasla daha yüksek dayanım gösterir. Yüksek sıcaklıktaki ortamda yapılan deneylerde dayanım düşüş görülür [25].

2.3. Vermikülit

Vermikülit mineralojik gruplar içerisinde tek başına farklı bir grubu temsil etmekte olup, endüstriyel gruplarda ise genişleme özelliğine sahip mika grubu olan biotit, hidrobiotit ve flogopit gibi mineralleri de kapsayan genel bir terim olarak ifade edilmektedir. Bununla birlikte vermicülit alüminyum, sulu magnezyum, demir silikat olarak tarif etmek de mümkündür [29].

Vermikülitin doğada oluşumuna ve bulunduğu ortamına göre, toprak, otojenik, metaformik ve makroskopik olmak üzere dört farklı çeşidi görülmüştür [30]. Dünyadaki bazı vermicülit işletmelerine ait cevher numunelerinin kimyasal analizleri Tablo 2.2’de verilmektedir.

Yeşil, sarımsı kahve ve hatta siyah renklerde olabilen vermicülit düzenli dizilime sahiptir ve monoklinik sistemde kristallenir. Vermikülitin sertliği Mohs ölçeğine göre 1,2 ile 2,0 arasında değişirken, özgül ağırlığı ise 2,4-2,8 gr/cm³ aralığında değişmektedir [29-31]. Şekil 2.2’de işlenmemiş ham vermicülit örnekleri gösterilmiştir [32-33].

Tablo 2.2. Ticari Değerleri Olan Vermikülitlerin Kimyasal Analizleri [34]

	Enoree ABD	Virginia ABD	Güney Afrika	Brezilya	Çin	Kovdor Rusya
Li ₂ O	-	0.01	0.03	-	-	-
Na ₂ O	-	1.72	0.80	0.10	1.61	0.93
K ₂ O	4.42	6.63	2.46	0.50	5.97	2.56
MgO	20.04	16.38	23.37	23.60	24.22	21.39
CaO	0.75	1.12	1.46	3.80	0.93	0.20
BaO	0.12	-	-	0.20	-	0.03
MnO	0.07	0.14	0.30	-	0.05	-
FeO	-	-	1.17	-	1.54	3.56
Al ₂ O ₃	17.36	12.85	12.08	10.20	12.68	10.01
Cr ₂ O ₃	0.50	0.23	-	-	-	0.20
Fe ₂ O ₂	8.45	8.80	5.45	5.80	4.60	1.90
SiO ₂	38.66	38.34	39.37	45.10	41.20	43.05
TiO ₂	-	1.66	1.25	0.70	1.38	1.00
H ₂ O	8.71	10.66	11.20	10.20	5.82	15.70
Toplam	98.61	99.34	98.97	100.00	99.99	99.40



Şekil 2.2. İşlenmemiş Ham Vermikülit [32]

Vermikülit yüksek sıcaklıklara çıkarıldıktan sonra aniden soğutularak ısı şokuna maruz kaldığında hacimce genişerek uzamaktadır. Vermikülitte oluşan bu karakteristik genişleme, bünyesindeki kristal suyun aniden buharlaşmasıyla meydana gelen buhar basıncının etkisiyle gerçekleştiği düşünülmektedir. Buna rağmen ısısal genişleme olayının günümüzde halen tam anlamıyla açıklanmamasının nedeni, ağırlıkça aynı miktarda su içeren numunelerin dahi farklı oranlarda genişlebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Vermikülitte genişleme olayını etkileyen bir diğer önemli parametre ise, kimyasal birleşim ve yapraklar arasında bulunan su moleküllerinin hangi bağlarla yapıya tutunmuş olduğudur. Genişleme sonucunda malzemenin yığın yoğunluğu, yaklaşık 10 kat azalarak $0,8 \text{ g/cm}^3$ 'den $0,08 \text{ g/cm}^3$ 'e düşmektedir. Yığın yoğunluğundaki düşüş, vermikülitin kalitesine ve genişlemenin yapıldığı fırın performansına bağlı olmakta ve ısısal işlem sonucunda yaklaşık 30 katlık bir genişleme sağlanabilmektedir [29,31,35]. Yüksek sıcaklığa maruz kalan vermikülitin renginde değişiklik olabilir. Şekil 2.3'de ısıya tabi tutulmuş vermikülit verilmektedir [32].



Şekil 2.3. Isıya Tabi Tutulmuş Vermikülit [32]

2.3.1 Başlıca Vermikülit Çeşitleri

Vermikülitler doğada oluşumuna ve bulunduğu ortama göre; metaformik, makroskopik, otojenik ve kil vermikülit şeklinde dört farklı tipte görülmektedirler [29].

2.3.1.1. Kil Vermikülitler

Kil vermikülitler genellikle toprak içerisinde bulunduğundan toprak vermikülitleri olarak da adlandırılırlar. Kil vermikülitler dioktahedral makroskopik vermikülitlerin aksine, hem dioktahedral hem de trioktahedral olabilirler.

Kil tipi vermikülitte çoğunlukla toprak içinde rastlandığından toprak vermikülitleri de denmektedir. Dioktahedral makroskopik vermikülitlerin aksine, mineralin bu tipi hem dioktahedral hem de trioktahedral olabilir. İlk ve son oluşan kil mineral topluluklarının ara safhasını oluşturan kil vermikülitleri, asidik ve yükseltgen koşullarda alkali ve kalsiyumca zengin minerallerin (toprak fillosilikatların) tabaka arası K'nın Kristal yapısından çıkararak yerine Mg ve Ca'nın geçmesi, Fe²⁺'nin Fe³⁺'e yükseltgenmesi ile oluşmaktadır. Vermikülitin, çoğunlukla biyotitin bozunması ile oluşumu kristal yapılarının benzerliğine bağlanmaktadır. Şekil 2.4'de tipik bir kil vermikülit görülmektedir [36].



Şekil 2.4. Kil Vermikülit [36]

2.3.1.2. Otijenik Vermikülit

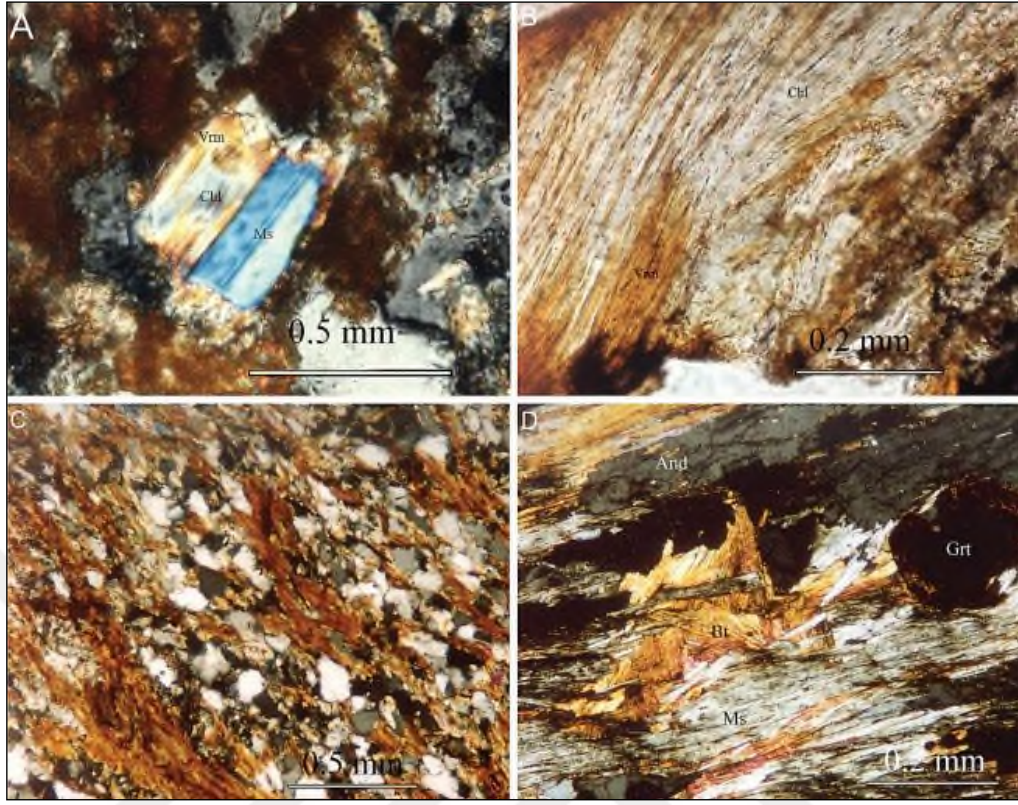
Deniz suyu yapısında bulunan K^+ (Potasyum) içeriği ana mineraldeki K'nın uzaklaşmasını engelleyeceğinden deniz ortamında mika ve klorit alterasyonu oluşan vermikülitte sık rastlanmaz. Denizel ortamda vermikülitte ilk defa Singer ve Stoffer yaptıkları çalışmalarda diğer sedimanter mineraller (illit, klorit, paligorskit, sepiolit) ile bulunan vermikülitte rastlamışlardır [37]. Bu oluşuma, volkanik aktivenin ve metallojenik su akıntılarının yoğunlukla olduğu bölgelerde rastlanmıştır.

Vermikülitin yanı sıra, hidrotermal etkilerle oluşan talk ve serpentinin bulunması, mineralin idomorf kristal yapıya sahip olması hidrotermal orijinin göstergesi olmuştur. Tanımlanan bu vermikülitin Fe, Mg ve Si kanyonları ile doymuş sıvılardaki kanyonların çökmesi ile oluştuğu düşünülmektedir. Hidrotermal vermikülitin, diğer tipteki vermikülitlere oranla su içeriği daha az iken, Al' nin Si yerine geçişi daha fazladır ve tetrahedral tabakasında da Fe içerir [29].

2.3.1.3. Metamorfik Vermikülit

Bazı araştırmacılar tarafından demirce zengin kloritin dönüşümü ile oluşan ve lavsonit içeren metasedimanlarda bulunan vermikülitler metamorfik olarak nitelendirilmişlerdir. Kloritten dönüşüm; düşük sıcaklıkta ortama alkali girişi, Fe, Mg ve bazen Al' nin ortamdan çıkışı ile gerçekleşmektedir [38].

Yapısı, biyotit ve stiliplomelaninkine benzemesine rağmen kimyası kloritinkine benzemektedir. Metamorfik vermikülit az miktarda da olsa K_2O ve CaO içerirken kloritte bu oksitler yoktur ve silisçe kloritten daha zengindir. Al içeriği ise biyotitinkinden daha fazladır. Şekil 2.5'te metamorfik vermikülitin mikro yapısı görülmektedir [36].



Şekil 2.5. Metamorfik Vermikülitin Mikro Yapısı [36]

2.3.1.4. Makroskopik Vermikülit

Makroskopik vermicülit, mikanın hidrasyonu ile oluşan trioktahedral mika-benzeri bir mineraldir. Elastik olmayan, ince bükülebilir levhaları ile tipik klivaj yapısına sahip büyük levhamsı kristaller halinde, parlayan yeşilimsi-sarı, yeşilimsi-siyah, kahverengi, altın sarısı, bal sarısı ve bronz renklerde gözlenir. Mikalardan daha yumuşaktır ve sertliği Mohs ölçeğine göre 2.0'dir. Erime noktası 1320- 1350°C arasındadır [29].

2.3.2. Vermikülitin Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Durumu

Dünya üzerinde bulunan en önemli vermükülit rezervleri Avustralya, Amerika Birleşik Devletleri, Rusya ve Güney Afrika Cumhuriyeti'ndedir. Bu ülkelerle birlikte Arjantin, Brezilya, Çin, Mısır, Hindistan, Meksika, Kanada, Bulgaristan, Şili, Finlandiya, Fransa, Japonya, Kore, Cezayir, İspanya, Sri Lanka, Tanzanya, Kazakistan, Türkiye, Uganda ve Zimbabve'de de vermükülit rezervleri bulunmaktadır. Dünyada vermükülit rezervinin 50 milyon ton olduğu tahmin edilmekle beraber bu miktar hakkında detaylı bilgiye ulaşmak da mümkün değildir. Dünya rezervinin %50'sine yani 25 milyon tonuna ABD'nin sahip olduğu bilinmekte olup en büyük rezervi Libby, Montana'da bulunmaktadır. Dünyadaki en büyük vermükülit yatağı olan Palabora'ya sahip olan Güney Afrika, dünya rezervlerinin %40'mı yani 20 milyon tonunu elinde bulundurarak ikinci sırada yer almaktadır. Tüm Dünyada vermükülit kaynaklarının toplam 200 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir [29]. Tablo 2.3'te, dünyadaki vermükülit rezervleri ve baz rezervleri gösterilmiştir [39].

Tablo 2.3. Dünyada Bulunan Mevcut Vermükülit Rezervleri Dağılımı (ton)[39]

ÜLKELER	REZERV	BAZ REZERV
ABD	25.000	100.000
G.AFRİKA CUM.	20.000	80.000
DİĞER ÜLKELER	5.000	20.000
DÜNYA TOPLAMI	50.000	200.000

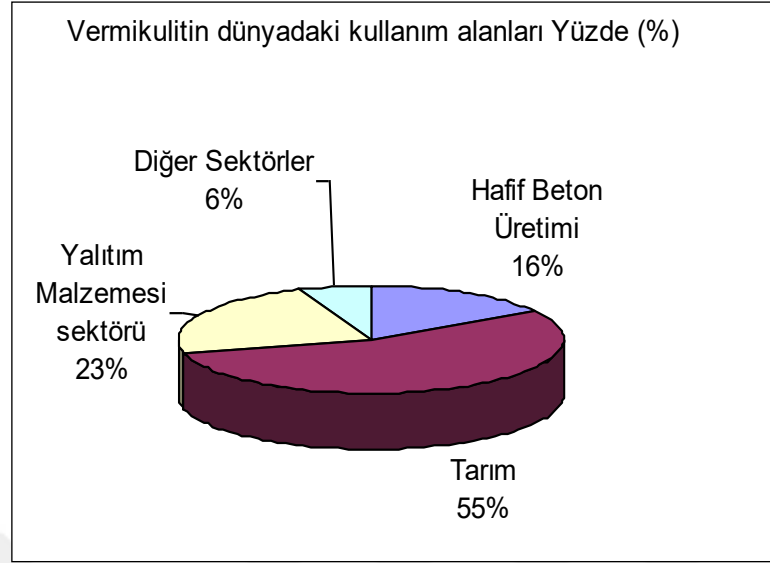
Dünyada vermükülit üretiminde önemli bir artış gözlenmekte olup 2008 yılı baz alındığında yıllık 200.000 tonluk vermükülit üretimiyle Güney Afrika ilk sırada yer almaktadır. Yıllık 110.000 ton üretim ile Çin ikinci, 100.000 tonluk üretimle ABD ise 3 sırada yer almaktadır. Dünyada belli başlı vermükülit üreten ülkelerin 2008 yılı itibariyle toplam üretimi 509.983 ton/yıl seviyesindedir [40].

Dünya genelinde üretilen vermükülitin kullanım alanlarına göre %55'i tarımda, %23'ü yalıtım malzemesi üretiminde, %16'sı hafif beton üretiminde agrega olarak, % 16'sı da diğer sektörlerde kullanılmaktadır [41]. Dünyadaki vermükülit üretimi Tablo 2.4'de gösterilmiştir.

Tablo 2.4. Dünyadaki Vermikülit Üretimi [41]

Ülke	2004	2005	2006	2007	2008
Rusya	30.000	30.000	30.000	30.000	30.000
Mısır	400	6.700	6.700	5.770	7.560
Güney Afrika	196.893	209.801	197.765	199.664	199.764
Uganda	2.688	2.574	3.512	3.269	-
Zimbawe	27.150	23.045	13.412	13.000	13.000
ABD	100.000	100.000	100.000	100.000	100.000
Arjantin	1.293	1.403	1.585	1.726	1.900
Brezilya	26.000	24.191	19.279	18.952	20.000
Çin	100.000	100.000	110.000	110.000	110.000
Hindistan	3.377	6.674	11.827	10.801	13.368
Japonya	6.000	6.000	6.000	6.000	6.000
Avusturalya	9676	8.769	9.392	8.900	8.391
TOPLAM (ton)	503.477	519.157	509.472	508.082	509.983

Çoğunluğu yapı malzemeleri sektöründe olmak üzere vermikülit pek çok sektörde kullanılmaktadır. Vermikülit üretimin sektörler göre dağılımı şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Vermikülitin Dünyada Kullanım Alanları [41]

Türkiye’de yapılan jeolojik çalışmalarla birlikte ortaya çıkan ofiyolit kuşaklarında vermikülit oluşumlarına rastlanmasına rağmen vermikülit yataklarının varlığı fazla bilinmemektedir [29]. Malatya-Darende-Kuluncak, Sivas-Yıldızeli-Demircik-Karakoç, Eskişehir-Sarıcakaya ve Elazığ-Harpüt-Arduçluk Türkiye’de bilinen belli başlı vermikülit yataklarıdır [42].

Yapılan rezerv hesaplarında Türkiye’de muhtemel vermükilit rezervinin 6-7 milyon ton olduğunu belirtilmektedir. Sivas-Yıldızeli’ndeki vermikülit rezervinin Türkiye’deki bilinen en büyük ve işletilen tek vermikülit yatağı olduğu ifade edilmektedir. Şimdiye kadar Türkiye’de rastlanan vermikülit oluşumlarının hepsi alkali damar kayaçları veya intrüzifleri ile kesilen ultramafik ve mafik kütleler içerisindedir. Dünyadaki bütün ekonomik vermikülit oluşumlarının büyük çoğunluğu bu tür ana kayaçlar içerisindedir [29].

Sivas-Yıldızeli-Karakoç ve Demircilik vermikülit bölgesinde son yıllarda yapılan incelemelerde bu cevherleşmenin jenerik açıdan Kuluncak sahasındaki vermikülitte benzerlik gösterdiği belirtilmiştir. Yapılan incelemelerde bu cevherleşmenin piroksen ve anfibol içeriğinin yüksek olduğu ultramafik kütlelerin alkali damar kayaçlarıyla kesilmesi sonucu meydana geldiği görülmüştür. Maden Teknik ve Arama (MTA) Genel Müdürlüğü tarafından yapılan saha gözlemleri ve değerlendirmeler sonucunda

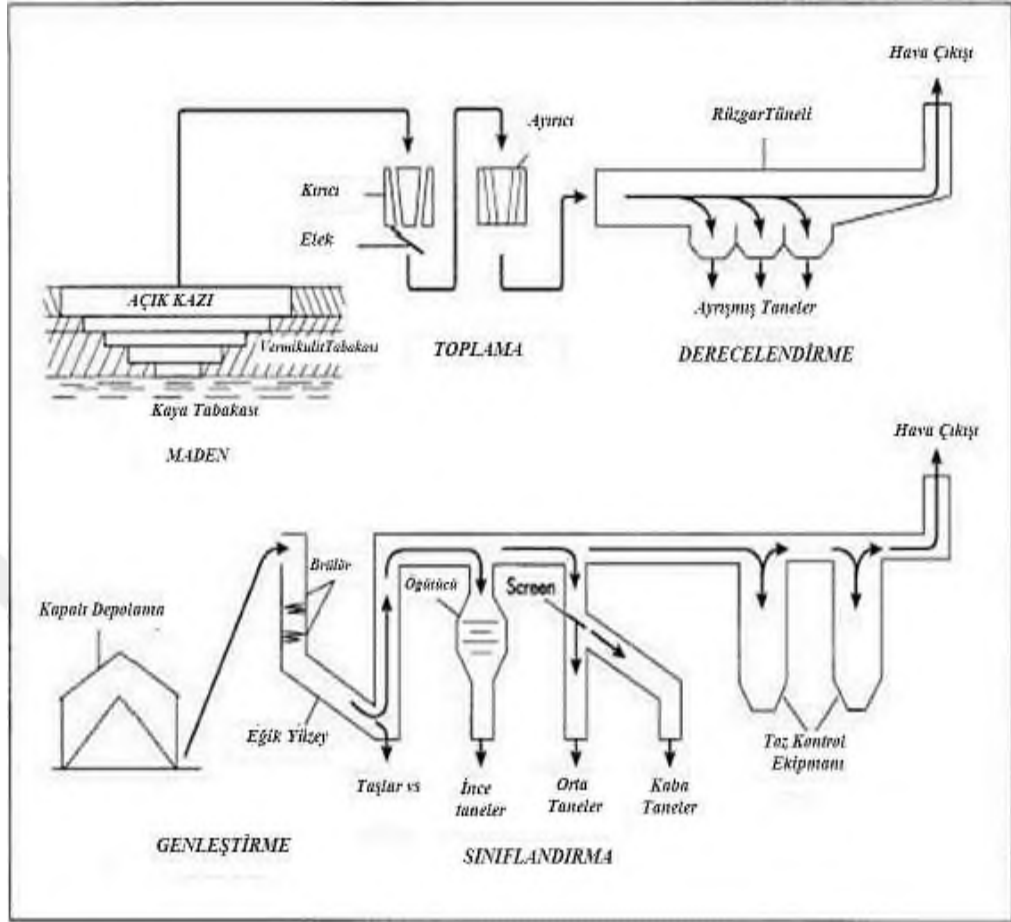
genleşme özelliği daha iyi olan 2.750.000 ton muhtemel rezervli tüvenan vermikülit ve düşük kaliteli 2.475.000 ton muhtemel rezervli tüvenan vermikülit cevheri belirlenmiştir [42].

Genleşme oranının ortam koşullarına göre 13 ile 18 kat arasında değiştiği yapılan teknolojik testlerde gözlemlenmiştir. Elde edilen malzemenin yığın yoğunluğuna göre yapılan sınıflamada 2. sınıf malzeme kalitesinde olduğu görülmüştür [43].

2.3.3. Genleştirilmiş Vermikülitin Üretim Yöntemi

Mevcuttaki vermikülit yataklarında açık ocak işletmeciliği yöntemi ile üretim gerçekleştirilmektedir. Vermükülit yataklarına en yakın bölgede kurulan cevher zenginleştirme ünitesinde vermükilite zenginleştirme işlemi yapılır ve daha sonra vermükilite genleştirme işlemi uygulanır. Ocaktan çıkarılan cevher primer kırıcıdan geçirilir ve daha sonra yaş elek yöntemi ile harmanlama yapılarak fraksiyonlarına ayrılır [29].

Vermükilite uygulanan harmanlama işleminden sonra konsantreler toplanır, kurutulur ve boyutlarına ayrılarak genleştirme ünitesine yönlendirilir. Vermükülitin rutubet alma özelliği taşımamasından dolayı depolanma işleminin kapalı mekanlarda yapılması son derece önemlidir. Aksi durumda vermükülit genleştirmek için gerekli enerji miktarı ve maliyetinde belirgin artışlar oluşmaktadır. Genleştirme işlemine tabi tutulacak ham vermükülit konveyör yardımıyla 6-7 metre yüksekliğindeki içi seramik/tuğla kaplı yüksek fırın üzerine çıkarılır [38]. Malzeme beslemesi yukardan yapılmakta ve malzeme fırın içindeki plakalardan düşerken alevle karşılaşmaktadır. Genleşen taneler ve tozlar bir fan vasıtasıyla çekilmekte ve daha sonra siklon ile birbirinden ayrılmaktadır. Genleşme ünitesinde, 900- 1000°C'de düşey fırınlarda 4-8 saniye bekletilerek, ani ısı etkisiyle genleştirilir ve genleşmemiş kısımlar harmanlama ile genleşenlerden ayrılır. Elde edilen genleşmiş ürün, torbalanarak pazarlanmaya hazır hale getirilir [29]. Şekil 2.7'de vermükülitin üretim aşamaları şematik olarak gösterilmiştir [44].



Şekil 2.7. Vermikülitin Üretim Aşamaları [44]

Ham vermiculitin genişleme işlemi düşey, eğimli, döner, toroidal tip fırınlar kullanılarak yapılmaktadır. Düşey fırınlarda vermiculit yukarıdan aşağı düşerken sıcak bölgeden geçer, genişler ve aşağı düşer. Şekil 2.8’de düşey tip fırından çıkan genişleştirilmiş vermiculit görülmektedir [45].



Şekil 2.8. Düşey Fırında Vermikülitin Genleştirilmesi [45]



Şekil 2.9. Genleştirilmiş Vermikulit Üretiminde Kullanılan Eğimli Fırın [45]

Döner tip fırınlarda direkt veya dolaylı olarak ısıtma yönetimi ile genişirme işlemi yapılır.



Şekil 2.10. Genleştirilmiş Vermikulit Üretiminde Kullanılan Döner Fırın [45]

Şekil olarak depolama silolarına benzeyen toroidal fırın ise akışkan yataklı bir hazneye sahiptir.



Şekil 2.11. Genleştirilmiş Vermikülit Üretiminde Kullanılan Toroidal Fırın [45]

2.3.4. Vermikülitin Özellikleri

2.3.4.1. Fiziksel Özellikleri

Monoklinik sistemde kristallenen vermükilit düzenli dilinime sahip olup yeşil, sarımsı kahve ve hatta siyah renklere bulunabilir. Vermükilit Mohs ölçeğine göre 1,2 ile 2,0 arasında bir sertliğe sahip olup özgül ağırlığı ise $2,4-2,8 \text{ gr/cm}^3$ 'dür. Vermikülit yüksek sıcaklıklara çıkarıldıktan sonra aniden soğutulduğunda ısı şokuna maruz kaldığında hacimce genişerek uzamaktadır. Vermikülitte oluşan bu karakteristik genişleme, bünyesindeki kristal suyun aniden buharlaşmasıyla meydana gelen buhar basıncının etkisiyle gerçekleştiği düşünülmektedir. Buna rağmen ısıl genişleme olayının günümüzde halen tam anlamıyla açıklanmamasının nedeni, ağırlıkça aynı miktarda su içeren numunelerin dahi farklı oranlarda genişebilmelerinden kaynaklanmaktadır. Vermikülitte genişleme olayını etkileyen bir diğer önemli parametre ise, kimyasal birleşim ve yapraklar arasında bulunan su moleküllerinin hangi bağlarla yapıya tutunmuş olduğudur. Genişleme sonucunda malzemenin yığın yoğunluğu, yaklaşık 10 kat azalarak $0,8 \text{ g/cm}^3$ 'den $0,08 \text{ g/cm}^3$ 'e düşmektedir. Yığın yoğunluğundaki düşüş,

vermikülitin kalitesine ve genişlemenin yapıldığı fırın performansına bağlı olmakta ve ısıl işlem sonucunda yaklaşık 30 katlık bir genişleme sağlanabilmektedir [29,30,31,35].

Vermükilit kalitesini belirlemek için tüketici/üretici ülkeler göre değişmekte olan çeşitli sınıflandırmalar yapılmaktadır. Türkiye'de kaliteyi belirleyen ve TSE tarafından da standardize edilen, tane boyuna göre yapılan sınıflama esas alınmakta olup Tablo 2.5'de bu sınıflandırma gösterilmiştir [29].

Tablo 2.5. Vermikülitin Tane Boyu Dağılımına Göre Sınıflandırılması [29]

Kare gözlü elek üzerinde biriken miktar, ağırlıkça %							
Elek gözü açıklığı							
Sınıflar	9,50 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	0,06 mm	0,30 mm	0,15 mm
1	30-80		80-100				
2	0-10			90-100			
3		0-10	45-90		95-100		
4			0-10		90-100	60-98	90-100
5				0-5			

Amerika'da kullanılan saf vermikülitin tane boyu ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması Tablo 2.6' da gösterilmiştir. Tablo 2.7'de ise Amerika'da kullanılan, saf vermikülitin elekten geçen miktarı ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

Tablo 2.6. Amerika'da Kullanılan Saf Vermikültin Tane Boyu ve Yoğunluğuna Göre Sınıflandırılması [36]

Sınıflar	Tane Boyu (μm)	Yoğunluk (Kg/m^3)
1	6,680-1,700	800-1,040
2	2,360-1,180	800-1,040
3	1,700-425	800-1,040
4	600-212	720-1,040
5	-425	640-800

Tablo 2.7. Amerika’da Kullanılan, Saf Vermikülitin Elekten Geçen Miktarı ve Yoğunluğuna Göre Sınıflandırılması [30].

Sınıf	1	2	3	4	5
Elek Gözü	Elek üstünde biriken miktar (%)				
Açıklığı					
9.05 mm	0-10				
4.75 mm	30-60	0-5			
2.36 mm	65-95	20-80	0-10		
1.18 mm	85-100	75-99	20-60	0-5	
600 µm		90-100	65-95	15-65	0-10
300 µm			75-98	60-98	10-50
150 µm			90-100	90-100	55-85
Yoğunluk (kg/m ³)	64-112	64-128	80-128	96-160	128-176

2.3.4.2. Kimyasal Özellikleri

Monoklinik sistemde kristalleşen vermicülitin X-ray çalışmalarında mika veya kloritten farklı olarak belirli bir tip teşkil ettiği gösterilmektedir. Karakteristik bir vermicülitin kimyasal bileşenlerinin önemli bir kısmını SiO₂, Al₂O₃ ve MgO elementleri oluşturmaktadır. Tablo 2.8’de tipik bir vermicülitin kimyasal analizi görülmektedir [45].

Tablo 2.8. Tipik Vermikülitin Kimyasal Analizi [45]

Element	Ağırlıkça oranı (%)
SiO ₂	38 to 46
Al ₂ O ₃	10 to 16
MgO	16 to 35
CaO	1 to 5
K ₂ O	1 to 6
Fe ₂ O ₃	6 to 13
TiO ₂	1 to 3
H ₂ O	8 to 16
Diğer	0.2 to 1.2

2.3.5. Vermikülitin Kullanım Alanları

Ham hali ile kullanımı hayli zor olan Vermikülitin endüstri alanında daha çok geliştirilmiş hali tercih edilmektedir. 1950'li yıllara kadar vermikülit sadece inşaat sektöründe, ısı yalıtım özelliğiyle dolgu malzemesi ve blok olarak kullanılırken, hafif agregalar halinde alçı ve sıvalarda kullanılmıştır. 1950'lerde fiziksel ve kimyasal özelliklerinin çalışılması ile vermikülitin diğer alanlarda da kullanılabileceği ortaya çıkmıştır [29].

Genleştirilmiş vermikülit başlıca şu alanlarda kullanılmaktadır [46].

- Hafif betonlar ve harçlar
- Gevşek yalıtım dolgularında
- Vermikülit sıvalarında
- Yangına karşı koruyucu malzeme olarak
- Seracılıkta
- Sürtünme balatalarında
- Yapılandırma ve yüksek ısı izolasyonunda
- Yüzme havuzu yalıtımında
- Özel kaplama conta ve keçelerde
- Paketleme makinelerinde
- Hayvan yemi olarak

2.3.5.1. Hafif Beton ve Harçlar

Yalıtımlı hafif beton üretmek için agrega yerine kullanılmaktadır. Yalıtım gerektiği yerlerde özellikle çatı ve zeminlerin yalıtımında, prekast yapı elemanlarında kullanılmaktadır[47]. Şekil 2.12’de vermikülitin hafif beton uygulaması verilmektedir.



Şekil 2.12. Vermikülitin Hafif Beton Uygulaması [47]

2.3.5.2. Sıcaklığa Dayanıklı Sıva

Vermikülit; alçı ve çimento ile karıştırılarak yangına karşı dayanıklı, işlenebilirliği kolay olan, su emmesi düşük ve yapışma kabiliyeti yüksek sıva olarak kullanılmaktadır

[47]. Vermikülit kullanılarak üretilen sıcaklığa dayanıklı sıva örneği Şekil 2.13’de verilmektedir.



Şekil 2.13. Vermikülitin Sıva Uygulaması [47]

2.3.5.3. Isı ve Ses Yalıtımı

Yalıtım yapılacak bölgeye serilen vermikülit ısı ve ses izolasyonda kullanılmaktadır. Çatı döşemelerinde genişletilmiş vermikülitin derzler içerisine serilmesiyle, soğuk havalarda ısının muhafazası ve sıcak havalarda serinlik sağlanmaktadır. Ayrıca ses yalıtımı da sağlamaktadır. Isı ve ses yalıtımı için uygulama örneği Şekil 2.14’de verilmektedir.



Şekil 2.14. Vermikülitin Çatı Yalıtım Uygulaması [47]

2.3.5.4. Yangından Korunma

Genleştirilmiş vermikülitin yüksek sıcaklığa karşı dayanımı bilinmektedir. Reçine esaslı karışımlarla birlikte kullanılan vermikülit, yapı elemanlarının sıcaklıktan korunmasında kullanılmaktadır. Vermikülit içeren kompozitlerin ısı iletim katsayıları oldukça düşük olduğu için yangın esnasında kapladığı alanı korumaktadır. Çelik yapı elemanlarının giydirme yöntemi ile yüksek sıcaklıklardan korunması sağlanmıştır. Şekil 2.15’de yangından korunma uygulamaları verilmektedir.



Şekil 2.15 Vermikülitin Yangından Koruma Uygulamaları [47]

2.3.5.5. Yüksek Sıcaklık İzolasyonu

Vermikülit, refrakter çimento ve kil ile birleştirilmesiyle 1100 °C’ye kadar birçok malzemenin üretilmesinde kullanılmaktadır. Üretilen malzemenin değişik şekillerde kalıplanmasıyla yüksek sıcaklık fırınlarında izole edici malzeme olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.16’da uygulama örneği verilmektedir.



Şekil 2.16. Vermikülitin Üretiminde İzolasyon Malzemesi Uygulaması [47]

2.3.5.6. Su Yalıtımı

Vermikülit; çimento ve reçine esaslı özel katkıları ile birleştirilerek; su izolasyonunda kullanılmaktadır. Havuzlarda geçirimsiz, esnek ve sağlam bir tabaka sağlanması amacıyla kullanılır. Şekil 2.17’de su yalıtımı uygulaması verilmektedir.



Şekil 2.17. Vermikülitin Su Yalıtımı Uygulaması [47]

2.3.5.7. Isı ve Ses Yalıtım Levhaları

Genellikle genişletilmiş vermicülitin reçine esaslı kompozitlerle birlikte kullanılmasıyla elde edilen yalıtım levhaları, ısı ve ses yalıtımında kullanılmaktadır. Farklı boyutlara ve kalınlıklara yalıtım levhaları Şekil 2.18’de verilmiştir.



Şekil 2.18. Vermikülitin Isı Yalıtım Uygulaması [47]

2.4. Yüksek Sıcaklık

Yüksek sıcaklık, yapılarının dayanıklılık problemine neden olan fiziksel etkenlerden biridir. Bu etki yapıların işlevsiz kalmasına, hatta can ve mal kayıplarına neden olmaktadır [48]. Yüksek sıcaklığın etkileri üzerine geçmişten günümüze kadar birçok araştırma yapılmıştır. Yapılan araştırmalarda yangın esnasında ve sonrasında malzemenin yangına karşı göstermiş olduğu davranışlar gözlemlenmiş ve yapının bütünlüğü anlaşılmasına çalışılmıştır [49].

2.4.1. Yüksek Sıcaklık Kaynakları

Yapı ve malzemelerine büyük hasarlar veren yüksek sıcaklığın kaynakları, yangın, endüstri fırın bacaları ve nükleer reaktörler şeklinde gösterilebilir [50].

Yangın; katı, sıvı ve/veya gaz halindeki maddelerin kontrol dışı yanması ile oluşan yangın yüksek sıcaklıklara neden olmaktadır. Araştırmalara göre, doğak bir yangın olayının genel olarak ateşleme, yavaş yanma, ısınma ve soğuma şeklinde dört fazdan meydana geldiği belirtilmektedir. Tüm parlama öncesi oluşan fazlara ateşleme ve yanma fazları, sonra oluşanlara ısınma ve soğuma fazları olarak adlandırılmaktadır. Tüm parlama öncesi fazı gelişmekte olan yangın, tüm parlama sonrası fazı ise gelişmiş olan yangın durumunu göstermektedir [5].

Endüstri Fırın Bacaları; Günümüzde sıcaklığın 1250-1300 °C ye ulaştığı endüstri fırın bacalarındaki artık ısı enerjisinin geri kazanımı için ısı eşanjörleri, ısı reküperatörleri, döner tip ısıtıcılar, ısı boruları ve ısı pompaları gibi araçlar kullanılarak sıcaklık yaklaşık 200 °C' ye kadar düşürülebilmektedir [51].

Nükleer Reaktörler; Nükleer reaktörlerde sistemin sıcak parçalarından transfer olan ısı, nötron ve gama ışınlarının baskısı ile oluşan sıcaklık nedeniyle, reaktörü koruyan betonların yüksek sıcaklığa maruz kalmalarına neden olur. Radyasyonun koruyucu betona zararı fazla yoktur fakat sıcaklık nedeniyle dayanımı düşer ve nötron baskısına karşı etkisi düşer. Nükleer reaktörde hızlı nötron ve gama ışınları yavaşlatılırken reaktör çekirdeğinde oluşan enerji koruyucu beton üzerinde tutulur ve ısı şeklinde salınır. Bu ısı reaktör çekirdeği etrafında etkilidir. Sodyum yakma havuzlarıyla

sodyum-beton reaksiyonu 400 °C’de başlar ve yarım saat gibi bir sürede sıcaklık 800 °C’yi aşar. [52].

2.4.2. Beton ve Harçlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi

500 °C’nin altında harçlar dirençli doğrusal olmayan yarı-gevrek bir davranış sergilerler. 700 °C’nin üzerinde davranış doğrusal olmayan sünek bir davranışa dönüşür. Harçlarda sıcaklık altında en uygun direnç 300 °C -500 °C sıcaklık aralığında elde edilir ve 900 °C de malzeme direnç sergileyemez [53].

Beton ve harçlar yüksek sıcaklığa maruz kaldığında iç buhar basıncı oluşabilir ve bu buhar basıncı da çatlamaya yol açabilir. Boşluk basıncı genellikle betonun çekme dayanımı aşan çekme gerilmeleri sebep olur. Bu da betonda etkili çatlamaya neden olur [54-55]. Isıl mikro çatlaklar özellikle kalsiyum hidroksit etrafında hidrate olmuş çimento hamurunda oluşur. Betonda hasar 300 °C’ye kadar agrega ve çimento hamuru arasında bölgede gözlemlenir. Bu sıcaklığın üstünde çatlak belirgin şekilde artar [54]. Soğuma sırasında ısıl çatlaklar oluşabilir ve bu durum kalsiyum hidroksidin tekrar hidrasyonuna ve hacim artışına neden olabilir. Uçucu kül gibi puzzolonik malzemeler soğuma sırasında çatlakların azalmasını yardım eder, öyleki puzzolik malzemelerdeki reaktif SiO₂ ve kalsiyum hidoksitteki hidrate çimento arasındaki puzzolik aktivite sayesinde kalsiyum hidroksit tüketilir [54].

Silis dumanı puzzolanik bir malzeme olmasına rağmen, özellikle %10’un üzerinde silis dumanı içeren betonların 350 C sıcaklık seviyesinin üzerindeki performansları zayıftır. Yüksek sıcaklıklarda silis dumanının matris yoğunluğunu ve iç buhar basıncını arttırdığı bilinmektedir. Öyle ki, çatlağın ve kararsız yapının oluştuğu yüksek sıcaklıklarda silis dumanı içeren beton dayanımını hızlıca kaybeder [56-57]

Nima Farzadnia ve ark. nano titanyumun harçlara ilavesi ile 600 °C sıcaklıklara kadar harçların eşik dayanımlarında %14’e kadar artış, elastik modül ve enerji yutma kapasitesinde ise iyileşme olduğunu ifade etmişlerdir [58].

Mineral katkıların ilavesi, düşük s/ç oranı ve süper akışkanlaştırıcı katkıları yüksek performanslı betonların özelliklerini etkilerler. Buna karşılık, yüksek performanslı betonlarda düşük geçirimsizlik olumlu bir durumdur, ancak yüksek sıcaklığa maruz

kalınmdığında olumsuz etki yapar [59]. Sıcaklık etkisi ile ortaya çıkan hasarlar için iki mekanizma tanımlanır; birincisi mikroyapıdaki değişikliğe neden olan hidrate ürünlerin bozulması, ikincisi ise iç buhar basıncının neden olduğu kararlı çatlak gelişimidir [60]. Sıcaklık etkisi ile açığa çıkan su buharının (nemin buharlaşması ile) neden olduğu C-S-H ve C-H değişimi ile içyapıdaki bozulma mekanizmaları daha önce yapılan araştırmalar ile açıklanmıştır [61,62]. Bazı çalışmalarda, metakolen, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi mineral katkıların betonların sıcaklığa karşı direncini arttırdığı vurgulanmıştır [63,64]. Mineral katkılı betonlarda sıcaklığa karşı direnç C-S-H'ta güçlü topaklaşma ve yüksek oranda C-H tüketimine bağlı olduğu ifade edilmektedir.

Williamson and Rashed, %0, %8 ve %16 silis dumanı içeren harçların yüksek sıcaklık sonrası, düşük, normal ve yüksek dayanımlı harçların reziduel dayanımlarını araştırmışlardır. Sıcaklık etkisiyle düşük dayanımlı harçların dayanımlarındaki kayıp silis dumanı içeren harçlarınkine kıyasla daha yüksek elde edilmiştir. Bununla karşılık, silis dumanı içeren yüksek dayanımlı harçlarda silis dumanı içermeyenlere kıyasla daha fazla dayanım kaybı olduğu çalışmada ifade edilmiştir [65].

Jahsen, silis dumanının betonun yangın direncine olumsuz etkisi yapabileceğini, silis dumanı kullanımı ile oluşan yoğun ve sıkı bir yapının yüksek sıcaklığa maruz yüksek dayanımlı betonun hasarına neden olabileceği ifade etmişlerdir. Bu nedenle riskli yapılarda silis dumanının bu etkisini azaltmak için çelik tel kullanımını önermiştir [66].

Yüksek sıcaklık etkisi altında kalmış çimento harçlarının farklı soğutma koşullarında eğilmede çekme dayanımı, basınç dayanımı ve boşluk oranı değişimini incelemek için 2010 yılında Durmuş ve Arslan bir çalışma yapmıştır. Çeşitli harçlara 100, 300, 500, 700 ve 900 °C yüksek sıcaklıklar uygulayarak ve soğutma işlemini havada ve suda soğutma işlemleriyle çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Bu çalışma sonucunda numunelerin 100 °C'de eğilmede çekme ve basınç dayanımlarında bir miktar artış görülmesine karşın bundan sonraki sıcaklık değişimlerinde ortalamaya bağlı olarak düşüş eğilimi gözlemlenmiştir. 500 °C'deki eğilmede çekme dayanımının havada soğutulmuş harç örneklerinde % 29, suda soğutulmuş harç örneklerinde ise % 58; basınç dayanımının havada soğutulmuş harç örneklerinde % 10, suda soğutulmuş da

ise % 35 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte havada soğutulmuş harçta boşluk oranını % 3.3 artarken, suda soğutulmuş harçta ise % 9 oranında arttığını görülmüştür [67].

Yüksek sıcaklık etkisi ile ilgili Kızılkant ve Yüzer, örnek üretimi, kürü, ısıtma-soğutma süreci, fiziksel ve mekanik olmak üzere dört aşamalı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Numune üretiminde silis ve kalker esaslı agregalar ile Standart CEN kumu ve aynı granülometride kalker esaslı agregalar kullanılırken bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 çimentosu, silis dumanı, uçucu kül, cüruf ve silis esaslı malzemeler kullanılmıştır. Numune karışımlarına çimento ağırlığının %10'u tekabül edecek şekilde puzolan malzemeleri eklemiştir. Harç numuneleri her sıcaklık için üç adet olmak şartıyla toplam 336 adet ve 40×40×160 mm boyutlarında üretilmiştir. Numunelerin su/bağlayıcı oranı 0,5 olacak şekilde melamin esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi farklı oranlarda kullanılmıştır. Numune karışımlarında kullanılan agrega, puzolan türleri ve soğutma şekline göre adlandırılmıştır. Kalker esaslı agrega ile üretilen numuneler 900 °C' ye kadarki sıcaklıklarda silis esaslı agrega ile üretilen örneklerine kıyasla daha iyi performansla sahip olmuşlardır. 600 °C' den sonraki sıcaklıklarda silis esaslı agreganın kullanıldığı örneklerin basınç dayanımında önemli oranda azalma görülmüştür. 900 °C 'den sonra kalker esaslı agreganın kullanıldığı gruplarda ise dayanımda belirgin azalma gerçekleşmiştir. Üretiminde silis dumanı ile kalker esaslı agrega, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile silis esaslı agrega kullanılan harç örnekleri, yüksek sıcaklık altında daha iyi basınç dayanımı göstermiştir [68].

Topçu ve Demir tarafından yapılan araştırmalarda farklı tip çimentolarla üretilen harçların yüksek sıcaklığa maruz bırakılmasıyla mekanik ve fiziksel özelliklerindeki değişimleri konu almıştır. Harç üretiminde kullanılan agregalar aynı tutularak çimento tiplerinin farklılıklarıyla yüksek sıcaklıkta kalma süreleri ve sonrasında soğuma şekilleri değiştirilmesi sonucundaki davranışlarının incelenmesi ve bu sonuçların kendi aralarında değerlendirilmesi hedeflenmiştir. 40×40×160 mm ebatlarındaki harç numuneleri TS EN 196-1 (Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini) standartlarına uygun olarak hazırlanmış ve 24 saatin ardından kalıplarından çıkarılmıştır. Bu numuneler 20±2 °C sıcaklıktaki kirece doymuş suda 28. güne kadar

bekletilmişlerdir. Numuneler karışımdaki çimentonun tipi, yüksek sıcaklıktaki süreleri ve soğuma şekillerine göre isimlendirilmiştir. Hazırlanan numunelerin ısıtma ve soğutma süreci, istenilen sıcaklıklara kadar ısıtma ve oda sıcaklığına kadar soğutulmuş kontrol deneylerinin yapılması şeklinde işlemektedir. Kürde bekletilen numuneler 28 gün sonunda çıkarılarak etüvde kurutulduktan sonra üçerli gruplar halinde TS EN 1363-1'e (Yangına dayanıklılık deneyleri bölüm 1: Genel kurallar) göre ısıtma hızı 6 °C/dak. olan fırında 150, 300, 400, 600 ve 900 °C sıcaklıklara kadar ısıtılarak 1, 3 ve 5 saat şeklinde üç farklı sürede bekletilmiştir. Numunelerin soğutulması ise oda sıcaklığında bekletilerek yavaş yavaş ve suda bekletilerek ani olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Soğutma işlemi tamamlanan numunelere birim ağırlık, dinamik elastisite modülü, eğilme ve basınç dayanımı, ultrases hızı, kılcal su emme katsayısı, ağırlıkça su emme deneyleri yapılarak değerleri belirlenmiştir. 1-3 saat uygulanan yüksek sıcaklık sonrasında numunelerin dayanımı önemli derecede etkilenirken, sıcaklık uygulama süresi arttırıldığında dayanıma etkinin azaldığı ve bu nedenle oluşan büyük dayanım azalmalarının ilk iki saat içerisinde gerçekleştiği sonucu ortaya çıktığı gözlemlenmiştir [69].

Gülce, dört farklı portland çimentosu kullanarak hazırladığı harç numunelerinin yüksek sıcaklık altında çimento tiplerinin ve sağuma tiplerinin farklılıklarının dayanıma olan etkisini kıyaslamayı amaçlamıştır. Bu kapsamda numuneleri 28 günlük ve 56 günlük kür sürelerinin ardından, 150, 300, 450, 600 ve 900 °C olmak üzere beş farklı sıcaklıkta ısıtılmış, soğutma işlemi havada ve suda olmak üzere iki farklı şekilde yapılmıştır. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numunelerde birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda çimento tipleri arasında büyük farklılıklar oluşmasa da yüksek sıcaklığa maruz kalması muhtemel yapıların bileşiminde Cem III tipi çimento kullanılmasının yararlı olacağı belirtilmiştir. Dört çimento tipi için de havada soğutmanın iyi sonuçlar doğurduğu gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklar altında harç numunelerinde önemli dayanım kayıplarının yaşandığı, özellikle de 450 °C ile 900 °C arasında daha fazla olduğu dikkat çekmiştir [50].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Genleştirilmiş vermikülit tozunun hacimsel olarak %0, %15, %30 ve %45 oranlarda ince agrega ile yer değiştirilmesiyle üretilen harçların yüksek sıcaklığa dirençleri deneysel çalışma ile araştırılmıştır. Deneysel çalışma kapsamında iki farklı çimento (portlant çimentosu ve kalsiyum alüminatlı çimento), 4 farklı genleştirilmiş vermikülit/ince agrega oranı ve 4 farklı sıcaklık etkisi bağımsız değişken olarak alınmıştır. Herbir deney sıcaklığı için 8 seri harç üretilmiştir. Üretilen harç numunelere standart kür (28 gün su içerisinde) sonrası yüksek sıcaklığa maruz bırakılan ve laboratuvar ortamındaki referans numuneler üzerinde fiziksel özelliklerin tayini için birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, ultrases hızı ve ısı iletkenlik deneyleri, mekanik dayanımların belirlenmesi için ise basınç ve eğilme dayanım deneyleri yapılmıştır.

3.1.Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada CEM I 42,5 R Tipi ve Alüminatlı olmak üzere iki farklı çimento, kum, vermikülit ve sudan oluşan harç karışımları hazırlanmıştır.

3.1.1. Çimento

Çalışma kapsamında CEM I 42,5 R Tipi Çimento ve Alüminatlı Çimento kullanılmıştır. Çimentolara ait fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler Tablo 3.1 ve 3.2'de verilmektedir.

Tablo 3.1. CEM I 42,5 R Tipi Çimento Özellikleri

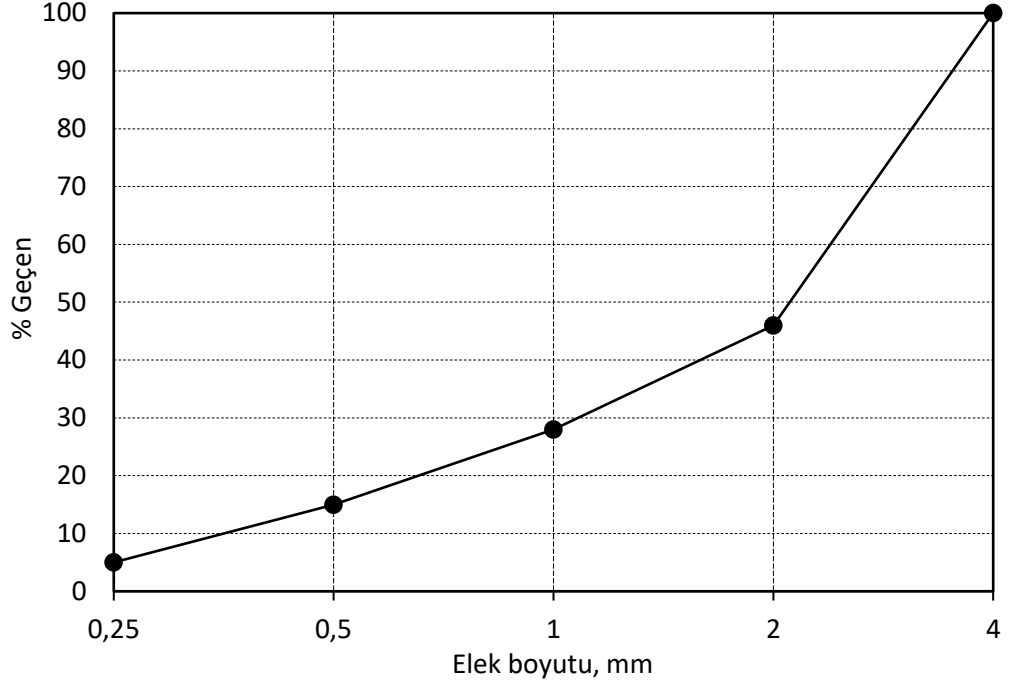
Kimyasal Bileşim	%	Fiziksel Özellikler	
CaO	62,09	32 μ altı (%)	18,55
SiO ₂	18,44	45 μ altı (%)	8,12
Al ₂ O ₃	5,50	Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,08
Fe ₂ O ₃	3,18	Özgül yüzey Blaine (cm ² /g)	3088
SO ₃	3,64	Priz başı, dakika	166
MgO	2,24	Priz sonu, dakika	216
K ₂ O	1,06		
Na ₂ O	0,12		
Çözünmeyen kalıntı	0,39		
Kızdırma kaybı	3,34		

Tablo 3.2. Alüminatlı Çimento Özellikleri

Kimyasal Bileşim	
Bileşen	(%)
CaO	36,41
TiO ₂	2,36
SiO ₂	4,72
Al ₂ O ₃	36,56
Fe ₂ O ₃	17,10
SO ₃	0,00
MgO	1,26
K ₂ O	0,13
Na ₂ O	0,24
Çözünmeyen kalıntı	1,08
Kızdırma kaybı	0,14
Fiziksel Özellikler	
32µ altı (%)	37,75
45µ altı (%)	28,86
Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,20
Özgül yüzey (cm ² /g)	3053
Mekanik Özellikler	
6 saatlik basınç dayanımı	47 MPa
24 saatlik basınç dayanımı	70 MPa

3.1.2. Agregada

Çalışmada agregada olarak kırılmakum ve vermikülit kullanılmıştır. Harç üretiminde ince agregada olarak özgül ağırlığı 2,63 ve su emme oranı %0,98 olan kalker kökenli 0-4 mm kırılmakum kullanıldı. İnce agregada ait tane dağılım eğrisi Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. İnce Agreganın Tane Dağılımı

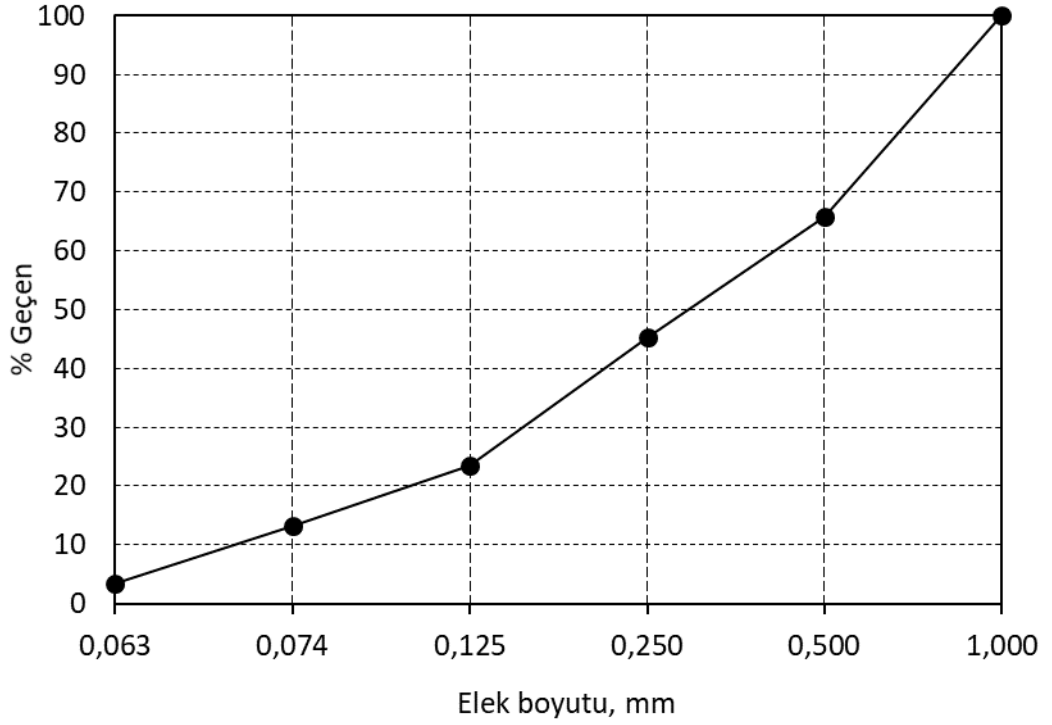
Çalışmada Ukrayna Menşeli genişletilmiş vermikülit tozu kullanılmıştır. Vermikülitte ait özellikler sırasıyla Tablo 3.3 ve Şekil 3.3’de verilmektedir.



Şekil 3.2. Çalışmada Kullanılan Genleştirilmiş Vermikülit Tozu

Tablo 3.3. Genleştirilmiş Vermikülit Tozu Tane Boyutu Dağılımı

Elek Boyutu, mm	% Geçen
1,0	100,0
0,5	65,69
0,250	45,25
0,125	23,36
0,074	13,14
0,063	3,28



Şekil 3.3. Genleştirilmiş Vermikülit Tozu Tane Boyutu Dağılımı Eğrisi

3.1.3. Karışım Suyu

Bu çalışmada karışım suyu olarak ortalama sıcaklığı $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) olan şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Karışım Oranları ve Üretim

Harçların üretiminde standart harç karışım miktarları referans alınmıştır. İki farklı çimento karışımı (Portland çimento ve kalsiyum alüminatlı çimento) s/ç oranı 0,5 olacak şekilde vermikülit/kum oranı %0, %15, %30 ve %45 olacak şekilde harç numuneleri üretilmiştir. Her bir harç numunesi için referans sıcaklık (laboratuvar sıcaklığı) ve 3 farklı sıcaklık değerleri alınarak numuneler üretilmiştir. Bu şekilde toplam 32 grup harç numunesi kullanılmıştır. Karışım oranları Tablo 3.5 ve 3.6'da verilmektedir.

Tablo 3.5. Portland Çimentosu ve Alüminatlı Çimento için harç karışım miktarları

Karışım Kodu	Vermikülit/Kum		Çimento (g)	Su (g)	Kum (g)	Vermikülit Tozu (g)
	V _v Hacimce, (%)					
V0-T20	0		1350	675	4050	0
V0-T300			1350	675	4050	0
P0-T600			1350	675	4050	0
V0-T900			1350	675	4050	0
V15-T20	15		1350	887	3444	75
V15-T300			1350	887	3444	75
V15-T600			1350	887	3444	75
V15-T900			1350	887	3444	75
V30-T20	30		1350	1052	2838	150
V30-T300			1350	1052	2838	150
V30-T600			1350	1052	2838	150
P30-T900			1350	1052	2838	150
V45-T20	45		1350	1237	2241	225
V45-T300			1350	1237	2241	225
V45-T600			1350	1237	2241	225
V45-T900			1350	1237	2241	225

Karışım hazırlanırken ilk önce çimento ve agrega karıştırıldı. Ardından vermikülit eklenip tekrar karıştırma işlemi yapılarak homojen dağılımı sağlandı. Daha sonrasında karışım suyu eklendi. Karışımların tamamı harç makinasında yapılmıştır.

3.2.1. Numune Üretimi

Standart çimento kalıbı kullanılarak, portland ve alüminatlı çimentolar için ayrı ayrı her bir vermikülit oranı %0, %15, %30, %45 olan, 20 °C, 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerleri için 40×40×160 mm boyutlarında prizma numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler, bir gün sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca 22 ± 3 °C sıcaklıkta su içerisinde kür edilmiştir. 8 farklı karışım için 32 grup olmak üzere 96 adet numune üretilmiştir.

Üretilen numunelerdeki kodlama sistemi, çimento tipi, vermikülit oranı ve deneysel sıcaklık değerleri olarak yapılmıştır. Örneğin, PÇ-V15-T600-2 numunesi; portland çimentolu vermikülit oranı %15 olan ve 600°C sıcaklığa maruz bırakılmış ikinci numuneyi tanımlamaktadır. Benzer şekilde, AÇ-V30-T300-3 numunesi; alüminatlı çimentolu vermikülit oranı %30 olan ve 300°C sıcaklığa maruz bırakılmış üçüncü numuneyi tanımlamaktadır.

Çalışmada sıcaklığa maruz bırakılmayan referans (şahit) numuneler ise kodlamada T20 ifadesi bulunan numunelerdir. Şekil 3.4’de 24 saat kalıpta bekletilen numuneler ve Şekil 3.5’de ise numunelerin 28 günlük durumu gösterilmiştir.



Şekil 3.4. 24 Saat Kalıpta Bekletilen Numuneler



Şekil 3.5. 28 Günlük Numuneler

3.3.Deneysel Yöntemler

3.3.1. Taze Harç Deneyleri

3.3.1.1. Birim Ağırlık Deneyi

Harç numunelerinin üretimi sırasında TS EN 12350-6'da (Beton-Taze Beton Deneyleri – Bölüm 6: Yoğunluk) belirtilen şartlara uygun olarak taze birim ağırlık deneyleri yapılmıştır.

3.3.1.2. Yayılma Tablası Deneyi

Harçların kıvamının belirlenmesi amacıyla numunelerin üretimi sırasında taze harçlar üzerinde TS EN 1015-3'e (Kargir harcı - Deney Metodları - Bölüm3: Taze harç kıvamının tayini) uygun olarak yayılma tablası deneyi (Şekil 3.6) yapılmıştır.



Şekil 3.6. Yayılma Tablası Deney Aleti

3.3.2. Numunelerin Sıcaklık Etkisi Uygulaması

28 günlük standart kür süresinin ardından numuneler 300 °C, 600 °C ve 900 °C etkisine maruz bırakılmak üzere yüksek sıcaklık fırınına konulmuştur. İstenilen sıcaklığa ulaşmak için sıcaklık artışı 7 ± 3 °C/dk. olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Numuneler hedef sıcaklıkta 3 saat süreyle bekletildikten sonra kendiliğinden soğumaya bırakılmış ve ardından numuneler üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler yapılmıştır.

3.3.3. Sertleşmiş Harç Deneyleri

3.3.3.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Deneyleri

28 günlük standart kür sonrası şahit ve sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra kendiliğinden soğumaya bırakılan harç prizma numuneler üzerinde kuru birim hacim ağırlık, porozite ve su emme oranlarının tespiti için Arşimet deneyi yapılmıştır. Ayrıca, Arşimet deneyi ile su içinde tartılarak gerçek hacimleri hesaplanan numunelerin birim hacim ağırlık (BHA), gözeneklilik değeri (P) ve su emme oranları (μ) sırasıyla (3.1), (3.2) ve (3.3) eşitlikleri yardımı ile hesaplanmıştır.

$$BHA = \frac{W_0}{W_1 - W_2}, kg / m^3 \quad (3.1)$$

$$P(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_1 - W_2} \quad (3.2)$$

$$\mu(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \quad (3.3)$$

Burada,

W_0 : Etiv kuru ağırlık

W_1 : Suya doygun havadaki ağırlık

W_2 : Su içerisindeki ağırlık olarak ifade edilmektedir.

3.3.3.2. Eğilme Dayanımı Tayini

Çalışmada üretilen 40×40×160 mm boyutundaki prizma numuneler üzerinde TS EN 196-1 (Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini) standartlarına uygun olarak eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme deneyi düzeneği Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Eğilme Deney Düzeneği

Eğilme deneyi 50 N/s yükleme hızında ve her bir karışım grubu için üç adet numune üzerinde yapılmıştır. Deney sonucu olarak üç numunenin ortalaması alınmıştır.

$$\sigma_e = \frac{1.5PL}{bd^2}$$

Burada;

P : Uygulanan kuvvet (N)

L : Mesnetler arası uzaklık (100 mm)

b : Numune kesitinin kısa kenar uzunluğu (40 mm)

d : Numune kesitinin yüksekliği (40 mm)

σ_e : Eğilme dayanımı, MPa

ifade etmektedir.

3.3.3.3. Basınç Dayanımı

Eğilme dayanımı deneyinden elde edilen numuneler üzerinde TS EN 196-1 (Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini) standartlarına uygun olarak basınç deneyi yapılmıştır. Basınç deney düzeneği Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Basınç Dayanımı Deney Düzeneği

Basınç deneyi 50 N/s yükleme hızında ve eğilme deneyi sonrası 2 parçaya ayrılan numunelerden elde edilen toplam 6 adet numune üzerinde yapılmıştır. Deney sonucu 6 adet numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir.

$$\sigma_b = \frac{P}{A}$$

Burada,

P : Uygulanan kuvvet (N)

A : Kesit Alanı (1600 mm²)

σ_b : Basınç Dayanımı, MPa

ifade etmektedir.

3.3.2.4 Ultrases Geçiş Hızlarının Belirlenmesi

Numuneler üzerinde sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve sonrasında TS EN 12504-4 (Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini) standartlarına uygun olarak ultrases geçiş hızının tayini deneyi yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.9. Ultra Ses Geçiş Hızının Belirlenmesi

Deneyde, ultrases aleti ile 0,1 μ s duyarlıklı ses geçiş süreleri ölçölmüştür. Ses geçiş hızı ölçüm yapılan numune boyunun kaydedilen geçiş süresine bölünmesiyle elde edilmiştir.

$$V_s = \frac{l}{t}$$

Burada,

V_s : Ultrases geçiş hızını (km/sn)

l : İki transducer arası mesafeyi (160 mm)

t : Ultrases geçiş süresi (μ s)

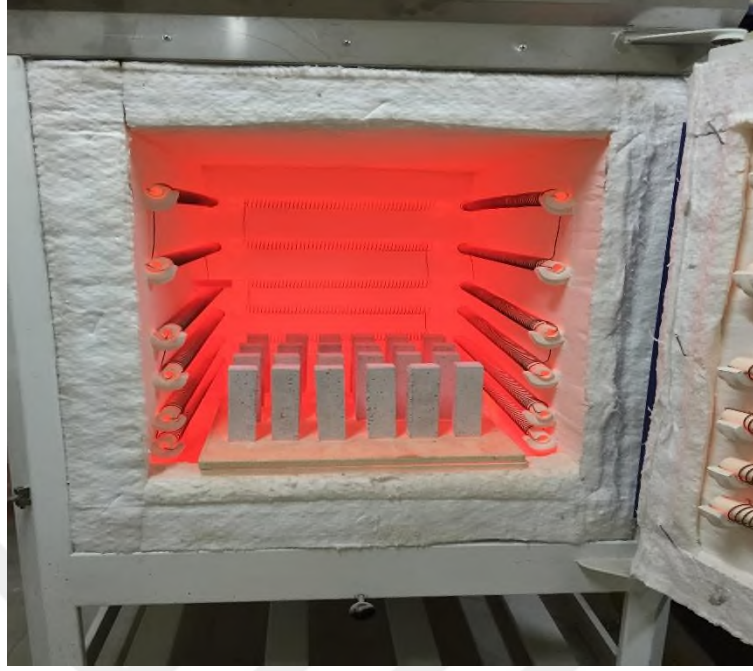
ifade etmektedir.

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

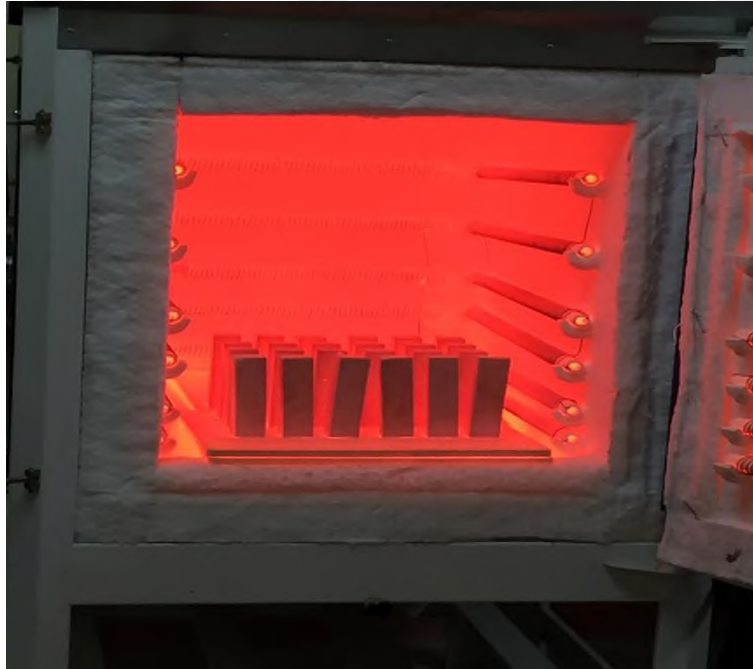
Çalışmada üretilen 40×40×160 mm boyutundaki prizma numuneler 28 gün standart küre tabi tutulduktan sonra 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklığa maruz bırakılmışlardır (Şekil 4.1, 4.2 ve 4.3). Numuneler hedef sıcaklıkta 3 saat süreyle bekletildikten sonra fırından çıkarılarak oda sıcaklığında normal soğumaya bırakılmıştır (Şekil 4.4, 4.5 ve 4.6). Soğuma sonrasında sıcaklık etkisine maruz bırakılan numuneler ile referans numuneler üzerinde standartlara uygun olarak kuru birim ağırlık, su emme, boşluk oranı, ultrases geçiş hızı, basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır.



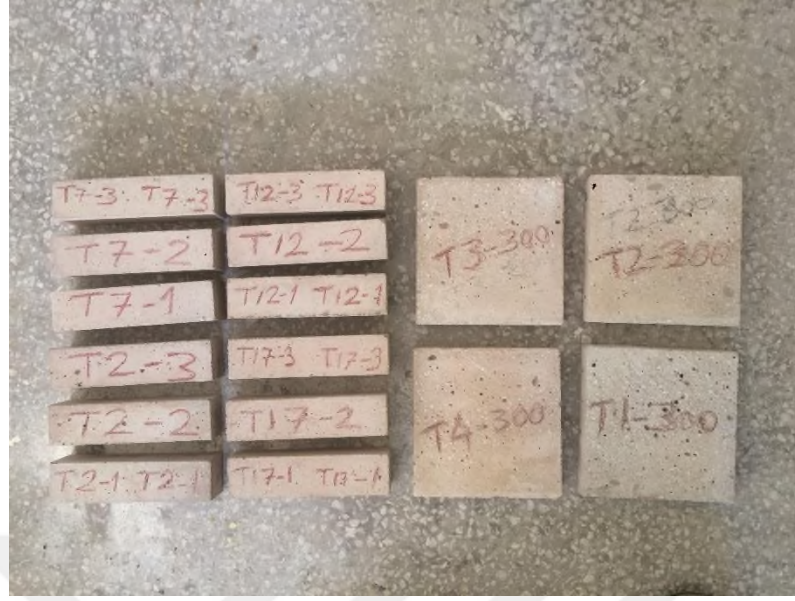
Şekil 4.1. Numunelerin 300 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu



Şekil 4.2. Numunelerin 600 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu



Şekil 4.3. Numunelerin 900 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu



Şekil 4.4. Numunelerin 300 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu



Şekil 4.5. Numunelerin 600 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu



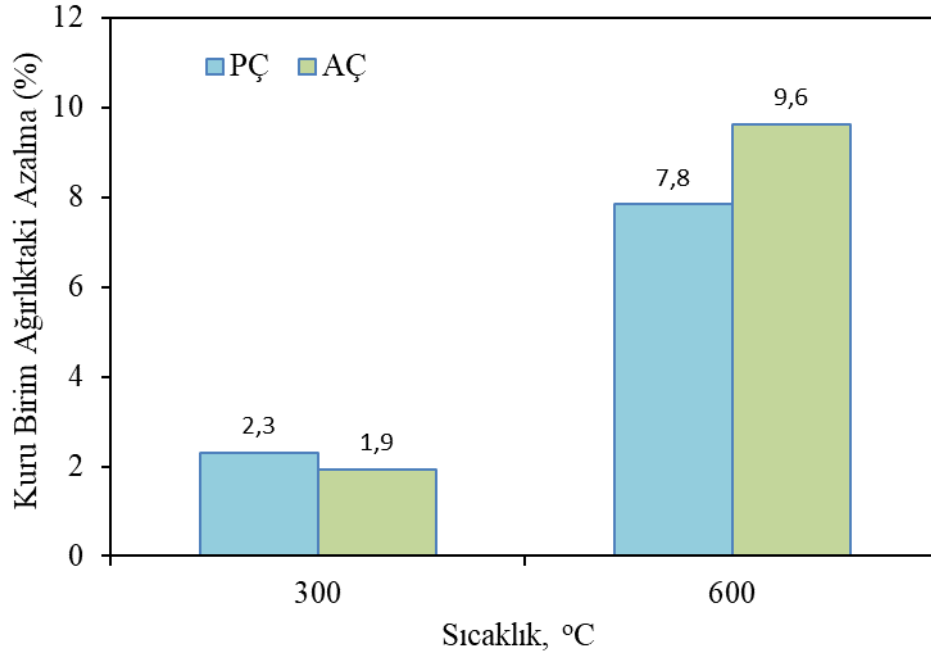
Şekil 4.6. Numunelerin 900 °C Sıcaklığa Maruz Bırakıldıktan Sonraki Durumu

4.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık

28 gün standart bakıma tabi tutulan numuneler sabit ağırlığa erişinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş harç numunelerin sıcaklık öncesindeki ve sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra kuru birim ağırlıkları belirlendi. Kuru birim ağırlık deney sonuçları ve sıcaklığa bağlı değişim oranları Tablo 4.1’de verilmiştir.

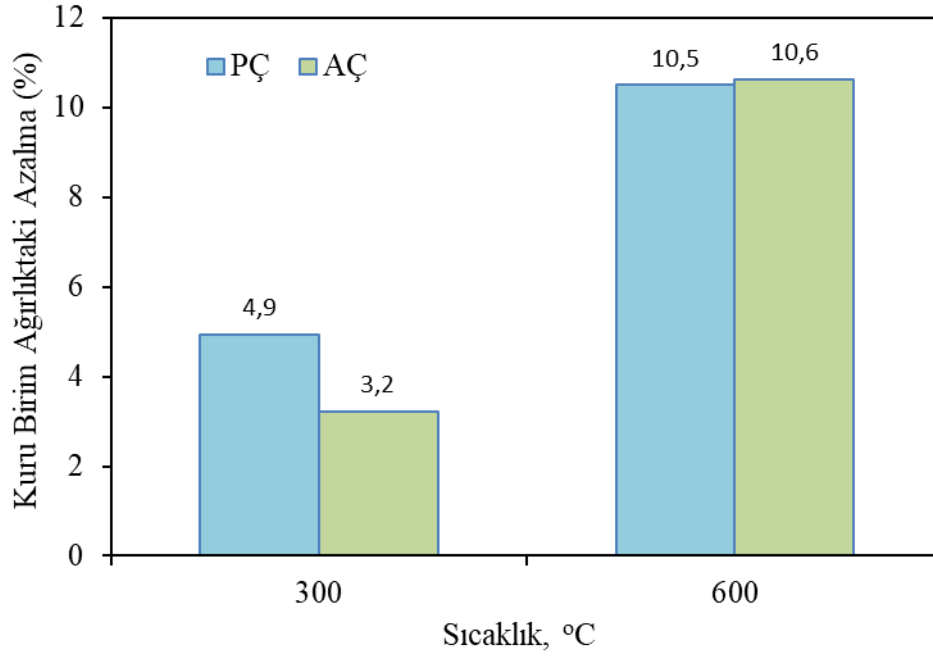
Tablo. 4.1. Numunelerin Kuru Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Vermikülit Oranı, V_v (%)	Sıcaklık $^{\circ}\text{C}$	Portland Çimento			Alüminatlı Çimento		
		Birim Ağırlık, kg/m^3		% Değişim	Birim Ağırlık, kg/m^3		% Değişim
		Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası		Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	
0	20	2179	-	-	2288		
	300	2173	2123	-2,30	2282	2237	-1,94
	600	2169	1999	-7,84	2276	2057	-9,63
	900	2178	-	-	2276		
15	20	2000	-	-	2149		
	300	2048	1947	-4,93	2177	2106	-3,23
	600	2040	1826	-10,50	2178	1946	-10,62
	900	2024	-	-	2179		
30	20	1861	-	-	2015		
	300	1854	1785	-3,71	2001	1920	-4,07
	600	1846	1649	-10,64	1979	1766	-10,76
	900	1911	-	-	2007		
45	20	1672	-	-	1798		
	300	1675	1578	-5,83	1808	1690	-6,51
	600	1673	1475	-11,84	1805	1540	-14,71
	900	1670	-	-	1781		



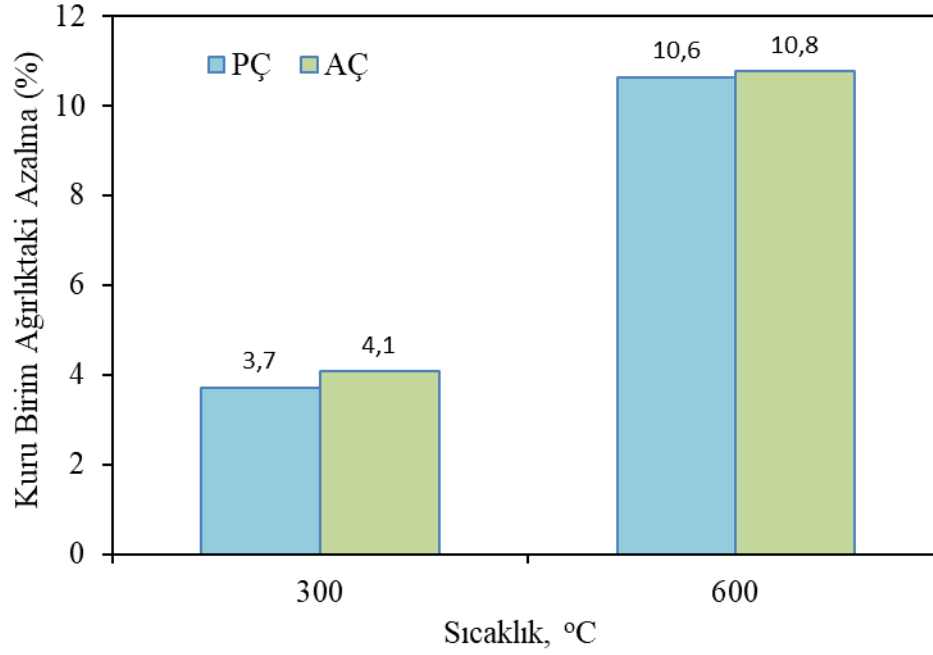
Şekil 4.7. %0 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Kuru Birim Ağırlığın Değişimi

Vermikülit oranı %0 ($V_v = 0$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi kuru birim ağırlıklarının sıcaklık sonrası kuru birim ağırlıklarına kıyasla %2,3 oranında azalırken, 600 °C’de ise %7,84 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık öncesi kuru birim ağırlıklarının sıcaklık sonrası kuru birim ağırlıklarına kıyasla %1,94 oranında azalırken 600 °C’de ise %9,63 oranında azaldığı gözlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülitli numunelerde sıcaklığa bağlı kuru birim ağırlığın değişimi Şekil 4.7’de verilmiştir.



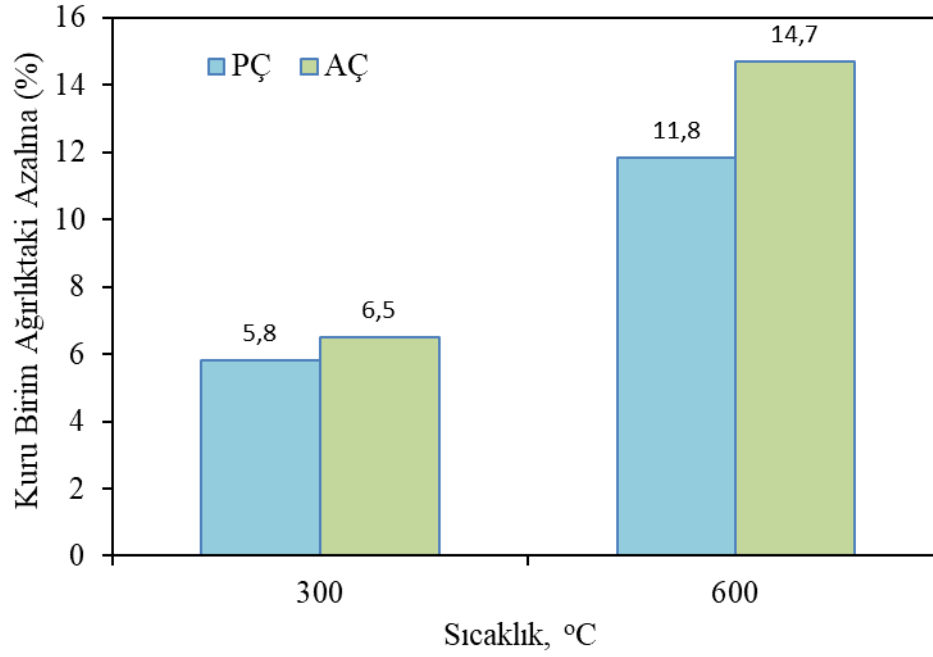
Şekil 4.8. %15 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Kuru Birim Ağırlığın Değişimi

Vermikülit oranı %15 ($V_v = \%15$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi kuru birim ağırlıklarının sıcaklık sonrası kuru birim ağırlıklarına kıyasla %4,9 oranında azalırken, 600 °C’de ise %10,5 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık öncesi kuru birim ağırlıklarının sıcaklık sonrası kuru birim ağırlıklarına kıyasla %3,2 oranında azalırken 600 °C’de ise %10,6 oranında azaldığı gözlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %15 olan numunelerde sıcaklığa bağlı kuru birim ağırlığın değişimi Şekil 4.18’de verilmiştir.



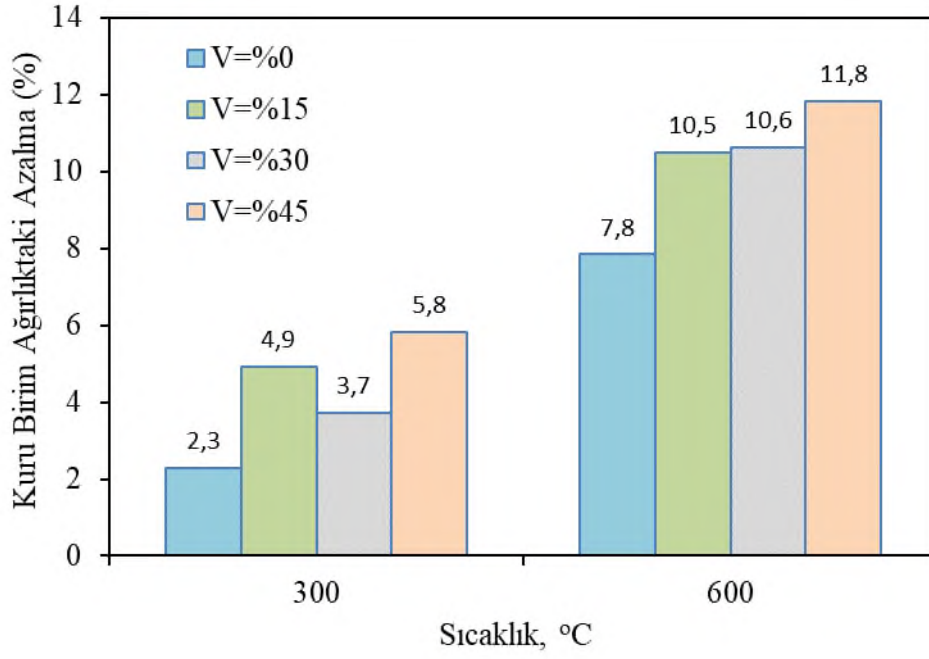
Şekil 4.9. %30 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Kuru Birim Ağırlığın Değişimi

Vermikülit oranı %30 ($V_v = \%30$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi kuru birim ağırlıklarının sıcaklık sonrası kuru birim ağırlıklarına kıyasla %3,7 oranında azalırken, 600 °C’de ise %10,6 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık öncesi kuru birim ağırlıklarının sıcaklık sonrası kuru birim ağırlıklarına kıyasla %4,1 oranında azalırken 600 °C’de ise %10,8 oranında azaldığı gözlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %30 olan numunelerde sıcaklığa bağlı kuru birim ağırlığın değişimi Şekil 4.9’da verilmiştir.

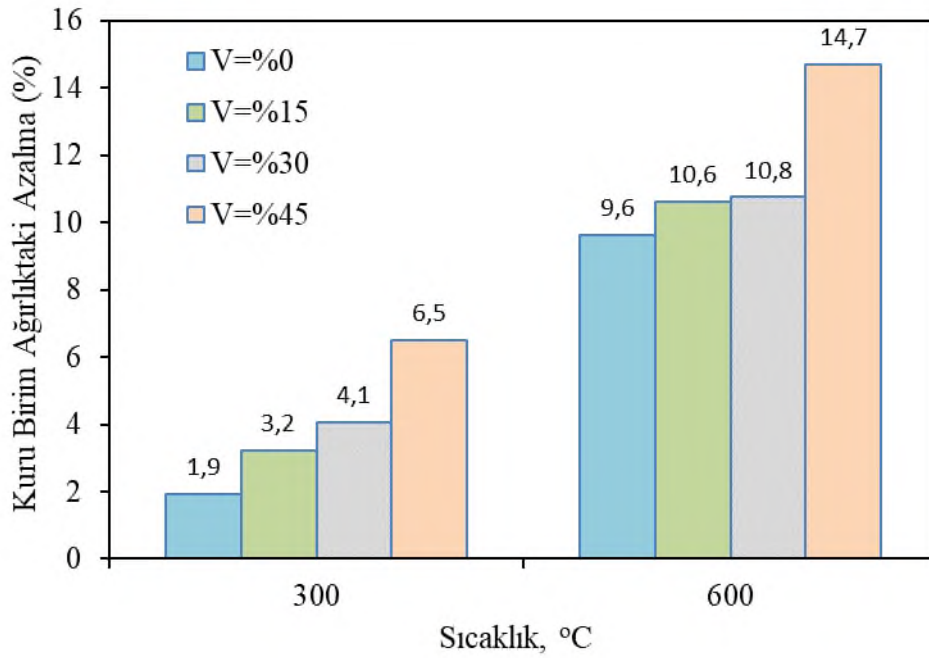


Şekil 4.10. %45 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Kuru Birim Ağırlığın Değişimi

Vermikülit oranı %45 ($V_v = \%45$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi kuru birim ağırlıklarının sıcaklık sonrası kuru birim ağırlıklarına kıyasla %5,8 oranında azalırken, 600 °C’de ise %10,8 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık öncesi kuru birim ağırlıklarının sıcaklık sonrası kuru birim ağırlıklarına kıyasla %6,5 oranında azalırken 600 °C’de ise %14,7 oranında azaldığı gözlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %45 olan numunelerde sıcaklığa bağlı kuru birim ağırlığın değişimi Şekil 4.10’da verilmiştir.



Şekil 4.11. Numunelerin Kuru Birim Ağırlığının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento)



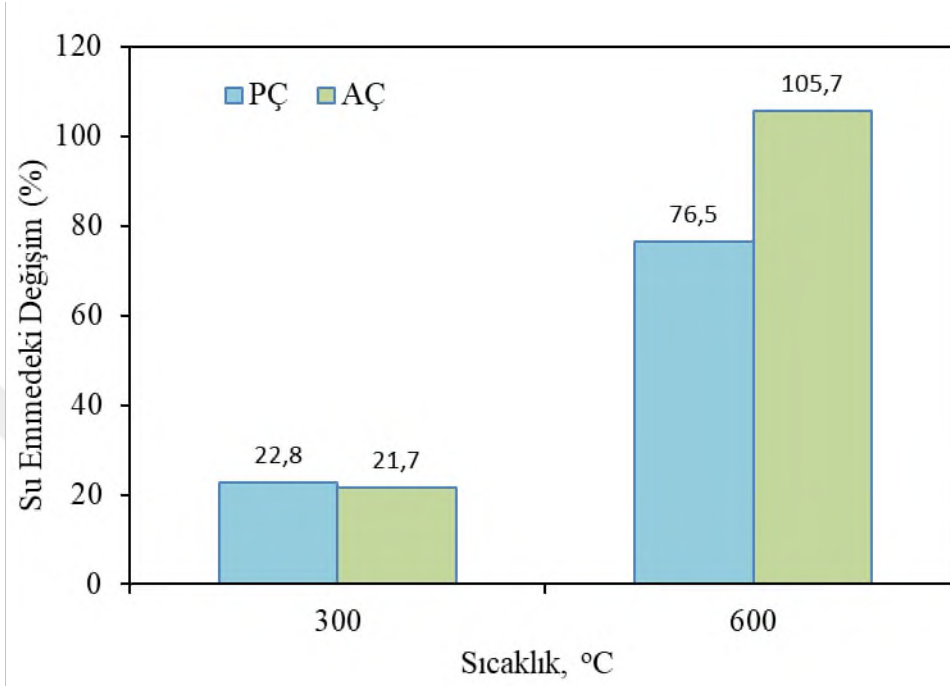
Şekil 4.12. Numunelerin Kuru Birim Ağırlığının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento)

4.2. Su Emme

28 gün standart bakıma tabi tutulan numuneler sabit ağırlığa erişinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş harç numunelerin sıcaklık öncesindeki ve sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki su emme oranları belirlendi. Su emme deney sonuçları ve sıcaklığa bağlı değişim oranları Tablo 4.2’de verilmiştir.

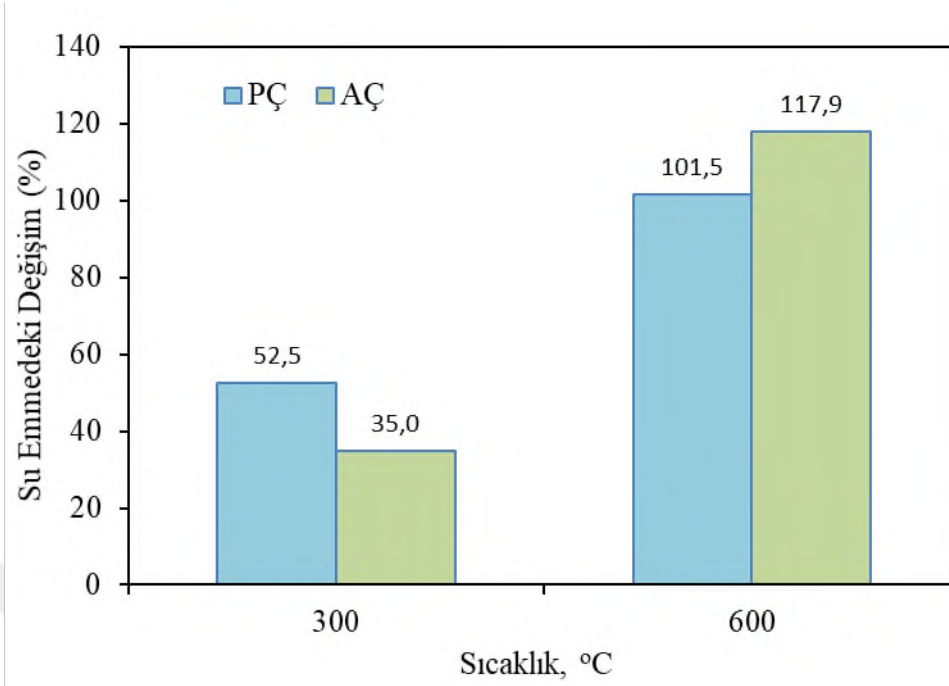
Tablo. 4.2. Numunelerin Su Emme Deney Sonuçları

Vermikülit Oranı, Vv (%)	Sıcaklık °C	Su Emme					
		Portland Çimento			Alüminatlı Çimento		
		Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim	Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim
0	20	6,3	-	-	6,5		
	300	6,9	8,5	22,80	6,5	7,9	21,66
	600	7,1	12,7	76,50	6,6	13,7	105,65
	900	7,2	-	-	6,7		
15	20	11,2	-	-	9,3		
	300	8,7	13,4	52,47	7,9	10,7	35,02
	600	9,1	18,4	101,48	7,7	16,9	117,87
	900	9,9	-	-	7,9		
30	20	14,1	-	-	10,7		
	300	14,2	18,0	26,93	11,4	15,3	35,04
	600	14,4	24,9	72,56	12,8	22,5	76,68
	900	10,2	-	-	11,3		
45	20	18,3	-	-	15,5		
	300	18,5	24,9	34,17	14,9	21,9	46,10
	600	18,8	32,2	70,73	14,7	31,0	110,38
	900	19,1	-	-	16,3		



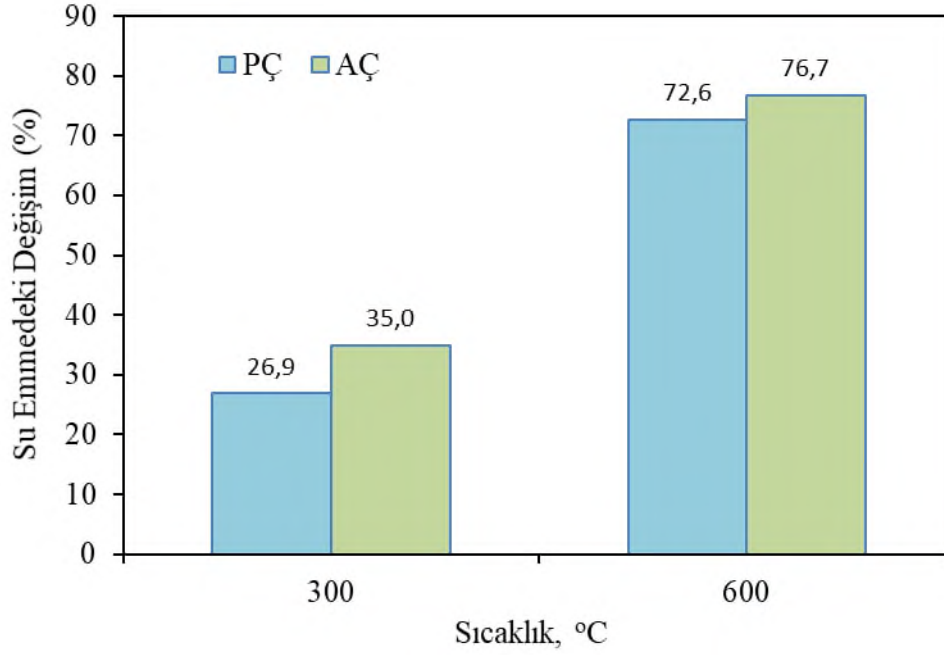
Şekil 4.13. %0 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Su Emme Oranın Değişimi

Vermikülit oranı %0 ($V_v=0$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi su emme değerlerinde sıcaklık sonrası su emme değerlerine kıyasla %22,8 oranında artarken, 600 °C’de ise %76,5 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık öncesi su emme değerlerinde sıcaklık sonrası su emme değerlerine kıyasla %21,7 oranında artarken, 600 °C’de ise %105,7 oranında arttığı gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülitli numunelerde sıcaklığa bağlı su emme oranının değişimi Şekil 4.13’de verilmiştir.



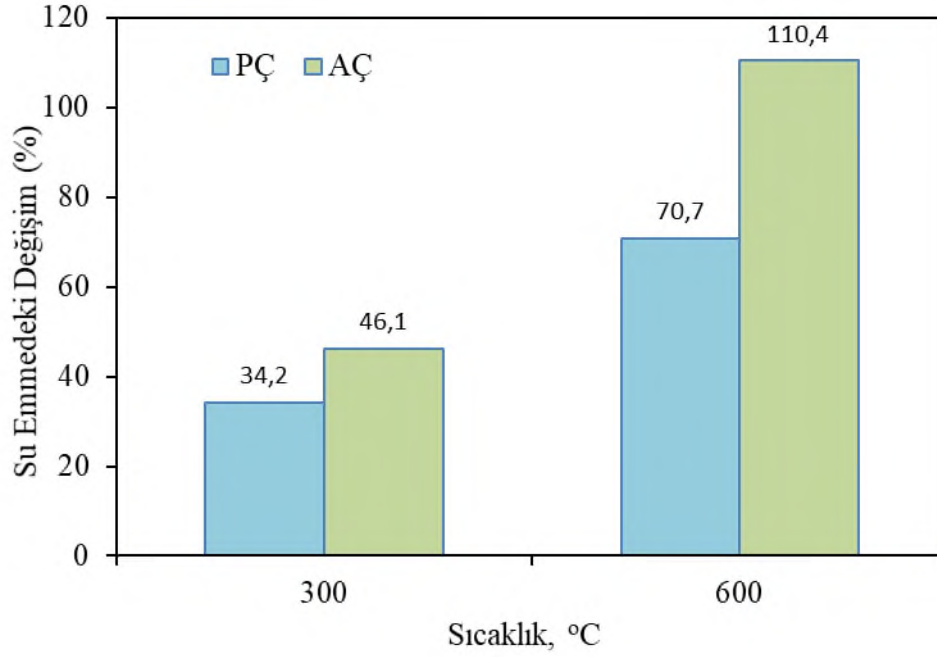
Şekil 4.14. %15 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Su Emme Oranın Değişimi

Vermikülit oranı %15 ($V_v = \%15$) olan karışımların portland çimento karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi su emme değerlerinde sıcaklık sonrası su emme değerlerine kıyasla %52,5 oranında artarken, 600 °C’de ise %101,5 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık öncesi su emme değerlerinde sıcaklık sonrası su emme değerlerine kıyasla %35 oranında artarken, 600 °C’de ise %117,9 oranında arttığı gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %15 olan numunelerde sıcaklığa bağlı su emme oranının değişimi Şekil 4.14’de verilmiştir.



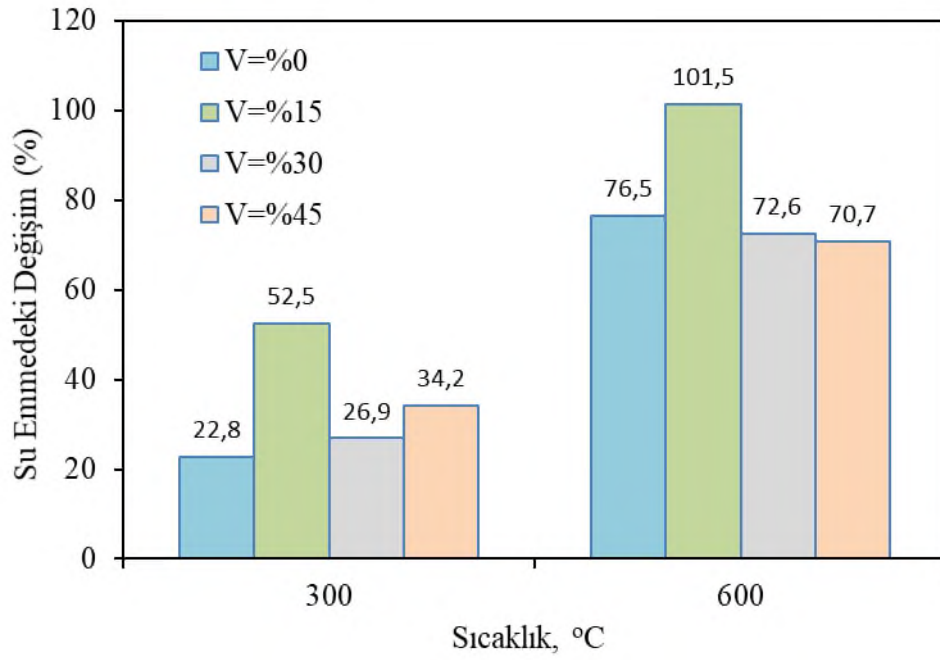
Şekil 4.15. %30 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Su Emme Oranın Değişimi

Vermikülit oranı %30 ($V_v = \%30$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi su emme değerlerinde sıcaklık sonrası su emme değerlerine kıyasla %26,9 oranında artarken, 600 °C’de ise %72,6 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık öncesi su emme değerlerinde sıcaklık sonrası su emme değerlerine kıyasla %35 oranında artarken, 600 °C’de ise %76,7 oranında arttığı gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %30 olan numunelerde sıcaklığa bağlı su emme oranının değişimi Şekil 4.15’de verilmiştir.

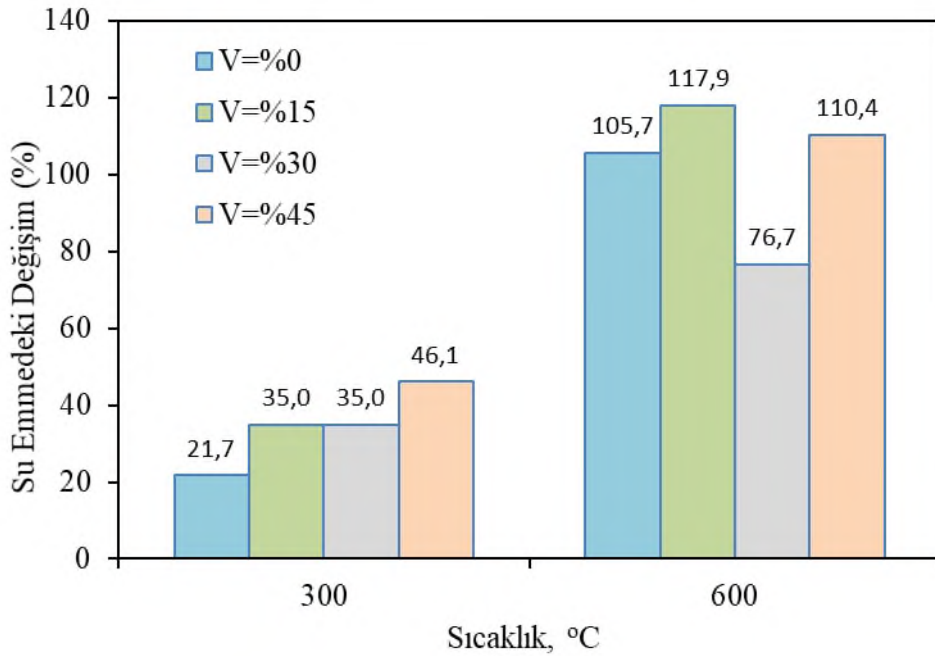


Şekil 4.16. %45 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Su Emme Oranın Değişimi

Vermikülit oranı %45 ($V_v = \%45$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi su emme değerlerinde sıcaklık sonrası su emme değerlerine kıyasla %34,2 oranında artarken, 600 °C’de ise %70,7 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık öncesi su emme değerlerinde sıcaklık sonrası su emme değerlerine kıyasla %46,1 oranında artarken, 600 °C’de ise %110,4 oranında arttığı gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %45 olan numunelerde sıcaklığa bağlı su emme oranının değişimi Şekil 4.16’da verilmiştir.



Şekil 4.17. Numunelerde Su Emme Oranın Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento)



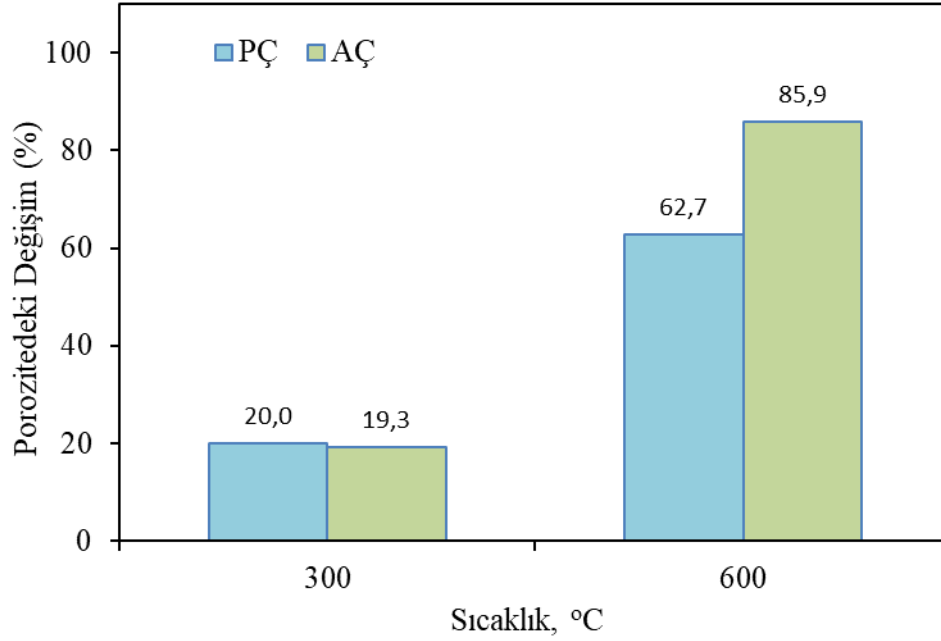
Şekil 4.18. Numunelerde Su Emme Oranın Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento)

4.3. Porozite

28 gün standart bakıma tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş harç numunelerin sıcaklık öncesindeki ve sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki porozite değerleri belirlendi. Porozite deney sonuçları ve sıcaklığa bağlı değişim oranları Tablo 4.3’de verilmiştir.

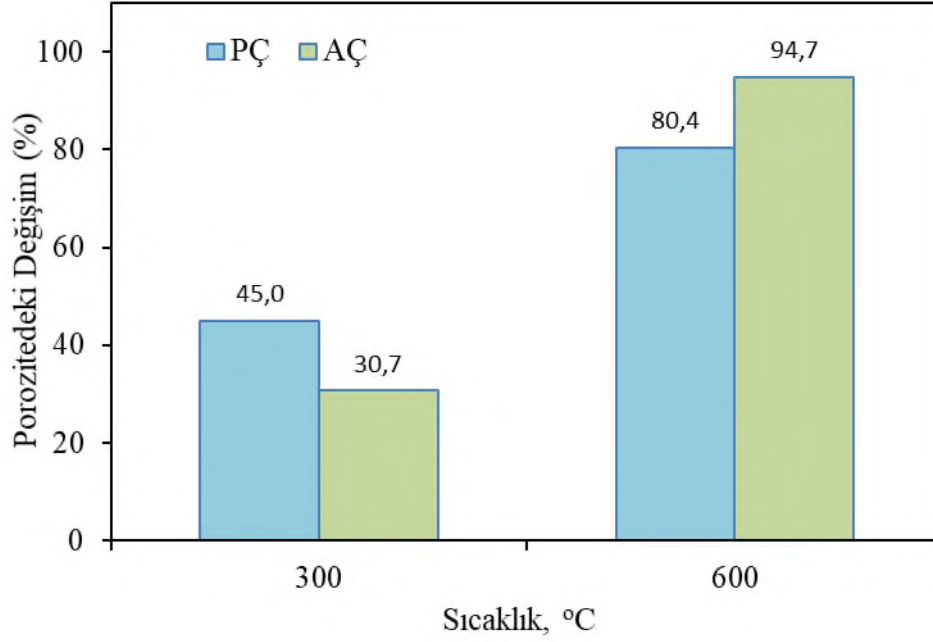
Tablo. 4.3. Numunelerin Porozite Deney Sonuçları

Vermikülit Oranı, Vv (%)	Sıcaklık °C	Porozite					
		Portland Çimento			Alüminatlı Çimento		
		Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim	Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim
0	20	13,93			14,86		
	300	15,09	18,11	20,01	14,86	17,73	19,30
	600	15,58	25,35	62,74	15,12	28,11	85,86
	900	15,71			15,26		
15	20	22,54			20,08		
	300	18,00	26,10	44,98	17,27	22,57	30,68
	600	18,64	33,62	80,36	16,88	32,88	94,74
	900	20,10			17,16		
30	20	26,27			21,48		
	300	26,41	32,28	22,21	22,74	29,46	29,56
	600	26,68	41,14	54,20	25,26	39,83	57,68
	900	19,48			22,61		
45	20	30,58			27,84		
	300	31,04	39,24	26,44	26,99	36,99	37,04
	600	31,53	47,50	50,64	26,45	47,75	80,55
	900	31,93			29,08		



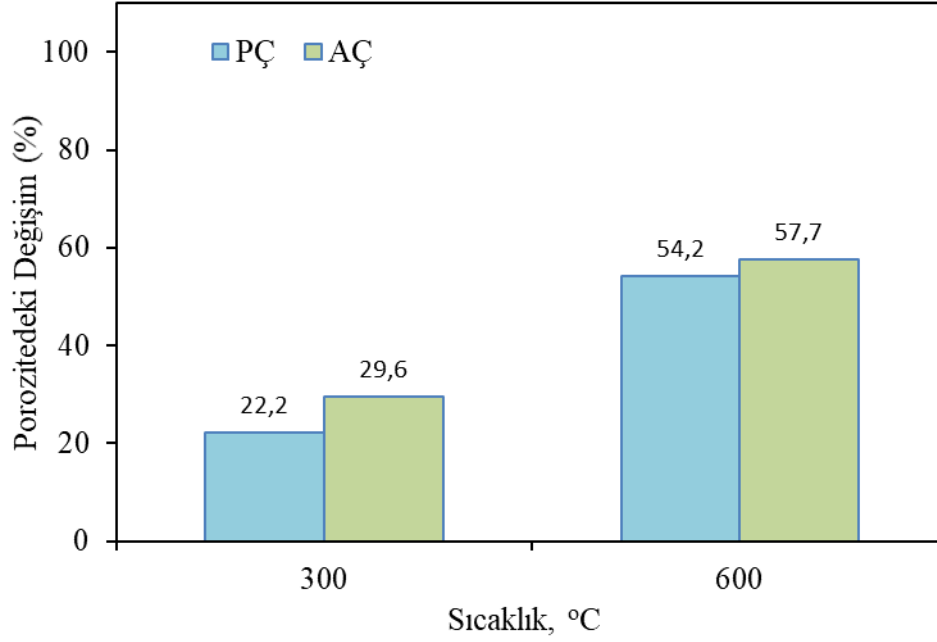
Şekil 4.19. %0 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Porozitenin Değişimi

Vermikülit oranı %0 ($V_v=0$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi görünen boşluk oranlarında sıcaklık sonrası görünen boşluk oranlarına kıyasla %20 oranında artarken, 600 °C’de ise %62,7 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık görünen boşluk oranlarında sıcaklık sonrası görünen boşluk oranlarına kıyasla %19,3 oranında artarken, 600 °C’de ise %85,9 oranında arttığı gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülitli numunelerde sıcaklığa bağlı porozite oranının değişimi Şekil 4.19’de verilmiştir.



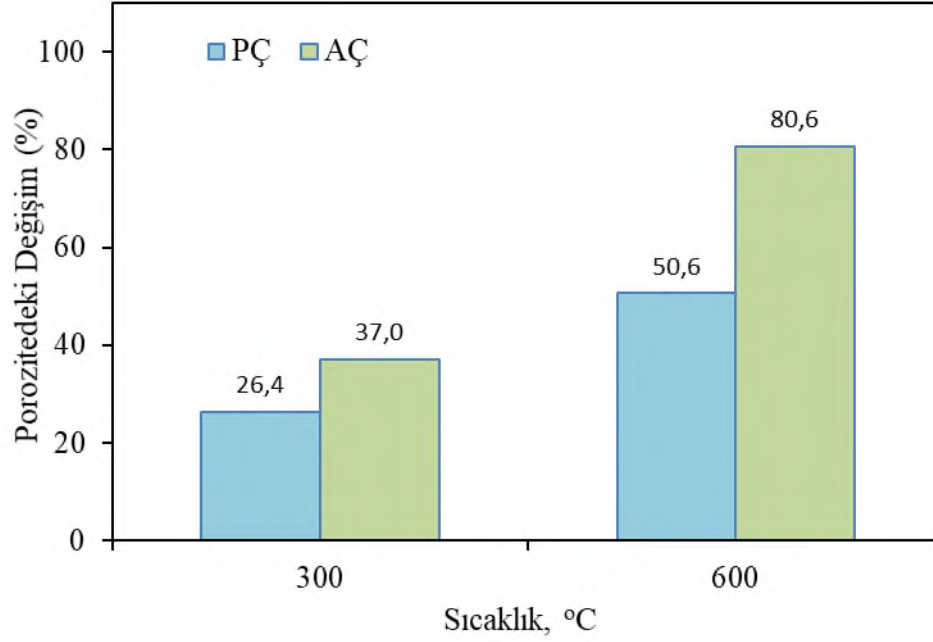
Şekil 4.20. %15 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Porozitenin Değişimi

Vermikülit oranı %15 ($V_v = \%15$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi görünen boşluk oranlarında sıcaklık sonrası görünen boşluk oranlarına kıyasla %45 oranında artarken, 600 °C’de ise %80,4 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık görünen boşluk oranlarında sıcaklık sonrası görünen boşluk oranlarına kıyasla %30,7 oranında artarken, 600 °C’de ise %94,7 oranında arttığı gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %15 olan numunelerde sıcaklığa bağlı porozite oranının değişimi Şekil 4.20’de verilmiştir.



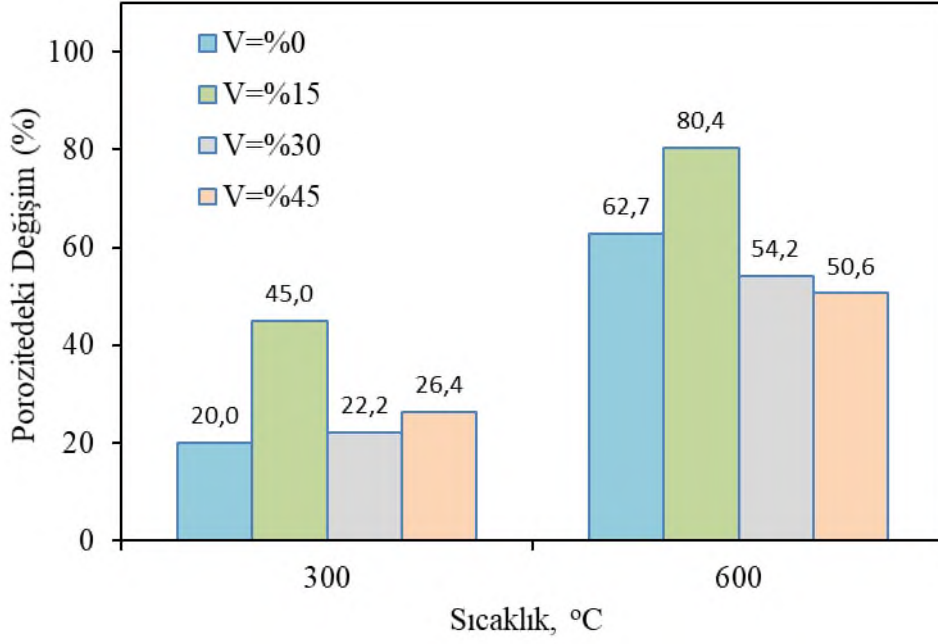
Şekil 4.21. %30 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Porozitenin Değişimi

Vermikülit oranı %30 ($V_v = \%30$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi görünen boşluk oranlarında sıcaklık sonrası görünen boşluk oranlarına kıyasla %22,2 oranında artarken, 600 °C’de ise %54,2 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık görünen boşluk oranlarında sıcaklık sonrası görünen boşluk oranlarına kıyasla %29,6 oranında artarken, 600 °C’de ise %57,7 oranında arttığı gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %30 olan numunelerde sıcaklığa bağlı porozite oranının değişimi Şekil 4.21’de verilmiştir.

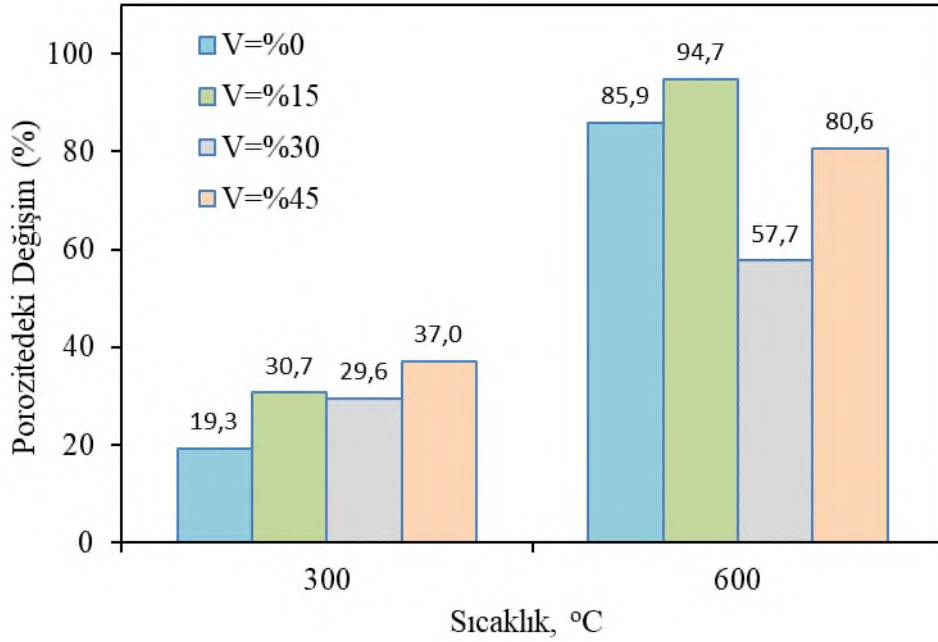


Şekil 4.22. %45 Vermikülitli Numunelerde Sıcaklığa Bağlı Porozitenin Değişimi

Vermikülit oranı %45 ($V_v = \%45$) olan karışımların portland çimentolu karışımında 300 °C’de sıcaklık öncesi görünen boşluk oranlarında sıcaklık sonrası görünen boşluk oranlarına kıyasla %26,4 oranında artarken, 600 °C’de ise %50,6 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise 300 °C’de sıcaklık görünen boşluk oranlarında sıcaklık sonrası görünen boşluk oranlarına kıyasla %37 oranında artarken, 600 °C’de ise %80,6 oranında arttığı gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %45 olan numunelerde sıcaklığa bağlı porozite oranının değişimi Şekil 4.22’de verilmiştir.



Şekil 4.23. Numunelerde Porozitenin Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento)



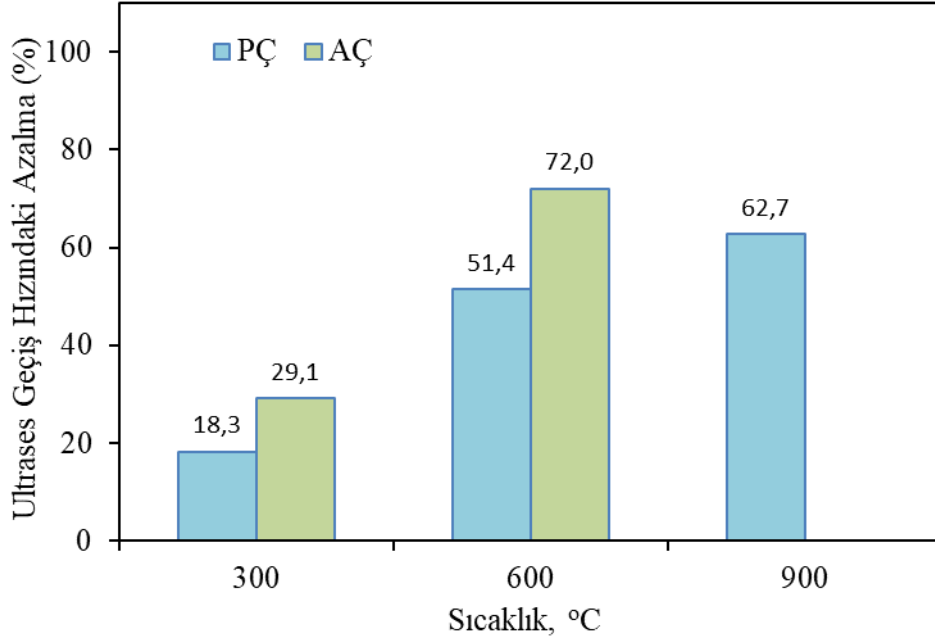
Şekil 4.24. Numunelerde Porozitenin Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento)

4.4. Ultrases Geçiş Hızı

Sıcaklık uygulamasından sonra üretilen numunelerin ultrases geçiş hızlarında büyük değişiklikler meydana gelmiştir. Ultrases geçiş hızı deney sonuçları ve sıcaklığa bağlı değişim oranları Tablo 4.4’de verilmiştir.

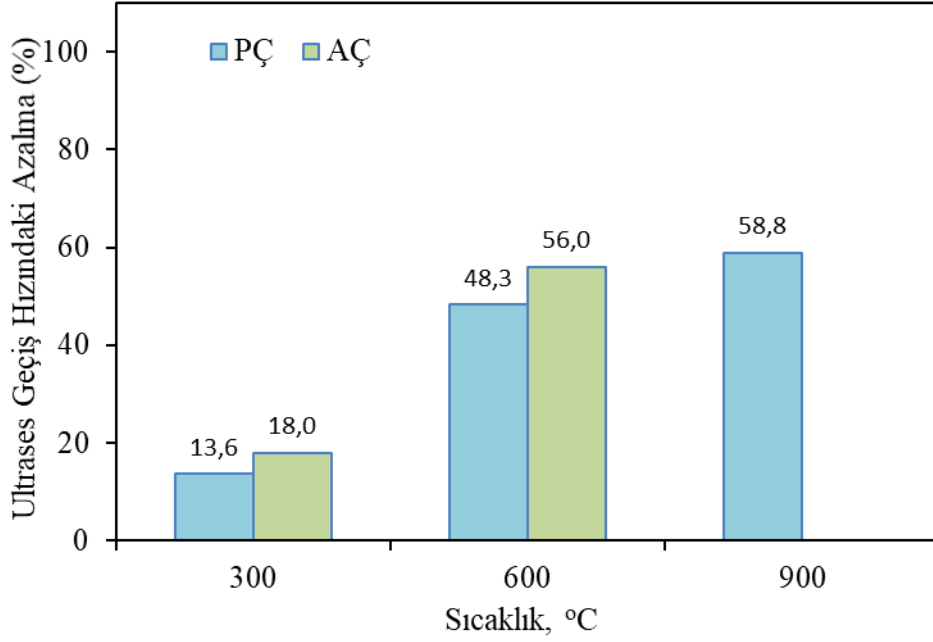
Tablo. 4.4. Numunelerin Ultrases Geçiş Hızları Deney Sonuçları

Vermikülit Oranı, Vv (%)	Sıcaklık °C	Ultrases Geçiş Hızı m/s					
		Portland Çimento			Alüminatlı Çimento		
		Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim	Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim
0	20	2532	-	-	2219	-	-
	300	2536	2073	-18,27	2293	1626	-29,11
	600	2524	1226	-51,42	2303	644	-72,04
	900	2528	943	-62,68	2274	-	-
15	20	2230	-	-	2090	-	-
	300	2249	1943	-13,63	2110	1730	-17,99
	600	2330	1205	-48,26	2126	935	-56,02
	900	2269	934	-58,83	2129	-	-
30	20	2017	-	-	1918	-	-
	300	1976	1708	-13,56	1856	1529	-17,62
	600	1954	1125	-42,42	1900	936	-50,75
	900	1968	934	-52,52	1937	-	-
45	20	1854	-	-	1520	-	-
	300	1897	1701	-10,33	1584	1424	-10,08
	600	1944	1182	-39,17	1502	937	-37,58
	900	1886	936	-50,39	1532	-	-



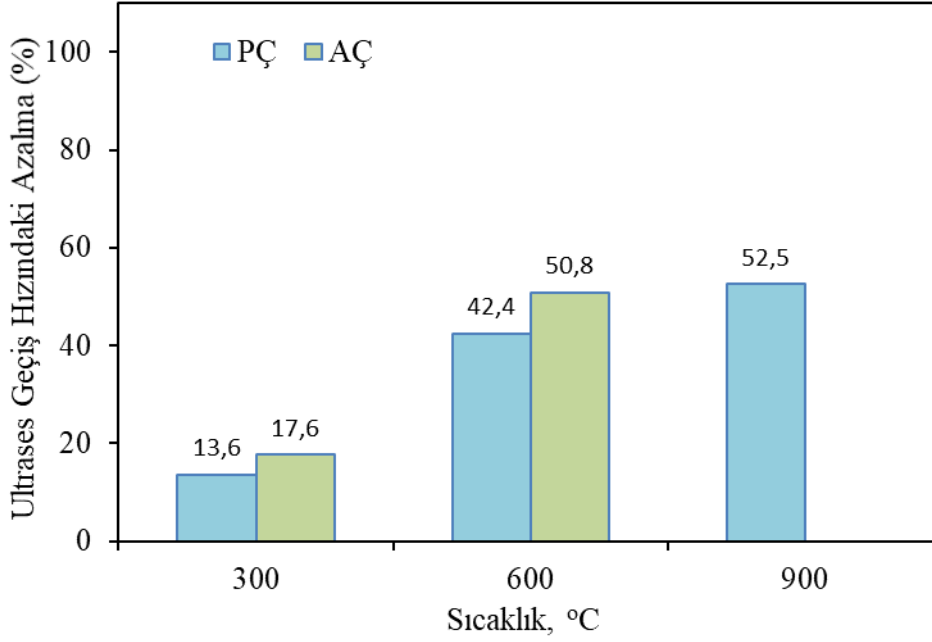
Şekil 4.25. Vermikülsiz Numunelerin Ultrases Geçiş Hızının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %0 olan numunelerin 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık uygulamasından önceki ultrases geçiş hızları numunelerinin ile sıcaklıktan sonraki ultrases geçiş hızları karşılaştırılmıştır. Vermikülit içermeyen portland çimentolu numunelerin sıcaklığa maruz bırakılmadan önceki ultrases geçiş hızları, 300 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %18,3 azalmıştır. 600 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %51,4 azalırken 900 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ultrases geçiş hızlarına göre ise geçiş hızının %62,7 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise numuneler 300 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonra ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %29,1 azaldığı görülmüştür. 600 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre ise %72 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Alüminatlı çimento numunelerinin 900 °C’de fırından çıkarıldığında dağıldığından dolayı bu numunelerin ultrases geçiş hızı miktarları hesaplanamamıştır. Vermikülsiz numunelerde sıcaklığa bağlı ultrases geçiş hızının değişimi Şekil 4.25’de verilmiştir.



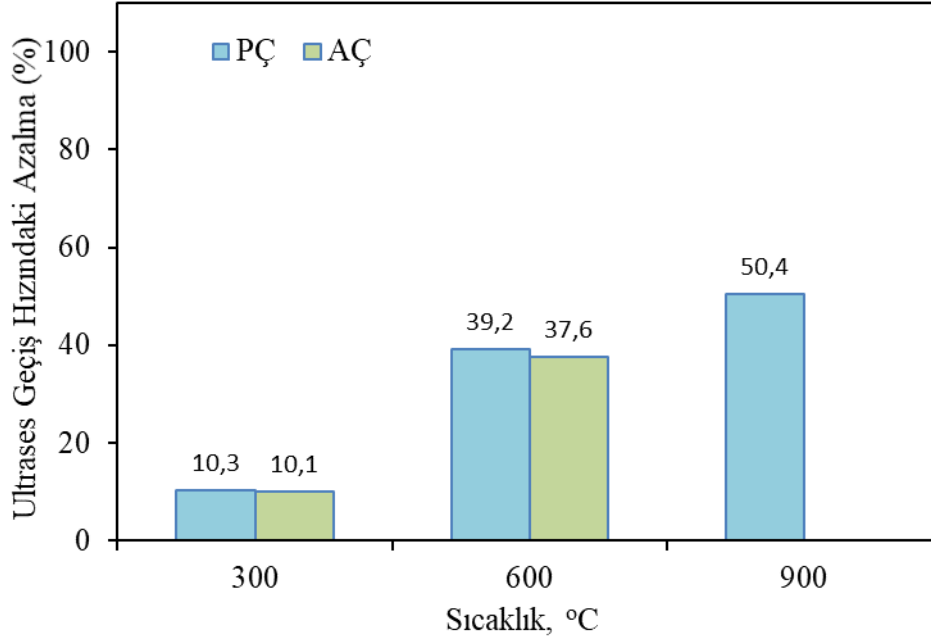
Şekil 4.26. %15 Vermikülit Oranlı Numunelerin Ultrases Geçiş Hızının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %15 olan numunelerin 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık uygulamasından önceki ultrases geçiş hızları numunelerinin ile sıcaklıktan sonraki ultrases geçiş hızları karşılaştırılmıştır. %15 Vermikülit içeren portland çimentolu numunelerin sıcaklığa maruz bırakılmadan önceki ultrases geçiş hızları, 300 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %13,6 azalmıştır. 600 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %48,3 azalırken 900 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ultrases geçiş hızlarına göre ise geçiş hızının %58,8 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise numuneler 300 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonra ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %18,0 azaldığı görülmüştür. 600 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre ise %56 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Alüminatlı çimento numunelerinin 900 °C’de fırından çıkarıldığında dağıldığından dolayı bu numunelerin ultrases geçiş hızı miktarları hesaplanamamıştır. Vermikülit oranı %15 olan numunelerde sıcaklığa bağlı ultrases geçiş hızının değişimi Şekil 4.26’da verilmiştir.



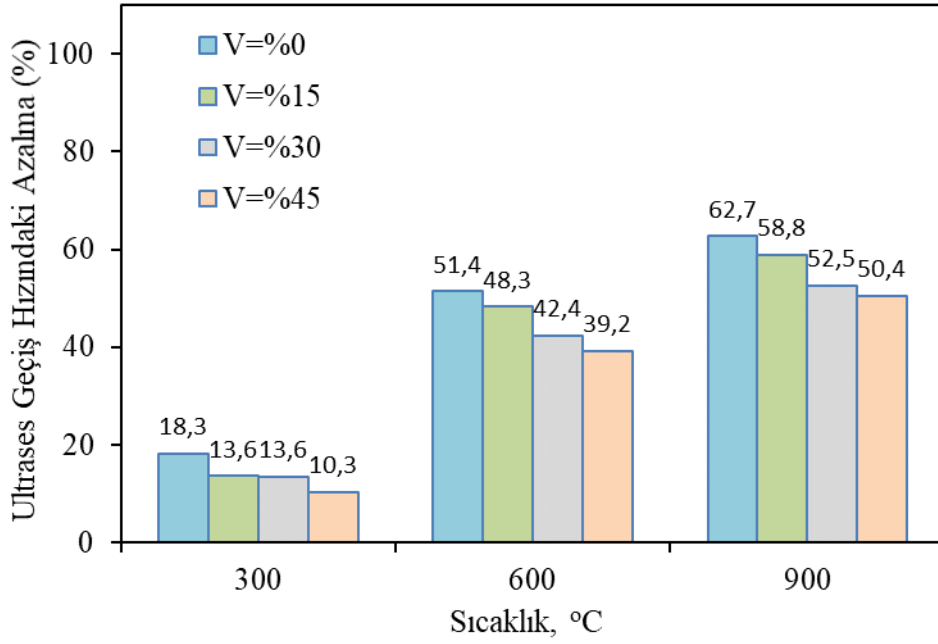
Şekil 4.27. %30 Vermikülit Oranlı Numunelerin Ultrases Geçiş Hızının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %30 olan numunelerin 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık uygulamasından önceki ultrases geçiş hızları numunelerinin ile sıcaklıktan sonraki ultrases geçiş hızları karşılaştırılmıştır. %30 Vermikülit içeren portland çimentolu numunelerin sıcaklığa maruz bırakılmadan önceki ultrases geçiş hızları, 300 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %13,6 azalmıştır. 600 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %42,4 azalırken 900 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ultrases geçiş hızlarına göre ise geçiş hızının %52,5 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise numuneler 300 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonra ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %17,6 azaldığı görülmüştür. 600 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre ise %50,8 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Alüminatlı çimento numunelerinin 900 °C’de fırından çıkarıldığında dağıldığından dolayı bu numunelerin ultrases geçiş hızı miktarları hesaplanamamıştır. Vermikülit oranı %30 olan numunelerde sıcaklığa bağlı ultrases geçiş hızının değişimi Şekil 4.27’de verilmiştir.

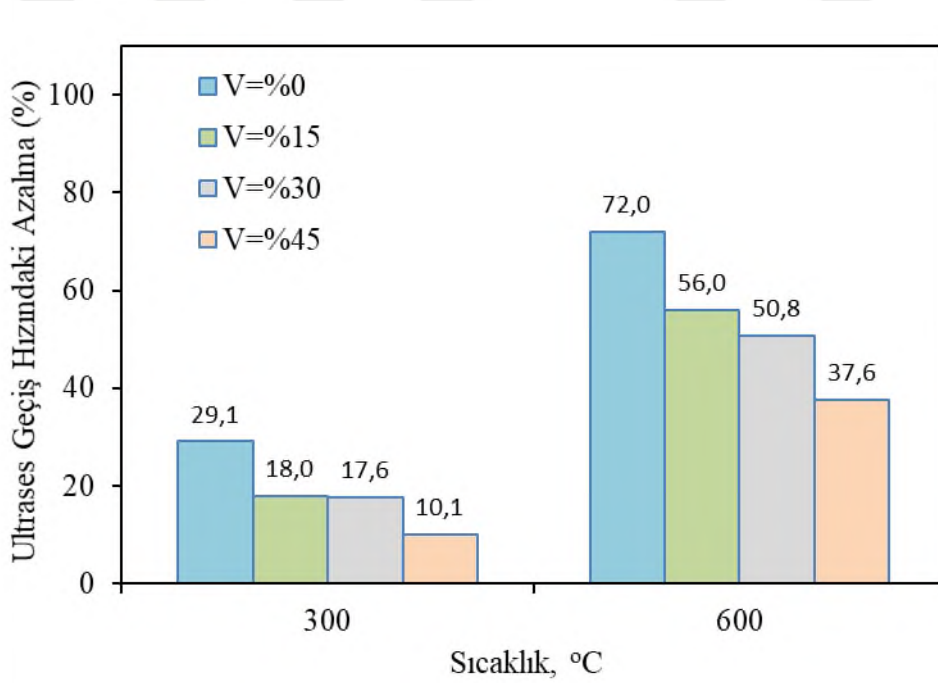


Şekil 4.28. %45 Vermikülit Oranlı Numunelerin Ultrases Geçiş Hızının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %45 olan numunelerin 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık uygulamasından önceki ultrases geçiş hızları numunelerinin ile sıcaklıktan sonraki ultrases geçiş hızları karşılaştırılmıştır. %45 Vermikülit içeren portland çimentolu numunelerin sıcaklığa maruz bırakılmadan önceki ultrases geçiş hızları, 300 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %10,3 azalmıştır. 600 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %39,2 azalırken 900 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ultrases geçiş hızlarına göre ise geçiş hızının %50,4 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Alüminatlı çimento karışımlarında ise numuneler 300 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonra ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre %10,1 azaldığı görülmüştür. 600 °C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ölçülen ultrases geçiş hızlarına göre ise %37,6 oranında azaldığı tespit edilmiştir. Alüminatlı çimento numunelerinin 900 °C’de fırından çıkarıldığında dağıldığından dolayı bu numunelerin ultrases geçiş hızı miktarları hesaplanamamıştır. Vermikülit oranı %45 olan numunelerde sıcaklığa bağlı ultrases geçiş hızının değişimi Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.29. Numunelerin Ultrases Geçiş Hızlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento)



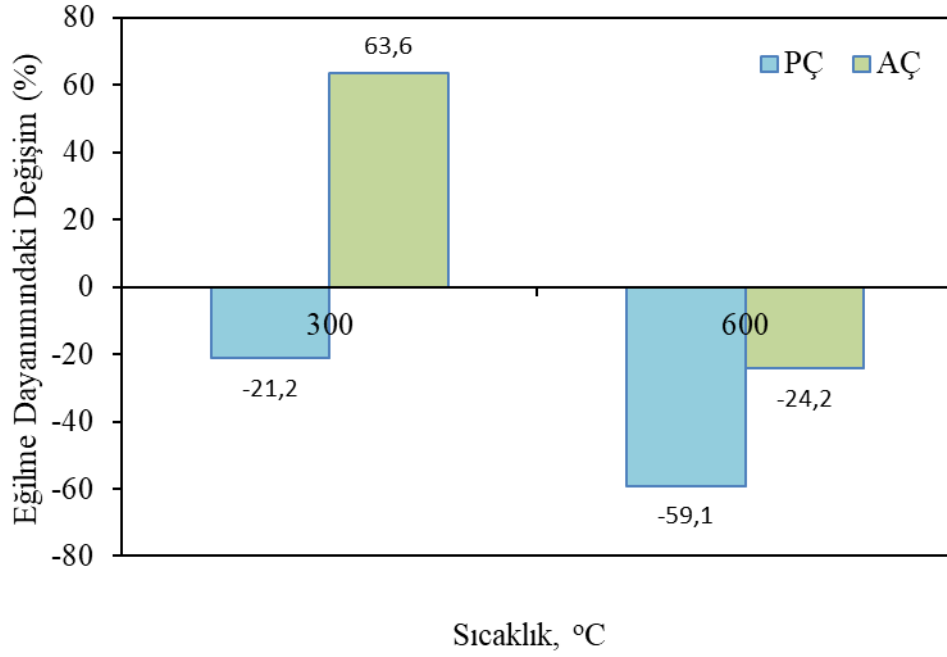
Şekil 4.30. Numunelerin Ultrases Geçiş Hızlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento)

4.5. Eğilme Dayanımı

Numuneler hedef sıcaklıkta 3 saat süreyle bekletildikten sonra fırından çıkarılarak oda sıcaklığında normal soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığında soğumaya bırakılan numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme dayanımı deney sonuçları ve sıcaklığa bağlı değişim oranları Tablo 4.5’de verilmiştir.

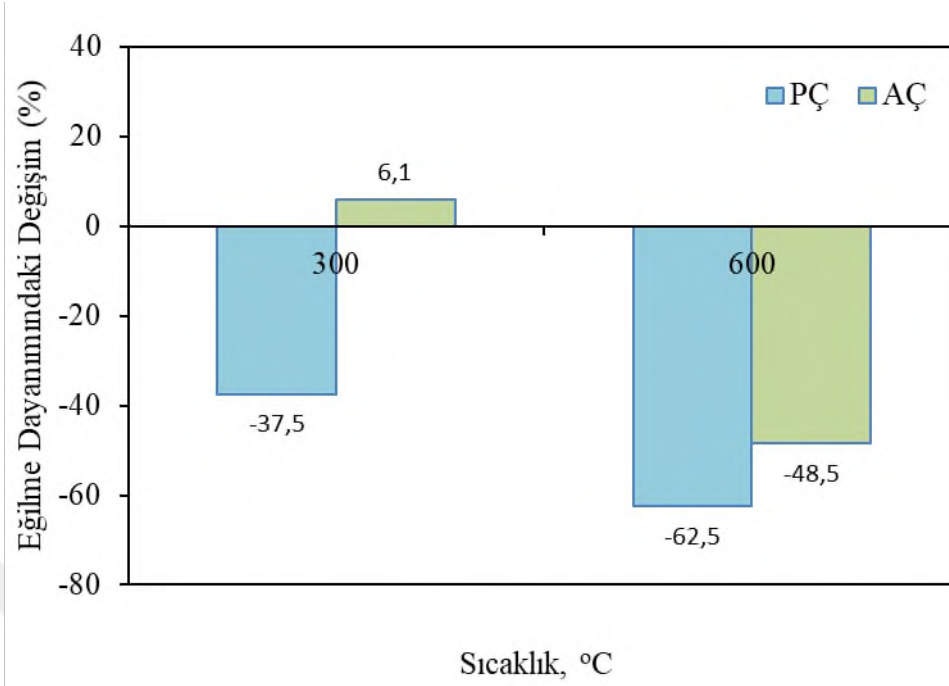
Tablo. 4.5. Numunelerin Eğilme Dayanımları Deney Sonuçları

Vermikülit Oranı, V _v (%)	Sıcaklık °C	Eğilme, MPa					
		Portland Çimento			Alüminatlı Çimento		
		Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim	Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim
0	20	6,6	-	-	3,3	-	-
	300	6,6	5,2	-21,21	3,3	5,4	63,63
	600	6,6	2,7	-59,09	3,3	2,5	-24,24
	900	6,6	-	-	3,3	-	-
15	20	4,8	-	-	3,3	-	-
	300	4,8	3,0	-37,5	3,3	3,5	6,06
	600	4,8	1,8	-62,5	3,3	1,7	-48,48
	900	4,8	-	-	3,3	-	-
30	20	3,4	-	-	2,2	-	-
	300	3,4	2,9	-14,70	2,2	2,6	18,18
	600	3,4	1,1	-67,64	2,2	1,0	-54,54
	900	3,4	-	-	2,2	-	-
45	20	1,9	-	-	1,2	-	-
	300	1,9	2,7	42,10	1,2	1,4	16,67
	600	1,9	1,0	-47,37	1,2	0,7	-41,67
	900	1,9	-	-	1,2	-	-



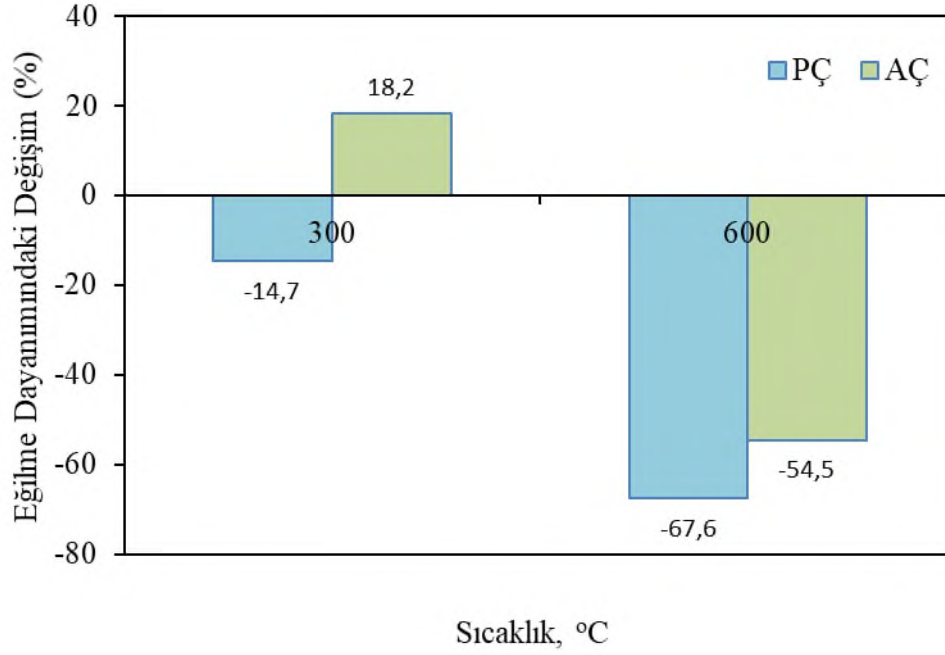
Şekil 4.31. Vermikülsüz Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Eğilme Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %0 ($V_v=0$) olan portland çimentolu karışımların sıcaklık öncesi eğilme dayanımları 6,6 MPa, 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 5,2 MPa ve 2,7 MPa olarak belirlenmiştir. Alüminatlı çimentolu numuneler için ise başlangıçta 3,3 MPa olan değer 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 5,4 MPa, 2,5 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak numunelerin eğilme dayanımları portland çimentolu karışımda 300 ve 600 °C’de sıcaklık öncesi eğilme dayanımlarının sıcaklık sonrası eğilme dayanımlarına kıyasla sırasıyla %21,2 ve %59,1 oranında azalmıştır. Alüminatlı karışımda ise 300 °C’de %63,6 oranında artış görülürken 600 °C’de %24,2 oranında düştüğü gözlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülsüz numunelerde sıcaklığa bağlı eğilme dayanımının değişimi Şekil 4.31’de verilmiştir.



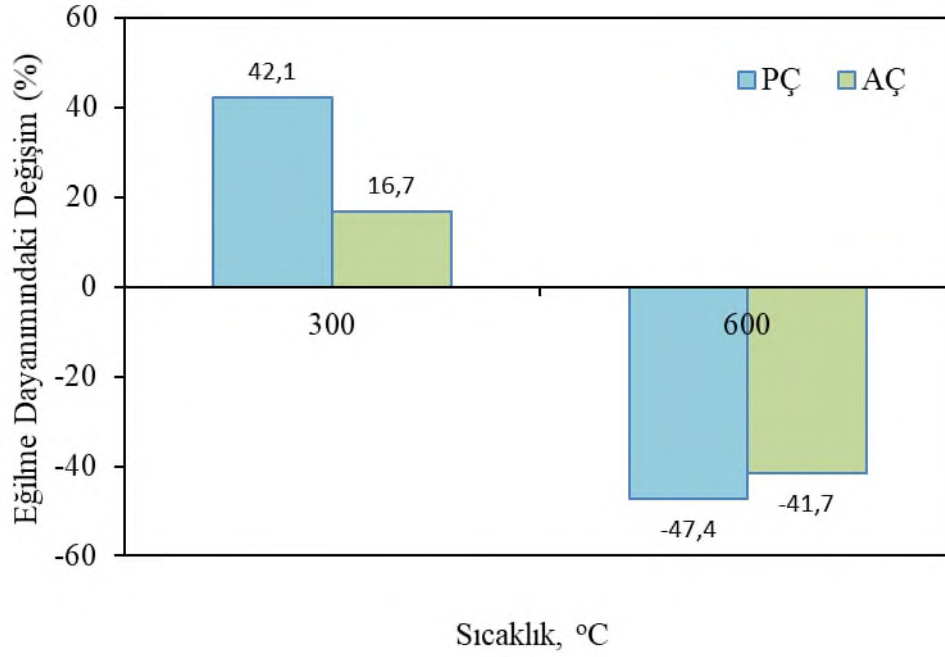
Şekil 4.32. %15 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Eğilme Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %15 ($V_v = \%15$) olan portland çimentolu karışımların sıcaklık öncesi eğilme dayanımları 4,8 MPa, 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 3,0 MPa ve 1,8 MPa olarak belirlenmiştir. Alüminatlı çimentolu numuneler için ise başlangıçta 3,3 MPa olan değer 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 3,5 MPa, 1,7 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak numunelerin eğilme dayanımları portland çimentolu karışımda 300 ve 600 °C’de sıcaklık öncesi eğilme dayanımlarının sıcaklık sonrası eğilme dayanımlarına kıyasla sırasıyla %37,5 ve %62,5 oranında azalmıştır. Alüminatlı karışımda ise 300 °C’de %60,1 oranında artış görülürken 600 °C’de %48,5 oranında düştüğü gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %15 olan numunelerde sıcaklığa bağlı eğilme dayanımının değişimi Şekil 4.32’de verilmiştir.



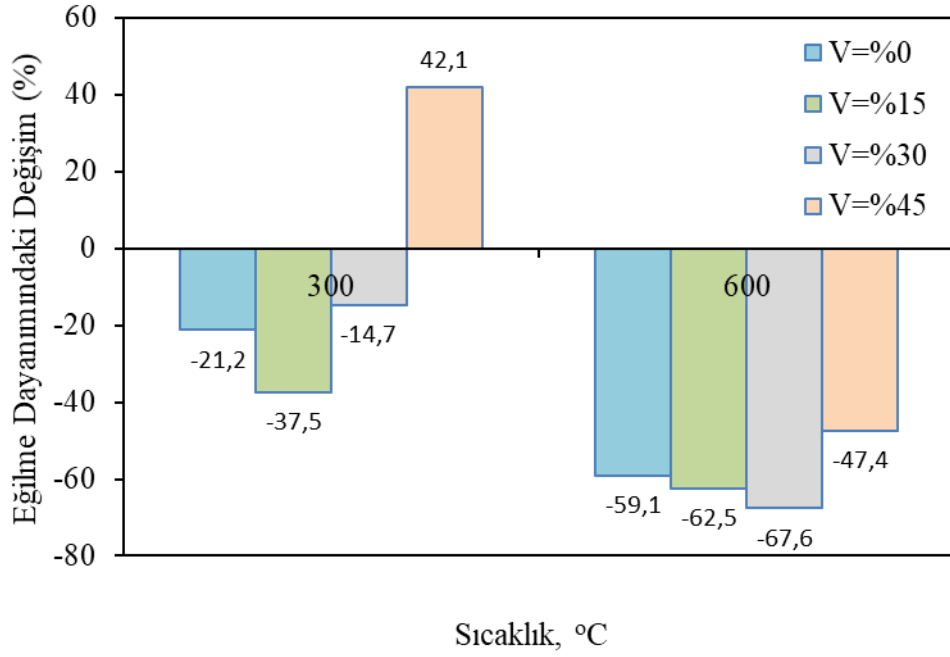
Şekil 4.33. %30 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Eğilme Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %30 ($V_v = \%30$) olan portland çimentolu karışımların sıcaklık öncesi eğilme dayanımları 3,4 MPa, 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 2,9 MPa ve 1,1 MPa olarak belirlenmiştir. Alüminatlı çimentolu numuneler için ise başlangıçta 2,2 MPa olan değer 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 2,6 MPa, 1,0 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak numunelerin eğilme dayanımları portland çimentolu karışımda 300 ve 600 °C’de sıcaklık öncesi eğilme dayanımlarının sıcaklık sonrası eğilme dayanımlarına kıyasla sırasıyla %14,7 ve %67,6 oranında azalmıştır. Alüminatlı karışımda ise 300 °C’de %18,2 oranında artış görülürken 600 °C’de %54,5 oranında düştüğü gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %30 olan numunelerde sıcaklığa bağlı eğilme dayanımının değişimi Şekil 4.33’de verilmiştir.

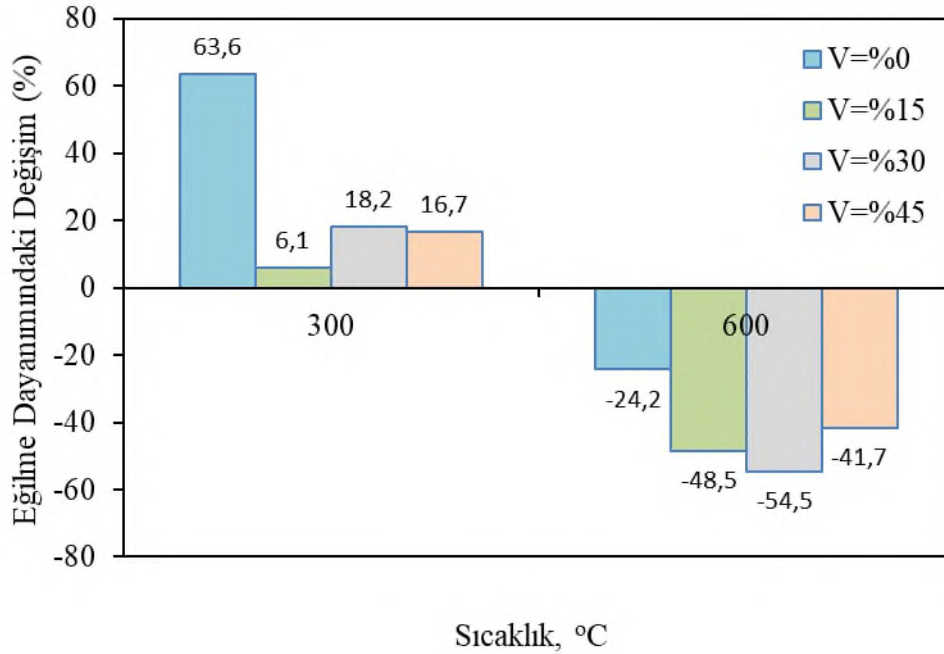


Şekil 4.34. %45 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Eğilme Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %45 ($V_v = \%45$) olan portland çimentolu karışımların sıcaklık öncesi eğilme dayanımları 1,9 MPa, 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 2,7 MPa ve 1,0 MPa olarak belirlenmiştir. Alüminatlı çimentolu numuneler için ise başlangıçta 1,2 MPa olan değer 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 1,4 MPa, 0,7 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak numunelerin eğilme dayanımları portland çimentolu karışımda 300 °C’de sıcaklık öncesi eğilme dayanımlarının sıcaklık sonrası eğilme dayanımlarına kıyasla %42,1 oranında artarken 600 °C’de %47,4 oranında azalmıştır. Alüminatlı karışımda ise 300 °C’de %16,7 oranında artış görülürken 600 °C’de %41,7 oranında düştüğü gözlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %45 olan numunelerde sıcaklığa bağlı eğilme dayanımının değişimi Şekil 4.34’de verilmiştir.



Şekil 4.35. Numunelerin Eğilme Dayanımlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento)



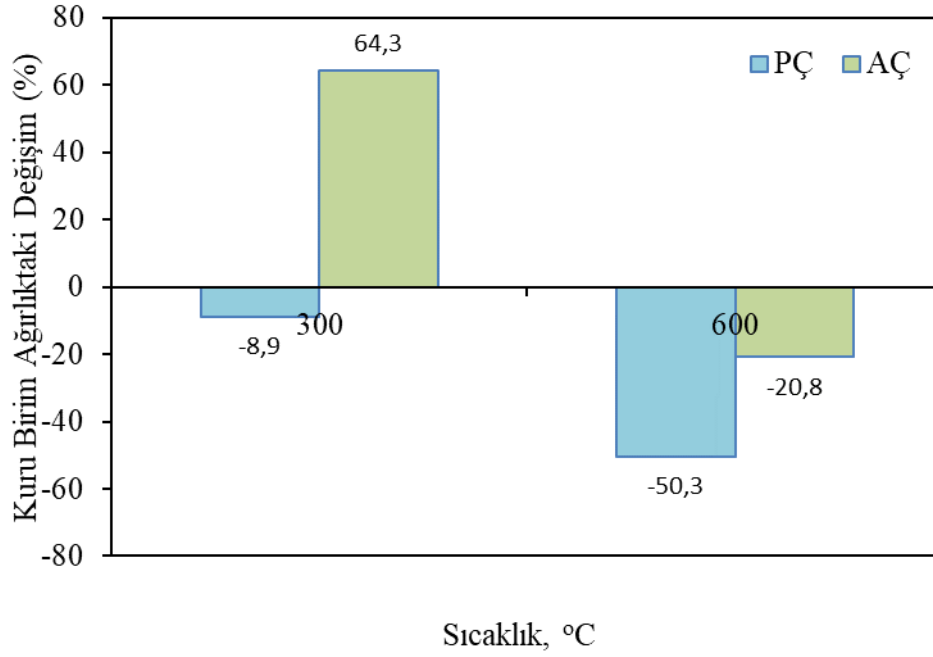
Şekil 4.36. Numunelerin Eğilme Dayanımlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alüminatlı Çimento)

4.6. Basınç Dayanımı

Vermikülit oranı %0, %15, %30 ve %45 olan numuneler 28 günlük standart kür sonrası yüksek sıcaklık fırınında 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklığa maruz bırakılmışlardır. Numuneler hedef sıcaklıkta 3 saat süreyle bekletildikten sonra fırından çıkarılarak oda sıcaklığında normal soğumaya bırakılmıştır. Oda sıcaklığında soğumaya bırakılan numuneler üzerinde üç noktalı eğilme deneyi yapılmıştır. Eğilme testinden sonra her bir numuneden elde edilen iki parça numuneye basınç dayanım testi uygulanmış ve elde edilen ortalama değerler basınç dayanım değeri olarak not edilmiştir. Basınç dayanımı deney sonuçları ve sıcaklığa bağlı değişim oranları Tablo 4.6'da verilmiştir.

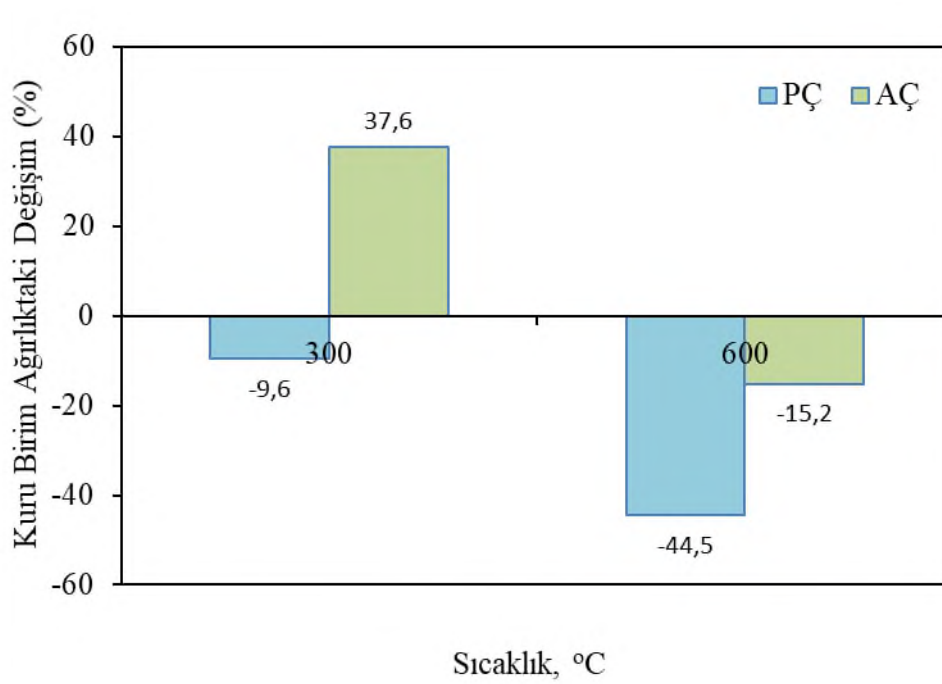
Tablo 4.6. Numunelerin Basınç Dayanımları Deney Sonuçları

Vermikülit Oranı, V _v (%)	Sıcaklık °C	Basınç Dayanımı, MPa					
		Portland Çimento			Alüminatlı Çimento		
		Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim	Sıcaklık Öncesi	Sıcaklık Sonrası	% Değişim
0	20	48,3	-	-	20,7	-	-
	300	48,3	44,0	-8,90	20,7	34,0	64,25
	600	48,3	24,0	-50,31	20,7	16,4	-20,77
	900	48,3	-	-	20,7	-	-
15	20	29,2	-	-	16,5	-	-
	300	29,2	26,4	-9,59	16,5	22,7	37,57
	600	29,2	16,2	-44,52	16,5	14,0	-15,15
	900	29,2	-	-	16,5	-	-
30	20	20,6	-	-	11,2	-	-
	300	20,6	18,5	-10,19	11,2	14,6	30,36
	600	20,6	10,7	-48,06	11,2	8,4	-25,00
	900	20,6	-	-	11,2	-	-
45	20	13,9	-	-	6,7	-	-
	300	13,9	14,2	2,15	6,7	7,4	10,45
	600	13,9	8,2	-41,01	6,7	5,2	-22,39
	900	13,9	-	-	6,7	-	-



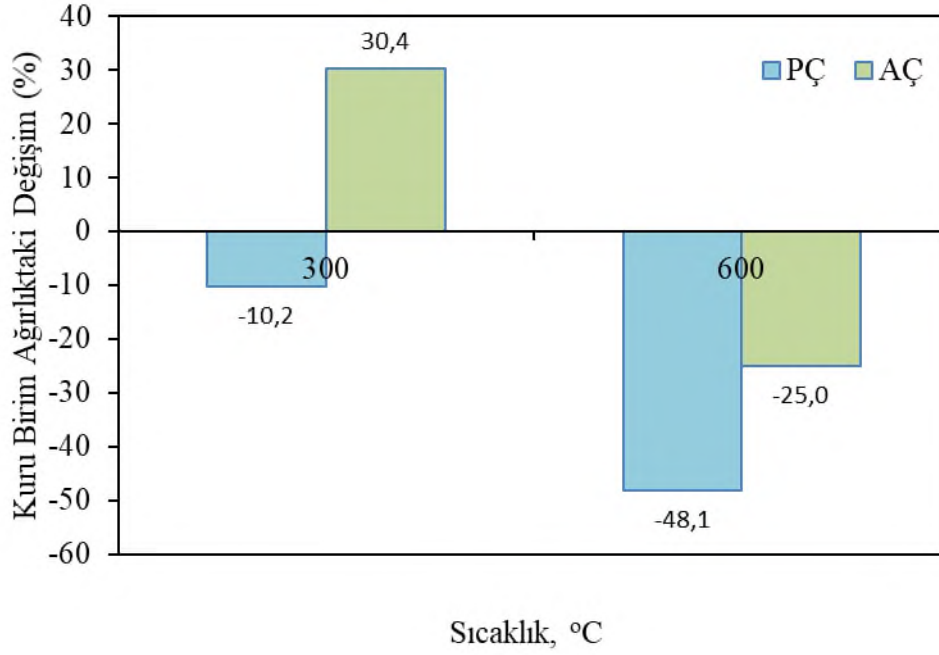
Şekil 4.37. Vermikülsiz Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Basınç Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %0 ($V_v = 0$) olan portland çimentolu karışımların sıcaklık öncesi basınç dayanımları 48,3 MPa, 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 44 MPa ve 24 MPa olarak belirlenmiştir. Alüminatlı çimentolu numuneler için ise başlangıçta 20,7 MPa olan değer 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 34 MPa, 16,4 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak numunelerin basınç dayanımları portland çimentolu karışımda 300 ve 600 °C’de sıcaklık öncesi basınç dayanımlarının sıcaklık sonrası basınç dayanımlarına kıyasla sırasıyla %8,9 ve %50,3 oranında azalmıştır. Alüminatlı karışımda ise 300 °C’de %64,3 oranında artış görülürken 600 °C’de %20,8 oranında düştüğü gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülsiz numunelerde sıcaklığa bağlı basınç dayanımının değişimi Şekil 4.37’de verilmiştir.



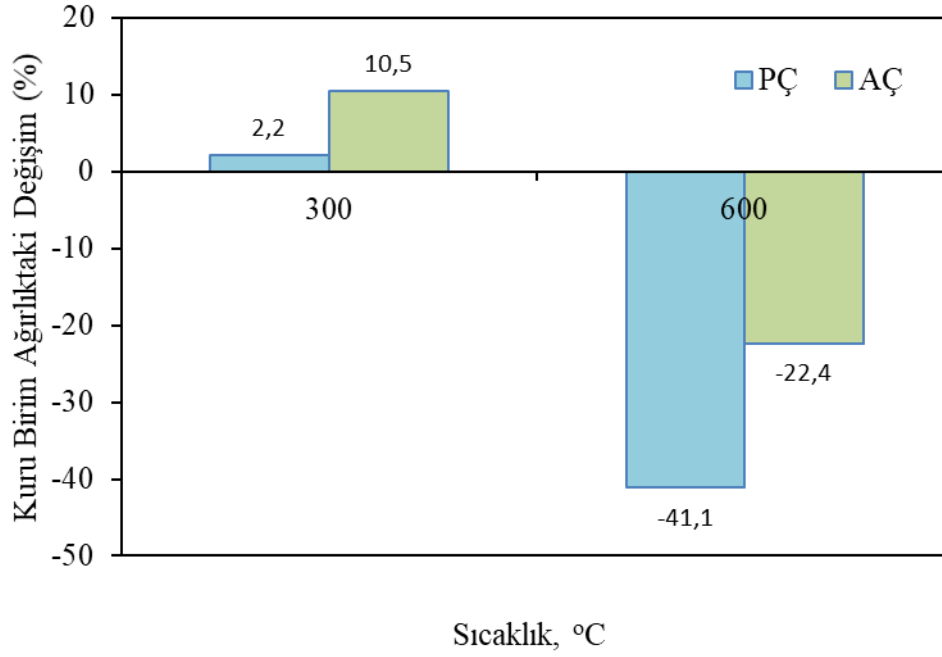
Şekil 4.38. %15 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Basınç Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %15 ($V_v = \%15$) olan portland çimentolu karışımların sıcaklık öncesi basınç dayanımları 29,2 MPa, 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 26,4 MPa ve 16,2 MPa olarak belirlenmiştir. Alüminatlı çimentolu numuneler için ise başlangıçta 16,5 MPa olan değer 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 22,7 MPa, 14 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak numunelerin basınç dayanımları portland çimentolu karışımda 300 ve 600 °C’de sıcaklık öncesi basınç dayanımlarının sıcaklık sonrası basınç dayanımlarına kıyasla sırasıyla %9,6 ve %44,5 oranında azalmıştır. Alüminatlı karışımda ise 300 °C’de %37,6 oranında artış görülürken 600 °C’de %15,2 oranında düştüğü gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %15 olan numunelerde sıcaklığa bağlı basınç dayanımının değişimi Şekil 4.38’de verilmiştir.



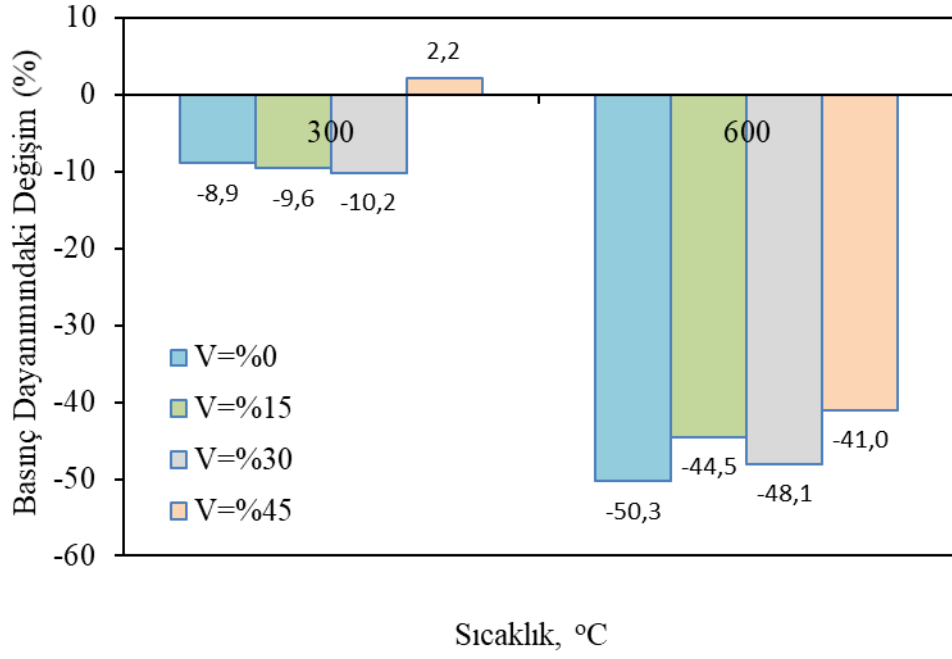
Şekil 4.39. %30 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Basınç Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %15 ($V_v = \%15$) olan portland çimentolu karışımların sıcaklık öncesi basınç dayanımları 20,6 MPa, 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 18,5 MPa ve 16,2 MPa olarak belirlenmiştir. Alüminatlı çimentolu numuneler için ise başlangıçta 11,2 MPa olan değer 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 14,6 MPa, 8,4 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak numunelerin basınç dayanımları portland çimentolu karışımda 300 ve 600 °C’de sıcaklık öncesi basınç dayanımlarının sıcaklık sonrası basınç dayanımlarına kıyasla sırasıyla %10,2 ve %48,1 oranında azalmıştır. Alüminatlı karışımda ise 300 °C’de %30,4 oranında artış görülürken 600 °C’de %25,0 oranında düştüğü gözlemlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %30 olan numunelerde sıcaklığa bağlı basınç dayanımının değişimi Şekil 4.39’da verilmiştir.

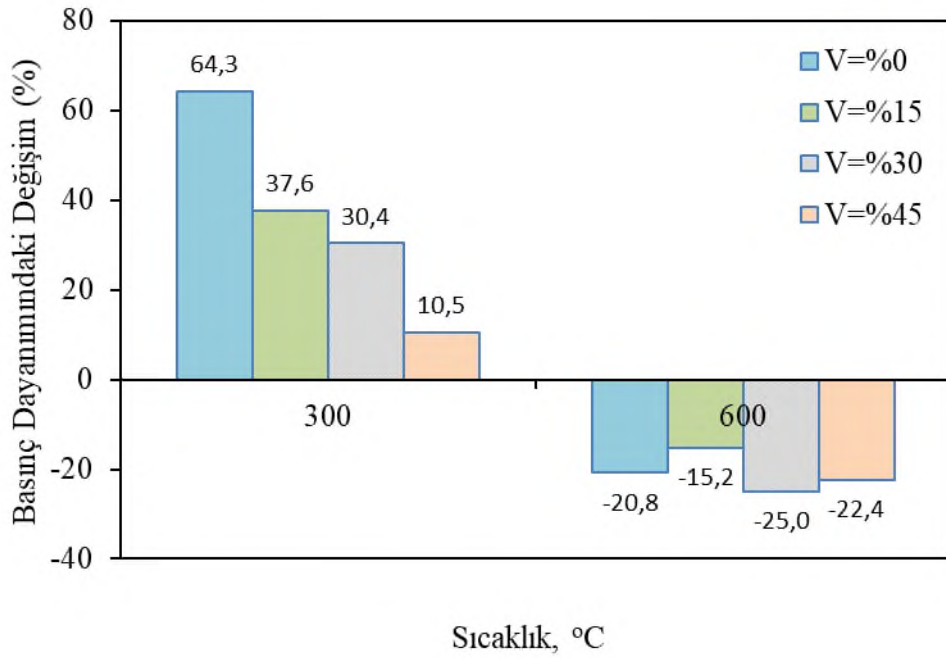


Şekil 4.40. %45 Vermikülitli Numunelerin Portland ve Alüminatlı Çimento Tiplerinde Basınç Dayanımının Sıcaklığa Bağlı Değişimi

Vermikülit oranı %45 ($V_v = \%45$) olan portland çimentolu karışımların sıcaklık öncesi basınç dayanımları 13,9 MPa, 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 14,2 MPa ve 8,2 MPa olarak belirlenmiştir. Alüminatlı çimentolu numuneler için ise başlangıçta 6,7 MPa olan değer 300 ve 600 °C sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra sırasıyla 7,4 MPa, 5,2 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak numunelerin basınç dayanımları normal çimentolu karışımda 300 °C’de sıcaklık öncesi basınç dayanımlarının sıcaklık sonrası basınç dayanımlarına kıyasla %2,2 oranında artarken 600 °C’de %41,1 oranında azalmıştır. Alüminatlı karışımda ise 300 °C’de %10,5 oranında artış görülürken 600 °C’de %22,4 oranında düştüğü gözlenmiştir. 900 °C’deki iki çimento türünde de bütün numunelerin dağıldığı gözlemlenmiştir. Vermikülit oranı %45 olan numunelerde sıcaklığa bağlı basınç dayanımının değişimi Şekil 4.40’da verilmiştir.



Şekil 4.41. Numunelerin Basınç Dayanımlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Portland Çimento)



Şekil 4.42. Numunelerin Basınç Dayanımlarının Sıcaklığa Bağlı Vermikülit İçeriği İle Değişimi (Alimünatlı Çimento)

5. SONUÇLAR

Vermikülit kullanılarak üretilen harçlar üzerinde yapılan deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir

1. Numunelerin kuru birim ağırlıkları sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra azalmıştır. Sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra portland çimentolu numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarında %2,3-11,8 arasında, alüminatlı çimentolu numunelerde ise kuru birim hacim ağırlıklarında %1,9-14,7 arasında azalma elde edilmiştir. Sıcaklık etkisiyle her iki çimento tipinde de kuru birim hacim ağırlığında en fazla azalma oranı %45 vermikülit oranlı numunede gerçekleşirken, en düşük azalma oranı ise vermikülistsiz numunelerde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Vermikülit içeriğinin artırılmasıyla birlikte kuru birim hacim ağırlığının azalma oranı da artmıştır.
2. Sıcaklığın artması ile portland çimento tipinde karışımda vermikülit/çimento hacimsel oranının %45 olması ile boşluk oranı ve su emme oranı en az artma miktarını gösterirken, alimünatlı çimento tipinde ise vermikülistsiz olan numunelerde boşluk oranı ve su emme oranı en az artış miktarını göstermiştir. Her iki çimento tipi için de sıcaklığın artmasıyla su emme ve boşluk oranı artışının en fazla olduğu numune ise %15 oranında vermikülit içeren numuneler olduğu görülmüştür.
3. Numunelerden portland çimentolu numunelerin porozitelerindeki artış miktarının %20-80,4 arasında, alüminatlı çimentolu numunelerin ise porozitelerindeki artış miktarının %19,3-94,7 arasında değiştiği belirlenmiştir.
4. Sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin, sıcaklığa tabi tutulmayan numunelere oranla içyapılarında meydana gelen bozulmalar nedeniyle, ultrases geçiş hızlarında azalma tespit edilmiştir. 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık uygulamasından sonra portland çimentolu numunelerde ultrases geçiş hızındaki azalmanın en az olduğu numune %45 vermikülit içeriğine sahip olan numune olduğu görülmüştür. 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık uygulamalarından sonra

portland çimentolu numuneler için ultrases geçiş hızındaki en büyük azalma oranlarının vermikülit içermeyen numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Alüminatlı çimentolu numunelerde ise 300 °C ve 600 °C sıcaklık uygulamasından sonra numunelerde ultrases geçiş hızındaki en az azalma oranı %45 vermikülit içeren numunelerde görülürken, geçiş hızındaki en fazla azalma oranı ise vermikülitlessiz numunelerde görülmüştür.

5. Genleştirilmiş vermikülit tozunun portland veya alüminatlı çimentolu standard harçlarda bileşim malzemesi olarak kullanımı ile yangına dayanıklı çimento esaslı kompozit yapı malzemesi üretilebileceği, ayrıca yapılarda kullanılan ısı yalıtım sıvalarında ince malzeme bileşeni olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır.
6. Genleştirilmiş vermikülitin farklı bağlayıcılarla ve malzemlerle kullanılması ile sıcaklığa dayanıklı ve ısı yalıtım özelliğe sahip farklı sektörler için malzeme üretimi için araştırmalar yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Mavi, Ö., Kireç, Harç ve Sıvaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2000.
2. Khoury, G.A., Compressive Strength of Concrete at High Temperatures: A Reassessment, Magazine of Concrete Research, 44, 161, 291-309, 1992.
3. Lea, F.C., The Effect of Temperature on Some of the Properties of Materials, Engineering, 110, 293-298, 1920.
4. Khoury, G.A., Passive Fire Protection of Concrete Structures, Structures & Buildings, sayı 583, sayfa 135-145, 2008.
5. Aköz, F. ve Yüzer, N., Yüksek Sıcaklığın Nedenleri ve Betonarme Elemanlara Etkileri, Yıldız Teknik Üniversitesi Dergisi, İstanbul, 1994.
6. Yüzer, N., Aköz, F., Öztürk L.D., Compressive Strength-Color Change Relation in Mortars at High Temperature, Cement and Concrete Research, 34, 1803-1807, 2004.
7. Çil, İ., et al., Farklı Tip Çimentoların Yüksek Sıcaklık Direnci, Tübitak Projesi, MAG 106M158, İzmir, 2007.
8. Topçu, İ.B., Semi-lightweight Concrete Produced by Volcanic Slags, Cement and Concrete Research, 27, 15-21, 1997.
9. Demirboğa, R., Gül, R., The Effects of Expanded Perlite Aggregate, Silica Fume and Fly Ash on the Thermal Conductivity of Lightweight Concrete, Cement and Concrete Research, 33, 723-727, 2002.
10. Miled, K., Et al, Compressive Behavior of an Idelized EPS Lightweight Concrete: Size Effects and Failure Mode, Mechanics of Materials, 36, 1031-1046, 2003.
11. Altun, F., et al., Yangına Maruz Hasarlı Prefabrike Yapıda Malzeme Kalitesinin Belirlenmesi ve Onarım Detayları, Yapısal Onarım ve Güçlendirme Sempozyumu, Denizli, 159-168, 7-8 Aralık, 2006.
12. Neville, A. M., Properties of Concrete, John Wiley&Sons Inc, USA, 1996.
13. Akman, S. ve Tasdemir, M.A., Taşıyıcı malzeme olarak perlit betonu. 1. Ulusal Perlit Kongresi Bildirileri, MTA, 40-48, Ankara, 1977.
14. Eriç, M., Yapı Fiziği ve Malzemesi, Literatür Yay., İstanbul, 1994.
15. Şengün, N., Pomzanm Hafif Harç Yapımında Endüstriyel Hammadde Olarak Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, 2004.

16. Gündüz, L., Pomza Teknolojisi: Pomza Karakterizasyonu, Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, cilt 2, İsparta, 1998.
17. Orton, A., Structural Design of Masonry, Newyork, 1986.
18. Koksall, T., Portland Kompoze ve Aynı Dayanım Sınıfındaki Çimentolarla Üretilen Harç ve Betonlarda Geçirgenlik ve Diğer Özelliklerin Araştırılması, Kahramanmaraş, 2002.
19. Gulan, Z.A., The effects of microsilica on HSC. A Master's Thesis, Boğaziçi University, İstanbul, 1992.
20. Postacıoğlu, B., Beton, Agregalar-Beton,(2). 177-402, İstanbul, 1987.
21. Erdoğan, T.Y., Agregalar. Türkiye Hazır Beton Birliği, 162, İstanbul, 1995.
22. Öz, A., YFC Ve Doğal Zeolit Katilli Kendiliğinden Yerleşen Betonların Termo- Mekanik Özellikleri, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2006.
23. Kömürcü, M.Ç., Effect of the type of aggregate on the mechanical properties of the HSC. A Master Thesis in Civil Engineering METU, Ankara, 1993.
24. Erdoğan, T.Y., Karışım ve Bakım Suları. Türkiye Hazır Beton Birliği, 67, İstanbul, 1995.
25. Karakoç, M.B., Genleştirilmiş Perlit Agregasının Yüksek Dayanımlı Betonların Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerine Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2002.
26. TS500, Betonarme yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
27. Özdemir, E., PÇ ve mineral katkı maddelerinin ikili, üçlü ve dördü kombinasyonlarını içeren harç numunelerinin bazı özelliklerinin incelenmesi, Yüksek lisans tezi, 2006.
28. Taşdemir, C., Mineral katkıların ve kür koşullarının betonun kılcal geçirimsizliğine etkileri. Beton Çimento ve Boya Semineri, DSİ-TAKK Dairesinin Kuruluşunun 40. Yılı Anısına 24-26 Haziran, Ankara, 1998.
29. Toksoy, F., Vermikülit : Mineraloji, Jeolojik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye'deki Durumu, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim, İzmir,Türkiye, 1997.
30. Strand, P. R., , Vermiculite, Industrial Minerals And Rocks, ed: Lefond S. J., Vol: 2, 1983.

31. Weisman, J., <http://webmineral.com>, Photographic Guide to Mineral Species, 2010.
32. Weller, R., Cochise College, Cochise Country, Arizona, <http://skywalker.cochise.edu>, 2010.
33. Loughbrough, R., , Minerals in Lightweight Insulation, Industrial Minerals, October, 21-35. v7, 1991.
34. Harben, P. W., Kuzvart, M., Industrial Minerals, Global Geology Ind. Mins. Inf. Ltd. Metal Bulletin, 462p., London, 1996.
35. Yanxi Minerals Co. Ltd., <http://www.chinavermiculite.com/>, China, 2011.
36. Dolares M, Chemical and structural evolution of metamorphic vermiculite. Spain Vol. 44, pp. 249-265, 2006.
37. Singer, A., Stoffer, P. Hydrothermal Vermiculite from the Atlantis II Deep, Red Sea. Clays and Clay Minerals, 29(6), pp 454-458, 1981.
38. <http://www.enotes.com/how-products-encyclopedia/vermiculite>, Mayıs 2011.
39. Erseçen, S.. Dünya'da ve Türkiye'de Vermiculite : MTA Genel Müdürlüğü Yayinlari, sayfa 19, 1992.
40. World Mineral Production. British Geological Survey., Keyworth, Nottingham. 2010.
41. IRUE National center of marketing and price study.
42. DPT: 2617 - ÖİK: 628, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III, (Pomza-Perlit-Vermikülit- Flogopit-Genleşen Killer) Çalışma Grubu Raporu, Ankara, 2001.
43. Ekinci, C.E. ve Yeniboğanlı, A., Silis Dumanlı Betonlarda Sürtünme Yolu ile Aşınma Kaybı, İnşaat Mühendisliğindeki gelişmeler 2. Teknik Kongre, Bildiriler Kitabı, İstanbul, sayfa 359-368, 1995.
44. <http://www.madehow.com/Volume-6/Vermiculite.html>, Mayıs 2011.
45. <http://www.vermiculite.org/Properties6.php>, Mayıs 2011.
46. Evans, A.M., Ore Geology and Industrial Minerals : An Introduction. 3rd Ed. Blackwell Scientific Publications, London, Edinburg, pp 390, Boston, 1993.
47. Vermiculite Board VMC, <http://construction.tradepad.net/products-26664-vermiculite-boardbrick.html>, 2011.

48. Aydın, S., Baradan, B., “Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Geliştirilmesi”, TMMOB inşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 451-460, (2003).
49. Khoury, G., A., “Effect of fire on concrete and concrete structures”, Prog. Struct. Engng Mater. Imperial College, London, UK, 2: 429-447 (2000).
50. Gülce, C., “Farklı Çimentolarla Üretilen Harçların Yüksek Sıcaklık ve Değişik Soğutma Koşulları Altındaki Özellikleri”, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, (2009).
51. Avcı A.U., Dökümde enerji tasarrufu, Yıldız Teknik Üniversitesi Yayınları, 178, (1984).
52. Sakr K. ve EL-Hakim E., “Effect of Temperature or Fire on Heavy Weight Concrete Properties”, Cement and Concrete Research, 35, 590-596, (2005).
53. S. Djaknoun & E. Ouedraogo, A. Ahmed Benyahia “Fracture energy of high performance mortar subjected to high Temperature” Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures - Recent Advances in Fracture Mechanics of Concrete - B. H. Oh, et al.(eds), p 73-78.
54. Xu Y, Wong YL, Poon CS, Anson M. Influence of PFA on cracking of concrete and cement paste after exposure to high temperatures. Cem Concr Res 2003;33(12):2009–16.
55. Neville AM. Properties of concrete. New York: John Wiley and Sons; 1995.
56. Poon CS, Azhar S, Anson M, Wong YL. Comparison of the strength and durability performance of normal and high strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. Cem Concr Res 2001;31(9):1291–300.
57. Phan LT, Carino NJ. Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. ACI Mater J 2002;99(1):54–66.
58. Nima Farzadnia, Abang Abdullah Abang Ali, Ramazan Demirboga, Mohammed Parvez Anwar, “Characterization of high strength mortars with nano Titania at elevated temperatures” Construction and Building Materials 43 (2013)469–479.
59. Kalifa P, Menneteau F-D, Quenard D. Spalling and pore pressure in HPC at high temperatures. Cem Concr Res 2000;30(12):1915–27
60. Xiao J, Xie M, Zhang C. Residual compressive behaviour of pre-heated high-performance concrete with blast-furnace-slag. Fire Saf J2006;41(2):91–8.

61. Handoo SK, Agarwal S, Agarwal SK. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. *Cem Concr Res* 2002;32(7):1009–18.
62. Alonso C, Fernandez L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. *J Mater Sci* 2004;39(9):3015–24.
63. Seleem HEDH, Rashad AM, Elsokary T. Effect of elevated temperature on physico-mechanical properties of blended cement concrete. *Constr Build Mater* 2011;25(2):1009–17.
64. Poon C-S, Azhar S, Anson M, Wong Y-L. Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. *Cem Concr Res* 2001;31(9):1291–300.
65. Williamson, R. B. and Rashed, A. I., “High Strength Concrete and Mortars in High Temperature Environments,” *Materials Research Society Symposium Proceedings*, 42, 295–303 (1985).
66. Jahsen, P.A., 1989, *Fire Resistance of High-Strength/Dense Concrete with Particular Reference to the Use of Silica Fume-A Review*, *Proceedings, 3rd International Conf. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, Trondheim, Editor, Malhotra, V.M., ACI SP-114, Vol.2, pp.1013-1049.
67. Durmuş, G., Arslan, M., Yüksek Sıcaklık Uygulanan Çimento Harçlarının Farklı Soğutma Koşullarındaki Bazı Fiziksel Özellikleri, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 25 (3) : 541-548, (2010).
68. Kızılkant, A.B ve Yüzer, N., “Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Harcın Basınç Dayanımı-Renk Değişimi İlişkisi”, *İMO Teknik Dergi*, 238:4381-4392 (2008).
69. Topçu, İ.B., Demir A., “Yüksek Sıcaklık Uygulama Süresinin Harç Özelliklerine Etkisi”, *7. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul*, 455-463 (2007).

ÖZGEÇMİŞ

Turan NAZLI, 1985 yılında Yozgat'ın Merkez İlçesinde doğdu. Orta ve lise öğrenimini sırasıyla Celal Atik Ortaokulu ve Yozgat Lisesinde tamamlamıştır. 2004 yılında Fırat Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitimi başlamış olup 2008 yılında başarıyla bitirmiştir.

2010 yılında YOZGAT BOZOK Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yapı Mühendisliği Programında Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır.

Eğitim hayatının yanı sıra Yozgat İl Özel İdaresi Proje ve Yapım İşleri Bürosunda Kontrol Mühendisi olarak iş hayatını devam ettirmektedir.

İletişim Bilgileri:

Adres :Şeyh Osman Mah. Cemil Çiçek Cad. Çemsan Sitesi B Blok No:17

66100 YOZGAT

Tel : 0 541 276 68 20

E-Posta : turannazli6@gmail.com