

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

Yüksek Lisans Tezi

**GENLEŞTİRİLMİŞ VERMİKÜLİT KULLANILARAK
ÜRETİLEN SİLİS DUMANI KATKILI-ÇİMENTO
ESASLI KOMPOZİTLERİN YÜKSEK SICAKLIK
DİRENÇLERİ**

Mehmet KAYA

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Fuat KÖKSAL**

Yozgat 2011

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

Yüksek Lisans Tezi

**GENLEŞTİRİLMİŞ VERMİKÜLİT KULLANILARAK
ÜRETİLEN SİLİS DUMANI KATKILI-ÇİMENTO
ESASLI KOMPOZİTLERİN YÜKSEK SICAKLIK
DİRENÇLERİ**

Mehmet KAYA

**Tez Danışmanı
Yrd. Doç. Dr. Fuat KÖKSAL**

Yozgat 2011

T.C.
BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı 7011070007 numaralı öğrencisi Mehmet KAYA'nın hazırladığı **“Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Silis Dumanı Katkılı-Çimento Esaslı Kompozitlerin Yüksek Sıcaklık Dirençleri”** başlıklı YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 04/07/2011 Pazartesi günü saat 13:00'de yapılmış, tezin onayına ~~OY ÇOKLUĞU~~ / OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Yüksel TAŞDEMİR

Üye : Yrd. Doç. Dr. Fuat KÖKSAL (Danışman)

Üye : Yrd. Doç. Dr. S. Emre GÖRKEM

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 12 / 07 / 11 tarih ve 08 sayılı kararı ile onaylanmıştır.



Enstitü Müdürü

Yrd. Doç. Dr. Mustafa EROL
Bozok Üniversitesi
Fen Bil. Enst. Müdürü V.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜR.....	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	xi
1.GİRİŞ.....	1
2.LİTERATÜR ÇALIŞMASI.....	4
2.1. Silis Dumanı.....	4
2.1.1. Genel.....	4
2.1.2. Silis Dumanının Üretimi.....	4
2.1.3. Piyasaya Arz Edilişi.....	6
2.1.4.Silis Dumanın Fiziksel Özellikleri.....	7
2.1.4.1. Renk.....	7
2.1.4.2. Özgöl Ağırlık.....	8
2.1.4.3. Birim Ağırlık.....	8
2.1.4.4. Özgöl Yüzey Alanı.....	8
2.1.4.5. Tane Şekilleri.....	9
2.1.5. Silis Dumanın Kimyasal Yapısı.....	9
2.1.6. Silis Dumanın İnşaat Sektöründe Kullanımı.....	10
2.1.7. Silis Dumanın Çimento Esaslı Kompozit Özelliklerine Etkisi.....	12
2.1.7.1.Taze Beton Özellikleri Üzerine Etkisi.....	12
2.1.7.2. Sertleşmiş Betonlar Üzerine Etkisi.....	14
2.2. Vermikülit.....	21
2.2.1. Genel.....	21
2.2.2. Başlıca Vermikülit Çeşitleri.....	24

2.2.2.1. Kil Vermikülitler.....	24
2.2.2.2. Otijenik Vermikülitler.....	25
2.2.2.3. Metamorfik Vermikülitler.....	25
2.2.2.4. Makroskobik Vermikülitler.....	26
2.2.3. Vermikülitin Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Durumu.....	26
2.2.4. Genleştirilmiş Vermikülitin Üretim Yönetmi.....	30
2.2.5. Vermikülitin Özellikleri.....	34
2.2.5.1. Fiziksel Özellikleri.....	34
2.2.5.1. Kimyasal Özellikleri.....	37
2.2.6. Genleştirilmiş Vermikülitin Kullanım Alanları.....	36
3. DENEYSEL ÇALIŞMA.....	42
3.1. Kullanılan Malzemeler.....	42
3.1.1. Çimento.....	42
3.1.2. Genleştirilmiş Vermikülit.....	43
3.1.3. Silis Dumanı.....	46
3.1.3. Karışım Suyu.....	47
3.2. Karışım Oranları ve Üretim.....	47
3.2.1. Numune Üretimi.....	50
3.2.2. Numunlerin Sıcaklık Etkisine Konulması.....	52
3.3. Deneyler.....	54
3.3.1. Taze Harç Deneyleri.....	54
3.3.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri.....	55
3.3.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Deneyleri.....	55
3.3.2.2. Eğilme Dayanımı.....	57
3.3.2.3. Basınç Dayanımı.....	59
3.3.2.4. Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi.....	60
4. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRİLMESİ.....	65
4.1. Birim Ağırlık.....	65
4.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri.....	67
4.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite.....	67

4.2.2. Eğilme Dayanımı.....	71
4.2.3. Basınç Dayanımı.....	86
4.2.4. Ultrases Geçiş Hızı.....	100
SONUÇ ve ÖNERİLER.....	104
KAYNAKLAR.....	106
ÖZGEÇMİŞ.....	113

GENLEŞTİRİLMİŞ VERMİKÜLİT KULLANILARAK ÜRETİLEN SİLİS DUMANI TAKVİYELİ-ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİTLERİN YÜKSEK SICAKLIK DİRENÇLERİ

Mehmet KAYA

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

2011; Sayfa: 113

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Fuat KÖKSAL

ÖZET

Bu tez çalışmasında genleştirilmiş vermikülit ile üretilen, farklı oranlarda silis dumanı içeren çimento esaslı harçların yüksek sıcaklık etkisindeki mekanik dayanımları araştırılmıştır. Bu amaçla, üç değişik vermikülit/çimento hacimsel oranına sahip karışımlar içerisine, çimento ağırlığının %5, %10 ve %15'i oranında silis dumanı ilave edilerek, 40 mm× 40mm ×160 mm boyutlarında dikdörtgen prizma numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler; yüksek sıcaklık fırınında, 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık etkisinde bırakıldıktan sonra eğilme ve basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı testlerine tabi tutulmuşlardır. Elde edilen sonuçlar, oda sıcaklığı etkisindeki numunelerin mekanik dayanımları ve ultrases geçiş hızları ile karşılaştırılmıştır.

Yüksek sıcaklığa dirençli harç üretmek amacıyla yapılmış olan bu çalışma sonucunda, deney sonuçları değerlendirilmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinde silis dumanı içeren numunelerin, silis dumanı içermeyen numunelere göre, basınç dayanımlarının yüksek, eğilme dayanımlarının ve ultrases geçiş hızlarının düşük olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Vermikülit, silis dumanı, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ultrases.

VERMICULITE EXPANDED SILICA FUME REINFORCED-CEMENT BASED COMPOSITES PRODUCED BY HIGH TEMPERATURE RESISTORS

Mehmet KAYA

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

2011; Sayfa: 113

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

ABSTRACT

In this study, mechanical properties of cement based composites produced by expanded vermiculite with addition of silica fume at elevated temperatures were investigated. Mixtures were prepared with expanded vermiculite to cement ratios of 4, 6, and 8 by volume, volume fractions of 0%, 0,5%, 1,0%, and 1,5% for silica fume replaced with cement content were used. Dimensions of 40x40x160 mm specimens were exposed to 20°C, 300°C, 600°C and 900°C temperatures. Specimens were cooled to room temperature in air and flexure and compressive strength and ultrasonic pulse velocity of specimens were investigated. Experimental results compared with the control specimens.

High temperature-resistant mortar, the work was done in order to produce a result, the test results were evaluated. Samples containing silica fume under the influence of high temperature, according to samples containing silica fume, gigh compressive strength, flexual strength, and ultrasound were lower transition rates.

Keywords: Vermiculite, silica fume, compressive strength, bending strength, ultrasound,

TEŞEKKÜR

Bu Yüksek Lisans tezinin, ders aşamasından tamamlanıncaya kadar geçen süre içerisinde her türlü destek ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Fuat KÖKSAL' a, tezin laboratuvar çalışmalarından tamamlanıncaya kadar geçen süre içerisinde her aşamada bana yardımcı olan Araştırma Görevlisi Sayın Murat ŞAHİN' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans eğitimim ve tez aşaması boyunca bana destek veren eşime teşekkür ederim.

TABLÖLER LİSTESİ

Tablo 2.1:	Silis Dumanın Alaşım Türüne Göre Özgöl Ağırlığı.....	8
Tablo 2.2:	Farklı Malzemelerin Özgöl Yüzey Alanları.....	9
Tablo 2.3:	Silis Dumanın Genel Kimyasal Bileşimi.....	10
Tablo 2.4:	Silis Dumanlarının Satış Şekline Göre Fiyatı.....	11
Tablo 2.5:	Dünyadaki Vermikülit Rezervleri.....	27
Tablo 2.6:	Dünyada Vermikülit Üretimi.....	28
Tablo 2.7:	Vermikülitin Tane Boyu Dağılımına Göre Sınıflandırılması.....	34
Tablo 2.8:	Amerika’da Kullanılan Saf Vermikülitin Tane Boyu ve Yoğunluğuna Göre Sınıflandırılması.....	35
Tablo 2.9:	Amerika’da Kullanılan, Saf Vermikülitin Elekten Geçen Miktarı ve Yoğunluğuna Göre Sınıflandırılması.....	35
Tablo 2.10:	Tipik Vermikülitin Kimyasal Analizi.....	36
Tablo 3.1:	CEM I 42,5 R Portland Çimentosunun Özellikleri.....	42
Tablo 3.2:	Genleştirilmiş Vermikülitin Fiziksel Özellikleri.....	43
Tablo 3.3:	Genleştirilmiş Vermikülitin Kimyasal Özellikleri.....	43
Tablo 3.4:	Genleştirilmiş Vermikülitin Elek Analizi Değerleri.....	44
Tablo 3.5:	Çalışmada Kullanılan Silis Dumanını Özellikleri.....	46
Tablo 3.6:	Karışım Oranları.....	49
Tablo 3.7:	Taze Harçlara Ait Birim Hacim Ağırlık ve Yayılma Deney Sonuçları.....	55
Tablo 3.8:	Sertleşmiş Harçlara Ait Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Deney Sonuçları.....	57
Tablo 3.9:	Vermikülit/Çimento Hacimsel Oranı 4 Olan Numunelerin Deney Sonuçları.....	62
Tablo 3.10:	Vermikülit/Çimento Hacimsel Oranı 6 Olan Numunelerin Deney Sonuçları.....	63
Tablo 3.11:	Vermikülit/Çimento Hacimsel Oranı 8 Olan Numunelerin Deney sonuçları.....	64
Tablo 4.1:	Numunelerin Eğilme Dayanımları.....	72
Tablo 4.2:	Numunelerin Basınç Dayanımları.....	86

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1:	Ferrosilisyum Üretim Şeması ve Baca Tozlarının Toplanması.....	5
Şekil 2.2:	Silis Dumanı.....	7
Şekil 2.3:	Silis Dumanı Katkısının Ara Yüzeye Etkisi.....	14
Şekil 2.4:	Silis Dumanının Beton Üzerine Olumu Etkisi.....	15
Şekil 2.5:	Silis Dumanı Miktarının Beton Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi	16
Şekil 2.6:	Silis Dumanı Katkısının Beton basınç Dayanımına Etkisi.....	17
Şekil 2.7:	Ham Vermikulit.....	22
Şekil 2.8:	Genleştirilmiş Vermikulit.....	23
Şekil 2.9:	Kil Vermikulit.....	24
Şekil 2.10:	Metamorfik Vermikulitin Mikro Yapısı.....	26
Şekil 2.11:	Vermikulitin Dünyadaki Kullanım Alanları.....	29
Şekil 2.12:	Vermikulitin Üretim Aşamaları.....	31
Şekil 2.13:	Düşey Fırında Vermikulitin Genleştirilmesi.....	32
Şekil 2.14:	Genleştirilmiş Vermikulit Üretiminde Kullanılan Eğimli Fırın.....	32
Şekil 2.15:	Genleştirilmiş Vermikulit Üretiminde Kullanılan Döner Fırın.....	33
Şekil 2.16:	Genleştirilmiş Vermikulit Üretiminde Kullanılan Toroidal Fırın.....	33
Şekil 2.17:	Genleştirilmiş Vermikulitle Hafif Betonun Teras Uygulaması.....	37
Şekil 2.18:	Vermikulit Esaslı Tavan Sıvası Uygulaması.....	38
Şekil 2.19:	Genleştirilmiş Vermikulitin Isı Yalıtımı İçin Tavan Arasına Serilmesi.....	38
Şekil 2.20:	Genleştirilmiş Vermikulitin Seracılıkta Kullanımı.....	39
Şekil 2.21:	Havuz Tabanında Genleştirilmiş Vermikulit Uygulaması.....	40
Şekil 2.22:	Vermikulitin Conta ve Keçe Üretiminde Kullanımı.....	40
Şekil 2.23:	Genleştirilmiş Vermikulitin Paketlemede Kullanımı.....	41
Şekil 3.1:	Çalışmada Kullanılan Vermikülitin Elek Analizi.....	44
Şekil 3.2:	Çalışmada Kullanılan Genleştirilmiş Vermikulit.....	45
Şekil 3.3:	Genleştirilmiş Vermikulite Su İlave Edilmesi.....	45

Şekil 3.4:	Çalışmada Kullanılan Silis Dumanı.....	47
Şekil 3.5:	Çalışmada Kullanılan Çimento Mikseri.....	48
Şekil 3.6:	Genleştirilmiş Vermikulit İle Üretilmiş Harç.....	49
Şekil 3.7:	Harcın Kalıba Yerleştirilmesi.....	50
Şekil 3.8:	Harcın Kalıba Yerleştirilmiş Hali.....	51
Şekil 3.9:	Numunelerin 28 Günlük Kür Sürecindeki Durumu.....	51
Şekil 3.10:	Numunelerin 28 Günlük Durumu.....	52
Şekil 3.11:	Numunelerin Sıcaklık Uygulanmadan Önceki Durumu.....	53
Şekil 3.12:	Numunelerin Sıcaklık Uygulandıktan Sonraki Durumu.....	53
Şekil 3.13:	Yayılma Deneyi Aleti.....	54
Şekil 3.14:	Numunelere Arşimet Deneyi Yapılması.....	56
Şekil 3.15:	Eğilme Deneyinde Yükleme Başlığı ve Yükleme Tablası.....	58
Şekil 3.16:	Eğilme Dayanımı Tayini Deney Cihazı.....	58
Şekil 3.17:	Basınç Dayanımı Deney Düzeneği.....	59
Şekil 3.18:	Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi.....	61
Şekil 4.1:	Taze Birim Ağırlık Deney Sonuçları.....	65
Şekil 4.2:	Silis Dumanı İçermeyen Numunelere Kıyasla Üretilen Harçların Taze Birim Hacim Ağırlığı Artışı.....	66
Şekil 4.3:	Kuru Birim Ağırlığın Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi.....	68
Şekil 4.4:	Silis Dumanı İçermeyen Numunelere Kıyasla Numunelerin Kuru Birim Ağırlığı Değişimleri.....	68
Şekil 4.5:	Porozitenin Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi.....	69
Şekil 4.6:	Su Emme Miktarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi.....	69
Şekil.4.7:	20°C Sıcaklıktaki Harçların Eğilme Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişim.....	73
Şekil 4.8:	Silis Dumanı İçeren Harçların Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % değişimi (20°C).....	73
Şekil 4.9:	300°C Sıcaklıktaki Harçların Eğilme Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi.....	74
Şekil 4.10:	Silis Dumanı İçeren Harçların Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (300°C).....	75
Şekil 4.11:	600°C Sıcaklıktaki Harçların Eğilme Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi.....	76
Şekil 4.12:	Silis Dumanı İçeren Harçların Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % değişimi (600°C).....	77

Şekil 4.13:	900 °C Sıcaklıktaki Harçların Eğilme Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi.....	78
Şekil 4.14:	900°C Sıcaklıkta Test Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçeriğine Göre Değişimi.....	79
Şekil 4.15:	Vermikülit/çimento Oranı 4 Olan Numunelerin Bağlı Eğilme Dayanımları.....	80
Şekil 4.16:	Vermikülit/çimento Oranı 6 olan Numunelerin Bağlı Eğilme Dayanımları.....	81
Şekil 4.17:	Vermikülit/çimento Oranı 8 Olan Numunelerin Bağlı Eğilme Dayanımları.....	81
Şekil 4.18:	Sıcaklığın Bağlı Eğilme Dayanıma Etkisi (SD İçeriği=%0).....	83
Şekil 4.19:	Sıcaklığın Bağlı Eğilme Dayanıma Etkisi (SD İçeriği=%5).....	83
Şekil 4.20:	Sıcaklığın Bağlı Eğilme Dayanıma Etkisi (SD İçeriği=%10).....	84
Şekil 4.21:	Sıcaklığın Bağlı Eğilme Dayanıma Etkisi (SD İçeriği=%15).....	85
Şekil 4.22:	20°C Sıcaklıkta Test Edilen Numunelerin Basınç Dayanımı.....	87
Şekil 4.23:	Silis Dumanı İçeren Harçların Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (20°C).....	87
Şekil 4.24:	300°C Sıcaklıktaki Harçların Basınç Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi.....	89
Şekil 4.25:	Silis Dumanı İçeren Harçların Basınç Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (300°C).....	89
Şekil 4.26:	600°C Sıcaklıktaki Harçların Basınç Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi.....	91
Şekil 4.27:	Silis Dumanı İçeren Harçların Basınç Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (600°C).....	91
Şekil 4.28:	900°C Sıcaklıktaki Harçların Basınç Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi.....	93
Şekil 4.29:	Silis Dumanı İçeren Harçların Basınç Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (900°C).....	93
Şekil 4.30:	Vermikülit/çimento Oranı 4 Olan Numunelerin Bağlı Basınç Dayanımları.....	95
Şekil 4.31:	Vermikülit/çimento Oranı 6 Olan Numunelerin Bağlı Basınç Dayanımları.....	95
Şekil 4.32:	Vermikülit/çimento Oranı 8 Olan Numunelerin Bağlı Basınç Dayanımları.....	96
Şekil 4.33:	Sıcaklığın Bağlı Basınç Dayanıma Etkisi (SD İçeriği=%0).....	97
Şekil 4.34:	Sıcaklığın Bağlı Basınç Dayanıma Etkisi (SD İçeriği=%5).....	98
Şekil 4.35:	Sıcaklığın Bağlı Basınç Dayanıma Etkisi (SD İçeriği=%10).....	99
Şekil 4.36:	Sıcaklığın Bağlı Basınç Dayanıma Etkisi (SD İçeriği=%15).....	100

Şekil 4.37:	VÇ4 Serisi Numunelerinin Bağlı Ultrases Geçiş Hızları.....	101
Şekil 4.38:	VÇ6 Serisi Numunelerinin Bağlı Ultrases Geçiş Hızları.....	101
Şekil 4.39	VÇ8 Serisi Numunelerinin Bağlı Ultrases Geçiş Hızları.....	102

KISALTMALAR LİSTESİ

C-S-H	:	Kalsiyum-Silika-Hidrate
EN	:	Avrupa Normu
SD	:	Silis Dumanı
SD0	:	Silis Dumanı Oranı 0 Olan Numune/karışım
SD5	:	Silis Dumanı Oranı %5 Olan Numune/karışım
SD10	:	Silis Dumanı Oranı %10 Olan Numune/karışım
SD15	:	Silis Dumanı Oranı %15 Olan Numune/karışım
TS	:	Türk Standartları
VÇ4	:	Vermikülit/Çimento Hacimsel Oranı 4 Olan Numune/ karışım
VÇ6	:	Vermikülit/Çimento Hacimsel Oranı 6 Olan Numune/ karışım
VÇ8	:	Vermikülit/Çimento Hacimsel Oranı 8 Olan Numune/ karışım

1. GİRİŞ

Agrega, çimento ve su karışımı ile üretilen geleneksel betonlarla inşa edilen betonarme yapılarda en önemli olumsuzluklardan birisi yapı ölü ağırlığının fazla olmasıdır. Bu durum geleneksel betonun birim hacim ağırlığının yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Geleneksel beton ile inşa edilen yapılarda kat yüksekliği arttıkça ölü yük artmakta, betonarme elemanların kesitleri büyümekte, buna bağlı olarak maliyet yükselmektedir. Yapı ağırlığının artması, depreme karşı dayanıklılığı azaltan önemli faktörlerden birisidir. Geleneksel betonun bu olumsuz durumunu iyileştirmek için başlıca 3 yöntem vardır [1]. Bunlar:

- Normal agregaların yerine boşluklu olan doğal veya yapay agregalar kullanarak hafif beton üretmek,
- Beton içerisinde fiziksel veya kimyasal yöntemlerle büyük boşluklar oluşturarak gaz ve köpüklü beton üretmek,
- Betonun ince agregasını çıkararak üretilen kumsuz betonlar üretmek olarak ifade edilebilir.

Seçilen bu yöntemlerin tamamı beton birim hacim ağırlığının düşük olduğu hafif beton üretmeyi amaçlamaktadır. Hafif beton üretmek için genel kural, beton içerisinde boşluk oluşturmaktır. Boşluk ise ya harç içerisinde, ya agregataneleri arasında ya da agreganın kendi yapısından kaynaklı olarak sağlanmaktadır. Hafif betonların kullanılmasının başlıca sebepleri, birim ağırlıklarının düşük olması, ateşe dayanıklılıkları, ses ve ısıya karşı yalıtkan olmaları sayılabilir [2].

Hafif betonların kullanımlarının bazı üstünlükleri ise; birim ağırlıklarının hafifliği, ateşe dayanıklılığı, ses ve ısıya karşı yalıtkan olması, eğilme etkisindeki elemanlarda donatı ekonomisi sağlaması, yapı elemanlarının ve temel boyutlarının küçülmesi, kalıplara normal betonlardan daha az bir basıncın gelmesi ile kalıp giderlerinin azalması şeklinde sıralanabilir. Bunun yanı sıra mekanik dayanımlarının normal betonlara göre düşük

olması, ani ve geciken şekil değiştirmelerin varlığı, üretim ve yerleştirilmesine özen gösterilmesi gerekliliği başlıca dezavantajları olarak söylenebilir [3].

Hafif beton konusunda gerek yurtdışında gerekse ülkemizde pek çok çalışma yapılmıştır. İlk uygulamalarda, hafif betonun birim hacim ağırlığı ve ısı iletkenlik katsayılarının düşük oluşu ekonomik yararının temelini oluşturmaktadır. Bugün, yalıtım elemanı olarak kullanılmalarının yanı sıra taşıyıcı özelliği olan elemanlarda da hafif beton kullanılmaya başlanmış, dolayısıyla mekanik özelliklerinin bilinmesine de ihtiyaç duyulmuştur [4].

Birim hacim ağırlıkları 800-2000 kg/m³ arasında değişen hafif betonların, yapılarda kullanılmasının diğer bir sebebi de ısı iletkenlik katsayılarının düşüklüğü ve yangına karşı dayanıklı olmasıdır. Ayrıca hafif betonun kullanımında enerji tasarrufu göz önüne alındığında yalıtım özelliğinin ön plana çıkmasıdır. Hafif betondaki gözeneklilik, betonda devamlı artan dayanım ve dayanıklılık sağlamaktadır [5].

Yapılarda durabilite (kalıcılık) problemine yol açan başlıca fiziksel etkilerden biri de yüksek sıcaklıktır. Bu etki yapılarda kalıcı hasarlar oluşturarak yapının servis dışı kalmasına yol açabilmekte, ayrıca can ve mal kaybına neden olabilmektedir [6].

Betonların yangın ve fırın gibi yüksek ısıya maruz kaldığı yerlerde ısıya karşı dirençleri ön plana çıkmaktadır. Yangına maruz kalmış beton bünyesindeki suyu kaybederek bağlayıcıların agrega tanelerinden ayrılmasına yol açar. Beton ve betonarme yapılar birkaç saat içerisinde 600 °C' ye ulaşan sıcaklıklarda, donatı herhangi bir dayanım kaybına uğramazken, beton %50'lik bir dayanım kaybına uğramaktadır. Sıcaklığın 800°C' ye ulaşması durumunda ise beton dayanımının yaklaşık %80'ini kaybeder ve yapı yıkılma tehlikesiyle karşılaşır [7]. Bu sebeple beton elemanların yangına karşı dayanıklılığı son derece önemlidir.

Yüksek sıcaklığın kaynaklarından biri olan yangının, betona ve betonarme yapılara etkisi 1922'den günümüze kadar araştırılmaktadır. Yapılan araştırmalarda yangın sırasında ve sonrasında malzemenin karmaşık davranışı, yapısal güvenlik ve yapının bütünlüğü anlaşılmaya çalışılmıştır. 10 yıl öncesine kadar yapılan çalışmalar yüksek sıcaklığın normal dayanımlı beton üzerindeki etkilerinin araştırılmasına yoğunlaşmıştır. Ancak günümüzde modern yapılarda, endüstri yapılarında, tünellerde veya özel hizmet amaçlı inşa edilen yapılarda kimyasal ve mineral katkıların kullanımı ile yüksek performanslı ve yüksek dayanımlı betonlar kullanılmaya başlanmıştır. Bu betonların yüksek sıcaklık etkisindeki davranışı iyi bilinmesini gündeme getirmiştir. Çünkü bu betonların boşluk oranı düşük, yapısı daha yoğun olduğu için yüksek sıcaklık etkisinde performansı normal dayanımlı betona göre daha düşük olmaktadır [8].

Hafif betonun ısı iletkenlik katsayısının düşük olması ve yangına karşı göstermiş olduğu olumlu performans, birim hacim ağırlığı düşük agregalarla yapılan hafif beton üretimine yönelik çalışmaları artırmıştır. Ülkemizde özellikle pomza taşı, volkanik tüf ve volkanik cüruf ile hafif beton yapımına yönelik birçok araştırma bulunmaktadır. Hafif betonlarda genleştirilmiş vermikülit kullanımı konusunda henüz yeterli seviyede çalışma bulunmamaktadır. Yakın geçmişte genleştirilmiş vermikülit kullanılarak ısıya ve yüksek sıcaklığa dayanıklı hafif beton üretmek için çalışmalar yapılmıştır [9].

Bu çalışmanın amacı, genleştirilmiş vermikülit kullanılarak ve farklı oranlarda silis dumanı ilave edilerek üretilen çimento esaslı hafif harçların yüksek sıcaklık etkisindeki mekanik dayanımlarının araştırılmasıdır. Bu kapsamda dayanımı arttırılmış, yüksek sıcaklığa dirençli çimento esaslı hafif harç üretimi hedeflenmiştir.

2.LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1. Silis Dumanı

2.1.1. Genel

Silis dumanı, silisyum metali veya ferrosilisyum alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO₂ olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturur [10] .

Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanında bulunan SiO₂ miktarı artmaktadır. Bu miktar silisyum metalinde %98 ulaşır. Araştırmalarda ve pratikte kullanılan silis dumanları genellikle %75 ve yukarı oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan elde edilmiştir [10].

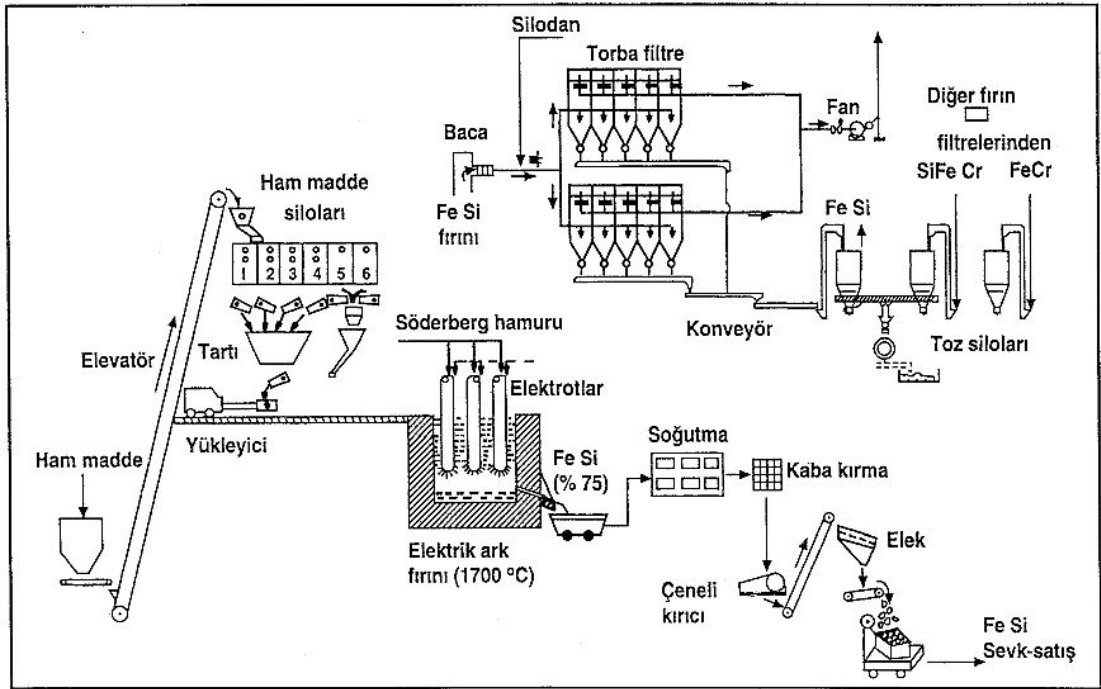
Silisyum metalinin ve ferrosilisyum alaşımlarının bir yan ürünü olarak elde edilen silis dumanı ile ilgili çalışmalar 1950 yılında Norveç'te başlamış ve yine çimento katkısı olarak kullanımı 1969 da NORCEM firması tarafından Norveç'te denenmiştir [10]. Silis dumanının beton özelliklerine etkisi ile ilgili çalışmalar 1980'li yıllara kadar yavaş gelişmiştir. Betonda süper akışkanlaştırıcıların kullanılmasıyla birlikte silis dumanının beton özelliklerine olumlu etkileri ve çevre kirliliğine karşı alınan sıkı tedbirler nedeniyle silis dumanı konusundaki çalışmalar 10 yılda hızla ilerlemiştir. Silis dumanı artık bir endüstri atığı değil, parayla satılan kıymetli bir mineral haline gelmiştir. 1989 yılında dünyadaki toplam silisyum üretimi 1.000.000 ton'a ulaşmıştır [7].

Türkiye'de silis dumanı üretimi Antalya'da bulunan Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinden elde edilmektedir. Tesisin üretim kapasitesi yıllık 8.000 ton civarındadır [11]. Tesiste 7,5 MVA gücünde tipik elektrik ark fırını kullanılmakta olup, ferrokrom üretimi konusunda ülkenin ilk kuruluşudur [12].

2.1.2.Silis Dumanının Üretimi

Üretim sürecinde %95 civarında SiO_2 içeren kuvarsit, demir-çelik hurdası ya da demir cevheri ile birlikte metalurjik kottan oluşan hammaddelerle belirli oranlarda karıştırılarak 600 kVA gücündeki elektrik ark-direnç fırınına sevk edilir. Bu fırınlarda elektrot malzemesi olarak antrasit ve ziftten oluşan söderberg hamuru kullanılır. Demir ve silisyum oksitler karbon ile indirgenerek ferrosilisyum alaşımı oluştururlar. Fırın tabanında biriken alaşım mal alma oluklarının uygun zaman aralıklarında açılmasıyla demir kalıplara alınır. Soğuyan bloklar kırılıp net 500 kg' lık sandık ve azami 25 kg' lık parçalarla dökme olarak ayrıca 10-100 mm ebatlarda özel kırma yapılarak satışa sunulur.

Aşağıdaki şekilde ferrosilisyum üretim aşaması şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Ferrosilisyum üretim şeması ve baca tozlarının toplanması [10]

Silis Dumanı, 200 kg/m^3 yoğunluğa sahip aşırı derecede küçük parçacıklardan oluşur. Bu parçacıklar çimentodan yaklaşık 100 kere daha incedir ve taşınması zordur. Taşınma

ve kullanımı kolaylaştırmak için özel yöntemler kullanılmış olup, değişik formlarda üretilmektedir. Belli başlı formları şunlardır [13] :

Yoğunlaşmamış formu: 200- 350 kg/m³ yoğunluktadır. Filtrelerde toplandığında ince toz şeklinde olup hafiftir ve torbalanan materyal harç oluşturmada kullanılmaktadır.

Yoğunlaşmış formu: Serbest çökelmiş partiküllerin yoğunluğu 500- 600 kg/m³'e kadar artırılmış olup, yoğunlaşmamış formdaki gibi toz halde değildir ve ince taneli görünümündedir. Precast (ön üretim) ve hazır beton oluşturmada kullanılmaktadır.

Tanelenmiş (küreselleştirilmiş) formu: Kütle yoğunluğu yaklaşık 1000 kg/m³ olup, katı bir çökelti vermesi için az su karıştırılmıştır. Çimento klinkeri ile öğütme işleminde kullanılabilir.

Sıvılaştırılmış formu: Yoğunlaştırılmamış silis dumanının su içindeki asılı tanecik biçimindeki formudur. Karışım oranı %50'dir. Yoğunluğu 1400 kg/m³ tür. Taşınabilirliği toz haline göre daha kolaydır.

2.1.3. Piyasaya Arz Edilişi

Silis dumanı piyasaya elde edildiği gibi, sulandırılmış olarak, sıkıştırılmış olarak veya topak halinde sevk edilmektedir. Üretildikten sonra, çimento gibi torba ile veya dökme olarak kullanılması mümkündür. Etibank Antalya tesislerinde zaman zaman 80×80×140 cm boyutlarındaki bez torbalarda satışa sunulmuştur. Çok ince taneli olması gevşek birim hacim ağırlığının az oluşu nedeniyle taşıma, depolama ve harmanlama işlemleri özenle yapılmalıdır. Boşaltma sırasında toz halinde kolayca yayılabildiği için su ile karıştırılarak bulamaç halinde piyasaya sürülebilir. Genellikle %40- 60 oranında su ilave edilerek veya gerektiğinde akışkanlaştırıcı eklenerek bulamaç halinde piyasaya sürülür. Bu amaçla 200 litrelik variller veya 20 litrelik damacanalara ile piyasaya sürülmesi ekonomik olmaktadır. Silis dumanın sıkıştırılmış hale getirilmesi için silolarda basınçlı hava ile ince tanelerin birbirine yapışması sağlanır. Daha iri taneli malzeme oluşturulur. Bu malzeme 25 kg veya 900 kg' lık torbalarda piyasaya sunulmaktadır. İstendiğinde toz

halinde kimyasal katkıları katılır. Silis dumanının mekanik olarak sıkıştırılmasında da uygulanan bir yöntemdir. Ayrıca, az miktarda su ile karıştırılarak toprak haline getirilmesi mümkündür. Değişik büyüklüklerde oluşan topraklar sertlikleri nedeniyle doğrudan betonyeye katılmazlar, ancak klinkerle birlikte öğütülerek katkılı çimento üretiminde kullanılabilirler [10].

Ferrosilisyum endüstrisinde çalışan işçilerle ilgili bazı sağlık tüzükleri silis dumanının sağlığa zararlı maddeler arasında saymaktadırlar. Ancak, silis dumanının çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması sırasında çalışanların sağlığı üzerinde olumsuz bir etkisi görülmemiştir. Buna rağmen, çok ince taneli silis içeren bu madde ile çalışılan yerlerde solunan havada tozlanmanın en aza indirilmesi ve çalışanların gerekli koruyucu önlemleri alması gerekmektedir [1].

2.1.4. Silis Dumanının Fiziksel Özellikleri

2.1.4.1. Renk

Silis dumanının rengi, açık sarı ve koyu gri arasında değişebilmektedir. Kullanılan silis dumanını çoğu gri renklidir. Renkteki koyuluk karbon miktarı ile orantılıdır [7]. Şekil 2.2 'de silis dumanının resmi görülmektedir.



Şekil 2.2.Silis Dumanı

2.1.4.2. Özgöl Ağırlık

Silis dumanının özgöl ağırlığı ortalama 2,20 civarındır. Bu değer alaşımın türü ve kaynağına göre değişebilmektedir [1]

Tablo 2.1. Silis Dumanın Alaşım Türüne Göre Özgöl Ağırlığı

Si Alaşım Türü	Özgöl Ağırlık
Si	2,23
Si+Fesi (%75)	2,26- 2,27
FeSi (%50)	2,30
FeSi (%75)	2,21- 2,23

2.1.4.3. Birim ağırlık

Silis dumanının birim ağırlığı, normal portland çimentosu için verilen 1200 kg/m³ ile kıyaslandığında 250-300 kg/m³ tür. Yani çimento tankeri ile silis dumanı nakledilirse ¼ oranında silis dumanı taşınacak demektir. Malzemenin hafifliği, etrafa kolayca yayılması önemli bir taşıma sorunudur. Bu yönde yöntemler geliştirilmiştir: 80x80x140 cm boyutlarında torbalama (500 kg/m³) veya bulamaç haline getirme (1300 kg/m³) gibi (bulamacın yarısı sudur). Tankerler içinde gereksiz yere su da taşınmış olacaktır. Bulamacın ayrıca şantiyede depolanması için özel tanklar düşünülmelidir [14].

2.1.4.4. Özgöl yüzey alanı

Silis dumanı genellikle camsı, düzgün yüzeyli küresel taneciklerden meydana gelmiştir. Çok ince taneli ve hafif olduğundan özgöl yüzey bazında inceliği Blaine metodu ile belirlenmektedir. Çok ince taneli cisimlerde özgöl yüzey alanı azot adsorpsiyon metodu (BET) ile belirlenir. Burada özgöl yüzey, tanelerin dış yüzeyi ile içlerindeki açık

boşlukların iç yüzeylerinden oluşan alanı 1 molekül kalınlığında tabaka ile kaplayacak azot gazı miktarından hesaplanır [10].

Silis dumanı 20000 m²/kg yüzey alanına sahip ince partiküllerden oluşmuştur. Tablo 2.2’de silis dumanının inceliği hakkında fikir vermesi açısından, benzer malzemelerin özgül yüzey alanları verilmiştir [7].

Tablo 2.2. Farklı Malzemelerin Özgül Yüzey Alanları [7].

Malzemeler	Özgül Yüzey Alanı	Ölçüm Metodu
Silis Dumanı	20 000	Azot Adsorpsiyon
Uçucu Kül	400- 700	Blane
Yüksek Fırın Cürufu	350- 600	Blane
Portland Çimentosu	300- 400	Blane

2.1.4.5. Tane Şekilleri

Silis dumanın taneleri küre şeklindedir. Elektron mikroskobu altında taneler, bir araya gelmiş kürecikler biçiminde görülür [13].

Silis dumanın tanelerinin tamamı 1 µm’ den küçük olup ortalama tane boyu 0,1 µm civarındadır. Ortalama çimento tanesinin 10 µm boyutunda olduğu değerlendirildiğinde, silis dumanın çimento tanesinden 100 kat daha ince olduğu gözlenir [10].

2.1.5. Silis Dumanının Kimyasal Yapısı

Silis dumanının ana bileşeni kristalize olmayan amorf haldeki silistir. Beton katkı malzemesi olarak kullanılan silis dumanının SiO₂ içeriği %85’in üzerindedir. İkinci ana bileşeni ise yanmamış karbon kalıntılarıdır. Fe₂O₃ içeriği ise %1 ile %2 civarındadır.

Al_2O_3 , SO_3 , MgO , Na_2O ve K_2O gibi oksitler ise genelde %1'den az miktarda bulunur [15].

Silis dumanının kimyasal özelliği, üretilen metalin ya da alaşımın tipine göre değişiklik gösterebilir. Demir silikon üretiminden elde edilen silis dumanının, demir ve magnezyum içeriği diğer silikon metal üretilen fırınlardan elde edilen silis dumanının demir ve magnezyum içeriğinden daha fazladır. Tablo 2.3'de farklı ülkelerde üretilen silis dumanlarının genel kimyasal bileşimi verilmiştir [16].

Tablo 2.3. Silis Dumanın Genel Kimyasal Bileşimi

Bileşen	USA	Norveç	Türkiye
SiO_2	90-93	90-96	93-95
C	1.3-2.6	0.5-1.4	0.8-1
Fe_2O_3	0.4-0.7	0.2-0.8	0.4-1
Al_2O_3	0.5-1.6	0.5-3	0.4-1.4
MgO	0.3-0.5	0.5-1.5	1-1.5
CaO	0.5-0.8	0.1-0.5	0.6-1
Na_2O	0.1-0.3	0.2-0.7	0.1-0.4
K_2O	1-1.2	0.4-1	0.5-1
S	0.1-0.2	0.1-0.4	0.1-0.3
Kızdırma Kaybı	1.4-2.8	0.7-2.5	0.5-1

2.1.6. Silis Dumanın İnşaat Sektöründe Kullanımı

Silis dumanlarının yüksek pozolanik aktivitelerinden dolayı son yıllarda beton üretiminde oldukça yaygın halde kullanılmaktadır. Dayanıklılığın çok önemli olduğu yüksek performanslı betonlarda silis dumanlı çimento veya betonlar yaygın olarak

kullanılmaktadır. Silis dumanı katılmış betonlar süper akışkanlaştırıcılar ile beraber kullanılmak suretiyle yüksek performans verirler. Bazı araştırmacılara göre silis dumanın beton basınç dayanımını artırmasının nedeni agrega-hamur geçiş bölgelerini kuvvetlendirmesine bağlanmaktadır. Diğer taraftan inceliğinden dolayı daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşturduğu öne sürülmektedir [17].

Silis dumanı, yüksek performanslı betonların kullanıldığı otoyollar, köprü kirişleri, köprü payanda ve mesnetleri, barajlar gibi kısa sürede bozulma istenmeyen yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Aynı zamanda deniz suyu ve endüstriyel kirlilik gibi çevre zararları söz konusu olan yerlerde de kullanılan yüksek performanslı beton üretimi için çok uygundur [18].

Silis dumanının inceliğinden dolayı daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşturduğu öne sürülmektedir. 1984 yılında Kanada Montreal’de yapılan La Laurentienne Building’de Silis/Bağlayıcı oranı 0.27 olan silis dumanlı betonlarda 28. günde 93, 91. günde ise 107 MPa’lık dayanımlar elde edilmiştir [18]. Malhotra ve Jahren [19], silis dumanının beton dayanımı üzerindeki etkisinin uçucu kül ve cüruf gibi atıklardan daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Eşdeğerlik faktörü, (K), uçucu küllerde genel olarak 1 değerini ancak 90 günlük dayanımlarda yakalayabilirken silis dumanı ile 7 ve 28 günlük dayanımlarda bu değer 2~5 arasında olmaktadır. Diğer bir deyimle 1 kg silis dumanı 2~5 kg çimentoya eşdeğer sayılmaktadır.

Tablo 2.4. Silis Dumanlarının Satış Şekline Göre Fiyatı [20]

Silis Dumanı	Torba Ebadı (cm)	Torba Ağırlığı (kg)	Fiyatı (\$/Ton)
FeSi ve SiFeCr	60x80x100	500	31

2.1.7. Silis Dumanının Çimento Esaslı Kompozitlerin Özelliklerine Etkisi

2.1.7.1. Taze Beton Özellikleri üzerine etkisi

Silis dumanı, tanelerinin çimento tanelerinden daha küçük bir yapıda olmasından dolayı çimento taneleri arasındaki boşlukları doldurur, granülometriyi iyileştirir ve karışımdaki serbest su miktarını artırır. Bununla birlikte, silis dumanı yüksek özgül yüzey alanına sahip olması nedeniyle, karışımdaki miktarı arttıkça karışımın su ihtiyacı da artar. Öngörülen su miktarı ise 1 m³ karışım içerisinde 1 kg silis dumanı ilave edebilmek için 1 lt suya ihtiyaç duyulması olarak ifade edilebilir [21].

Çimento dozajı düşük betonlarda silis dumanı %5 oranında çimento yerine ikame edilmesi su ihtiyacını artırmayabilir. Karışımdaki silis miktarı artırılırken suya ilave etmeden hatta suyu azaltarak işlenebilirlik artırılabilir [10]. Çimento miktarının %7,5 'i oranında yerine ikame edilen silis dumanı ile birlikte karışımın viskozitesinin arttığı, daha az miktarlarda ise viskozitesinin azaldığı gözlenmiştir [22].

Khayat ve Aitcin [23] 'ye göre, silis dumanı çimento tanecikleri arasındaki küçük boşlukları doldurarak arada hapsolmuş suyun serbest kalmasını sağlar. Bununla birlikte yüksek yüzey alanı nedeni ile hapsolan su miktarı da artmaktadır. Silis dumanının betonun su ihtiyacına etkisi, su/bağlayıcı oranı ve süper akışkanlaştırıcı kullanılması gibi faktörlerle ilişkilidir. Normal betonlarda, çimento yerine kullanılan %5 oranında silis dumanı süper akışkanlaştırıcı ihtiyacı doğurmamaktadır. Yüksek oranlarda kullanılan silis dumanı ilavesiyle orantılı olarak artırılan süper akışkanlaştırıcı, karışımdaki su ihtiyacını artırmamaktadır.

Yeğinobalı [10], silis dumanının genel olarak betonun su ihtiyacını artırdığını, yüksek dayanımlı betonlarda işlenebilirliği artırmak için cüruf ve uçucu kül gibi bağlayıcıların ve süper akışkanlaştırıcının kullanılmasının uygun olacağını belirtmiştir.

Jahren [21], silis dumanı ilave edilmiş betonların normal betonlara göre daha yapışkan olduğunu ifade etmiş, işlenebilirliklerini belli bir süre koruyabilmeleri için ilk çökme değerinde 50 mm civarında bir artış sağlanması gerektiğini belirtmiştir.

Goncalvez'e [21] göre; bağlayıcı miktarı 200,300 ve 400 kg/m³ olan betonlarda %50'ye kadar çimentonun silis dumanı ile yer değiştirmesi durumunda sabit işlenebilirlik için gerekli su miktarı artmaktadır.

Duval ve Kadri [16], silis dumanının betonun işlenebilirliğine ve basınç mukavemetine etkisini iki değişik tip çimento kullanarak incelemişlerdir. su/bağlayıcı oranını 0.25~0.45 arasında değiştirdikleri çalışmalarında, %10 ve daha düşük oranlarda silis dumanı kullanımının işlenebilirliğe olumlu etkisinin olduğunu, su/bağlayıcı oranının düşmesiyle silis dumanının işlenebilirlik üzerindeki bu etkisinin daha da belirgin hale geldiğini bildirmişlerdir. Karışımlarda kullanılan süper akışkanlaştırıcı miktarının ise çimentonun C₃A ve alkali-sülfat içeriğine bağlı olarak değiştiğini ifade etmişlerdir.

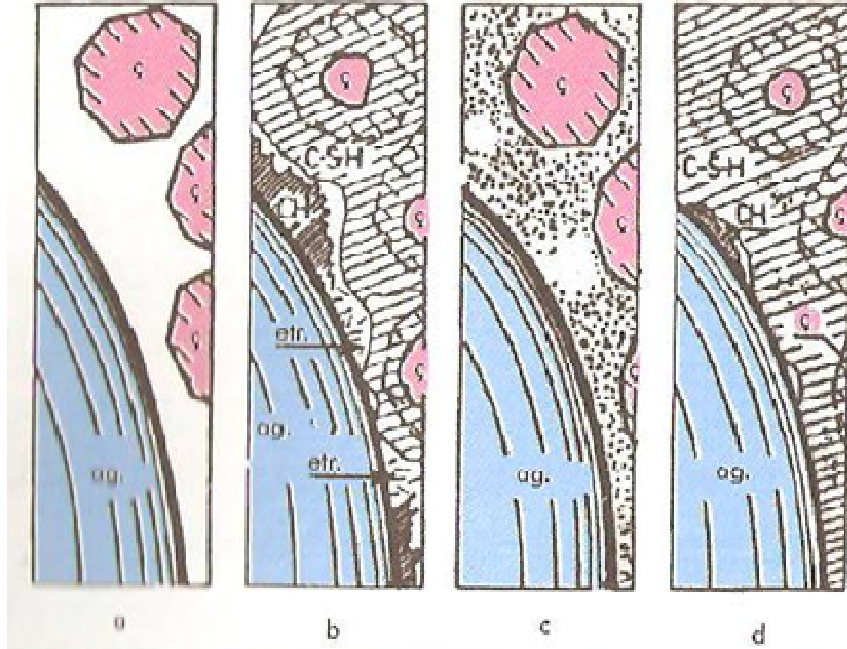
Kakizaki ve diğ. [21], yüksek dayanımlı betonlarda bileşenlerin değişik karıştırma yöntemlerine göre etkilerini araştırmışlardır. Çimento ve suyun önceden karıştırılması ile çökme değerinin arttığını ifade etmişlerdir.

Öztok ve Yeğınobalı [10], yaptıkları çalışma sonucunda, silis dumanının genelde betonun su ihtiyacını artırdığını, yüksek dayanımlı betonlarda, işlenebilirliğin iyi olması için silis dumanının cüruf ve uçucu kül gibi bir bağlayıcı ve süper akışkanlaştırıcı ile birlikte kullanılmasının daha uygun olacağını belirtmişlerdir.

Mazloom ve ark. [21], yüksek mukavemetli betonların kısa ve uzun vadedeki mekanik özelliklerini inceledikleri çalışmalarında sabit çökme (100±10 mm) değeri için yüksek oranlarda silis dumanı katılması durumunda betonun işlenebilirliğinin düştüğünü ve daha fazla süper akışkanlaştırıcı gerektiğini belirtmişlerdir.

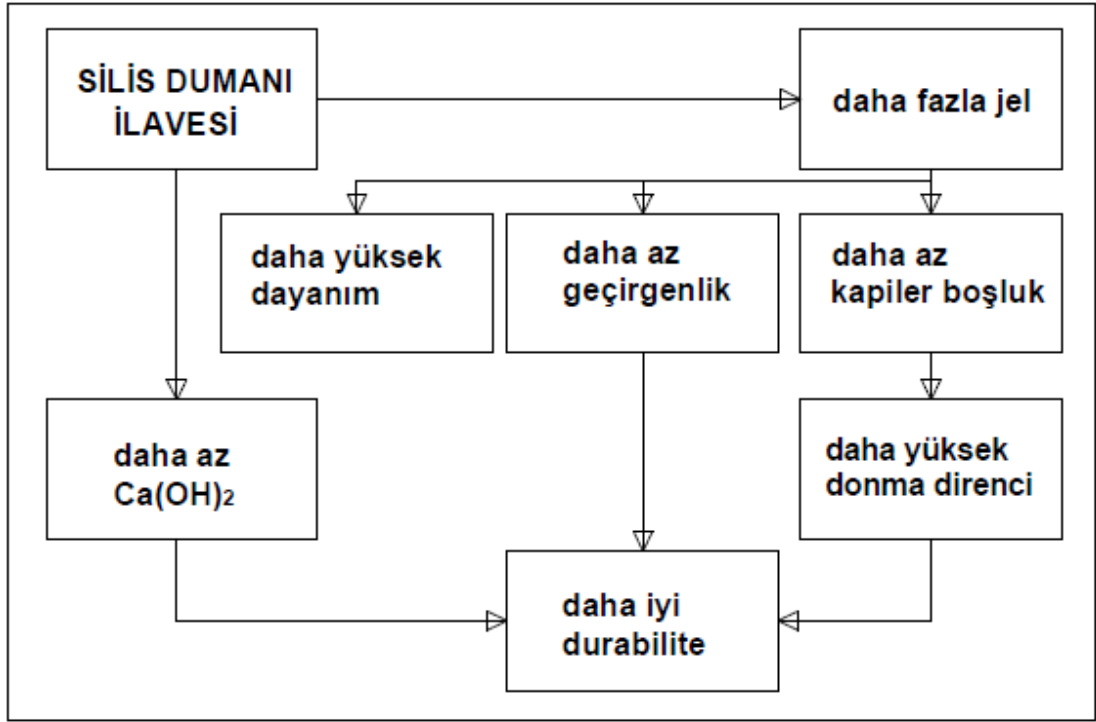
2.1.7.2. Sertleşmiş Betonlar Üzerine Etkisi

Silis dumanının betona ilavesi ile betonun basınç dayanımı artmaktadır [24]. Silis dumanının beton içerisindeki boşlukları doldurma ve puzolanik etki olmak üzere iki tür işlevi bulunmaktadır. Silis dumanının betonda en önemli işlevinin agrega çimento ara yüzeyini güçlendirmesidir. Bu durum mikro yapısal ve mekanik incelemeler ile kanıtlanmıştır [24].



Şekil 2.3. Silis Dumanı Katkısının Ara Yüzeye Etkisi

Agrega-çimento ara yüzeyinin güçlenmesi betondaki boşluk oranının azalmasından kaynaklanmaktadır. Silis dumanının beton içerisine süper akışkanlaştırıcı ilave edilmeden katılması su ihtiyacını artırmaktadır. Su ilavesi ise beton dayanımının azaltan bir faktördür. Bu nedenle silis dumanı çoğu zaman süper akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılarak betonun su/bağlayıcı oranı azaltılmaya çalışılır. Silis dumanının betonun birçok özelliğine olumlu etkisi şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Silis Dumanının Beton Üzerine Olumlu Etkisi [15]

Silis dumanı ilavesiyle beton mukavemetinin artmasının esas nedenleri kullanılan silis dumanının miktarına, su-bağlayıcı oranına, bağlayıcı malzeme miktarına, çimento tipine, su azaltıcı katkının cinsine, kür durumuna ve zamana bağlanmaktadır. Silis dumanı kullanılarak elde edilen betonun basınç dayanımının optimum olmasını sağlayan esas neden ise silis dumanı miktarı ile kullanılan akışkanlaştırıcının dozajı sağlamaktadır. Akışkanlaştırıcı kullanmadan üretilen silis dumanı betonunun su ihtiyacı sabit işlenebilirlik için direkt olarak silis dumanı miktarına bağlıdır. Genel yapılarda kullanmak için silis dumanının dozajı genelde %7 ile %10 arasında değişir. Bazı özel durumlarda ise %15'e kadar silis dumanı başarılı bir şekilde kullanılmıştır [15].

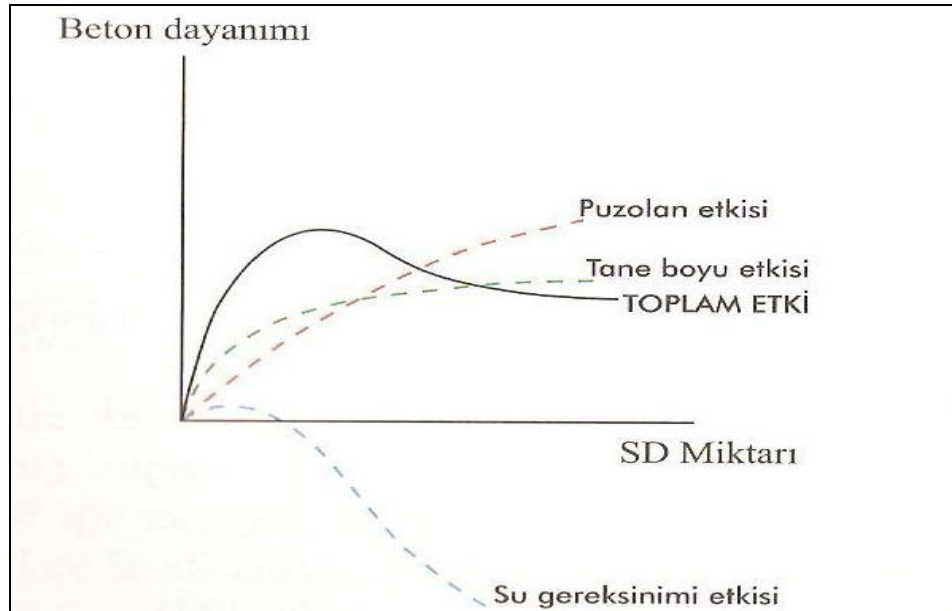
Sertleşmiş çimento hamuru ile agrega arasında yaklaşık 50 µm kalınlığındaki ara yüzey bölgesi, hidratasyon başlangıcından itibaren hamurun diğer bölgelerinden daha farklı bir yapı oluşturur. Silis dumanı katkısı bu bölgenin morfolojisini olumlu yönde etkileyerek beton dayanımının artmasına katkıda bulunur. Silis dumanı katkısı ile bölgenin kalınlığı

azalır. Bölgedeki CH kristalleri küçülür, eğimleri değişir, gözeneklilik azalır ve buradaki hamurun içyapısı zamanla diğer bölgelerinkine benzemeye başlar [10].

Silis dumanı katkılı betonların erken dayanımları oldukça yüksek olabilmektedir. Fakat bu durum su/ bağlayıcı oranına bağlı olmaktadır. Malhotra ve arkadaşları [25] tarafından yapılan çalışmalarda, çimento ağırlığının %5-%15'i kadar silis dumanının kullanılmasıyla su/ bağlayıcı oranı 0,60 olan betonlarda ilk üç gün içerisinde belirgin bir dayanım artışı olmadığını, fakat bu oranın 0,40 seviyesine çekilmesi ile ilk günlerde de dayanım artışı olduğu gözlenmiştir.

Taşdemir ve ark. [26], betonda silis dumanı kullanılması ile agrega- bağlayıcı ara yüzeyinin mikro yapısının değiştiğini, buna bağlı olarak ara yüzeyin daha homojen ve sağlam olduğu betonun gevrekliğinin arttığını belirtmişlerdir.

Şekil 2.5' te, beton içerisine katılan silis dumanı miktarının beton basınç dayanımı üzerindeki etkisi gösterilmiştir:

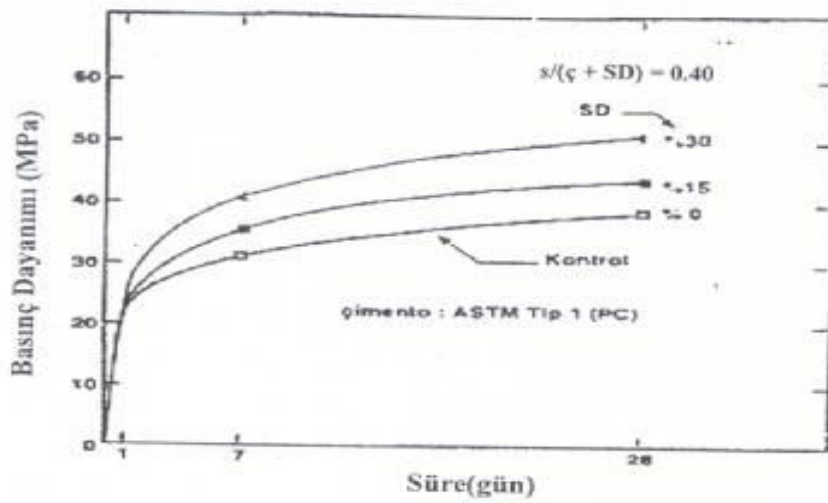


Şekil 2.5. Silis Dumanı Miktarının Beton Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkisi [10]

Betonun 28 günlük dayanımını artırmayı amaçlayan çalışmalarda silis dumanının genellikle çimentonun %5-%20'si oranında betona katıldığı ve gerekli işlenebilmeyi sağlamak için %10'dan yukarı miktarların süper akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanıldığı görülmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı çimentonun ağırlıkça %15'i yerine katılmaktadır. Bu betonlarda çimento dozajını 400–500 kg/m³ sınırının üstüne çıkarmak veya su/bağlayıcı oranının 0,30'un altına indirmek gibi zorlamaların fazla yarar sağlamadığı gözlenmiştir [10].

Silis dumanı taneleri, C-S-H (kalsiyum silikat hidrate) jelleri oluşturmasının dışında, çimento hamurunu agrega-hamur ara yüz geçiş bölgesini sıkılaştırıp kuvvetlendirerek beton dayanımını artırmaktadır. Buna karşın belirli bir işlenebilirlik için su gereksiniminin artması gibi olumsuz etkileri de olabilmektedir. [27].

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda belirgin olarak gözlenmektedir [28]. Normal bakım koşullarında bu etki 3-28 gün arasında kendisini gösterir. Ancak su-bağlayıcı oranının % 40 civarına indirerek 1 günlük dayanımı bile yükseltmek mümkündür [29]. Süper akışkanlaştırıcı kullanılarak ve su/ bağlayıcı oranını 0,40 seviyesinde sabit tutarak hazırlanan betonlarda çimentonun %30'una kadar varan miktarda katılan silis dumanı, ilk birkaç günden itibaren dayanımları artırmaktadır [30].



Şekil 2.6. Silis Dumanı Katkısının Beton Basınç Dayanımına Etkisi [31]

Carette ve arkadaşlarına göre, silis dumanın ileri yaşlarda beton üzerindeki olumlu etkileri azalmakta, 90. günden itibaren dayanım düşmektedir [32]. Diğer taraftan 4-6. yıldan itibaren beton dayanımının düştüğünü ifade eden araştırmacılar bulunmaktadır [33].

Betonun 28 günlük dayanımını artırmayı amaçlayan çalışmalarda silis dumanın genellikle çimentonun %10-20'si oranında betona katıldığı ve gerekli işlenebilmeyi sağlamak için %10'dan yukarı miktarların süper akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanıldığı görülmektedir [34]. Silis dumanının beton dayanımına olan olumlu etkisi, su/bağlayıcı oranını 0,40'ın altına çekerek çok kısa bir sürede gözlenebilmektedir [35].

Shannag [36], yaptığı çalışmada, çimento ağırlığının %15'i oranında silis dumanı ilavesiyle, 28 günlük basınç dayanımı 110 MPa olan yüksek dayanımlı beton elde etmiştir.

Silis dumanı katkısı yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde de yararlı olmaktadır. Genleşmiş kil agregası kullanarak ve %20 silis dumanı ile birim ağırlığı 135 kg/m³'ü geçmeyen, basınç dayanımı 100 MPa olan betonlar elde edilmiştir [37].

Çimento miktarının %15'ine kadar silis dumanı ile yer değiştirilerek yapılan karışım sonucu elde edilen betonların 28 günlük basınç dayanımı 50-70 MPa civarında tespit edilmiştir. Çimento miktarı arttıkça ve su/bağlayıcı oranı düştükçe, silis dumanının etkisi azalmaktadır [38].

Ekinci, silis dumanı ilavesiyle harçların basınç ve eğilme dayanımlarının arttığını ve optimum yer değiştirme oranının %10 olduğunu belirtmektedir [39].

Silis dumanı katkılı betonlarda çekme ve eğilme dayanımlarının basınç dayanımına oranı katkısız betonlarınkine benzer. Ancak artış hızı giderek yavaşlar. Silis dumanı miktarının artması veya süper akışkanlaştırıcı kullanılmaması eğilme-basınç dayanımları orantısının katkısız betonlarınkinden daha küçük olmasına yol açar [40].

Silis dumanlı betonlarda iç terleme azaldığından agrega alt yüzeylerinde olduğu için çelik donatı çubuklarının altında da su birikimi ve boşluk oluşumu azalır, aradaki aderans kuvvetlenir. Değişken tip agregalar ve %5 'den %30'a kadar silis dumanı katkısı içeren betonlarda hamur- agrega arasındaki aderansı kuvvetlendirir. Silis dumanı betonlarda çelik donatıya olan aderansı da artırmaktadır. Aderans artışı %20'nin üzerindeki katkı miktarları ile daha belirgin olmaktadır. Hafif agregalı betonlarda da silis dumanı katkı miktarına göre aderansı 3-5 kat artırmaktadır [10].

Betonda elastisite modülü dayanımla birlikte artarmakta, ancak artış katkısız betonlara göre daha yavaş olmaktadır. Helland ve arkadaşlarına [41] göre, silis dumanı katkılı betonlardaki elastisite modülü ile normal betonlardaki elastisite modülü arasında fazla fark olmadığını, Khayat ve arkadaşları [42] ise silis dumanlı betonların elastisite modülünün normal betonlara göre artış göstereceğini fakat dayanıma oranla fazla olmayacağını belirtmişlerdir.

Çimento yerine ağırlıkça %15- 25 miktarında katıldığında silis dumanı 50–100 MPa dayanım sınıfındaki betonların sünmesini fazla etkilememektedir. Silis dumanı ile elde edilen yüksek dayanımlı, düşük çimento/bağlayıcı orantılı betonların sünmesi, normal dayanımlı katkısız betonlarınkinden daha düşüktür. Her iki grup beton için 180 günlük sünme katsayısı olarak sırası ile 0,42 ve 2,60 gibi değerler elde edilmiştir [42].

Betonun zararlı etkilere karşı dayanıklılığı büyük ölçüde geçirgenliği ile ilgilidir. Normal betonlarda olduğu gibi silis dumanlı betonlarda da geçirgenlik bileşim, bileşenlerin özellikleri, yerleştirme koşulları ve bakım gibi faktörlere bağlıdır. Silis dumanı, hamurda gözenek yapısını daha geçirimsiz hale getirmektedir. Ara yüz bölgesinin de sıkılanması sonucu silis dumanı katkılı betonlarda benzer bakım koşullarındaki normal betonlara göre geçirgenlik azalmaktadır [43].

Kimyasal maddelerin betonu yıpratıcı etkileri çeşitli yollardan olabilir. Asitler kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girerek suda çözünen tuzlar meydana getirirler. Betondan ayrılan tuzlar geçirgenliği artırır ve zararlı etkilere karşı direnci azaltırlar. Sülfatlar betonda şişme ve çatlamalara yol açarlar.

Çimentoya %10- 30 oranında katılan silis dumanı ile harçların sodyum, magnezyum ve kalsiyum klorürlere karşı direncinin önemli ölçüde arttığı gözlenmiştir. Klorür çözeltileri içinde bekletilen harç numunelerinin çeşitli özellikleri incelendiğinde silis dumanının olumlu etkileri ortaya çıkmıştır [44]. Silis dumanı katkısının magnezyum sülfata karşı olan etkisi ise genellikle olumsuzdur. Silis dumanı katkısının, harçların amonyum sülfata karşı direncini olumlu etkilediği yönünde bulgular olduğu ifade edilmektedir [45].

Yapılan araştırmalar sonucunda, silis dumanı katkısı nedeniyle artan geçirimsizlik donatı çevresindeki betonda oksijen yayınmasını da azaltmakta, elektrik direncini yükselttiği ifade edilmektedir [44]. Silis dumanı katkısı iyi beton yapım kurallarına uyulduğu takdirde karbonatlaşmanın ilerleme hızını da fazla etkilememekte, hatta süper akışkanlaştırıcı katkı ile beraber kullanıldığında azaltmaktadır [40]

Beton yüzeyinin servis koşulları altında bozulup çatlayarak parçalanması trafik yükleri altında veya akarsuların etkisi ile erozyon ve oyulma şeklinde meydana gelmektedir. Silis dumanı katkısı gerek hamur gerekse hamur-agrega ara yüzey dayanımlarını artırması nedeni ile betonunun aşınmaya karşı direncini artırmaktadır. Böhme cihazı ile yapılan deneylerde çimentonun %10'u kadar katılan silis dumanı ile aşınma kaybının %40 mertebesinde azalabileceği bulunmuştur [46].

Betonun donma-çözölmeye karşı direnci geçirimsizliği ve boşluk yapısı ile yakından ilişkilidir. İyi beton yapım kurallarına uyulması ve kimyasal katkılar yolu ile hava sürüklenmesi alınacak başlıca önlemlerdir. Silis dumanı katkısının betonda donma-çözölme direnci üzerinde pek çok araştırmada çelişkili sonuçlar çıkmıştır. Bunda deney şartları ve metodu önemli rol oynamaktadır [10].

Betonun yüksek sıcaklıklara karşı direnci bileşen ve karışım özelliklerinden etkilendiği gibi yapılarda elemanın boyutları, nem durumu ile sıcaklığının derecesi, artış hızı ve etki süresi de rol oynar. Bilindiği gibi betonda sıcaklık 100 °C iken serbest, 200 °C civarında iken kristal suyu buharlaşmaya başlar. Hamurdaki kireç hidrat 500 °C da C-S-H jeli ise 700 °C da bozunmaya başlamakta ve bu arada agrega bileşimine bağlı değişimle ortaya çıkmaktadır [40].

Sisli dumanı içeren betonlarda yüksek sıcaklıklara karşı direnç katkı miktarına ve dayanım düzeyine bağlı olarak değişebilmektedir. Silis dumanı miktarı %20'nin üzerinde olan yüksek dayanımlı betonların direnci normal dayanımlı betonlara göre daha azdır. Beton elemanın boyutları büyüdükçe bu olumsuz etki daha belirgin olmaktadır. Diğer taraftan silis dumanı oranı %20'nin altında olan betonların, normal betonlara nazaran daha dirençli oldukları gözlenmiştir [40].

2.2. Vermikülit

2.2.1. Genel

Vermikülit genellikle mika mineralleri ve kloritin alterasyonu sonucu oluşan 2:1 tabakalı fillosilikal mineralidir [47]. Vermikülit, [mikanın](#) doğal aşınmasıyla oluşmuş magnezyum alümino silikat kil [mineralidir](#) [48]. Mineralojik olarak tek başına farklı bir grubu temsil eden vermikülit, endüstriyel olarak genleşme özelliğine sahip tüm mika grubu minarelerine de (flogopit, biotit ve hidrobiotit) kapsayan genel bir terim olarak kullanılmaktadır. Vermikülitli sulu magnezyum, alüminyum, demir silikat olarak ta tarif etmek mümkündür [49].

Uzun süre bir çeşit trioktahedral mika minerali olarak bilinen vermikülit, hızlı ısıtma ile yapraklara ayrılır ve küçük kurtçuklara benzeyen bir şekil alır vermikülit terimi, bu özelliği kullanılarak Latince “vermiculare” teriminden türetilmiş ve 2:1 genleşebilen,

tabaka yükü simetrikinden büyük olan ve mikaya benzeyen mineraller için kullanılmıştır [47].

Vermikülit, monoklinik sistemde kristallenir ve muntazam dilinime sahiptir. Yeşil, sarımsı kahve ve hatta siyah renkte olabilir. Şekil 2.7' de ham vermikülitin tipik resmi görülmektedir.



Şekil 2.7. Ham Vermikülit [48].

Sertliği Mohs ölçeğine göre 1,2 ile 2,0 arasında ve özgül ağırlığı ise 2,4-2,7'dir. Vermikülit yüksek sıcaklıklarda aniden ısı-şokuna tabi tutulduğunda akordiyon gibi uzamaktadır. Bu karakteristik genişlemenin yapıda bulunan kristal suyunun ani olarak buharlaşması sonucu oluşan buhar basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir. Isısal genişleme olayının henüz tam olarak açıklanmamasının nedeni, ağırlıkça toplam aynı miktarda su içeren numunelerin dahi farklı oranlarda genişlebilmeleridir. Kimyasal birleşim ve yapraklar arasında bulunan su moleküllerinin hangi bağlarla yapıya tutunduğu genişleme olayını etkileyen diğer önemli parametrelerdir. Genleşme sonucunda malzemenin yığın yoğunluğu, yaklaşık 10 kat azalarak $0,8 \text{ g/cm}^3$ 'den $0,08$

g/cm³'ye düşmektedir. Yığın yoğunluğundaki düşüş, vermikülin kalitesine ve genişlemenin yapıldığı fırın performansına bağlı olmakta ve ısıtma işlemi sonucunda yaklaşık 30 katlık bir genişleme sağlanabilmektedir [9]. Şekil 2.8' de genişletilmiş vermikülinin tipik bir resmi görülmektedir. [51]



Şekil 2.8. Genleştirilmiş Vermikülin [48]

İri taneli vermikülinler, genelde yeraltı ve yerüstü suları ile hidrotermal çözeltilerin birisinin veya hepsinin flogopit, biotit, klorit, piroksen gibi tabaka yapısına sahip silikatları ıslatarak alterasyona uğratması sonucu oluşmaktadır. Oluşum mekanizması henüz tam olarak açıklanamamıştır. Araştırmacıların üzerinde anlaşmaya varamadıkları konu, vermikülinin hidrotermal çözeltilerin kayalar üzerine etkisiyle veya superjen çözeltilerin biotit ve flogopit üzerinde meydana getirdiği değişiklikler sonucu oluştuğudur. Olayın hidrotermal şartlar altında olduğunun delilleri; yüksek sıcaklıklarda oluşan mineral ve kayalarda vermikülin oluşumlarına rastlanması ve 70 metreden daha fazla derinliklerde maden yataklarının varlığıdır. Superjen oluşumun kanıtları ise; biotit ve flogopitin oda sıcaklığında kolayca vermiküline dönüşmesi, potasyumun çok düşük konsantrasyonlarda bile vermikülinin oluşumunda önemli etkisinin olması, derinliğin

artması ile biotit ve flogopite daha çok rastlanması ve pegmatitler içinde vermikülit oluşumlarının varlığı sayılabilmektedir [50].

2.2.2. Başlıca Vermikülit Çeşitleri

Doğada; oluşumuna ve bulunduğu ortamlara göre, kil vermikülitleri, otojenik vermikülit, metamorfik ve makroskopik vermikülit olmak üzere dört tip vermikülit bulunmaktadır [47].

2.2.2.1. Kil Vermikülitler

Kil tipi vermikülitte çoğunlukla toprak içinde rastlandığından toprak vermikülit 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 vermikülit, asidik ve yükseltgen koşullarda alkali ve kalsiyumca zengin minerallerin (toprak fillosilikatların) tabaka arası K'nın Kristal yapısından çıkarak yerine Mg ve Ca'nın geçmesi, Fe^{2+} 'nin Fe^{3+} 'e yükseltgenmesi ile oluşmaktadır. Vermikülitin, çoğunlukla biyotitin bozunması ile oluşumu kristal yapılarının benzerliğine bağlanmaktadır. Şekil 2.9' da tipik bir kil vermikülit görülmektedir [52].



Şekil 2.9. Kil Vermikülit

2.2.2.2. Otijenik vermikülit

Denizel ortamda, deniz suyunun K⁺ içeriği ana mineralin yapısındaki K'nın uzaklaşmasını engelleyeceğinden mika ve klorit alterasyonu oluşan vermikülitte rastlamak pek mümkün değildir, ilk defa Singer ve Stoffer [53] denizel ortamda diğer sedimanter mineraller (illit, klorit, paligorskit, sepiolit) ile bulunan vermikülitleri tespit etmişlerdir. Bu oluşuma, yakın zamanlarda volkanik aktivenin ve metallojenik su akıntılarının yoğun olduğu bölgelerde rastlanmıştır.

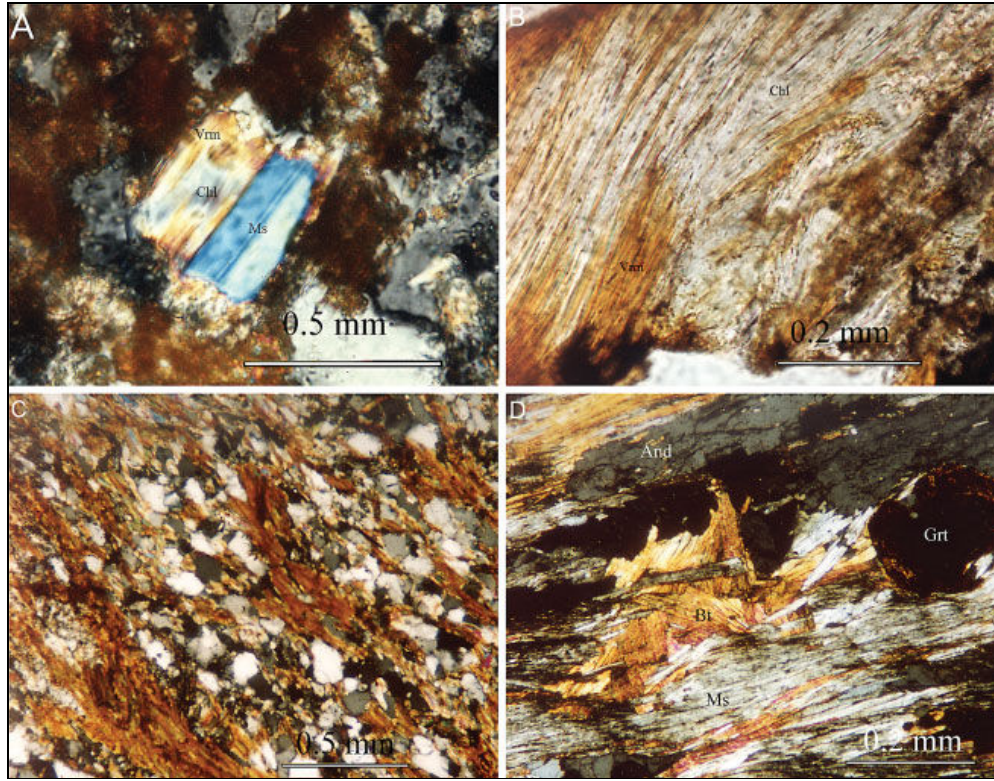
Vermikülitin yanı sıra, hidrotermal etkilerle oluşan talk ve serpentinin bulunması, mineralin idomorf kristal yapılaşma sahip olması hidrotermal orijinin göstergesi olmuştur. Tanımlanan bu vermikülitin Fe, Mg ve Si katyonları ile doymuş sıvılardaki katyonların çökmesi ile oluştuğu düşünülmektedir. Hidrotermal vermikülitin, diğer tipteki vermikülitlere oranla su içeriği daha az iken, Al' nin Si yerine geçişi daha fazladır ve tetrahedral tabakasında da Fe içerir [47].

2.2.2.3. 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 [54].

Yapısı, biyotit ve stiliplomelanınkine benzemesine rağmen kimyası kloritinkine benzemektedir. Metamorfik vermikülit az miktarda da olsa K₂O ve CaO içerirken kloritte bu oksitler yoktur ve silisçe kloritten daha zengindir. Al içeriği ise biyotitinkinden daha fazladır.

Şekil 2.10'da metamorfik vermikülitin mikro yapısı görülmektedir [52].



Şekil 2.10. Metamorfik Vermikülitin Mikro Yapısı [52].

2.2.2.4. Makroskopik Vermikülit

Makroskopik vermikülit, 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 [47].

2.2.3. Vermikülitin Dünyada ve Türkiye'deki Mevcut Durumu

Dünyada önemli vermikülit rezervleri Güney Afrika Cumhuriyeti, Amerika Birleşik Devletleri, Rusya ve Avustralya'da bulunmaktadır. Bunların dışında 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 vermikülit yatakları vardır. Vermikülit rezerv miktarı hakkında detaylı bilgi elde etmek mümkün olmamakla birlikte dünya vermikülit rezervinin 50 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir. ABD dünya rezervinin %50'sine yani 25 milyon tonuna sahiptir ve en büyük rezervi Libby, Montana'da bulunmaktadır. Dünyadaki en büyük vermikülit yatağı olan Palabora'ya sahip olan Güney Afrika, dünya rezervlerinin %40'mı yani 20 milyon tonunu elinde bulundurarak ikinci sırada yer almaktadır. Dünya vermikülit kaynaklarının 200 milyon ton olduğu tahmin edilmektedir [47].

Dünyada bazı vermikülit rezervleri toplamı yaklaşık 200 milyon ton civarındadır. Bunun yaklaşık %50'si ABD'de bulunmaktadır. Tablo 2.5'te, dünyadaki vermikülit rezervleri ve bazı rezervleri gösterilmiştir [56].

Tablo 2.5. Dünyadaki Vermikülit Rezervleri

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

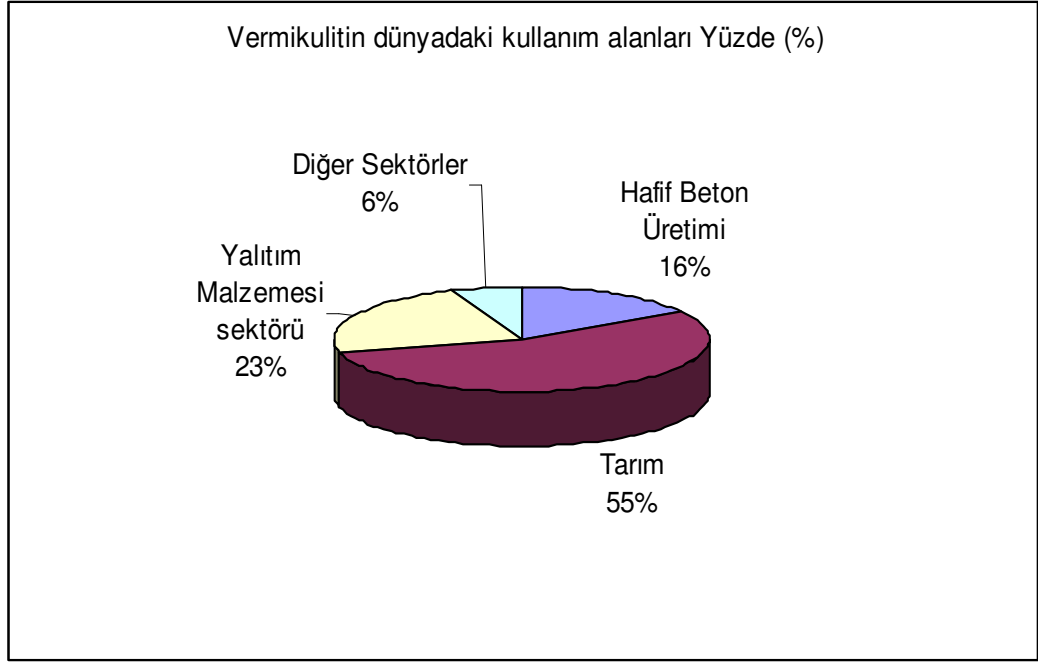
Son yıllarda dünyadaki vermikülit üretiminde önemli bir artış gözlenmektedir. 2008 yılı itibariyle Güney Afrika yıllık yaklaşık 200.000 tonluk üretimi ile ilk sırada yer almaktadır. Çin yıllık 110.000 ton üretim ile ikinci, ABD ise 100.000 tonluk yıllık üretimle 3 sırada bulunmaktadır. 2008 yılı itibariyle dünyada belli başlı vermikülit üreticisi ülkelerin toplam üretimi 509.983 ton/yıl seviyesine ulaşmıştır [57].

Dünyada, üretilen vermikülitin, %16'sı hafif beton üretiminde agrega olarak, % 23 'ü yalıtım malzemesi üretiminde, %55'i tarımda, % 16'sı da diğer sektörlerde kullanılmaktadır [58]. Dünyadaki vermikülit üretimi Tablo 2.6'da verilmiştir.

Tablo 2.6. Dünyada Vermikülit Üretimi

Ülke	<u>2004</u>	<u>2005</u>	<u>2006</u>	<u>2007</u>	<u>2008</u>
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

Vermikülit, başta yapı malzemesi sektöründe olmak üzere pek çok sektörde kullanılmaktadır. Vermikülit üretimin sektörlere göre dağılımı şekil 2.11’de verilmiştir.



Şekil 2.11. Vermikülitin Dünyadaki Kullanım Alanları

Türkiye'de vermikülit yataklarının varlığı fazla bilinmemekle birlikte jeolojik çalışmalar sırasında ofiyolit kuşaklarında vermikülit oluşumlarına rastlanmıştır [47].Türkiye’de bilinen belli başlı vermikülit yatakları, Malatya-Darende-Kuluncak, Sivas-Yıldızeli-Demircik-Karakoç, Eskişehir-Sarıcakaya ve Elazığ-Harpüt-Arduçluk civarında bulunmaktadır. [59].

Rezerv hesapları Türkiye’de 6-7 milyon ton muhtemel rezervin olduğunu göstermektedir. Sivas-Yıldızeli’ndeki vermikülit oluşumunun Türkiye’deki bilinen en büyük ve işletilen tek vermikülit yatağı olduğu ifade edilmektedir. Şimdiye kadar Türkiye’de rastlanan vermikülit oluşumlarının hepsi alkali damar kayalar veya intrüzifleri ile kesilen ultramafik ve mafik kütleler içersindedir. Tüm dünyada ki ekonomik vermikülit oluşumlarının hemen hepsi bu tür ana kayalar içersindedir [47].

Sivas-Yıldızeli-Karakoç ve Demircilik vermikülit bölgesinde son yıllarda yapılan incelemeler, bu cevherleşmenin de jenerik açıdan Kuluncak sahasıyla benzerlik gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu cevherleşmede piroksen ve anfibol içeriğinin yüksek

olduğu ultramafik kütlenin alkali damar kayalarıyla kesilmesi sonucu meydana gelmiştir. 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 [59].

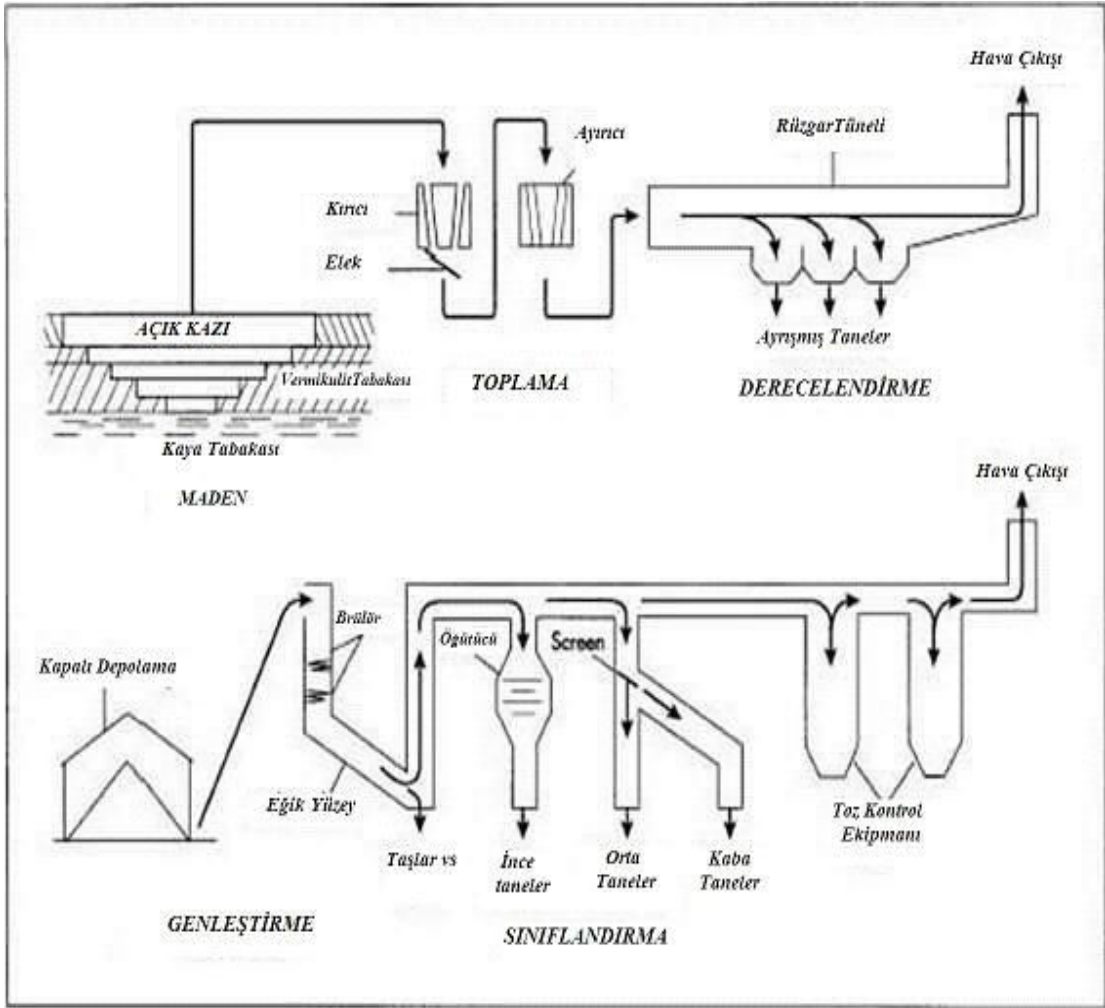
Yapılan teknolojik testlerde genleşme oranının ortam koşullarına göre 13 ile 18 kat arasında olduğu gözlenmiştir. Elde edilen malzemenin yığın yoğunluğuna göre yapılan sınıflamaya göre 2. sınıf malzeme kalitesinde olduğu belirlenmiştir [46].

2.2.4. Genleştirilmiş Vermikülitin Üretimi Yöntemi

Mevcut vermikülit ocaklarında açık ocak işletmeciliği ile üretim gerçekleştirilmektedir. Ocaklara en yakın bölgede kurulan cevher zenginleştirme ünitesinde zenginleştirme işlemi yapıldıktan sonra genleştirme işlemi uygulanır. Ocaktan çıkarılan cevher primer kırıcıdan geçirildikten sonra yaş elek yöntemi ile harmanlama yapılarak fraksiyonlarına ayrılır. [47].

Harmanlama işleminden sonra konsantreler toplanır, kurutulur ve boyutlarına ayrılarak genleştirme ünitesine gönderilir. Depolama işlemi kapalı mekanlarda yapılmalıdır. Bu durum rutubet alma özelliği olan vermikülit için son derece önemlidir. Aksi takdirde vermikülit genleştirmek için gerekli enerji miktarı ve maliyet artmaktadır. Genleştirme işlemine tutulacak ham vermikülit konveyör üzerine boşaltılır. Konveyör yardımıyla 6- 7 metre yüksekliğindeki içi seramik/tuğla kaplı yüksek fırın üzerine çıkarılır [54]. Besleme yukardan yapılmakta, 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 [47]. Şekil 2.12’de vermikülitin üretim aşamaları şematik olarak gösterilmiştir [55]



Şekil 2.12. Vermikülitin Üretim Aşamaları

Ham vermikülitin genleştirme işleminde düşey, eğimli, döner, toroidal tip fırınlar kullanılmaktadır. Düşey fırınlarda vermikülit yukarıdan aşağı düşerken sıcak bölgeden geçer, genleşir ve aşağı düşer. Şekil 2.13’te düşey tip fırından çıkan genleştirilmiş vermikülit görülmektedir.



Şekil 2.13. Düşey fırında vermikülitin genişletilmesi [62]

Eğimli fırın 1934 yılında ABD Ulusal Vermikülit Ürünleri A.Ş' de geliştirilmiştir. Eğimli fırın dikey fırındaki dökülme sırasında sınıflandırma ile ilgili olumsuzlukları ortadan kaldırmıştır. Şekil 2.14' te genişletilmiş vermikülit üretiminde kullanılan eğimli fırın görülmektedir.



Şekil 2.14. Genleştirilmiş Vermikülit Üretiminde Kullanılan Eğimli Fırın [62].

Döner tip fırınlarda genleştirme işlemi direkt veya dolaylı olarak ısıtma yönetimi ile yapılabilmektedir.



Şekil 2.15. Genleştirilmiş Vermikulit Üretiminde Kullanılan Döner Fırın [62].

Toroidal fırın ise akışkan yataklı bir hazneye sahiptir. Tip olarak depolama silolarına benzemektedir.



Şekil 2.16. Genleştirilmiş Vermikulit Üretiminde Kullanılan Toroidal Fırın [62].

2.2.5. Vermikülitin Özellikleri

2.2.5.1. Fiziksel Özellikleri

Vermikülit, monoklinik sistemde kristallenir ve muntazam dilinime sahiptir. Yeşil, sarımsı kahve ve hatta siyah renkte olabilir. Sertliği Mohs ölçeğine göre 1,2 ile 2,0 arasında ve özgül ağırlığı ise 2,4-2,7'dir. Vermikülit yüksek sıcaklıklarda aniden ısı-şokuna tabi tutulduğunda akordiyon gibi uzamaktadır. Bu karakteristik genişlemenin yapıda bulunan kristal suyunun ani olarak buharlaşması sonucu oluşan buhar basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir. Isısal genleşme olayının henüz tam olarak açıklanmamasının nedeni, ağırlıkça toplam aynı miktarda su içeren numunelerin dahi farklı oranlarda genleşebilmeleridir. Kimyasal birleşim ve yapraklar arasında bulunan su moleküllerinin hangi bağlarla yapıya tutunduğu genleşme olayını etkileyen diğer önemli parametrelerdir. Genleşme 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 genleşmenin yapıldığı fırın performansına bağlı olmakta ve ısı işleme sonucunda yaklaşık 30 katlık bir genleşme sağlanabilmektedir [60].

Vermikülit kalitesi belirlenirken çeşitli sınıflamalar yapılmaktadır. Bu sınıflamalar tüketici/üretici ülkelere göre değişmektedir. Türkiye'de kaliteyi belirleyen ve TSE tarafından da standardize edilen, tane boyuna göre yapılan sınıflama esas alınmaktadır.

Tablo 2.7. Vermikülitin Tane Boyu Dağılımına Göre Sınıflandırılması [47]

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			

Tablo 2.8’ de Amerika’da kullanılan saf vermikülitin tane boyu ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması verilmiştir. Tablo 2.9’da ise Amerika’da kullanılan, saf vermikülitin elekten geçen miktarı ve yoğunluğuna göre sınıflandırılması gösterilmiştir.

Tablo 2.8. Amerika’da Kullanılan Saf Vermikultin Tane Boyu ve Yoğunluğuna Göre Sınıflandırılması [61]

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 2.9. Amerika’da Kullanılan, Saf Vermikülitin Elekten Geçen Miktarı ve Yoğunluğuna Göre Sınıflandırılması [60].

Sınıf	1	2	3	4	5
Elek Gözü Açıklığı	Elek üstünde biriken miktar (%)				
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

2.2.5.2. Kimyasal Özellikleri

Vermikülit monoklinik sistemde kristalleşir. X-ray çalışmaları vermiculitin mika veya kloritten farklı olarak belirli bir tip teşkil ettiğini göstermektedir. Tipik bir vermiculitin kimyasal bileşenlerinin büyük bir kısmını SiO_2 , Al_2O_3 ve MgO oluşturmaktadır. Tablo 2.10'da tipik bir vermiculitin kimyasal analizi görülmektedir [62].

Tablo 2.10. Tipik Vermikülitin Kimyasal Analizi

Element	Ağırlıkça oran ı(%)
SiO_2	38 to 46
Al_2O_3	10 to 16
MgO	16 to 35
CaO	1 to 5
K_2O	1 to 6
Fe_2O_3	6 to 13
TiO_2	1 to 3
H_2O	8 to 16
Diğer	0.2 to 1.2

2.2.6. Genleştirilmiş Vermikülitin Kullanım Alanları

Vermikülitin ham iken kullanımı oldukça az olması nedeniyle endüstride daha çok genleştirilmiş hali tercih edilmektedir. 1950'li yıllara kadar vermiculit 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 [47].

Genleştirilmiş vermikülit başlıca şu alanlarda kullanılmaktadır [63].

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

Bunun yanı sıra genleştirilmiş vermikülit, çatı vb. mekanlarda yalıtım amacıyla yapılan hafif betonlarda kullanılabilir. Hafif betondaki fonksiyonu nedeniyle taşıyıcı sistemde demir miktarının azaltılmasında avantaj sağlar.



Şekil 2.17. Genleştirilmiş Vermikülit ile Yapılmış Hafif Betonun Teras Uygulaması [62].

Alçı ve çimento esaslı olarak hazırlanmış vermikülit içeren hafif sıvalar, iyi işlenebilirlik, mükemmel yalıtım, yangına karşı dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir. Elle veya püskürme yöntemi ile uygulanabilir.



Şekil 2.18. Vermikülit Esaslı Tavan Sıvası Uygulaması [62].

Genleştirilmiş vermikülit, çatı ve tavan arasına serilmek suretiyle sıcak ve soğuğa karşı ısı yalıtımı sağlar.



Şekil 2.19. Genleştirilmiş Vermikülitin Isı Yalıtımı İçin Tavan Arasına Serilmesi [62].

Genleştirilmiş vermikülit, yangına dayanıklı panel üretiminde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Genleştirilmiş vermikülit, dolgu malzemesi olarak ve başka bağlayıcılar ile birlikte akkor halindeki sıcak dökümlerin taşınmasında, erimiş metalin üzerinin örtülmesinde kullanılır. Erimiş malzemeyi paketlemek ve taşımakta kullanıldığı gibi kimyasalların taşınmasında kullanılan sıcak borular ve buhar borularının yalıtımında da vermikülit kullanılmaktadır [47].

Tarımda da önemli yeri olan vermikülit, bahçelerde, spor sahalarında, golf sahalarında, parklarda ve daha birçok alanda toprağı düzenleyici olarak kullanılır ve gübre işlevini görür [62].



şekil 2.20. Genleştirilmiş Vermikülitin Seracılıkta Kullanımı [62].

Vermikülit, motor ve debriyaj balatalarında sürtünme astar sektöründe, asbestin yerine daha güvenli malzeme olarak kullanılmaktadır.

Havuz tabanlarında iyi bir izolasyon malzemesi olmakla birlikte yastık görevi de yapar. Çimento esaslı bağlayıcılar ile püskürtme metodu ile uygulanır.



Şekil 2.21. Havuz Tabanında Püskürtme Genleştirilmiş Vermikülit Uygulaması [62].

Vermikülit aynı zamanda yüksek performanslı conta, keçe ve köpük üretiminde kullanılır.



Şekil 2.22. Vermikülitin Conta ve Keçe Üretiminde Kullanımı [62].

Vermikülit, düzensiz şekilli nesnelerin etrafına dökülerek taşıma sırasında nesneleri koruyup tampon görevi yapar. Paketleme sektöründe kullanılmaktadır.



Şekil 2.23. Genleştirilmiş Vermikülitin Paketlemede Kullanımı [62].

Vermikülit, büyükbaş hayvan yetiştiriciliğinde, pekmez ve vitaminlerle karıştırılarak yem olarak verilir. Fazla su tutma özelliği nedeniyle, iyi bir dengeleyici olarak kabul edilmektedir [62].

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde, deney çalışmasında kullanılan malzemelerin özellikleri, çalışmada kullanılan harçların oranları, taze ve kuru haldeki birim hacim ağırlıkları, deneylerin yapım metotları ve çalışmalardan elde edilen sonuçlar anlatılmaktadır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Deney çalışmasında, Cimpor Yibitaş Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş'nin Yozgat Çimento fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.1' de verilmiştir.

Tablo 3.1. CEM I 42,5 R Portland çimentosunun özellikleri

Kimyasal Bileşim	
Bileşen, (%)	
MgO	2.75
SiO ₂	19.12
Al ₂ O ₃	5.63
Fe ₂ O ₃	2.39
Na ₂ O	-
CaO	63.17
SO ₃	2.74
K ₂ O	1.00
Kızdırma Kaybı	2.33
Çözünmeyen Kalıntı	0.49
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık g/cm ³	3.09
Özgül Yüzey cm ² /g.	3114

3.1.2. Genleştirilmiş Vermikülit

Çalışmada kullanılan vermikülit, Sivas İli, Yıldızeli İlçesi, Demircik Köyü'ndeki vermikülit ocağından elde edilen vermikülitin 600 °C sıcaklıkta 10 saniye bekletilmesi sonucu elde edilmiştir. Çalışmada kullanılan vermikülitte ait fiziksel özellikler Tablo 3.2 de verilmiştir.

Tablo 3.2. Genleştirilmiş vermikülitin fiziksel özellikleri

Renk	Altın
Şekil	Akordeon
Su Tutma Kapasitesi	% 240 (ağırlıkca)
	% 28 (hacimsel)
Kasyon Değişim Oranı	50 - 150 meg / 100 gr.
Isı İletkenliği	0,065 - 0,062 W/mK
Geçirgenlik	95%
Sinterlenme Noktası	1150 °C - 1250 °C
Ateşe Dayanıklılık	Yanmaz
Spesifik Isı	0,20 - 0,26 Kcal / Kg°C
Sıkışık Birim Hacim	0,22 gr/cm ³
Ağırlık	

Genleştirilmiş vermikülitin kimyasal özellikleri Tablo 3.3' te verilmiştir.

Tablo 3.3. Genleştirilmiş vermikülitin kimyasal özellikleri

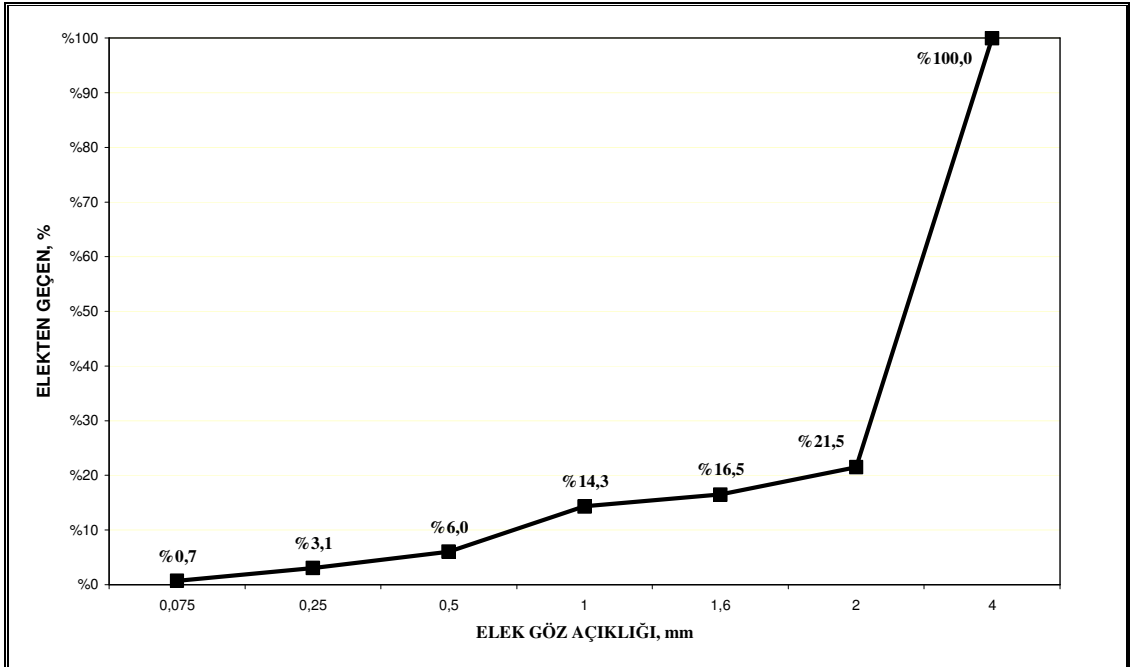
Bileşik	Yüzde (%)
Silisyum (SiO ₂)	35,4
Alüminyum (Al ₂ O ₃)	17,8
Potasyumoksit (K ₂ O)	4,68
Kalsiyumoksit (CaO)	6,9
Magnezyum (MgO)	17,3
Demiroksit (Fe ₂ O ₃)	16,7
Ph	8,1
Diğer	0,2-1,2

Genleştirilmiş vermikülitte ait elek analizi değerleri Tablo 3.4’ te verilmiştir.

Tablo 3.4. Genleştirilmiş Vermikülitin Elek Analizi değerleri

Elek no	Elekten Geçen %
4	100
2	21,5
1,6	16,5
1	14,3
0,5	6
0,25	3,1
0,075	0,7
Tava	0,000

Çalışmada kullanılan genleştirilmiş vermikülitte ait elek analizi grafiği Şekil 3.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada Kullanılan Vermikülitin Elek Analizi

Şekil 3.2' de çalışmada kullanılan genleştirilmiş vermikülite gösterilmiştir. Şekil 3.'2 de ise genleştirilmiş vermikülite su ilave edilmesi verilmiştir.



Şekil 3.2. Çalışmada Kullanılan Genleştirilmiş Vermikülit



Şekil 3.3. Genleştirilmiş Vermikülite Su ilave Edilmesi

3.1.3. Silis Dumanı

Çalışmada kullanılan silis dumanı ASTM C-1240' a uygun olarak elde imal edilmiştir. Kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.5' te, resmi ise Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

Tablo 3.5. Çalışmada Kullanılan Silis Dumanını Özellikleri

Kimyasal Bileşim	
Bileşen,	Yüzdesi (%)
MgO	1,47
SiO ₂	85,35
Al ₂ O ₃	1,42
Fe ₂ O ₃	2.39
Na ₂ O	-
CaO	0,80
SO ₃	1,34
K ₂ O	-
Kızdırma Kaybı	3,4
Çözünmeyen Kalıntı	-
Fiziksel Özellikler	Miktarı
Özgül Ağırlık g/cm ³	2,23
BET	23,36 cm ² /gr
+45 mikron üzeri	%0,58
Hacim yoğunluğu	0,55-0,65 kg/dm ³
Nem (H ₂ O)	% 0,19



Şekil 3.4. Çalışmada Kullanılan Silis Dumanı

3.1.4. Karışım Suyu

Çalışmada karışım suyu şehir şebeke suyu kullanılmış olup sıcaklığı ortalama +18 °C'dir.

3.2. Karışım Oranları ve Üretim

Deneysel çalışmada, daha önceden vermikülit/çimento hacimsel oranları 4,6 ve 8 olarak belirlenmiş olan karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan bütün karışımlarda vermikülitin karışım suyunu aniden emip işlenebilirliği azaltmasını önlemek amacıyla, karışım suyunun 300 gr'ı, 1 saat öncesinden vermikülit ile karıştırılmıştır.

Karışım hazırlanırken, çimento, 1 saat önce karışım suyunun 300 gr'ı ile sulandırılmış vermikülit karıştırılarak ön karışım oluşturulmuştur. Silis dumanlı karışımlarda ise, ilk önce çimento ve silis dumanı karıştırılmış, ardından 1 saat önce karışım suyunun 300 gr'ı ile sulandırılmış vermikülit ile karıştırma işlemi yapılmıştır.

Karışımların tamamı çimento mikserinde yapılmış olup, ön kuru karışımlar 1 dakika, su ilave edilmesiyle toplamda 3 dakika karıştırma işlemi sonlandırılmıştır.

Şekil 3.5' te, çimento mikseri, Tablo 3.6' da ise üretilen 12 farklı karışım için belirlenmiş karışım oranları gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Çalışmada Kullanılan Çimento Mikseri

Tablo 3.6. Karışım Oranları

Seri Kodu	Vermikülit/Çimento Oranı (Hacimsel)	Çimento (kg/m ³)	Vermikülit (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Silis Dumanı (kg/m ³)
VÇ4-SD0	4	790	153	540	0
VÇ4-SD5	4	790	153	540	39,5
VÇ4-SD10	4	790	153	540	79
VÇ4-SD15	4	790	153	540	118,5
VÇ6-SD0	6	659	186	557	0
VÇ6-SD5	6	659	186	557	39,5
VÇ6-SD10	6	659	186	557	79
VÇ6-SD15	6	659	186	557	118,5
VÇ8-SD0	8	473	198	567	0
VÇ8-SD5	8	473	198	567	39,5
VÇ8-SD10	8	473	198	567	79
VÇ8-SD15	8	473	198	567	118,5

Şekil 3.6 'da ise genleştirilmiş vermikülit kullanılarak hazırlanmış harç gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Genleştirilmiş Vermikülit İle Üretilmiş Harç

3.2.1. Numune Üretimi

Standart çimento kalıbı kullanılmak suretiyle, her bir vermikülit/çimento oranı ve silis dumanı oranı için, 20 °C, 300 °C, 600 °C ve 900 °C sıcaklık değerleri için kullanılmak üzere 40x40x160 mm boyutlarında numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler, bir gün sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca 20 ± 3 sıcaklıkta su içerisinde kür edilmiştir. Toplam olarak 40x40x160 mm boyutlarında 12 farklı karışım için 180 adet numune üretilmiştir.

Üretilen numunelerdeki kodlama sistemi, vermikülit/çimento oranı, silis dumanı oranı ve deneysel sıcaklık değerlerine yapılmıştır. Örneğin, 4-SD10-T300 numunesi; vermikülit/çimento oranı 4, silis dumanı oranı % 10 olan 300 °C’ de test edilecek olan numuneyi tanımlamaktadır. Çalışmada silis dumanı içermeyen numuneler (SD0 serisi), kontrol numunesi olarak üretilmiştir. Şekil 3.7’de harcın kalıba yerleştirilmesi, Şekil 3.8’de ise numunenin kalıpta prize bekletilmesi gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Harcın Kalıba Yerleştirilmesi



Şekil 3.8. Harcın Kalıba Yerleştirilmiş Hali



Şekil 3.9. Numunelerin 28 Günlük Kür Sürecindeki Durumu



Şekil 3.10. Numunelerin 28 Günlük Durumu

3.2.2. Numunelerin Sıcaklık Etkisine Konulması

Kür süresinin ardından, numuneler 300 °C, 600 °C ve 900 °C' ye kadar değişik sıcaklıklara ulaşabilen ısınma hızı 8 ± 4 °C/dk olan yüksek sıcaklık fırınına yüksüz olarak yerleştirilmiştir. Yüksek sıcaklık fırınında, her bir sıcaklık gurubunda bulunan numuneler 6 saat süre ile ısı etkisinde bırakılmıştır. Süre sonunda fırın enerjisi kapatılarak fırının sıcaklığı normal oda sıcaklığına düşünceye kadar fırın açılmamıştır. Daha sonra soğumuş numuneler üzerinde ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç deneyleri uygulanmıştır.

Numunelerin sıcaklık uygulanmadan önceki durumu Şekil 3.11'de, sıcaklık uygulandıktan sonraki durumu ise Şekil 3.12' de gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Numunelerin Sıcaklık Uygulanmadan Önceki Durumu



Şekil 3.12. Numunelerin Sıcaklık Uygulandıktan Sonraki Durumu

3.3. Deneyler

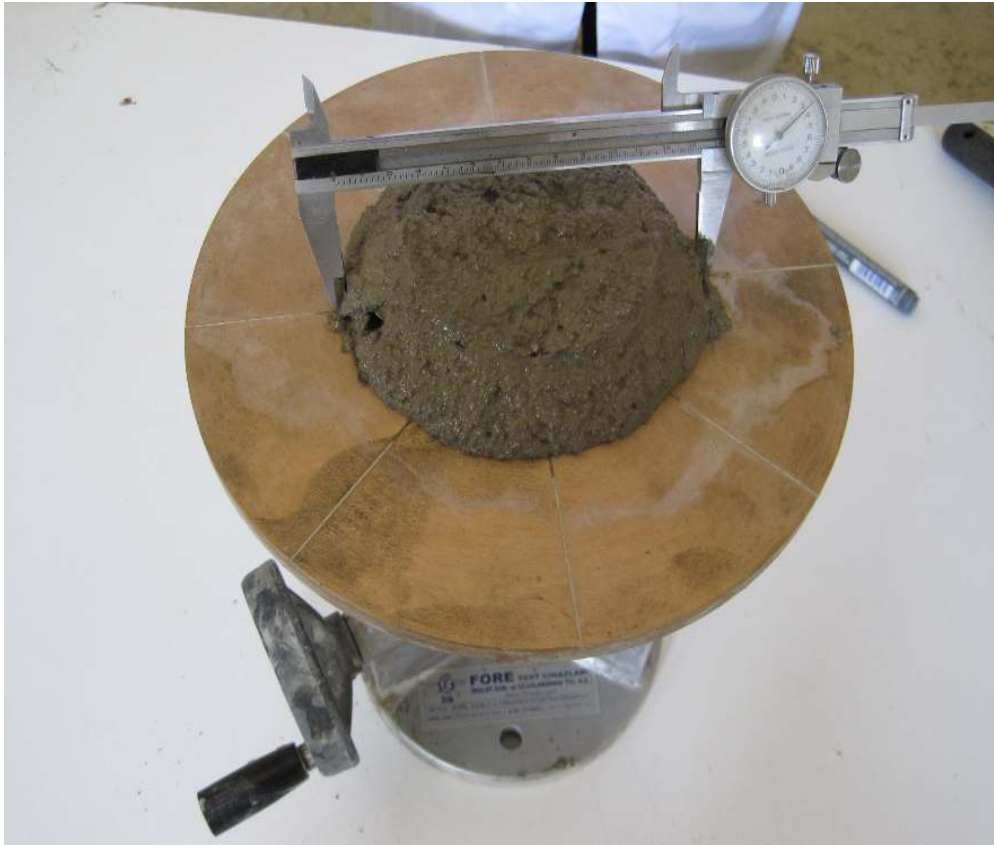
3.3.1. Taze Harç Deneyleri

Birim Ağırlık Deneyi

Hazırlanan harç numuneleri üzerinde TS EN 12350-6' da belirtilen şartlara uygun olarak birim ağırlık deneyi yapılmıştır. Deney sonuçları vermikülit/çimento oranlarına göre hazırlanan Tablo 3.7, Tablo 3.8, Tablo.3.9'da gösterilmiştir.

Yayılma Tablası Deneyi

Çalışmada hazırlanan harçlar, taze halde TS EN 1015-3'te belirtilen şartlara uygun olarak yayılma tablası ölçümleri yapılmıştır. Deney sonuçları vermikülit/çimento oranlarına göre hazırlanan Tablo 3.7, Tablo 3.8, Tablo.3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.13. Yayılma Deneyi Aleti

Tablo 3.7. Taze harçlara ait birim hacim ağırlık ve yayılma deney sonuçları.

V/Ç Oranı*	Seri Kodu	Silis Dumanı Oranı*	Çimento (kg/m ³)	Vermikülit (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Silis Dumanı (kg/m ³)	Taze Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Yayılma (mm)
4	VÇ4-SD0	%0	790	153	540	0	1534	105
	VÇ4-SD5	%5	790	153	540	39,5	1572	115
	VÇ4-SD10	%10	790	153	540	79	1567	110
	VÇ4-SD15	%15	790	153	540	118,5	1552	110
6	VÇ6-SD0	%0	659	187	557	0	1367	112
	VÇ6-SD5	%5	659	187	557	32,95	1360	115
	VÇ6-SD10	%10	659	187	557	65,90	1417	110
	VÇ6-SD15	%15	659	187	557	98,85	1409	105
8	VÇ8-SD0	%0	526	199	569	0	1280	130
	VÇ8-SD5	%5	526	199	569	23,7	1260	120
	VÇ8-SD10	%10	526	199	569	47,3	1273	110
	VÇ8-SD15	%15	526	199	569	72	1288	110

3.3.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri

3.3.2.1. Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Deneyleri

Deneyde üretilen 40x40x160 mm boyutlarındaki numuneler 24 standart bakım havuzundan çıkarıldıktan sonra suya doygun ağırlığı, 24 saat süreyle 105 °C’ de etüv içerisinde bırakıldıktan sonra ise, etüv kurusu ağırlığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Arşimet deneyi ile su içinde tartılarak gerçek hacimleri hesaplanan numunelerin birim hacim ağırlıkları ve gözeneklilik değerleri (3.1), (3.2) eşitlikleri yardımı ile hesaplanmıştır.

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

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

W_0 : Etüv kurusu ağırlık

W_1 : Suya doygun havadaki ağırlık

W_2 : Su içerisindeki ağırlık.

olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3.14. Numunelere Arşimet Deneyi Yapılması

Farklı vermikülit/çimento oranları ve silis dumanı içerikleri için kuru birim ağırlık ve porozite deney sonuçları Tablo 3.8’de verilmektedir.

Tablo 3.8. Sertleşmiş Harçlara Ait Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Deney Sonuçları

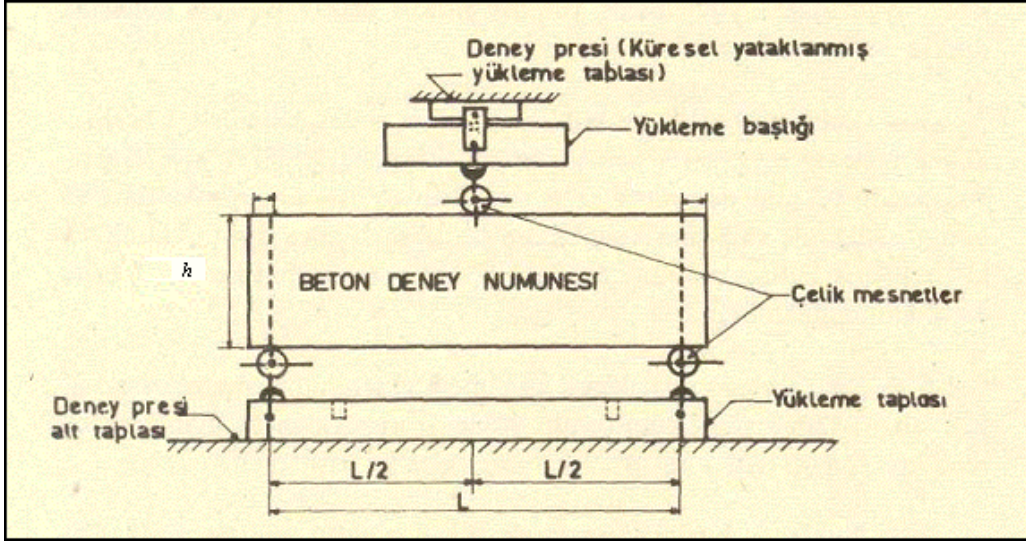
V/Ç Oranı*	Seri Kodu	Silis Dumanı Oranı*	Çimento (kg/m ³)	Vermikülit (kg/m ³)	Su (kg/m ³)	Silis Dumanı (kg/m ³)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Porozite %	Su Emme %
4	VÇ4-SD0	%0	790	153	540	0	1103	37,5	34
	VÇ4-SD5	%5	790	153	540	39,5	1193	28,9	24,2
	VÇ4-SD10	%10	790	153	540	79	1150	30,5	26,5
	VÇ4-SD15	%15	790	153	540	118,5	1200	29,4	24,5
6	VÇ6-SD0	%0	659	187	557	0	931	39,5	38,4
	VÇ6-SD5	%5	659	187	557	32,95	991	33,6	30,9
	VÇ6-SD10	%10	659	187	557	65,90	987	36,5	33,7
	VÇ6-SD15	%15	659	187	557	98,85	1027	30,2	25,1
8	VÇ8-SD0	%0	526	199	569	0	780	43,2	40,6
	VÇ8-SD5	%5	526	199	569	23,7	806	37,5	31,2
	VÇ8-SD10	%10	526	199	569	47,3	812	40,8	36,8
	VÇ8-SD15	%15	526	199	569	72	893	35,9	31,1

3.3.2.2. Eğilme Dayanımı

Çalışmada üretilen 40 x 40x160 mm boyutundaki 180 adet numune, 28 gün boyunca 20 ± 3 sıcaklıktaki bakım havuzunda bekletilmiştir. Daha sonra oda sıcaklığında ve 6' şar saat süreyle 300 °C, 600 °C, 900 °C sıcaklıkta yüksek sıcaklık fırını içerisinde bırakılmıştır. Oda sıcaklığına kadar soğutulan numuneler üzerinde TS EN 1015-11 sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımı tayini deneyinde belirtilen şartlara uygun olarak eğilme dayanımı deneyi yapılmıştır.

Numunelerin sıcaklık sonucu eğilme dayanımının bulunması için üç adet prizmatik numune üzerinde TS EN 1015-11'de belirtildiği gibi üç noktadan yükleme deneyine

yapılmıştır. Her numune, ara mesafesi 100 mm olan silindir mesnet üzerine oturtulmakta ve numunenin üst yüzeyinin orta noktasına maksimum 50 N/s hızla aynı büyüklükteki bir silindir numune kırılıncaya kadar yükleme yapmaktadır. Şekil 3.15'te gösterilen duruma göre elde edilen kırılma yükü değeri ile eğilme gerilmesi hesaplanmaktadır.



Şekil 3.15. Eğilme Deneyinde Yükleme Başlığı ve Yükleme Tablası



Şekil 3.16. Eğilme Dayanımı Tayini Deney Cihazı

Vermikülit/çimento oranı 4, 6 ve 8 olan, farklı çelik silis dumanı içeriklerinde ve farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış numunelerin eğilme dayanımı deney sonuçları sırasıyla Tablo 3.9, Tablo 3.10 ve Tablo 3.11’de verilmektedir.

3.3.2.3 Basınç Dayanımı

Eğilme dayanımı deneyinde, yaklaşık olarak ortasından kırılan numuneler 2 parçaya ayrılmıştır. Böylece 3 adet benzer numuneden 6 adet parça elde edilmiştir..Elde edilen bu parçalar TS EN 1015-11’de belirtilen duruma uygun olarak yüklenmiştir. Kırma başlıkları arasındaki prizma 40x40x40 mm boyutlarında bir küp işlevi yapmaktadır. 6 adet numune için cihazdan elde edilen basınç değerlerinin ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.17. Basınç Dayanımı Deney Düzeneği

Vermikülit/çimento oranı 4, 6 ve 8 olan, farklı silis dumanı içeriklerinde ve farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları sırasıyla Tablo 3.9, Tablo 3.10 ve Tablo 3.11’de verilmektedir.

3.3.2.4 Ultrases Geçiş Hızlarının Belirlenmesi

Bütün numunelere, sıcaklık uygulanmadan önce ve sıcaklık uygulandıktan sonra TS EN 12504-4’te belirtilen ultrases geçiş hızının tayini deneyi uygulanmıştır. Deneyde, 0,1 µs duyarlıklı ultrases aleti ile t, µs ses geçiş süreleri ölçülmüştür. Deneyde numunelerin pürüzlü yüzeylerine vazelin sürülerek transduserler numunenin boyu doğrultusunda yerleştirilmiştir. Direkt iletim yöntemi ile geçiş süresi olan t, µs değerleri kaydedilmiştir. Daha sonra transduserler yer değiştirilerek ikinci bir okuma kaydedilmiş, her numune için bu iki okumanın ortalaması alınmıştır. Kaydedilen bu değer (3.3) bağıntısı ile ses geçiş hızı V_{ses} km/sn cinsinden hesaplanmıştır.

$$V_{ses} = L / t \quad [3.3]$$

V_{ses} : Ultrases geçiş hızı (km/sn)

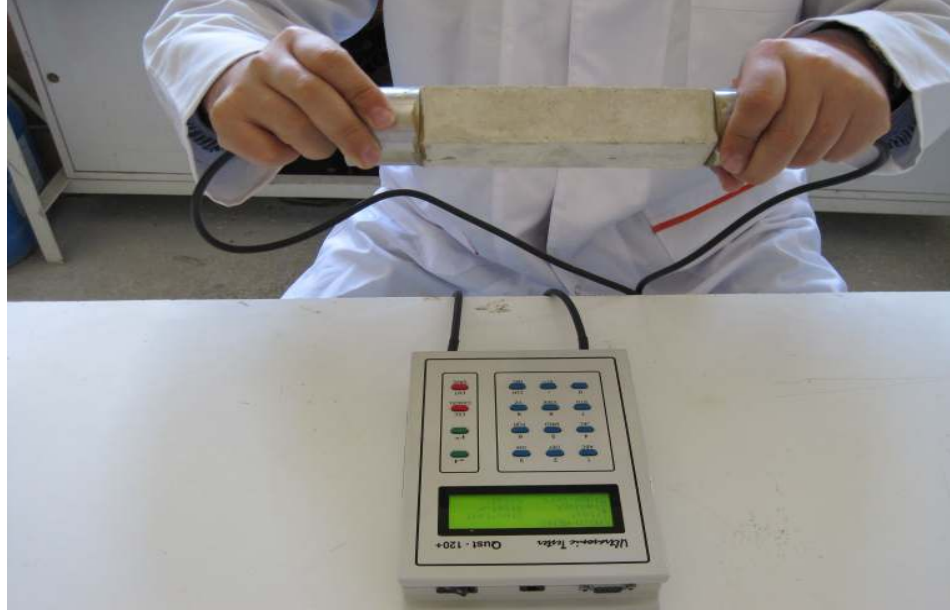
L : İki transduser arası mesafe (160 mm)

t : Ultrases geçiş hızı (µs)

olarak ifade edilmektedir.

Vermikülit/çimento oranı 4, 6 ve 8 olan, farklı silis dumanı içeriklerinde ve farklı sıcaklıklara maruz bırakılmış numunelerin ultrases geçiş hızı deney sonuçları sırasıyla Tablo 3.9, Tablo 3.10 ve Tablo 3.11’de verilmektedir.

Şekil 3.18’de ultrases geçiş hızının belirlenmesinde kullanılan cihaz gösterilmektedir.



Şekil 3.18. Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi

Tablo 3.9. Vermikülit/Çimento hacimsel oranı 4 olan numunelerin deney sonuçları

V/Ç Oranı	Silis Dumanı Oranı %	Sıcaklık °C	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Eğilme Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa
4	0	20	2,51	4,05	13,46
		300	2,75	3,22	10,96
		600	2,63	3,34	10,88
		900	2,52	1,38	6,67
	0,5	20	2,35	2,25	11,46
		300	2,75	3,10	10,13
		600	2,56	2,41	11,52
		900	2,51	1,32	8,13
	1,0	20	2,10	1,59	14,63
		300	2,59	2,55	11,75
		600	2,40	2,50	8,00
		900	2,59	1,13	7,46
	1,5	20	2,41	1,61	13,02
		300	2,69	2,10	14,27
		600	2,73	1,80	9,27
		900	2,77	1,17	8,54

Tablo 3.10. Vermikülit/Çimento hacimsel oranı 6 olan numunelerin deney sonuçları

V/Ç Oranı	Silis Dumanı Oranı %	Sıcaklık °C	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Eğilme Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa
6	0	20	2,24	3,45	9,10
		300	2,18	2,56	6,83
		600	2,26	2,76	6,88
		900	2,24	1,30	4,42
	0,5	20	2,30	2,52	8,75
		300	2,30	2,40	7,10
		600	2,29	2,13	7,40
		900	2,53	1,23	4,98
	1,0	20	2,18	1,52	9,94
		300	2,57	2,69	9,88
		600	2,39	2,28	7,94
		900	2,39	1,10	5,69
	1,5	20	2,34	1,30	16,44
		300	2,54	1,71	8,98
		600	2,68	1,43	10,13
		900	2,32	1,02	4,10

Tablo 3.11. Vermikülit/Çimento hacimsel oranı 8 olan numunelerin deney sonuçları

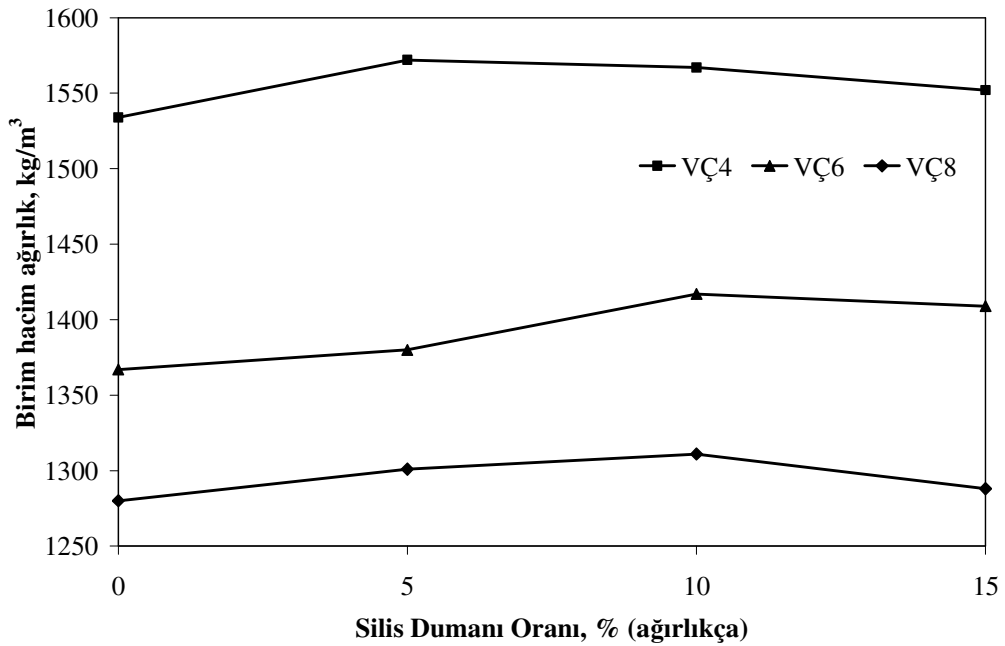
V/Ç Oranı	Silis Dumanı Oranı %	Sıcaklık °C	Ultrases Geçiş Hızı (km/s)	Eğilme Dayanımı MPa	Basınç Dayanımı MPa
8	0	20	2,12	2,44	5,79
		300	1,97	1,87	3,94
		600	1,94	1,83	4,23
		900	2,02	1,38	2,88
	0,5	20	2,14	2,88	7,33
		300	2,11	1,88	5,10
		600	2,18	2,57	5,31
		900	2,06	1,10	3,52
	1,0	20	1,91	1,90	7,27
		300	2,26	2,06	6,17
		600	2,19	2,28	6,00
		900	2,22	0,91	3,77
	1,5	20	2,06	1,99	8,48
		300	2,21	1,89	7,65
		600	2,17	1,90	4,96
		900	2,21	0,95	3,25

4. DENEY SONUÇLARI ve DEĞERLENDİRİLMESİ

4.1. Birim ağırlık

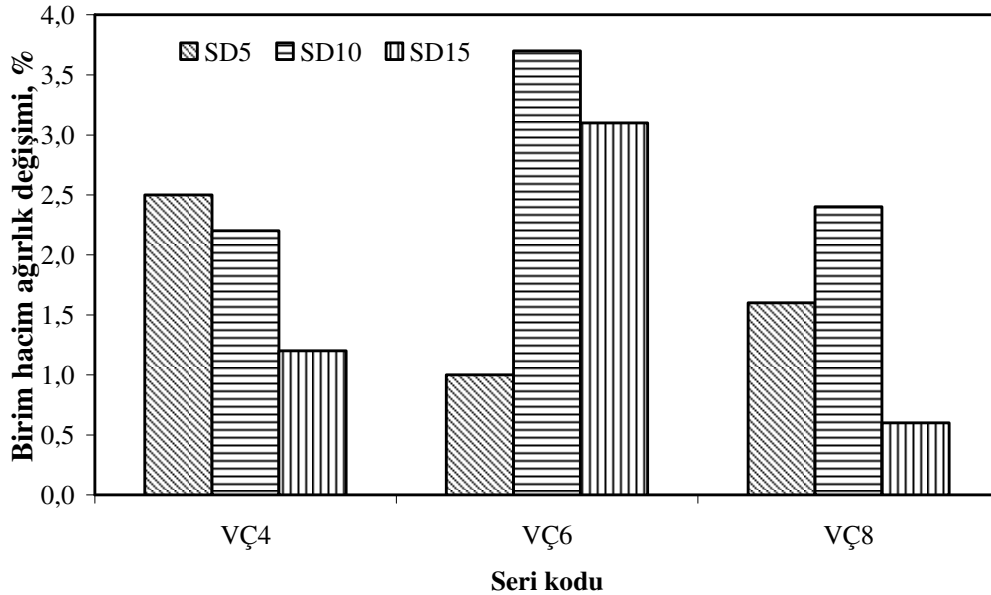
Deneysel çalışmanın bu aşamasında, VÇ4 VÇ6 ve VÇ8 karışımlarının taze ve sertleşmiş haldeki birim hacim ağırlıkları ve karışımlara silis dumanı ilave edilmesine bağlı değişiklikler incelenmiştir.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan VÇ4 karışımı incelendiğinde diğer VÇ6 ve VÇ8 karışımlarından daha yüksek bir çimento oranına sahip olduğu gözlenmektedir. Karışımlarda silis dumanı miktarı arttıkça işlenebilirliğin belirgin şekilde azaldığı tespit edilmiştir. Silis dumanı içeriğine bağlı taze birim hacim ağırlık değişimi grafiksel olarak Şekil 4.1’ de verilmiştir. Şekil 4.2’ de silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla taze birim hacim ağırlıktaki değişimler verilmektedir.



Şekil 4.1. Taze Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Silis dumanı içermeyen VÇ4 karışımının taze birim ağırlığı 1534 kg/m^3 iken, karışımdaki silis dumanı oranı %5 olduğunda taze birim ağırlığın 1572 kg/m^3 'e çıkmıştır. Silis dumanı oranı %10'a çıkarıldığında taze birim ağırlığın 1567 kg/m^3 , Silis dumanı oranı %15'e çıkarıldığında ise taze birim ağırlığın 1552 kg/m^3 olduğu gözlenmiştir. VÇ4 karışımında, silis dumanlı karışımların, silis dumansız karışıma oranla ortalama %1,9 taze birim hacim ağırlıklarının arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak vermikülit/çimento oranı 4 için, %5, %10 ve %15 silis dumanı ilavesi ile numunelerin taze birim hacim ağırlıkları sırasıyla %2,5, %2,2 ve %1,2 artış gözlenmiştir.



Şekil 4.2. Silis Dumanı İçermeyen Numunelere Kıyasla Üretilen Harçların Taze Birim Hacim Ağırlığı Artışı

VÇ6 karışımında, silis dumansız numunenin taze birim hacim ağırlığının 1367 kg/m^3 , silis dumanın katkısının %5, %10 ve %15 olduğu numunelerde ise sırasıyla 1360 kg/m^3 , 1417 kg/m^3 , 1409 kg/m^3 olarak elde edilmiştir. Silis duman içeren numunelerin taze birim hacim ağırlıklarının, silis dumanı içermeyen kontrol grubu numunelere kıyasla ortalama %3 oranında bir artış gözlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak

vermikülit/çimento oranı 6 için, %5, %10 ve %15 silis dumanı ilavesi ile numunelerin taze birim hacim ağırlıklarında sırasıyla %1 %3,7 ve %3,1 artış gözlenmiştir.

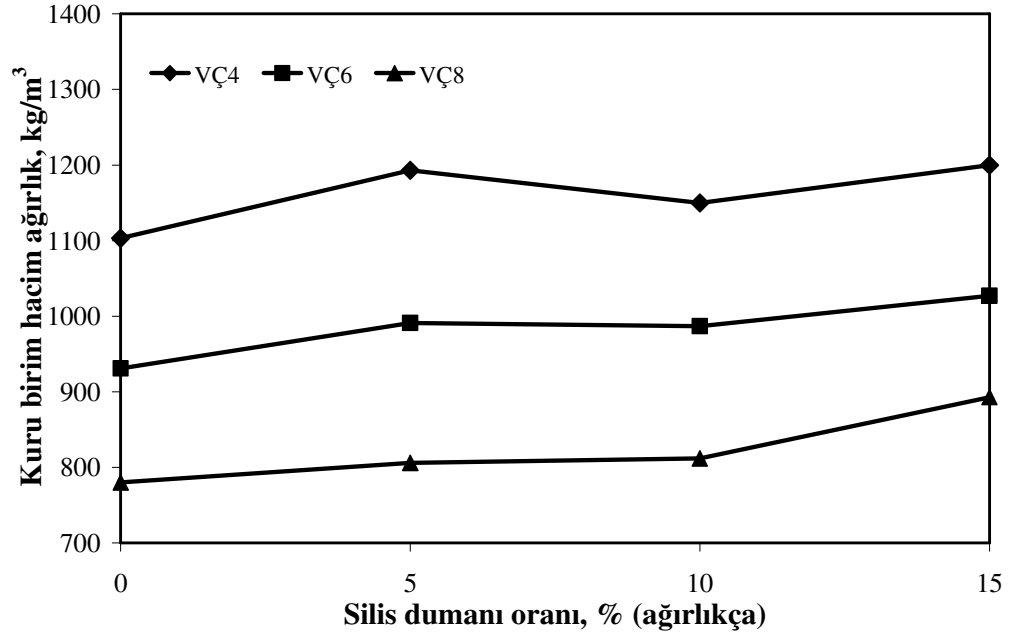
VÇ8 karışımlarda silis dumanı içermeyen numunelerin taze birim hacim ağırlıkları ortalama 1280 kg/m³ olup, buna karşılık %5, %10 ve %15 silis dumanı içeren numunelerin taze birim hacim ağırlıkları sırasıyla ise 1260 kg/m³, 1273 kg/m³, 1288 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak vermikülit/çimento oranı 8 için, %5, %10 ve %15 silis dumanı ilavesi ile numunelerin taze birim hacim ağırlıklarında sırasıyla %1,6 %2,4 ve %0,6 artış gözlenmiştir.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı azaldıkça, çimento miktarındaki artışa bağlı olarak taze birim ağırlığın arttığı belirlenmiştir. Çimento miktarı en fazla ve vermikülit miktarı en düşük olan VÇ4 karışımın taze birim hacim ağırlığı VC6 ve VC8 ile kıyaslandığında daha yüksek elde edilmiştir. Bu durum, karışımın yoğunluğunun doğrudan karışımda kullanılan malzeme miktarları ve bunların yoğunlukları ile ilişkili olmasının bir sonucudur.

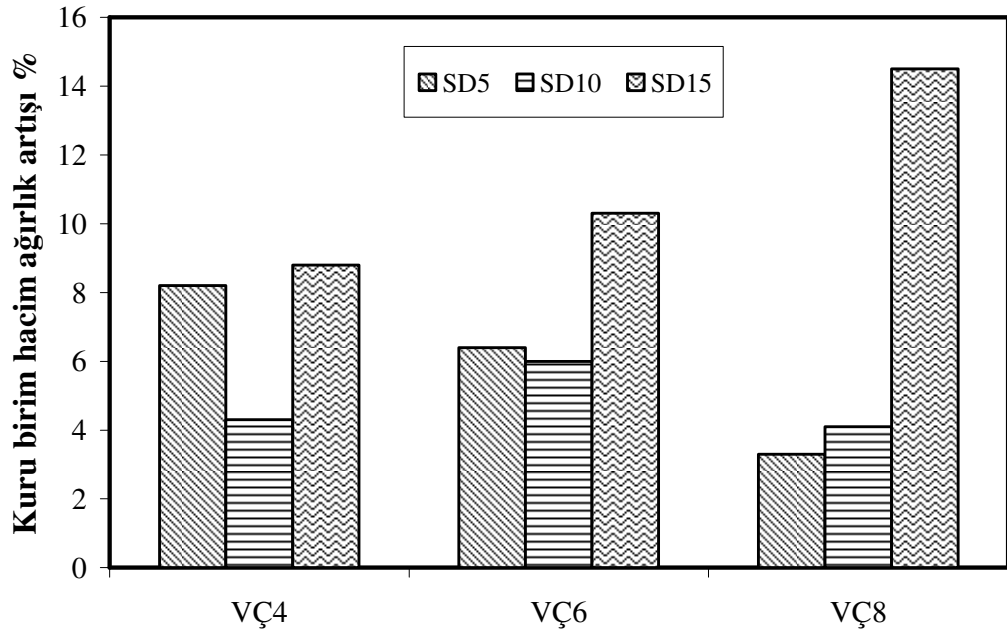
4.2. Sertleşmiş Harç Deneyleri

4.2.1. Kuru Birim Ağırlık, Su emme ve Porozite

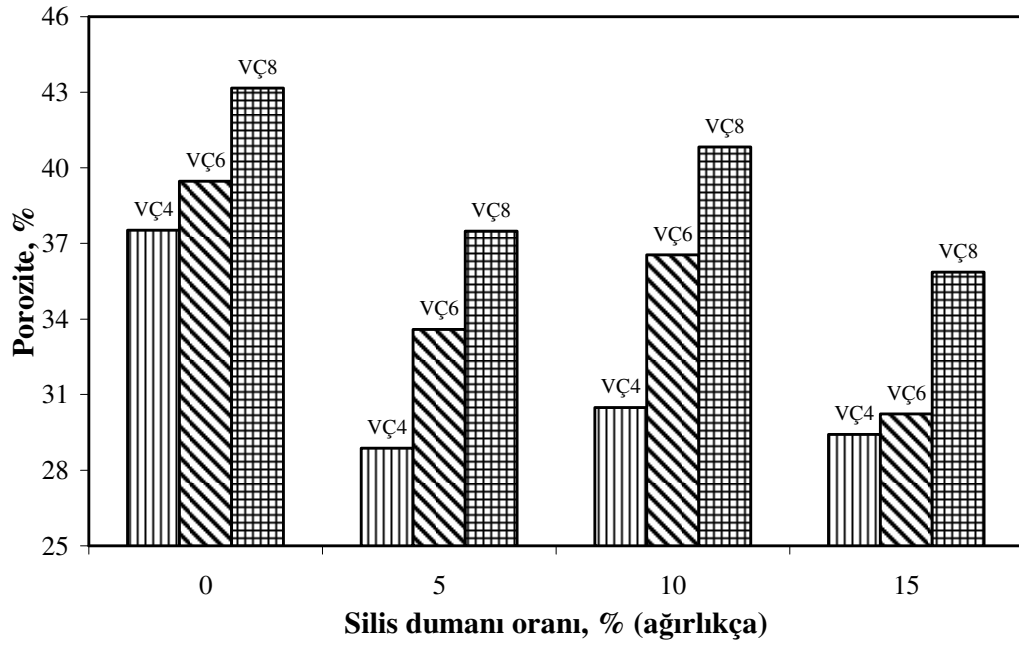
28 gün standart bakıma tabi tutulan numuneler kuru ağırlığı değişmeyinceye kadar kurumaya bırakıldı. Daha sonra sertleşmiş harç numunelerin kuru birim ağırlıkları, su emme ve poroziteleri belirlenmiştir. Kuru birim hacim ağırlık her bir vermikülit/çimento hacimsel oranına göre bulunup gruplara ayrılmıştır. Üretilen numunelerin kuru birim ağırlıklarının grafiksel gösterimi ve silis dumanı içeriğine bağlı kuru birim hacim ağırlıklarındaki değişimler sırasıyla Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te, su emme ve porozite değişimleri ise sırasıyla Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilmektedir.



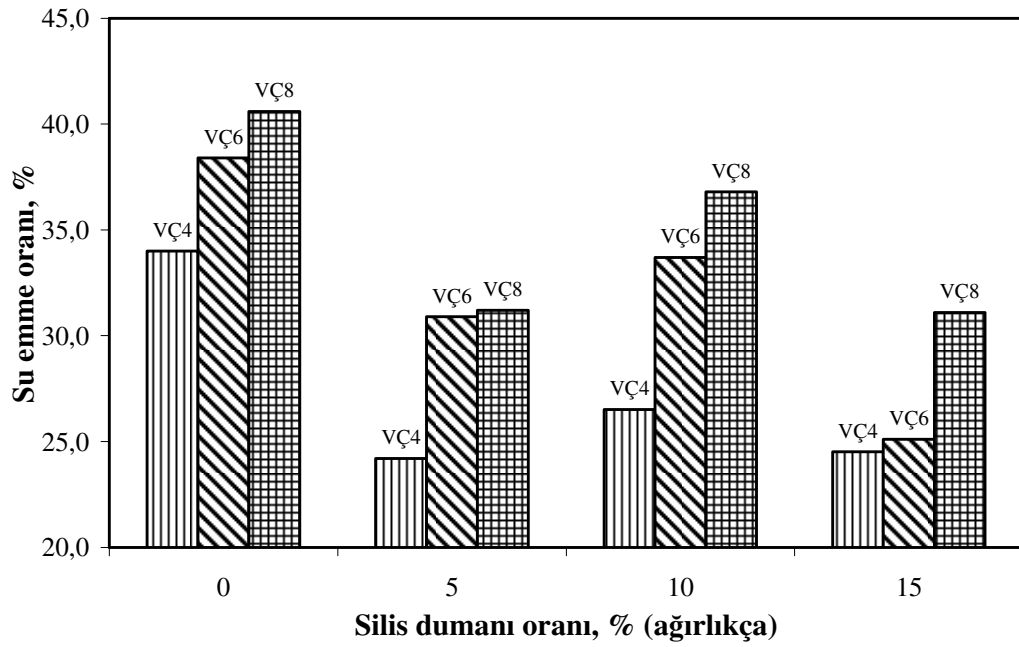
Şekil 4.3. Kuru Birim Ağırlığın Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi



Şekil 4.4. Silis Dumanı İçermeyen Numunelere Kıyasla Numunelerin Kuru Birim Ağırlığı Değişimleri



Şekil 4.5. Porozitenin Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi



Şekil 4.6. Su Emme Miktarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan VÇ4 karışımı incelendiğinde, silis dumansız numunelerin ortalama kuru birim ağırlıklarının 1103 kg/m^3 olduğu, silis dumanı miktarının %5, %10 ve %15 e çıkması ile numunelerdeki kuru birim hacim ağırlıklarının sırasıyla 1193 kg/m^3 , 1150 kg/m^3 , 1200 kg/m^3 'e çıktığı gözlenmiştir. VÇ4 karışımında, silis dumanlı karışımların, silis dumansız karışıma oranla ortalama %7 oranında kuru birim hacim ağırlıklarının arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak vermikülit/çimento oranı 4 için, %5, %10 ve %15 silis dumanı ilavesi ile numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarında sırasıyla %8,2 %4,3 ve %8,8 artış gözlenmiştir. Bu serideki karışımlara %0, %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı ilave edilmesi ile görünen boşluk oranları sırasıyla %37,5, %28,9, %30,5, %29,4 ve su emme değerleri ise %34, %24,2, %26,5 ve %24,5 olarak belirlenmiştir.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 6 olan VÇ6 karışımı incelendiğinde, silis dumansız numunelerin ortalama kuru birim ağırlıklarının 931 kg/m^3 olduğu, silis dumanı miktarının %5, %10 ve %15 e çıkması ile numunelerdeki kuru birim hacim ağırlıklarının sırasıyla 991 kg/m^3 , 987 kg/m^3 , 1027 kg/m^3 'e çıktığı belirlenmiştir. VÇ6 karışımında, silis dumanlı karışımların, silis dumansız karışıma oranla ortalama %7,5 oranında kuru birim hacim ağırlıklarının arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak vermikülit/çimento oranı 6 olan numuneler için, %5, %10 ve %15 silis dumanı ilavesi ile numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarında sırasıyla %6,4, %6 ve %10,3 artış gözlenmiştir. Bu serideki karışımlara %0, %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı ilave edilmesi ile görünen boşluk oranları sırasıyla %39,5, %33,6, %36,5, %30,2 ve su emme değerleri ise %38,4, %30,9, %33,7 ve %25,1 olarak belirlenmiştir.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 olan VÇ8 karışımı incelendiğinde, silis dumansız numunelerin ortalama kuru birim ağırlıklarının 780 kg/m^3 olduğu, silis dumanı miktarının %5, %10 ve %15 e çıkması ile numunelerdeki kuru birim hacim ağırlıklarının sırasıyla 806 kg/m^3 , 812 kg/m^3 , 893 kg/m^3 'e çıktığı gözlenmiştir. VÇ8 karışımında, silis dumanlı karışımların, silis dumansız karışımlara oranla ortalama %7,3 oranında

kuru birim hacim ağırlıklarının arttığı tespit edilmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak vermikülit/çimento oranı 8 olan numuneler için, %5, %10 ve %15 silis dumanı ilavesi ile numunelerin kuru birim hacim ağırlıklarında sırasıyla %3,3, %4,1 ve %14,5 artış belirlenmiştir. Bu serideki karışımlara %0, %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı ilave edilmesi ile görünen boşluk oranları sırasıyla %43,2, %37,5, %40,8, ve %35,9 ve su emme değerleri ise %40,6, %31,2, %36,8 ve %31,1 olarak belirlenmiştir.

Vermikülit/çimento hacimsel oranına göre karışımda çimento miktarının azalıp vermikülit miktarının artması ile kuru birim hacim ağırlığın azaldığı görülmektedir. Vermikülit/çimento hacimsel oranlarına göre üretilen harçların kuru birim hacim ağırlıklarında, en fazla çimento miktarı veya en az genleştirilmiş vermikülit miktarı içeren vermikülit/çimento oranı 4 olan VÇ4 serisinin kuru birim ağırlık değerleri bütün silis dumanı içeriklerinde en yüksek değerleri almıştır.

Vermikülit miktarı en fazla veya çimento miktarı en az olan vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 serisinin kuru birim ağırlık değerleri bütün silis dumanı oranlarında en düşük değerleri almıştır. Karışımlarda genleştirilmiş vermikülit miktarının artmasıyla kuru birim hacim ağırlık belirgin şekilde azalmıştır.

4.2.2 Eğilme Dayanımı

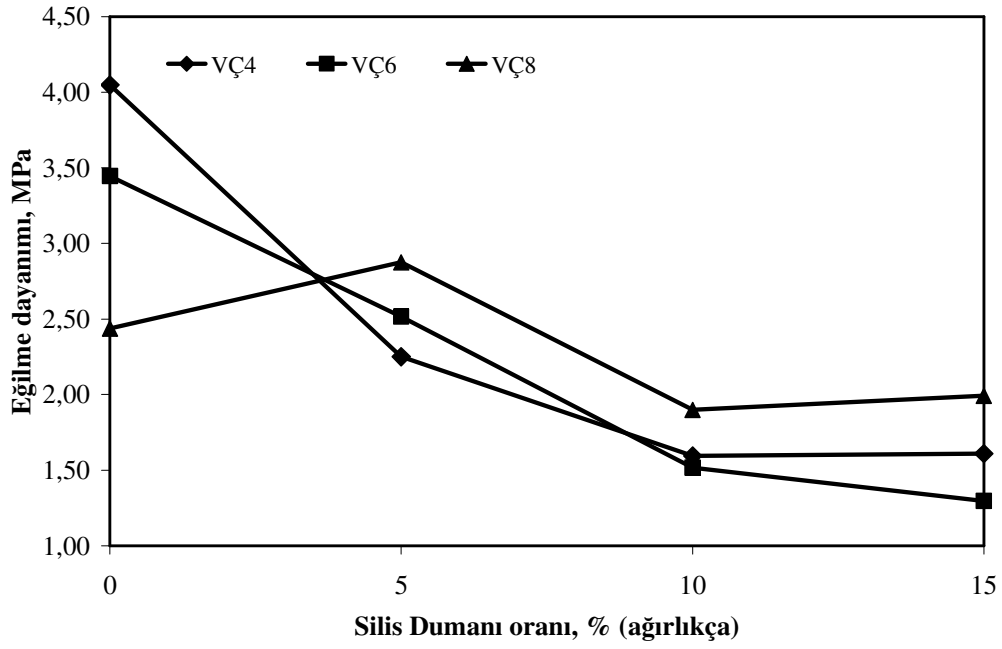
Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4, 6, 8 olan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 karışımları için üretilen silis dumansız ve silis dumanlı numunelere 20 °C, 300 °C, 600 °C ve 900 °C değişik sıcaklıklarda yüksek sıcaklık fırını içerisinde, sıcaklığa tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelere eğilme testi uygulanmıştır. Eğilme deneyi sonucu bulunan farklı karışım ve sıcaklık değerlerine ait eğilme dayanımı değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir. 20°C sıcaklıktaki harç numunelerin eğilme dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.7’de ve dayanımlardaki % değişimler ise Şekil 4.8’de gösterilmiştir.

Tablo. 4.1.Numunelerin Eğilme Dayanımları

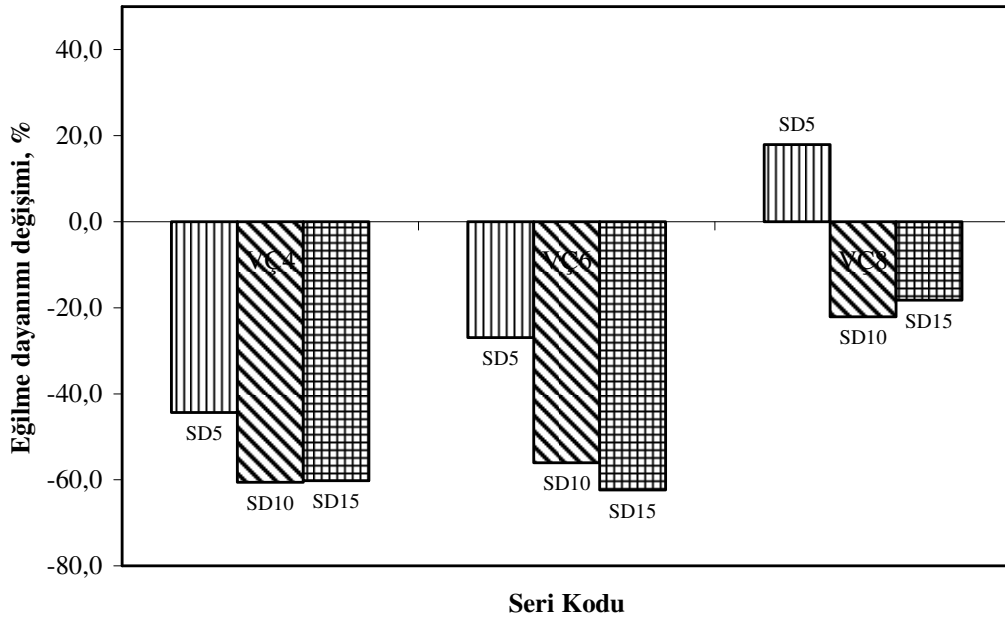
V/Ç Oranı	Silis Dumanı %	Seri No	Eğilme Dayanımı, MPa			
			20 °C	300 °C	600 °C	900 °C
4	0	VÇ4-SD0	4,05	3,32	3,34	1,38
	5	VÇ4-SD5	2,25	3,10	2,41	1,32
	10	VÇ4-SD10	1,59	2,55	2,50	1,13
	15	VÇ4-SD15	1,61	2,10	1,80	1,47
6	0	VÇ6-SD0	3,45	2,56	2,76	1,30
	5	VÇ6-SD5	2,52	2,40	2,13	1,23
	10	VÇ6-SD10	1,52	2,69	2,28	1,10
	15	VÇ6-SD15	1,30	1,71	1,43	1,02
8	0	VÇ8-SD0	2,44	1,87	1,83	1,38
	5	VÇ8-SD5	2,88	1,88	2,57	1,10
	10	VÇ8-SD10	1,90	2,06	2,28	0,91
	15	VÇ8-SD15	1,99	1,89	1,90	0,95

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan numunelerin 20°C sıcaklıktaki eğilme dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 4,05 MPa, 2,25 MPa, 1,59 MPa, 1,61 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %55,5, %60,7, %60,2 oranında azalmıştır.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 6 olan numunelerin 20°C sıcaklıktaki eğilme dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 3,45 MPa, 2,52 MPa, 1,52 MPa, 1,30 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %26,9, %55,9, %62,3 oranında azalmıştır.



Şekil 4.7. 20°C Sıcaklıktaki Harçların Eğilme Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi

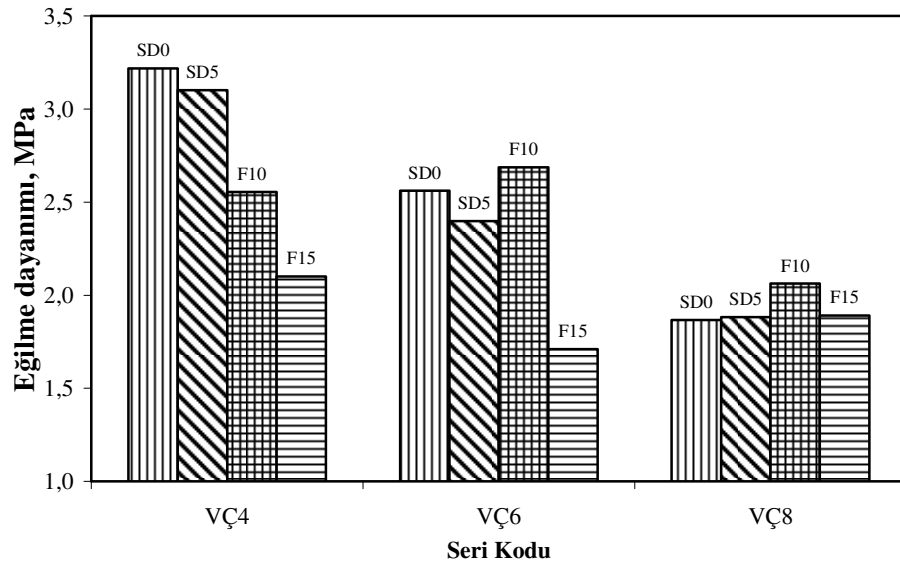


Şekil 4.8. Silis Dumanı İçeren Harçların Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % değişimi (20°C).

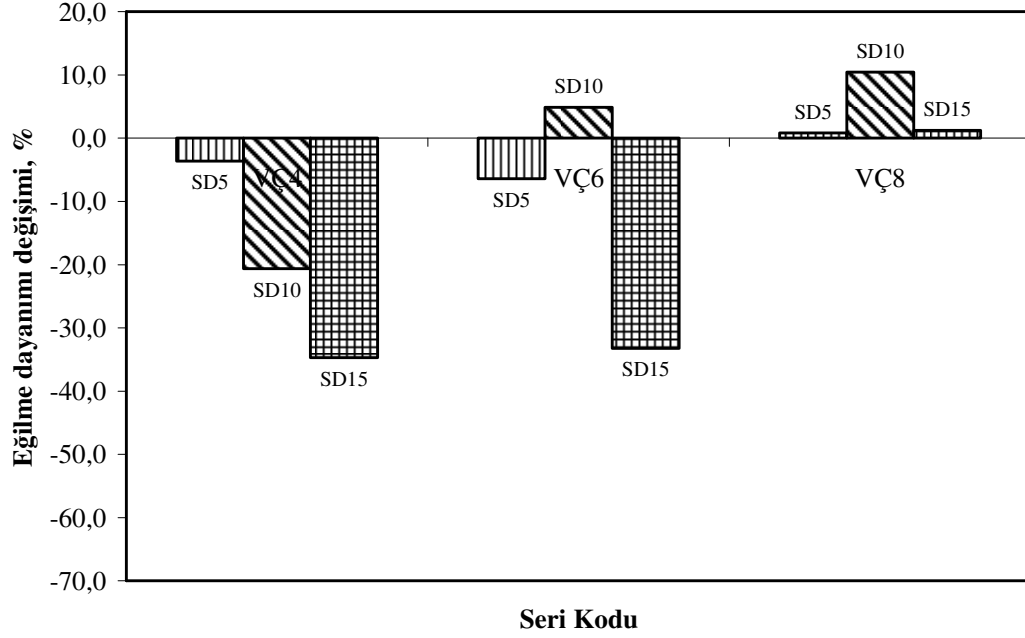
Vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 olan numunelerin 20°C sıcaklıktaki eğilme dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 2,44 MPa, 2,88 MPa, 1,90 MPa, 1,99 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %18 arttığı, %22,19, %18,4 oranında azaldığı gözlenmiştir .

20°C sıcaklıkta silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımı değerleri vermikülit çimento hacimsel oranı 4, 6 ve 8 için sırasıyla 4,05 MPa, 3,45 MPa, 2,44 MPa olarak belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde 20°C sıcaklıkta test edilen numunelerde, silis dumanı içermeyen numunelerin silis dumanı içeren numunelere göre eğilme dayanımlarının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Karışımdaki silis dumanı oranı fazla olan numunelerin, silis dumanı oranı az olan numunelerle kıyaslandığında eğilme dayanımlarındaki düşük olduğu tespit edilmiştir.

300°C sıcaklıkta test edilen numunelerin eğilme dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.9’da, dayanımlardaki % değişimler Şekil 4.10’da verilmektedir. .



Şekil 4.9. 300°C Sıcaklıktaki Harçların Eğilme Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi



Şekil 4.10. Silis Dumanı İçeren Harçların Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (300°C).

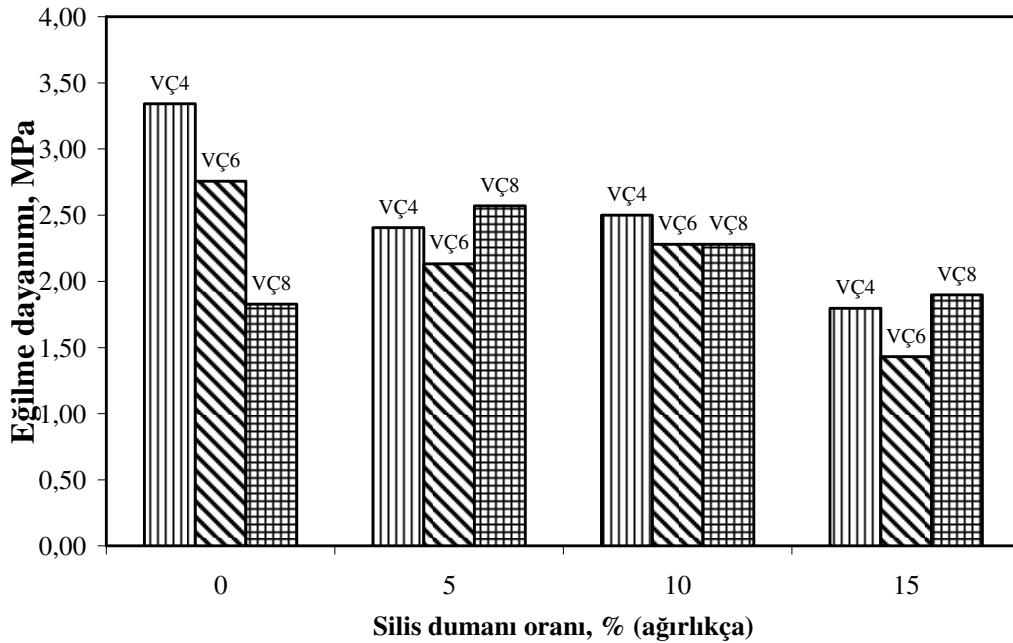
300°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 3,32 MPa, 3,10 MPa, 2,55 MPa, 2,10 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %6,6, %23,2, %36,7 oranında azalmıştır.

300°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 6 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 2,56 MPa, 2,40 MPa, 2,69 MPa, 1,71 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %6,2 azalmış, %5,1 artmış ve %33,2 oranında azalmıştır.

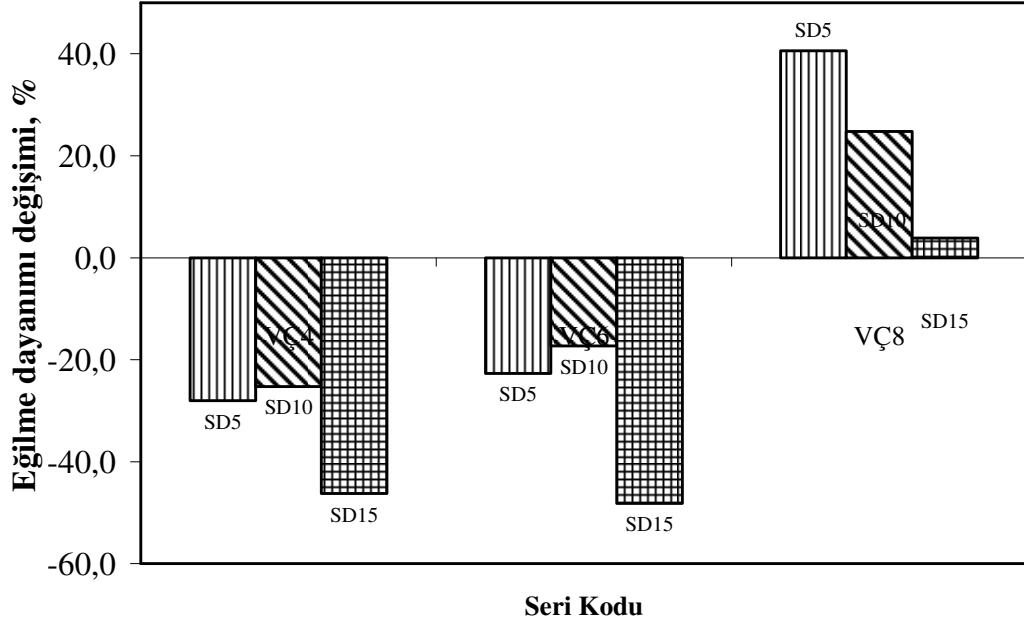
300°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 1,87MPa, 1,88 MPa, 2,06 MPa, 1,89 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %0,5, %10,1 ve %1,06 oranında arttığı gözlenmiştir.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan numunelerde; silis dumanı katkısız numunelerin 300 °C sıcaklık etkisinden sonra eğilme dayanımları, silis dumanı katkılı numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Silis dumanı ilavesinin eğilme dayanımını az miktarda düşürdüğü belirlenmiştir

600°C sıcaklıkta test edilen numunelerin eğilme dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.11’de verilmektedir. Dayanımlardaki 5 değişimler ise Şekil 4.12’te gösterilmiştir.



Şekil 4.11. 600°C Sıcaklıktaki Harçların Eğilme Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi



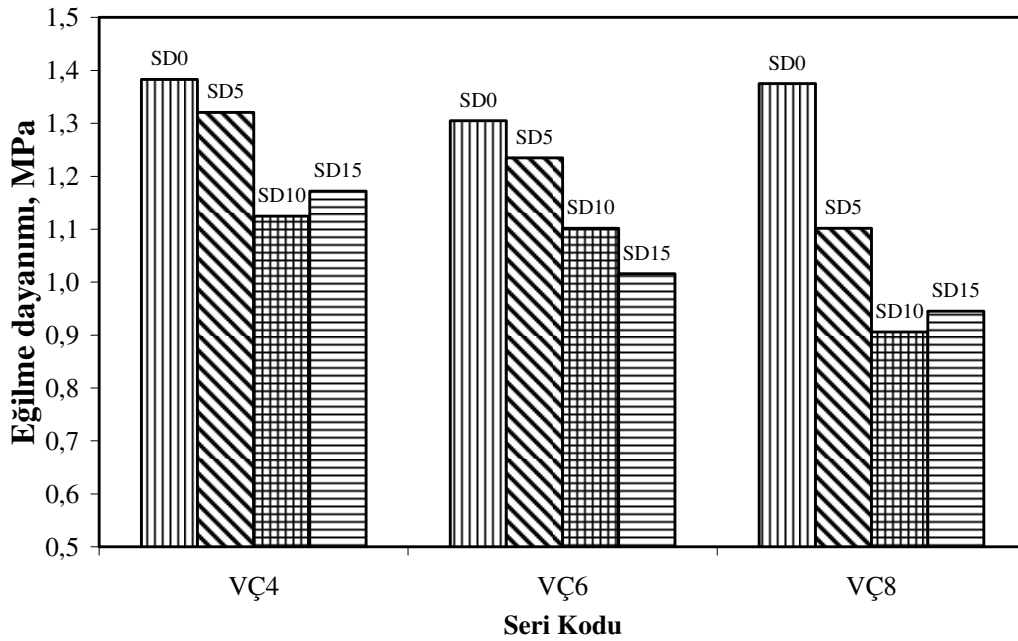
Şekil 4.12. Silis Dumanı İçeren Harçların Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % değişimi (600°C)

600°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımı 3,34 MPa, %5, %10, %15 silis dumanı içeriklerinde ise sırasıyla 2,41 MPa, 2,50 MPa, 1,80 MPa olarak belirlenmiştir.. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %27,8, %25,1 ve %46,1 oranında azalmıştır.

600°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 6 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımı 2,76 MPa, %5, %10, %15 silis dumanı içeriklerinde ise sırasıyla, 2,13 MPa, 2,28 MPa, 1,43 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %22,8, %17,4 ve %48,2 oranında azalmıştır.

600°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımı 1,83 MPa, %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeriklerinde ise sırasıyla, 2,57 MPa, 2,28 MPa, 1,90 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %40,4, %24,5 ve %3,8 oranında artmıştır.

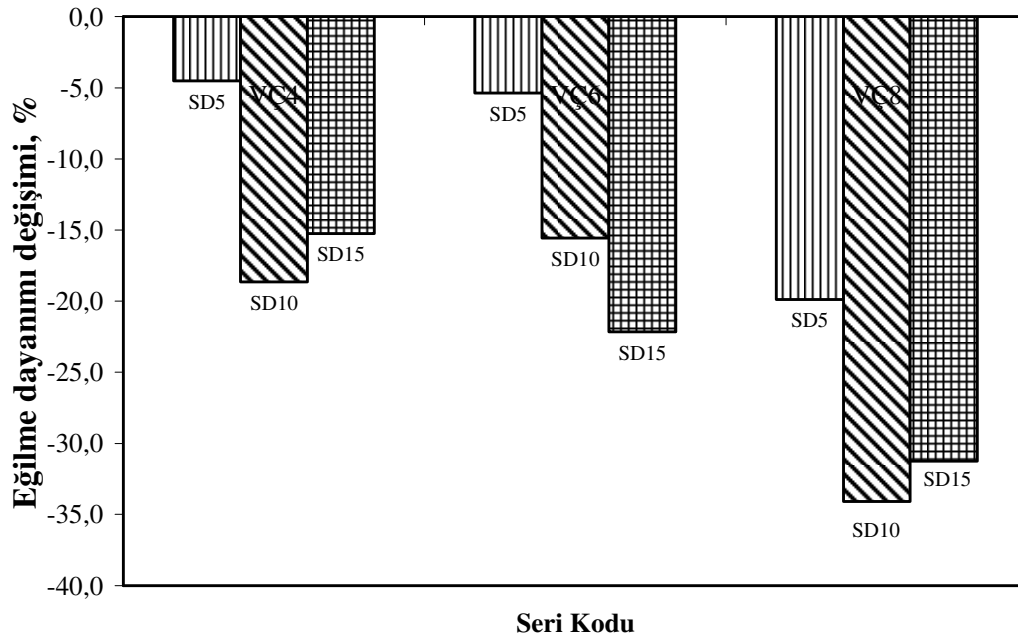
900°C sıcaklıkta test edilen numunelerin eğilme dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.13’de verilmektedir. Dayanımlardaki % değişimler 4.14’de verilmektedir.



Şekil 4.13. 900 °C Sıcaklıktaki Harçların Eğilme Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi

900°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımı 1,38 MPa, %5, %10 ve %15 içeriklerinde ise sırasıyla 1,32 MPa, 1,13 MPa, 1,17 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme

dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %4,3, %18,1 ve %15,2 oranında azalmıştır.

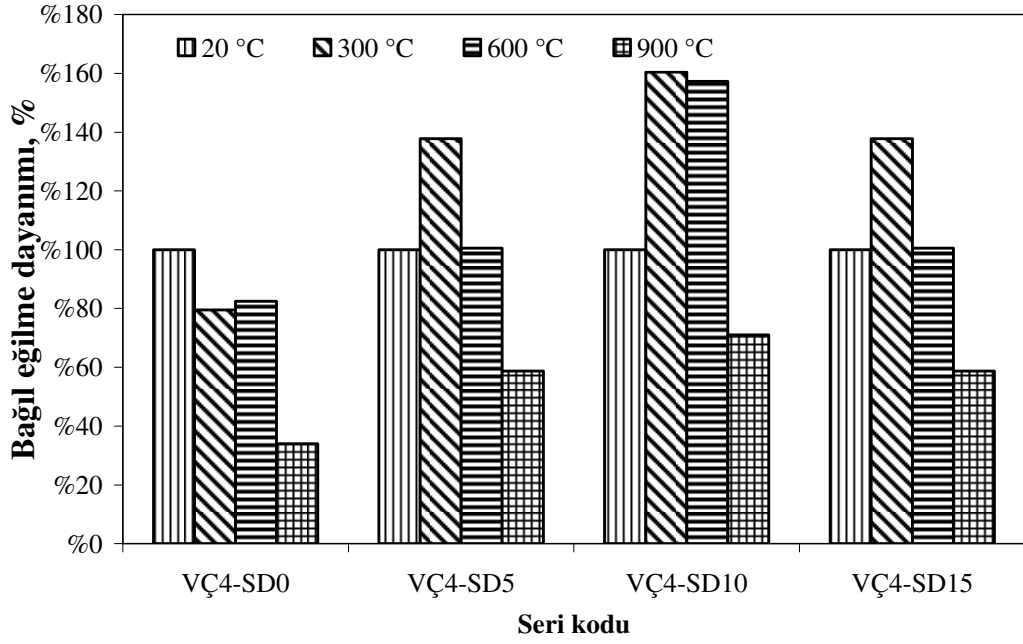


Şekil 4.14. 900°C Sıcaklıkta Test Edilen Numunelerin Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçeriğine Göre Değişimi

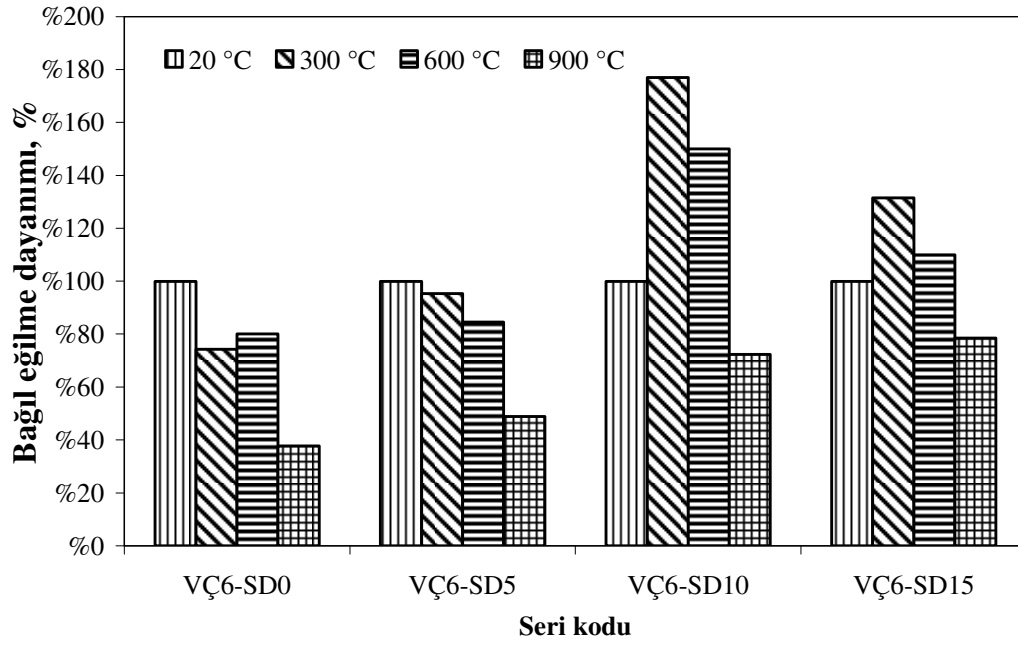
900°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 6 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımı 1,30 MPa, %5, %10 ve %15 içeriklerinde ise sırasıyla 1,23 MPa, 1,10 MPa, 1,02 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %5,3, %15,3 ve %21,5 oranında azalmıştır.

900°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımı 1,38 MPa, %5, %10 ve %15 içeriklerinde ise sırasıyla 1,10 MPa, 0,91 MPa, 0,95 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin eğilme

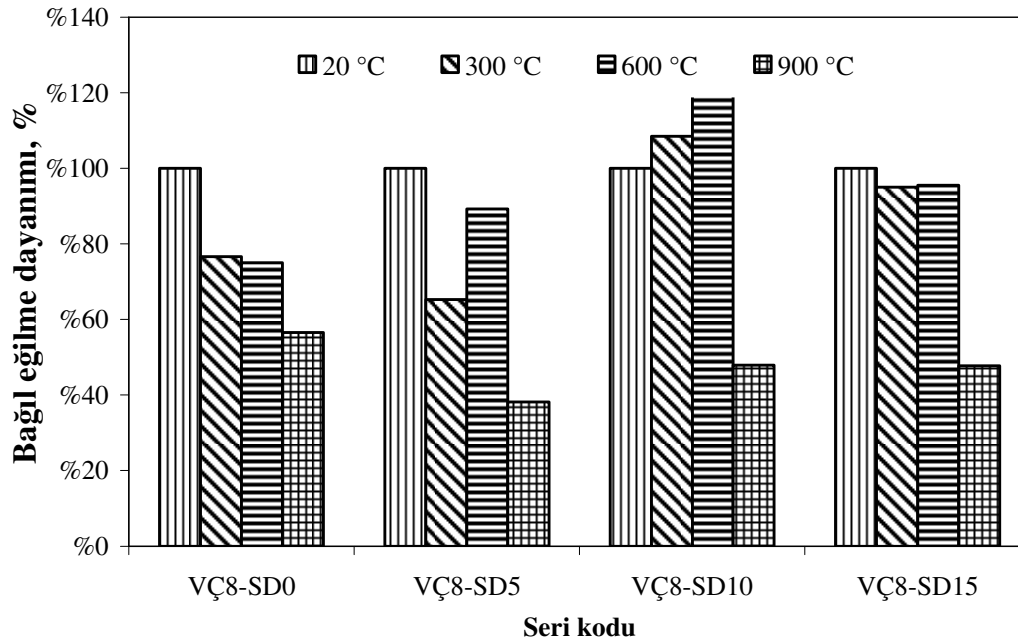
dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %20,2, %34 ve %31,2 oranında azalmıştır. 900°C sıcaklığa kadar test edilen numunelerin bağıl eğilme dayanımları vermikülit/çimento hacimsel oranına göre Şekil 4.15, Şekil 4.16 ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir.



Şekil 4.15. Vermikülit/çimento Oranı 4 Olan Numunelerin Bağıl Eğilme Dayanımları



Şekil 4.16. Vermikülit/çimento Oranı 6 olan Numunelerin Bağıl Eğilme Dayanımları



Şekil 4.17. Vermikülit/çimento Oranı 8 Olan Numunelerin Bağıl Eğilme Dayanımları

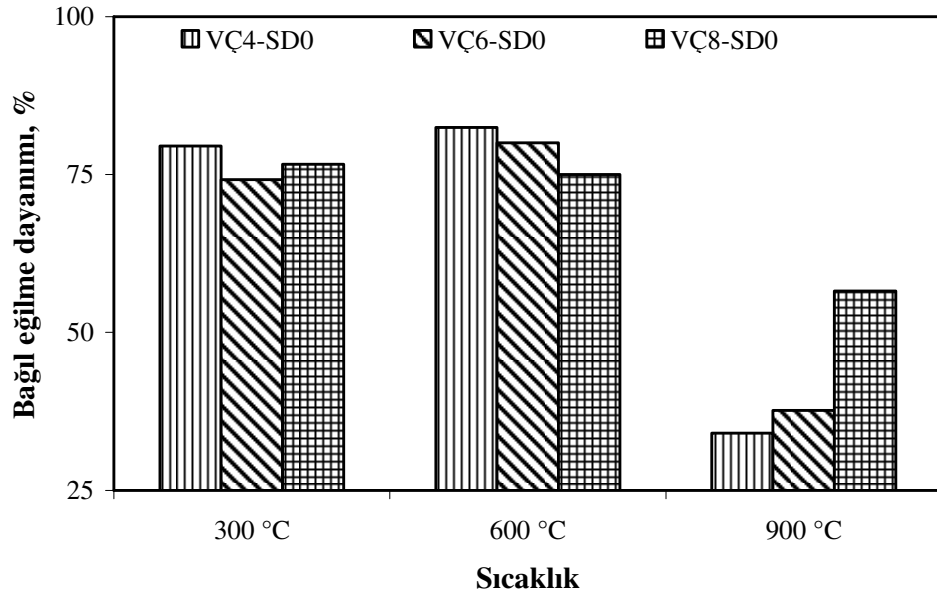
Vermikülit/çimento oranı 4 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklık uygulamasından sonra bağıl eğilme dayanımları sırasıyla, silis dumanı içermeyen numuneler için %80, %82 ve %34 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde silis dumanı içeriği %5 olan numuneler için %138, %101 ve %59, silis dumanı içeriği %10 numuneler için %160, %157 ve %71, silis dumanı içeriği %15 olan numuneler için %138, %101 ve %59 olarak belirlenmiştir.

Vermikülit/çimento oranı 6 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklık uygulamasından sonra bağıl eğilme dayanımları sırasıyla, silis dumanı içermeyen numuneler için %74, %80 ve %38 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde silis dumanı içeriği %5 olan numuneler için %95, %85 ve %49, silis dumanı içeriği %10 numuneler için %177, %150 ve %72, silis dumanı içeriği %15 olan numuneler için %132, %110 ve %78 olarak belirlenmiştir.

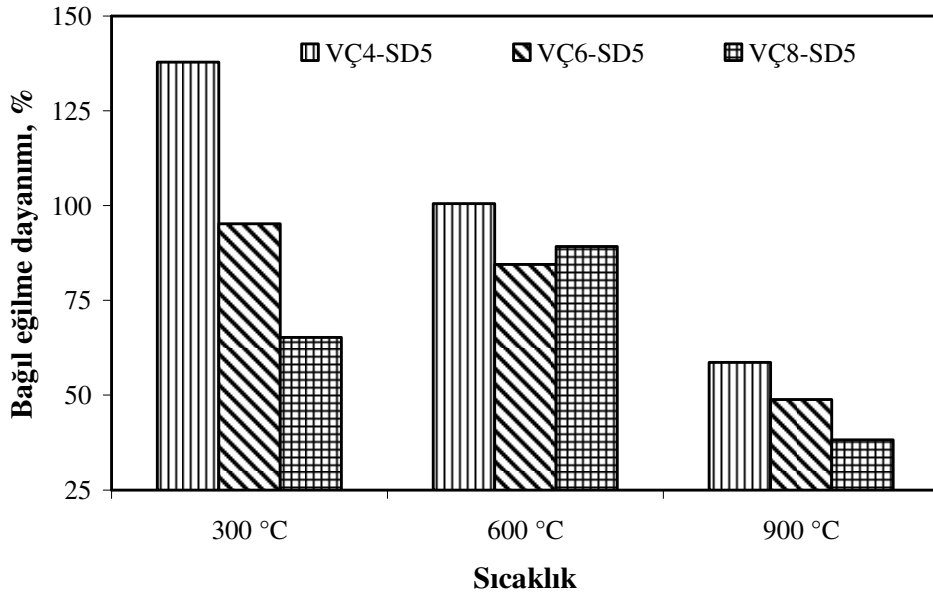
Vermikülit/çimento oranı 8 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklık uygulamasından sonra bağıl eğilme dayanımları sırasıyla, silis dumanı içermeyen numuneler için %77, %755 ve %57 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde silis dumanı içeriği %5 olan numuneler için %65, %89, %38, silis dumanı içeriği %10 numuneler için %108, %120 ve %48, silis dumanı içeriği %15 olan numuneler için %95, %95 ve %48 olarak belirlenmiştir.

Vermikülit/çimento oranlarına göre silis dumanı içeriğinin ve sıcaklığın bağıl eğilme dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.18- Şekil 4.24’de verilmektedir.

Silis dumanı içermeyen numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki eğilme dayanımları, 20°C sıcaklığa tabi tutulan silis dumanı içermeyen numunelerin eğilme dayanımı ile karşılaştırılmıştır. 300°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla %18, %25,7, %23,3 azalmıştır. 600°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla %17,5, %20, %25 oranında azalmıştır. 900°C sıcaklığa tutulan numunelerin eğilme dayanımları VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serileri için sırasıyla %66, %62 ve %63 oranında azalmıştır.

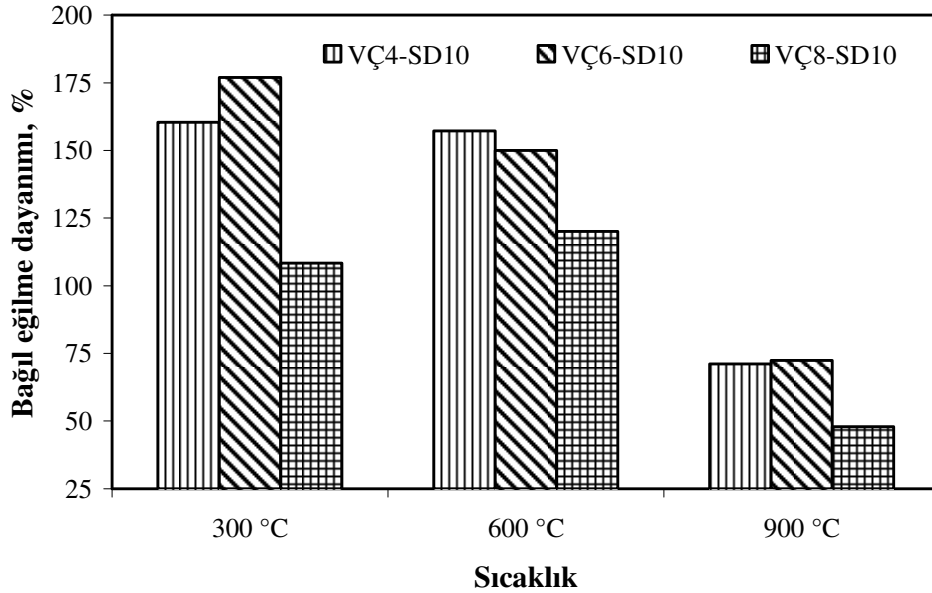


Şekil 4.18. Sıcaklığın Bağlı Eğilme Dayanıma Etkisi (Silis Dumanı İçeriği=%0)



Şekil 4.19. Sıcaklığın Bağlı Eğilme Dayanıma Etkisi (Silis Dumanı İçeriği=%5)

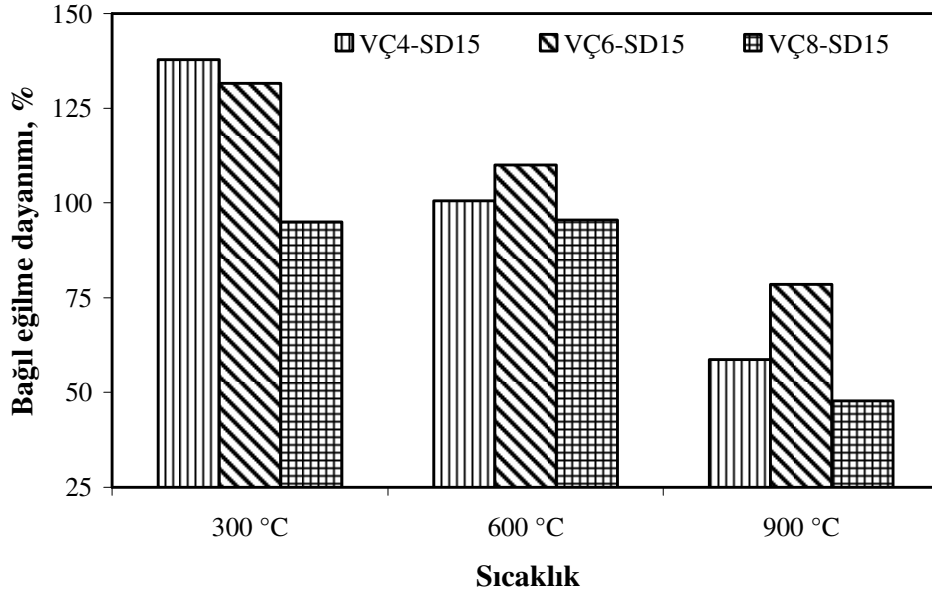
Silis dumanı içeriği %5 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki eğilme dayanımları, 20°C sıcaklığa tabi tutulan silis dumanı içeriği %5 olan numunelerin eğilme dayanımı ile karşılaştırılmıştır. 300°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4 serisi numunelerinin eğilme dayanımı %44 artmış, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin eğilme dayanımı ise sırasıyla %5 ve %35 oranında azalmıştır. 600°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4 serisi numunelerinin eğilme dayanımları %7 artarken, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla %15 ve %25 oranında azalmıştır. 900°C sıcaklığa tutulan numunelerin eğilme dayanımları VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serileri için sırasıyla %41, %51 ve %62 oranında azalmıştır.



Şekil 4.20. Sıcaklığın Bağıl Eğilme Dayanıma Etkisi (Silis Dumanı İçeriği=%10)

Silis dumanı içeriği %10 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki eğilme dayanımları, 20°C sıcaklığa tabi tutulan silis dumanı içeriği %10 olan numunelerin eğilme dayanımı ile karşılaştırılmıştır. 300°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4 ve VÇ6 serisi numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla %60 ve %76 artmış, VÇ8 serisi numunelerinin eğilme dayanımı ise %35 oranında azalmıştır. 600°C

sıcaklığa tutulan numunelerin eğilme dayanımları VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serileri için sırasıyla %57, %50 ve %20 oranında artmıştır. 900°C sıcaklığa tutulan numunelerin eğilme dayanımları VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serileri için sırasıyla %29, %52 ve %52 oranında azalmıştır.



Şekil 4.21. Sıcaklığın Bağlı Eğilme Dayanıma Etkisi (Silis Dumanı İçeriği=%15)

Silis dumanı içeriği %15 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki eğilme dayanımları, 20°C sıcaklığa tabi tutulan silis dumanı içeriği %10 olan numunelerin eğilme dayanımı ile karşılaştırılmıştır. 300°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4 ve VÇ6 serisi numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla %30 ve %32 artmış, VÇ8 serisi numunelerinin eğilme dayanımı ise %5 oranında azalmıştır. 600°C sıcaklığa tutulan numunelerin eğilme dayanımları VÇ4 ve VÇ6 serisi numunelerinin eğilme dayanımları sırasıyla %12 ve %10 oranlarında artarken, VÇ8 seri numunelerin eğilme dayanımı %5 oranında azalmıştır. 900°C sıcaklığa tutulan numunelerin eğilme dayanımları VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serileri için sırasıyla %9, %22 ve %52 oranında azalmıştır.

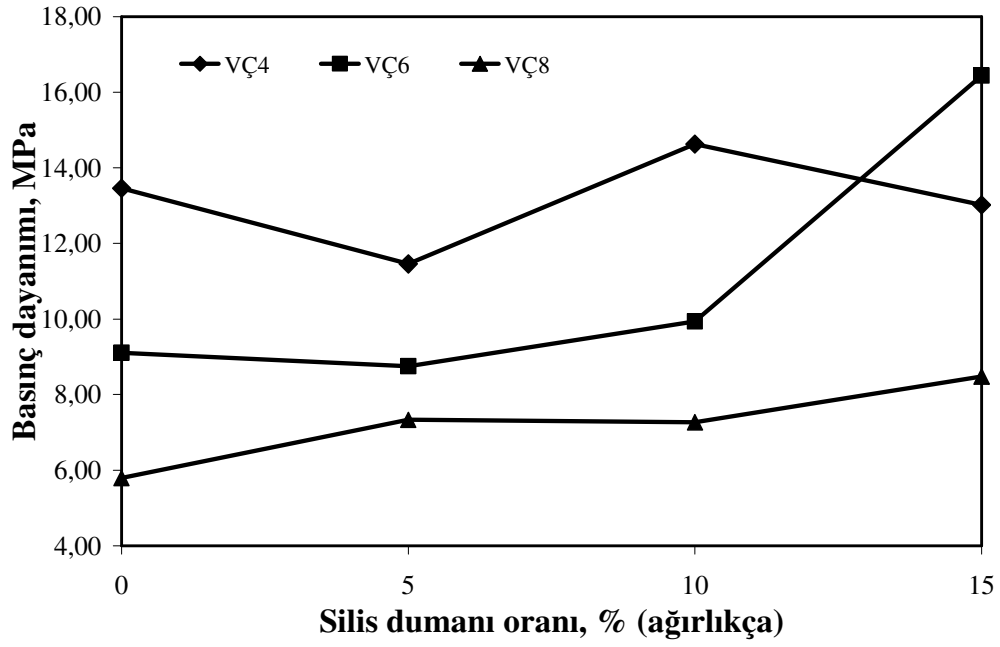
4.2.3. Basınç Dayanımı

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4, 6, 8 olan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 karışımları için üretilen silis dumansız ve silis dumanlı numunelere 20 °C, 300 °C, 600 °C ve 900 °C değişik sıcaklıklarda yüksek sıcaklık fırını içerisinde, sıcaklığa tabi tutulmuştur. Fırından çıkarılan numuneler eğilme testi uygulanmıştır. 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.

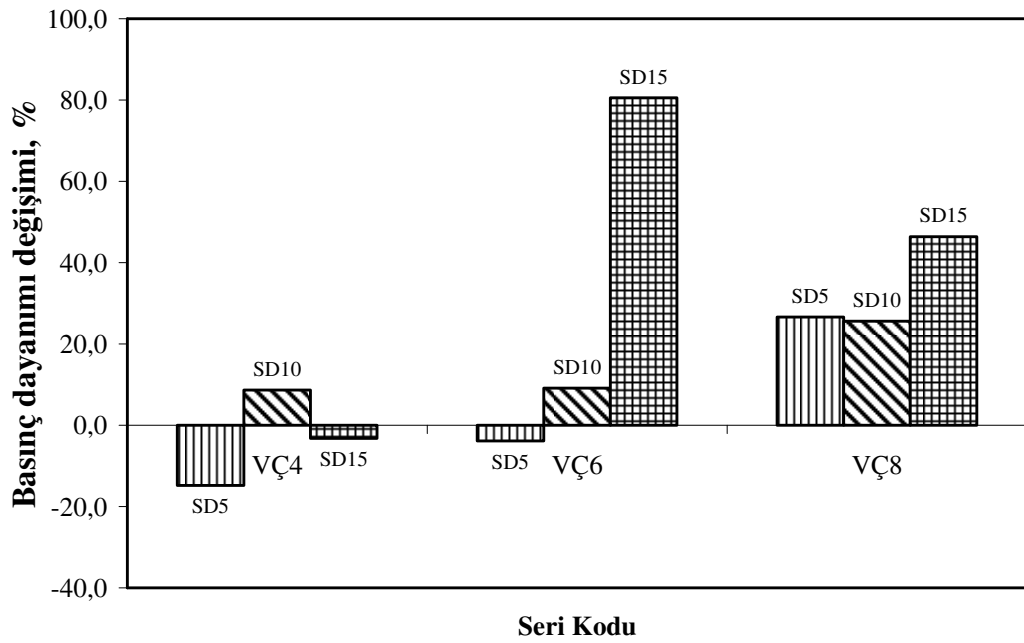
Basınç deneyi sonucu bulunan farklı karışım ve sıcaklık değerlerine ait eğilme dayanımı değerleri Tablo 4.2’de verilmiştir. 20°C sıcaklıktaki harç numunelerin basınç dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.22’de ve dayanımlardaki % değişimler ise Şekil 4.23’de gösterilmiştir.

Tablo 4.2. Numunelerin Basınç Dayanımları

V/Ç oranı	Silis Dumanı %	Seri No	Basınç Dayanımı (MPa)			
			20 °C	300 °C	600 °C	900 °C
4	0	VÇ4-SD0	13,46	10,96	10,88	6,67
	5	VÇ4-SD5	11,46	10,13	11,52	8,13
	10	VÇ4-SD10	14,63	11,75	8,00	7,46
	15	VÇ4-SD15	13,02	14,27	9,27	8,54
6	0	VÇ6-SD0	9,10	6,83	6,88	4,42
	5	VÇ6-SD5	8,75	7,10	7,40	4,98
	10	VÇ6-SD10	9,94	9,88	7,94	5,69
	15	VÇ6-SD15	16,44	8,98	10,13	4,10
8	0	VÇ8-SD0	5,79	3,94	4,23	2,88
	5	VÇ8-SD5	7,33	5,10	5,31	3,52
	10	VÇ8-SD10	7,27	6,17	6,00	3,77
	15	VÇ8-SD15	8,48	7,65	4,96	3,25



Şekil 4.22. 20°C Sıcaklıkta Test Edilen Numunelerin Basınç Dayanımı



Şekil 4.23. Silis Dumanı İçeren Harçların Eğilme Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (20°C).

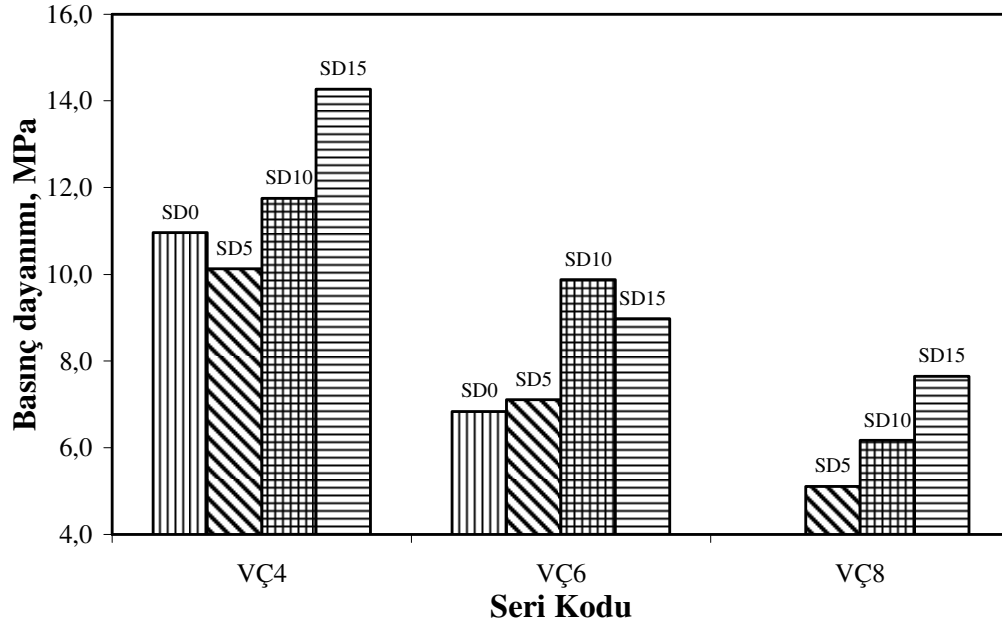
Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan numunelerin 20°C sıcaklıktaki basınç dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 13,46 MPa, 11,46 MPa, 14,63 MPa, 13,02 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları, silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %14,8 azalmış, %8,6 artmış ve %3,2 oranında azalmıştır.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 6 olan numunelerin 20°C sıcaklıktaki basınç dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 9,1 MPa, 8,75 MPa, 9,94 MPa, 16,44 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %3,8 oranında azalmış, %9,2 ve %80,6 oranında artmıştır

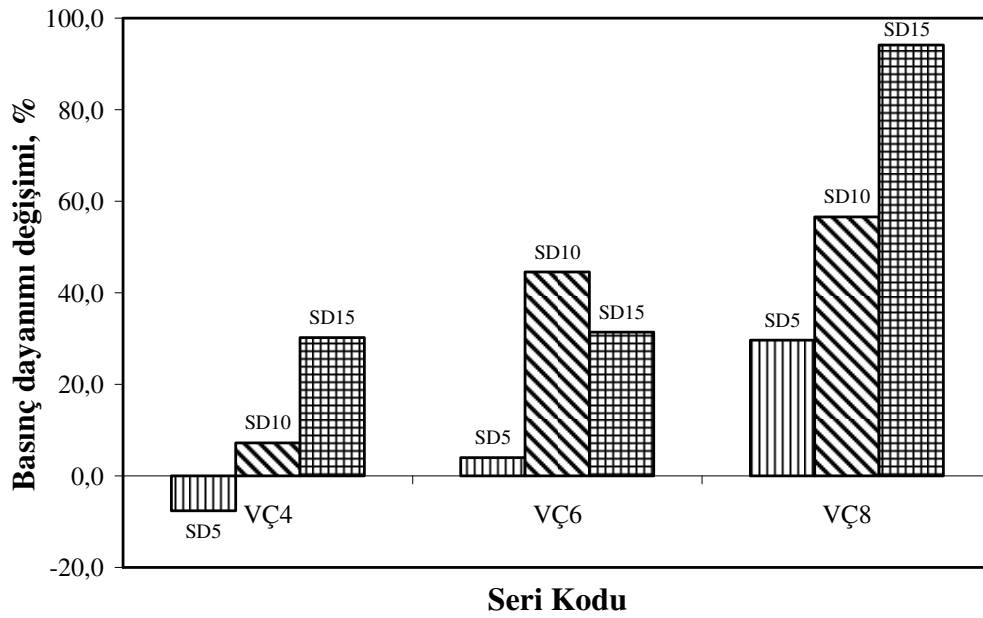
Vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 olan numunelerin 20°C sıcaklıktaki basınç dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 5,79 MPa, 7,33 MPa, 7,27 MPa, 8,48 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %26,5, %25,5 ve %52,6 oranında arttığı gözlenmiştir .

20°C sıcaklıkta silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı değerleri vermikülit çimento hacimsel oranı 4, 6 ve 8 için sırasıyla 13,46 MPa, 9,10 MPa ve 5,79 MPa olarak belirlenmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde 20°C sıcaklıkta test edilen numunelerde, silis dumanı içermeyen numunelerin silis dumanı içeren numunelere göre basınç dayanımlarının daha düşük olduğu gözlenmiştir. Karışımdaki silis dumanı oranı fazla olan numunelerin, silis dumanı oranı az olan numunelerle kıyaslandığında basınç dayanımlarının yüksek olduğu tespit edilmiştir.

300°C sıcaklıkta test edilen numunelerin eğilme dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.24'te, basınç dayanımlardaki % değişimler Şekil 4.25'te verilmektedir.



Şekil 4.24. 300°C Sıcaklıktaki Harçların Basınç Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi



Şekil 4.25. Silis Dumanı İçeren Harçların Basınç Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (300°C).

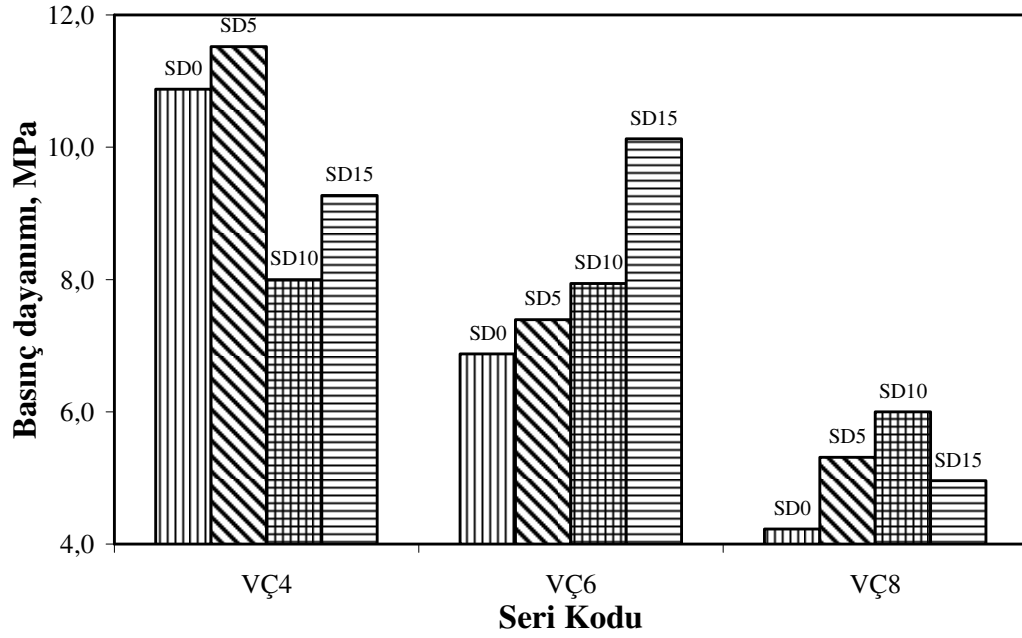
300°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 10,96 MPa, 10,13 MPa, 11,75 MPa, 14,27 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %7,5 oranında azalmış, %7,2 ve %30,2 oranında artmıştır.

300°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 6 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 6,83 MPa, 7,10 MPa, 9,88 MPa, 8,98 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla sırasıyla %3,9, %44,6 ve %31,4 oranında arttığı gözlenmiştir.

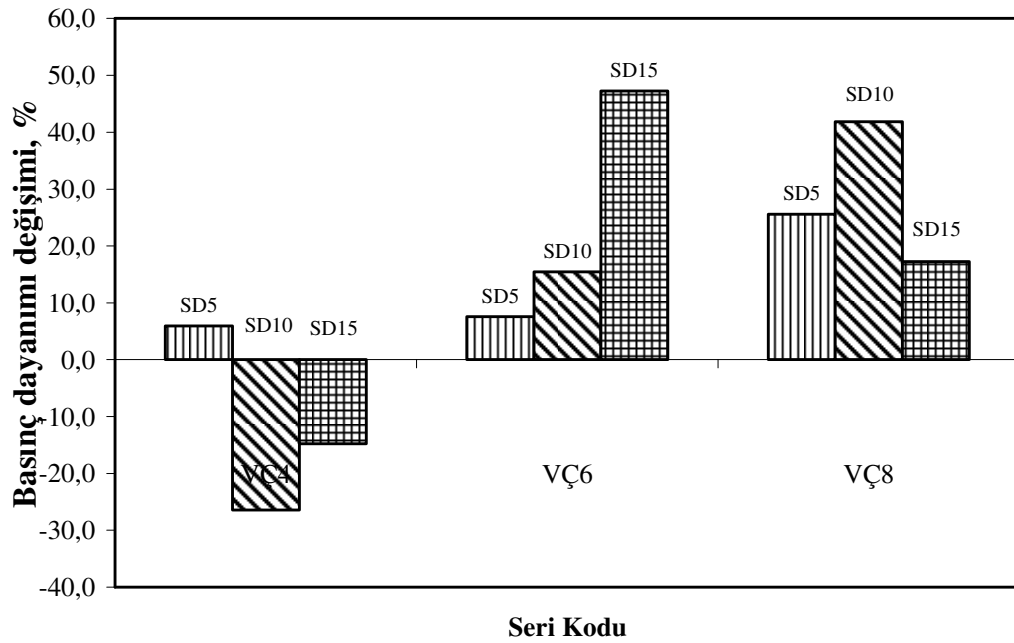
300°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımları %0, %5, %10, %15 silis dumanı oranları için sırasıyla 3,94 MPa, 5,10 MPa, 6,17 MPa, 7,65 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %29,4, %56,5 ve %94,1 oranında arttığı gözlenmiştir.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4,6 ve 8 olan numunelerin genelinde; silis dumanı katkılı numunelerin 300 °C sıcaklık etkisinden sonra basınç dayanımları, silis dumanı katkısız numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Silis dumanı ilavesinin basınç dayanımını belirgin miktarda artırdığı tespit edilmiştir.

600°C sıcaklıkta test edilen numunelerin basınç dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.26'da verilmektedir. Basınç dayanımlardaki değişimler ise Şekil 4.27'de gösterilmiştir.



Şekil 4.26. 600°C Sıcaklıktaki Harçların Basınç Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi



Şekil 4.27. Silis Dumanı İçeren Harçların Basınç Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (600°C)

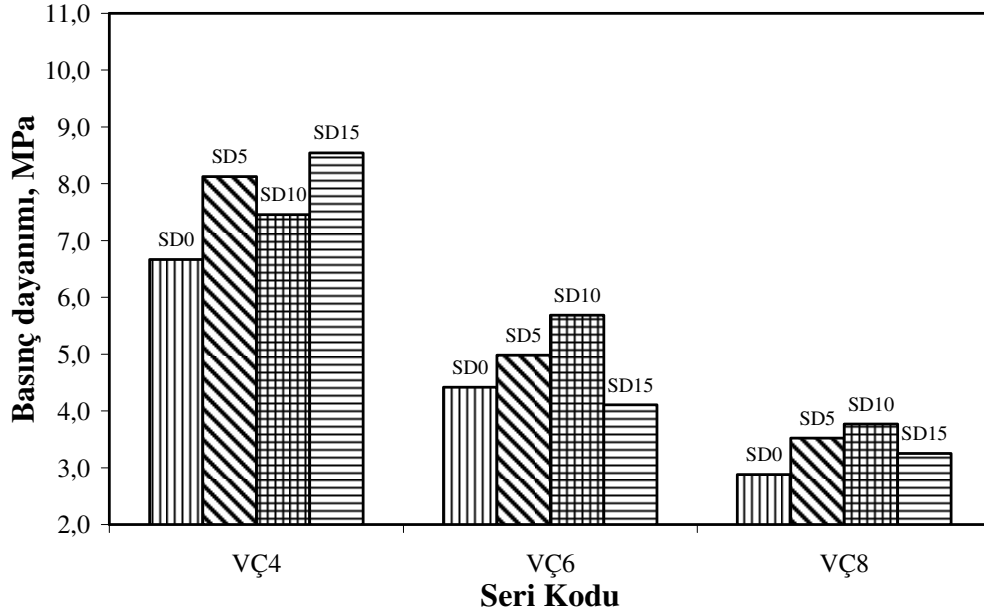
600°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı 10,88 MPa, %5, %10, %15 silis dumanı içeriklerinde ise sırasıyla 11,52 MPa, 8 MPa, 9,27 MPa olarak belirlenmiştir.. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %5,8 oranında artmış, %26,4 ve %10,6 oranında azalmıştır.

600°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 6 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı 6,88 MPa, %5, %10, %15 silis dumanı içeriklerinde ise sırasıyla, 7,40 MPa, 7,94 MPa, 10,13 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak ağırlıkça %5, %10, %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %7,5, %15,4 ve %47,2 oranında artmıştır.

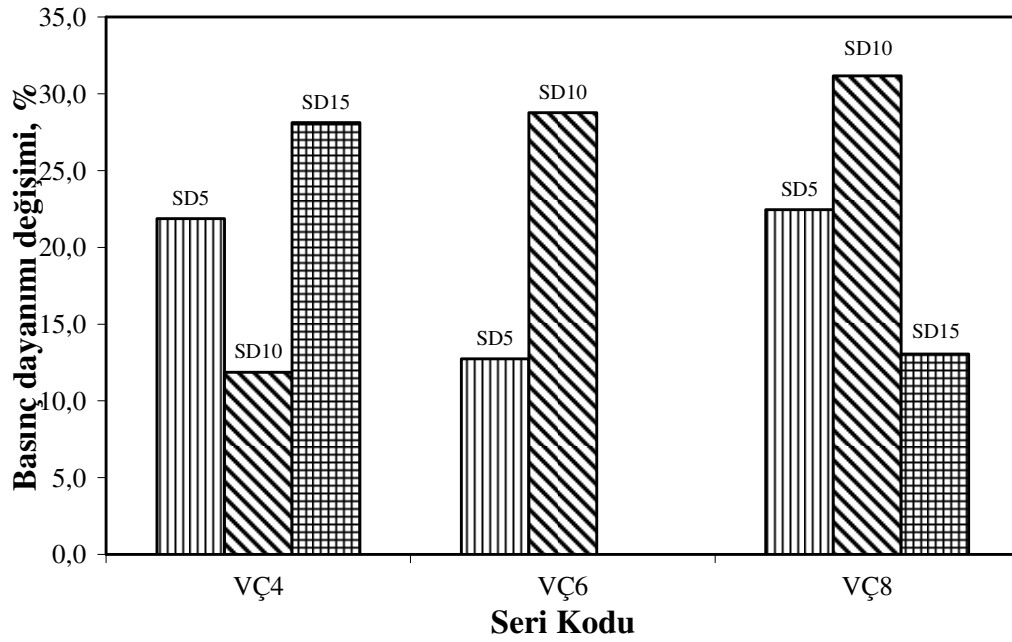
600°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı 4,23 MPa, %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeriklerinde ise sırasıyla, 5,31 MPa, 6 MPa, 4,96 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %25,5, %41,8 ve %17,2 oranında artmıştır.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4,6 ve 8 olan numunelerin genelinde; silis dumanı katkılı numunelerin 600 °C sıcaklık etkisinden sonra basınç dayanımları, silis dumanı katkısız numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Silis dumanı ilavesinin basınç dayanımını belirgin miktarda artırdığı tespit edilmiştir.

900°C sıcaklıkta test edilen numunelerin eğilme dayanımlarının grafiksel olarak gösterimi Şekil 4.28’de verilmektedir. Basınç dayanımlardaki % değişimler 4.29’da verilmektedir.



Şekil 4.28. 900°C Sıcaklıktaki Harçların Basınç Dayanımlarının Silis Dumanı İçeriğine Bağlı Değişimi



Şekil 4.29. Silis Dumanı İçeren Harçların Basınç Dayanımının Silis Dumanı İçermeyen Harçlara Kıyasla % Değişimi (900°C)

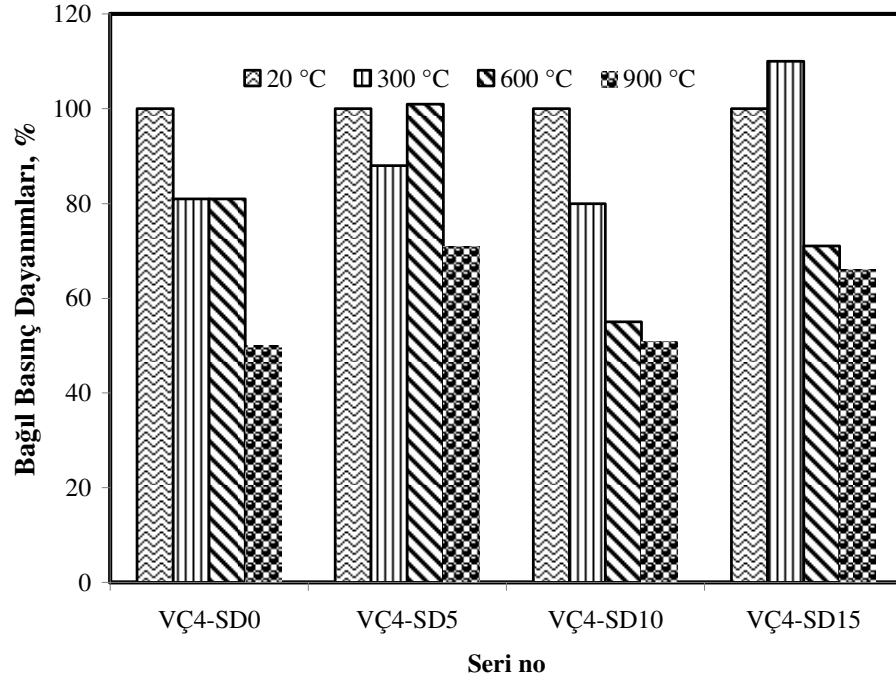
900°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 4 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı 6,67 MPa, %5, %10 ve %15 içeriklerinde ise sırasıyla 8,13 MPa, 7,46 MPa, 8,54 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %21,8, %11,8 ve %28 oranında artmıştır.

900°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 6 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı 4,42 MPa, %5, %10 ve %15 içeriklerinde ise sırasıyla 4,98 MPa, 5,69 MPa, 4,10 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %12,6, %28,7 oranında artmış ve %7,2 oranında azalmıştır.

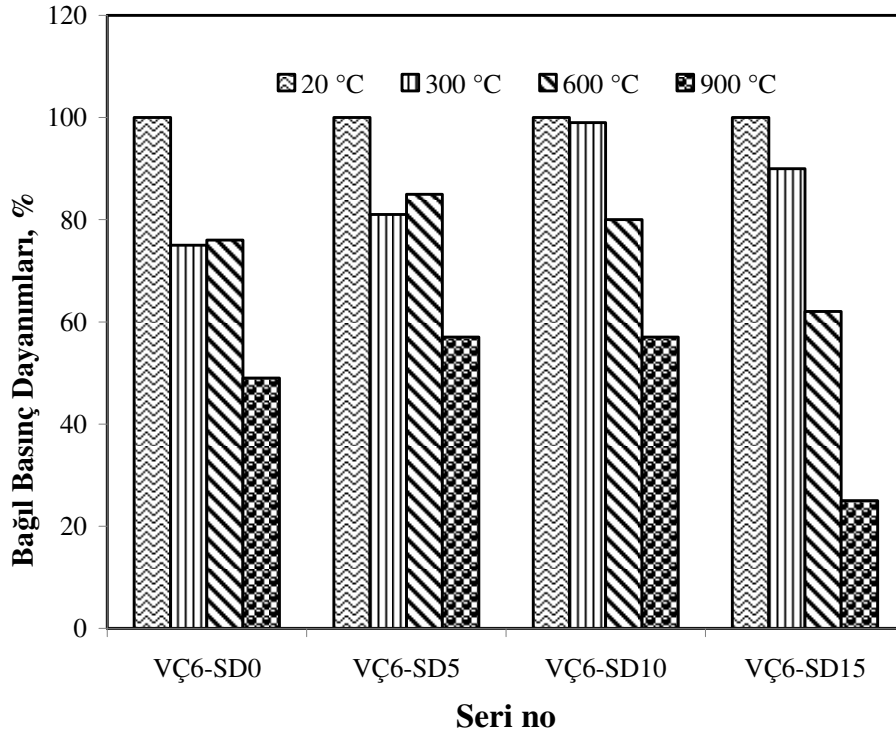
900°C sıcaklığa tabi tutulan vermikülit/çimento hacimsel oranı 8 olan ve silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı 2,88 MPa, %5, %10 ve %15 içeriklerinde ise sırasıyla 3,52 MPa, 3,77 MPa, 3,25 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara bağlı olarak hacimce %5, %10 ve %15 oranlarında silis dumanı içeren numunelerin basınç dayanımları silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla sırasıyla %22,2, %30,9 ve %12,8 oranında azalmıştır.

Vermikülit/çimento hacimsel oranı 4,6 ve 8 olan numunelerin genelinde; silis dumanı katkılı numunelerin 900 °C sıcaklık etkisinden sonra basınç dayanımları, silis dumanı katkısız numunelere göre daha yüksek çıkmıştır. Silis dumanı ilavesinin basınç dayanımını belirgin miktarda artırdığı tespit edilmiştir.

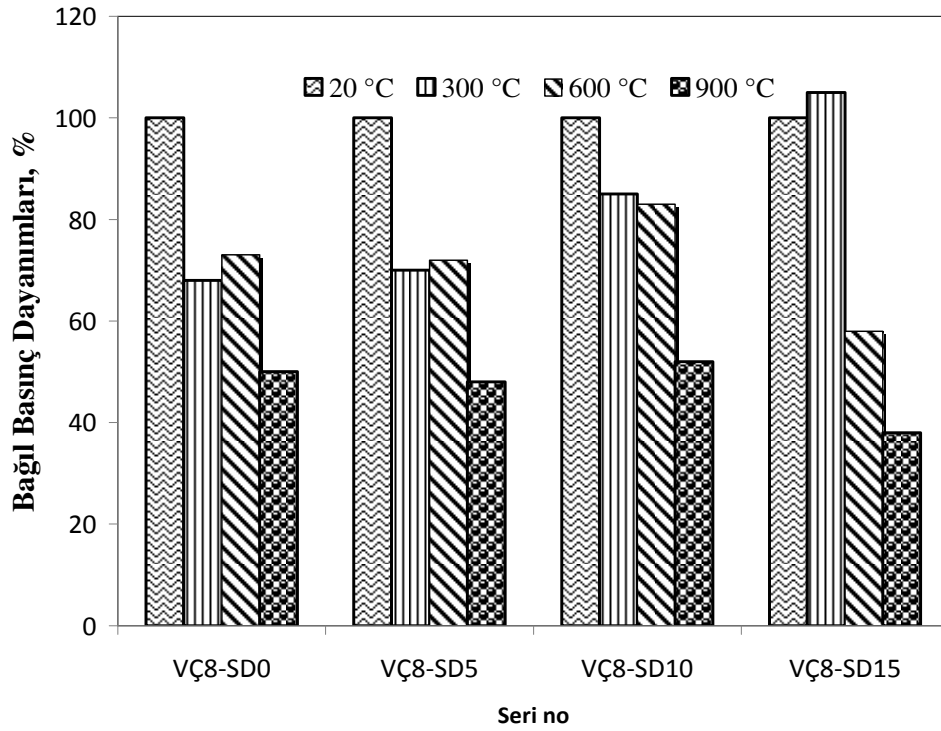
900°C sıcaklığa kadar test edilen numunelerin bağlı basınç dayanımları vermikülit/çimento hacimsel oranına göre Şekil 4.30, Şekil 4.31 ve Şekil 4.32’de gösterilmiştir.



Şekil.4.30. Vermikülit/çimento Oranı 4 Olan Numunelerin Bağıl Basınç Dayanımları



Şekil.4.31 Vermikülit/çimento Oranı 6 Olan Numunelerin Bağıl Basınç Dayanımları



Şekil.4.32 Vermikülit/çimento Oranı 8 Olan Numunelerin Bağıl Basınç Dayanımları

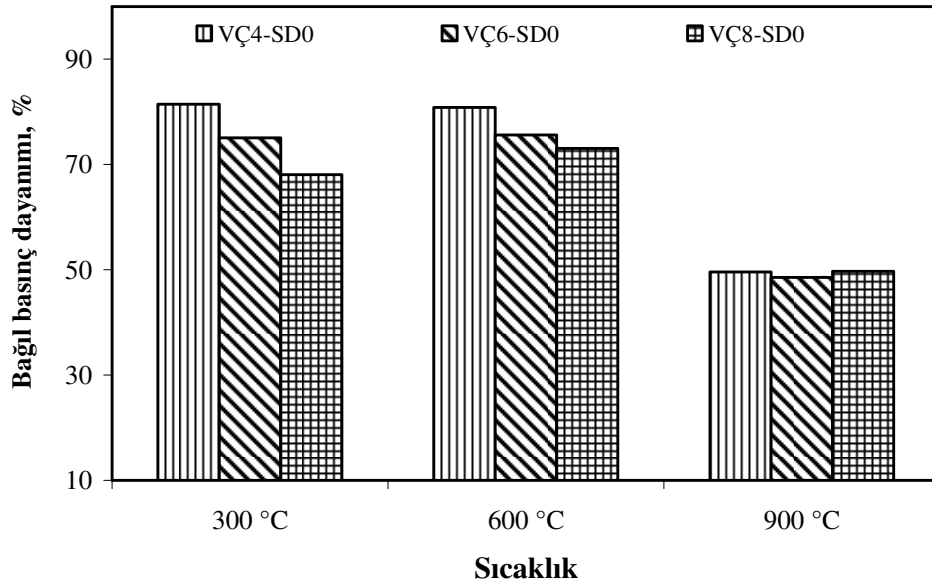
Vermikülit/çimento oranı 4 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklık uygulamasından sonra bağıl basınç dayanımları sırasıyla, silis dumanı içermeyen numuneler için %81, %81 ve %50 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde silis dumanı içeriği %5 olan numuneler için %88, %101 ve %71, silis dumanı içeriği %10 numuneler için %80, %55 ve %51, silis dumanı içeriği %15 olan numuneler için %110, %71 ve %66 olarak belirlenmiştir.

Vermikülit/çimento oranı 6 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklık uygulamasından sonra bağıl basınç dayanımları sırasıyla, silis dumanı içermeyen numuneler için %75, %76 ve %49 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde silis dumanı içeriği %5 olan numuneler için %81, %85 ve %57, silis dumanı içeriği %10 numuneler

için %99, %80 ve %57, silis dumanı içeriği %15 olan numuneler için %90, %62 ve %25 olarak belirlenmiştir.

Vermikülit/çimento oranı 8 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklık uygulamasından sonra bağıl eğilme dayanımları sırasıyla, silis dumanı içermeyen numuneler için %68, %73 ve %50 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde silis dumanı içeriği %5 olan numuneler için %70, %72, %48, silis dumanı içeriği %10 numuneler için %85, %83 ve %52, silis dumanı içeriği %15 olan numuneler için %105, %58 ve %38 olarak belirlenmiştir.

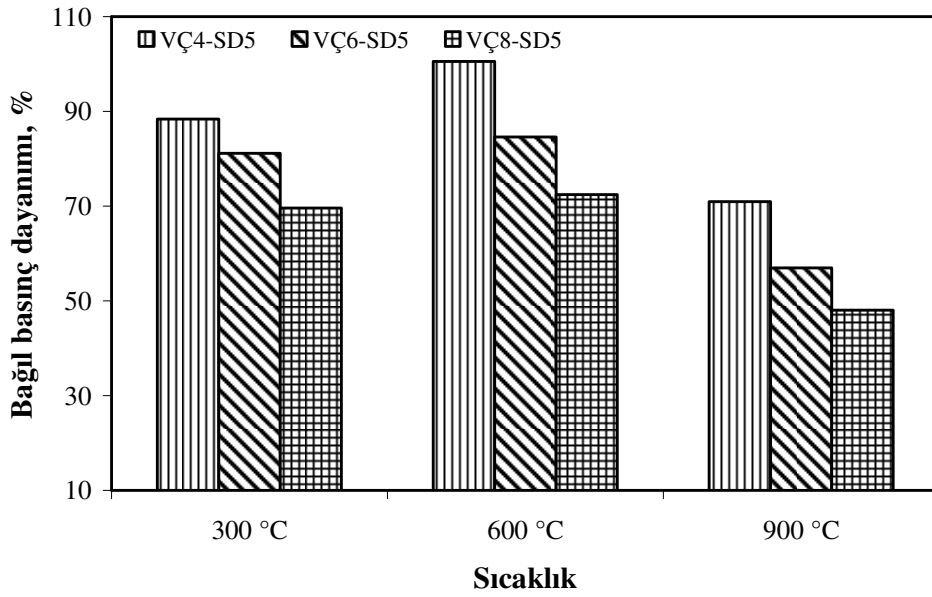
Vermikülit/çimento oranlarına göre silis dumanı içeriğinin ve sıcaklığın bağıl eğilme dayanımı üzerindeki etkisi Şekil 4.33- Şekil 4.36'da verilmektedir.



Şekil 4.33. Sıcaklığın Bağıl Basınç Dayanıma Etkisi (Silis Dumanı İçeriği=%0)

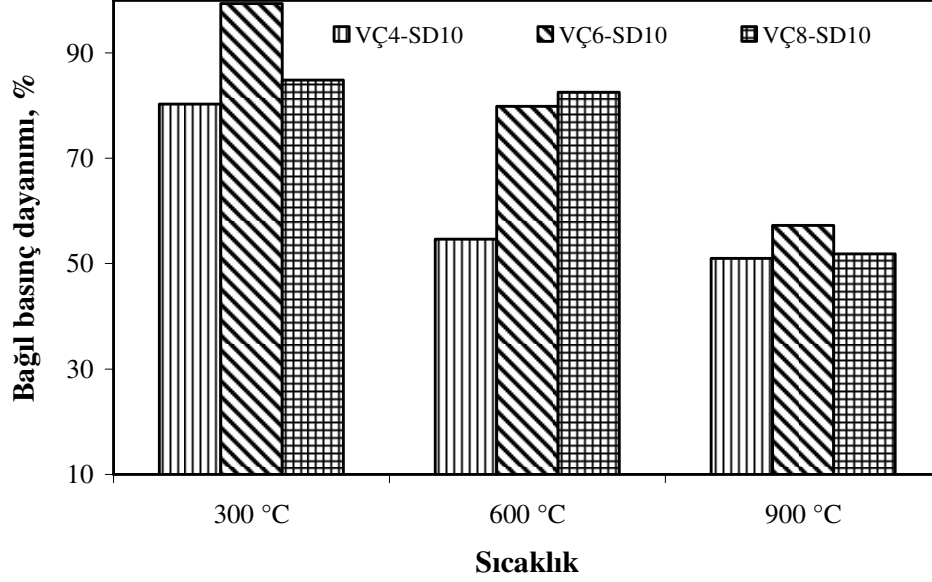
Silis dumanı içermeyen numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki basınç dayanımları, 20°C sıcaklığa tabi tutulan silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı ile karşılaştırılmıştır. 300°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4,

VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla %18, %25 ve %32 azalmıştır. 600°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla %19, %24, %27 oranında azalmıştır. 900°C sıcaklığa tutulan numunelerin basınç dayanımları VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serileri için sırasıyla %50, %51 ve %50 oranında azalmıştır.



Şekil 4.34. Sıcaklığın Bağıl Basınç Dayanıma Etkisi (Silis Dumanı İçeriği=%5)

Silis dumanı içeriği %5 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki basınç dayanımları, 20°C sıcaklığa tabi tutulan silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı ile karşılaştırılmıştır. 300°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla %12, %19 ve %30 azalmıştır. 600°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla %1 artmış, %15 ve %28 oranlarında azalmıştır. 900°C sıcaklığa tutulan numunelerin basınç dayanımları VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serileri için sırasıyla %29, %43 ve %52 oranında azalmıştır.

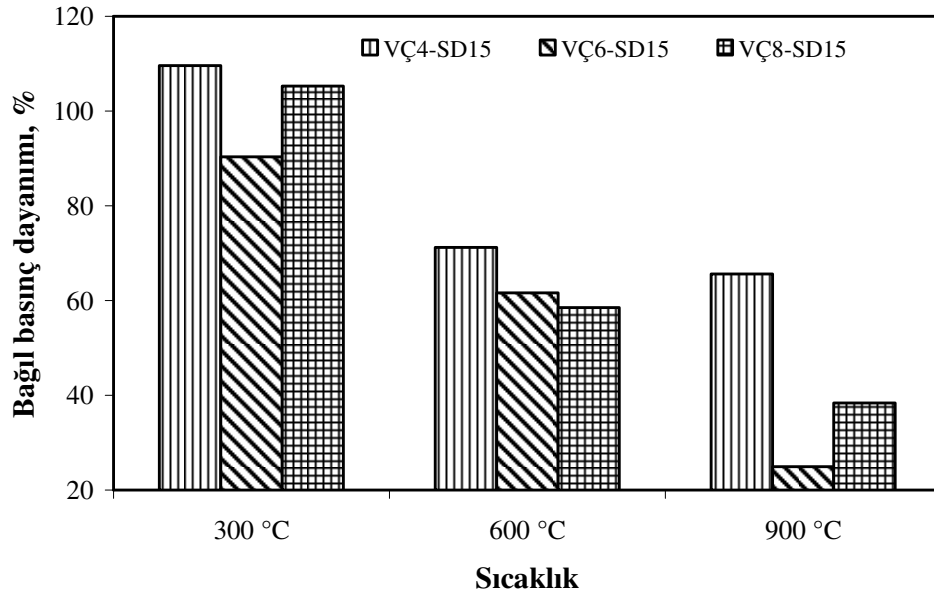


Şekil 4.35. Sıcaklığın Bağıl Basınç Dayanıma Etkisi (Silis Dumanı İçeriği=%10)

Silis dumanı içeriği %10 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki basınç dayanımları, 20°C sıcaklığa tabi tutulan silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı ile karşılaştırılmıştır. 300°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla %20, %1 ve %15 azalmıştır. 600°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla %45, %20 ve %17 oranlarında azalmıştır. 900°C sıcaklığa tabi tutulan numunelerin basınç dayanımları VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serileri için sırasıyla %51, %43 ve %48 oranında azalmıştır.

Silis dumanı içeriği %15 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki basınç dayanımları, 20°C sıcaklığa tabi tutulan silis dumanı içermeyen numunelerin basınç dayanımı ile karşılaştırılmıştır. 300°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla %10 artmış, %45 ve %10 azalmıştır. 600°C sıcaklığa tabi tutulan VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serisi numunelerinin basınç dayanımları sırasıyla %29, %38 ve %42 oranlarında azalmıştır.

900°C sıcaklığa tutulan numunelerin basınç dayanımları VÇ4, VÇ6 ve VÇ8 serileri için sırasıyla %34, %75 ve %62 oranında azalmıştır.

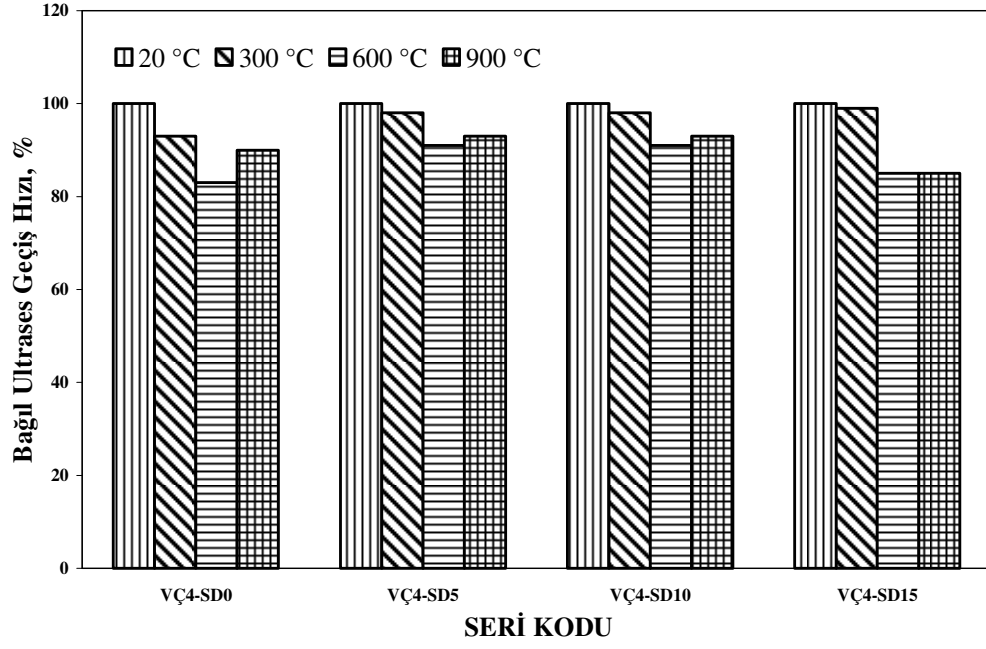


Şekil 4.36. Sıcaklığın Bağıl Basınç Dayanıma Etkisi (Silis Dumanı İçeriği=%15)

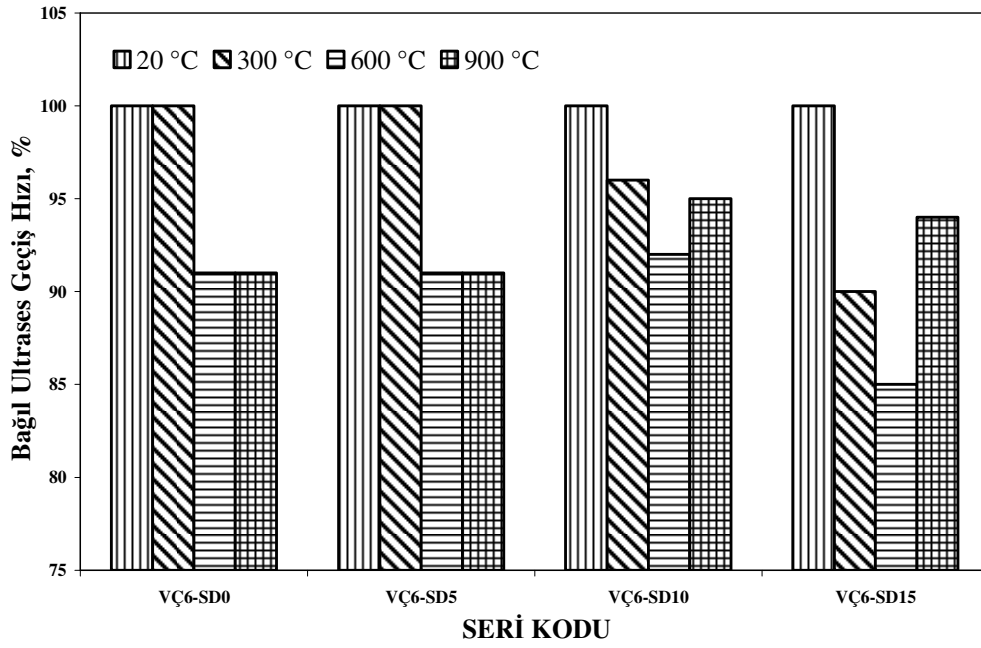
4.2.4.Ultrases Geçiş Hızı

Sıcaklık uygulamasından sonra üretilen numunelerin ultrases geçiş hızlarında azalmalar meydana gelmiştir. Üretilen numunelerin bağıl ultrases geçiş hızları Şekil 4.37-4.47’de verilmektedir.

Vermikülit/çimento oranı 4 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklık uygulamasından sonraki ultrases geçiş hızları, 20°C sığağa tabi tutulan VÇ4 serisi numunelerinin ultrases geçiş hızları ile karşılaştırılmıştır. Silis dumanı içermeyen numunelerin ultrases geçiş hızları 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ultrases geçiş hızları sırasıyla %7, %17 ve %10 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, silis dumanı içeriği %5 olan numunelerin ultrases geçiş hızları %2, %9 ve %7,



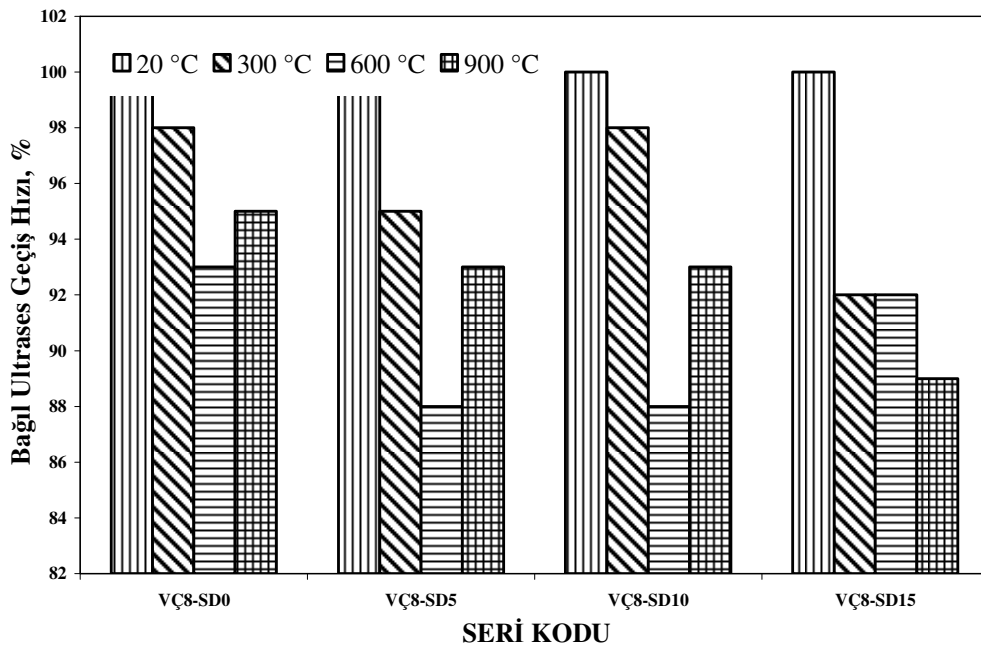
Şekil 4.37. VÇ4 Serisi Numunelerinin Bağlı Ultrases Geçiş Hızları



Şekil 4.38. VÇ6 Serisi Numunelerinin Bağlı Ultrases Geçiş Hızları

silis dumanı içeriği %10 olan numunelerin ultrases geçiş hızları %2, %9 ve %7, silis dumanı içeriği %15 olan numunelerin ultrases geçiş hızları %1, %15 ve %15 oranında azaldığı belirlenmiştir.

Vermikülit/çimento oranı 6 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklık uygulamasından sonraki ultrases geçiş hızları, 20°C sıcaklıktaki VÇ6 serisi numunelerinin ultrases geçiş hızları ile karşılaştırılmıştır. Silis dumanı içermeyen numunelerin ultrases geçiş hızlarında 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonra sırasıyla %0, %9 ve %9 azalma gözlenmiştir. Benzer şekilde, silis dumanı içeriği %5 olan numunelerin ultrases geçiş hızlarının sırasıyla %0, %9 ve %9, silis dumanı içeriği %10 için sırasıyla %4, %8 ve %5 ve silis dumanı içeriği %15 için ise %10, %15 ve %6 oranında azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.39. VÇ8 Serisi Numunelerinin Bağlı Ultrases Geçiş Hızları

Vermikülit/çimento oranı 8 olan numunelerin 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklık uygulamasından sonraki ultrases geçiş hızları, 20°C sığağa tabi tutulan VÇ8 serisi numunelerinin ultrases geçiş hızları ile karşılaştırılmıştır. Silis dumanı içermeyen

numunelerin ultrases geçiş hızları 300°C, 600°C ve 900°C sıcaklığa tabi tutulduktan sonraki ultrases geçiş hızları sırasıyla %2, %7 ve %5 oranında azalmıştır. Benzer şekilde, silis dumanı içeriği %5 olan numunelerin ultrases geçiş hızları %5, %12 ve %7, silis dumanı içeriği %10 olan numunelerin ultrases geçiş hızları %2, %12 ve %7, silis dumanı içeriği %15 olan numunelerin ultrases geçiş hızları %8, %8 ve %11 oranında azaldığı belirlenmiştir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Genleştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen silis dumanı takviyeli çimento esaslı kompozitler üzerinde yapılan deneysel çalışmaya bağı olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Üretilen numunelerin kuru birim ağırlıkları $780-1200 \text{ kg/m}^3$, poroziteleri %28,9-39,5 arasında değiştiğı belirlenmiştir. Karışımlarda genleştirilmiş vermikülit miktarının artışı ile numunelerin kuru birim ağırlık değeri azalmaktadır. Bunun yanında, silis dumanı kullanılmasıyla harçların kuru birim ağırlıklarında %3,33-14,48 arasında artış elde edilmiştir.

Yüksek sıcaklık uygulaması ile numunelerin basınç ve eğilme dayanımlarında genel olarak azalmalar gözlenmiştir. Sıcaklığa tabi tutulmayan numunelerin basınç dayanımları 5,79 MPa-13,46 MPa ve eğilme dayanımları 1,30 MPa-4,05 MPa arasında değişmektedir.

Harçlara silis dumanı ilave edilmesiyle elde edilen numunelerin eğilme dayanımında, silis dumanı içermeyen numunelere kıyasla %26,9-62,31 aralığında azalma gözlenmiştir. Eğilme dayanımdaki en büyük düşüş vermikülit/çimento oranı 6 ve %15 silis dumanı içeren harçlarda %62,31 olarak elde tespit edilmiştir. Silis dumanı içermeyen numunelerde ise en yüksek eğilme dayanımı değeri vermikülit/çimento oranı 4 olan numunelerde elde edilmiştir.

900°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin eğilme dayanımdaki en az kayıp vermikülit/çimento oranı 4 ve silis dumanı olmayan numunelerde gözlenmiş ve dayanım kaybı % 4,3 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, 900°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerde eğilme dayanım kaybının en fazla olduğu numuneler ise vermikülit/çimento oranı 8 ve silis dumanı içeriğı %10 olan numunelerde gözlenmiş ve dayanım kaybı %34 olarak tespit edilmiştir

900°C sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımdaki en fazla kayıp vermikülit/çimento oranı 6 ve silis dumanı oranı %15 olan numunelerde gözlenmiş ve dayanım kaybı %75 olarak belirlenmiştir. Buna karşılık, 900°C sıcaklığa maruz bırakılan basınç dayanımdaki en az kayıp ise vermikülit/çimento oranı 8 ve silis dumanı oranı %15 olan numunelerde gözlenmiş ve dayanım kaybı %38 olarak belirlenmiştir.

Sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin, sıcaklığa tabi tutulmayan numunelere kıyasla içyapıda meydana bozulmalar nedeniyle, ultrases geçiş hızlarında azalma tespit edilmiştir. Sıcaklığa maruz bırakılan numuneler üzerinde gözle yapılan inceleme sonucunda, numunelerde aşırı çatlak, kırılma ve kopma gibi bozulmalar gözlenmemiştir.

Ülkemizde yeterli sayıda araştırma ve uygulama alanı bulunmayan geliştirilmiş vermikülitin, çimento ve diğer bağlayıcılar ile birlikte kullanılarak yalıtım ve ısıya dayanıklı yapı malzemesi üretiminde kullanılmasıyla ilgili araştırmalara ihtiyaç vardır. Farklı bağlayıcı malzemeler kullanılarak üretilecek geliştirilmiş vermikülit içeren malzemelerin, ısıl iletkenlik ve radyasyon geçirimsiği konularında araştırma yapılması yapı malzemesi ve diğer sanayi sektörleri için yararlı çalışmalar sağlayabilir.

KAYNAKLAR

1. Taşdemir M.A., Taşıyıcı Hafif Agregalı Betonların Elastik ve Elastik Olmayan Davranışları., Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1986.
2. İlgün A.K., Hafif Betondan İmal Edilmiş Kirişlerin Dayanım ve Davranışı. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Konya, 1992
3. Kocaman B., Doğu Anadolu Bölgesi'nde Doğal Hafif ve Normal Agregalarla Üretilen Betonların Fiziksel Mekanik ve Isı İletkenlik Özelliklerinin Belirlenmesi ile Tarımsal Yapılarda Kullanılma Olanakları üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2000.
4. Durmuş, A. ve Aytekin, M., , Betonarme İnşaatta Hafif Betonlar, TMMOB Haber Bülteni , İzmir 12-15, 1986.
5. National Ready Mixed Concrete Association, CIP 36, 2003.
6. Aydın S., Baradan B., (2003), Yüksek Sıcaklığa Dayanıklı Geliştirilmesi, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, sayfa 451-460, 2003.
7. Şimşek O., Beton ve Beton Teknolojisi, Seçkin Yayınevi, Ankara, 2007.
8. Mahsanlar N., Yüksek Sıcaklık Etkisinde Beton Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Üniversitesi , Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
9. Akol C., Genleştirilmiş Vermikulit İçeren Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisindeki Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 2010.

10. Yeğınobalı A., Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, , Ankara, Nisan 2007
11. Yılmaz, A., Antalya Ferrokrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cürufıların ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya, 2002.
12. Eti Metalurji A.Ş Web Sitesi. <http://www.etimet.com/default.asp?lang=TR> , Mayıs 2011
13. Özbek, R., Silis Dumanın Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
14. Değirmenci A., Silis Dumanı Katkısının Betonarme Çeliğı Korozyonuna Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniveristesi, Ankara, 2006.
15. Akçaözoğı K., Silis Dumanı İçeren Yüksek Dayanımlı Harçlarda Numune Boy Değışiminin Basınç Dayanımı ve Birim Kısılma Üzerine Etkisi, Çukurova Üniverisitesi, Adana 2007.
16. Özcan F., Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve Hızlandırılmış Kür İle Dayanım Tahmini , Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2005.
17. Toğçu İ, Canbaz M., Antalya Etibank Metalurji İşletmesi Atığı Silis Dumanının Hazır Betonda Kullanımı, Makale.
18. P.K. Mehta and P.C. Aitcin, , Principles Underlying Production of High-Performance Concrete, Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, pp. 70-78. 1990.
19. Kaval M., Silis Dumanının Hazır Betonda Kullanımının Optimizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2000.

20. Ekinli C.E., Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Silis Dumanlarının Çimento ve Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ, 1995.
21. Demir A., Silis Dumanı İçeren Betonların Hızlandırılmış Kür İle Dayanım Tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, 2005.
22. Ivanov, Y.P., Reshevelov, T.T., The Effect of Condensed Silica Fume on the Rheological Behavior of Cement Pastes. International Conference on Rheological Behavior of Cement Pastes. Liverpool, pp. 23-26. 1990.
23. Khayat, K. H., Aitcin, P.C., Silica Fume in Concrete: An Overview. Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. Proceedings Fourth International Conference (V. M. Malhotra editör). ACI-SP-132, İstanbul, Turkey. pp. 835-872, 1992.
24. Taşdemir C., Mikrofiller Malzemelerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkıları Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.199-208, 1996.
25. Malhotra, V.M., 1993. Fly Ash, Slag, Silica Fume and Rice-Husk Ash in Concrete: A Review. Concrete International, Vol. 15, No. 4, pp. 23-28.
26. Taşdemir C., Akyüz S., Taşdemir M.A., Koca C., Silis Dumanı İçeren Yüksek Mukavemetli Betonların Basınç Altındaki Davranışı. 3. Ulusal Beton Kongresi Hazır Beton Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, s.175-187, 1994.
27. Jähren P., Use of Silica Fume in Concrete. ACI Sp Publication SP-79, Detroit, s.625-645, 1993.
28. Şimşek O., Yapı Malzemesi II. Ankara Üniversitesi Basımevi, Ankara, s.2-90, 2000.

29. Khayat, K.H., Aitcin, P.C Silica Fume in Concrete: an Overview. ACI Sp Publication S132, Detroit, pp.835-872. ,1992.
30. Carrette, G.G., Malhotra V.M., Aitcin, P.C.,. Preliminary Data on Long-Term Strength Development of Condensed Silica Fume Concrete. Canmet Int. Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, Montreal. 1987.
31. Khayat K.H., Aitcin P.C., Silica Fume in Concrete: an Overview. ACI Sp Publication S132, Detroit, pp.835-872, 1992.
32. CCarette, G.G., Malhotra V.M., Aitcin, P.C., Preliminary Data on Long-Term Strength Development of Condensed Silica Fume Concrete. Canmet Int. Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, Montreal. 1987.
33. Aitcin P.C., Laplante P., Long-Term Compressive Strength of Silica Fume Concrete. J. Materials in Civil Engineering, 3, pp.164-170, 1990.
34. Yeğınobalı A, Silis Dumanının Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması, Sempozyumu Bildirileri, Ankara, sayfa 149-167,1993.
35. Yeğınobalı A. Erdoğan K., Çimento ve Betonda Mineral Katkılar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Çimento ve Beton Araştırma- Geliştirme Enstitüsü Seminer Notları 4, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, sayfa 18, 1999.
36. ShannagM.J., High Strength Concrete Containing Natural Pozzolan and Silica Fume. Cement & Concrete Composites, v.22, pp.399-406, 2000
37. Zhang, M.H ve Gjirv, O.E “ Charateristic of lightweight aggregates for high strength concretes”, ACI Materials Journal, v.88, n.2, pp 150-158, 1991.

38. Yogendran, V. Langan, B.W., Haque, M.N., Ward, M.A. Silica Fume in High Strength Concrete. ACI Materials Journal, Detroit, 84 (2), pp.124- 129, 1987.
39. Ekinci C.E., Antalya Etibank Elektrometalurji İşletmesi Silis Dumanlarının Çimento ve Betonda Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi, , Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, sayfa 204, 1995.
40. Khayat, K.H ve Aitcin P.C., Silica fume in concrete:an overview, CI SP-132,835 865, American Concrete Institute, Detroit, 1992.
41. Helland, S., hoff,A. ve Einstabland,T., high strength concrete, Norsk Betongdagr semineri, Trondheim, Norway, 1983.
42. Cong, X ve diğerleri, “ Role of silica fume in compressive strength of cement paste mortar and concrete”, ACI materials Jorunal, v.89, n.4, 375-387, 1992.
43. ACI Committee 234, Guide for the use of silica fume in concrete, American Concrete Institute, Farmington Hilss, 2000.
44. Aköz, F., Yüzer N. ve Koral S., Silis dumanı katkılı ve katkısız harçlara Sodium klorür ve Magnezyum Klorürün Etkileri”, 4. Ulusal Beton Kongresi, Bildiriler kitabı, , İMO, İstanbul, sayfa 305-316,1996
45. Mehta, P.K., Studies on chemical resistance of low water /cement ratio concretes, Cement and Concrete Research, v.15, n.6, pp 696-978, 1985.
46. 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.

47. Toksoy, F. Vermikülit: Mineraloji, Jeolojik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye'deki Durumu, Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, Türkiye
48. Wikipedia.org web sitesi. <http://tr.wikipedia.org/wiki/Vermik%C3%BClit>, Mayıs 2011
49. 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.
50. <http://www.marbleport.com/dogal-kaynaklar/63/vermikulit>, Mayıs 2011
51. http://grow.ars-informatica.ca/grow_topic.php?subject=med4, Mayıs 2011
52. Dolares M, Chemical and structural evolution of metamorphic vermiculite. Spain Vol. 44, pp. 249-265, 2006
53. Singer, A., Stoffer, P. Hydrothermal Vermiculite from the Atlantis II Deep, Red Sea. Clays and Clay Minerals, 29(6), pp 454-458, 1981.
54. <http://www.enotes.com/how-products-encyclopedia/vermiculite>, Mayıs 2011
55. <http://www.madehow.com/Volume-6/Vermiculite.html>, Mayıs 2011
55. Erseçen, S.. Dünya'da ve Türkiye'de Vermiculite : MTA Genel Müdürlüğü Yayinlari, sayfa 19, 1992.
57. World Mineral Production.British Geological Survey., Keyworth, Nothingam. 2010.
58. IRUE National center of marketing and price study.

59. 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.
60. Strand, P. R., Vermiculite, Industrial Minerals And Rocks, ed: Lefond S. J.Vol: 2, 1983.
61. Harben, P. W., Kuzvart, M. Industrial Minerals, Global Geology. Ind. Mins. Inf. Ltd. Metal Bulletin, Pic, 462 p., London, 1996.
62. <http://www.vermiculite.org/Properties6.php>, Mayıs 2011
63. Evans, A.M., Ore Geology and Industrial Minerals : An Introduction. 3rd Ed. Blackwell Scientific Publications, London, Edinburg, pp 390, Boston, 1993..

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet KAYA, 1972 yılında Yozgat'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Yozgat'ta tamamladı. 1989 Yılında Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü kazandı. 1993 yılında İnşaat Mühendisi olarak mezun oldu. 2009 yılında Maltepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü'nde İşletme Yüksek Lisansını (MBA) tamamladı.

Askerlik hizmetini 1994-1996 yılları arasında Cizre'de Yedek Subay olarak yaptı. 1996 yılından itibaren Yozgat'ta, Yozgat Belediyesi ve Yozgat İl Özel İdaresi ortaklığı olan YBK İnşaat Temizlik Ticaret Ltd. Şti' nde, çeşitli projelerde şantiye şefi olarak çalıştı. Yarı zamanlı olarak bazı şirketlerde proje koordinatörlüğü ve teknik danışmanlık yaptı. 1999 yılından beri aynı işletmede, şirket müdürü olarak çalışmaktadır. Halen Bozok Üniversitesi Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü'nde betonarme, beton teknolojisi ve yapı malzemesi derslerinde, üniversite dışından öğretim elemanı olarak görev almaktadır.

Mehmet KAYA, evli ve iki çocuk sahibidir.

İletişim Bilgileri

Adres : YBK İnşaat Ltd. Şti. Lise Cad. Abide İşhanı Kat 2 No 3

66100 YOZGAT

Telefon: (354) 212 36 60

Faks: (354) 212 76 75

GSM: (532) 434 12 77

E-posta: memmetk@gmail.com