

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

Yüksek Lisans Tezi

**GENLEŞTİRİLMİŞ VERMİKÜLİT KULLANILARAK
ÜRETİLEN KÖPÜK BETONLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Ali Can TÜREYEN

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

Yozgat 2019

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

Yüksek Lisans Tezi

**GENLEŞTİRİLMİŞ VERMİKÜLİT KULLANILARAK
ÜRETİLEN KÖPÜK BETONLARIN FİZİKSEL VE
MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Ali Can TÜREYEN

Tez Danışmanı
Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

Yozgat 2019

T.C.
YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEZ ONAYI

Enstitümüzün İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı 70110716001 numaralı öğrencisi Ali Can TÜREYEN'in hazırladığı "Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Köpük Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezi ile ilgili TEZ SAVUNMA SINAVI, Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği uyarınca 11/09/2019 Çarşamba günü saat 10:00'da yapılmış, tezin onayına ~~OY ÇOKLUĞU~~ / OY BİRLİĞİYLE karar verilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi İsmail İsa ATABEY

Üye : Prof. Dr. Fuat KÖKSAL (Danışman)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet KAYA

ONAY:

Bu tezin kabulü, Enstitü Yönetim Kurulu'nun 17.09.2019 tarih ve 44 sayılı kararı ile onaylanmıştır.

17.09/2019

Prof. Dr. Mustafa SACMACI



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iii
ABSTRACT	iv
TEŞEKKÜR	v
TABLolar LİSTESİ	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ	viii
KISALTMALAR LİSTESİ	xiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI	3
2.1 Hafif Beton	3
2.1.1 Hafif Betonların Sınıflandırılması	4
2.1.2 Hafif Agregaların Sınıflandırılması	7
2.2. Vermikülit.....	8
2.2.1. Tanımı ve Sınıflandırma	8
2.2.2. Üretim Metodu ve Teknolojisi	11
2.2.3 Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Harçlar ve Betonlar	12
2.3 Köpük Beton.....	17
2.3.1 Köpük Ajanı	18
2.3.2. Köpük Betonun Fiziksel Özellikleri	20
2.3.2.1 Birim Ağırlık	20
2.3.2.2 Porozite ve Gözenek Yapısı	20
2.3.2.3 Su emme ve Kılcal Geçirimsizlik	23
2.3.2.4 Isıl İletkenlik.....	24
2.3.2.5 Yangın Dayanımı	25
2.3.2.6 Ses Yalıtımı	26
2.3.3. Köpük Betonun Mekanik Özellikleri.....	26
2.3.3.1 Basınç Dayanımı.....	27

2.3.3.2 Elastik Modül	29
2.4 Köpük Betonun Kullanım Alanları	29
3. DENEYSEL ÇALIŞMA	35
3.1 Kullanılan Malzemeler	35
3.1.1. Çimento	35
3.1.2. Silis Dumanı	36
3.1.3 Genleştirilmiş Vermikülit.....	37
3.1.4 Köpük Ajanı	40
3.1.5. Karışım Suyu	41
3.2 Karışım Oranları ve Üretim	41
3.2.1 Numune Üretimi	44
3.3. Deneyler.....	48
3.3.1 Birim Ağırlık Deneyi	48
3.3.2 Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Deneyleri.....	48
3.3.3 Kılcal Su Emme Deneyleri.....	51
3.3.4 Ultrases Geçiş Hızlarının Belirlenmesi.....	52
3.3.5 Basınç Dayanımı Deneyleri	53
3.3.6 Isıl İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi.....	56
4. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRİLMESİ	57
4.1 Taze Birim Ağırlık	57
4.2 Kuru Birim Ağırlık.....	63
4.3 Su Emme	72
4.4 Görünen Porozite	78
4.5 Kılcal Su Emme	85
4.6 Ultrases Geçiş Hızı.....	91
4.7 Basınç Dayanımı	98
4.8 Isıl İletkenlik	107
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	115
KAYNAKLAR.....	117
ÖZGEÇMİŞ.....	124

GENLEŞTİRİLMİŞ VERMİKÜLİT KULLANILARAK ÜRETİLEN KÖPÜK BETONLARIN FİZİKSEL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Ali Can TÜREYEN

Yozgat Bozok Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

2019; Sayfa:124

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

ÖZET

Bu çalışma geliştirilmiş vermikülit tozu kullanılarak üretilen köpük betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılmasını kapsamaktadır. Köpük beton üretiminde 3 farklı çimento miktarı, 3 farklı geliştirilmiş vermikülit tozu miktarı ve 3 farklı köpük miktarı değişken olarak alınmıştır ve toplamda 27 seri köpük beton üretimi yapılmıştır. Üretilen köpük betonlar laboratuvar ortamında kür edilmiş ve 28 günlük kür sonrası numuneleri üzerinde fiziksel özelliklerin belirlenmesi için birim ağırlık, su emme, porozite, kılcal su emme, ultrases geçiş hızı ve ısıl iletkenlik deneyleri, mekanik özelliklerin belirlenmesi için ise eksenel basınç deneyi yapılmıştır.

Deney sonuçlarına bağlı olarak karışımlarda köpük oranı ve geliştirilmiş vermikülit oranı artıkça birim ağırlığın belirgin şekilde azaldığı, su emme oranı ve porozitenin belirgin şekilde arttığı, buna karşılık basınç dayanımının azaldığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde, köpük oranı ve geliştirilmiş vermikülit oranı artıkça ısıl iletkenlik katsayısının azaldığı sonucuna varılmıştır. En düşük kuru birim ağırlık 405 kg/m^3 , en yüksek su emme ve porozite sırasıyla değeri %75,2 ve %40,3 en düşük ısıl iletkenlik katsayısı ise $0,063 \text{ W/m.K}$ olarak elde edilmiştir. Köpük betonların basınç dayanımları ise $0,47\text{-}3,49 \text{ MPa}$ arasında elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Köpük beton, vermikülit, porozite, basınç dayanımı

**PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF FOAMED CONCRETE
PRODUCED BY USING EXPANDED VERMICULITE**

Ali Can TÜREYEN

Bozok University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

2019; Page:124

Thesis Supervisor: Prof. Fuat KÖKSAL

ABSTRACT

This thesis concerns the investigations of physical and mechanical properties of foamed concrete produced by using expanded vermiculite powder. In the experimental study, 3 different dosages for each ingredients of cement, expanded vermiculite powder and foam were taken as independent parameters and totally 27 series of foamed concrete were produced. After specimens were cured on laboratory condition until 28 days, tests such as unit weight, water absorption, porosity, capillary absorption, ultrasound velocity and thermal conductivity for physical properties, and axial compression strength test for mechanical property were carried on foam concrete specimens.

As a result of experimental study, a significant decrease on dry unit weight, and a significant increases in water absorption and porosity were obtained by increasing of expanded vermiculite powder and/or foam. On the other hand, compressive strength was decreased by increasing of expanded vermiculite powder and/or foam. Similarly, thermal conductivity was decreased due to the increases in expanded vermiculite powder and/or foam. The lower dry density to be obtained was 405 kg/m^3 , higher water absorption and porosity were %75,2 ve %40,3 respectively. Minimum thermal conductivity coefficient was obtained as 0,063 W/m.K. Compression strengths of foamed concrete specimens changed between 0,47-3,49 MPa.

Keywords: Foamed concrete, vermiculite, porosity, compressive strength

TEŞEKKÜR

Öncelikle çalışmalarım boyunca bilgi ve tecrübesi ile bana her konuda yardımcı olan, yol gösteren çok değerli danışman hocam Prof. Dr. Fuat KÖKSAL'a en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.

Eğitim ve öğretim hayatım boyunca iyi bir eğitim ve öğretim almam için bana her zaman destek olan kıymetli lise biyoloji öğretmenim Meltem KÖKSAL hocama teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimimin ders aşamasından tezimin tamamlanmasına kadar geçen süre içerisinde her çalışmamda yardımcı olan değerli arkadaşım Öğretim Görevlisi Elif Tuğçe KOCABEYOĞLU'na, desteğini ve yardımlarını esirgemeyen değerli Dr. Öğr. Üyesi Polat ÖZYİĞİT hocama, Bozok Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde görev yapan değerli hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Maddi ve manevi her zaman bana destek olan ve daima yanımda olan beni yalnız bırakmayan canım babam Cemal TÜREYEN'e, en büyük destekçim olarak dualarını benden esirgemeyen kıymetli annem Aysel TÜREYEN'e ve her konuda bana destekçi olan yoluma ışık tutan ağabeyim Hasan TÜREYEN'e teşekkür ederim.

TABLolar LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2. 1 Hafif Betonların Sınıflandırılması.....	5
Tablo 2. 2 Hafif Beton Sınıfları [12].....	7
Tablo 2. 3 Ticari Değerleri Olan Vermikülitin Kimyasal Analizleri [24]	9
Tablo 2. 4 Köpük Betonun Elastisite Modülünü Hesaplamak İçin Denklemler [2]..	29
Tablo 3. 1 CEM I 42,5 R Portland Çimentosunun Özellikleri	35
Tablo 3. 2 Çalışmada Kullanılan Silis Dumanının Özellikleri.....	36
Tablo 3. 3 Genleştirilmiş Vermikülitin Fiziksel Özellikleri.....	38
Tablo 3. 4 Genleştirilmiş Vermikülitin Kimyasal Özellikleri	39
Tablo 3. 5 Öğütülmüş Genleştirilmiş Vermikülitin Tane Boyut dağılımı	39
Tablo 3. 6 Köpük Betonun Karışım Miktarları (kg/m ³).....	42
Tablo 3. 7 Köpük Betonun Hacimsel Olarak Karışım Oranları	43
Tablo 4. 1 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Taze Birim Ağırlık Deney Sonuçları	57
Tablo 4. 2 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Taze Birim Ağırlık Deney Sonuçları	59
Tablo 4. 3 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Taze Birim Ağırlık Deney Sonuçları	61
Tablo 4. 4 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlık Deney Sonuçları	63
Tablo 4. 5 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlık Deney Sonuçları	65
Tablo 4. 6 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlık Deney Sonuçları	68
Tablo 4. 7 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Su Emme Deney Sonuçları	72
Tablo 4. 8 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Su Emme Deney Sonuçları	74
Tablo 4. 9 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Su Emme Deney Sonuçları	76
Tablo 4. 10 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Görünen Porozite Sonuçları.....	79

Tablo 4. 11 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Görünen Porozite Sonuçları.....	81
Tablo 4. 12 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonun Görünen Porozite Sonuçları.....	83
Tablo 4. 13 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kılcal Su Emme Katsayısı Sonuçları	85
Tablo 4. 14 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kılcal Su Emme Katsayısı Sonuçları	87
Tablo 4. 15 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kılcal Su Emme Katsayısı Sonuçlar	89
Tablo 4. 16 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları	92
Tablo 4. 17 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları	94
Tablo 4. 18 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları	96
Tablo 4. 19 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	99
Tablo 4. 20 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	101
Tablo 4. 21 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	103
Tablo 4. 22 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Isıl İletkenlik Katsayısı Sonuçları	108
Tablo 4. 23 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Isıl İletkenlik Katsayısı Sonuçları	110
Tablo 4. 24 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Isıl İletkenlik Katsayısı Sonuçları.....	112

ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Hafif Betonların Sınıflandırılması [12].....	6
Şekil 2. 2 İşlenmemiş Ham Vermikülit [15].....	10
Şekil 2. 3 Elekten Geçirilmiş Ham Vermikülit.....	10
Şekil 2. 4 Genleştirilmiş Ham Vermikülit [30].....	12
Şekil 2. 5 Genleştirilmiş Vermikülit.....	12
Şekil 2. 6 Protein Esaslı Köpük Ajanı.....	18
Şekil 2. 7 Sentetik Esaslı Köpük Ajanı.....	19
Şekil 2. 8 Gaz Beton ve Köpük Birim Ağırlık- Basınç Dayanımı İlişkisi [77]	27
Şekil 2. 9 Köpük Beton İle Yol Kenarı Kazısı Dolgusu [84]	31
Şekil 2. 10 Köpük Beton Yol Alt Temel Uygulaması [85].....	31
Şekil 2. 11 Köpük Beton İle Kapatılmış Kanalizasyon Borusu [85].....	32
Şekil 2. 12 Hafif Köpük Beton Bina Taşıyıcı Duvarı [86]	32
Şekil 2. 13 Köpük Betonun Şap Uygulaması [86]	33
Şekil 2. 14 Köpük Betonun Çatı Yalıtım Uygulaması [86].....	33
Şekil 2. 15 Köprü Ayağı Dolgu Malzemesi Olarak Köpük Betonun Kullanılması [87]	34
Şekil 3. 1 Çalışmada Kullanılan Silis Dumanı.....	37
Şekil 3. 2 Genleştirilmiş Vermikülitin Öğütülmeden Önceki Hali	37
Şekil 3. 3 Genleştirilmiş Vermikülitin Öğütüldükten Sonraki Hali	38
Şekil 3. 4 Karışımda Kullanılan Reçine Esaslı Köpük Ajanı	40
Şekil 3. 5 Köpük Beton Kesme Makinası.....	44
Şekil 3. 6 Köpük Kesme Makinasıyla Kesilen Numuneler	44
Şekil 3. 7 Köpük Makinasından Basınçlı Hava Yardımıyla Üretilen Köpük	45
Şekil 3. 8 Köpük Betonun Üretim Aşaması [88]	46
Şekil 3. 9 Üretilen Silindir Numunelerinin Priz Alması için 1 Gün Kalıpta Bekletilmesi	46
Şekil 3. 10 Fiziksel Deneyler İçin Üretilen 200x200x500 mm ³ Numunelerin Priz Alması için 1 gün Kalıpta Bekletilmesi	47
Şekil 3. 11 28 Gün Laboratuvar Koşullarında Kür Edilen Üretilen Tüm Numune Grupları	47

Şekil 3. 12 Köpük Betonun Taze Ağırlığının Tartılması.....	48
Şekil 3. 13 70x70x70 mm ³ Numunenin Kuru Birim Ağırlığının Elektronik Terazide Tartılması	49
Şekil 3. 14 3 Gün Boyunca Su İçerisinde Muhafaza Edilen Numuneler.....	49
Şekil 3. 15 Suya Doygun Havadaki Ağırlığın Tartılması.....	50
Şekil 3. 16 Oda Sıcaklığında Kurumaya Bırakılan Deney Numuneleri.....	51
Şekil 3. 17 Kılcal Su Emme Deney Düzeyindeki Numuneler	52
Şekil 3. 18 Kılcal Su Emme Deney Düzeyindeki Numunelerin Belirli Aralıklarla Ölçülmesi	52
Şekil 3. 19 Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi.....	53
Şekil 3. 20 Tüm Deney Grubu Silindirler İçin Yapılan Başlıklar.....	54
Şekil 3. 21 Basınç Dayanımı Deney Düzeneği	54
Şekil 3. 22 Basınç Dayanımı Deney Sonrası Numunenin Kırılma Şekli	55
Şekil 3. 23 Hot-Wire Metodu İle Isıl İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi	56
Şekil 4. 1 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğu (K) Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi	58
Şekil 4. 2 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi	58
Şekil 4. 3 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	60
Şekil 4. 4 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi	60
Şekil 4. 5 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi	62
Şekil 4. 6 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi	62
Şekil 4. 7 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	64
Şekil 4. 8 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	64
Şekil 4. 9 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	66
Şekil 4. 10 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	67

Şekil 4. 11 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	69
Şekil 4. 12 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	69
Şekil 4. 13 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Taze Birim Ağırlıklarına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	70
Şekil 4. 14 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Taze Birim Ağırlıklarına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	71
Şekil 4. 15 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Taze Birim Ağırlıklarına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi.....	71
Şekil 4. 16 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi	73
Şekil 4. 17 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi	73
Şekil 4. 18 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi	75
Şekil 4. 19 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi.....	75
Şekil 4. 20 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi	77
Şekil 4. 21 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranının Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi.....	77
Şekil 4. 22 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi	79
Şekil 4. 23 Hacimce 48 Çimento Oranına sahip olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi...	80
Şekil 4. 24 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi	81
Şekil 4. 25 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğunun(K) ve V/Ç Oranına Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi	82
Şekil 4. 26 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranına ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi	83
Şekil 4. 27 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi...	84

Şekil 4. 28 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi	86
Şekil 4. 29 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğunun(K) ve V/Ç Oranına Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi.	86
Şekil 4. 30 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi.....	88
Şekil 4. 31 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi	88
Şekil 4. 32 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi.....	90
Şekil 4. 33 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi	90
Şekil 4. 34 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi	92
Şekil 4. 35 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi.....	93
Şekil 4. 36 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi.....	95
Şekil 4. 37 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi.....	95
Şekil 4. 38 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi.....	97
Şekil 4. 39 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi.....	97
Şekil 4. 40 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi	99
Şekil 4. 41 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi	100
Şekil 4. 42 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi	102
Şekil 4. 43 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi	102
Şekil 4. 44 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi	104
Şekil 4. 45 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi	104

Şekil 4. 46 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlıklarına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi	106
Şekil 4. 47 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlıklarına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi	106
Şekil 4. 48 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlıklarına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi	107
Şekil 4. 49 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi	108
Şekil 4. 50 Hacimce 48 Çimento İçeren Köpük Betonun Köpük Yoğunluğunun(K) V/Ç Oranının Göre Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi.....	109
Şekil 4. 51 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi	111
Şekil 4. 52 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi	111
Şekil 4. 53 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi	113
Şekil 4. 54 Hacimce 68 Çimento İçeren Köpük Betonun Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi	113

KISALTMALAR LİSTESİ

ASTM	: Amerikan Malzeme Testleri Birliği
RILEM	: Uluslararası Yapı Malzemeleri, Sistemleri ve Yapı Laboratuvarları ve Uzmanları
CEB	: Avrupa Beton Komitesi
TS	: Türk Standartı
EN	: Avrupa Standartı
V/Ç	: Vermikülit/Çimento Oranı
EPS	: Genleştirilmiş Polistren
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
XRD	: X-Işını Kırınım Yöntemi
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
MPa	: Megapaskal
E	: Elastik Modül
fc	: Basınç Dayanımı
W	: Kuru Birim Ağırlık
48Ç	: Hacimce 48 Çimento Oranı
58Ç	: Hacimce 58 Çimento Oranı
68Ç	: Hacimce 68 Çimento Oranı
36V	: Hacimce 36 Vermikülit Oranı
45V	: Hacimce 45 Vermikülit Oranı
54V	: Hacimce 54 Vermikülit Oranı
19K	: Hacimce 19 Köpük Oranı
25K	: Hacimce 25 Köpük Oranı
31K	: Hacimce 31 Köpük Oranı
µs	: Mikrosaniye
K.S.E.K	: Kılcal Su Emme Katsayısı

1.GİRİŞ

İstenilen yapının şekil ve boyutlarını sağlamlaştırmak için çimento, kum ve çakıl ya da iri agreganın su ile özenli bir şekilde karıştırılarak elde edilen taş gibi malzemeye beton denir [1]. Beton günümüzde en çok kullanılan yapı malzemesi olmasına karşın gelişen teknolojiyle birlikte ve kentsel yaşam alanlarının artmasının bir sonucu olarak küresel ısınmanın artması ve doğal enerji kaynaklarının sınırlı olması gibi etkenlerden dolayı birçok araştırmacı geleneksel betonun zayıf yönlerini güçlendirmek için araştırma çalışmaları yapmaktadır. Gelişen kimyasal katkı sektörünün yardımı ile çevreye duyarlı, daha az maliyetli, sıcak ve soğuk iklim bölgelerinde ses ve ısı yalıtımını sağlayan ve aynı zamanda deprem yüklerini azaltmak için daha düşük birim ağırlıklı olması gibi birçok özelliğe sahip hafif betonlar yapısal ve yalıtım amacıyla günümüz yapı sektöründe kullanılmaktadır.

Köpük beton, hücreli yapısında sayısız hava boşluğuna sahip, düşük birim hacim ağırlıklı, yüksek akışkan, sıkıştırma işlemi gerektirmeyen, yüksek poroziteli, ısı ve ses yalıtımı açısından avantajlı bir hafif beton türüdür. Köpük betonun patenti çok eski zamanlarda alınmış olmasına rağmen boşluk yapısının kararlılığının sağlanamamasından dolayı düşük basınç dayanımının etkisi ile 1990 ve 2000'li yıllara kadar çok çalışma yapılmamıştır. Gelişen teknoloji sektörü ile birlikte köpük üretim jeneratörlerinin daha kararlı boşluk yapısına sahip köpüklerin üretim koşullarını sağlamasından dolayı köpük beton ile ilgili araştırmaların sayısında artış gözlemlenmiştir.

Kararlı bir köpük betonun üretimi, karışımında kullanılacak olan köpük ajanı tipinin seçimine, köpüğün hazırlanış metoduna ve seçilen malzemede üniform hava boşluğu dağılımı sağlamak için karışım tasarım stratejisine bağlı olduğu ifade edilmiştir [2].

Köpük betonların kuru birim ağırlıkları 400 ve 1600 kg/m^3 arasında ve 28 günlük basınç dayanımlarının ise birim ağırlıklarına bağlı olarak $1-25 \text{ N/mm}^2$ arasında değişmektedir. Brady ve arkadaşları (2001), köpük betonların kısa süreli donma-çözünme döngüsünde ve sülfat ataklarına karşı tatmin edici bir direnç gösterdiğini, ayrıca köpük betonun hücreli gözenekli yapısının bir sonucu olarak daha düşük ısı iletkenliğe sahip olduklarını ifade etmişlerdir [3].

Bu tezin amacı genleştirilmiş vermikülit tozu kullanılarak düşük birim ağırlığa ve düşük ısı iletkenliğe sahip köpük beton üretilmesini kapsamaktadır. Deneysel çalışma ile alternatif köpük beton üretilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, mevcut köpük betonlara kıyasla porozitesi daha yüksek, aynı zamanda birim ağırlığı ve ısı iletkenlik katsayısı daha düşük kompozit malzeme üretilmesi, buna bağı olarakta yapı malzemesi sektörüne katkı sağlanması ve ülkemizde henüz yeni bir maden olan genleştirilmiş vermikülitin öneminin vurgulanması hedeflenmektedir.



2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI

2.1 Hafif Beton

Geleneksel beton iyi bir taşıyıcı olmasına rağmen kendi birim ağırlığı fazla olduğundan yapıdaki ölü yüklerin büyük bir oranına sahiptir. Ayrıca ısıl iletkenliği de yüksektir. Geleneksel betonun birim ağırlıklarının azaltılmasıyla birlikte betonarme taşıyıcı elemanlarının da öz ağırlıkları azalacak ve yapı hafifletilebilecektir. Dolayısıyla daha düşük birim ağırlığa sahip betonun kullanılması daha küçük kesitli taşıyıcı elemanlar ve temel boyutundaki bir azalma da sağlayıp yapı maliyetlerini düşürecektir [4].

Üretim metotlarına göre hafif betonun çeşitli tiplerini tanımlamak mümkündür [5]. Bunlar;

- a) Düşük özgül ağırlığa sahip (özgül ağırlığı $< 2,6$) gözenekli hafif agregalar kullanılarak üretilen betonun bu tipi hafif agregalı beton olarak ifade edilmektedir.
- b) Betonun ya da harcın içerisinde büyük ara boşluklar ortaya çıkartılarak, bu boşluklara hava sürüklenmesiyle oluşturulur. Betonun bu tipi hava sürüklenmiş, hücreli, köpük ya da gaz beton olarak çok çeşitli şekilde bilinmektedir.
- c) Normal ağırlıklı betonda genellikle kaba agregalar kullanılır. Karışımdaki ince agregalar çıkartılması ile birlikte çok sayıda ara boşluklar oluşur. Bu beton kumsuz beton olarak tanımlanmaktadır.

Her bir metot açısından betonun yoğunluğundaki azalma ya agregadaki ya da harçtaki oluşan boşluklar tarafından veya iri agregalar arasındaki aralıklardan elde edilir. Oluşan bu boşluklar hafif betonun dayanımını normal ağırlıklı betona kıyasla azaltır. Fakat birçok uygulamada beton dayanımı önemli olmamaktadır. Çünkü hava boşluğu içeren hafif betonlar iyi ısı yalıtımı sağlar ve tatmin edici kalıcılık özelliği gösterirler. Buna karşılık aşınmaya karşı dirençleri zayıftır. Genel olarak hafif betonların maliyeti normal betonlara kıyasla daha yüksektir. Hafif betonların karıştırılması, taşınması ve yerleştirilmesi normal betonlara kıyasla daha hassas olması gereken durumlardır. Bununla birlikte hafif betonun avantajları birçok amaç için dezavantajlarına kıyasla ön plana çıkmaktadır [5].

Hafif betonların normal betonlara göre avantajlı özellikleri şöyle özetlenebilir [6]:

- Normal ağırlıklı beton elemanların ağırlıkları yüksek olup, yapıya gelen yüklerin büyük bir kısmını oluşturur. Daha düşük yoğunluklu betonun kullanımı taşıyıcı elemanların kesit alanında, temel boyutlarında ve donatı miktarının azalmasını sağlar.
- Yapı yüklerinin azalmasından dolayı yapıya gelen deprem yükleri azalır.
- Kalıplara daha az basınç uygulanmasının sonucu olarak kalıp kesitinde azalama ile birlikte, kalıp ve iskele maliyetleri düşer.
- Isıl iletkenlikleri düşük, ısı ve ses yalıtımı yüksektir.
- Yangına karşı dayanıklıdır.
- Taşınması ve yerleştirmesi kolaydır ve fabrikasyon üretimlerde kolaylıklar sunar.

Hafif betonların normal betonlara göre zayıf yönleri ise şöyle özetlenebilir [6]:

- Boşluklarının fazla olmasından dolayı dayanımları düşüktür ve taşıyıcı beton olarak uygulamalarda çok tercih edilen bir yapı malzemesi değildir.
- Aşınmaya karşı dirençleri zayıftır.
- Su ve rutubete karşı yalıtılması gerekir.
- Hafif agregaların her yerde bulunmadığından dolayı zor temin edilir ve yapay olarak üretilmeleri ekonomik değildir. Bu yüzden hafif betonların maliyetleri normal betona kıyasla daha yüksektir.
- Normal betona göre üretimlerinde daha yüksek çimento gereksinimine ihtiyaç duyulur. Bu da hafif betonun üretim maliyetini artırır.
- Normal betona kıyasla elastisite modülleri daha düşük olduğundan daha fazla şekil değiştirme özelliğine sahiptirler.
- Ayrışma riskleri daha yüksektir. Üretiminde, taşınmasında, yerleştirilmesinde ve kür edilmesinde daha nitelikli işçilik ve hassasiyet gerektirir.
- Rötne ve sünme oranları normal betona göre daha yüksektir.

2.1.1 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Hafif betonların sınıflandırılması, genel bir ifade ile hem birim ağırlığa hem de dayanıma göre yapılmaktadır. Yalıtım amaçlı ve taşıyıcı olarak kullanılan bütün hafif

betonların özellikle birim ağırlıklarına göre sınıflandırılmasında farklı kabuller bulunmaktadır.

Hafif betonlar kullanım amaçlarına göre de sınıflandırılır. Hafif betonlar, yapısal hafif beton [7] (ASTM C330-05), duvar ögeleri [8] (ASTM C 331-05) ve yalıtım betonu [9] (ASTM C332-99) olarak sınıflandırılır. ASTM C330-05 [7]'e göre 28 günlük silindirin basınç dayanımı 17 MPa'dan az olmamalıdır. Bu tür betonların birim ağırlığı 1840 kg/m³ aşmamalı ve genellikle 1400 ve 1800 kg/m³ arasında olmalıdır. Diğer taraftan dolgu duvar olarak kullanılanların birim ağırlıkları genellikle 500 ve 800 kg/m³ arasında, basınç dayanımları ise 7-14 MPa arasındadır. Yalıtım betonun en önemli özelliği birim ağırlığının 800 kg/m³'den daha az, dayanımlarının ise 0,7 ve 7 MPa arasındayken ısı iletkenlik katsayısının yaklaşık 0,3 J/m².sec°C/m (0,35 W/m.K) altında olabilmesidir [5].

Uluslararası Yapı Malzemeleri, Sistemleri ve Yapı Laboratuvarları ve Uzmanları Birliği (RILEM) ile birlikte Avrupa Beton Komitesi (CEB) tarafından onaylanan betonların kullanım amaçlarına göre sınıflandırılması Tablo 2.1'de gösterilmiştir.

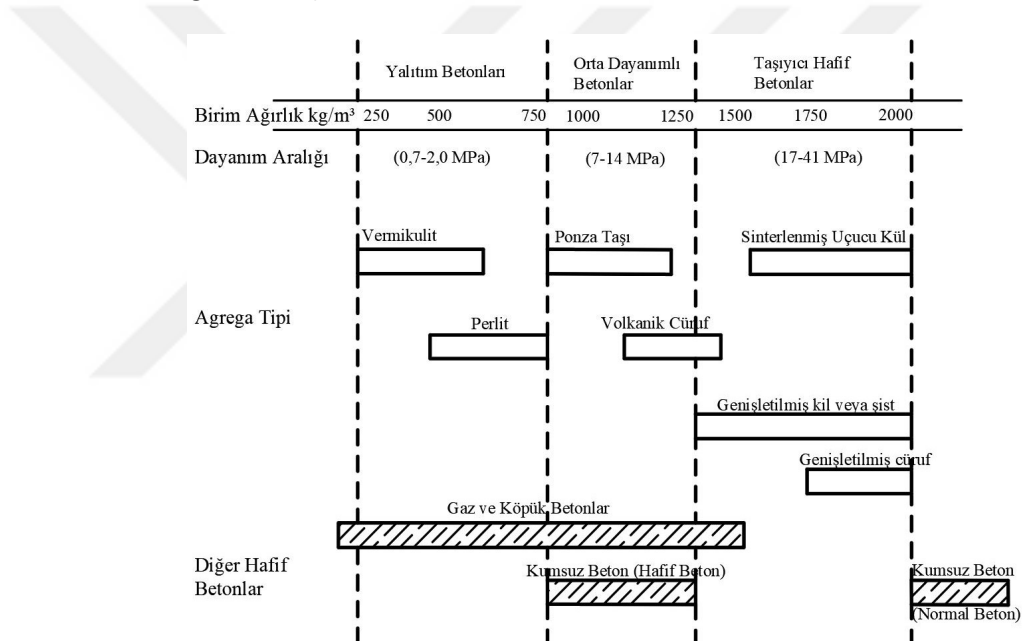
Tablo 2. 1 Hafif Betonların Sınıflandırılması

Özellik	Sınıflandırma ve Tipi		
	I	II	III
	Yapısal	Yapısal /Yalıtım	Yalıtım
Basınç Dayanımı (MPa)	>15	>3,5	>0,5
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m.K)	-	<0,75	<0,30
Birim Ağırlık (kg/m ³)	1600-2000	<1600	<< 1450

Yapısal hafif betonun kuru birim ağırlığı 2000 kg/m³'den daha büyük olmayan bir beton olarak tanımlanmasına rağmen farklı sınıflandırmalar olduğu görülmektedir. Örneğin, Avustralya yapısal hafif beton içerisinde normal ağırlıklı ince agrega ve hafif ağırlıklı agrega ile üretilmiş ve suya doygun yüzey kuru birim ağırlığı 1800 kg/m³'den daha az olan betonları tanımlamaktadır. Norveç'te hafif beton içerisinde hafif agrega

bulunan, kuru birim ağırlığı 1200-2200 kg/m³ arasında değişen ve basınç dayanımı 85 MPa'dan küçük olan betonlar olarak tanımlanır. Amerika'da ise yapısal hafif agregalı beton kuru birim ağırlığı 1810 kg/m³'den daha az olduğunda hafif beton olarak tanımlanır [10]. Ülkemizdeki hafif beton standardı TS EN 206-1'e göre bir betonun hafif beton sınıflandırılmasında yer alabilmesi için birim ağırlığının 800 kg/m³'ten az ve 2000 kg/m³'ten fazla olmaması gerektiği belirtilmiştir [11].

Şekil 2.1'de farklı agrega tip ve kuru birim ağırlıklarına göre hafif betonların kullanım alanları gösterilmiştir.



Şekil 2. 1 Hafif Betonların Sınıflandırılması [12]

Karışımında sadece %100 vermikülit agregası kullanılarak üretilen hafif betonların yalıtım betonu olarak kullanılabilir. Gaz ve köpük betonlar hem yalıtım hem de orta dayanımlı beton olarak adlandırılır.

Hafif betonların birim ağırlıkları geniş bir aralıkta değiştiğinden dolayı basınç dayanımlarını da göz önüne alınarak sınıflandırılır. Tablo 2.2'de birim ağırlık ve basınç dayanımına bağlı hafif betonların sınıflandırılması verilmiştir [12].

Tablo 2. 2 Hafif Beton Sınıfları [12]

Hafif Beton Sınıfı	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Basınç Dayanım Aralığı (MPa)
S1	≤800	1-7
S2	800-1200	7-10
S3	1000-1400	10-14
S4	1300-1800	14-25
S5	1500-1800	25-40
S6	1800-2000	40-70

S1 sınıfındaki hafif betonlar esas olarak ısı yalıtımının sağlaması ve kısmen de taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. S2 ve S3 sınıfı hafif betonlar orta dayanımlı betonlardır ve yalıtım özelliklerine de sahiptir. S4, S5 ve S6 sınıfı hafif betonları ise taşıyıcı betonlardır ve bu sınıf betonlar birçok ülkede taşıyıcı beton olarak kabul edilirler [12].

2.1.2 Hafif Agregaların Sınıflandırılması

Hafif agrega sınıflandırması dikkate alınır ve hafif agregalar ile istenilen birim ağırlığa sahip hafif beton üretilebilir. Hafif beton üretiminde kullanılan hafif agregalar üretildikleri malzemenin kökenine ve kendi birim ağırlıklarına göre sınıflandırılır. Hafif agregalar elde edilmiş biçimlerine göre dört ana grupta sıralanabilir [12, 13]:

- Doğal hafif agregalar: volkanik tüf, volkanik cüruf, ponza taşı ve ağaç parçacıkları gibi organik malzemeler.
- Doğal malzemelerden üretilen yapay hafif agregalar: Genleştirilmiş arduaz, perlit, vermikülit, genleştirilmiş kil, genleştirilmiş şist ve styropor gibi polimer esashlı malzemeler.
- Endüstriyel atıklardan üretilen hafif agregalar: Yüksek fırın cürufu, uçucu kül.
- Endüstriyel atıkların işlenmesiyle üretilen hafif agregalar: Genleştirilmiş yüksek fırın cürufu ve kızdırılmış uçucu kül.

Hafif agregalar birim ağırlıklarına göre sınıflandırma yapılırken üretiminde kullanılacak olan hafif betonun fonksiyonel özelliğine göre gruplanır. Bu gruplandırma şu şekildedir:

- Birim ağırlığı 400 kg/m^3 'ten küçük olan hafif agregalar: Yalıtım betonlarının üretiminde kullanılırlar.
- Birim ağırlığı $400\text{-}650 \text{ kg/m}^3$ arasında olan hafif agregalar: Yalıtım ve orta dayanımlı betonların üretiminde kullanılırlar
- Birim ağırlığı 650 kg/m^3 'ten büyük olan hafif agregalar: Taşıyıcı hafif betonların üretiminde kullanılırlar [12, 13].

2.2. Vermikülit

2.2.1. Tanımı ve Sınıflandırma

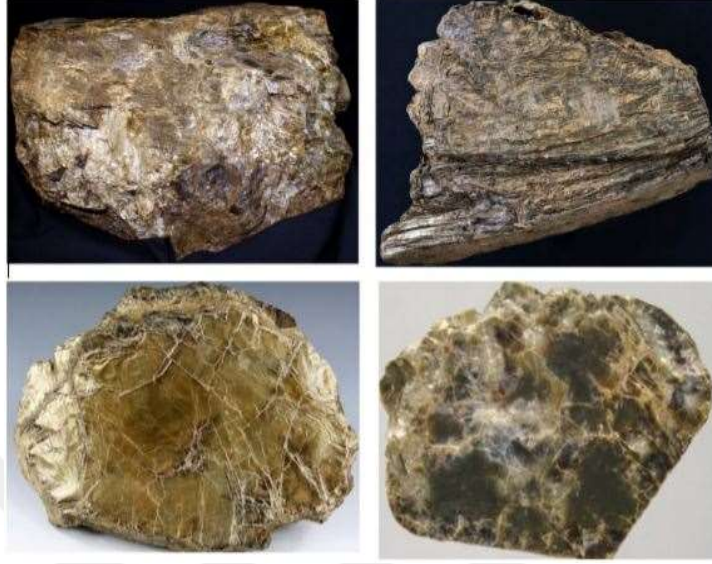
Vermikülit adı kristalleri aniden yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında üretilen kavisli, uzun ve bükülmüş yapısı nedeniyle latince vermicularis (kıl kurdu)'den türetilmiştir. Vermikülit filosilikat grubunun bir üyesi olan parlak ince tabakalı mika benzeri bir minareldir. Biyotitin ya da filogitin hidrotermal değişimi veya ayrışması gibi doğal koşullar altında oluşur. Vermikülit, ağırlıkça başlıca SiO_2 (%37-42), MgO (%14-12), Al_2O_3 (%10-13), Fe_2O_3 (5-17), H_2O (%8-18) ve çok az miktar FeO (%1-3) içerir [14, 15]. Vermikülit, mineralojik olarak tek başına farklı bir grubu temsil eder, endüstriyel olarak genişleme özelliğine sahip tüm mika grubu minarelerini de (flogopit, biotit ve hidrobiotit) kapsayan genel bir ifade olarak kullanılmaktadır. Vermikülit sulu magnezyum, alüminyum, demir silikat olarak da açıklanabilir [16]. Vermikülit; bulunduğu ortama ve doğada oluşumuna göre, toprak, otojenik, metaformik ve makroskopik olmak üzere dört tipinin olduğu gözlenmiştir [17]. Vermikülitin kimyasal bileşenlerindeki değişikliğe kendi fiziksel özelliklerindeki bir değişim neden olabilir. Vermikülit nötr, etkisiz ve pH değeri yaklaşık olarak 7'dir. Özgül ağırlığı 2,2-2,5 arasında değişmektedir. Vermikülit sudaki ağır metal tuzlarını çıkarmak ve gerekli malzemeleri hazırlamak için olağanüstü iyon değişimi özellikleri gösterir [15, 18, 19]. Vermikülitin yapraksı yapısı sıcaklığın geniş aralığı için yüksek kayganlaştırıcı özelliğine sahip olmasına olanak verir. Bu yüzden yangına dayanıklı malzeme olarak [20] ve ısı yalıtımı için gözenekli hafif dolgu malzemesi olarak kullanılır [21]. Dünya çapında 2014-2015 yıllarında sırasıyla yaklaşık olarak 381 ve 408 bin ton vermikülit

üretimiştir [22]. Dünyadaki bazı vermikülit işletmelerine ait olan cevher numunelerinin kimyasal analizleri Tablo 2.3’de gösterilmiştir.

Monoklinik sistemde kristalleşen vermikülit 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 2,4-2,8 gr/cm³ aralığında değişmektedir [16, 17]. Düşük ısı iletkenlik katsayısına yaklaşık olarak 0,04-012 W/m.K’ ve nispeten yüksek ergime noktasına 1240-1430°C’ye sahiptir [14]. 1 kHz ses frekansındaki 0,7-0,8 arasında değişen ses emme katsayısı, su emmesi %10’na ulaşmıştır. Havadan nem absorbe etmesi %98 hava nemine sahip ortamda ağırlıkça %3’ten daha fazla değildir. Düşük toz oluşumuna ve aşındırıcı özellik gösterir [23]. Şekil 2.2’de İşlenmemiş ham vermikülit örnekleri [15] ve Şekil 2.3’de elekten geçirilmiş ham vermikülit gösterilmiştir.

Tablo 2. 3 Ticari Değerleri Olan Vermikülitin Kimyasal Analizleri [24]

	Enoree (ABD)	Virginia (ABD)	Güney Afrika	Brezilya	Çin	Kovdor (Rusya)
Li ₂ O	-	0,01	0,03	-	-	-
Na ₂ O	-	1,72	0,80	0,10	1,61	0,93
K ₂ O	4,42	6,63	2,46	0,50	5,97	2,56
MgO	20,04	16,38	23,37	23,60	24,22	21,39
CaO	0,75	1,12	1,46	3,80	0,93	0,20
BaO	0,12	-	-	0,20	-	0,03
MnO	0,07	0,14	0,30	-	0,05	-
FeO	-	-	1,17	-	1,54	3,56
Al ₂ O ₃	17,36	12,85	12,08	10,20	12,68	10,01
Cr ₂ O ₃	0,50	0,23	-	-	-	0,20
Fe ₂ O ₂	8,45	8,80	5,45	5,80	4,60	1,90
SiO ₂	38,66	38,34	39,37	45,10	41,20	43,05
TiO ₂	-	1,66	1,25	0,70	1,38	1,00
H ₂ O	8,71	10,66	11,20	10,20	5,82	15,70
Toplam	98,61	99,34	98,97	100,00	99,99	99,40



Şekil 2. 2 İşlenmemiş Ham Vermikülit [15]



Şekil 2. 3 Elekten Geçirilmiş Ham Vermikülit

Yüksek sıcaklıklarda aniden ısı şokuna tabi tutulduğunda vermicülit akordion gibi uzamaktadır. Bu karakteristik genişleme yapısında bulunan kristal suyun ani olarak buharlaşmasından dolayı meydana gelir. Bu genişlemenin buharlaşma sonucunda oluşan buhar basıncından kaynaklandığı düşünülmektedir. Isısal genişlemenin henüz net bir şekilde açıklanamamasının sebebi, toplam ağırlıkça aynı miktarda su içeren numunelerin dahi farklı oranlarda genişlebilmelerinden dolayıdır. Genleşme

sonucunda malzemenin yığın yoğunluğu, yaklaşık 10 kat azalarak $0,8 \text{ gr/cm}^3$ 'den $0,08 \text{ gr/cm}^3$ 'e düşmektedir. Yığın yoğunluğundaki düşüş, vermikülitin kalitesine ve genişlemenin yapıldığı fırın performansına bağlı olmakta ve ısı işlem sonucunda yaklaşık 30 katına kadar bir genişleme yapabilmektedir [25, 26, 27]. Isıl genişleme esnasında vermikülitin kimyasal bileşenler değişmez. Sadece kimyasal bağlarındaki su uzaklaşır [23]. Isıtılmadan önce vermikülit kendi boyutunun 10 katından daha fazla genişlediğinde, Vermikülit iyi kalitede olarak tanımlanabilir. Genişleme 10 katından düşükse, düşük dereceli olarak sınıflandırılabilir [28]. Vermikülitdeki genişlemenin derecesi ısıtma hızı, en yüksek sıcaklıkta tutma süresi, soğutma süresi, nem içeriği, vermikülitin yapısı, bileşen aşaması ve başlangıç materyalinin öğütülmesi veya ufalanması gibi birçok faktör tarafından yönetilir. Parçacıklar, ince bir hava boşluğu ile ayrılmış, gözenekli bir yapıya ve yağlı veya ipeksi bir parlaklığa sahip ince plakalar olarak görülmektedir. Renkleri, bileşenlerinin tane şekli ve parlaklığı kendi kökenlerine yakından bağlantılıdır. Çoğu durumda, vermikülitin rengi altın sarısı ya da kahverengi seyrek bir şekilde sedefli pembe ışığa sahip yeşimlisi renge sahiptir. Ayrıca parçacıkların rengi Fe_2O_3 oluşmasından dolayı gümüş ya da altın kırmızı görülebilir. Vermikülit 1000°C veya daha yüksek sıcaklıkta ısıtılırsa malzemenin deformasyona uğramasına ve ısı yalıtım karakteristik özelliğinin bozulmasına neden olan klinostatite dönüştüğü gözlenebilir. Bu yüzden maksimum ısıtma sıcaklığının $1000-1100^\circ\text{C}$ 'yi aşılması önerilmiştir [29].

2.2.2. Üretim Metodu ve Teknolojisi

Açık ocak işletmeciliği ile vermikülit üretimi gerçekleştirilmektedir. Ocaklara en yakın bölgede kurulan cevher zenginleştirme ünitesinde zenginleştirme işlemi yapılır. Daha sonra ise genişletme işlemi uygulanır. Ocaktan çıkarılan cevher primer kırıcıdan geçirilir. Sonra yaş elek yöntemi ile harmanlama yapılarak fraksiyonlarına ayrılır. Harmanlama işleminden sonra konsantreler toplanır, kurutulur ve boyutlarına göre ayrılarak genişletme ünitesine gönderilir. Genişleme ünitesinde, ani ısı etkisiyle $900-1000^\circ\text{C}$ 'de düşey fırınlarda 4-8 saniye bekletilerek genişletilir. Genleşmemiş kısımlar harmanlama ile genişlenlerden ayrılır. Elde edilen genişmiş ürün torbalanarak pazarlanmaya hazır hale getirilir [17]. Şekil 2.4 ve 2.5'de genişleştirilmiş ve ham vermikülit örnekleri gösterilmiştir [30].



Şekil 2. 4 Genleştirilmiş Ham Vermikülit [30]



Şekil 2. 5 Genleştirilmiş Vermikülit

2.2.3 Genleştirilmiş Vermikülit Kullanılarak Üretilen Harçlar ve Betonlar

Mo ve arkadaşları (2018) kısmi olarak kumla ile yer değiştirmiş genleştirilmiş vermicülit hafif agregası içeren çimento esaslı harçların özelliklerini araştırmışlardır. Genleştirilmiş vermicülitin kum ile yer değiştirme oranı %30 ve %60 olduğunda işlenebilirliğin normal harca kıyasla daha yüksek olduğu ifade etmişlerdir. Genleştirilmiş vermicülitin gözenekli hafif yapısı nedeniyle su emme miktarını, buna

karşılık harcın birim ağırlığının ve basınç dayanımının azalmasına neden olduğu söylenmiştir. Yüksek sıcaklık etkisinin artırılması ile geliştirilmiş vermikülit harcında ağırlık kaybı oluşmasına rağmen, geliştirilmiş vermikülit harcın ısı direnci ve ısıl kararlılığı sağlamasında olumlu etkisi olduğu gözlenmiştir [31].

Köksal ve arkadaşları (2015) laboratuvar ortamında ve yüksek sıcaklığa maruz hafif harçların özelliklerine silis dumanı ve geliştirilmiş vermikülitin etkisini araştırmışlardır. Üretilen harçların fiziksel, mekanik, termal ve mikro yapı özellikleri belirlenmiştir. Hacimce vermikülit/çimento oranı (V/Ç) 4, 6 ve 8 olan numuneler üzerinde çalışmalar yapmışlardır. Silis dumanı her bir V/Ç oranına için çimento miktarının %0, %5, %10 ve %15 oranlarında kullanılmıştır. Toplamda 40x40x160 mm boyutuna sahip 114 harç numunesi incelenmiştir. Numuneler 6 saat boyunca 300, 600 ve 900°C'ye maruz kalmıştır. Geliştirilmiş vermikülitli kullanılarak üretilen harçların birim ağırlıklarının 1200 ve 780 kg/m³ arasında değiştiğini belirtmişlerdir. Silis dumanının karışıma ikamesiyle harçların akışkanlıkları azalmıştır, bunun nedeninin silis dumanının yüzey alanının bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Harçların porozitesi %28,9'a kadar silis dumanı eklenmesiyle azalırken %43,2'ye kadar vermikülit içeriğiyle artmıştır. Silis dumanının filler etkisinden dolayı harçların porozitesinde azalmaya yol açmıştır. Su emme oranları %24,6 ve %40,6 arasında değişkenlik göstermiştir. Deneysel çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre geliştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen harçların basınç dayanımı 3,9 ve 16,4 MPa arasında ve ısıl iletkenlik katsayısı 0,257 W/m.K bulunmuştur. Geliştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen harçların yüksek sıcaklıklarda mekanik dayanımını muhafaza etmesi açısından iyi bir performans gösterdiğini ve geliştirilmiş vermikülitin yangın dayanıklı çimento esaslı harç üretiminde kullanılabilirliğini ifade etmişlerdir [32].

Shoukry ve arkadaşları (2016) geliştirilmiş vermikülit ve nano metakaolin kullanılarak üretilen harçların fiziksel, mekanik özellikleri ve mikro yapı özelliklerini araştırmışlardır. Çimento ile geliştirilmiş vermikülit hacimce %70 yer değiştirmiştir, nano metakaolin ise geliştirilmiş vermikülitin ağırlıkça 2, 4, 6, 8 ve %10 oranlarında kullanılmıştır. Deneysel çalışma sonunda nano metakolin kullanımı ile hem basınç hem de eğilme dayanımında iyileşme olduğunu ve %10 metakolin

içeriğinde betonların dayanım açısından en iyi performansı sergilediğini ifade etmişlerdir. Kapiler su emme miktarı nano metakaolin artması ile genel olarak azaldığını belirtmişlerdir. Buna karşılık yoğunluk ve ısı iletkenlik üzerine nano metakaolin içeriğinin önemli etkisinin olmadığını söylemişlerdir. Ayrıca nano metakaolinin sertleşmiş betonun mikro yapısını iyileştirdiğini vurgulamışlardır. [33].

Köksal ve arkadaşları (2014) kısa kesilmiş çelik lif ve geliştirilmiş vermikülit kullanılarak üretilen hafif harçların yüksek sıcaklık etkisi altındaki özelliklerini araştırmışlardır. Çelik lifle ve geliştirilmiş vermikülitin birlikte kullanılmasıyla üretilen hafif harçların 600 °C'ye kadar iyi performans gösterdiğini, 900 °C kadar ise eğilme ve basınç dayanımlarını büyük ölçüde koruduğunu ifade etmişlerdir. Genel olarak çelik liflerin yüksek sıcaklığa maruz hafif harçların mekanik özelliklerine faydalı bir etkisi olduğunu belirtmişlerdir. Geliştirilmiş vermikülitte sahip hafif harçların yüksek sıcaklıkta performansının kullanılan lif miktarına bağlı olduğunu ifade edilmiştir [34].

Suvorov ve Skurikhin (2003) yüksek sıcaklıktaki ısı yalıtım performansı için önemli bir malzeme olan geliştirilmiş vermikülit ile ilgili çalışma yapmışlardır. Vermikülit 300 °C'nin üzerinde ısıtıldığında genişerek son derece etkili bir ısı yalıtım malzemesi ortaya çıktığını ifade etmişlerdir. Geliştirilmiş vermikülitin düşük yoğunluğu (80-120 kg/m³), düşük ısı iletkenliği (0,04-0,12 W/m.K), nispeten yüksek erime noktası (1240-1430°C), dayanıklı ve çevreci gibi özelliklerinden dolayı ısı yalıtım malzemeleri için taş unu (filler) olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir. Vermikülit esaslı yüksek ısı yalıtımlı malzemelerin oldukça tatmin edici karakteristik özelliklere sahip olduğunu ifade etmişlerdir. Geliştirilmiş vermikülitin şamot ve ısı yalıtımlı lifleri ile birlikte kullanıldığında 1150°C sıcaklığa kadar ısıya dayanıklı yapıların duvarlarında kullanılabilmesini söylemişlerdir [14].

El-Gamal ve arkadaşları (2012) vermikülit ve geliştirilmiş vermikülit içeren çimento esaslı harçların yüksek sıcaklık etkisi altındaki ısı dayanıklılığını araştırmışlardır. Çalışmada, her iki vermikülit çimento ağırlığının %2,5, %5 ve %10 oranlarında kullanılmıştır. Numuneler 28 günlük standart kür sonrası 300°C, 600°C ve 800°C sıcaklığa maruz bırakılmıştır. Sıcaklık sonrası numuneler normal ve ani soğumaya bırakılarak deneyler yapılmıştır. Suda soğutulan numunelerin havada soğutulan

numunelere göre daha çok dayanım kaybına uğradığı söylenmiştir. Vermikülitin normal Portland I çimento hamurunun ısı direncini geliştirdiğini, ağırlıkça %5 vermikülitler içeren numunelerin tüm sıcaklıklarda en iyi performansı gösterdiğini ifade etmişlerdir. Ayrıca Genleştirilmiş vermikülit genleştirilmemiş olana kıyasla daha iyi ısı direnç gösterdiği belirtmişlerdir. Vermikülit ile birlikte silis dumanının karışıma ilavesi ile kalıcı dayanımlarda daha yüksek performanslar elde edilmiştir. Bu durumu vermikülitin yalıtım özelliklerini ve silis dumanını puzolanik aktifliğinin birleşim etkisinin bir sonucu olarak açıklamışlardır [35].

Sütçü (2015), genleştirilmiş vermikülitin kil tuğlalarının fiziksel özellikleri ve termal iletkenliği üzerine etkisini araştırmıştır. Ağırlıkça 2,5, 5, 7,5 ve %10 oranlarında çimento ile genleştirilmiş vermikülitin yer değiştirmesi ile gözenekli kil tuğlaları üretilmiştir. Üretim yarı kuru sıkıştırma yöntemiyle yapılmıştır. Farklı oranlarda Vermikülit içeren tuğla karışımları oluşturulup kurutulmuş daha sonra iki saat boyunca 900 ve 1000 °C'de tutulmuştur. Numunelerin kuruma ve fırınlama büzülmesi, kızdırma kaybı, yoğunluk, porozite, su emme, ısı iletkenlik, basınç dayanımı ve mikro yapısı gibi özelliklerini belirlemiştir. %10 genleştirilmiş vermikülit kullanılmasıyla birim ağırlığın 1,76'dan 1,34 gr/cm³'e kadar düştüğünü ifade etmişlerdir. Buna karşılık porozitenin %45'e kadar ulaştığını ancak basınç dayanımının azaldığını ifade etmişlerdir. Vermikülitin ısı iletkenliği olumlu etkilediğini ve %10 Vermikülit içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayılarının referans numunelerle kıyasla %32 azalarak 0,96'dan 0,65 W/m.K düştüğünü ifade etmişlerdir. Sonuç olarak tuğla üretiminde vermikülitin yalıtım malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [36].

Mladenoviç ve arkadaşları (2004) hafif agregaların alkali silika reaktifliğini (ASR) araştırmışlardır. Hafif agregaların termal harç ve sıvalarda kullanılmasının yanında betonda da kullanılabilmesini ifade ederek bu tür agregaların ASR içinde önemli olduğunu ifade etmişlerdir. Hızlandırılmış harç çubuğu deneyi, hızlı kimyasal testi ve elektron tarama mikroskopu- X-ray dağılım tekniği (SEM-EDX) kullanılarak dört farklı hafif agreganın (genleştirilmiş Vermikülit, genleştirilmiş kil, genleştirilmiş cam ve perlit agregası) alkali silika reaktifliğini incelemişlerdir. Genleştirilmiş vermikülit ve genleşmiş kilin alkali silika reaksiyonu sergilemediği, buna karşılık camı faz (genleştirilmiş cam ve perlit) içeren agreganın alkali silika reaksiyonundan dolayı harç

çubuğu testinde ve SEM-EDX analizleri sonucunda genleşme olmamasına rağmen agrega dokusunda ciddi bir ayrışma tehlikesi olduğunu gözlemlediklerini söylemişlerdir [37].

Melo ve arkadaşları (2012) yaptıkları araştırmada alçıtaşı, vermikülit ve etilen vinil asetat (EVA) kullanılarak üretilen sıva harcının ısı iletkenliği araştırmışlardır. Dolgu duvar sıvasında vermikülitin kullanılmasıyla ısı yükünde metre kare başına %38 azalma, alçıtaşı veya etilen vinil asetat kullanıldığında ise %41 azalma olduğunu ifade etmişlerdir. Bu malzemelerin uygulamalarında geleneksel yapı malzemelerinin ısı direncinden daha düşük olduğu belirtilmiştir. Vermikülit içeren sıva için ısı iletkenlik değeri 0,30 W/m/°C ve etilen vinil asetat için ise 0,26 W/m/°C olarak elde edilmiştir [38].

Abidi ve arkadaşları (2015) perlit ve vermikülit içeren çimento esaslı kompozitlerin ısı iletkenliklerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma da binalar için pasif yangın koruması sağlayan ısı yalıtım özelliğine sahip yeni bir kompozit malzemenin ısı davranışı incelemişlerdir. Karışım içerisinde ağırlıkça vermikülit miktarları %5 ve %25 için hacimsel porozitelerinin sırasıyla %51 ve %74, ısı iletkenlik değerlerinin ise sırasıyla 0,45 ve 0,25 W/m.K olduğunu belirtmişlerdir. Benzer şekilde karışım içerisinde ağırlıkça perlit miktarları %5 ve %25 için hacimsel porozitelerinin sırasıyla %57 ve %76, ısı iletkenlik değerlerinin ise sırasıyla 0,35 ve 0,16 W/m.K olduğunu belirtmişlerdir. Perlit ilave edilen kompozitlerin vermikülit ve çimentoya kıyasla daha fazla ısı yalıtım kapasitesine sahip olduklarını ifade etmişlerdir [39].

Schackow ve arkadaşları (2014) hava sürükleyici katkı ile birlikte vermikülit ve geliştirilmiş polistren (EPS) hafif agregalar kullanılarak üretilen hafif betonların mekanik ve termal özelliklerini araştırmışlardır. Karışım içerisinde hafif agrega hacmi %55 ve %65 olarak deneysel çalışma yapılmıştır. Hava sürükleyici ajan ilavesiyle birlikte hafif beton daha hafif, ancak dayanımı daha düşük olmuştur. EPS'li hafif betonun vermikülit içeren hafif betona kıyasla daha yüksek dayanımlı ve daha hafif olduğunu belirtmişlerdir. Birim ağırlıkların EPS'li hafif betonun için 1070-1250 g/cm³ arasında, vermikülitli hafif beton için ise birim ağırlıkları 1130-1290 g/cm³ arasında değiştiği söylemişlerdir. Vermikülitli hafif betonun EPS'li olana kıyasla daha düşük ısı iletkenliğe sahip olduğunu, hem EPS'li hem de vermikülitin hafif agrega olarak

beton yapısal olmayan hafif beton üretiminde ve duvar malzemesi olarak kullanılabileceğini belirtmişlerdir [40].

2.3 Köpük Beton

Köpük beton harç içerisine üretilmiş köpüğün veya doğrudan köpük ajanın karıştırılmasından sonra gelişigüzel boşlukların yaratılması ile bir hafif beton (400-1800 kg/m³) olarak sınıflandırılan hücreli boşlukta bir beton olarak bilinmektedir. Köpük beton düşük çimento içeriği ile hafif agregaların kullanıldığı akıcılığı yüksek ve mükemmel ısı yalıtımı olan bir malzeme olarak tanınır [2, 41, 42, 43]. Ayrıca köpük betonlar; büyük ölçekli hafif yapı malzemeleri, bölme duvar, dolgu aşamasında ve yol dolgusu vb. gibi birçok kullanım alanına sahiptir. Köpük beton Almanya, Amerika Filipinler, Türkiye ve Tayland'da yaygın şekilde kullanılır [44, 45, 46].

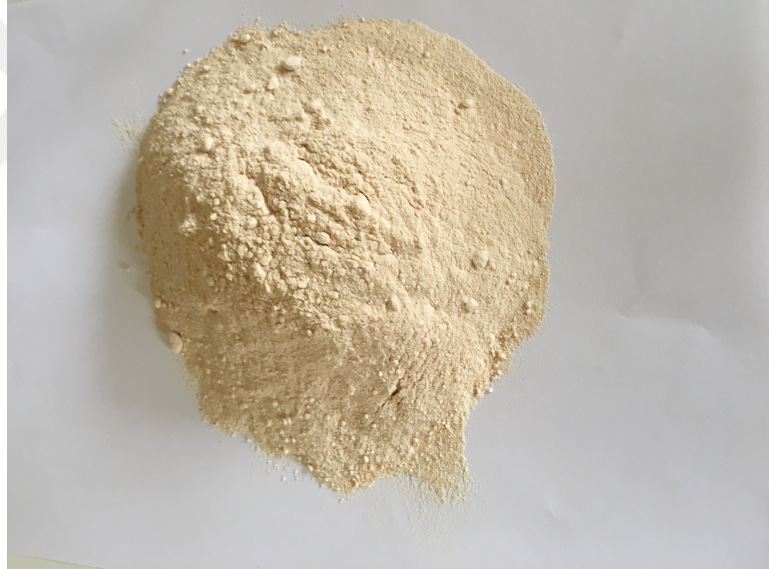
Ülkemizde TSE K 314 [47] standardına göre köpük beton, bünyesinde düzgün halde dağılmış 0,1 mm ile 1,0 mm arasında değişen, yüksek oranda hava boşluğu oluşturulmuş kuru birim ağırlığı 300 kg/m³'den büyük 1800 kg/m³'den küçük olan, çimento, agrega, su köpük ajanı ve kimyasal veya mineral katkı malzemelerin ilave edilmesiyle mikserde karıştırılması sonucu elde edilen ürüne köpük beton denir. Ayrıca standartta köpük betondaki hava içeriği kendi katı hacminin %20'sinden daha fazla olduğu belirtilmiştir [47].

Tarihsel açıdan ilk olarak Romalılar, sıcak kireç su ile birlikte ince çakıl ve iri taneli kuma hayvan kanı ekleyerek ve karıştırarak gerçekleştirmişlerdir. Küçük hava boşlukları karışımı daha fazla işlenebilir ve akıcı yapmak için oluşturulmuştur [46, 48]. Bununla birlikte ilk köpük beton Axel Eriksson tarafından 1923'de patentlenmiştir [49]. Son 20 yıldır üretim ekipmanları ve süper akışkanlaştırıcılar, köpük ajanı açısından önemli gelişmelerin olması köpük betonun büyük ölçüde kullanılmasına izin vermiştir. Birçok araştırma da köpük betonun kapsamlı bir şekilde özelliklerini ve davranışlarını öğrenmek, ayrıca yapısal uygulamalarda kullanımını basitleştirmek için yapılmıştır. Şimdiye kadar yapılan birçok çalışma ile [2, 46, 50, 51] köpük betonun yapısal ölü yükleri azaltan düşük yoğunluklu, temel büyüklüğünü azaltan, taşınması ve yerleştirmesi kolay birçok özelliğe sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Ayrıca dokusal yüzeyi ve mikro yapısal hücreleri nedeniyle yangına dayanıklılığı, termal iletkenliği ve ses emilimini artırdığı da belirtilmiştir.

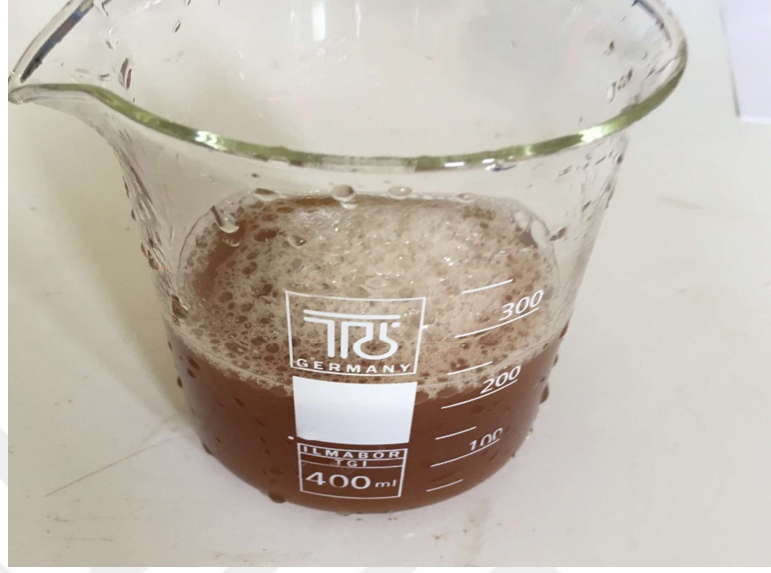
2.3.1 Köpük Ajanı

Köpük ajanı TSE K 314'e göre sulu çözelti halindeyken suyun yüzey gerilmesini düşüren ve köpük oluşturabilen bir kimyasal katkı malzemesi olarak tanımlanmıştır [47].

Köpük beton üretiminde başlıca iki ana üretim metodu vardır. Birinci metot önceden hazırlanmış köpüğün üretilmiş harç içerisine ilave edilip karıştırılmasıyla yapılır. İkinci metot ise betonun karışım esnasında harç içerisine toz köpük ajanın katılarak köpük kabarcıkları oluşturma yöntemidir [52]. En yaygın şekilde kullanılan köpük ajanları ya protein esaslı ya da sentetik esaslıdır. şekil 2.6'da Protein esaslı köpük ajanının toz hali ve şekil 2.7'de sentetik esaslı köpük ajanı gösterilmiştir.



şekil 2. 6 Protein Esaslı Köpük Ajanı



Şekil 2. 7 Sentetik Esaslı Köpük Ajanı

Protein esaslı köpük ajanları hayvanların boynuz, tırnak, kan, kemik ve diğer hayvanların kalıntılarında elde edilmektedir. Sentetik esaslı köpük ajanlar ise şampuan ve sabun tozu üretiminde kullanılan kimyasallardan türetilmiştir. Protein esaslı köpük ajanları daha fazla kapalı boşluklu ve yüksek dayanımlı köpük beton üretimini sağlarken sentetik esaslı köpük ajanları daha fazla genişleme böylelikle daha düşük yoğunluklu ve daha fazla gözenekli köpük beton üretimine olanak sağlar. Ayrıca Sentetik esaslı köpük ajanlarının depolaması, saklanması kolay ve daha az maliyetlidir. Ancak sıcaklığa karşı sentetik esaslı köpük ajanları daha az duyarlıdır [52].

Köpük beton üretmek için temel malzemeler önceden oluşturulmuş köpük ile karıştırılır. Önceden oluşturulmuş köpük, ıslak köpük ve kuru köpük olarak iki sınıfa ayrılabilir. Islak köpük, köpük ajanı çözeltisinin ince bir ağ üzerindeki su ile sprey gibi püskürtülerek 2-5 mm arasında değişen kabarcık ağıyla sonuçlanması ile üretilir. Islak köpüğün geniş kabarcıklı ve nispeten kararlı bir yapıya sahiptir. 1100 kg/m^3 altından daha hafif köpük betonlar üretimi için tavsiye edilmez. Uzun mesafeli pompalama ve yüksek derinliklere dökmek için uygun değildir. Kuru köpük ise tıraş köpüğü görüntüsüne benzerdir ve ıslak köpükten daha küçük 1 mm çapından daha az kabarcık boyutu dağılımına sahip ve oldukça kararlıdır [49]. Köpük kalitesini köpük ajanının seyreltilme oranına, şekillendirme işlemine, sıkıştırılmış hava basıncına, köpüğün yoğunluğuna, harçla birlikte ekleme ve karıştırılma işleminden etkilendiği

belirtmiştir [53]. Aşırı köpük hacminin akışkanlığı düşürdüğü ve akışkanlığın ise karışım anında önemli bir etken olduğu yapılan çalışmalarda ifade edilmiştir [49]. Karıştırma süresi ne kadar uzun olursa, içeri giren hava ne kadar fazla olursa olsun uzun süreli karıştırma ile hava içerinin düşmesine bağlı sürüklenen hava miktarın da kayıp olabilir [49]. Hava boşluğu oranının en yaygın kullanılan köpük beton uygulamalarında toplam karışım hacminin % 6-% 35 arasında olması tavsiye edilmektedir [54].

2.3.2. Köpük Betonun Fiziksel Özellikleri

Köpük betonun birim ağırlık, su emme, porozite, kılcal geçirimsizliği ve boşluk yapısı gibi özellikleri normal betondan onu farklı kılan en önemli özelliklerdir. Köpük betonun sahip olduğu bu özellikler alt bölümler halinde incelenmiştir.

2.3.2.1 Birim Ağırlık

Karışımın birim ağırlığı taze ve kuru birim ağırlığı olmak üzere iki aşamalı bir şekilde ölçülebilir. Taze birim ağırlık hacmi belli olan ve ağırlığı önceden tartılmış bir standart kabın doldurulmasıyla belirlenir. W.A. Thanoon ve arkadaşları (2004) ölçülen taze ve kuru birim ağırlıklar arasındaki farkın $100-120 \text{ kg/m}^3$ olması tavsiye edilmiştir [55]. Taze birim ağırlığı belirlemedeki temel amaç kuru köpük betonun fiziksel, mekanik ve kalıcılık özellikleri üzerine etkisini incelemek ve döküm kontrolü için gerçek hacim ve karışım oranlarını hesaplamaktır [2]. C. Bing ve arkadaşları (2011) köpük betonun taze birim ağırlığının köpük hacminin artışıyla birlikte genellikle azaldığını söylemişlerdir ve köpük betonun taze birim ağırlığının normal betonun birim ağırlığının yaklaşık %65'i kadar olması halinde köpük beton basınç dayanımının 50 MPa'ya kadar ulaşabileceğini ifade etmişlerdir. [56]. F.C. McCormick (1967) birim ağırlığın ince agreganın tipi ve agreganın granülometrisinden etkilenebileceğini ve agreganın oranı arttıkça birim ağırlığın daha yüksek olabileceğini belirtmiştir [57].

2.3.2.2 Porozite ve Gözenek Yapısı

Nambiar ve Ramamurthy (2007a) köpük betonun hava boşluklarını tanımlamak için porozite, su geçirimsizlik ve gözenek boyut dağılımını önceden belirlemek gerektiğini, çünkü çimento esaslı malzemeler gibi köpük betonun boşluk yapısının, dayanım ve kalıcılık gibi özelliklerini üzerinde etkisinden dolayı hava boşluklarının tanımlanmasının çok önemli olduğunu söylemişlerdir. Gözenek yapısının köpük

betonun özelliklerini etkileyen ana unsur olabileceğini belirtilmiştir. Gözenek ve köpük beton arasındaki ilişkiyi belirlemenin önemli olduğu ifade edilmiştir. Hava içeriğinin etkisi dışında numune hacim ve boyut ile ve hava boşluğunun boyutunun dayanım ve birim ağırlık üzerinde etkilerinin olduğunu söylemişlerdir. Köpük betonda daha fazla hava boşluğunun uniform dağılması üzerinde dolgu malzemesi olarak uçucu kül kullanılmasının ince kuma kıyasla daha iyi olduğu sonucunu ifade etmişlerdir. Bunun nedeninin daha ince olan uçucu kül tanelerinin her bir kabarcık üzerini uniform kaplayarak, aynı zamanda birleşmeyi ve üst üste binmeleri engelleyerek hava boşluğunun uniform dağılmasını olduğunu söylemişlerdir. Tüm hava boşlukları yaklaşık olarak benzer şekilde olduğunu ve bu boşlukların köpük hacminden bağımsız olması dolayısıyla hava boşluğunun şeklinin köpük betonun özellikleri üzerinde bir etkiye sahip olduğu belirtmişlerdir [58].

Hilal ve arkadaşları (2015a) köpük betonun gözenek boyutu dağılımının dayanım ve kalıcılık gibi özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bu özelliklerini belirlemek için toplam hava boşluğundan çok boşluğun şekli, boyutu ve dağılımı üzerinde araştırmalarını yoğunlaştırmışlardır. Köpük beton sertleştikten sonra boşluğun şeklini belirlemek için köpüğün kabarcık boyutu dağılımını (karışıma ilave edilmeden önce) ve köpük beton içerisindeki gözenek boyutu dağılımını (sertleştikten sonra) bu çalışmanın içeriğini oluşturmuştur. Karışıma eklenmeden önce köpüğün yapısını araştırmak için bitüm emülsiyonuna sahip köpük yapısının açık bir görüntüsünün optik mikroskop kullanarak yakalanabileceği belirtilmiştir. Bu teknik kullanılarak köpük kabarcıklarının boyut dağılımı ve köpük beton içerisindeki hava boşlukları arasında önemli bir farklılık olduğu görülmüştür. Sonuçlara boşluğun küreselliği arttıkça eklenen köpük hacminin bağlı olarak kabarcıkların birleşimlerinin de artırdığını söylemişlerdir. Araştırmacılar tarafından kabarcık birleşimlerinin gözenek boyutu için nispeten önemli olduğu ifade edilmiştir. Daha büyük bileşenlerin olduğu karışımlarda en düşük birim ağırlıklar elde edilmiştir. Bunun nedeninin doğrudan daireselliğin etkisinin bir sonucu olduğunu belirtmişlerdir. [59].

Kuzielová ve arkadaşları (2016) sıvı köpüğün farklı hacimlerde ve su/ çimento oranı 0,55 olan köpük betonların özelliklerine köpük ajanının etkisini araştırmışlardır. Numunelerin kristal faz bileşimi XRD analizi ile değerlendirilmiştir. SEM ortalama

bir boşluk boyutunu belirlemek için kullanılmıştır. Protein esaslı köpük ajanı düşük yoğunluğuna sahip numunelerde; gözenek boyutu daha az olurken, buna karşılık daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Hidratasyon reaksiyonu üzerindeki gecikmeyi engelleyen ve aynı zamanda hidratasyonu hızlandıran protein esaslı köpük ajanının düşük yoğunluğunun köpük kararlılığını artırdığı ifade edilmiştir [60].

Jiang ve arkadaşları (2016) normal Portland çimentosu esaslı yüksek poroziteli köpük betonun özellikleri üzerine bir araştırma yapmışlardır. Çalışmada hava boşluk yapısı, sertleşme özellikleri, kür metodu ve taze köpük betonun kararlılığı incelenmiştir. Priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcılar kullanılarak elde edilen küçük hava boşluklarının boyutu ve bunların sık dağılımı yoğunluğu artırmıştır. Yüksek poroziteli ve kararlı poroziteye sahip köpük beton üretmek için ön köpükendirme metodu kullanılmıştır. Önceden hazırlanmış köpük kullanılarak %88,5-95,4 poroziteye sahip köpük beton elde edileceği belirtilmiştir. Bununla birlikte üretilen köpük betonların basınç dayanımlarının 0,12-0,75 MPa ve ısı iletkenliklerinin ise 0,036-0,063 W/m.K arasında değiştiğini araştırma sonucu olarak ifade etmişlerdir [61].

Xie ve arkadaşları (2018) köpük betonun hava boşluğu yapısı ve özellikleri üzerine bentonit harcının etkisini araştırmışlardır. Bentonit harcı ile üretilen köpük betonun içerisindeki nano boyuta sahip boşluk miktarı artmıştır. Bu da bentonit harcı ile üretilmiş köpük beton daha düşük ısı iletkenliğe sahip olabileceğini göstermiştir [62].

Chung ve arkadaşları (2017) köpük betonun malzeme özellikleri üzerine gözenek özelliklerinin ve gözenekliliğin Micro-CT resimleri ve sayısal yaklaşımlar kullanılarak değerlendirilmesini araştırmışlardır. Köpük beton içerisinde sayısız gözenek bulunur ve bu gözenekler malzemenin özelliklerini önemli ölçüde etkiler. Özellikle köpük betonun özelliklerini, ısı ve mekanik özelliklerini gözenek dağılımı önemli derecede etkilediği vurgulanmıştır. Çalışmada farklı birim ağırlıklara sahip köpük beton numuneleri fiziksel ve ilaveten gözenek yapısı araştırılmıştır. Numunelerin boşluk dağılım özellikleri, boşlukların genişliği, anizotrop gözeneklerin dairesellik etkeni ve bağıl birim ağırlıkları olasılık ve nicel yöntemler ile Micro-CT resimleme tekniği kullanılarak incelenmiştir. Yapılan araştırmada köpük betonun basınç dayanımının azalmasına neden olan gözenek boyutunun ve şeklinin etkisini en aza indirmek ve daha düşük ısı iletkenliğe sahip köpük beton geliştirmek amaçlanmıştır [63].

Hilal ve arkadaşları (2015b) silis dumanı, uçucu kül ve akışkanlaştırıcı katkıların köpük betonun boşluk yapısına ve dayanımına etkisini araştırmışlardır. Akışkanlaştırıcı katkı içeren ve içermeyen köpük betonların özellikleri bu çalışmada kıyaslanmıştır. Optik mikroskop ve SEM kullanılarak köpük betonun içyapısındaki değişimler ve farklı katkıların köpük betonlar üzerine etkisi incelenmiştir. Akışkanlaştırıcı katkıların hem çimento hamurunun mikro yapısını hem de köpük betonun hava boşluğu yapısını geliştirdiği söylenmiştir. Ayrıca, akışkanlaştırıcıların tek başına kullanıldıklarında hava boşlukları üzerinde en yararlı etkiye sahip oldukları belirtilmiştir. Akışkanlaştırıcıların silisi dumanı ve uçucu kül ile kullanılmasıyla hem boşluk sayısını arttığı, aynı zamanda çimento hamurunun yapısının güçlendiği buna bağlı olarak köpük betonun dayanımı arttığı söylenmiştir [64].

2.3.2.3 Su emme ve Kılcal Geçirimsizlik

Kearsley ve Wainwright (2001a) köpük betonun porozitesi ve geçirimsizliği uçucu külün ağırlıkça %75 oranında çimentonun ağırlığının ile yerl değiştirmesi durumunda üretilen köpük betonların porozite ve geçirimsizliklerini araştırmışlardır. Geçirimsizliğin belirlenmesi için su emme ve su buharı geçiş deneyleri yapılmıştır. Köpük beton tarafından emilen su miktarının aynı su/bağlayıcı oranına sahip çimento hamurunun tarafından emilen miktarın yaklaşık iki katından fazla olduğunu ifade etmişlerdir. Uçucu kül tipi ve kül içeriğinin köpük betonun su emmesi üzerinde bir etkiye sahip olmadığını belirtmişlerdir. Çimento hamurunun birim hacim başına su emmesi porozitenin artmasıyla artmıştır. Su buharı geçirimsizliğinin porozitenin artışıyla arttığı gözlenmiştir. Köpük beton karışımlarının su buharı geçirimsizliği kül/çimento oranının artışıyla arttığını ve bu eğilim daha düşük birim ağırlıklarda daha etkili olduğunu söylemişlerdir [65].

Nambiar ve Ramamurthy (2007b) köpük beton gibi yapı malzemelerinin su emme ve kılcallık gibi özelliklerinin kalıcılığı etkilediğini yaptıkları çalışmada söylemişlerdir. Köpük betonun su emmesi ve kılcal su emme miktarlarının köpük içeriğinin artışıyla düştüğü söylenmiştir. Bu durum köpük hacminin artması ile hamur içeriğindeki azalması olarak açıklanmıştır. Kılcallık yoluyla suyun taşınması hava boşluğu oranına ve kıvrım yoluna bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Su emme ince malzeme tipine, yoğunluğa ve boşluk yapısına aynı zamanda geçirimsizlik mekanizmasına da bağlı

olduğu ifade edilmiştir. Belli bir yoğunluk için su-katı etkisine ek olarak azalan köpük içeriğinden dolayı artan hamur hacmi de uçucu kül karışımlarının su emme artışına katkıda bulunabileceği söylenmiştir. Birim ağırlığa bağlı dayanımdaki azalmanın nedeni sürüklenmiş hava boşluğu olduğundan dolayı su emme ve kılcal su emmenin çoğunlukla kılcal geçirimsizlik tarafından kontrol edilebileceğini bildirmişlerdir [66].

Zhijua ve arkadaşları (2014) akışkanlaştırıcı katkı ve yüksek fırın cürufu kullanılarak çok düşük yoğunluğa sahip köpük betonun özelliklerini araştırmışlardır. Kimyasal katkıların sertleşmiş çimentonun fiziksel özelliklerine ilaveten taze çimento hamurunun reolojik özelliklerini ve sertleşme hızını düzenlediği söylenmiştir. Köpük beton hazırlanırken, hammaddenin eklenme sırası ve karışım hızı seçimi dâhil, doğru karışım oranının kontrolü süper düşük yoğunluklu köpük betonun başarılı şekilde hazırlanması için gerekli olduğu ifade edilmiştir. Çalışma sonucunda köpük betonların su emme oranlarının %6,6 ve %8,3, basınç dayanımlarının ise 0,33 ve 1,1 MPa, ısı iletkenliklerinin ise 0,05 ve 0,07 W/m.K arasında değişen değerler elde edilmiştir [67].

2.3.2.4 Isıl İletkenlik

Mydin (2011) farklı birim ağırlıklara sahip köpük betonların ısı iletkenliklerini araştırmıştır. Çalışmada değişen sabit çimento/kum oranı ve su/çimento oranı kullanılarak üretilen birim ağırlıkları 650- 1200 kg/m³ arasında değişen köpük beton numuneleri kullanılmıştır. Birim ağırlık, porozite ve boşluk boyutunun köpük betonun ısı iletkenliği üzerine etkileri incelemiştir. Köpük beton bir çimento esaslı karışım içerisine hava enjekte ederek üretildiği için köpük betonun yoğunluğu doğrudan köpük betonun içerisindeki havanın (porozitenin) bir işlevi olduğu söylenmiştir. Bu yüzden köpük betonun birim ağırlığı ısı iletkenliğini belirlemede önemli rol oynadığını, daha düşük birim ağırlıklarda daha büyük poroziteler elde edileceğini ifade etmiştir. Isı iletkenlik katsayısının köpük betonun porozitesinin belirgin şekilde bağlı olduğunu belirtmiştir [68].

Sayadi ve arkadaşları (2016) genleştirilmiş polistren tozu (EPS) katkısının köpük betonların yangın dayanımı, ısı iletkenliği ve basınç dayanımı gibi özelliklerine etkilerini ele almışlardır. Çalışmada su/çimento oranı 0,33 olan ve karışım içerisindeki %0-82,22 aralığında EPS hacmine sahip birim ağırlıkları 1200kg/m³'den 150 kg/m³ arasında değişen köpük betonlar üzerinde yapılmıştır. Köpük betonun dayanımı EPS

agregasının su iten doğasının bir sonucu olarak hemen hemen sıfır dayanım ve matris temas bölgesinde daha düşük bağ dayanımı oluşturmasından dolayı EPS'nin hacminin artışıyla azalmıştır. Bununla birlikte EPS agregasının sıkışabilir davranışı matrisin ara yüzey bölgesindeki hamurun kırılmasını hızlandırdığı belirtilmiştir. EPS hacmindeki bir artış EPS hacminin (98'i hava %2'si polistren) özelliklerinden dolayı düşük ısı iletkenlik sağladığı ve en düşük ısı iletkenlik değerinin %82 EPS hacmine sahip olan numunelerde 0,084 Wm/K olarak görüldüğünü ve bu değer %28 EPS hacmine sahip olan numunelerde ise yaklaşık 2,5 kat daha fazla olduğunu söylenmişlerdir [69].

Kumar ve arkadaşları (2018) köpük betonun mekanik ve ısı davranışı üzerine deneysel araştırma yapmışlardır. 6 grup köpük beton %15, %17 ve %20 değişen oranlardaki hava içeriklerinde hazırlanmıştır. Hazırlanan köpük beton küp ve levhalar basınç ve ısı testler için kullanılmıştır. Köpük beton kuru birim ağırlığı 860 kg/m³'den 1245 kg/m³'e kadar, basınç dayanımı ise 2,5-6,5 MPa arasında değişmiştir. Bu çalışmada köpük betonun kuru birim ağırlığı, basınç dayanımını ve ısı iletkenliği kil tuğlasıyla kıyaslanmıştır. Yaygın şekilde kullanılan bina tuğlalarının basınç dayanımı 3,5 N/mm², ikinci sınıf tuğlaların ki 7,5 N/mm² ve birinci sınıf tuğlaların ise 10 N/mm² olduğunu, üretilen köpük betonun dayanımlarının yaklaşık olarak ikinci sınıf tuğla dayanımına eşit olduğunu belirtmişlerdir. Buna bağlı olarak iki katlı bir yapı ürettikleri köpük betonun taşıyıcı bir duvar olarak kullanılabilmesi söylemişlerdir. Köpük betonların ısı iletkenlikleri 0,021-0,035 W/m.K arasında değişirken, kil tuğlalarının ısı iletkenlik değerlerinin ise 0,6-1,0 W/m.K olduğunu ifade ederek, köpük betonun kil tuğlasına kıyasla daha az iletken olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca çalışmanın sonucunda köpük beton kullanımıyla ısınma maliyetlerini azaltabileceğini ve yapı ölü yüklerinin %50 oranlarında azaltabileceği belirtilmiştir [70].

2.3.2.5 Yangın Dayanımı

Kearsly ve Mostert (2005) refrakter açısından köpük betonun kullanımını araştırmıştır. Köpük betonun yüksek hava içeriğinden dolayı yangına dayanıklı duvar uygulamalarında kullanılmasının uygun olduğunu söylenmiştir. Bu çalışma da yüksek alüminatlı çimentonun köpük betonda kullanımını ve yüksek sıcaklıkta köpük betonun davranışını üzerine etkisini incelenmiştir. Refraktör endüstrisi için ihtiyaç duyulan belirli dayanım ve gerekli hacim kararlılığına sahip olan köpük betonların özellikleri

araştırılmıştır. Köpük betonun birim ağırlığının dayanım ve hacim kararlılığı üzerine etkisi tartışılmıştır. Köpük betonda kullanılan dolomit kumu ve çimento tipinin yüksek sıcaklığa karşı malzemenin kalıcılığı hakkında bir etkiye sahip oldukları söylenmiştir. Kuruma ve ısınma esnasında köpük beton kendi ağırlığını %25'e kadar kaybetmiştir. 400°C sıcak civarında dolomit kumu içeren harçlar ufalanmaya başladıklarını, hidrolik çimento ve kül içeren harçlarda ise 800°C sıcaklığa kadar dayandıkları ifade edilmiştir. Köpük betonun ısı yalıtım özellikleri birim ağırlığının bir fonksiyonu olduğu ayrıca ifade edilmiştir [71].

Vilches ve arkadaşları (2012) ultra hafif köpük betonun yangın dayanımını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmalarında akışkanlaştırıcılar, hafif agregalar, köpük ajanları ve mineral katkıları gibi çeşitli karışım bileşenleri kullanılarak üretilen ultra hafif köpük betonları incelemiştir. Köpük betonun yangın dayanımı kullanılan malzemelerin oranına ve bileşenlerine bağlı olduğu söylenmiştir. Elde edilen sonuçlara bağlı olarak köpük betonun birim ağırlığı arttıkça ısı iletkenlik ve yangın direnci arttığını belirtmişlerdir. 400 kg/m³ birim ağırlığa sahip ultra hafif köpük betonun yangın direncinin birim ağırlığı 150 kg/m³ sahip olana kıyasla 3 kat daha fazla olduğunu belirtilmişler ve yeterli yangın dayanımına sahip olmak köpük beton elde etmek için birim ağırlığın 250 kg/m³'den daha fazla olması gerektiği önerisinde bulunmuşlardır [72].

2.3.2.6 Ses Yalıtımı

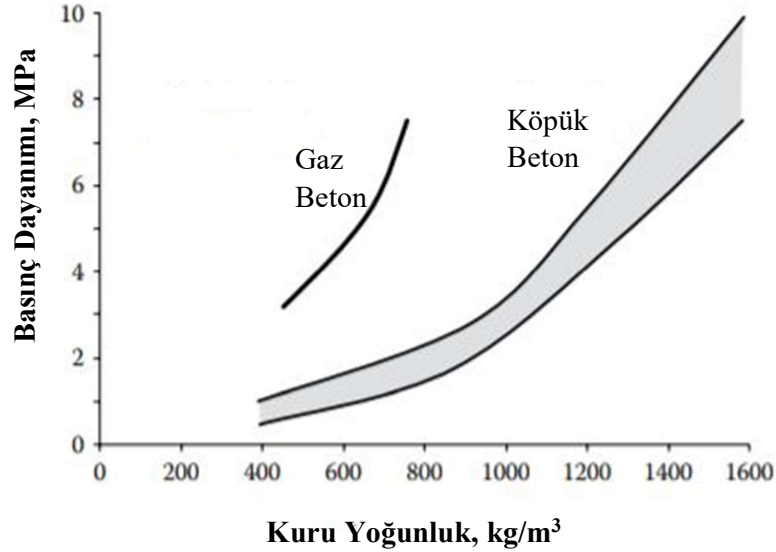
Son çalışmalarda hücreli mikro yapısından dolayı köpük beton normal betona göre daha yüksek akustik yalıtım gösterdiği ifade edilmektedir [73]. Hücreli boşluklu yapısından dolayı bir köpük beton duvar normal beton duvara kıyasla ses frekansını %3 daha fazla bir değerle iletir. Köpük betonun normal betona kıyasla 10 kat daha fazla ses emilimi oranına sahip olduğu çalışmalarda vurgulanmıştır [42, 74]. Köpük betonun ses yalıtımı, köpük içeriği, boşluk boyutu, boşluk dağılımı ve boşluğun uniformluğunun etkili olduğu ifade edilmektedir [41, 73, 75].

2.3.3. Köpük Betonun Mekanik Özellikleri

Bu bölümde köpük betonun basınç dayanımı ve elastik modülü alt başlıklar halinde incelenmiştir.

2.3.3.1 Basınç Dayanımı

Köpük betonun basınç dayanımı hem temel karışım malzemelerin hem de köpük ajanının karakteristik özelliklerinin bir fonksiyonu olarak tanımlanmıştır. [3] Aynı zamanda basınç dayanımı genelde köpük ajanının oranına, kum parçacıklarının tipine, kür metoduna, çimento-kum oranına, karışıma eklenen malzemelerin özelliklerine ve karışım harmanının dağılım gibi farklı etkenlere bağlanmıştır [76]. Önceki çalışmalarda basınç dayanımının yoğunluğun azalması ile birlikte basınç dayanımının azaldığı gözlenmiştir. Şekil 2.9'da gaz beton ve köpük betonun kuru birim ağırlık ile basınç dayanımı arasındaki ilişki gösterilmiştir [77].



Şekil 2. 8 Gaz Beton ve Köpük Birim Ağırlık- Basınç Dayanımı İlişkisi [77]

Kearsley ve Wainwright (2001b) uçucu kül tipinin köpük betonun basınç dayanımı üzerine etkisini araştırmıştır. Uçucu külün %67'ye kadar çimento ile yer değiştirmesi durumunda basınç dayanımlarının önemli değişiklik olmayacağını ifade etmiştir. Hem 28 günlük hem de 1 yıllık sonuçlar köpük betonun basınç dayanımının kuru yoğunluğun başlıca bir fonksiyonu olduğunu ve külle yüzdece yer değiştiren çimentodan çok az etkilendiğini söylemişlerdir [78].

Ibrahim ve arkadaşları (2014) %0, %0,2, %0,4 ve %0,6 polyoelfin lif içeren köpük betonun basınç ve eğilme dayanımlarını araştırmışlardır. Polyoelfin liflerin köpük betonun basınç ve eğilme dayanımını küçük ölçüde artırdığını, . Polyoelfin liflerin

ilave edilmesinin basınç ve eğilme dayanımını artırmaktan ziyade çatlak ilerlemesini geciktirdiğini söylemiştir [79].

Tan ve arkadaşları (2014) ultra hafif köpük betonların ($<300 \text{ kg/m}^3$) basınç dayanımına su/çimento oranı, uçucu kül, uçucu kül etkinleştirici ve köpük ajanının etkisini incelemişlerdir. Uçucu kül içeriğinin %45'den daha az olduğunda basınç dayanımının kısmen azaldığı fakat uçucu kül içeriğinin %45 den daha fazla olması halinde dayanımın hızla azaldığı belirtilmiştir. Basınç dayanımı için en iyi sonuçlar uçucu kül içeriğinin %45'i aşmadığı durumlarda elde edildiğini belirtmişlerdir. Ayrıca yapılan deneysel çalışma da en uygun su/çimento oranının 0,45 olduğu ifade edilmiştir. Köpük ajanın miktarının artması ile köpük betonun basınç dayanımı önemli bir şekilde azaldığı, uçucu kül etkinleştiricinin miktarının artması ile de köpük beton numunelerinin basınç dayanımı belirgin şekilde arttığını gözlemlediklerini belirtmişlerdir [80].

Cong ve Bing (2015) yumuşak kil ve silis dumanı içeren köpük betonların özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada aynı su/çimento oranı için farklı birim ağırlıklara sahip kil esaslı ve silis dumanı içeren köpük betonlar üretilmiştir. Karışımlarda köpük oranı arttıkça ısı iletkenlik ve basınç dayanımının düştüğünü söylemişlerdir. Köpük beton içerisine silis dumanı eklenmesiyle büyük oranda basınç dayanımının arttığı ve ısı yalıtım performansını iyileştirdiğini ifade edilmiştir. İç yapıdaki boşluk yapısının incelenmesine bağlı olarak silis dumanının yalıtım performansını ve dayanımı arttırdığı, ayrıca boşluk dağılımını, boşluk oluşumunu daha uniform ve kapalı boşluklu olarak geliştirdiği gözlenmiştir. Sönmemiş kirecin kil esaslı köpük betonun içerisine eklenmesiyle köpüğün kararlılığını azalttığından basınç dayanımı ve yoğunluğunun artabileceği tespit edilmiştir [81].

Ma ve Chen (2017) Magnezyumfosfat çimento kullanılarak üretilen yeni bir köpük betonun özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada 3 saatlik ve 28 günlük basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ısı iletkenlik ve su direnci ölçülmüştür. Deneylemlerden elde edilen sonuçlara göre köpük içeriği arttıkça kuru birim ağırlık, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ısı iletkenlik ve su direncinin azaldığı belirtilmiştir. Magnezyumfosfat esaslı köpük betonun 3 saatlik basınç dayanımı 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %70'i olarak elde ettiklerini ifade etmişlerdir.

Kuru birim ağırlık azaldıkça basınç dayanımı azaldığı, kuru birim ağırlığı 1565 ve 544 kg/m³ olan numunelerin basınç dayanımı sırasıyla 43,3 MPa ve 1,9 MPa olarak belirlendiğini belirtmişlerdir. Bu gözlem doğrultusunda magnezyumfosfat esaslı köpük betonun kuru birim ağırlığı ile basınç dayanımı ile bağlantılı olduğu söylenmiştir [82].

2.3.3.2 Elastik Modül

Elastik modül köpük betonun kuru birim ağırlığı ile ilişkilendirilmiştir. Kuru birim ağırlığı 500-1600 kg/m³ arasında değişen köpük beton için elastik modül değeri 1-12 kN/mm² arasında değiştiği yapılan çalışmalarda ifade edilmektedir [3]. Basınç dayanımı 40 N/mm² olan yapısal bir köpük betonun elastik modülü yaklaşık 28 kN/mm² olduğu ve önceki çalışmalar ile bu değerler arasındaki büyük farklılığın sebebi iri agreganın eksikliği olarak yorumlamışlardır [3]. Çok az sayıdaki araştırmacı kuru birim ağırlık, basınç dayanımı ve elastik modül arasında köpük betonun elastik modülü hesaplamak için denklem önermişlerdir [2]. Bu denklemler Tablo 2.4’de gösterilmiştir.

Tablo 2. 4 Köpük Betonun Elastisite Modülünü Hesaplamak İçin Denklemler [2]

Yazar	Denklemler	Açıklama
Tada	$E = 5,31 * W - 853$	Kuru birim Ağırlığı 200-800 kg/m ³ arasında değişen numuneler için
McCormick	$E = 33 * W^{1,5} \sqrt{f_c}$	Pauw Denklemi
Jones ve McCarthy	$E = 0,42f_c^{1,18}$	İnce agrega olarak kum kullanıldığında
	$E = 0,99f_c^{0,67}$	İnce agrega olarak uçucu kül kullanıldığında

E= Elastik Modülü (kN/mm²), f_c= Basınç Dayanımı (N/mm²), W= Kuru birim ağırlık (kg/m³)

2.4 Köpük Betonun Kullanım Alanları

Köpük betonun birim ağırlığının normal betona göre hafif olması, düşük ısı iletkenlik, yüksek akışkanlık ve kendiliğinden yerleşmesi aynı zamanda nispeten ucuz maliyetli

olması nedeniyle birçok inşaat uygulamalarında rastlamamız mümkündür [2]. Düşük birim ağırlıklı köpük beton boşluk doldurma ve yalıtım amacıyla kullanırken yüksek birim ağırlıklı olanları yapısal uygulamalarda kullanılır.

Köpük betonun yaygın şekilde uygulama alanları aşağıdaki verilmiştir:

1. Yol kenarı kazılarında oluşan boşlukları doldurmada
2. Kendiliğinden yerleşen ve tesviye eden özelliklerinden dolayı boşlukları doldurma da hızlı ve etkili bir çözüm olarak
3. Zayıf olan toprak tabakasının yerine ve yol alt temeli olarak
4. Liman rıhtımlarına gelen yanal ölü yükleri azaltmak için
5. Zemin ıslahı sağlamak için
6. Yangın Yalıtımında
7. Isı ve ses yalıtımında
8. Yer altındaki yakıt tanklarının, boruların kanalizasyonların yangın ve çökme durumlarından uzak tutmak için
9. Prekast panellerde ve hafif tuğla üretiminde
10. Havaalanlarında darbe emici bariyerlerde kullanılır.

Köpük beton sıkıştırma gerektirmemesi, kendiliğinden yerleşmesi ve yerleştikten bir sonraki gün üzerinde kaplama yapılabilme özelliklerinden dolayı yol kenarlarındaki kazıları doldurmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [83]. Şekil 2.10'da yol kenarındaki kazının köpük beton ile doldurulması gösterilmiştir.



Şekil 2. 9 Köpük Beton İle Yol Kenarı Kazısı Dolgusu [84]

Üretimlerinde ince taneli malzemeler kullanılmasından dolayı daha kararlı bir yapıya sahip olan köpük betonlar yol alt temel malzemesi olarak uygulanmaktadır (Şekil 2.11).



Şekil 2. 10 Köpük Beton Yol Alt Temel Uygulaması [85]

Yeraltı tankları, boruları ve kanalizasyonları yangın tehlikesini ve çökmeyi engellemek için önce dolgu malzemeleri ile desteklenir daha sonra $600-1000 \text{ kg/m}^3$

yoğunluğa sahip köpük beton tarafından kapatılır [83]. Şekil 2.12’de köpük beton ile kapatılmış kanalizasyon borusu gösterilmiştir.



Şekil 2. 11 Köpük Beton İle Kapatılmış Kanalizasyon Borusu [85]

Isı yalıtımı ve hafif özelliği gibi köpük betonun üstün özellikleri depremin olumsuz etkilerini azaltmak ve sıcaklık değişikliklerinin negatif etkisini çözmek için hafif tuğla ve prekast panel olarak da kullanılır. Şekil 2.13’de hafif köpük beton tuğla ile örülmüş bina duvarı görülmektedir.



Şekil 2. 12 Hafif Köpük Beton Bina Taşıyıcı Duvarı [86]

Akışkan, kolay işlenebilir ve sıkıştırma gerektirmeyen doğası gereği ayrıca hafif olmasından dolayı köpük beton ısı yalıtım amaçlı ve çatı sızıntılarından gelen suyu tahliye etmek için binalarda şap betonu olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.14’de köpük betonun şap uygulaması ve Şekil 2.15’de köpük betonun çatı yalıtım uygulaması gösterilmiştir.



Şekil 2. 13 Köpük Betonun Şap Uygulaması [86]



Şekil 2. 14 Köpük Betonun Çatı Yalıtım Uygulaması [86]

Köprü ayaklarında ve liman rıhtımlarının arkasında geri dolgu malzemesi olarak birim ağırlığının düşük olmasından dolayı köpük beton yanal yükleri azaltmak için kullanılır. 400-600 kg/m³ bir birim ağırlığa sahip köpük beton bu uygulama için uygun olmaktadır. Şekil 2.16'da köprü ayağına dolgu olarak kullanılan köpük beton uygulaması görülmektedir.



Şekil 2. 15 Köprü Ayağı Dolgu Malzemesi Olarak Köpük Betonun Kullanılması [87]

3. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu bölümde deneysel olarak kullanılan malzemelerin özellikleri, köpük betonun karışım oranları, köpük betonun taze ve kuru birim ağırlıkları, su emme, porozite, kılcal su emme, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve ısı iletkenlik katsayısının belirlenmesi için yapılan deneylerin yapım metotları ve yapım aşamaları anlatılmaktadır.

3.1 Kullanılan Malzemeler

3.1.1. Çimento

Çalışmada, Votorantim Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş'nin Yozgat Çimento fabrikasında üretilen CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentoya ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3. 1 CEM I 42,5 R Portland Çimentosunun Özellikleri

Kimyasal Özellikler	
Bileşen	(%)
MgO	2,6
SiO ₂	18,7
Al ₂ O ₃	5,48
Fe ₂ O ₃	3,01
Na ₂ O	0,23
K ₂ O	1,22
SO ₃	3,25
CaO	62,3
Kızdırma Kaybı	2,57
Çözünmeyen Kalıntı	0,84
Fiziksel Özellikler	
Özgül Ağırlık g/cm ³	3.11
Özgül Yüzey cm ² /g.	3319

3.1.2. Silis Dumanı

Çalışmada ASTM C-1240 standartlarına uygun silis dumanı kullanılmıştır. Silis dumanına ait kimyasal ve fiziksel özellikler Tablo 3.2’de, görünümü ise Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 2 Çalışmada Kullanılan Silis Dumanının Özellikleri

Kimyasal Özellikler	
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, cm ² /gr	23,36
+45 mikron üzeri	%0,58
Hacim yoğunluğu, g/cm ³	0,55-0,65
Nem (H ₂ O), %	0,19



Şekil 3. 1 Çalışmada Kullanılan Silis Dumanı

3.1.3 Genleştirilmiş Vermikülit

Çalışmada Ukrayna menşeli genleştirilmiş vermikülit kullanılmıştır. Genleştirilmiş vermikülit öğütme cihazı içerisine konularak öğütülmüştür. Genleştirilmiş vermikülitin öğütme öncesi ve öğütme sonrası halleri sırasıyla Şekil 3.2 ve 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 2 Genleştirilmiş Vermikülitin Öğütülmeden Önceki Hali



Şekil 3. 3 Genleştirilmiş Vermikülitin Öğütüldükten Sonraki Hali

Deneysel çalışmada kullanılan genleştirilmiş vermikülitin fiziksel özellikleri Tablo 3.3'de, kimyasal özellikleri Tablo 3.4'de, elek analizi değerleri Tablo 3.5'de, elek analizinin grafiksel gösterimi Şekil 3.4'de verilmiştir.

Tablo 3. 3 Genleştirilmiş Vermikülitin Fiziksel Özellikleri

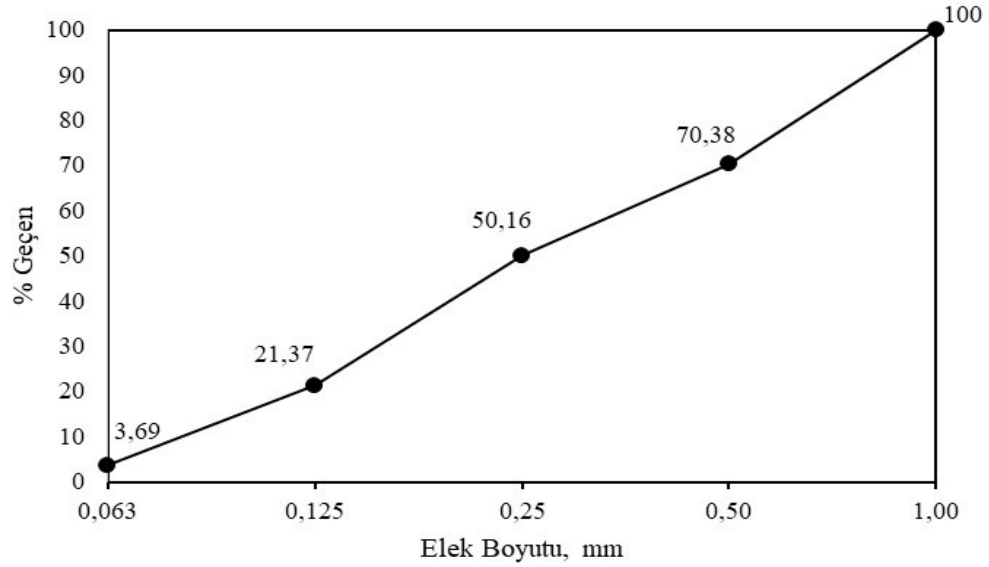
Renk	Altın
Şekil	Akordeon
Su Tutma Kapasitesi	% 240 (ağırlıkça) % 28 (hacimsel)
Kasyon Değişim Oranı	50 - 150 meg / 100 gr.
Isı İletkenliği	0,065 - 0,062 W/mK
Geçirgenlik	95%
Sinterlenme Noktası	1150 °C - 1250 °C
Ateşe Dayanıklılık	Yanmaz
Spesifik Isı	0,20 - 0,26 Kcal / Kg°C
Sıkışık Birim Hacim Ağırlık	0,147 gr/cm ³

Tablo 3. 4 Genleştirilmiş Vermikülitin Kimyasal Özellikleri

Bileşik	%
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

Tablo 3. 5 Öğütülmüş Genleştirilmiş Vermikülitin Tane Boyut dağılımı

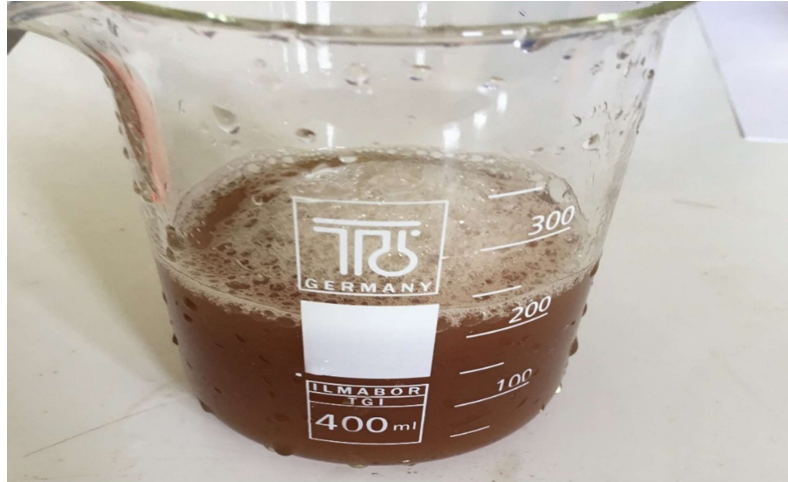
Elek boyutu, mm	% Geçen
1,0	100
0,5	70,38
0,25	50,16
0,125	21,37
0,063	3,69



Şekil 3.4 Öğütülmüş Genleştirilmiş Vermikülitin Tane Boyut Dağılımı Eğrisi

3.1.4 Köpük Ajanı

TSE K 314’de sulu çözelti halinde iken, suyun yüzey gerilmesini düşüren ve köpük oluşturan katkı olarak tanımlanan köpük ajanından köpük solüsyonu hazırlamak için; reçine esaslı köpük ajanı ile suyun kütlece %5 oranında karıştırılıp elde edilen solüsyonu kullanılarak köpük üretim makinasının hava basıncı yardımıyla köpük üretildi. Şekil 3.4’de köpük beton karışımında kullanılan reçine esaslı köpük ajanı gösterilmiştir.



Şekil 3. 4 Karışımında Kullanılan Reçine Esaslı Köpük Ajanı

3.1.5. Karışım Suyu

Bu çalışmada hem karışım suyu olarak hem de köpük solüsyonuna katılacak su Bozok Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarında ortalama sıcaklığı +20 °C olan şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2 Karışım Oranları ve Üretim

Karışım oranlarının belirlenmesi ön döküm yapılan deneylerin sonucunda belirlenmiştir. Bütün karışımlar için silis dumanı çimentonun ağırlığının %2,5'i kadar karışıma katılmıştır. Her bir karışım için hacimce 3 farklı çimento, hacimce 3 farklı genişletilmiş vermikülit tozu ve hacimce 3 farklı önceden üretilmiş köpük hacmi olmak üzere toplam 27 farklı köpük beton numunesi üretilmiştir. Basınç dayanımının ölçülmesi için her bir grup için 3 adet toplamda 81 adet 150x300 mm² (çap=150 mm ve yükseklik=300 mm) silindir kalıplar dökülmüştür. Fiziksel deneyler için 200x200x500 mm³ boyutlarında üretilen prizma numunelerin köpük kesme makinasında 70x70x70 mm³ kesilmesi ile elde edilen numuneler üzerinde yapılmıştır. Her bir grup için 3 adet olmak üzere toplamda 81 adet numune hazırlanmıştır. Benzer şekilde ısı iletkenlik deneyi için de 81 adet 150x120x25 mm³ boyutlarında plak numuneler toplamda kesilerek elde edilmiştir. Köpük beton kesme makinasıyla numunelerin kesilmesi Şekil 3.5'de ve Şekil 3.6'da grupların kesilmiş halleri gösterilmiştir. Köpük betonun karışım miktarları Tablo 3.6'da ve köpük betonun hacimsel olarak karışım oranları Tablo 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3. 6 Köpük Betonun Karışım Miktarları (kg/m³)

Karışım Kodu	Su/Bağlayıcı Oranı	Çimento kg	Silis Dumanı kg	Vermikülit kg	Köpük, kg	Su kg
48Ç-36V-19K	0,69	502	13	33	50	354
48Ç-36V-25K	0,69	456	11	30	61	321
48Ç-36V-31K	0,69	387	10	26	65	273
48Ç-45V-19K	0,75	485	12	40	49	375
48Ç-45V-25K	0,75	418	10	35	56	323
48Ç-45V-31K	0,75	369	9	31	61	285
48Ç-54V-19K	0,85	456	11	46	46	399
48Ç-54V-25K	0,85	395	10	40	53	346
48Ç-54V-31K	0,85	364	9	36	61	318
58Ç-36V-19K	0,68	555	14	31	46	387
58Ç-36V-25K	0,68	471	12	26	52	328
58Ç-36V-31K	0,68	392	10	22	54	273
58Ç-45V-19K	0,70	539	13	37	45	386
58Ç-45V-25K	0,70	452	11	31	50	324
58Ç-45V-31K	0,70	407	10	28	57	291
58Ç-54V-19K	0,78	501	13	42	42	401
58Ç-54V-25K	0,78	437	11	36	49	349
58Ç-54V-31K	0,78	387	10	32	54	310
68Ç-36V-19K	0,59	638	16	30	46	383
68Ç-36V-25K	0,59	521	13	25	50	312
68Ç-36V-31K	0,59	452	11	22	54	271
68Ç-45V-19K	0,66	585	15	35	42	397
68Ç-45V-25K	0,66	510	13	30	49	346
68Ç-45V-31K	0,66	460	12	27	55	313
68Ç-54V-19K	0,73	585	15	42	42	436
68Ç-54V-25K	0,73	477	12	34	45	356
68Ç-54V-31K	0,73	426	11	30	51	318

Tablo 3. 7 Köpük Betonun Hacimsel Olarak Karışım Oranları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Vermikülit	Çimento	Silis Dumanı	Köpük
1	48Ç-36V-19K	0,75	36	48	5,4	19
2	48Ç-36V-25K	0,75	36	48	5,4	25
3	48Ç-36V-31K	0,75	36	48	5,4	31
4	48Ç-45V-19K	0,90	45	48	5,4	19
5	48Ç-45V-25K	0,90	45	48	5,4	25
6	48Ç-45V-31K	0,90	45	48	5,4	31
7	48Ç-54V-19K	1,10	54	48	5,4	19
8	48Ç-54V-25K	1,10	54	48	5,4	25
9	48Ç-54V-31K	1,10	54	48	5,4	31
10	58Ç-36V-19K	0,60	36	58	6,4	19
11	58Ç-36V-25K	0,60	36	58	6,4	25
12	58Ç-36V-31K	0,60	36	58	6,4	31
13	58Ç-45V-19K	0,75	45	58	6,4	19
14	58Ç-45V-25K	0,75	45	58	6,4	25
15	58Ç-45V-31K	0,75	45	58	6,4	31
16	58Ç-54V-19K	0,90	54	58	6,4	19
17	58Ç-54V-25K	0,90	54	58	6,4	25
18	58Ç-54V-31K	0,90	54	58	6,4	31
19	68Ç-36V-19K	0,50	36	68	7,4	19
20	68Ç-36V-25K	0,50	36	68	7,4	25
21	68Ç-36V-31K	0,50	36	68	7,4	31
22	68Ç-45V-19K	0,65	45	68	7,4	19
23	68Ç-45V-25K	0,65	45	68	7,4	25
24	68Ç-45V-31K	0,65	45	68	7,4	31
25	68Ç-54V-19K	0,80	54	68	7,4	19
26	68Ç-54V-25K	0,80	54	68	7,4	25
27	68Ç-54V-31K	0,80	54	68	7,4	31



Şekil 3. 5 Köpük Beton Kesme Makinası



Şekil 3. 6 Köpük Kesme Makinasıyla Kesilen Numuneler

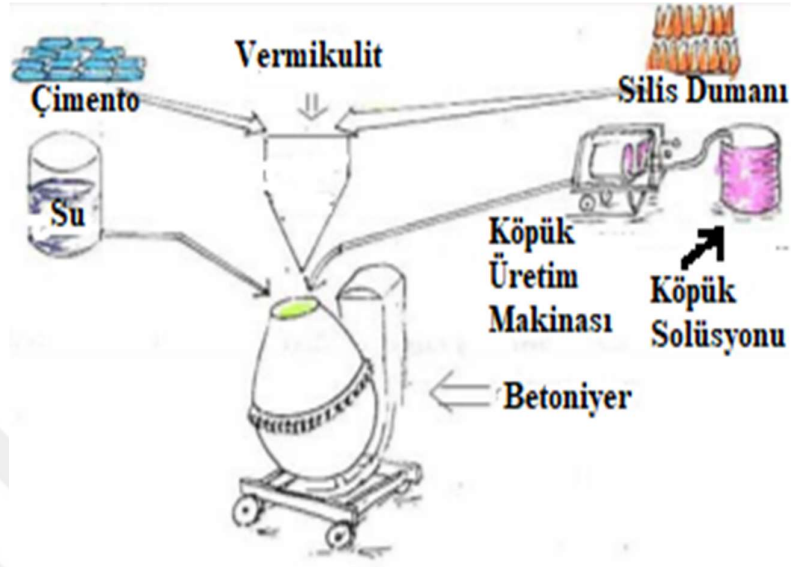
3.2.1 Numune Üretimi

Yozgat Bozok Üniversitesi Yapı Malzemesi Laboratuvarındaki Standart 150x300 mm² numune ve 200x200x500 mm³ kalıpları kullanılarak, her karışım için 3 farklı çimento, 3 farklı vermikülit/çimento oranı ve 3 farklı önceden oluşturulmuş köpük hacmine sahip numuneler üretilmiştir. Köpük solüsyonu; su ve köpük ajanın kütleli olarak karışımı olup üretilen tüm numunelerde aynı olmakla beraber köpük ajanı su

kütlesinin %2,5'i kadardır. Köpük beton üretimine başlamadan önce vermikülit, çimento ve silis dumanı betoniyerde homojen şekilde dağılım göstermesi için karıştırıldı. Daha sonra karışım suyu ilave edilerek bulamaç istenen kıvama getirilmiştir. Önceden hazırlanan köpük solüsyonu köpük üretim makinasından basınçlı hava yardımıyla köpük üretilmiştir. Üretilen köpük karışıma katıldıktan sonra betoniyerde tüm karışım malzemelerinin homojen olacak şekilde betoniyerde 3 dakika karıştırılmasıyla köpük beton elde edilmiştir. Köpük makinasında basınçlı hava yardımıyla üretilen köpük Şekil 3.7'de görülmektedir. Köpük betonun üretim aşaması Şekil 3.8'deki gibi yapılmıştır. Kalıba yerleştirilmiş köpük beton numuneleri Şekil 3.9-3.10'da gösterilen numuneler priz alması için bir gün beklenmiştir. Üretilen numuneler bir gün sonra kalıptan çıkarılmış ve 28 gün boyunca 20 ± 5 °C laboratuvar sıcaklığında kür edilmiştir. Şekil 3. 11'de ise üretilen tüm numunelerin 28 günlük durumu gösterilmiştir.



Şekil 3. 7 Köpük Makinasından Basınçlı Hava Yardımıyla Üretilen Köpük



Şekil 3. 8 Köpük Betonun Üretim Aşaması [88]



Şekil 3. 9 Üretilen Silindir Numunelerinin Priz Alması için 1 Gün Kalıpta Bekletilmesi



Şekil 3. 10 Fiziksel Deneyler İçin Üretilen $200 \times 200 \times 500 \text{ mm}^3$ Numunelerin Priz Alması için 1 gün Kalıpta Bekletilmesi



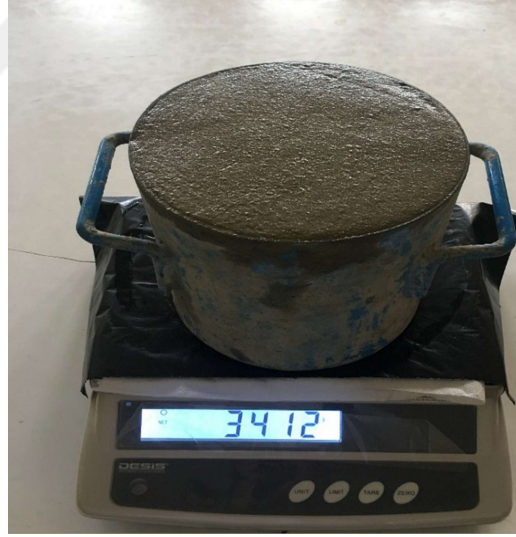
Şekil 3. 11 28 Gün Laboratuvar Koşullarında Kür Edilen Üretilen Tüm Numune Grupları

Üretilen numunelerdeki kodlama sistemi, çimento, vermikülit hacimlerine ve köpük yoğunluklarına göre yapılmıştır. Örneğin, 48Ç-54V-19K-2 numunesi; Hacimce 48 çimento, hacimce Vermikülit 54 ve hacimce 19 köpük içeren numunenin ikincisi olarak tanımlanmaktadır.

3.3. Deneyle

3.3.1 Birim Ağırlık Deneyi

Köpük betonun numunelerinin üretimi sırasında TS EN 12350-6'da belirtilen şartlara uygun olarak 5 litre hacimli silindir kap kullanılarak taze birim ağırlık deneyleri yapılmıştır. Şekil 3.12'de 5 litre hacimli silindir kap ile üretilen köpük betonun taze birim ağırlığının ölçülmesi görülmektedir.



Şekil 3. 12 Köpük Betonun Taze Ağırlığının Tartılması

3.3.2 Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Deneyle

Laboratuvar koşullarında 28 gün kürlenmiş olan 70x70x70 mm³ tüm deney grubu numunelerinin kuru birim ağırlıkları elektronik terazi de tartılmıştır. Şekil 3.13'de 70x70x70 mm³ numunenin kuru birim ağırlığının elektronik terazi ile tartılması gösterilmiştir.



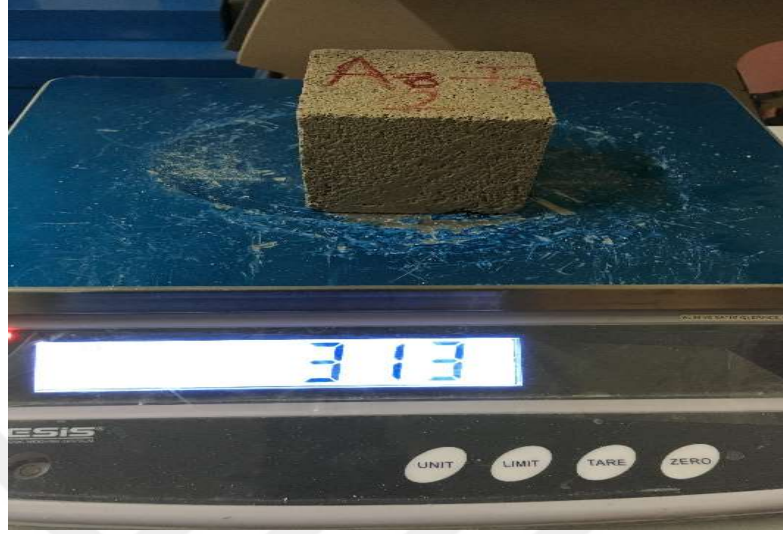
Şekil 3. 13 70x70x70 mm³ Numunenin Kuru Birim Ağırlığının Elektronik Terazide Tartılması

Daha sonra numunelerin porozite ve su emme oranlarını belirlemek için tüm deney grubundaki numuneler 3 gün boyunca su içerisinde muhafaza edildi. Şekil 3.14’de su içerisinde muhafaza edilen numuneler gösterilmiştir.



Şekil 3. 14 3 Gün Boyunca Su İçerisinde Muhafaza Edilen Numuneler

Su içerisinde 3 gün muhafaza edilen numuneler deney gruplarına göre tek tek alınıp yüzeyleri kurularak suya doymun havadaki ağırlıkları elektronik terazide tartılmıştır. Şekil 3.15’de suya doymun havadaki ağırlıkların tartılma aşaması verilmiştir.



Şekil 3. 15 Suya Doymun Havadaki Ağırlığın Tartılması

Ayrıca Arşimet deneyi ile su içinde tartılarak gerçek hacimleri hesaplanan numunelerin porozite değeri (P) ve su emme oranları (μ) sırasıyla (3,1) ve (3,2) bağıntılarıyla hesaplanmıştır. Arşimet deneyi sonrası tüm numuneler Şekil 3.16'da gösterildiği gibi oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Her bir grup için 3 adet üretilen numunelerin ortalamaları alınarak deney sonuçları elde edilmiştir.

$$P(\%) = \frac{(W_1 - W_0)}{W_1 - W_2} \times 100 \quad (3.1)$$

$$\mu(\%) = \frac{(W_1 - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3.2)$$

Burada;

W_0 : Kuru ağırlık

W_1 : Suya doymun havadaki ağırlık

W_2 : Su içerisindeki ağırlık olarak ifade edilmektedir.



Şekil 3. 16 Oda Sıcaklığında Kurumaya Bırakılan Deney Numuneleri

3.3.3 Kılcal Su Emme Deneyleri

Numunelerin suya değen yüzeyinden su alması için diğer yüzeyler mum eritilerek su seviyesinden yüksek olacak şekilde parafinlenmiştir. Parafinlenen numunelerin ağırlıkları elektronik terazide ölçülmüş ve ölçülen bu değer kuru birim ağırlık olarak alınmıştır. Daha sonra numunelerin bir yüzü temas edecek biçimde Şekil 3.17 'de gösterilen deney düzeneğinde belli aralıklarla 1, 2, 4, 8,16,30 dakika, 1sa, 2 ve 4 saatte suyun temas ettiği yerler kâğıt havluyla silinerek numunelerin ağırlıkları ölçülmüştür. Şekil 3.18'de belli aralıklarla ölçülen numunelerin tartılması gösterilmiştir. Her bir grup için 3 adet olan numunelerin ortalamaları alınarak deney sonucuna yazılmıştır.

$$kt = \frac{Q^2}{A^2} \quad (3.3)$$

Burada;

Q: Emilen su miktarı, (cm³)

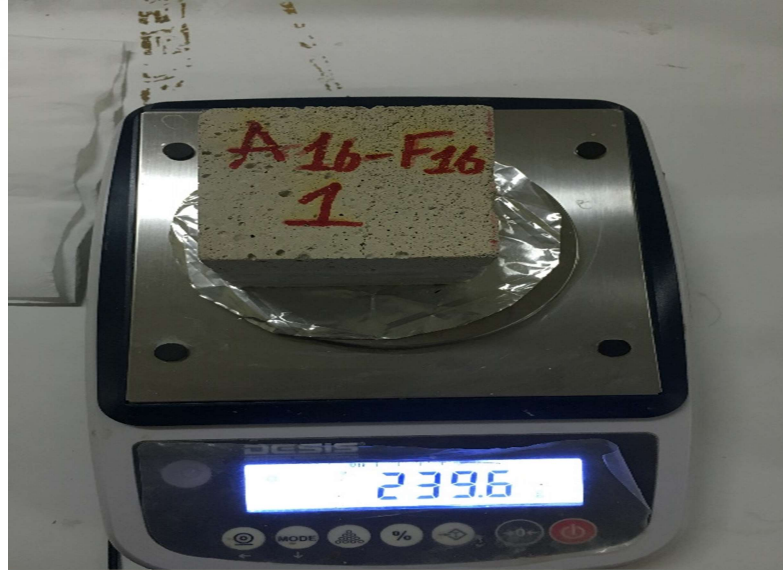
A: Su ile temas eden kesit alanı (suyun emildiği kesit alan), (cm²)

t: Geçen zaman, (sn)

k: Kılcal su emme katsayısı, (cm²/s) ifade etmektedir.



Şekil 3. 17 Kılcal Su Emme Deney Düzeğindeki Numuneler



Şekil 3. 18 Kılcal Su Emme Deney Düzeğindeki Numunelerin Belirli Aralıklarla Ölçülmesi

3.3.4 Ultrases Geçiş Hızlarının Belirlenmesi

Her bir grup için 3'er adet kesilmiş olan $70 \times 70 \times 70 \text{ mm}^3$ numunelerin TS EN 12504-4 standartlarına uygun olarak ultrases geçiş hızının tayini deneyi yapılmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.22'de verilmiştir.



Şekil 3. 19 Ultrases Geçiş Hızının Belirlenmesi

Deneyde, ultrases cihazı ile 10^{-6} μ s duyarlıkla bulunan ultrases geçiş süreleri ölçülmüştür. Ölçüm yapılan numune boyunun kaydedilen geçiş süresine bölünmesiyle ses geçiş hızı hesaplanmıştır. Her grup için 3 adet üretilen $70 \times 70 \times 70$ mm³ numunelerin ultrases sonuçlarının ortalaması alınarak sonuçlara yazılmıştır.

$$V_s = \frac{l}{t} \quad (3.3)$$

Burada,

V_s : Ultrases geçiş hızını (m/s)

l : İki transducer arası mesafeyi

t : Ultrases geçiş hızını (μ s)

ifade etmektedir.

3.3.5 Basınç Dayanımı Deneyleri

28 günlük oda sıcaklığında kürlenmiş olan tüm deney gruplarından 3'er adet silindir önce çimento kum karışımından yapılan silindirlerin yüzeylerini düzeltmek için başlıklar yapılmıştır. Şekil 3.20'de tüm deney grubu silindir numuneleri için yapılan başlıklar görülmektedir.



Şekil 3. 20 Tüm Deney Grubu Silindirler İçin Yapılan Başlıklar

Daha sonra tüm deney grupları için numuneler Şekil 3.21’de gösterilen TS EN 12390-3 standardına uygun cihazda basınç dayanımları ölçülmüştür.



Şekil 3. 21 Basınç Dayanımı Deney Düzeneği

Deney sonucu 3 adet numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınarak belirlenmiştir. Cihazdan elde edilen deney sonuçlar kN cinsinden alınmış olup alınan değerler MPa'ya çevrilmiştir. Şekil 3.22'de deney sonundaki bir numune gösterilmiştir.

$$\sigma_b = \frac{P}{A} \quad (3.2)$$

Burada,

P: Uygulanan Kuvvet

A: Kesit Alanı

σ_b : Basınç Dayanımı

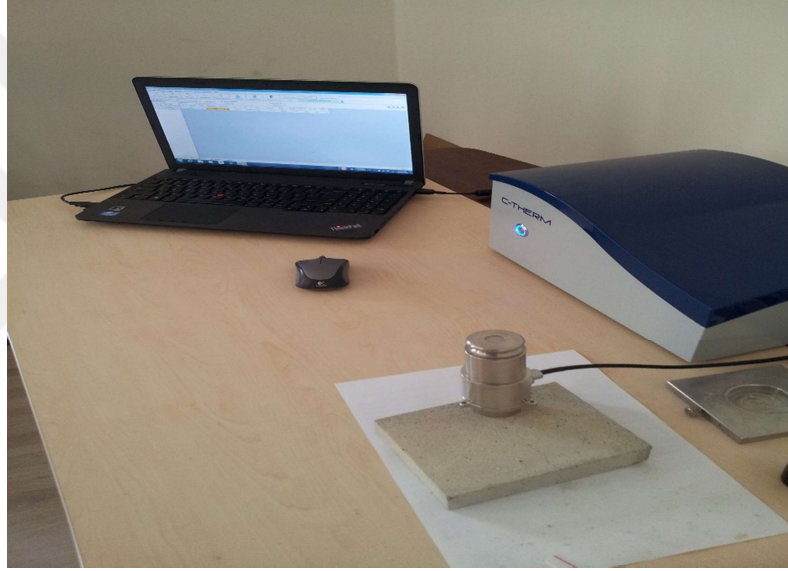
ifade etmektedir.



Şekil 3. 22 Basınç Dayanımı Deney Sonrası Numunenin Kırılma Şekli

3.3.6 Isıl İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi

Isıl iletkenlik katsayısının belirlemek için 28 gün oda koşullarında kürlenmiş olan her bir deney grubu için 3 adet kesilmiş olan 150x120x25 mm³ plak numuneler üzerinde yapılmıştır. Deneyler Bartın Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnaaat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında Hot Wire yöntemiyle yapılmıştır. Şekil 3.23'de deney düzeneği verilmiştir. Isıl iletkenlik sonuçları her grup için 3 adet olan numunelerin ortalamaları alınarak sonuçlara yazılmıştır.



Şekil 3. 23 Hot-Wire Metodu İle Isıl İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi

4. DENEYSEL SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRİLMESİ

Üretilen köpük beton numuneler yapılan fiziksel ve mekanik özelliklere ait deney sonuçları aşağıda verilmiştir.

4.1 Taze Birim Ağırlık

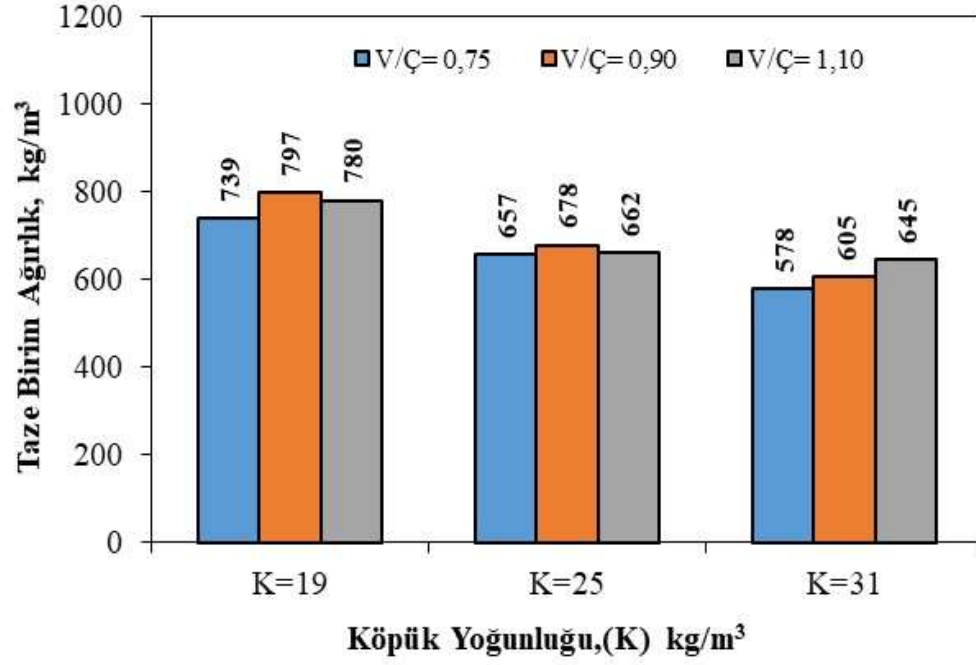
Hacimce 48 çimento oranına sahip olan köpük betonların taze birim ağırlık deney sonuçları Tablo 4.1’de verilmiştir. Taze birim ağırlıkların V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.1’de ve Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 1 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Taze Birim Ağırlık Deney Sonuçları

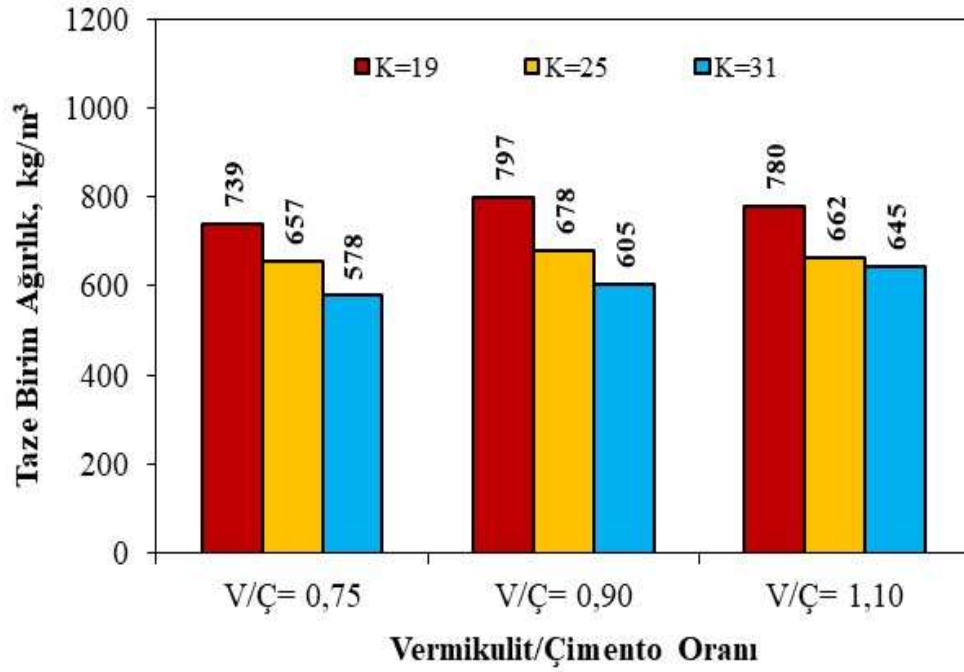
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Vermikülit	Çimento	Köpük	Taze Birim Ağırlık, kg/m ³
1	48Ç-36V-19K	0,75	36	48	19	739
2	48Ç-36V-25K	0,75	36	48	25	657
3	48Ç-36V-31K	0,75	36	48	31	578
4	48Ç-45V-19K	0,90	45	48	19	797
5	48Ç-45V-25K	0,90	45	48	25	678
6	48Ç-45V-31K	0,90	45	48	31	605
7	48Ç-54V-19K	1,10	54	48	19	780
8	48Ç-54V-25K	1,10	54	48	25	662
9	48Ç-54V-31K	1,10	54	48	31	645

Hacimce 48 çimento oranına sahip köpük betonların taze birim ağırlık değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç=0,75 oranında sırasıyla 739, 657 ve 578 kg/m³ olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,90 oranı için ise sırasıyla 797, 678 ve 605 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=1,10 oranı olduğunda ise 780, 662 ve 645 kg/m³ olarak elde edilmiştir.

En düşük taze birim ağırlık değeri köpük yoğunluğu 31kg/m³ olan V/Ç =0,75 oranında 578 kg/m³, en yüksek taze birim ağırlık değeri ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,90 olan numunede 797 kg/m³ olarak görülmüştür.



Şekil 4. 1 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğu (K) Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi



Şekil 4. 2 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi

Taze birim ağırlık, köpük yoğunluğunun 19 ve 25 kg/m³ V/Ç oranının artması ile önce artıp daha sonra azalmıştır. Köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olduğunda ise V/Ç oranı arttıkça taze birim ağırlığın arttığı gözlemlenmiştir.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile taze birim ağırlıklarda azalma görülmüştür.

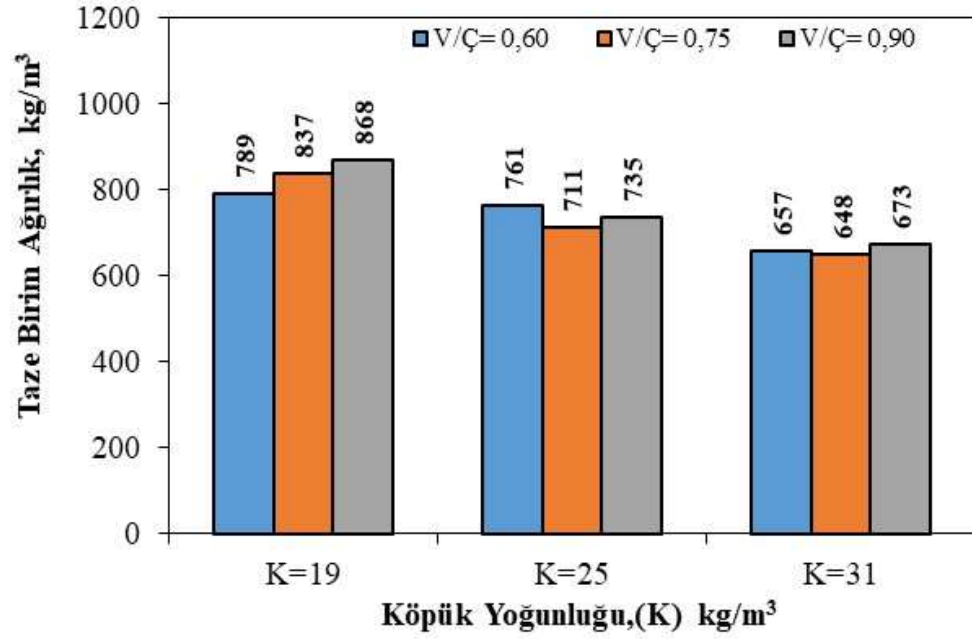
Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların taze birim ağırlık deney sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir. Taze birim ağırlıkların V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.3’de ve Şekil 4.4’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 2 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Taze Birim Ağırlık Deney Sonuçları

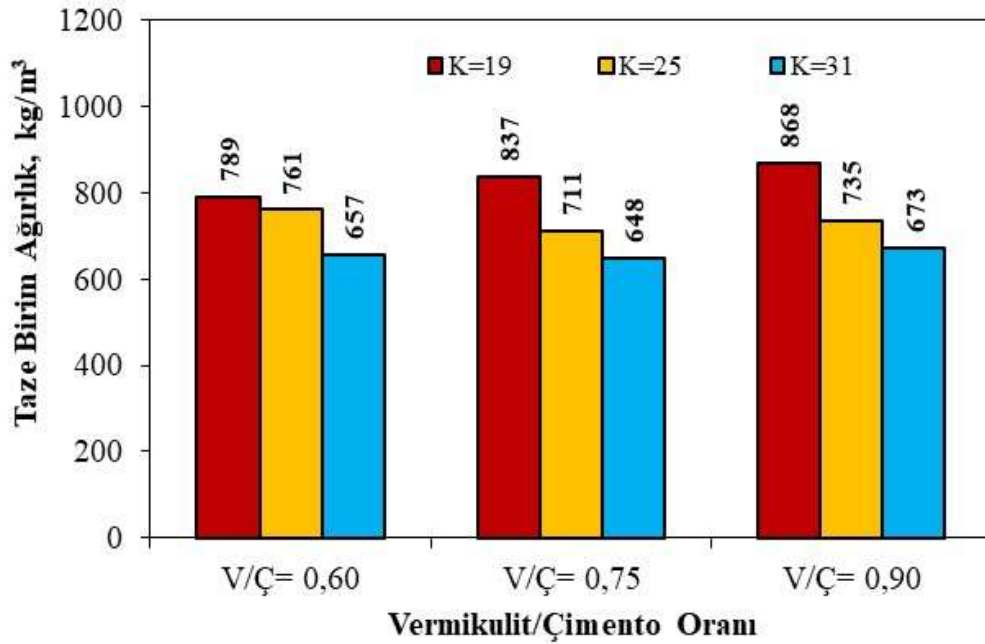
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Vermikülit	Çimento	Köpük	Taze Birim Ağırlık, kg/m ³
1	58Ç-36V-19K	0,60	36	58	19	789
2	58Ç-36V-25K	0,60	36	58	25	761
3	58Ç-36V-31K	0,60	36	58	31	657
4	58Ç-45V-19K	0,75	45	58	19	837
5	58Ç-45V-25K	0,75	45	58	25	711
6	58Ç-45V-31K	0,75	45	58	31	648
7	58Ç-54V-19K	0,90	54	58	19	868
8	58Ç-54V-25K	0,90	54	58	25	735
9	58Ç-54V-31K	0,90	54	58	31	673

Hacimce 58 çimento oranına sahip köpük betonların taze birim ağırlık değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç=0,60 oranında sırasıyla 789, 761 ve 657 kg/m³ olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,75 oranı için ise sırasıyla 837, 711 ve 648 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,90 oranı olduğunda ise 868, 735 ve 673 kg/m³ olarak elde edilmiştir.

En düşük taze birim ağırlık değeri köpük yoğunluğu 31kg/m³ olan V/Ç =0,75 oranında 648 kg/m³, en yüksek taze birim ağırlık değeri ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,90 olan numunede 868 kg/m³ olarak görülmüştür.



Şekil 4. 3 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi



Şekil 4. 4 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi

Taze birim ağırlık, köpük yoğunluğunun 19 kg/m^3 'de V/Ç oranının artması ile artmıştır. Köpük yoğunluğunun 25 ve 31 kg/m^3 olduğunda V/Ç oranı arttıkça taze birim ağırlığın önce azaldığı daha sonra arttığı gözlemlenmiştir.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile taze birim ağırlıklarda azalma görülmüştür.

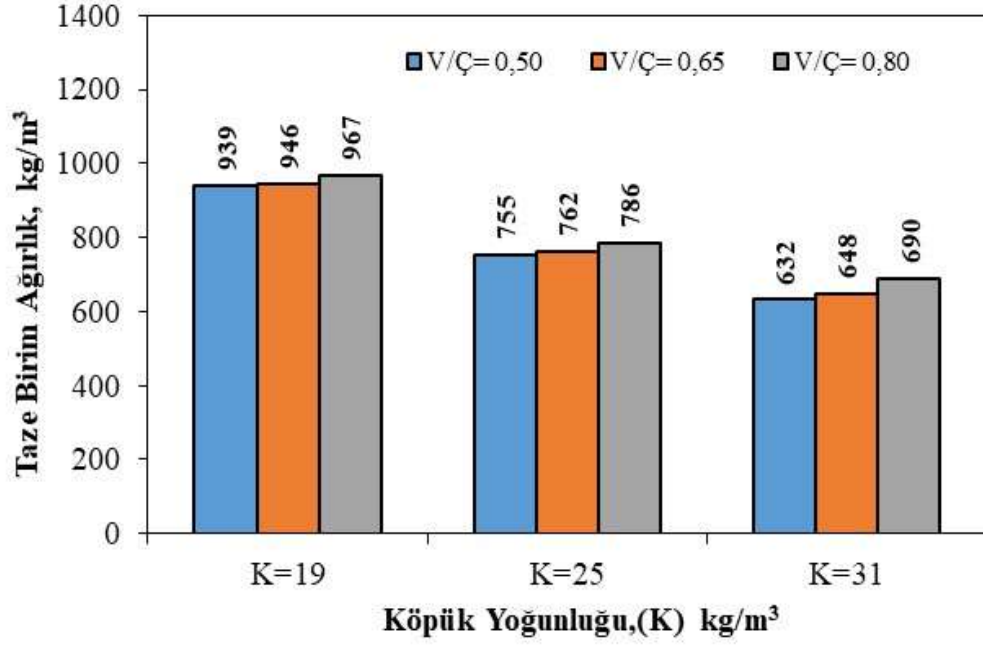
Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların taze birim ağırlık deney sonuçları Tablo 4.3'de verilmiştir. Taze birim ağırlıkların V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.5'de ve Şekil 4.6'da gösterilmiştir.

Tablo 4. 3 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Taze Birim Ağırlık Deney Sonuçları

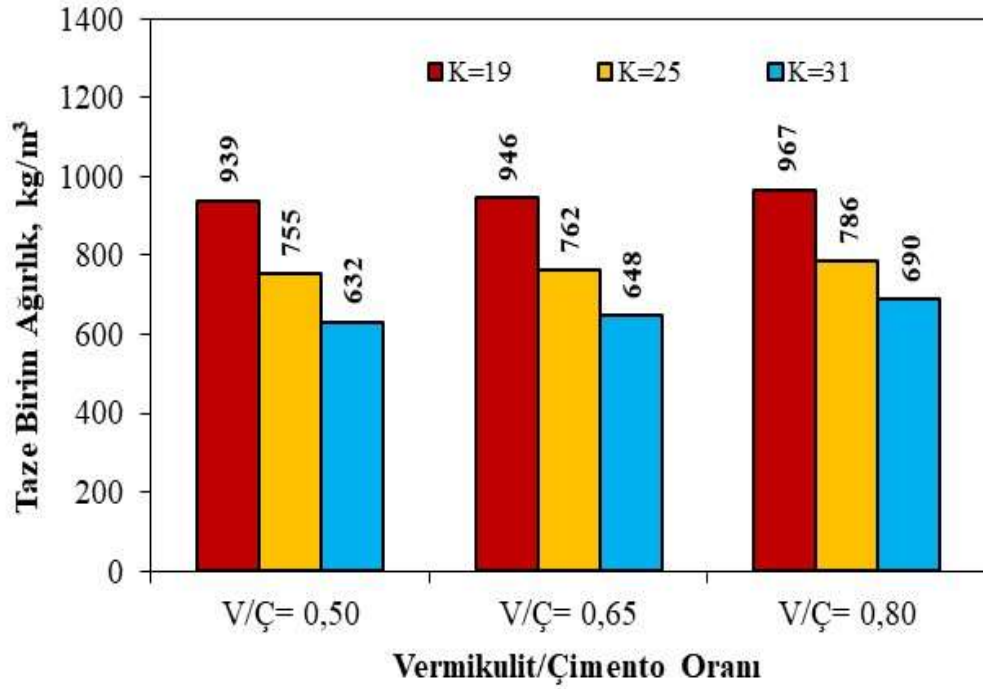
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Vermikülit	Çimento	Köpük	Taze Birim Ağırlık, kg/m^3
1	68Ç-36V-19K	0,50	36	68	19	939
2	68Ç-36V-25K	0,50	36	68	25	755
3	68Ç-36V-31K	0,50	36	68	31	632
4	68Ç-45V-19K	0,65	45	68	19	946
5	68Ç-45V-25K	0,65	45	68	25	762
6	68Ç-45V-31K	0,65	45	68	31	648
7	68Ç-54V-19K	0,80	54	68	19	967
8	68Ç-54V-25K	0,80	54	68	25	786
9	68Ç-54V-31K	0,80	54	68	31	690

Hacimce 68 çimento oranına sahip köpük betonların taze birim ağırlık değerleri; köpük yoğunluğu 19 , 25 ve 31 kg/m^3 için V/Ç=0,50 oranında sırasıyla 939 , 755 ve 632 kg/m^3 olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,65 oranı için ise sırasıyla 946 , 762 ve 648 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,80 oranı olduğunda ise 967 , 786 ve 690 kg/m^3 olarak elde edilmiştir.

En düşük taze birim ağırlık değeri köpük yoğunluğu 31 kg/m^3 olan V/Ç =0,50 oranında 632 kg/m^3 , en yüksek taze birim ağırlık değeri ise köpük yoğunluğu 19 kg/m^3 olan V/Ç=0,80 olan numunede 967 kg/m^3 olarak görülmüştür.



Şekil 4. 5 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi



Şekil 4. 6 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğuna (K) ve V/Ç Oranına Göre Taze Birim Ağırlıklarının Değişimi

Taze birim ağırlık, her bir köpük yoğunluğunda V/Ç oranının artması ile artmıştır.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile taze birim ağırlıklarda azalma görülmüştür.

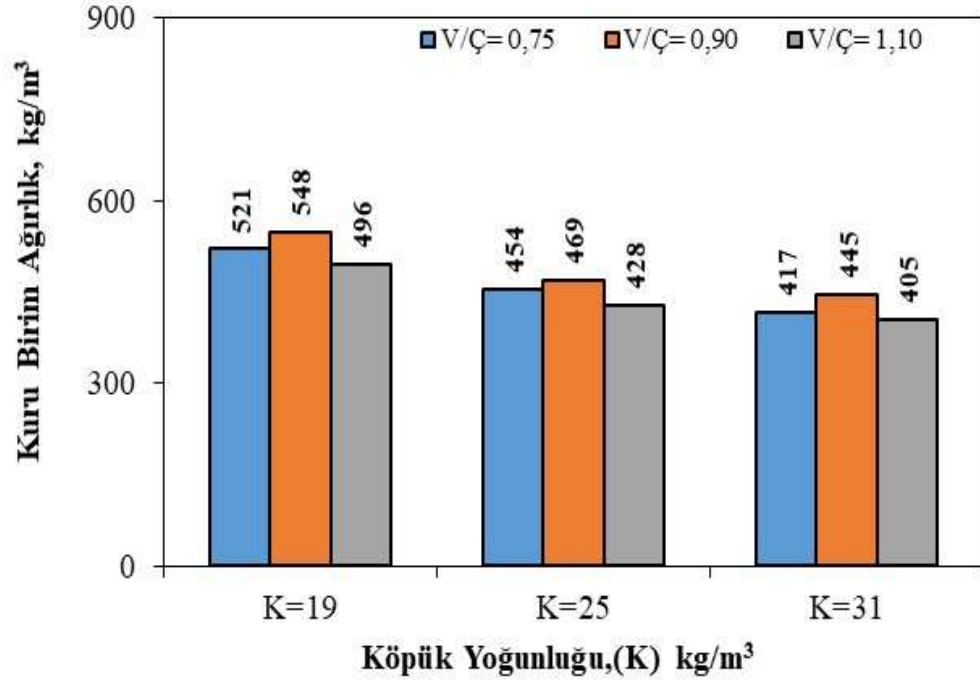
Genel bir ifade ile çimento oranı arttıkça köpük betonun boşluk yapısının azalmasının bir sonucu olarak taze birim ağırlığının arttığı söylenebilir. Ayrıca tüm çimento oranlarında köpük yoğunluğu arttıkça köpük betonun boşluk yapısının artması ile taze birim ağırlık azalmıştır. Tüm çimento oranlarında en düşük taze birim ağırlığın hacimce çimento oranı 48 olan, köpük yoğunluğu 31 kg/m³ ve V/Ç= 0,75 oranında 578 kg/m³ olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek taze birim ağırlık ise hacimce çimento oranı 68, köpük yoğunluğu 19 kg/m³ ve V/Ç=0,80 oranında 967 kg/m³ olarak belirlenmiştir.

4.2 Kuru Birim Ağırlık

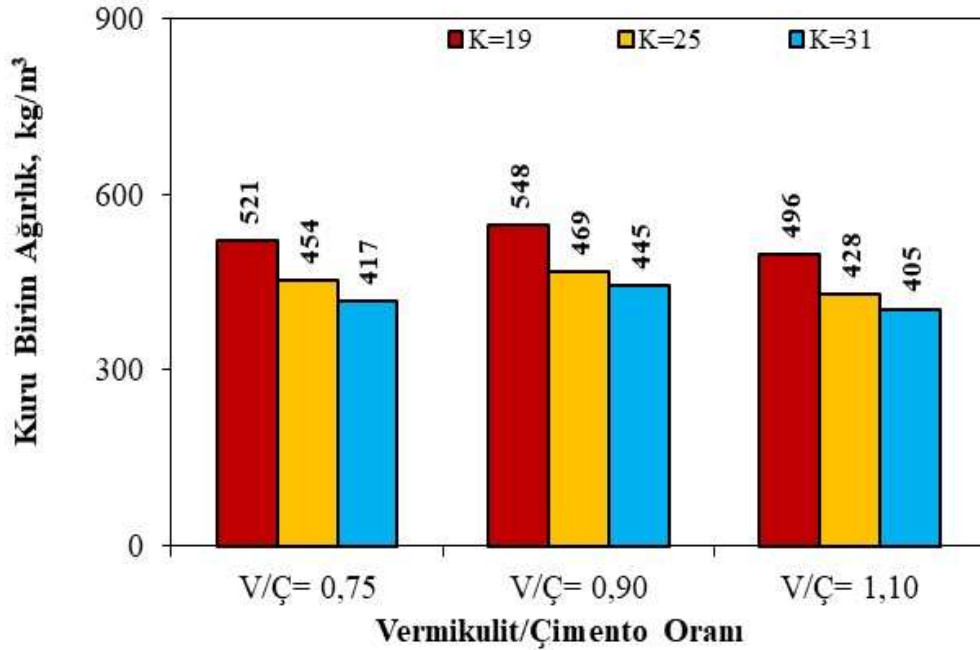
Hacimce 48 çimento oranına sahip olan köpük betonların kuru birim ağırlık deney sonuçları Tablo 4.4'de verilmiştir. Kuru birim ağırlıkların V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.7'de ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 4 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Kuru Birim Ağırlık, kg/m ³
1	48Ç-36V-19K	0,75	48	36	19	521
2	48Ç-36V-25K	0,75	48	36	25	454
3	48Ç-36V-31K	0,75	48	36	31	417
4	48Ç-45V-19K	0,90	48	45	19	548
5	48Ç-45V-25K	0,90	48	45	25	469
6	48Ç-45V-31K	0,90	48	45	31	445
7	48Ç-54V-19K	1,10	48	54	19	496
8	48Ç-54V-25K	1,10	48	54	25	428
9	48Ç-54V-31K	1,10	48	54	31	405



Şekil 4. 7 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi



Şekil 4. 8 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğuna (K) ve V/Ç Oranına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi

Hacimce 48 çimento oranına sahip köpük betonların kuru birim ağırlık değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,75 oranında sırasıyla 521, 454 ve 417 kg/m³ olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,90 oranı için ise sırasıyla 548, 469 ve 445 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=1,10 oranı olduğunda ise 496, 428 ve 405 kg/m³ olarak elde edilmiştir.

En düşük kuru birim ağırlık değeri köpük yoğunluğu 31kg/m³ olan V/Ç =1,10 oranında 405 kg/m³, en yüksek kuru birim ağırlık değeri ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,90 olan numunede 548 kg/m³ olarak görülmüştür.

Kuru birim ağırlık, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/Ç oranının artması ile önce artıp daha sonra azalmıştır.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile kuru birim ağırlıklarda azalma görülmüştür.

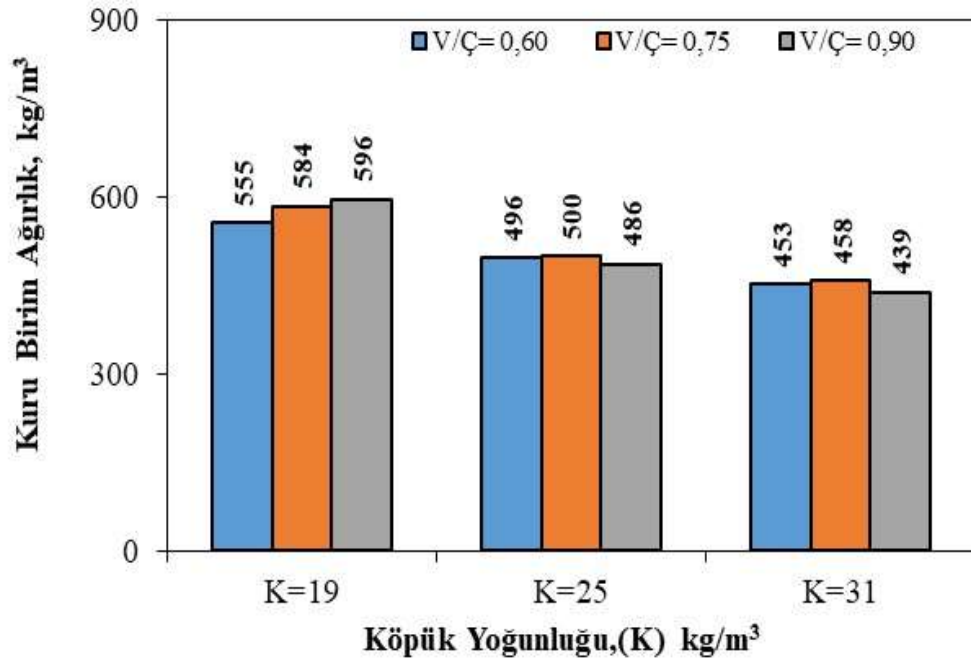
Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların kuru birim ağırlık deney sonuçları Tablo 4.5’de verilmiştir. Kuru birim ağırlıkların V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.9’da ve Şekil 4.8’da gösterilmiştir.

Tablo 4. 5 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Kuru Birim Ağırlık, kg/m ³
1	58Ç-36V-19K	0,60	58	36	19	555
2	58Ç-36V-25K	0,60	58	36	25	496
3	58Ç-36V-31K	0,60	58	36	31	453
4	58Ç-45V-19K	0,75	58	45	19	584
5	58Ç-45V-25K	0,75	58	45	25	500
6	58Ç-45V-31K	0,75	58	45	31	458
7	58Ç-54V-19K	0,90	58	54	19	596
8	58Ç-54V-25K	0,90	58	54	25	486
9	58Ç-54V-31K	0,90	58	54	31	439

Hacimce 58 çimento oranına sahip köpük betonların kuru birim ağırlık değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,60 oranında sırasıyla 555, 496 ve 453kg/m³ olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,75 oranı için ise sırasıyla 584, 500 ve 458 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç= 0,90 oranı olduğunda ise 596, 486 ve 439 kg/m³ olarak elde edilmiştir.

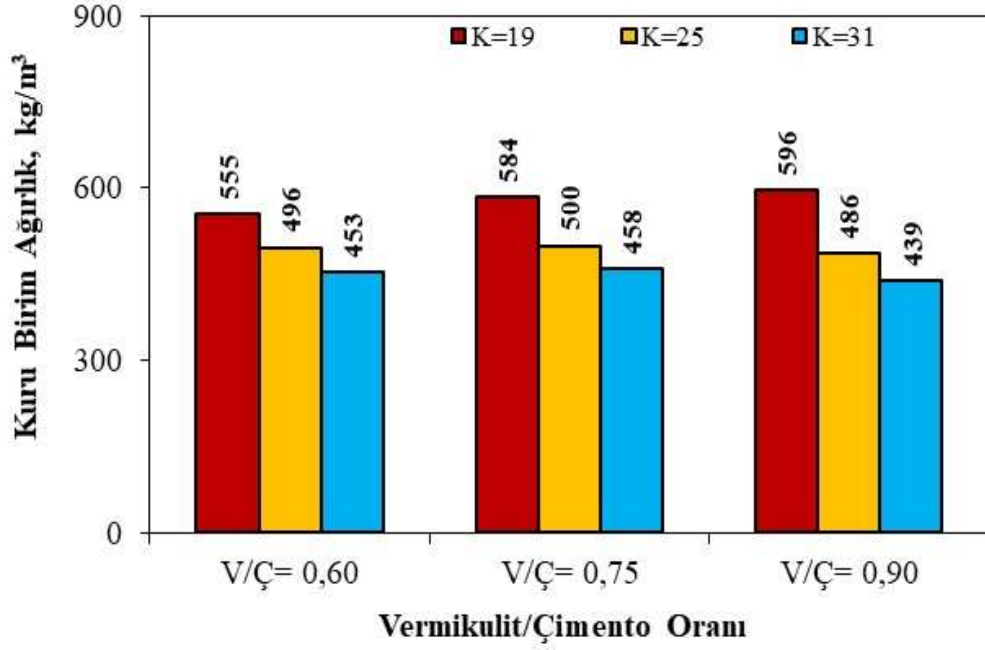
En düşük kuru birim ağırlık değeri köpük yoğunluğu 31kg/m³ olan V/Ç = 0,90 oranında 439 kg/m³, en yüksek kuru birim ağırlık değeri ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç= 0,90 olan numunede 596 kg/m³ olarak görülmüştür.



Şekil 4. 9 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi

Kuru birim ağırlık, köpük yoğunluğunun 19 kg/m³ değeri için V/Ç oranının artması ile artmıştır. Köpük yoğunluğunun 25 ve 31 kg/m³ olduğunda ise V/Ç oranı arttıkça önce arttığı daha sonra azaldığı gözlemlenmiştir.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile kuru birim ağırlıklarda azalma görülmüştür.



Şekil 4. 10 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi

Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların kuru birim ağırlık deney sonuçları Tablo 4.6'da verilmiştir. Kuru birim ağırlıkların V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.11'de ve Şekil 4.12'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 6 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlık Deney Sonuçları

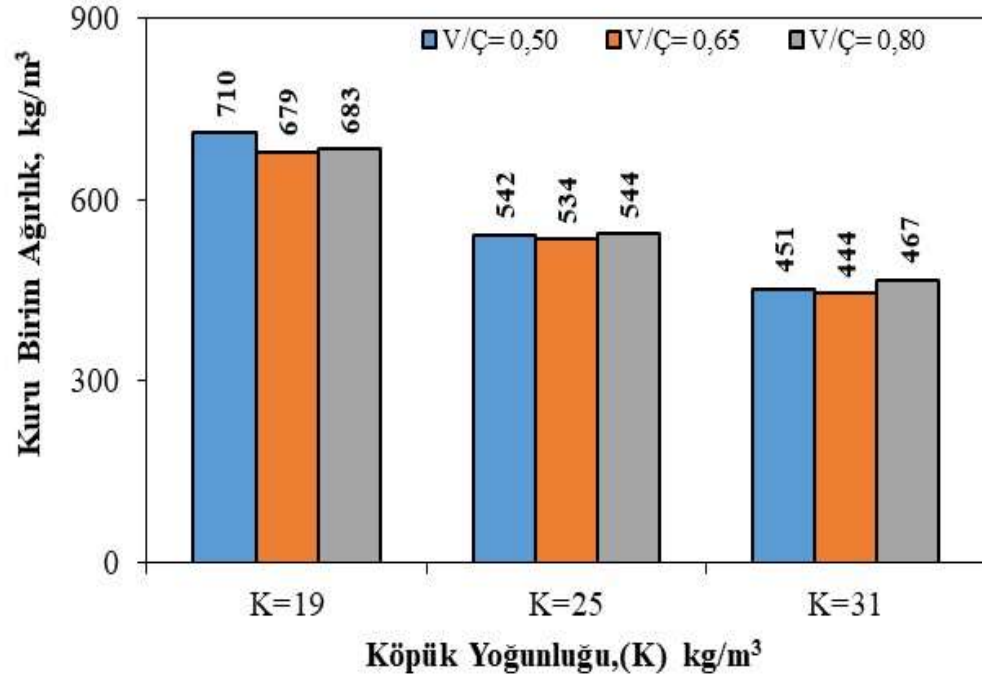
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Kuru Birim Ağırlık, kg/m ³
1	68Ç-36V-19K	0,50	68	36	19	710
2	68Ç-36V-25K	0,50	68	36	25	542
3	68Ç-36V-31K	0,50	68	36	31	451
4	68Ç-45V-19K	0,65	68	45	19	679
5	68Ç-45V-25K	0,65	68	45	25	534
6	68Ç-45V-31K	0,65	68	45	31	444
7	68Ç-54V-19K	0,80	68	54	19	683
8	68Ç-54V-25K	0,80	68	54	25	544
9	68Ç-54V-31K	0,80	68	54	31	467

Kuru birim ağırlık değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,50 oranında sırasıyla 710, 542 ve 451 kg/m³ olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,65 oranı için ise sırasıyla 679, 534 ve 444 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç= 0,80 oranı olduğunda ise 683, 544 ve 467 kg/m³ olarak elde edilmiştir.

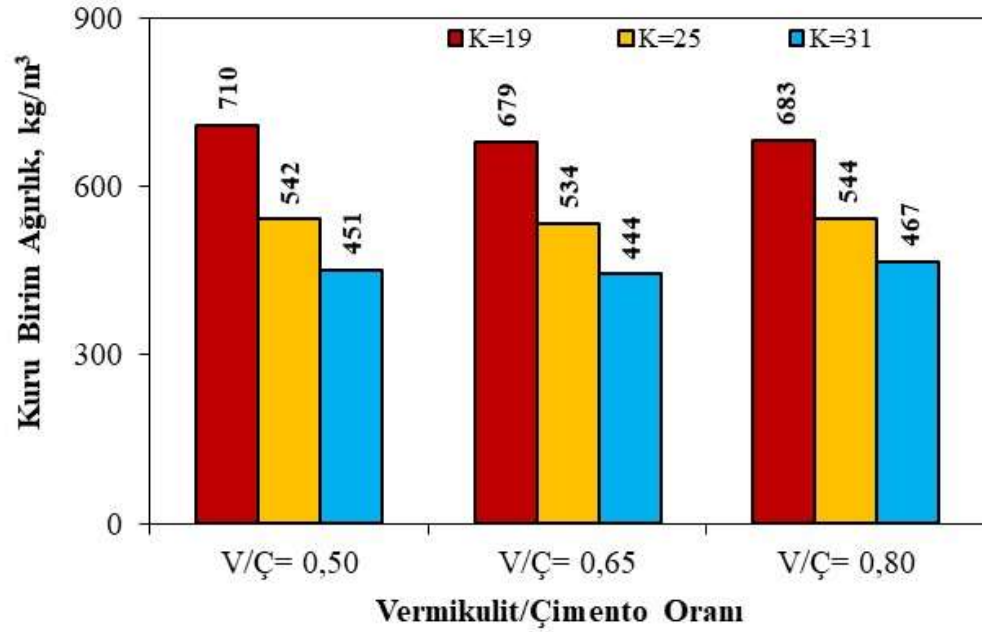
En düşük kuru birim ağırlık değeri köpük yoğunluğu 31kg/m³ olan V/Ç = 0,65 oranında 444 kg/m³, en yüksek kuru birim ağırlık değeri ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç= 0,50 olan numunede 710 kg/m³ olarak görülmüştür.

Kuru birim ağırlık, köpük yoğunluğunun her bir değeri için V/Ç oranının artması ile önce azaldığı daha sonra arttığı gözlemlenmiştir.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile kuru birim ağırlıklarda azalma görülmüştür.



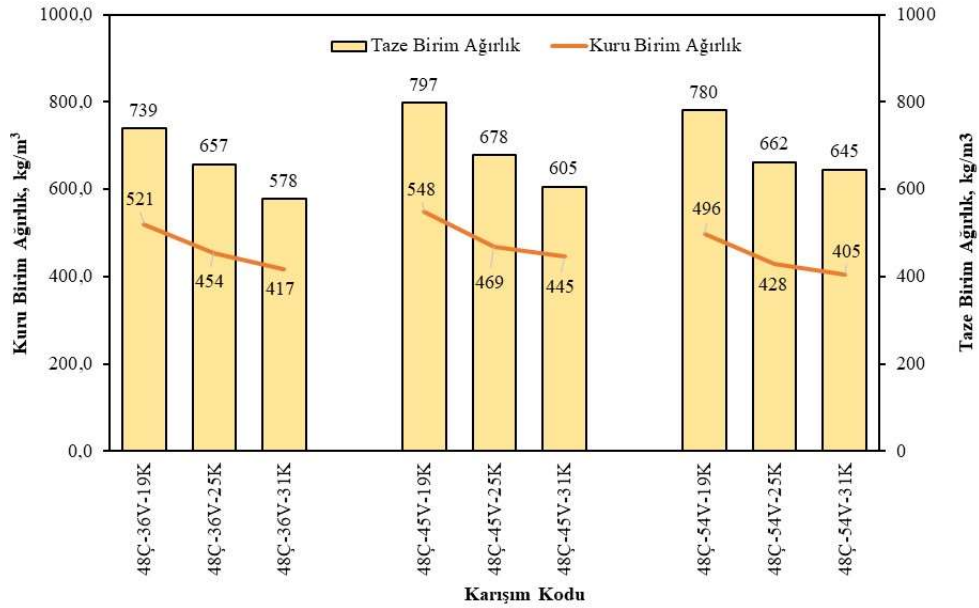
Şekil 4. 11 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi



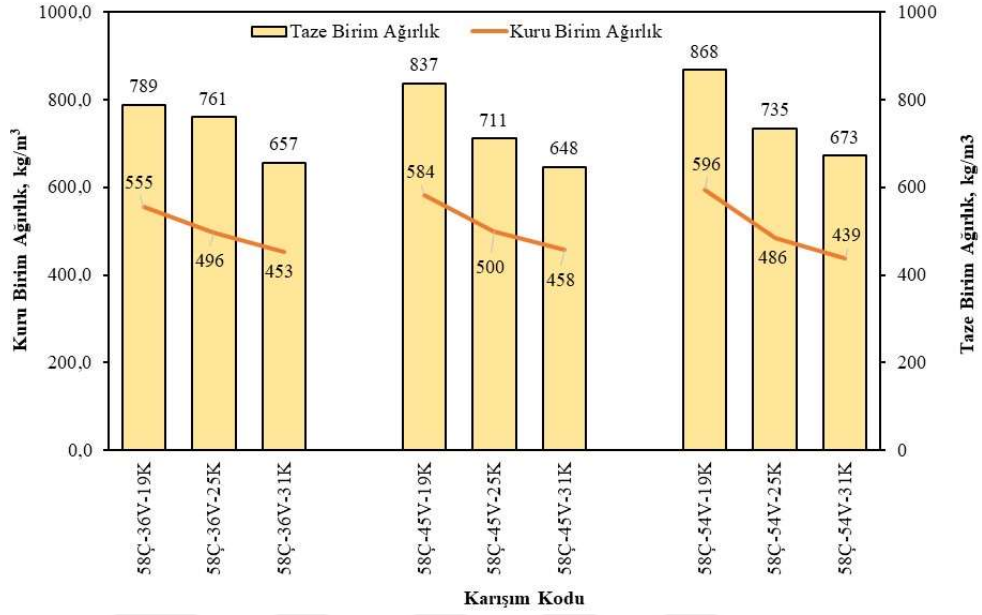
Şekil 4. 12 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi

Genel bir ifade ile çimento oranı arttıkça köpük betonun kuru birim ağırlığının arttığı söylenebilir. Ayrıca tüm çimento oranlarında köpük yoğunluğu arttıkça köpük betonun boşluk yapısının artmasından dolayı kuru birim ağırlık azalmıştır. Tüm çimento oranlarında en düşük kuru birim ağırlığın hacimce çimento oranı 48 olan, köpük yoğunluğu 31 kg/m^3 ve $V/\Ç= 1,10$ oranında 405 kg/m^3 olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek kuru birim ağırlık ise hacimce çimento oranı 68, köpük yoğunluğu 19 kg/m^3 ve $V/\Ç=0,50$ oranında 710 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.

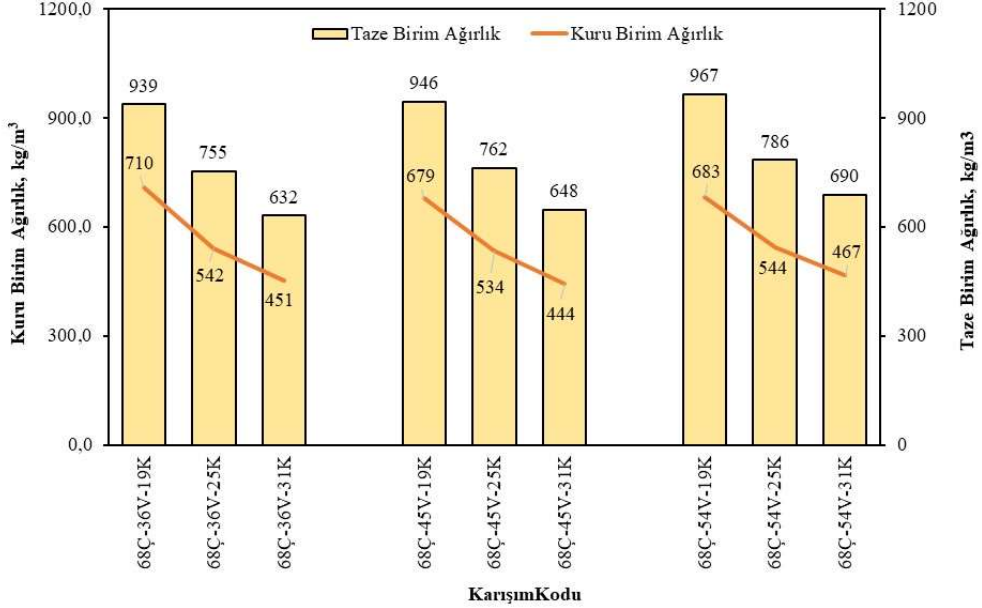
Taze birim ağırlığa göre her bir çimento oranının kuru birim ağırlıklarının değişim grafikleri hacimce 48 çimento için Şekil 4.13’de, hacimce 58 çimento için Şekil 4.14’de son olarak hacimce 68 çimento için ise Şekil 4.15.’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 13 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Taze Birim Ağırlıklarına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi



Şekil 4. 14 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Taze Birim Ağırlıklarına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi



Şekil 4. 15 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Köpük Betonların Taze Birim Ağırlıklarına Göre Kuru Birim Ağırlıklarının Değişimi

4.3 Su Emme

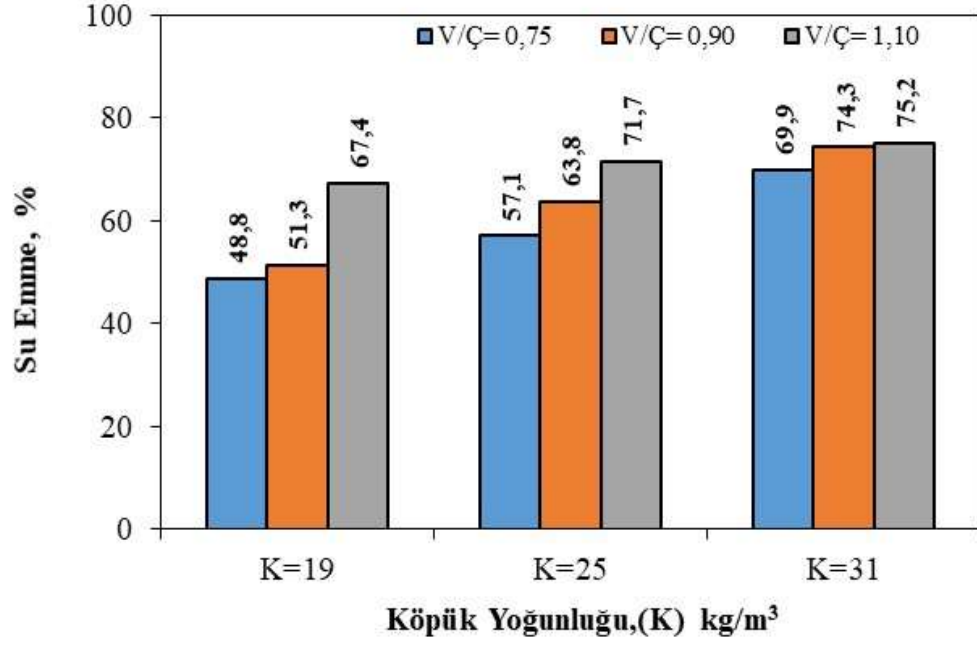
Hacimce 48 çimento oranına sahip olan köpük betonların su emme deney sonuçları Tablo 4.7’de verilmiştir. Su emme değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.16’da ve Şekil 4.17’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 7 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Su Emme Deney Sonuçları

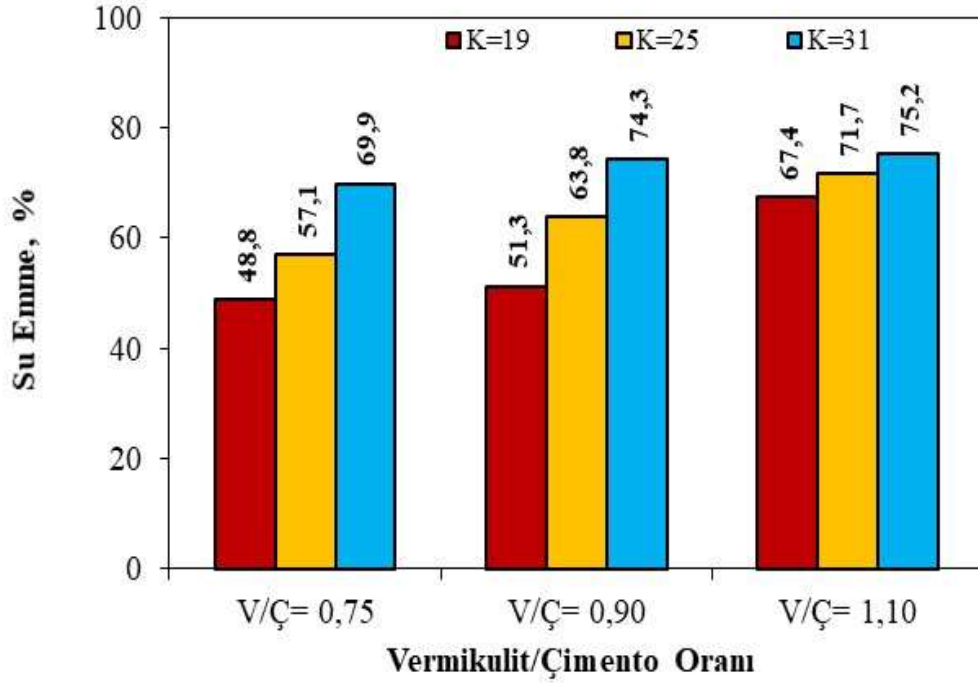
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Su emme, %
1	48Ç-36V-19K	0,75	48	36	19	48,8
2	48Ç-36V-25K	0,75	48	36	25	57,1
3	48Ç-36V-31K	0,75	48	36	31	69,9
4	48Ç-45V-19K	0,90	48	45	19	51,3
5	48Ç-45V-25K	0,90	48	45	25	63,8
6	48Ç-45V-31K	0,90	48	45	31	74,3
7	48Ç-54V-19K	1,10	48	54	19	67,4
8	48Ç-54V-25K	1,10	48	54	25	71,7
9	48Ç-54V-31K	1,10	48	54	31	75,2

Hacimce 48 çimento oranına sahip köpük betonların su emme değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,75 oranında sırasıyla % 48,8, % 57,1 ve % 69,9 olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,90 oranı için ise sırasıyla % 51,3, % 63,8 ve % 74,3 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=1,10 oranı olduğunda ise % 67,4, % 71,7 ve % 75,2 olarak elde edilmiştir.

En düşük su emme değeri köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç =0,75 oranında % 48,8, en yüksek su emme değeri ise köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/Ç=1,10 olan numunede % 75,2 olarak görülmüştür.



Şekil 4. 16 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi



Şekil 4. 17 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi

Su emme değeri, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/ oranının artması ile arttığı gözlenmiştir.

Her bir V/ oranında köpük yoğunluğunun artması ile su emme değerlerinde artma grlmştir.

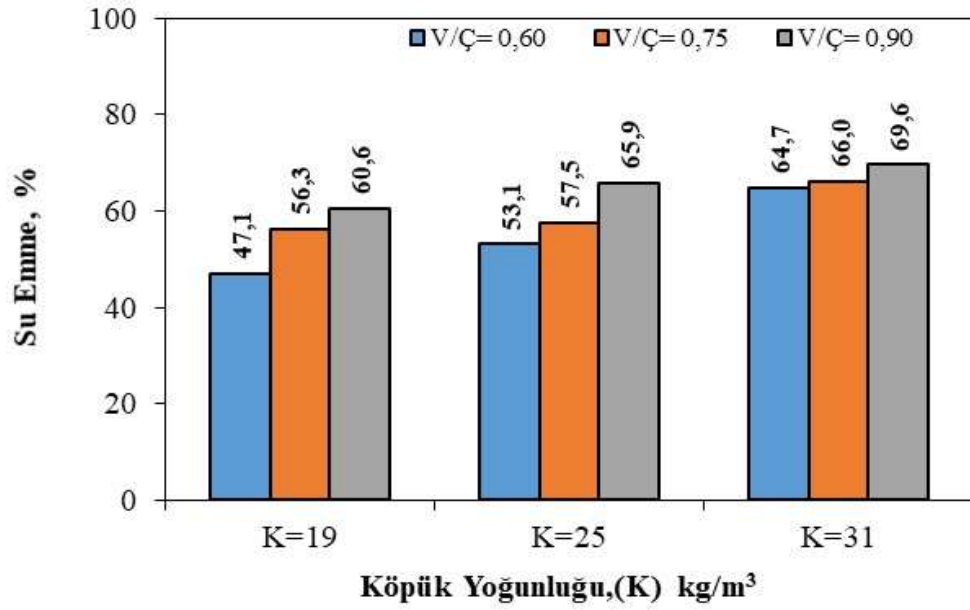
Hacimce 58 imento oranına sahip olan köpük betonların su emme deney sonuçları Tablo 4.8’de verilmiştir. Su emme değerlerinin V/ oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi şekil 4.18’de ve şekil 4.19’da gösterilmiştir.

Tablo 4. 8 Hacimce 58 imento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Su Emme Deney Sonuçları

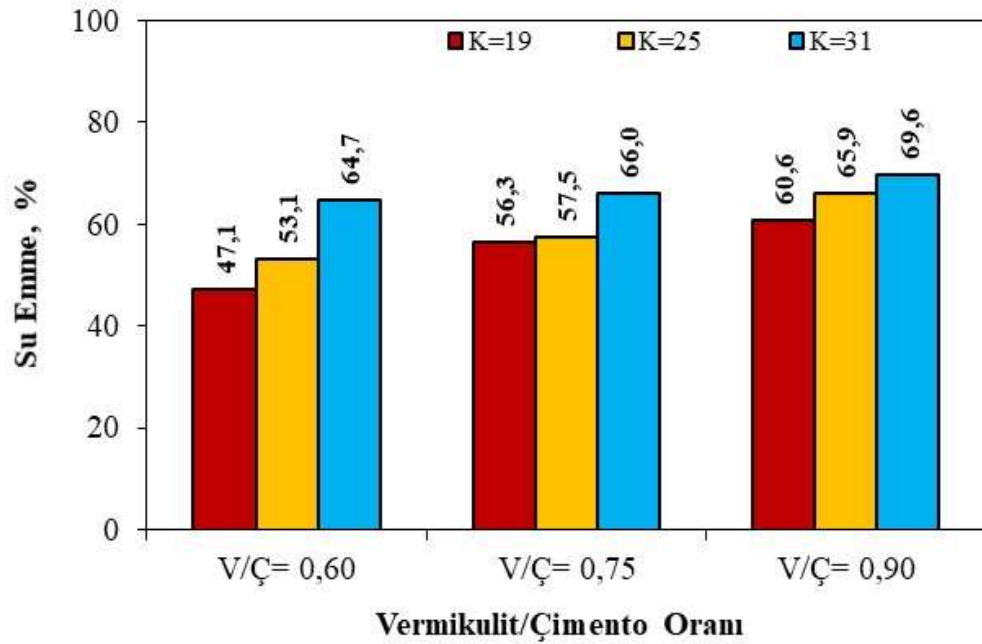
Karışım No.	Karışım Kodu	V/ Oranı	imento	Vermikülit	Köpük	Su emme, %
1	58-36V-19K	0,60	58	36	19	47,1
2	58-36V-25K	0,60	58	36	25	53,1
3	58-36V-31K	0,60	58	36	31	64,7
4	58-45V-19K	0,75	58	45	19	56,3
5	58-45V-25K	0,75	58	45	25	57,5
6	58-45V-31K	0,75	58	45	31	66,0
7	58-54V-19K	0,90	58	54	19	60,6
8	58-54V-25K	0,90	58	54	25	65,9
9	58-54V-31K	0,90	58	54	31	69,6

Hacimce 58 imento oranına sahip köpük betonların su emme değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/= 0,60 oranında sırasıyla % 47,1, % 53,1 ve % 64,7 olarak llmştir. V/=0,75 oranı için ise sırasıyla % 56,3, % 57,5 ve % 66,0 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/=0,90 oranı olduğunda ise % 60,6, % 65,9 ve % 69,6 olarak elde edilmiştir.

En düşük su emme değeri köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/ =0,60 oranında % 47,1, en yüksek su emme değeri ise köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/=0,90 olan numunede % 69,6 olarak grlmştir.



Şekil 4. 18 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi



Şekil 4. 19 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğuna (K) ve V/Ç Oranına Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi

Su emme değeri, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/Ç oranının artması ile arttığı gözlenmiştir.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile su emme değerlerinde artma görülmüştür.

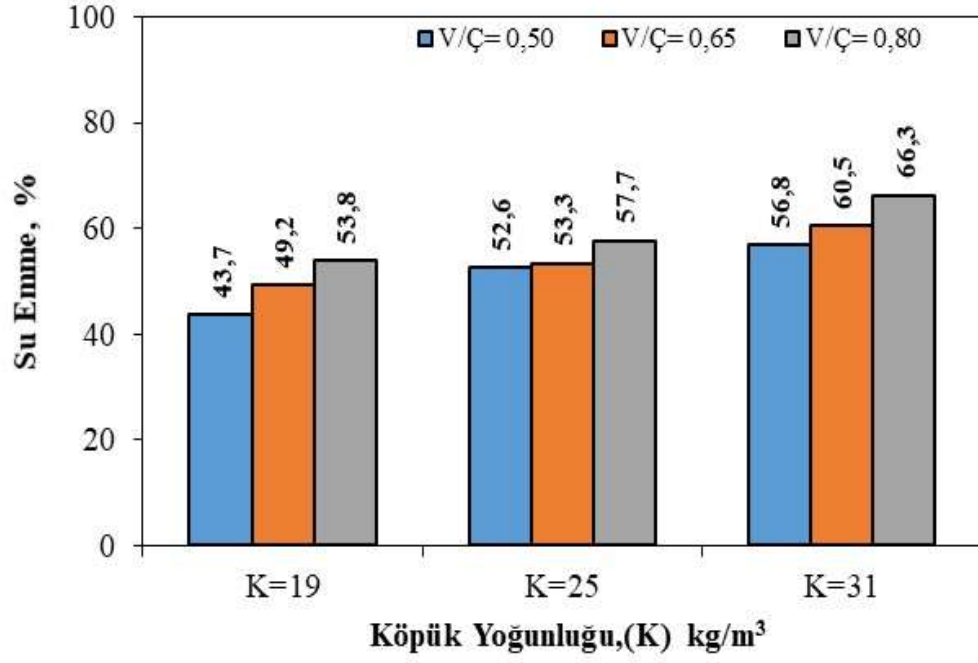
Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların su emme deney sonuçları Tablo 4.9’da verilmiştir. Su emme değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.20’de ve Şekil 4.21’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 9 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Su Emme Deney Sonuçları

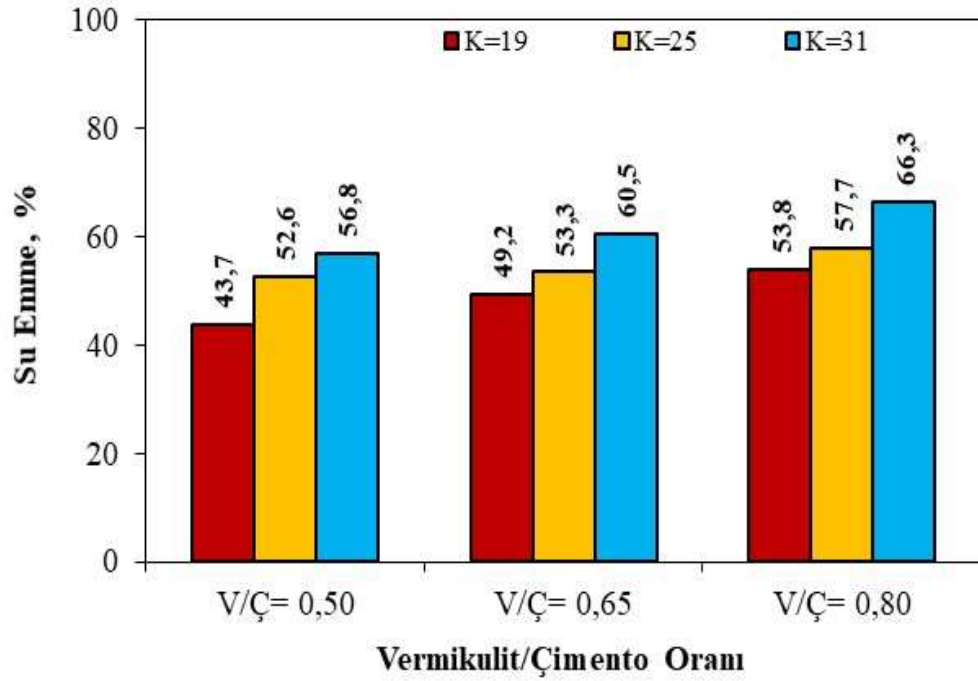
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Su emme, %
1	68Ç-36V-19K	0,50	68	36	19	43,7
2	68Ç-36V-25K	0,50	68	36	25	52,6
3	68Ç-36V-31K	0,50	68	36	31	56,8
4	68Ç-45V-19K	0,65	68	45	19	49,2
5	68Ç-45V-25K	0,65	68	45	25	53,3
6	68Ç-45V-31K	0,65	68	45	31	60,5
7	68Ç-54V-19K	0,80	68	54	19	53,8
8	68Ç-54V-25K	0,80	68	54	25	57,7
9	68Ç-54V-31K	0,80	68	54	31	66,3

Hacimce 68 çimento oranına sahip köpük betonların su emme değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,50 oranında sırasıyla % 43,7, % 52,6 ve % 56,8 olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,65 oranı için ise sırasıyla % 49,2, % 53,3 ve % 60,5 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,80 oranı olduğunda ise % 53,8, % 57,7 ve % 66,3 olarak elde edilmiştir.

En düşük su emme değeri köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç =0,50 oranında % 43,7, en yüksek su emme değeri ise köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/Ç=0,80 olan numunede % 66,3 olarak görülmüştür.



Şekil 4. 20 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi



Şekil 4. 21 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğuna (K) ve V/Ç Oranının Göre % Su Emme Değerlerinin Değişimi

Su emme değeri, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/ oranının artması ile arttığı gözlenmiştir.

Her bir V/ oranında köpük yoğunluğunun artması ile su emme değerlerinde artma grlmştir.

Genel bir ifade ile imento oranı arttıķa köpük betonun boşluk yapısının azalmasının sonucu olarak % su emme değeri azalmıştır. Ayrıca tüm imento oranlarında köpük yoğunluğu arttıķa köpük betonun boşluk yapısının artması ile birlikte % su emme değeri artmıştır. Benzer şekilde tüm imento oranlarında V/ oranı arttıķa vermikülitin gözenekli yapısından dolayı % su emme değerinin arttığı grlmştir. Tüm imento oranlarında en düşük % su emme değeri hacimce imento oranı 68 olan, köpük yoğunluğu 19 kg/m³ ve V/= 0,50 oranında % 43,7 olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek % su emme değeri ise hacimce imento oranı 48, köpük yoğunluğu 31 kg/m³ ve V/=1,10 oranında %75,2 olarak belirlenmiştir.

4.4 Görünen Porozite

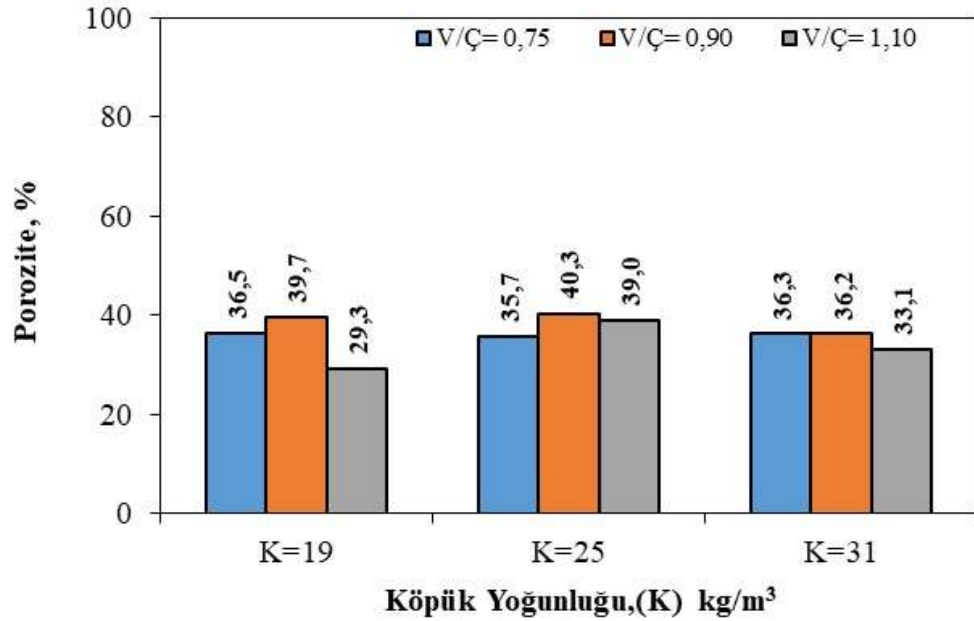
Hacimce 48 imento oranına sahip olan köpük betonların görünen porozite deney sonuçları Tablo 4.10'da verilmiştir. Görünen porozite değerlerinin V/ oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi şekil 4.22'de ve şekil 4.23'de gösterilmiştir.

Hacimce 48 imento oranına sahip olan köpük betonların görünen porozite değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/= 0,75 oranında sırasıyla %36,5, %35,7 ve %36,3 olarak llmştir. V/=0,90 oranı için ise sırasıyla % 39,7, % 40,3 ve % 36,2 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/=1,10 oranı olduğunda ise % 29,3, % 39,0 ve % 33,1 olarak elde edilmiştir.

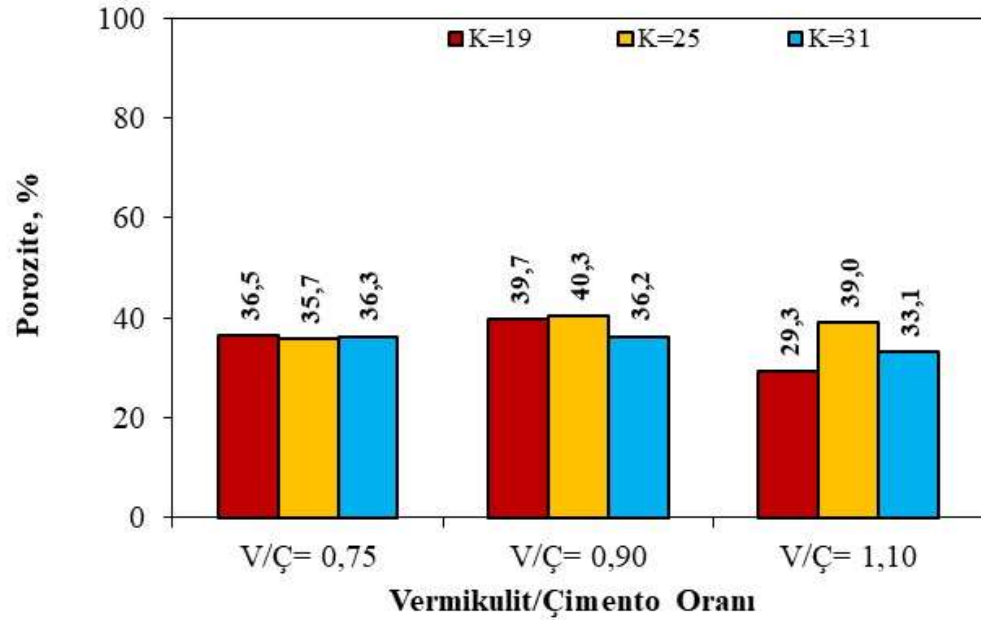
En düşük görünen porozite değeri köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/ =1,10 oranında % 29,3, en yüksek görünen porozite değeri ise köpük yoğunluğu 25 kg/m³ olan V/=0,90 olan numunede % 40,3 olarak grlmştir.

Tablo 4. 10 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Görünen Porozite Sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Görünür Porozite, %
1	48Ç-36V-19K	0,75	48	36	19	36,5
2	48Ç-36V-25K	0,75	48	36	25	35,7
3	48Ç-36V-31K	0,75	48	36	31	36,3
4	48Ç-45V-19K	0,90	48	45	19	39,7
5	48Ç-45V-25K	0,90	48	45	25	40,3
6	48Ç-45V-31K	0,90	48	45	31	36,2
7	48Ç-54V-19K	1,10	48	54	19	29,3
8	48Ç-54V-25K	1,10	48	54	25	39,0
9	48Ç-54V-31K	1,10	48	54	31	33,1



Şekil 4. 22 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi



Şekil 4. 23 Hacimce 48 Çimento Oranına sahip olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi

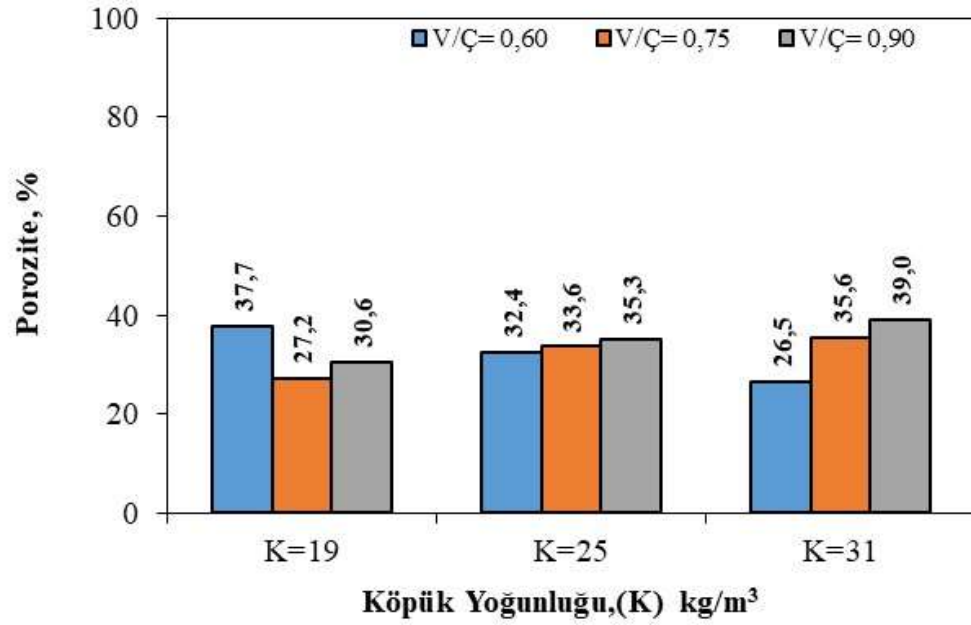
Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların görünen porozite deney sonuçları Tablo 4.11’de verilmiştir. Görünen Porozite değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.24’de ve Şekil 4.25’de gösterilmiştir.

Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların görünen porozite değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,60 oranında sırasıyla % 37,7, % 32,4 ve % 26,5 olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,75 oranı için ise sırasıyla % 27,2, % 33,6 ve % 35,6 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,90 oranı olduğunda ise % 30,6, % 35,3 ve % 39,0 olarak elde edilmiştir.

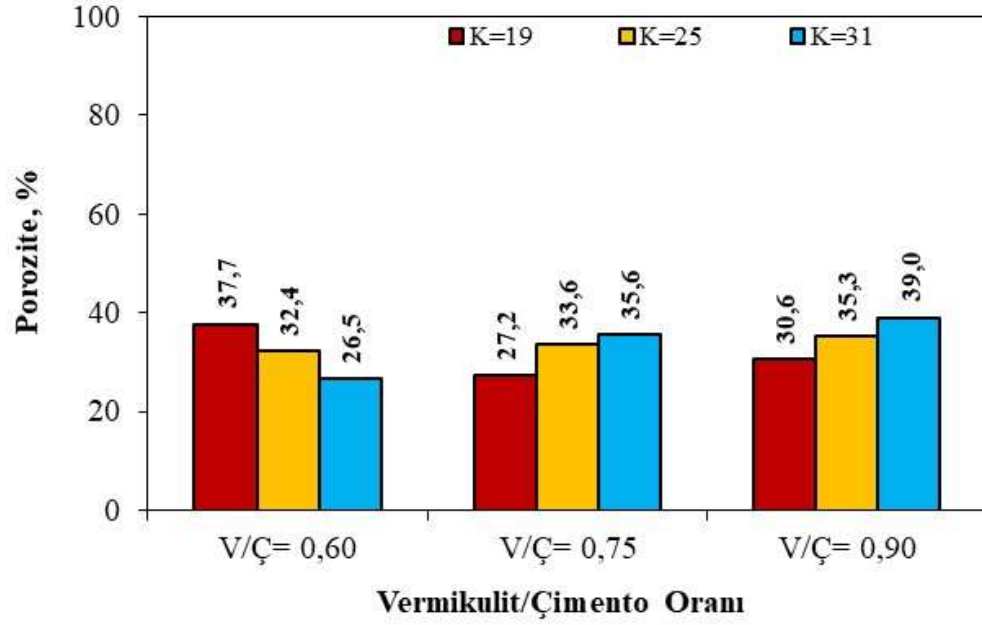
En düşük görünen porozite değeri köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/Ç =0,60 oranında % 26,5, en yüksek görünen porozite değeri ise köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/Ç=0,90 olan numunede % 39,0 olarak görülmüştür.

Tablo 4. 11 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Görünen Porozite Sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Görünür Porozite, %
1	58Ç-36V-19K	0,60	58	36	19	37,7
2	58Ç-36V-25K	0,60	58	36	25	32,4
3	58Ç-36V-31K	0,60	58	36	31	26,5
4	58Ç-45V-19K	0,75	58	45	19	27,2
5	58Ç-45V-25K	0,75	58	45	25	33,6
6	58Ç-45V-31K	0,75	58	45	31	35,6
7	58Ç-54V-19K	0,90	58	54	19	30,6
8	58Ç-54V-25K	0,90	58	54	25	35,3
9	58Ç-54V-31K	0,90	58	54	31	39,0



Şekil 4. 24 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi



Şekil 4. 25 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonlarının Köpük Yoğunluğunun(K) ve V/Ç Oranına Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi

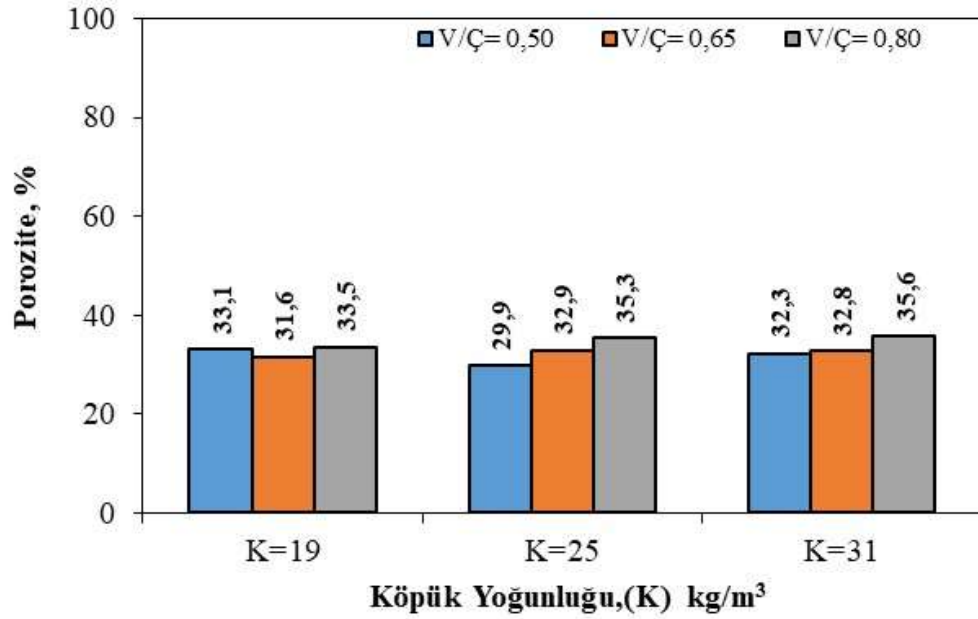
Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların görünen porozite deney sonuçları Tablo 4.12’de verilmiştir. Görünen Porozite değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.26’da ve Şekil 4.27’de gösterilmiştir.

Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların görünen porozite değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,50 oranında sırasıyla % 33,1, % 29,9 ve % 32,3 olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,65 oranı için ise sırasıyla % 31,6, % 32,9 ve % 32,8 olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,80 oranı olduğunda ise % 33,5, % 35,3 ve % 35,6 olarak elde edilmiştir.

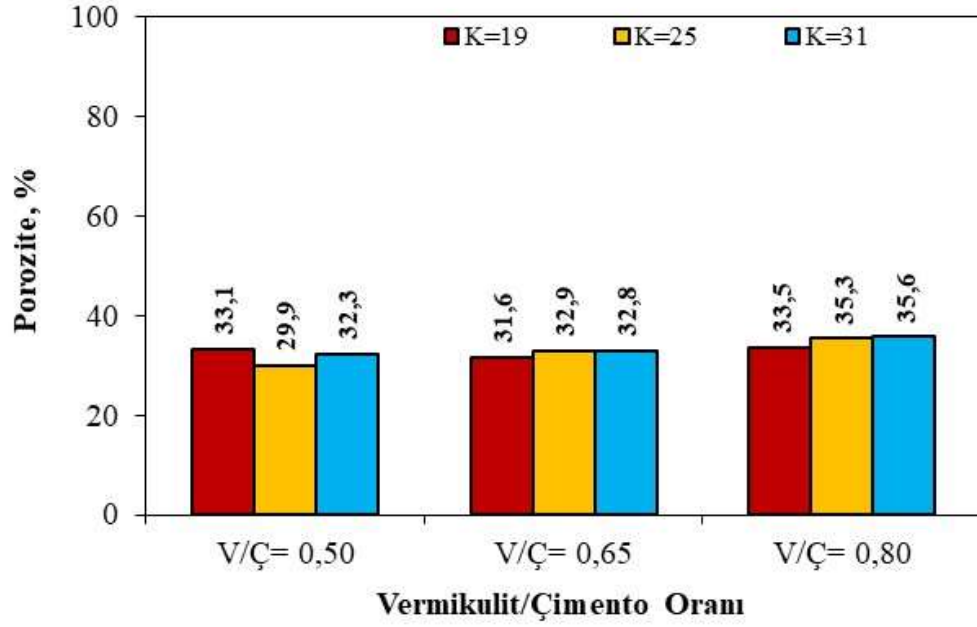
En düşük görünen porozite değeri köpük yoğunluğu 25 kg/m³ olan V/Ç =0,50 oranında % 29,9, en yüksek görünen porozite değeri ise köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/Ç=0,80 olan numunede % 35,6 olarak görülmüştür.

Tablo 4. 12 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonun Görünen Porozite Sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Görünür Porozite, %
1	68Ç-36V-19K	0,50	68	36	19	33,1
2	68Ç-36V-25K	0,50	68	36	25	29,9
3	68Ç-36V-31K	0,50	68	36	31	32,3
4	68Ç-45V-19K	0,65	68	45	19	31,6
5	68Ç-45V-25K	0,65	68	45	25	32,9
6	68Ç-45V-31K	0,65	68	45	31	32,8
7	68Ç-54V-19K	0,80	68	54	19	33,5
8	68Ç-54V-25K	0,80	68	54	25	35,3
9	68Ç-54V-31K	0,80	68	54	31	35,6



Şekil 4. 26 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranına ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi



Şekil 4. 27 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre % Görünen Porozite Değerlerinin Değişimi

Genel bir ifadeyle tüm çimento oranlarında görünen porozite açık boşluklardan emilen su miktarı ve hacimleri yaklaşık olarak aynı olan numunelerden hesaplanmaya çalışılmıştır. Bu hesaplamalar sonucunda açık boşluklardan emilen suyun kapalı gözenekler ulaşamadığı için görünen porozite değerleri gerçek porozite değerlerine göre daha düşük çıkmıştır. Tüm çimento oranlarında en düşük görünen porozite değeri hacimce çimento oranı 58, köpük yoğunluğu 31 kg/m³ ve V/Ç oranı 0,60 oranında %26,5 olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek görünen porozite değeri ise hacimce çimento oranı 48, köpük yoğunluğu 25 kg/m³ ve V/Ç oranı 0,90 oranında % 40,3 olarak belirlenmiştir.

4.5 Kılcal Su Emme

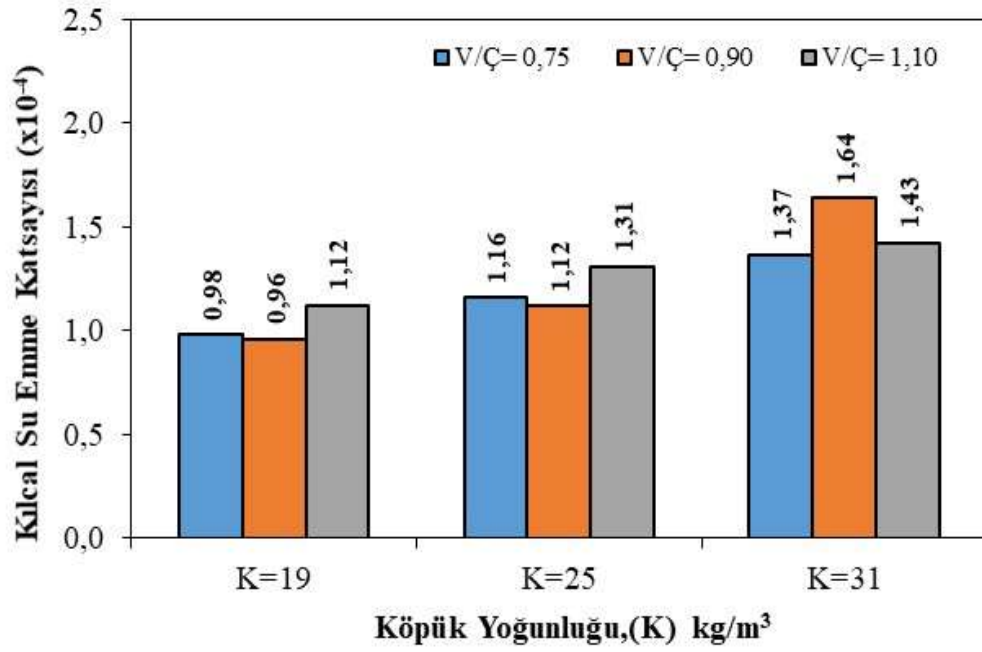
Hacimce 48 çimento oranına sahip olan köpük betonların kılcal su emme katsayısı deney sonuçları Tablo 4.13’de verilmiştir. Kılcal su emme katsayısının değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.28’de ve Şekil 4.29’da gösterilmiştir.

Tablo 4. 13 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kılcal Su Emme Katsayısı Sonuçları

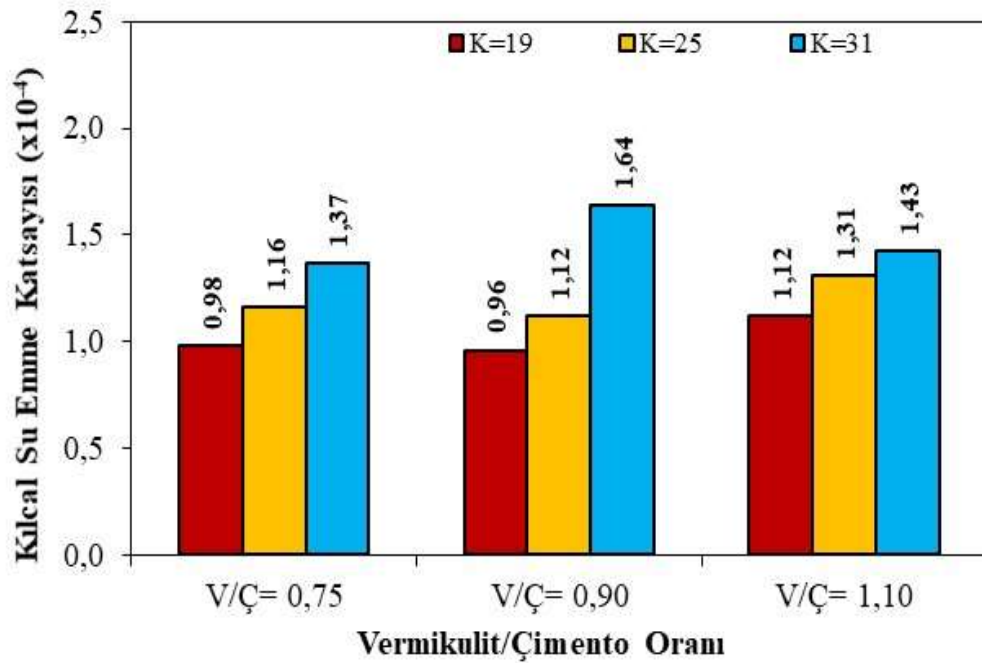
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	K.S.E.K., (x10 ⁻⁴), cm ² /s
1	48Ç-36V-19K	0,75	48	36	19	0,98
2	48Ç-36V-25K	0,75	48	36	25	1,16
3	48Ç-36V-31K	0,75	48	36	31	1,37
4	48Ç-45V-19K	0,90	48	45	19	0,96
5	48Ç-45V-25K	0,90	48	45	25	1,12
6	48Ç-45V-31K	0,90	48	45	31	1,64
7	48Ç-54V-19K	1,10	48	54	19	1,12
8	48Ç-54V-25K	1,10	48	54	25	1,31
9	48Ç-54V-31K	1,10	48	54	31	1,43

Hacimce 48 çimento oranına sahip olan köpük betonların kılcal su emme katsayısı değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,75 oranında sırasıyla 0,98, 1,16 ve 1,37 x10⁻⁴ cm²/s olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,90 oranı için ise sırasıyla 0,96, 1,12 ve 1,64 x10⁻⁴ cm²/s olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=1,10 oranı olduğunda ise 1,12, 1,31 ve 1,43 x10⁻⁴ cm²/s olarak elde edilmiştir.

En düşük kılcal su emme kat sayısı değeri köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç =0,90 oranında 0,96x10⁻⁴ cm²/s, en yüksek kılcal su emme katsayısı değeri ise köpük yoğunluğu 31 kg/m³ V/Ç=0,90 olan numunede 1,64x10⁻⁴ cm²/s olarak görülmüştür.



Şekil 4. 28 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi



Şekil 4. 29 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğunun(K) ve V/Ç Oranına Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi

Kılcal su emme değeri, köpük yoğunluğunun 19 ve 25 kg/m³ değerleri için V/Ç oranının artması ile önce azalmış daha sonra artmıştır. Köpük yoğunluğunun 31 kg/m³ olduğunda kılcal su emme değeri V/Ç oranı arttıkça önce artmış daha sonra azalmıştır.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile kılcal su emme katsayısı değerinde artma gözlenmiştir.

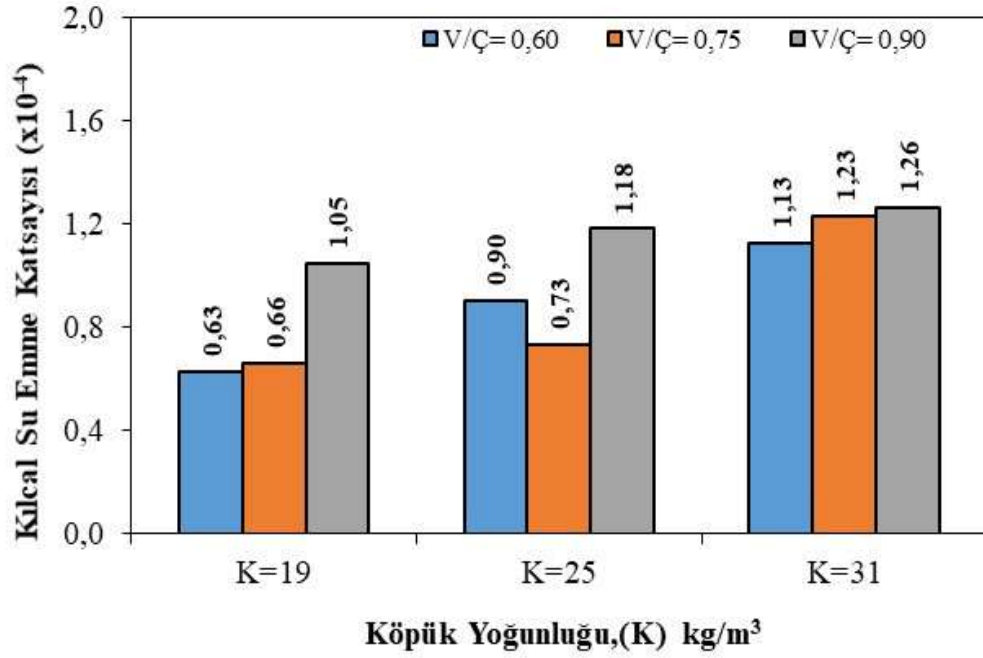
Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların kılcal su emme katsayısı deney sonuçları Tablo 4.14’de verilmiştir. Kılcal su emme katsayısının değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.30’da ve Şekil 4.31’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 14 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kılcal Su Emme Katsayısı Sonuçları

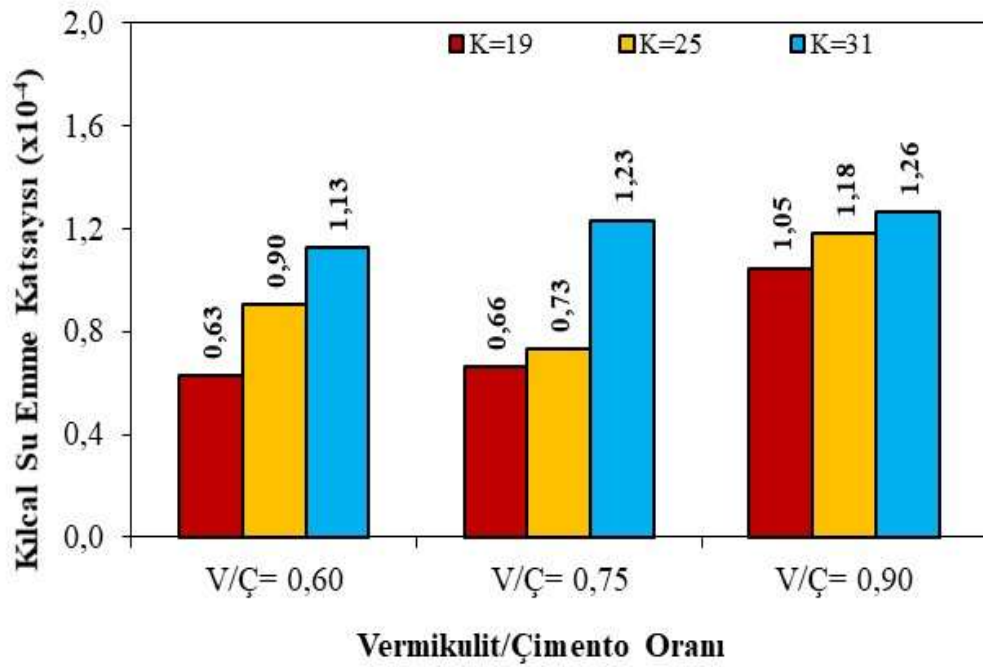
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	K.S.E.K. (x10 ⁻⁴)cm ² /s
1	58Ç-36V-19K	0,60	58	36	19	0,63
2	58Ç-36V-25K	0,60	58	36	25	0,90
3	58Ç-36V-31K	0,60	58	36	31	1,13
4	58Ç-45V-19K	0,75	58	45	19	0,66
5	58Ç-45V-25K	0,75	58	45	25	0,73
6	58Ç-45V-31K	0,75	58	45	31	1,13
7	58Ç-54V-19K	0,90	58	54	19	1,05
8	58Ç-54V-25K	0,90	58	54	25	1,18
9	58Ç-54V-31K	0,90	58	54	31	1,26

Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların kılcal su emme katsayısı değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,60 oranında sırasıyla 0,63, 0,90 ve 1,13 x10⁻⁴ cm²/s olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,75 oranı için ise sırasıyla 0,66, 0,73 ve 1,23 x10⁻⁴ cm²/s olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,90 oranı olduğunda ise 1,05, 1,18 ve 1,26 x10⁻⁴ cm²/s olarak elde edilmiştir.

En düşük kılcal su emme kat sayısı değeri köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç =0,60 oranında 0,63x10⁻⁴ cm²/s, en yüksek kılcal su emme katsayısı değeri ise köpük yoğunluğu 31 kg/m³ V/Ç=0,90 olan numunede 1,26x10⁻⁴ cm²/s olarak görülmüştür.



Şekil 4. 30 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi



Şekil 4. 31 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi

Kılcal su emme değeri, köpük yoğunluğunun 19 ve 31 kg/m³ değerleri için V/Ç oranının artması ile artmıştır. Köpük yoğunluğunun 25 kg/m³ olduğunda kılcal su emme değeri V/Ç oranı arttıkça önce azalmış daha sonra artmıştır.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile kılcal su emme katsayısı değerinde artma gözlenmiştir.

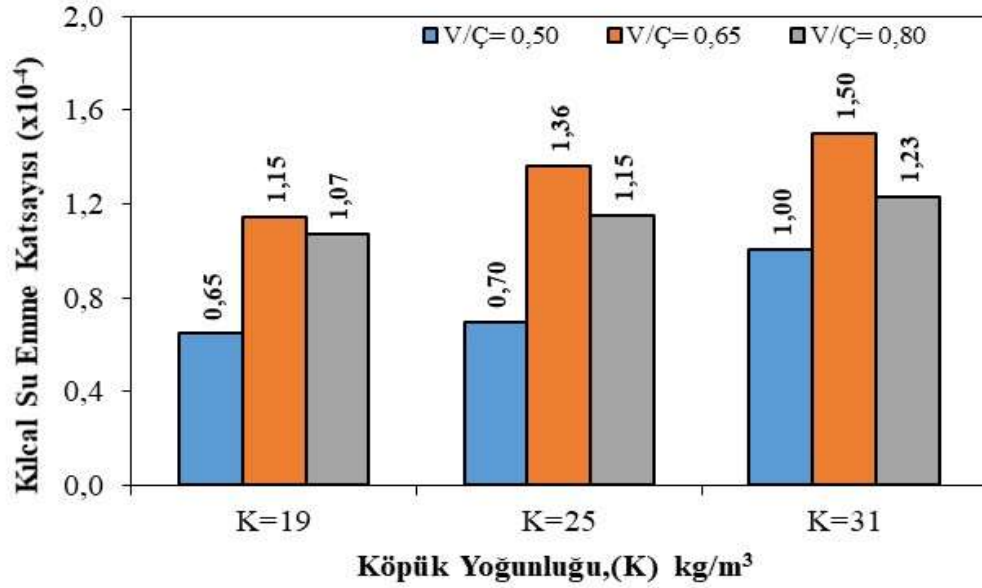
Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların kılcal su emme katsayısı deney sonuçları Tablo 4.15’de verilmiştir. Kılcal su emme katsayısının değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.32’de ve Şekil 4.33’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 15 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kılcal Su Emme Katsayısı Sonuçlar

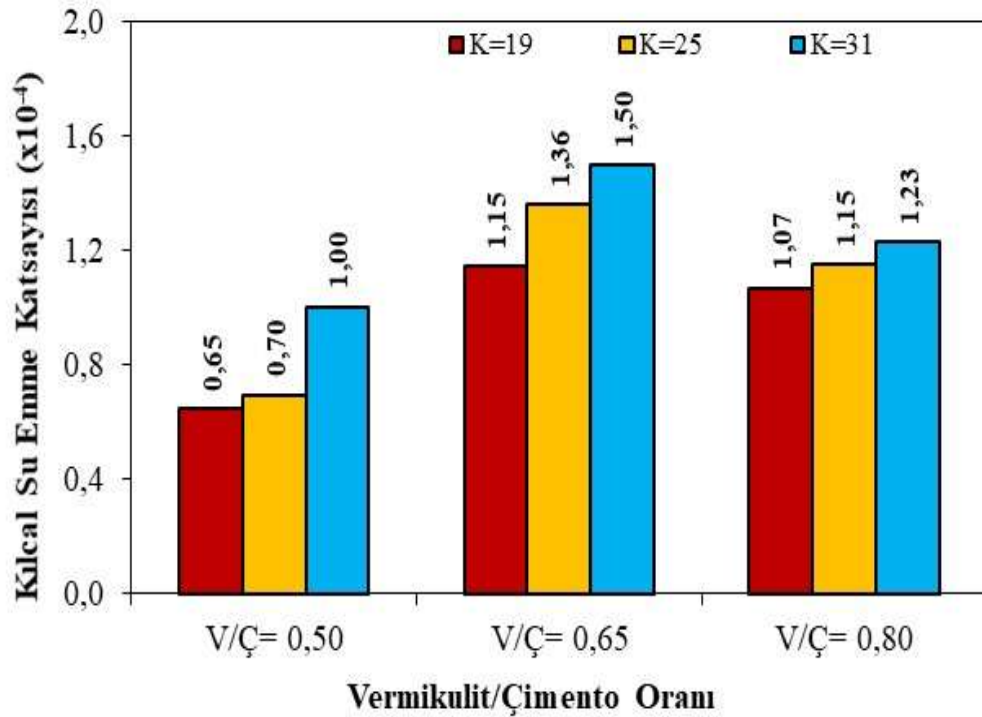
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	K.S.E.K. (x10 ⁻⁴)cm ² /s
1	68Ç-36V-19K	0,50	68	36	19	0,65
2	68Ç-36V-25K	0,50	68	36	25	0,70
3	68Ç-36V-31K	0,50	68	36	31	1,00
4	68Ç-45V-19K	0,65	68	45	19	1,15
5	68Ç-45V-25K	0,65	68	45	25	1,36
6	68Ç-45V-31K	0,65	68	45	31	1,50
7	68Ç-54V-19K	0,80	68	54	19	1,07
8	68Ç-54V-25K	0,80	68	54	25	1,15
9	68Ç-54V-31K	0,80	68	54	31	1,23

Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların kılcal su emme katsayısı değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,50 oranında sırasıyla 0,65, 0,70 ve 1,00 x10⁻⁴ cm²/s olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,65 oranı için ise sırasıyla 1,15, 1,36 ve 1,50 x10⁻⁴ cm²/s olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,80 oranı olduğunda ise 1,07, 1,15 ve 1,23 x10⁻⁴ cm²/s olarak elde edilmiştir.

En düşük kılcal su emme kat sayısı değeri köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç =0,50 oranında 0,65x10⁻⁴ cm²/s, en yüksek kılcal su emme katsayısı değeri ise köpük yoğunluğu 31 kg/m³ V/Ç=0,65 olan numunede 1,50x10⁻⁴ cm²/s olarak görülmüştür.



Şekil 4. 32 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi



Şekil 4. 33 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Kılcal Su Emme Katsayılarının Değişimi

Kılcal su emme değeri, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/Ç oranının artması ile önce artmış daha sonra azalmıştır.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile kılcal su emme katsayısı değerinde artma gözlenmiştir.

Genel bir ifade ile çimento oranı arttıkça 19, 25 ve 31 kg/m³ köpük yoğunluğunda köpük betonun boşluklarının azalmasından dolayı kılcal su emme katsayısının azaldığı söylenebilir. Ayrıca tüm çimento oranlarında köpük yoğunluğu arttıkça köpük betonun boşluk yapısının artmasından dolayı kılcal su emme katsayısının arttığı gözlenmiştir.

Tüm çimento oranlarında en düşük kılcal su emme katsayısı hacimce çimento oranı 58, köpük yoğunluğu 19 kg/m³ ve V/Ç= 0,60 oranında 0,63x10⁻⁴ cm²/s olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek kılcal su emme katsayısı ise hacimce çimento oranı 48, köpük yoğunluğu 31 kg/m³ ve V/Ç=0,90 oranında 1,64x10⁻⁴ cm²/s olarak belirlenmiştir.

4.6 Ultrases Geçiş Hızı

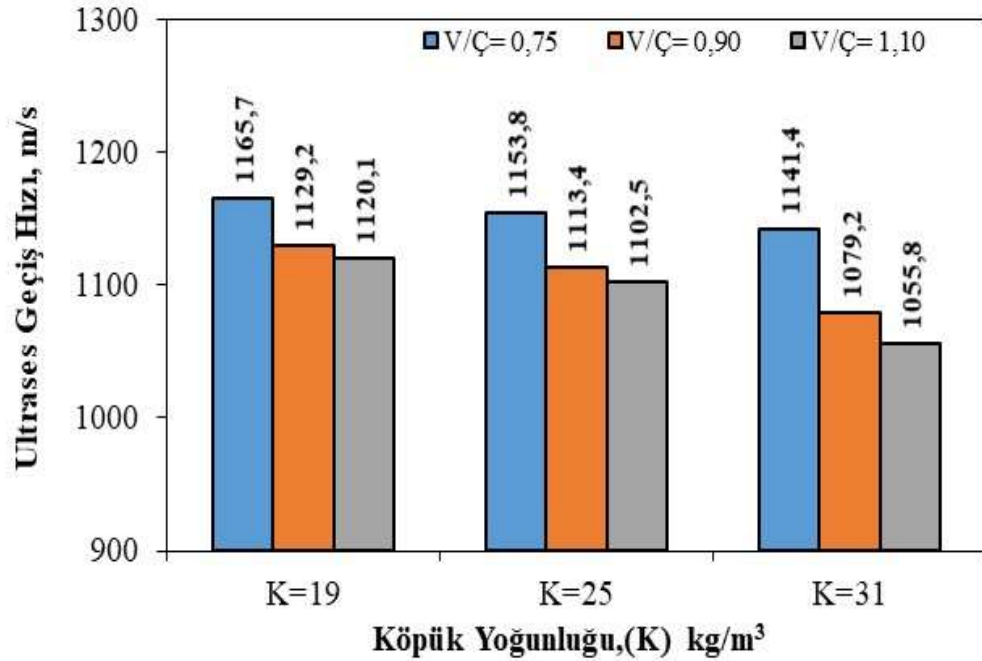
Hacimce 48 çimento oranına sahip olan köpük betonların ultrases geçiş hızı deney sonuçları Tablo 4.16'da verilmiştir. Kılcal su emme katsayısının değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.34'de ve Şekil 4.35'de gösterilmiştir.

Hacimce 48 çimento oranına sahip olan köpük betonların ultrases geçiş hızı değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,75 oranında sırasıyla 1165,7, 1129,2 ve 1120,1 m/s olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,90 oranı için ise sırasıyla 1129,2, 1113,4 ve 1079,2 m/s olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=1,10 oranı olduğunda ise 1120,1 1102,5 ve 1055,8 m/s olarak elde edilmiştir.

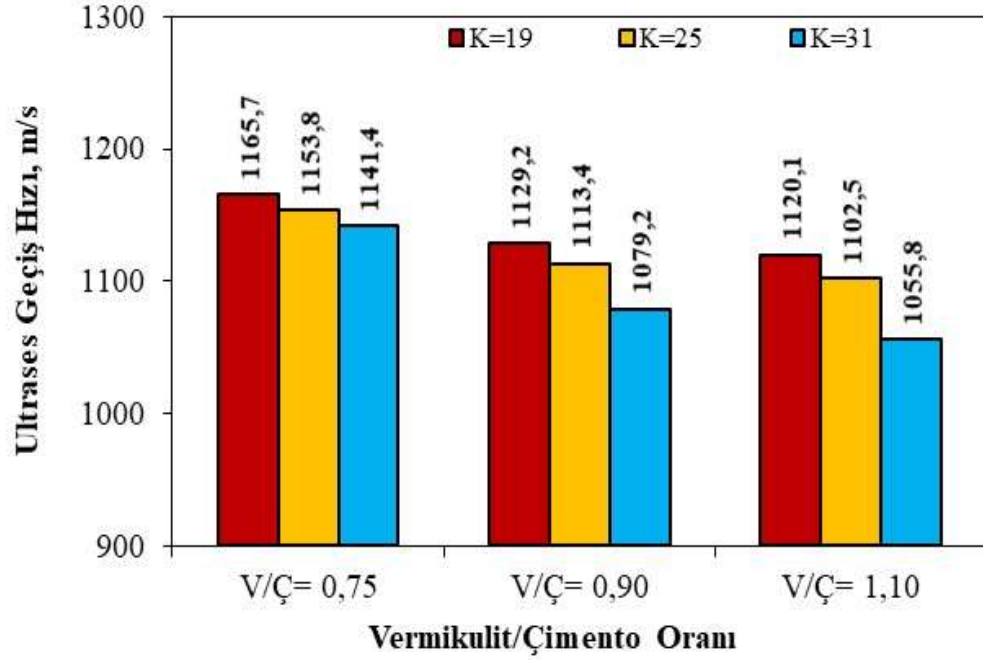
En düşük ultrases geçiş hızı değeri köpük yoğunluğu 31kg/m³ olan V/Ç =1,10 oranında 1055,8 m/s, en yüksek ultrases geçiş hızı değeri ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,75 olan numunede 1165,7 m/s olarak görülmüştür.

Tablo 4. 16 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Ultrases Geçiş Hızı, m/s
1	48Ç-36V-19K	0,75	48	36	19	1165,7
2	48Ç-36V-25K	0,75	48	36	25	1153,8
3	48Ç-36V-31K	0,75	48	36	31	1141,4
4	48Ç-45V-19K	0,90	48	45	19	1129,2
5	48Ç-45V-25K	0,90	48	45	25	1113,4
6	48Ç-45V-31K	0,90	48	45	31	1079,2
7	48Ç-54V-19K	1,10	48	54	19	1120,1
8	48Ç-54V-25K	1,10	48	54	25	1102,5
9	48Ç-54V-31K	1,10	48	54	31	1055,8



Şekil 4. 34 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi



Şekil 4. 35 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi

Ultrases geçiş hızı, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/Ç oranının artması ile azalmıştır.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile ultrases geçiş hızında azalma görülmüştür.

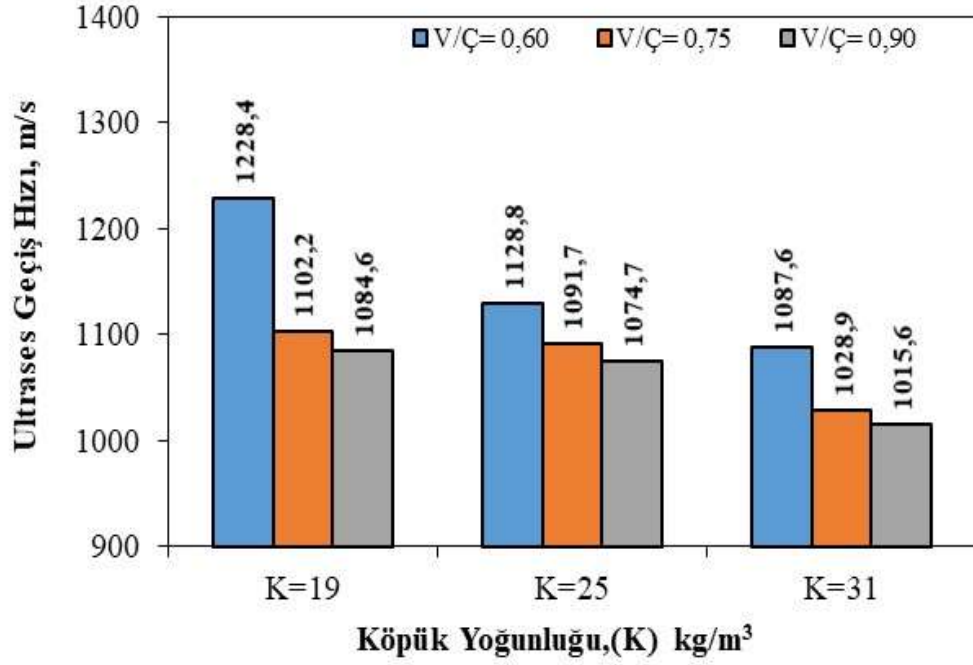
Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların ultrases geçiş hızı deney sonuçları Tablo 4.17’de verilmiştir. Kılcal su emme katsayısının değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.36’da ve Şekil 4.37’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 17 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Ultrases Geçiş Hızı Sonuçları

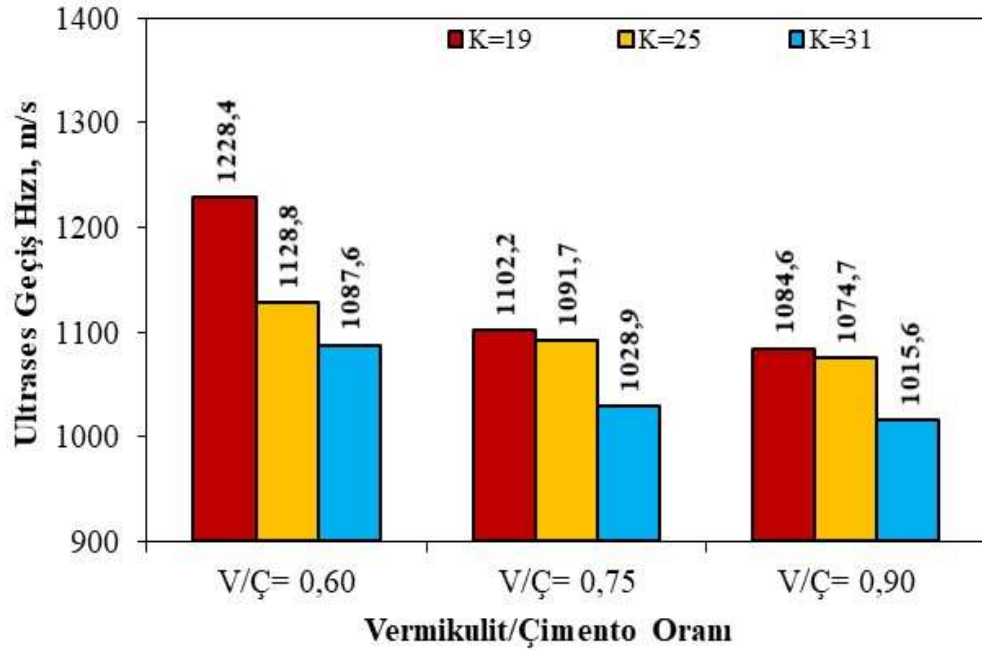
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Ultrases Geçiş Hızı, m/s
1	58Ç-36V-19K	0,60	58	36	19	1228,4
2	58Ç-36V-25K	0,60	58	36	25	1128,8
3	58Ç-36V-31K	0,60	58	36	31	1087,6
4	58Ç-45V-19K	0,75	58	45	19	1102,2
5	58Ç-45V-25K	0,75	58	45	25	1091,7
6	58Ç-45V-31K	0,75	58	45	31	1028,9
7	58Ç-54V-19K	0,90	58	54	19	1084,6
8	58Ç-54V-25K	0,90	58	54	25	1074,7
9	58Ç-54V-31K	0,90	58	54	31	1015,6

Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların ultrases geçiş hızı değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,60 oranında sırasıyla 1228,4, 1128,8 ve 1087,6 m/s olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,75 oranı için ise sırasıyla 1102,2, 1091,7 ve 1028,9 m/s olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,90 oranı olduğunda ise 1084,6 1074,7 ve 1015,6 m/s olarak elde edilmiştir.

En düşük ultrases geçiş hızı değeri köpük yoğunluğu 31kg/m³ olan V/Ç =0,90 oranında 1015,6 m/s, en yüksek ultrases geçiş hızı değeri ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,60 olan numunede 1228,4 m/s olarak görülmüştür.



Şekil 4. 36 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köyük Betonların V/Ç Oranı ve Köyük Yoğunluğuna (K) Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi



Şekil 4. 37 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köyük Betonların Köyük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi

Ultras es geçiş hızı, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/Ç oranının artması ile azalmıştır.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile ultras es geçiş hızında azalma görölmüştür.

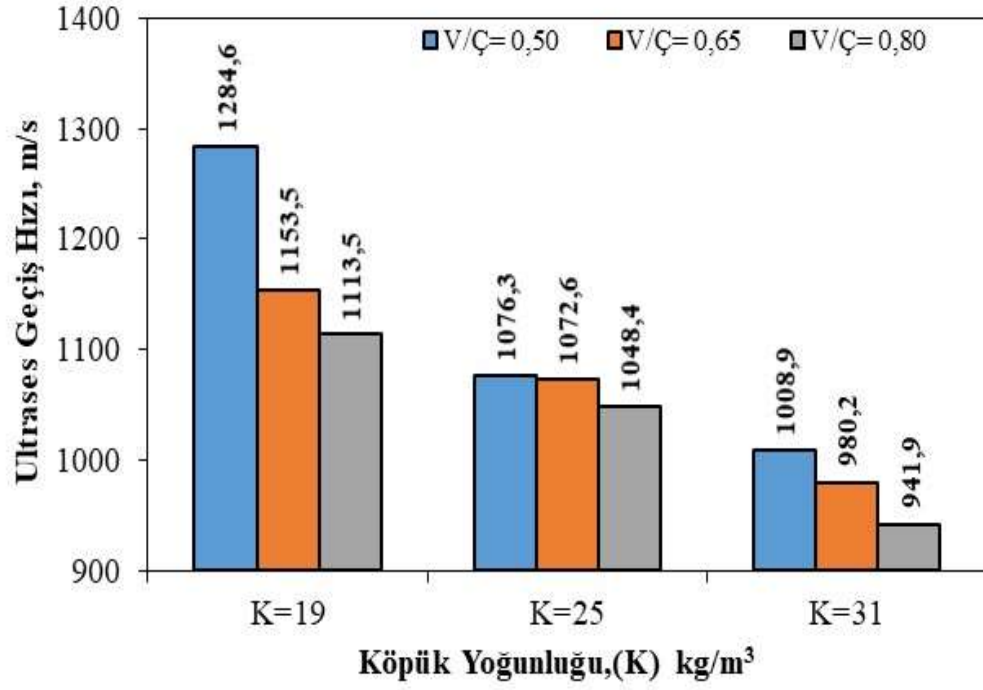
Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların ultras es geçiş hızı deney sonuçları Tablo 4.18’de verilmiştir. Kılcal su emme katsayısının değerlerinin V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.38’de ve Şekil 4.39’da gösterilmiştir.

Tablo 4. 18 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Ultras es Geçiş Hızı Sonuçları

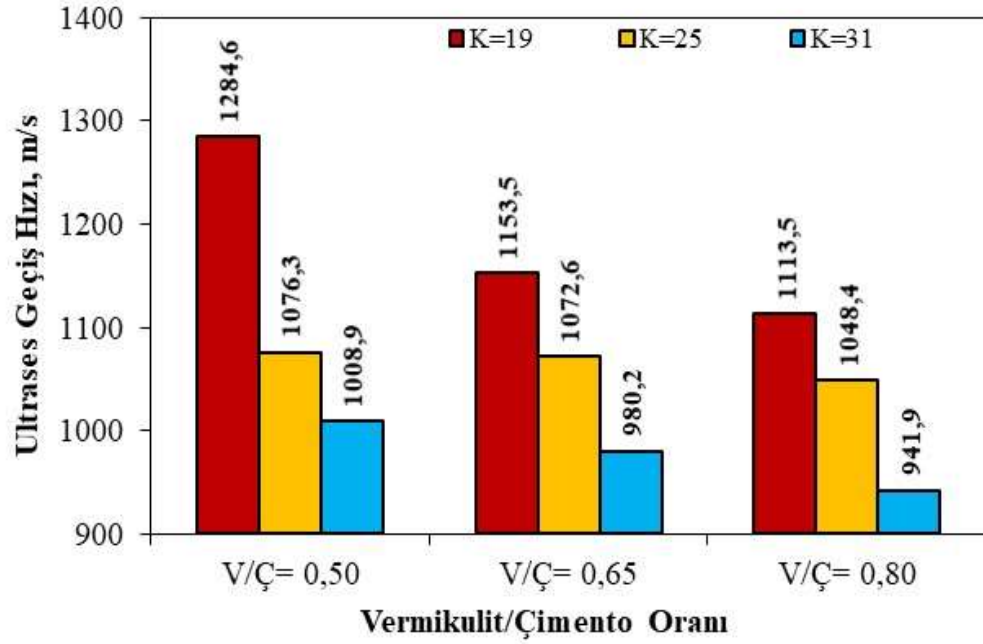
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Ultras es Geçiş Hızı, m/s
1	68Ç-36V-19K	0,50	68	36	19	1284,6
2	68Ç-36V-25K	0,50	68	36	25	1076,3
3	68Ç-36V-31K	0,50	68	36	31	1008,9
4	68Ç-45V-19K	0,65	68	45	19	1153,5
5	68Ç-45V-25K	0,65	68	45	25	1072,6
6	68Ç-45V-31K	0,65	68	45	31	980,2
7	68Ç-54V-19K	0,80	68	54	19	1113,5
8	68Ç-54V-25K	0,80	68	54	25	1048,4
9	68Ç-54V-31K	0,80	68	54	31	941,9

Hacimce 68 oranına sahip köpük betonların ultras es geçiş hızı değerleri; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,50 oranında sırasıyla 1284,6, 1076,3 ve 1008,9 m/s olarak ölçölmüştür. V/Ç=0,65 oranı için ise sırasıyla 1153,5, 1072,6 ve 980,2 m/s olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,80 oranı olduğunda ise 1113,5 1048,4 ve 941,9 m/s olarak elde edilmiştir.

En düşük ultras es geçiş hızı değeri köpük yoğunluğu 31kg/m³ olan V/Ç =0,80 oranında 941,9 m/s, en yüksek ultras es geçiş hızı değeri ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,50 olan numunede 1284,6 m/s olarak görölmüştür.



Şekil 4. 38 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köyük Betonların V/Ç Oranı ve Köyük Yoğunluğuna (K) Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi



Şekil 4. 39 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köyük Betonların Köyük Yoğunluğu(K) ve V/Ç Oranına Göre Ultrases Geçiş Hızlarının Değişimi

Ultrases geçiş hızı, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/ oranının artması ile azalmıştır.

Her bir V/ oranında köpük yoğunluğunun artması ile ultrases geçiş hızında azalma görülmüştür.

Genel bir ifade ile imento oranı arttıķa köpük betonun boşluk yapısının azalmasından dolayı 19 kg/m³ köpük yoğunluğunda ultrases geçiş hızı artmıştır. Köpük yoğunluğu 25 ve 31 kg/m³ olduğunda ise imento oranı arttıķa köpük betonun boşluk yapısının artmasından dolayı ultrases geçiş hızı azalmıştır. Ayrıca tüm imento oranlarında köpük yoğunluğu arttıķa köpük betonun boşluk yapısının artmasının bir sonucu olarak ultrases geçiş hızının azaldığı gözlenmiştir. Tüm imento oranlarında V/ oranı arttıķa vermikliten gözenekli yapısından dolayı gözeneklilik artmış ve ultrases geçiş hızının azaldığı belirlenmiştir. Tüm imento oranlarında en düşük ultrases geçiş hızı hacimce imento içeriği 68, köpük yoğunluğu 31 kg/m³ ve V/=0,80 oranında 941,9 m/s olduğu gözlemlenmiştir. Benzer Şekilde en yüksek ultrases geçiş hızı ise hacimce imento oranı 68, köpük yoğunluğu 19 kg/m³ ve V/=0,50 oranında 1284,6 m/s olarak belirlenmiştir.

4.7 Basınç Dayanımı

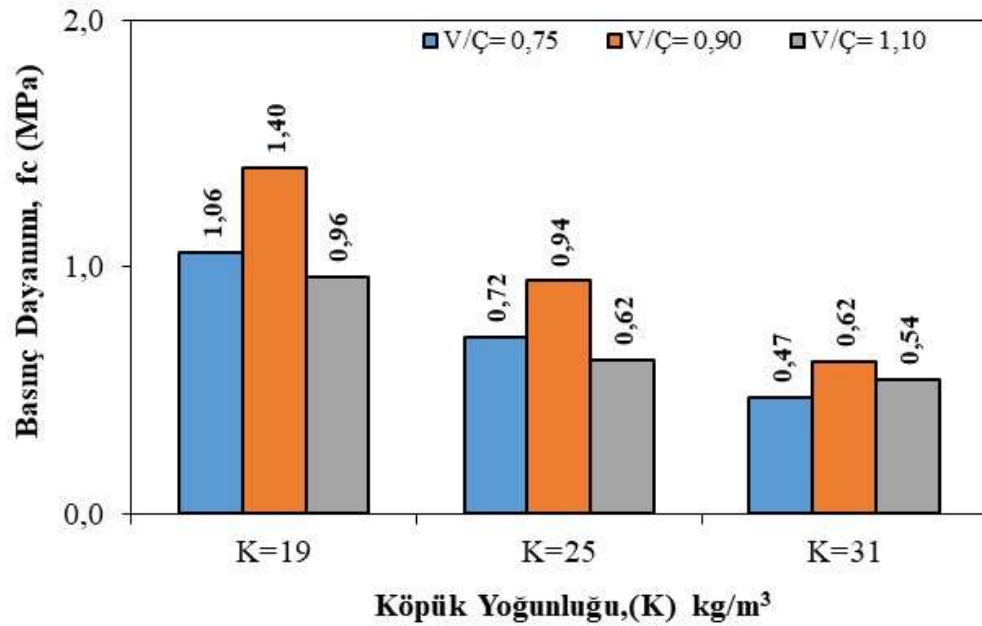
Hacimce 48 imento oranına sahip olan köpük betonların basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 4.19'da verilmiştir. Basınç dayanımlarının V/ oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.40'da ve Şekil 4.41'de gösterilmiştir.

Hacimce 48 imento oranına sahip olan köpük betonların basınç dayanımları; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/= 0,75 oranında sırasıyla 1,06, 0,72 ve 0,47 MPa olarak ölçülmüştür. V/=0,90 oranı için ise sırasıyla 1,40, 0,94 ve 0,62 MPa olarak belirlenmiştir. Benzer Şekilde V/=1,10 oranı olduğunda ise 0,96, 0,62 ve 0,54 MPa olarak elde edilmiştir.

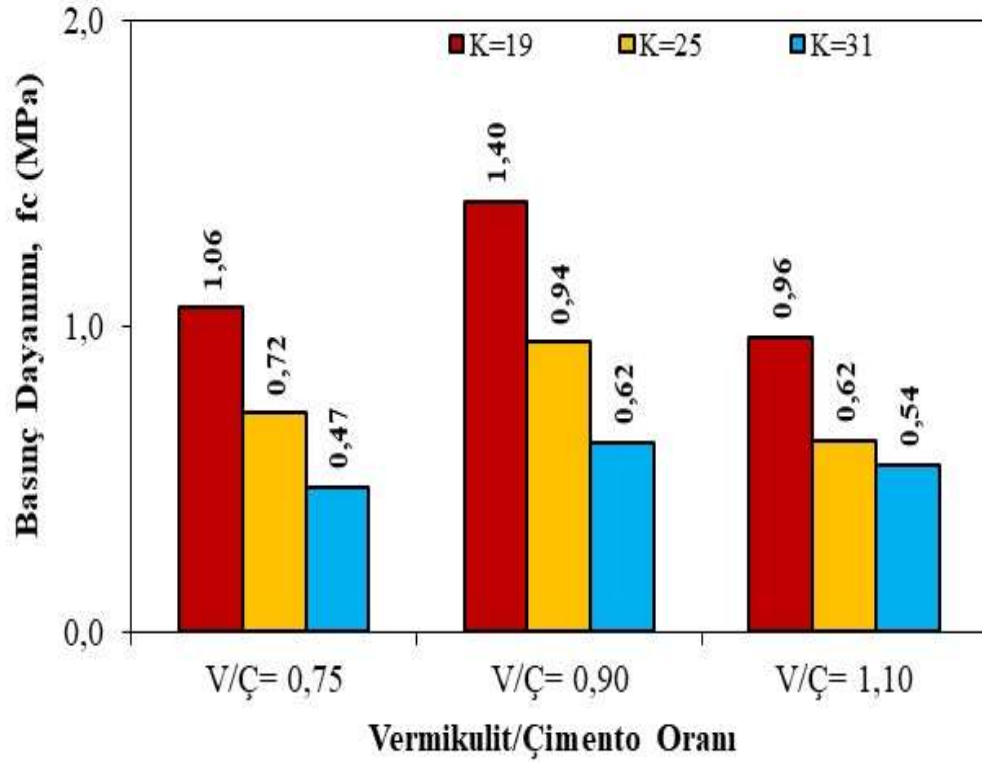
En düşük basınç dayanımı köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/ =0,75 oranında 0,47MPa, en yüksek basınç dayanımı ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/=0,90 olan numunede 1,40 MPa olarak görülmüştür.

Tablo 4. 19 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Basınç Dayanımı (fc), MPa
1	48Ç-36V-19K	0,75	48	36	19	1,06
2	48Ç-36V-25K	0,75	48	36	25	0,72
3	48Ç-36V-31K	0,75	48	36	31	0,47
4	48Ç-45V-19K	0,90	48	45	19	1,40
5	48Ç-45V-25K	0,90	48	45	25	0,94
6	48Ç-45V-31K	0,90	48	45	31	0,62
7	48Ç-54V-19K	1,10	48	54	19	0,96
8	48Ç-54V-25K	1,10	48	54	25	0,62
9	48Ç-54V-31K	1,10	48	54	31	0,54



Şekil 4. 40 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi



Şekil 4. 41 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi

Basınç dayanımının, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/Ç oranının artması ile önce arttığı daha sonra azaldığı gözlenmiştir.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile basınç dayanımının azaldığı görülmüştür.

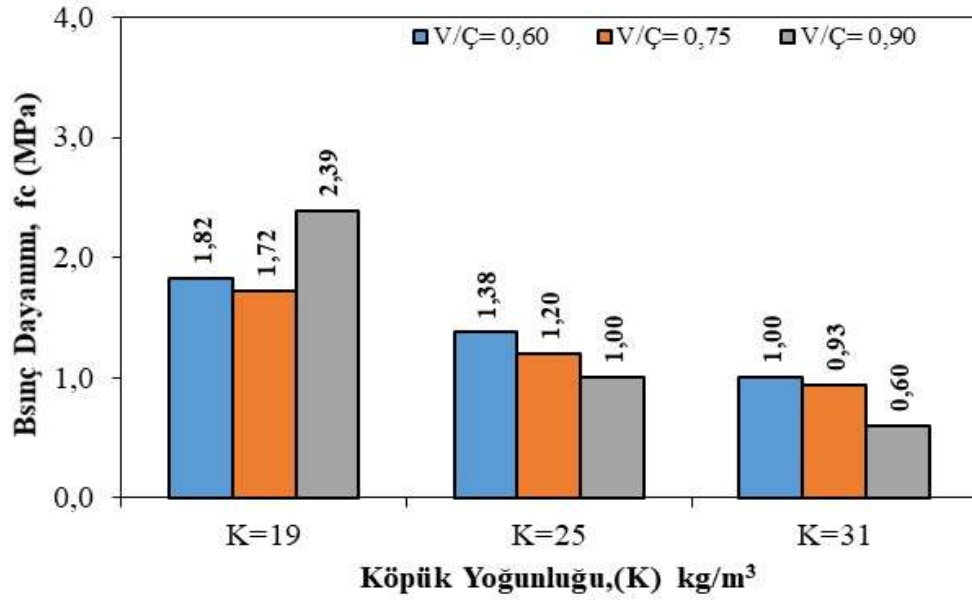
Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 4.20’de verilmiştir. Basınç dayanımlarının V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.42’de ve Şekil 4.43’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 20 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

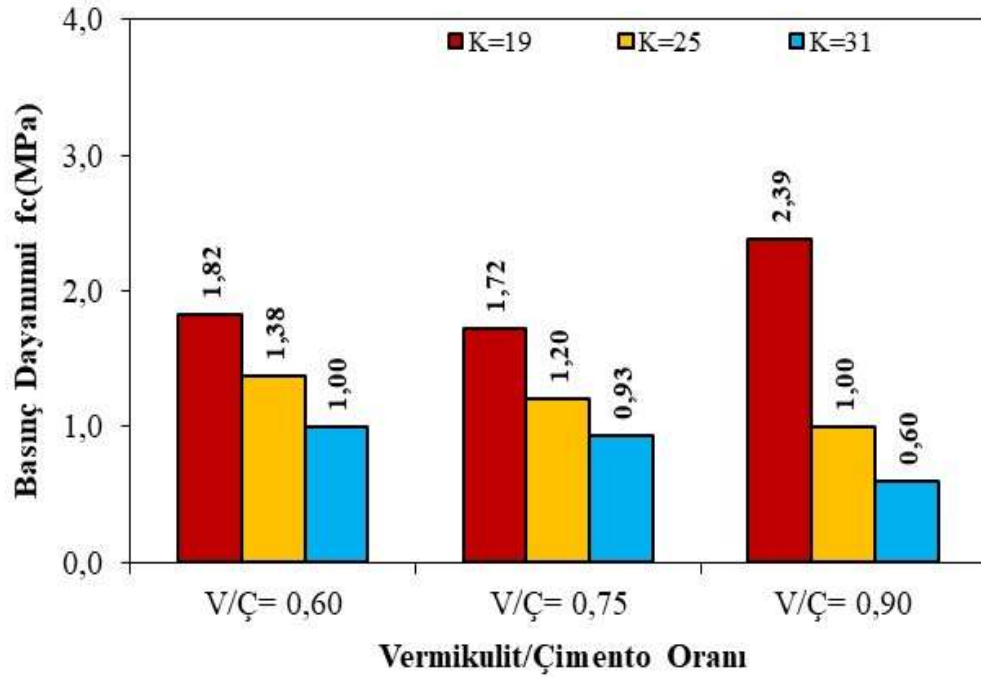
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Basınç Dayanımı (fc), MPa
1	58Ç-36V-19K	0,60	58	36	19	1,82
2	58Ç-36V-25K	0,60	58	36	25	1,38
3	58Ç-36V-31K	0,60	58	36	31	1,00
4	58Ç-45V-19K	0,75	58	45	19	1,72
5	58Ç-45V-25K	0,75	58	45	25	1,20
6	58Ç-45V-31K	0,75	58	45	31	0,93
7	58Ç-54V-19K	0,90	58	54	19	2,39
8	58Ç-54V-25K	0,90	58	54	25	1,00
9	58Ç-54V-31K	0,90	58	54	31	0,60

Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların basınç dayanımları; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,60 oranında sırasıyla 1,82, 1,38 ve 1,00 MPa olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,75 oranı için ise sırasıyla 1,72, 1,20 ve 0,93 MPa olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,90 oranı olduğunda ise 2,39, 1,00 ve 0,60 MPa olarak elde edilmiştir.

En düşük basınç dayanımı köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/Ç =0,90 oranında 0,60MPa, en yüksek basınç dayanımı ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,90 olan numunede 2,39 MPa olarak görülmüştür.



Şekil 4. 42 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi



Şekil 4. 43 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğuna (K) ve V/Ç Oranına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi

Basınç dayanımının, köpük yoğunluğunun 19 kg/m^3 değeri için V/Ç oranının artması ile önce azaldığı daha sonra arttığı gözlenmiştir. Köpük yoğunluğunun 25 ve 31 kg/m^3 değerleri için V/Ç oranı arttıkça basınç dayanımları azalmıştır.

Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile basınç dayanımının azaldığı görülmüştür.

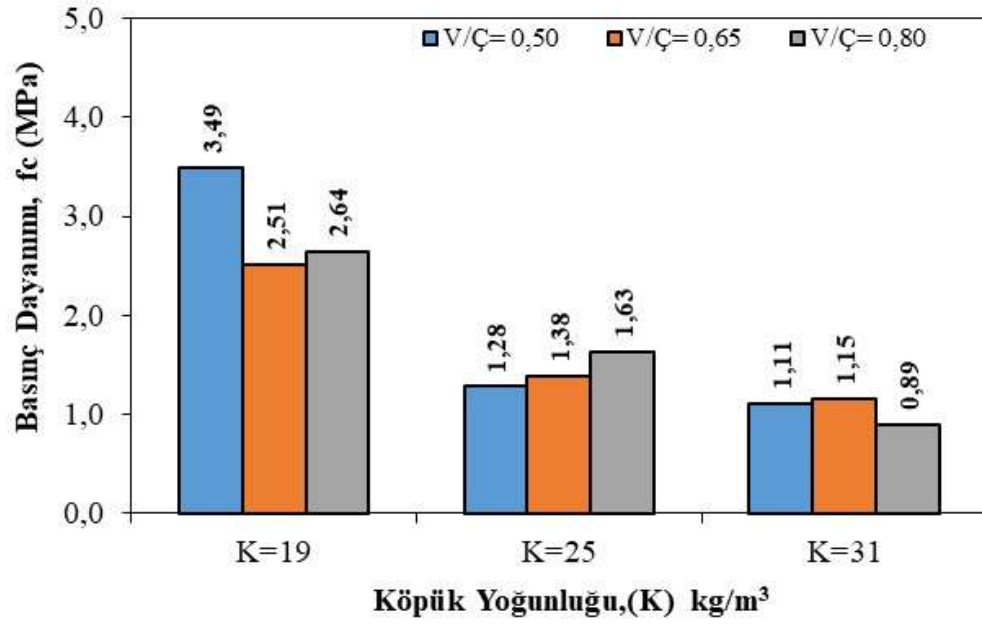
Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 4.21'de verilmiştir. Basınç dayanımlarının V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.44'de ve Şekil 4.45'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 21 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

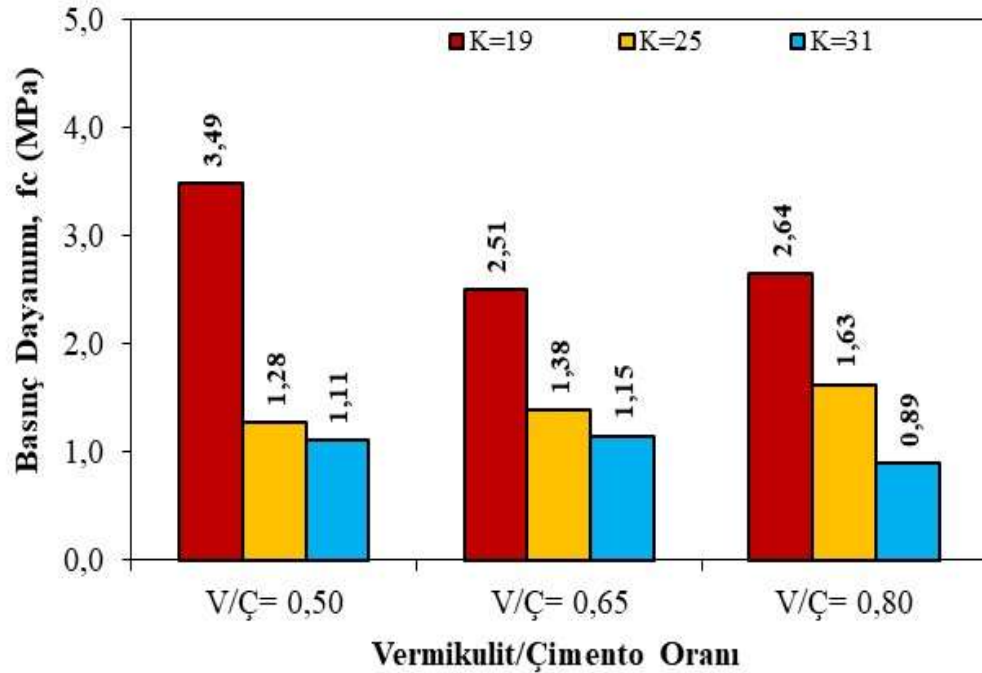
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Basınç Dayanımı (f_c), MPa
1	68Ç-36V-19K	0,50	68	36	19	3,49
2	68Ç-36V-25K	0,50	68	36	25	1,28
3	68Ç-36V-31K	0,50	68	36	31	1,11
4	68Ç-45V-19K	0,65	68	45	19	2,51
5	68Ç-45V-25K	0,65	68	45	25	1,38
6	68Ç-45V-31K	0,65	68	45	31	1,15
7	68Ç-54V-19K	0,80	68	54	19	2,64
8	68Ç-54V-25K	0,80	68	54	25	1,63
9	68Ç-54V-31K	0,80	68	54	31	0,89

Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların basınç dayanımları; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m^3 için V/Ç= 0,50 oranında sırasıyla 3,49, 1,28 ve 1,11 MPa olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,65 oranı için ise sırasıyla 2,51, 1,38 ve 1,15 MPa olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,80 oranı olduğunda ise 2,64, 1,63 ve 0,89 MPa olarak elde edilmiştir.

En düşük basınç dayanımı köpük yoğunluğu 31 kg/m^3 olan V/Ç =0,80 oranında 0,89MPa, en yüksek basınç dayanımı ise köpük yoğunluğu 19 kg/m^3 olan V/Ç=0,50 olan numunede 3,49 MPa olarak görülmüştür.



Şekil 4. 44 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köyük Betonların V/Ç Oranı ve Köyük Yoğunluğuna (K) Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi



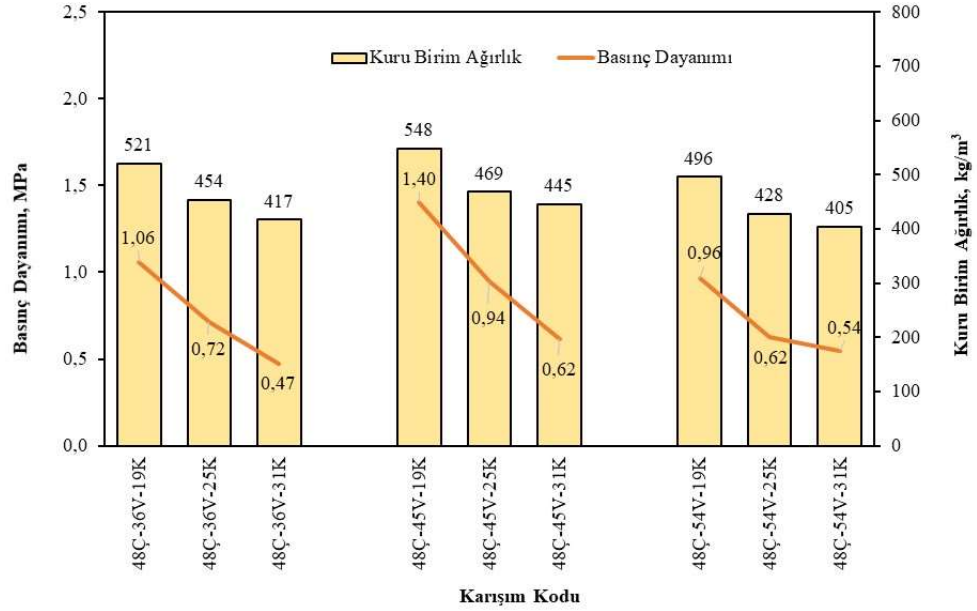
Şekil 4. 45 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köyük Betonların Köyük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi

Basınç dayanımının, köpük yoğunluğunun 19 kg/m^3 değeri için V/Ç oranının artması ile önce azaldığı daha sonra arttığı gözlenmiştir. Köpük yoğunluğunun 25 kg/m^3 olması durumunda ise basınç dayanımı V/Ç oranının artmasıyla artmıştır. Benzer şekilde köpük yoğunluğunun 31 kg/m^3 olduğunda ise basınç dayanımı V/Ç oranı arttıkça önce arttığı daha sonra azaldığı saptanmıştır.

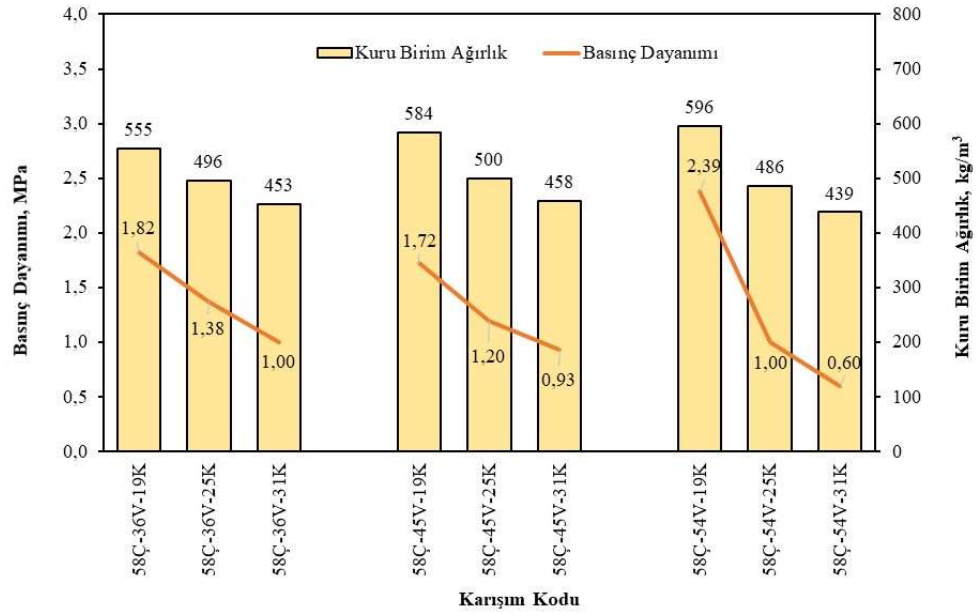
Her bir V/Ç oranında köpük yoğunluğunun artması ile basınç dayanımının azaldığı görülmüştür.

Genel bir ifade ile çimento oranı arttıkça köpük betonun boşluk yapısının azalmasının bir sonucu olarak basınç dayanımı artmıştır. Ayrıca tüm çimento oranlarında köpük yoğunluğu arttıkça köpük betonun boşluk yapısının artmasından dolayı basınç dayanımı azalmıştır. Ancak tüm çimento oranlarında V/Ç oranı arttıkça basınç dayanımı ile ilgili genel bir yorum yapılamamaktadır. Tüm çimento oranlarında en düşük basınç dayanımı hacimce çimento oranı 48, köpük yoğunluğu 31 kg/m^3 ve V/Ç=0,75 oranında 0,47 MPa olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek basınç dayanımı ise hacimce çimento oranı 68, köpük yoğunluğu 19 kg/m^3 ve V/Ç=0,50 oranında 3,49 MPa olarak belirlenmiştir.

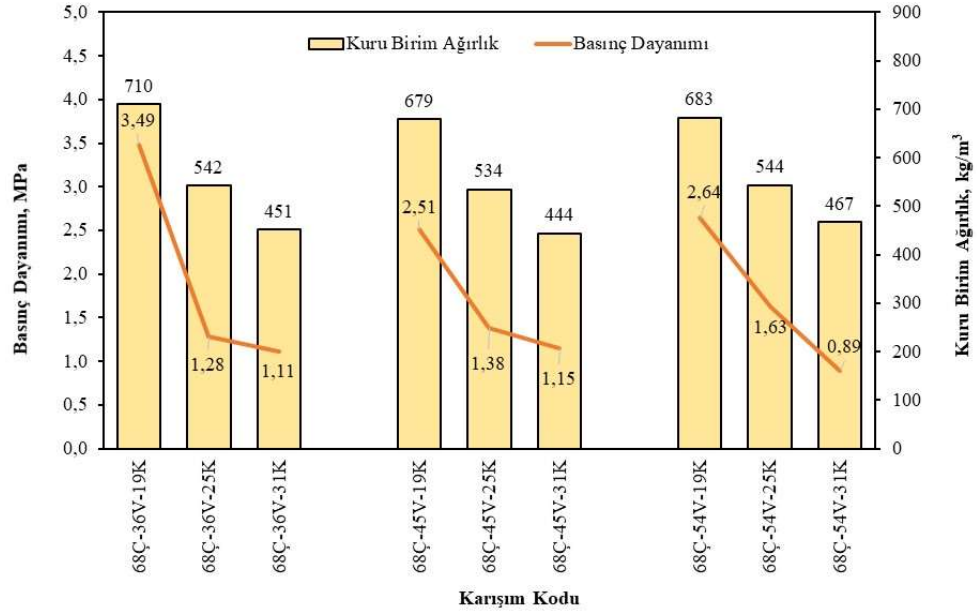
Kuru birim ağırlıklığa göre her bir çimento oranı için basınç dayanımlarının değişimi grafikleri hacimce 48 çimento oranı için Şekil 4.46'da, hacimce 58 çimento oranı için Şekil 4.47'de son olarak hacimce 68 çimento oranı için ise Şekil 4.48'de gösterilmiştir.



Şekil 4. 46 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlıklarına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi



Şekil 4. 47 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlıklarına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi



Şekil 4. 48 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Kuru Birim Ağırlıklarına Göre Basınç Dayanımlarının Değişimi

4.8 Isıl İletkenlik

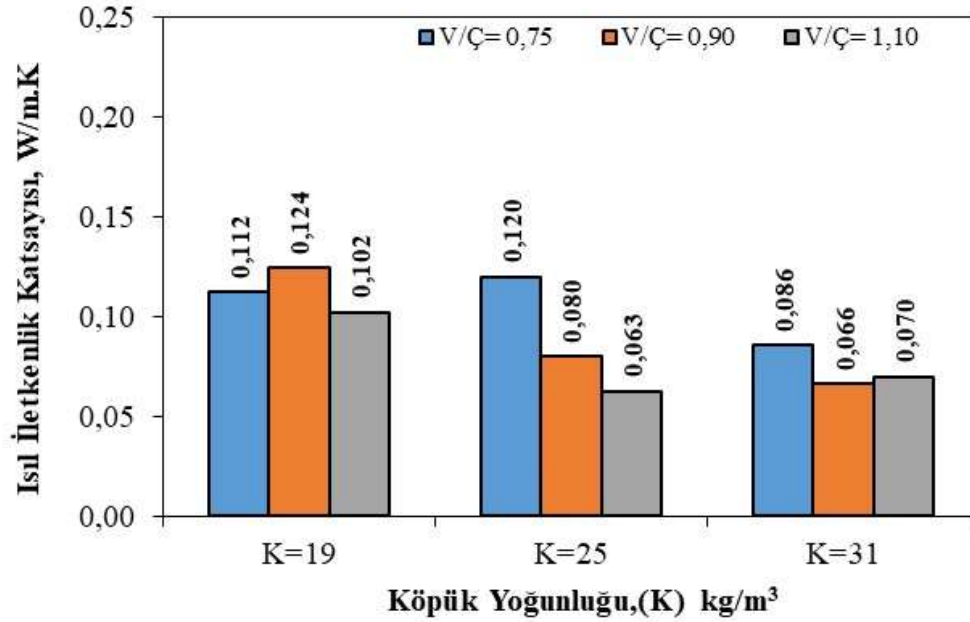
Hacimce 48 çimento oranına sahip olan köpük betonların ısı iletkenlik katsayısı deney sonuçları Tablo 4.22’de verilmiştir. Isıl iletkenlik katsayılarının V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.49’da ve Şekil 4.50’de gösterilmiştir.

Hacimce 48 çimento oranına sahip olan köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,75 oranında sırasıyla 0,112, 0,120 ve 0,086 W/m.K olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,90 oranı için ise sırasıyla 0,124, 0,080 ve 0,066 W/m.K olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=1,10 oranı olduğunda ise 0,102 0,063 ve 0,070 W/m.K olarak elde edilmiştir.

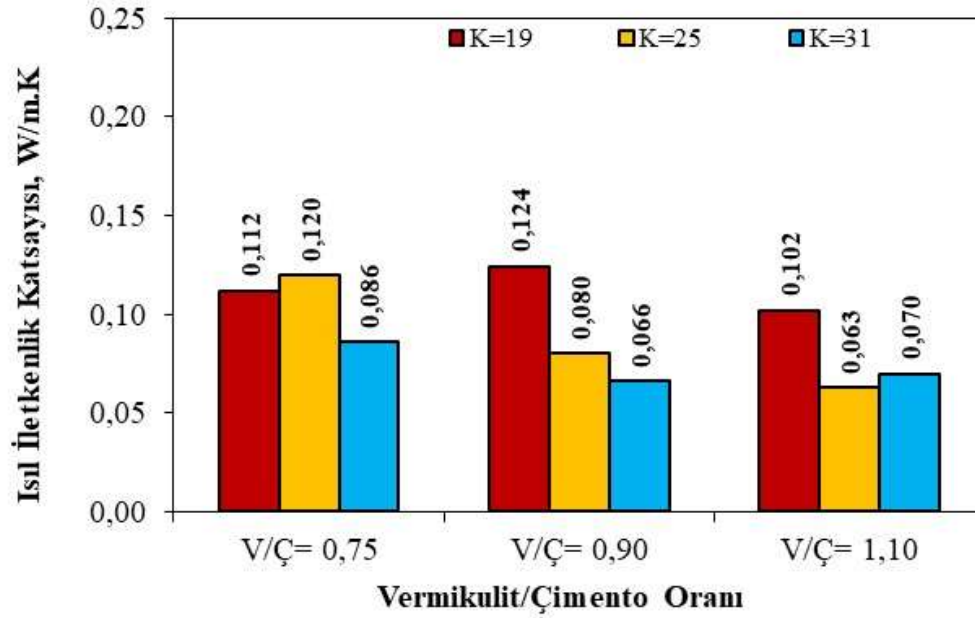
En düşük ısı iletkenlik katsayısı köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/Ç =0,90 oranında 0,066 W/m.K, en yüksek ısı iletkenlik katsayısı ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,90 olan numunede 0,124 W/m.K olarak görülmüştür.

Tablo 4. 22 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Isıl İletkenlik Katsayısı Sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Isıl İletkenlik Katsayısı, W/m.K
1	48Ç-36V-19K	0,75	48	36	19	0,112
2	48Ç-36V-25K	0,75	48	36	25	0,120
3	48Ç-36V-31K	0,75	48	36	31	0,086
4	48Ç-45V-19K	0,90	48	45	19	0,124
5	48Ç-45V-25K	0,90	48	45	25	0,080
6	48Ç-45V-31K	0,90	48	45	31	0,066
7	48Ç-54V-19K	1,10	48	54	19	0,102
8	48Ç-54V-25K	1,10	48	54	25	0,063
9	48Ç-54V-31K	1,10	48	54	31	0,070



Şekil 4. 49 Hacimce 48 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi



Şekil 4. 50 Hacimce 48 Çimento İçeren Köpük Betonun Köpük Yoğunluğunun(K) V/Ç Oranının Göre Isıl İletkenlik Katsayısının Değişimi

Isıl iletkenlik katsayısı, köpük yoğunluğunun 19 kg/m³ değeri için V/Ç oranının artması ile önce arttığı daha sonra azaldığı gözlenmiştir. Köpük yoğunluğu 25 kg/m³ değeri için ise V/Ç oranı arttıkça ısıl iletkenlik katsayı azalmıştır. Benzer şekilde köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan numuneler için V/Ç oranının artmasıyla ısıl iletkenlik katsayısı önce azalmış daha sonra artmıştır.

V/Ç oranı 0,75 olduğunda köpük yoğunluğunun artması ile ısıl iletkenlik katsayısı önce artmış daha sonra azalmıştır. V/Ç oranı 0,90 olduğunda ise ısıl iletkenlik katsayısı köpük yoğunluğunun artması ile azaldığı belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç oranı 1,10 olduğunda köpük yoğunluğu arttıkça ısıl iletkenlik katsayısı önce azaldığı daha sonra arttığı görülmüştür.

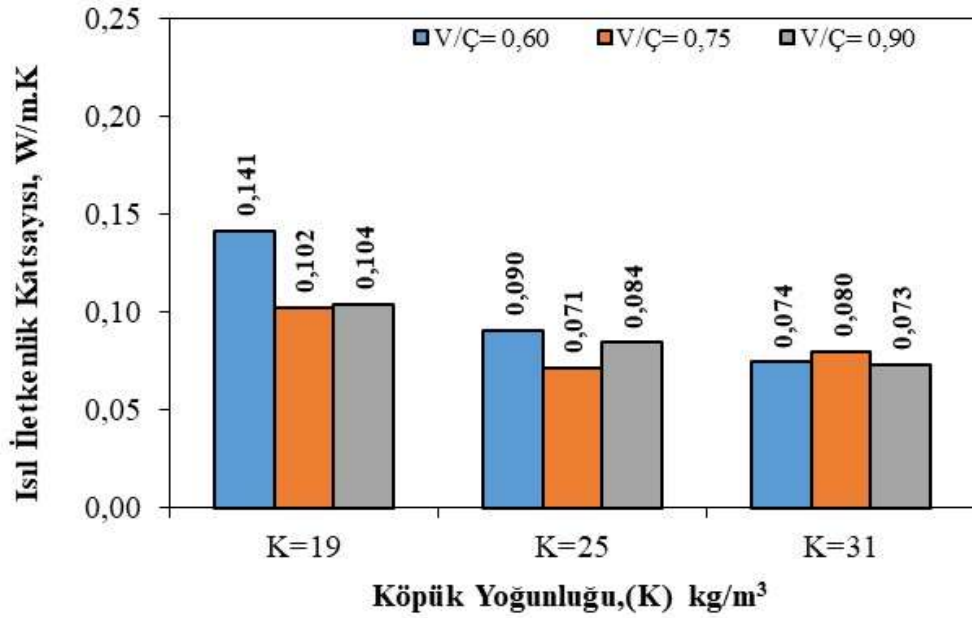
Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların ısıl iletkenlik katsayısı deney sonuçları Tablo 4.23'de verilmiştir. Isıl iletkenlik katsayılarının V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.51'de ve Şekil 4.52'de gösterilmiştir.

Tablo 4. 23 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Isıl İletkenlik Katsayısı Sonuçları

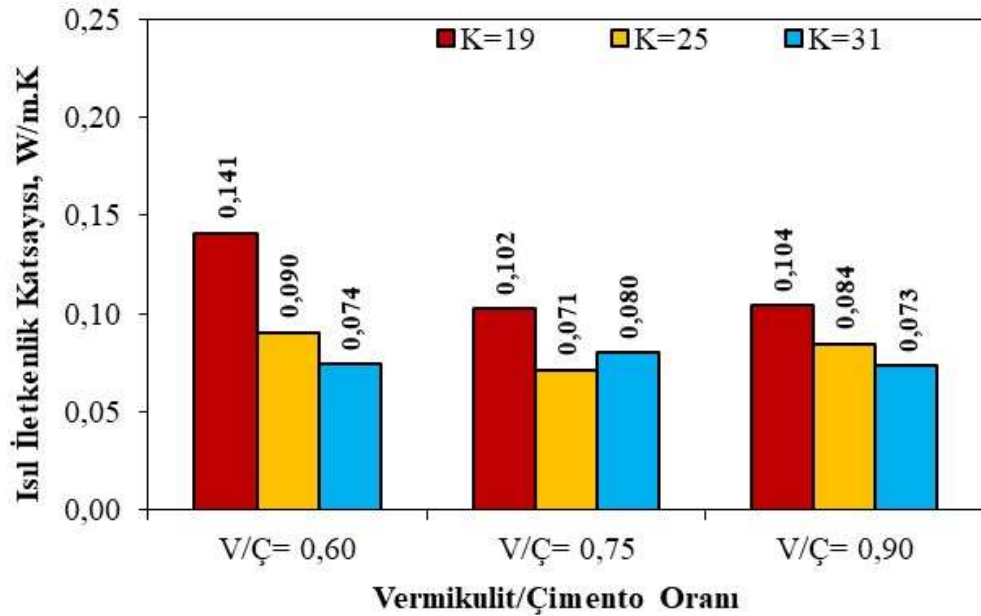
Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Isıl İletkenlik Katsayısı, W/m.K
1	58Ç-36V-19K	0,60	58	36	19	0,141
2	58Ç-36V-25K	0,60	58	36	25	0,090
3	58Ç-36V-31K	0,60	58	36	31	0,074
4	58Ç-45V-19K	0,75	58	45	19	0,102
5	58Ç-45V-25K	0,75	58	45	25	0,071
6	58Ç-45V-31K	0,75	58	45	31	0,080
7	58Ç-54V-19K	0,90	58	54	19	0,104
8	58Ç-54V-25K	0,90	58	54	25	0,084
9	58Ç-54V-31K	0,90	58	54	31	0,073

Hacimce 58 çimento oranına sahip olan köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,60 oranında sırasıyla 0,141, 0,090 ve 0,074 W/m.K olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,75 oranı için ise sırasıyla 0,102, 0,071 ve 0,080 W/m.K olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,90 oranı olduğunda ise 0,104 0,084 ve 0,073 W/m.K olarak elde edilmiştir.

En düşük ısı iletkenlik katsayısı köpük yoğunluğu 25 kg/m³ olan V/Ç =0,75 oranında 0,071 W/m.K, en yüksek ısı iletkenlik katsayısı ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,60 olan numunede 0,124 W/m.K olarak görülmüştür.



Şekil 4. 51 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi



Şekil 4. 52 Hacimce 58 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi

Isıl iletkenlik katsayısı, köpük yoğunluğunun 19 ve 25 kg/m³ değeri için V/Ç oranının artması ile önce azaldığı daha sonra arttığı gözlenmiştir. Köpük yoğunluğu 31 kg/m³

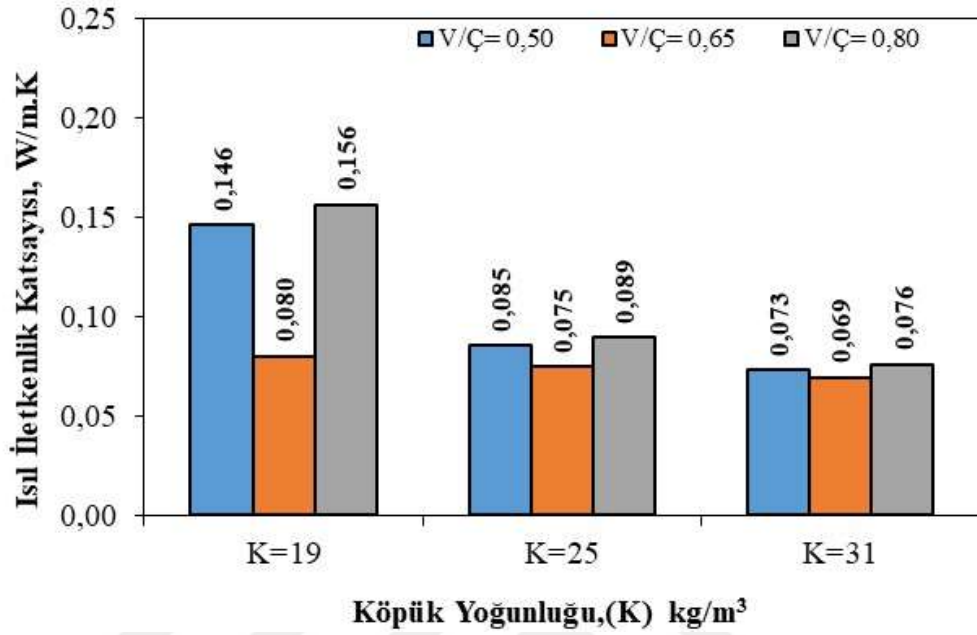
değeri için ise V/Ç oranı arttıkça ısı iletkenlik katsayı önce artmış daha sonra azalmıştır.

V/Ç oranı 0,60 ve 0,90 olduğunda köpük yoğunluğu arttıkça ısı iletkenlik katsayısı azaldığı görülmüştür. V/Ç oranı 0,75 olduğunda ise köpük yoğunluğu arttıkça ısı iletkenlik katsayısı önce azalmış daha sonra artmıştır.

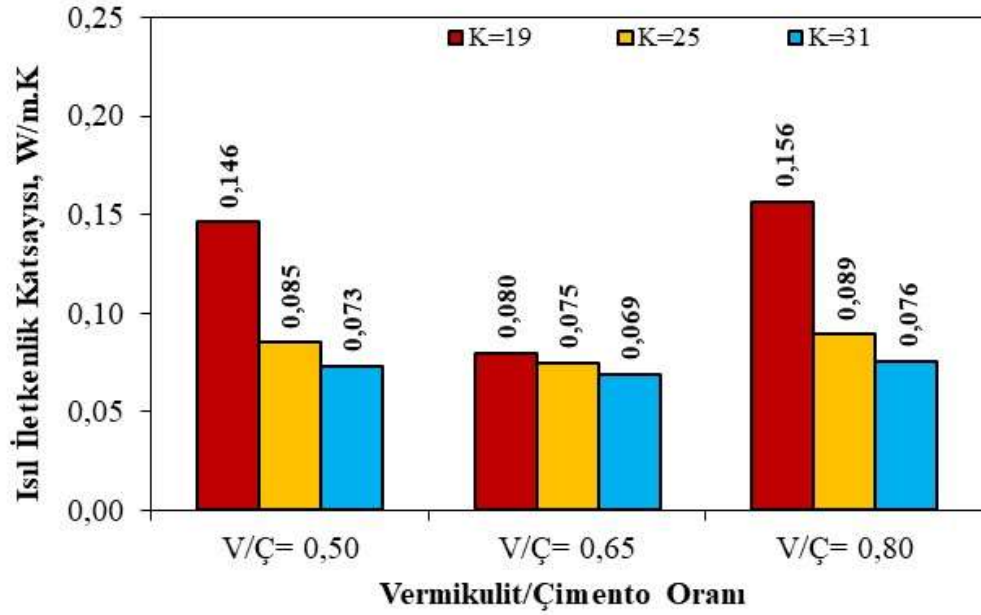
Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların ısı iletkenlik katsayısı deney sonuçları Tablo 4.24’de verilmiştir. Isı iletkenlik katsayılarının V/Ç oranı ve köpük yoğunluğuna (K) göre değişimi Şekil 4.53’de ve Şekil 4.54’de gösterilmiştir.

Tablo 4. 24 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların Isıl İletkenlik Katsayısı Sonuçları

Karışım No.	Karışım Kodu	V/Ç Oranı	Çimento	Vermikülit	Köpük	Isıl İletkenlik Katsayısı, W/m.K
1	68Ç-36V-19K	0,50	68	36	19	0,146
2	68Ç-36V-25K	0,50	68	36	25	0,085
3	68Ç-36V-31K	0,50	68	36	31	0,073
4	68Ç-45V-19K	0,65	68	45	19	0,080
5	68Ç-45V-25K	0,65	68	45	25	0,075
6	68Ç-45V-31K	0,65	68	45	31	0,069
7	68Ç-54V-19K	0,80	68	54	19	0,156
8	68Ç-54V-25K	0,80	68	54	25	0,089
9	68Ç-54V-31K	0,80	68	54	31	0,076



Şekil 4. 53 Hacimce 68 Çimento Oranına Sahip Olan Köpük Betonların V/Ç Oranı ve Köpük Yoğunluğuna (K) Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi



Şekil 4. 54 Hacimce 68 Çimento İçeren Köpük Betonun Köpük Yoğunluğu (K) ve V/Ç Oranına Göre Isıl İletkenlik Katsayılarının Değişimi

Hacimce 68 çimento oranına sahip olan köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları; köpük yoğunluğu 19, 25 ve 31 kg/m³ için V/Ç= 0,50 oranında sırasıyla 0,146, 0,085 ve 0,073 W/m.K olarak ölçülmüştür. V/Ç=0,65 oranı için ise sırasıyla 0,080, 0,075 ve 0,069 W/m.K olarak belirlenmiştir. Benzer şekilde V/Ç=0,80 oranı olduğunda ise 0,156 0,089 ve 0,076 W/m.K olarak elde edilmiştir.

En düşük ısı iletkenlik katsayısı köpük yoğunluğu 31 kg/m³ olan V/Ç =0,65 oranında 0,069 W/m.K, en yüksek ısı iletkenlik katsayısı ise köpük yoğunluğu 19 kg/m³ olan V/Ç=0,80 olan numunede 0,156 W/m.K olarak görülmüştür.

Isı iletkenlik katsayısı, köpük yoğunluğunun 19, 25 ve 31 kg/m³ değerleri için V/Ç oranının artması ile önce azaldığı daha sonra arttığı gözlenmiştir.

Her bir V/Ç oranı için köpük yoğunluğu arttıkça ısı iletkenlik katsayısı azaldığı görülmüştür.

Genel bir ifade ile çimento oranı arttıkça köpük betonun boşluk yapısının azalmasının bir sonucu olarak en yüksek ısı iletkenlik katsayı değerinin arttığı söylenebilir. Ayrıca tüm çimento oranı köpük yoğunluğu artması ile birlikte boşluk yapısının artmasının sonucu olarak ısı iletkenlik katsayısının azaldığı söylenebilir. Ancak tüm çimento oranlarında V/Ç oranı arttıkça ısı iletkenlik katsayısı ile ilgili genel bir yorum yapılamamaktadır. Tüm çimento oranlarında en düşük ısı iletkenlik katsayısı hacimce çimento oranı 48, köpük yoğunluğu 25 kg/m³ ve V/Ç= 1,10 oranında 0,063 W/m.K olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek ısı iletkenlik katsayısı ise hacimce çimento oranı 68, köpük yoğunluğu 19 kg/m³ ve V/Ç=0,80 oranında 0,156 W/m.K olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

3 farklı hacimsel çimento içeriği, 3 farklı hacimsel vermikülit ve 3 farklı hacimsel köpük kullanılarak üretilen köpük betonun üzerinde yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

- 3 farklı çimento oranında köpük yoğunluğu arttıkça köpük betonun boşluk yapısının artırdığından taze birim ağırlık azalmıştır. Ayrıca köpük betonun çimento oranı arttıkça önceden üretilmiş köpüğün içerisindeki suyu emerek köpüğü sönümlemesinin bir sonucu olarak taze birim ağırlığın arttığı söylenebilir.
- 28 gün boyunca laboratuvar şartlarında kür edilen köpük betonun köpük yoğunluğunun artması ile köpük betonun boşluk hacminin artması ile birlikte tüm çimento oranlarında kuru birim ağırlıkların azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca çimento oranı arttıkça köpük betonun yapısındaki boşluk hacminin azalması ile birlikte kuru birim ağırlıklar artmıştır.
- Köpük betonun % su emme değeri V/Ç oranı arttıkça tüm çimento oranlarında vermikülit agregasının gözenekli doğal yapısının bir sonucu olarak artmıştır. Benzer şekilde tüm çimento hacminde köpük yoğunluğun artması ile köpük betonun boşluk hacminin artması ile birlikte % su emme değerlerinin arttığı gözlenmiştir. Ayrıca köpük betonun çimento oranı arttıkça köpük betonun boşluk yapısının azalmasının bir sonucu olarak % su emme değerlerinde bir azalma görülmüştür.
- Köpük betonun kılcal su emme katsayısı, tüm köpük yoğunluklarında köpük betonun çimento oranı arttıkça boşluk hacminin azalması ile birlikte kılcal su emme katsayısının azaldığı gözlenebilmektedir. Ayrıca tüm çimento oranlarında köpük yoğunluğunun artması ile köpük betonun boşluk yapısının artmasından dolayı kılcal su emme katsayısının arttığı belirlenmiştir.
- En düşük köpük yoğunluğu olan 19 kg/m³'te çimento oranı arttıkça boşluk yapısının azalmasından dolayı ultrases geçiş hızı artmıştır. 25 ve 31 kg/m³ köpük yoğunluğunda ise köpük betonun çimento oranı arttıkça köpüklerin birbirini birleşerek sönümlemesini engelleyerek daha çok boşluk oluşturmaya yol açmasından dolayı ultrases geçiş hızı azalmıştır. Benzer şekilde tüm çimento oranlarında köpük yoğunluğunun artması ile köpük

betonun boşluk yapısının artması ve ultrases dalgalarının aldığı kıvrım yolu mesafesinin artmasıyla birlikte ultrases geçiş hızının azaldığı gözlenmiştir. V/Ç oranı tüm çimento oranlarında arttıkça vermikülitin gözenekli yapısının ultrases dalgalarının izlediği kıvrım yolunu artırmasının bir sonucu olarak köpük betonun ultrases geçiş hızının azaldığı görülmüştür.

- Köpük betonun basınç dayanımı, çimento oranı arttıkça azalan boşluk yapısı ile birlikte birim ağırlığının artmasından dolayı arttığı saptanmıştır. Köpük yoğunluğunun artması ile boşluk yapısının artması ve köpük betonun birim ağırlığının azalmasının bir sonucu olarak köpük betonun basınç dayanımının azaldığı belirlenmiştir. Köpük betonun basınç dayanımı ile kuru birim ağırlığı arasında doğrusal bir ilişkinin olduğunu gözlemlenmiştir.
- Çimento oranının artması ile ısıl iletkenlik katsayısı değerinin arttığı, buna karşılık tüm çimento hacimlerinde köpük betonun yoğunluğu arttıkça ısıl iletkenlik katsayısı değerinin düştüğü belirlenmiştir.

Ülkemizde kullanımı oldukça yeni bir maden olan, araştırma ve uygulama alanı çok yaygın olmayan genleştirilmiş vermikülitin agrega olarak kullanılmasıyla üretilecek köpük betonların ısı yalıtım özellikli hafif tuğla olarak geleneksel yapı tuğlalarına alternatifi bir yapı malzemesi olabileceği öngörülmektedir. Ayrıca, farklı bağlayıcı malzemeler ve liflerin vermikülit ile birlikte kullanılması ile elde edilecek yeni kompozit malzemeler üzerinde araştırma yapılması ile yapı malzemesi ve diğer sektörlere katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

1. Darwin, D., Dolan, C.W. ve Nilson A. H., DESIGN of CONCRETE STRUCTURES, Fifteenth Edition, McGraw-Hill Education, 2016.
2. K. Ramamurthy, E.K. Nambiar, G.I.S. Ranjani, A classification of studies on properties of foam concrete, Cem. Concr. Compos. 31 (6) (2009) 388–396.
3. Brady, K.C., Jones, M.R.ve Watts, G.R. Specification for foamed concrete, Application guide AG39: TRL Limited, 2001.
4. Neville, A.M., Properties of Concrete, Fifth Edition, Pearson, 2012.
5. Neville, A.M., Brooks, J.J., Concrete Technology, Second Edition, Pearson, 2010.
6. Baradan, B., Yazıcı, B., Aydın S., Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No:334, 2015.
7. ASTM C330-05, Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete, 2005.
8. ASTM C 331-05 Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units, 2005.
9. ASTM C 332-99 Standard Specification for Lightweight Aggregates for Insulating Concrete, 1999.
10. Newman, J., Choo B.S., Advanced Concrete Technology Processes, Elsevier, İngiltere, 2003.
11. TS EN 206-1, Beton- Bölüm 1: özellik, performans, imalat ve uygunluk, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002, 68 s., 2002.
12. Konuk ,H., Hafif agregalı Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı Yalıtımı, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul 2003.
13. Taşdemir, M. A., Taşıyıcı hafif agregalı betonların elastik ve elastik olmayan davranışları, Doktora Tezi, İTÜ İnşaat Fakültesi, İstanbul 1982.
14. Suvorov, S.A., Shurikhin, V.V., Vermiculite — a Promising Material for High-Temperature Heat Insulators, Volume 44(3), 186-193, 2003.
15. Rashad, A.M., Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer, Construction and Building Materials, 125, 53-62, 2016.

16. Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Yapı Malzemeleri III, Pomza-Perlit-Vermikülit-Flogopit-Genleşen Killer Çalışma Grubu Raporu, DPT: 2617 - ÖİK: 628, , Ankara, 2001.
17. Toksoy, F., Vermikülit : Mineraloji, Jeolojik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye'deki Durumu, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim, İzmir,Türkiye, 1997.
18. Bors, J., Gorny, A., S. Iodide, Dultz, cerium and strontium adsorption by organophilic vermiculite, Clay Miner, 32 (1), 21–28, 1997.
19. Melkhaner, W.K., Assaad, F.F., Thermodynamics of Sr-Mg vermiculite exchange and effect of PVA on Mg release, Thermochem. Acta 334 (1–2), 33–38, 1999.
20. Gedeonov, P. P., Expandable fireproof coatings based on vermiculite, Stroit. Mater., No. 7, 16–18, 1991.
21. Valáškov, M. ve arkadaşları Influence Of Vermiculite On The Formation Of Porous Cordierites, Applied Clay Science, 46, 196–201, 2009.
22. Suzette,M. K., Menial Commodity Summaries 2016, Department of the Interior, U.S. Geological Survey, pp. 1–1202, 2016.
23. V.T. Shmuradko ve arkadaşları Composition, structure, and property formation of heat insulation fire- and heat-reflecting materials based on vermiculite for industrial power generation Refract. Ind. Ceram 53(4) 254-258,2012.
24. Harben, P. W., Kuzvart, M., Industrial Minerals Global Geology Ind. Mins. Inf. Ltd. Metal Bulletin, 462p., London 1996
25. Strand, P. R., , Vermiculite, Industrial Minerals And Rocks, ed: Lefond S. J., Vol: 2., 1983.
26. Weisman, J., <http://webmineral.com>, Photographic Guide to Mineral Species, 2018.
27. Weller, R., Cochise College, Cochise Country, Arizona, <http://skywalker.cochise.edu>, 2010.
28. Swapna Mukherjee, Industrial Mineralogy: Mineral Processing, Chapter 17: Beneficiations and Other Related Mineral Usage, Springer, 425–489, 2011.

29. Yurkon, A.L., Aksel'rod, L.M., Properties of heat-insulating materials (A review), *Refract. Ind. Ceram.* 46 (3), 170–174, 2005.
30. Yanxi Minerals Co. Ltd., <http://www.chinavermiculite.com/>, China, 2019.
31. Mo, K.H. ve arkadaşları Incorporation of expanded vermiculite lightweight aggregate in cement mortar, *Construction and Building Materials*, 179, 302-306, 2018.
32. Köksal, F., Gençel, O., Kaya, M., Combined effect of silica fume and expanded vermiculite on properties of lightweight mortars at ambient and elevated temperatures, 88, 175-187, 2015.
33. Shoukry, H., ve arkadaşları, Enhanced physical, mechanical and microstructural properties of lightweight vermiculite cement composites modified with nano metakaolin, *Construction and Building Materials*, 112, 276-283, 2016.
34. Köksal, F., ve arkadaşları, Combined effect of steel fibre and expanded vermiculite on properties of lightweight mortar at elevated temperatures, *Materials and Structures*, 48(7), pp 2083-2092, 2014.
35. El-Gamal, S.M.A., Hashem, F.S., Amin, M.S., Thermal resistance of hardened cement pastes containing vermiculite and expanded vermiculite, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 109(1), 217-226, 2012.
36. Sütçü, M., Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks, *Ceramics International* 41, 2819-2827, 2015.
37. Mladenoviç, A., ve arkadaşları, Alkali-silica reactivity of some frequently used lightweight aggregates, *Cement and Concrete Research*, 34, 1809-1816, 2004.
38. Melo M.O.B.C., ve arkadaşları Energy efficiency in building installations using thermal insulating materials in northeast Brazil, *Energy and Buildings*, 47, 35-43, 2012.
39. Abidi, S., Impact of perlite, vermiculite and cement on the thermal conductivity of a plaster composite material: Experimental and numerical approaches, *Composites: Part B*, 68, 392-400, 2015.

40. Schackow, A., ve arkadaşları, Mechanical and thermal properties of lightweight concretes with vermiculite and EPS using air-entraining agent, *Construction and Building Materials*, 57, 190-197, 2014.
41. M.R. Jones, A. McCarthy, Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material, *Mag. Concr. Res.* 57 (1), 21–31, 2005.
42. R.C. Valore Jr., Cellular concretes Part 2 physical properties, *ACI J. Proc.*, 50 (6), 1954.
43. Richard, T.G. ve arkadaşları Cellular concrete – a potential load-bearing insulation for cryogenic applications, *IEEE Trans Magn.* 11 (2), 500–503, 1975.
44. Weigler, H., Karl, S., Structural lightweight aggregate concrete with reduced density-lightweight aggregate foamed concrete, *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.* 2 (2), 101–104, 1980.
45. Mydin, M.A.O. ve Wang, Y.C., Structural performance of lightweight steel-foamed concrete–steel composite walling system under compression, *Thin-walled Struct.* 49 (1), 66–76, .2011
46. Amran, Y.H.M., Farzadnia, N., Abang Ali, A.A., Properties and applications of foamed concrete; a review, *Constr. Build. Mater.* 101 (Part 1), 990–1005, 2015.
47. TSE K 314 Köpük Betondan Mamul Yerinde Döküm, Taşıyıcı Olmayan Duvar Elemanları - Binalar İçin Standart, Türk Standartları Enstitüsü, 2014.
48. Jones, M .R., McCarthy, A., Behaviour and Assessment of Foamed Concrete for Construction Applications, Thomas Telford, London, UK, 2005.
49. Bindiganavile, V. Ve Hoseini, M. Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete, Foamed Concrete, University of Alberta, Canada, pp. 231-255, 2008.
50. A.O. Richard, M. Ramli, Experimental production of sustainable lightweight foamed concrete, *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, 3 (4), 994–1005, 2013.
51. Nambiar, E.K. K., ve Ramamurthy, K., Fresh state characteristics of foam concrete, *J. Mater. Civ. Eng.*, 20 (2), 111–117, 2008.

52. Aldrige, D., Introduction to foamed concrete: What, Why,How? Proceedings: International Conference on the Use ofFoamed Concrete in Construction, University of Dundee,Scotland, July 5, pp. 1–14, 2005.
53. W.H. Taylor, Concrete Technology and Practice, American Elsevier Co. Inc.,NY, p. 185, 1965.
54. Panesar, D.K., Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents, *Constr. Build. Mater.* 44 (1), 575–584, 2013.
55. W.A. Thanoon, ve arkadaşları Development of an innovative interlocking load bearing hollow block system in Malaysia, *Constr. Build. Mater.* 18 (6), 445–454, 2004.
56. Bing, C., Zhen, W., Ning, L., Experimental research on properties of highstrength foamed concrete, *J. Mater. Civ. Eng.* 24 (1), 113–118, 2011.
57. F.C. McCormick, Rational proportioning of preformed foam cellular concrete, *ACI J. Proc.* 64 (2), 104–110, 1967.
58. Nambiar, E.K.K., Ramamurthy, K., Air-void characterisation of foam concrete, *Cement and Concrete Research*, 37, 221-230, 2007a.
59. Hilal, A.A., Thom, N.H., Dawson, A.R., On entrained pore size distribution of foamed concrete, *Construction and Building Materials*, 75, 227-233, 2015a.
60. Kuzielová, E., Pach, L.,Palou, M., Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties, *Construction and Building Materials*, 125, 998-1004, 2016.
61. Jiang, J., ve arkadaşları Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement, *Materials and Design* ,92, 949-959, 2016.
62. Xie, Y., ve arkadaşları, Effects of bentonite slurry on air-void structure and properties of foamed concrete, *Construction and Building Materials*, 179, 207-219, 2018.
63. Chung, S-Y., ve arkadaşları Pore Characteristics and Their Effects on the Material Properties of Foamed Concrete Evaluated Using Micro-CT Images and Numerical Approaches, *Applied Sciences*, 7(6), 550, 2017.

64. Hilal, A.A., Thom, N.H., Dawson, A.R. On void structure and strength of foamed concrete made without/with additives, *Construction and Building Materials*, 85, 157-164, 2015b.
65. Kearsley, E.P., Wainwright, P.J., Porosity and permeability of foamed concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 805-812, 2001a.
66. Nambiar, E.K.K., Ramamurthy, K., Sorption characteristics of foam concrete, 37, 1341-1347, 2007b.
67. Zhihua, P., Hengzhi, L., Weiqing, L., Preparation and characterization of super low density foamed concrete from Portland cement and admixtures, 72, 256-261, 2014.
68. Mydin, M.A.O., Effective thermal conductivity of foamcrete of different densities, *Concrete Research Letters*, 2(1), 2011.
69. Sayadi, A.A. ve arkadaşları, Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete, *Construction and Building Materials*, 112, 716-724, 2016.
70. Kumar, N.V., Arunkumar, C., Senthil, S.S., Experimental Study on Mechanical and Thermal Behavior of Foamed Concrete, *Materials Today: Proceedings*, 5, 8753-8760, 2018.
71. Kearsley, E.P., Mostert, H.F., The use of foamed concrete in refractories. In: Dhir RK, Newlands MD, McCarthy A, editors. *Use of foamed concrete in construction*. Thomas Telford, p. 89–96, 2005.
72. Vilches, J., Ramezani, M., Neitzert, T., Experimental investigation of the fire resistance of ultra lightweight foam concrete, *International Journal of Advanced Engineering Applications*, 1(4), 15-22, 2012.
73. N. Narayanan, K. Ramamurthy, Structure and properties of aerated concrete: a review, *Cem. Concr. Compos.*, 22 (5), 321–329, 2000.
74. M.R. Jones, M.J. McCarthy, A. McCarthy, Moving fly ash utilization in concrete forward: a UK perspective, in: *Proceedings of the 2003 International Ash Utilisation Symposium*, Centre for Applied Energy Research, University of Kentucky, pp. 20–22, 2003.
75. M.R. Jones, A. McCarthy, Utilising unprocessed low-lime coal fly ash in foamed concrete, *Fuel* 84 (11), 1398–1409, 2005.

76. R.C. Valore Jr., Cellular concretes Part 1 composition and methods of preparation, ACI J. Proc. 50 (5), 1954.
77. Domone, P. And Illston, J. (2010) Construction Materials Their nature and behaviour, Fifth Edition, CRC Press, 2018.
78. Kearsley, E.P., Wainwright, P.J., The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete, 31, 105-112, 2001b.
79. İbrahim, H.H.W., Compressive and Flexural Strength of Foamed Concrete Containing Polyolefin Fibers, Advanced Materials Research, 9, pp 489-493, 2014.
80. Tan, X. ve arkadaşları, Experimental Study of Ultralight Foamed Concrete, Advances in Materials Science and Engineering, 514759, 2014.
81. Cong, M., Bing, C., Properties of a foamed concrete with soil as filler, Construction and Building Materials, 76, 61-69, 2015.
82. Ma, C., Chen, B., Experimental study on the preparation and properties of a novel foamed concrete based on magnesium phosphate cement, Construction and Building Materials, 137, 160-168, 2017.
83. R.A. Barnes Excellence in Concrete Construction through Innovation, Foamed Concrete: Application and specification, The Concrete Society,UK,pp. 3-9, 2009.
84. <https://www.ekaconcrete.com/services/foam-concrete/>, Ağustos 2019.
85. http://www.cematrix.com/_resources/case-studies/cs-central-road.pdf, Ağustos 2019.
86. Sallal, A.K., Use Foam Concrete in Construction Works, International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology, 4(2),15-20, 2018.
87. <https://www.eabassoc.co.uk/uses-of-foamed-concrete.php>, Ağustos 2019.
88. Thakrele, M.H., Experimental Study On Foam Concrete, International Journal of Civil, Structural, 2249-7978 Vol. 4(1), 145-158, 2014.

ÖZGEÇMİŞ

Ali Can Türeyen, 1990 yılından Denizli’de doğdu. İlkokulu Yozgat Sakarya İlköğretim okulunda, lise öğrenimini ise Yozgat Anadolu Lisesi’nde tamamlamıştır. 2009 yılında Bozok Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi İnşaat Mühendisliği bölümünde lisans eğitime başlamış olup 2014 yılında başarıyla bitirmiştir. Özel sektörde farklı firmalarda saha mühendisi ve şantiye şefi olarak çalışmıştır.

2016 yılında Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Malzemesi Bilim Dalında Yüksek Lisans Eğitime başlamıştır.

İletişim Bilgileri:

Adres: İstanbulluoğlu Mah. Menfez Sok. Yortanlı Sitesi C / Blok Kat:3 No:5 66100-Merkez/Yozgat

Gsm: 0553 532 58 61

E-Posta: alicantureyen@gmail.com