



**DIATOMİTİN KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE  
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

**Hasan ELİKÜÇÜK**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KASIM 2024**



## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hasan ELİKÜÇÜK

11/11/2024



# DİATOMİTİN KÖPÜK BETON ÜRETİMİNDE KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Hasan ELİKÜÇÜK

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Kasım 2024

## ÖZET

Beton en çok kullanılan yapı malzemelerinden birisidir. Beton teknolojisinin hızlı gelişmesi nedeniyle beton, farklı amaçlar doğrultusunda tasarlanmış ve kullanım alanları arttırılmıştır. Kullanım alanlarının artması, beton üretimindeki gelişmeler, beton teknolojisini oldukça çeşitlendirmiştir. Geliştirilmiş birçok özel beton türü mevcuttur. Bunlardan bir tanesi ise köpük betondur. Köpük beton çimento, silis esaslı malzeme, gözenek oluşturan (köpük ajanı) katkı maddesi ve suyun karıştırılmasıyla hazırlanan bir beton türüdür. Köpük beton yüksek oranda peteksi yapıya sahip boşluklu bir beton türüdür. Bu nedenle yalıtım özelliği oldukça iyidir. Bu çalışmada Çankırı yöresinden temin edilen yoğunluğu  $1,83 \text{ kg/dm}^3$ , su emmesi %188 ve %84'ü silis olan diatomit ile köpük beton üretilebilirliği araştırılmıştır. Çalışmada 4 mm'den küçük diatomit kumu ile 4 farklı tasarım ve 5 farklı değişken kullanılarak optimum S/Ç oranı, optimum silis kumu miktarı, optimum diatomit miktarı ve optimum köpük miktarı oranları ayrı ayrı saptanmıştır. Bu tasarımlar sonucu karar verilen S/Ç oranı 0,75, çimento %100, su %75 diatomit % 36, silis kumu % 16 ve köpük % 10 oranlarıyla yeni köpük beton numuneleri üretilerek TS 13655'e göre köpük betonun özellikleri belirlenmiştir. Bu özellikler ile birim hacim kütleler, basınç dayanımları, su emme oranları, kapiller su emme kapasiteleri, ultrases geçiş hızları, ısı iletkenlik katsayıları ve yanıcılık ve ısı geçirgenlik özellikleri incelenmiştir. Optimum malzeme oranlarıyla üretilen köpük beton numunelerin birim hacim kütlesi,  $737,17 \text{ kg/m}^3$ , 7 günlük basınç dayanımı, 3,29 MPa iken 28 günlük basınç dayanımı, 3,64 MPa, su emme oranı % 60,7, kapiler su emme katsayısı  $2,53 \text{ g / m}^2\text{s}^{0,5}$ , ultrases geçiş hızı 1,54 km/s, ısı iletkenlik katsayısı 0,157 W/ m K olarak bulunmuştur.

Bilim Kodu : 91127  
Anahtar Kelimeler : Diatomit, köpük beton, silis kumu, optimum miktar  
Sayfa Adedi : 69  
Danışman : Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK

# INVESTIGATION OF THE USAGE OF DIATOMITE IN PRODUCTION OF FOAM CONCRETE

(M. Sc. Thesis)

Hasan ELİKÜÇÜK

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

November 2024

## ABSTRACT

Concrete is one of the most widely used building materials. Due to the rapid development of concrete technology, concrete has been designed for different purposes and its areas of use have increased. The increase in areas of use and developments in concrete production have diversified concrete technology considerably. There are many special concrete types that have been developed. One of these is foam concrete. Foam concrete is a type of concrete prepared by mixing cement, silica-based material, pore-forming (foaming agent) additive and water. Foam concrete is a type of hollow concrete with a high honeycomb structure. Therefore, its insulation properties are quite good. In this study, the ability to produce foam concrete with diatomite, which is supplied from the Çankırı region with a density of 1,83 kg/dm<sup>3</sup>, water absorption of 188% and 84% silica, was investigated. In the study, 4 different designs and 5 different variables were used with diatomite sand smaller than 4 mm and the optimum W/C ratio, optimum silica sand amount, optimum diatomite amount and optimum foam amount ratios were determined separately. As a result of these designs, new foam concrete samples were produced with the ratio of W/C 0,75, cement 100%, water 75%, diatomite 36%, silica sand 16% and foam 10% and the properties of foam concrete were determined according to TS 13655. With these properties, unit volume masses, compressive strengths, water absorption rates, capillary water absorption capacities, ultrasound transmission velocities, thermal conductivity coefficients and flammability and heat permeability properties were investigated. The unit volume mass of the foam concrete samples produced with optimum material ratios was found to be 737,17 kg/m<sup>3</sup>, 7-day compressive strength was 3,29 MPa, while 28-day compressive strength was 3,64 MPa, water absorption rate was 60,7 %, capillary water absorption coefficient was 2,53 g / m<sup>2</sup>xs<sup>0,5</sup>, ultrasound transmission speed was 1,54 km/s, and thermal conductivity coefficient was 0,157 W/ m K.

Science Code : 91127

Key Words : Diatomite, foam concrete, silica sand, optimum amount

Page Number : 69

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Osman ŞİMŞEK

## TEŞEKKÜR

Çalışmanın danışmanlığını üstlenen, tez konusunun belirlenmesi, çalışmanın hazırlanması, yapılan deneysel çalışmalar esnasında tarafıma destek veren, laboratuvar ve malzemelerin temin olanağını sağlayan, tezin yazım aşamasında yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Doç. Dr. Osman ŞİMŞEK' e, Bölüm Başkanı Prof. Dr. Salih YAZICIOĞLU' na, İnş. Yük. Müh. Yusuf ÖZÇELİK'e, İnş. Yük. Müh. Murat BİNGÖL' e, teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte büyük fedakarlık gösteren başta eşim Gülhan ELİKÜÇÜK olmak üzere çocuklarım Ahmet Emir ELİKÜÇÜK ve Begüm ELİKÜÇÜK' e minnettarım.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Beton .....	5
2.2. Hafif Betonlar.....	5
2.2.1. Hafif betonun sınıflandırılması .....	7
2.2.2. Taşıyıcı özelliklerine göre hafif betonlar .....	7
2.2.3. Agregalarına göre hafif betonlar .....	10
2.2.4. Kimyasal katkı maddesiyle üretilen hafif betonlar .....	11
2.3. Diatomit.....	17
2.3.1. Türkiye’de diatomit rezervleri .....	17
2.3.2. Diatomitin fiziksel ve kimyasal özellikleri .....	18
2.3.3. Literatür taraması .....	20
3. MATERYAL VE METOT .....	27
3.1. Materyal .....	27
3.1.1. Diatomit ve silis kumu .....	27
3.1.2. Çimento ve su.....	30

	<b>Sayfa</b>
3.1.3. Köpük ajanı .....	30
3.2. Metot .....	31
3.2.1. Optimum karışım oranlarının belirlenmesi .....	32
3.2.2. Temin edilen malzemelerin hazırlanması .....	34
3.2.3. Köpüğün üretilmesi.....	34
3.2.4. Köpük betonun üretilmesi.....	35
3.2.5. Deneysel yöntemler ve uygulamalar.....	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
4.1.Diatomitin Tane Kullanımı .....	43
4.2. Köpük Beton Karışımlarında Optimum Oranların Belirlenmesi .....	43
4.2.1. Optimum S/Ç oranının belirlenmesi .....	43
4.2.2. Optimum silis kumu oranının belirlenmesi.....	46
4.2.3. Optimum diatomit oranının belirlenmesi.....	49
4.2.4. Optimum köpük oranının belirlenmesi .....	51
4.3. Optimum Karışım Oranlarıyla Hazırlanan Köpük Betonun Teknik Özellikleri ..	53
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR .....	63
ÖZGEÇMİŞ .....	68

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 2.1. Hafif betonun sınıflandırılması.....	7
Çizelge 2.2. Diatomitin fiziksel özellikleri.....	19
Çizelge 3.1. Diatomitlerin fiziksel özellikleri.....	28
Çizelge 3.2. Diatomitlerin kimyasal kompozisyonları .....	29
Çizelge 3.3. Karışımda kullanılan silis kumunun özellikleri.....	30
Çizelge 3.4. CEM I 42,5 R bileşenleri .....	30
Çizelge 3.5. Köpük ajanının özellikleri .....	31
Çizelge 3.6. Köpük beton optimum karışım oranları.....	33
Çizelge 3.7. KB harcının akış süresine göre sınıflandırılması.....	36
Çizelge 4.1. Optimum S/Ç oranının belirlenmesi ve köpük betonun özellikleri.....	44
Çizelge 4.2. Optimum silis kumu oranının belirlenmesi ve köpük betonun özellikleri.....	47
Çizelge 4.3. Optimum diatomit oranının belirlenmesi ve köpük betonun özellikleri .....	50
Çizelge 4.4. Optimum köpük oranının belirlenmesi ve köpük betonun özellikleri....	52
Çizelge 4.5. Çimento ağırlığının optimum % karışım oranları .....	53
Çizelge 4.6. Optimum numunelere ait özellikler .....	54
Çizelge 4.7. Kapiler su emmeye ait özellikler .....	57
Çizelge 4.8. 300x300x50 mm plakaların arka yüzeyindeki ortalama sıcaklık değişimleri.....	58

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Akhasan (Çankırı- Çerkeş) diatomit yatağının yer haritası .....	27
Şekil 3.2. Akhasan (Çankırı- Çerkeş) diatomit yatağının jeolojik haritası .....	28
Şekil 4.1. Diatomitin tane dağılımı.....	43
Şekil 4.2. Köpük betonun basınç dayanımı ve birim hacim kütlesi- S/Ç oranı ilişkisi ..	46
Şekil 4.3. Basınç dayanımı ve birim hacim kütlesi- silis kumu oranı ilişkisi.....	49
Şekil 4.4. Köpük betonun basınç dayanımı ve birim hacim kütlesi- diatomit oranı ilişkisi.....	51
Şekil 4.5. Köpük betonun basınç dayanımı ve birim hacim kütlesi- köpük oranı ilişkisi.....	53
Şekil 4.6. Ultrases geçiş hızı-su emme oranı-birim hacim kütle-boşluk oranı ilişkisi ...	56
Şekil 4.7. 7 ve 28 günlük basınç dayanımı-birim hacim kütle ilişkisi.....	56
Şekil 4.8. Kapilarite grafiği.....	57
Şekil 4.9. Isıl iletkenlik katsayısı- birim hacim kütle ilişkisi.....	58

**RESİMLERİN LİSTESİ**

<b>Resim</b>	<b>Sayfa</b>
Resim 2.1. Köpük görünümü ve köpük beton harcı .....	15
Resim 2.2. İşlenmemiş diatomit.....	19
Resim 3.1. Araştırmada kullanılan diatomit ve silis kumu.....	29
Resim 3.2. Diatomitin eleme işlemi.....	34
Resim 3.3. Üretilen köpük .....	34
Resim 3.4. Köpük beton üretimi .....	35
Resim 3.5. Deney presini ve numunelerin testi .....	37
Resim 3.6. Ultrases geçiş süresinin tespiti.....	38
Resim 3.7. Numunelerin su içinde bekletilmesi .....	40
Resim 3.8. Termal iletkenlik ölçüm cihazı ve 300x300x50 mm deney numunesi .....	41
Resim 3.9. Alev tabancası ve termometre .....	42
Resim 3.10. İncelemede kullanılan mikroskop ve boşluk yapısı.....	42
Resim 4.1. Köpük betonun gözenek yapısı (40x büyütmeyle) .....	59

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
%	Yüzde
°C	Derece selsiyus
Ac	Yükleme alanı
F	Kuvvet
g	Gram
kg	Kilogram
kg/m <sup>3</sup>	Kilogram/metreküp
l	Litre
m	Metre
m/s	Metre/saniye
Km/s	Kilometre/saniye
MPa	Megapaskal
M	Molar
N	Nevtın
s	Saniye
V	Hız
V <sub>b</sub>	Boşluk hacmi
W/m K	Watt/metre kelvin
d	Yoğunluk

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
ACI	Amerikan Beton Enstitüsü
B.H.K	Birim hacim kütle
EPS	Polistiren sert köpük
FESEM	Taramalı elektron mikroskobu
ISO	Uluslararası Standart Örgütü

**Kısaltmalar****KA****KB****PÇ****S/Ç****SEM****TS EN****XRD****Açıklamalar**

Köpük ajanı

Köpük beton

Portland çimentosu

Su/çimento oranı

Taramalı elektron mikroskobu

Türk Standartları Enstitüsü

X-ışını kırınım analizi



## 1. GİRİŞ

Küresel ısınma sorunu, enerji tasarrufu sağlayan ısıtma ve soğutma amacıyla kullanılan malzemelerinin gelişimini hızlandırmıştır. Çünkü hem konut hem de ticari olarak enerji tüketimi gün geçtikçe artmaktadır. Aynı zamanda mevcut enerji kaynaklarından en iyi şekilde yararlanmak için binalarda ısı yalıtımı ile birlikte malzemelerin üretimi, ısınma ve soğutma sistemleri olarak kabul edilmektedir. Isı iletim katsayıları, ısı yalıtım malzemelerini birbirinden ayıran en önemli özelliktir. Malzemelerin diğer özellikleri arasında yoğunluk, mekanik dayanım, yangına dayanım sınıfı, su emme ve boyutsal stabilite yer almaktadır.

Beton, inşaatta en yaygın olarak kullanılan yapı malzemesidir. Köpük beton, beton teknolojisindeki ilerlemeye paralel olarak ortaya çıkan birçok yeni türden birisidir. Köpük beton, çimento, kum, sudan oluşan ve bulamaç haline getirilen hafif hücreli betondur. Bulamaca köpük oluşturan köpük ajanı katılarak hafif ve homojen yapıda bir beton elde edilmektedir (Amran ve diğerleri, 2015; Jalal ve diğerleri, 2017).

Silis kumu, uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu, ponza kumu, diatomit, doğal kum ve diğerleri köpük beton üretiminde kullanılmaktadır. Bazı araştırmacılar, ince agreganın kısmen ya da tamamen geri dönüştürülmüş veya ikincil malzemelerle değiştirilebilmesinin sürdürülebilirlik açısından çok önemli olduğunu düşünmektedirler (Papadopoulos, 2005; Özçelik ve Şimşek, 2024; Şimşek, Ünal ve Gökçe, 2024).

Diatomit kumu, hafif ve köpük beton için ideal bir doğal puzolan olarak düşünülmüştür. Diatomit, Türkiye'de bol miktarda bulunan ve büyük potansiyele sahip doğal ham minerallerden biri olarak yeterince değerlendirilememiştir. Volkanik aktivitenin çok yüksek olduğu bölgelerde tatlı ya da tuzlu sularda yaşayan tek hücreli alglerin yanı sıra kil, kum, volkanik kül veya diğer organik kalıntılardan oluşan  $SiO_2.nH_2O$  içeren bir tortul kayaç türüdür. Diatomit, sadece mikroskop ile görülebilecek kadar küçük olan, tek hücreli organizmaların fosilleşmesi sonucu oluşmaktadır (Ünal ve Uygunoğlu, 2007).

Genellikle diatomit gözenekli yapıya sahiptir. Taneler arasında kalan boşluklar mevcuttur. Boşluk değeri %95'e kadar çıkabilir. Kullanılabilir alana bağlı olarak kendi ağırlığının üç katı kadar su emme kapasitesine sahiptirler (Eliküçük ve Şimşek, 2024, baskıda).

Gerçekte diatomitin hafifliği, kimyasallara karşı dayanıklılığı, ısıya, sese ve elektriğe dayanma kapasitesi ve yüksek emicilik özellikleri önemli özelliklerinden başlıcalarıdır. %85-90'a varan gözenekliliği en dikkat çekici özelliklerinden birisidir. Bu özelliğinin bir sonucu olarak ısı iletkenliği 100 ile 300 °C arasında 0,08 Kcal/m<sup>2</sup>.°C.h, 800 °C ve üzerinde ise 0,11 Kcal/m<sup>2</sup>.°C.h'dir. Ayrıca diatomit çok çeşitli kimyasallara karşı dayanıklıdır ve yalnızca yüksek sıcaklıklardan ve asitler ile güçlü bazlardan etkilenir (Clarke, 1993).

Diatomit agregası kullanıldığı yapı malzemesine bağlı olarak betonun yalıtımı, hafifliği, mukavemeti ve terlemesini önleme yeteneğine sahiptir. Diatomit doğal olarak düşük maliyetli bir malzeme olmakla birlikte kolayca kullanılabilir. Hafif amaçlı inşaatlar için refakate tuğla yapımında diatomit kullanılır. Bu tuğlalar ısı yalıtımı ve yangına dayanıklı oldukları için bu binalarda tercih edilmektedir. %20-25 plastik kil konsantrasyonuna sahip diatomitler, asidik ortamlarda, düşük gaz geçirgenliğine ve termal şoklara dayanabilen tuğlalar yapmak için idealdir. Duvar bloku yapımında diatomitin hafif agrega olarak kullanılması, yük taşımayan ancak ısı yalıtımı yüksek olan yalıtım uygulamalarında önemli avantajlar sağlamaktadır. Romanya'da diatomit, cam ve seramik endüstrisinin silika kaynağı olarak kullanılmaktadır. Diatomitin başka bir kullanım alanı, çimento sektöründe homojenlik sağlamak ve beton karışım suyunun dengelenmesidir. Bu, diatomit tanelerinin fazla suyu tutmalarını sağlamaktadır. Köpük beton, köpük oluşturucu maddeler olarak bilinen kimyasalların yardımıyla %75'e kadar hava kabarcığı içeren harçtan oluşan hafif betonları tanımlamak için kullanılan bir terimdir. Kuru yoğunlukları tipik olarak 400 ile 1600 kg/m<sup>3</sup> arasında değişir ve yoğunluğa bağlı olarak basınç dayanımı tipik olarak 1 ile 15 MPa arasında değişir (Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü [MTA], 2023).

Köpük betonun özelliklerini geliştirmek için köpük beton üretim sürecinde çeşitli çimento malzemelerinin (silis kumu, uçucu kül, silis dumanı, alçı, inşaat yıkıntı atık kumu, mikro mermer tozu vb.) eklenmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Bu çalışmaların amacı, köpük betonun mühendislik özelliklerini geliştirmek ve çeşitli kür metotları, kimyasal katkı maddeleri ve çeşitli boyut ve çaplardaki lifler ekleyerek kullanım alanlarını genişletmektir. Köpük betonun ana bileşeni olan ve gözeneklerin birbirinden bağlantısız yapılar oluşturmasını sağlayan kimyasal köpük katkı maddesi hayati önem taşımaktadır. Köpük beton, inşaat sektöründe birçok farklı alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Mükemmel teknolojik özellikleri, hafifliği ve teknik özellikleri nedeniyle yapı için kritik bir malzemedir

(TS 13655, 2015; Kılınçarslan ve Tuzlak, 2018; Kocakerimoğlu, 2020; Şimşek ve diğerleri, 2024; Eliküçük ve Şimşek, 2024, baskıda; Kahraman, 2024).

Diatomitin hafifliği ve yalıtım özellikleri, inşaat sektöründe ısı ve ses yalıtım malzemelerinin kullanımına ilişkin devam eden araştırmalarda dikkat çekmektedir. Bu çalışmalardan biri olarak köpük betonun ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılmasının fizibilitesi araŐtırılmaktadır. Yapılan literatür araŐtırmalarında diatomit ile ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen diatomitin köpük beton üretiminde kullanıldığına dair herhangi bir veriye ulaŐılamamıŐtır.

Genel olarak köpük beton tasarımında amaç en düşük birim hacim kütle yi hedeflemek olsa da, bu çalışmada köpük beton üretiminde diatomitin kullanılabilirliğinin araştırılması ve araştırma sonrası üretilen köpük betonun teknik özelliklerini belirlenmesi amaçlanmıştır.



## 2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

### 2.1. Beton

Beton; Su, katkı maddeleri, agrega ve çimentonun belirli miktarlarda homojen bir şekilde birleştirilmesiyle elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir. İlk başta esnek bir kıvamına sahip olan beton yavaş yavaş sertleşir ve uygun şekle katılaşır (Şimşek, 2020).

Günümüzde inşaat sektöründe en sık kullanılan yapı malzemelerinden biri betondur. Betonun kolaylıkla istenilen şekle girebilmesi, istenilen mukavemeti ve dayanıklılığı verebilmesi hem ekonomik hem de uzun ömürlü olması betonun en önemli ve sık kullanılan özelliklerindedir. Bu nitelikler, betonun henüz tazeyken kolayca taşınmasını, döşenmesini, sıkıştırılmasını ve bu işlemler sonucunda bozulmamasını sağlar. Ayrıca sertleşme sırasında gerekli özen gösterilmeli ve hava şartlarından korunma sağlanmalıdır (Şimşek, 2020).

Beton, çimento ve suyun agrega tanelerini çevreleyen, aralarındaki boşlukları dolduran ve taneciklerin birbirine yapışmasını sağlayan kimyasal bir işlemde geçmesiyle oluşur (Şimşek, 2020).

Ayrıca beton yapım süreci boyunca belirli nitelikleri geliştirmek için puzolanik veya kimyasal katkılardan yararlanır. Çimento ağırlığının bir yüzdesi olarak bu katkı maddeleri diğer eşdeğer beton bileşenleriyle birlikte karıştırılır (Şimşek, 2020).

Agreganın betonun %75-80'ini oluşturduğu iyi bilinmektedir. Taşıyıcı olarak beton kullanılacaksa agreganın su emiciliğinin düşük olması, suda yumuşamaması ve betonun bileşimini olumsuz etkileyecek kimyasallardan arındırılmış olması gerekir. Betonun izolasyon olarak kullanılabilmesi için bağımsız boşluklara sahip ve yoğunluğu  $2 \text{ kg/dm}^3$ 'ten az olan bir yoğunluk değerine sahip olması gerekir. Beton, bazı araştırmalarda kullanılan agregaya (pomza, perlit vb.) göre, bazı çalışmalarda ise betonun hacim birimi cinsinden ağırlığına göre hafif beton olarak anılmaktadır (Özçelik, 2022).

### 2.2. Hafif Betonlar

"Hafif beton" genel olarak etüv kurusu yoğunluğu  $0,8$  ile  $2,0 \text{ kg/dm}^3$  olan betonlar olarak tanımlanır. Düşük birim ağırlıklı hafif agrega, hafif agregalı beton ve çimento üretmek için

kullanılır. Agregası karışımına daha fazla hafif agregası ilave edilerek daha düşük birim ağırlıklı beton elde edilebilir (Postacıoğlu, 1987; Sancak, Sarı ve Şimşek, 2008).

Hafif beton, volkanik patlamalardan elde edilen tuf ve pomza gibi doğal malzemelerle birleştirildiğinde uygun maliyetli beton elde edilebilir (Chandra ve Berntsson, 2003).

Son yıllarda betonarme endüstrisinde muazzam bir genişleme görüldü ve gelişmiş ülkelerin çoğunda doğal hafif agregası rezervleri bulunmadığından yapay hafif agregası üretimine yönelik araştırmalar başladı. Son kırk yıldır yüksek fırın cürufu, hafif agregaları üzerine yapılan araŐtırmaların konusu olmuştur; Genleştirilmiş yüksek fırın cürufunda kayda değer ilerlemeler 1980'lerin baŐında yapıldı. Amerikan araŐtırmaları kil ve Őistlerin yakılmasının bunların genleŐmesine neden olduğunu göstermiştir. 1919 yılında Amerika BirleŐik Devletleri ilk hafif agregalı beton partisini üretti. 20. yüzyılın ortalarından itibaren yüksek fırın cürufu gibi yan sanayi ürünlerinden elde edilen sentetik hafif agregaları kullanılarak İngiltere'de üretilen hafif beton kullanılmaya başlanmıştır. İngiltere'nin Brentford kentindeki üç katlı bir ofis binası, İngiltere'de hafif betonun kullanıldığı ilk yapıydı. 1960'lar ve onu takip eden yıllarda hafif beton kullanılarak birkaç yapı daha inşa edildi. Hafif beton ilk kez 1970'lerde Avustralya'da, 1960'larda ise Japonya'da kullanıldı (Clarke, 1993; Neville, 2000).

Hafif beton yapımında bentonit, lav cürufu, pomza taşı ve tuf gibi doğal hafif agregaları kullanılır. Diatomit gibi tortul kayalar veya gözenekli volkanik doğal kayalar da bulunabilir. Yapay hafif agregaları, perlit, kuvarsit, vermikülit, obsidyen, kil ve Şist gibi doğal taŐların termal genleŐmesinin yanı sıra uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel yan ürünler kullanılarak üretilebilir. Bunların yanı sıra çeşitli tarımsal atıklar, odun atıklarından elde edilen talaş ve lifler, EPS köpükler, plastik çöpler, hafif tuğla parçaları ve diğer atık malzemeler de hafif beton agregası olarak değerlendirilebilmektedir (Postacıoğlu,1987; Alduaij, Alshaleh, Haque, ve Ellaithy,1999; Bouguerra ve diğerleri, 1998; Megri, Achard, ve Haghghat, 1998; K.Babu ve D.Babu, 2003; Miled ve diğerleri, 2004; Haque, Al-Khaiat ve Kayalı, 2004).

### 2.2.1. Hafif betonun sınıflandırılması

Hafif betonlar, yoğunluğuna, ısı iletim katsayısına ve basınç dayanımına bağlı olarak taşıyıcı hafif betonlar, yarı taşıyıcı hafif betonları ve yalıtım hafif betonları olmak üzere Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi üç gruba ayrılır (Lamond ve Pielert, 2006).

Çizelge 2.1. Hafif betonun sınıflandırılması (Lamond ve Pielert, 2006)

Hafif beton sınıfı	Basınç dayanımı (MPa)		Beton yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )		Isı iletim katsayısı (W/m K)	
	A	B	A	B	A	B
Taşıyıcı (ACI 213R)	> 17,0	> 15,0	1120-1920	1600-2000	-	-
Taşıyıcı/yalıtım	3,4-17	> 3,5	800-1440	< 1600	0,22-0,43	<0,75
Yalıtım	0,7-3,4	>0,5	240-800	<<1450	0,065-0,22	< 0,30
A: Holm ve Ries’e göre		B: RILEM/CEB’e göre		*ACI 213R’de belirtilen dengeli yoğunluk (kg/m <sup>3</sup> )		

Hafif beton, LC8/9 ila LC80/88 basınç dayanımı sınıfına girer; En düşük tipik silindir basınç dayanımı değerleri 8 ile 80 MPa arasında değişir. Hafif betonlar yoğunluklarına, ısı iletim katsayılarına ve yük taşıma yeteneklerine göre sınıflandırılabilir. Yoğunluğu 300 ile 2000 kg/m<sup>3</sup>, mukavemeti 1 ile 60 MPa ve ısı iletim katsayısı 0,2 ile 1,0 W/m K’dir (Clarke, 1993; Neville, 2000).

### 2.2.2. Taşıyıcı özelliklerine göre hafif betonlar

Hafif betonlar, yük taşıma yeteneklerine göre üç tipe ayrılır. Bu hafif betonlar taşıyıcı, yarı taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan (yalıtım) olarak adlandırılır (Şimşek, 2020).

#### Taşıyıcı hafif betonlar

Hafif beton yapma sürecinde genellikle cüruf, şist ve genişletilmiş kil gibi yüksek mukavemetli malzemeler kullanılır. Yapısal hafif betonlar 1,35 ile 1,90 kg/dm<sup>3</sup> arasında değişen yoğunluğa sahip olmalıdır. 28 günlük basınç dayanımları ise 17 MPa olmalıdır. Yük taşıyan hafif betonun yapımında kullanılan agregalar, 35 ile 42 MPa arasında değişen basınç dayanımlarını sağlayabilmektedir. Hafif beton kullanıldığında taşıyıcı yapı elemanının kendi ağırlığının, kesit alanının ve donatı ihtiyacının azalacağı düşünülmektedir. Yapı elemanının

öz ağırlığının azalması nedeniyle depreme karşı daha fazla dayanımlı olacak, can ve mal kaybı azalacaktır. Bu betonlar ısıl açıdan orta dayanımlı ve düşük yoğunluklu beton kadar iyi performans göstermese de normal betondan daha iyi performans gösterebilirler (ACI 213R-14, 2014; Şener, 1999).

ACI 213R-03 (2003)'te yoğunluğu 1120 ile 1920 kg/m<sup>3</sup> arasında ve 28 günlük basınç dayanımı 17 MPa'nın üzerinde olan hafif betonlar taşıyıcı olarak sınıflandırılmaktadır.

Volkanik kaynaklardan elde edilen agregalar, ısıl işlem görmüş şist, kil, arduvaz, genişletilmiş cüruf ve uçucu külün peletlenmesiyle yapılan agregalar genellikle yük taşıyan hafif betonlarda kullanılır (Lamond ve Pielert, 2006).

Hafif beton kullanılarak yapılan çok sayıda deneyde, istenen temel özellik olarak hafiflikten ziyade mukavemet, dayanıklılık ve ısı yalıtımı gibi özelliklerin elde edilmesi ön planda tutulmuştur (Kok ve Min-Hong, 2002; Haque, Al-Khaiat ve Kayalı, 2004; Sarı ve Paşamehmetoğlu, 2005).

İnşaat sektöründe en yaygın kullanılan taşıyıcı malzeme genellikle normal betondur. Bu betonlar yüksek basınç dayanımlarına rağmen yüksek birim ağırlığa sahiptirler. Dolayısıyla öz ağırlıkları son derece yüksek değerlere ulaşır. Normal ağırlıktaki betonun birim ağırlığının azaltılmasıyla yapı veya yapı elemanının ağırlığının azaltılmasıyla ekonomi ve güvenlik açısından fayda sağlanması mümkün olmaktadır. Genel olarak kuru birim hacim ağırlığı 2,00 kg/dm<sup>3</sup>'ün altında olan betonlar hafif beton olarak sınıflandırılır (Ören, 2017).

#### Yarı taşıyıcı hafif betonlar

Hafif beton, yarı taşıyıcı olarak kullanılabilen hafif beton oluşturmak için gerektiği kadar doğal kumun yanı sıra pomza, talaş, tuf veya cüruf gibi hafif agregaların eklenmesiyle yapılır (Şener, 1999).

Yarı taşıyıcı betonlar olarak da bilinen bu betonların yoğunlukları 0,850 ile 1,400 kg/dm<sup>3</sup> arasında, basınç dayanımları ise 7 ile 17 MPa arasında değişmektedir. Yarı taşıyıcı olan bu tip betonun termal olarak normal betona göre çok daha iyi performans gösterdiği iyi bilinmektedir. Endüstriyel uygulamalarda dolgu betonuna ihtiyaç duyulduğunda, yalıtım özelliklerine sahip hafif, yarı taşıyıcı betonlar genellikle seçilmektedir. Bu tür betonun

yoğunluğu ve basınç dayanımı, yalıtım betonu ile taşıyıcı betonunki arasında olmalıdır. Bunları yapmak için büyük oranda hava boşluğuna sahip hafif agregalar kullanılabilir. Bu betonların termal özellikleri, yalıtım betonu ve taşıyıcı hafif betonunkiler arasındadır ve basınç dayanımları 3,4 ile 17,0 MPa arasında değişir (Lamond ve Pielert, 2006).

Bu hafif betonların kuma ihtiyaç duymadan, yalnızca iri agrega, hafif agrega, kimyasal köpükler ve gaz üreten kimyasal işlemler kullanılarak yapıldığı bilinmektedir. Yapının taşıyıcı veya taşıyıcı olmayan kısımlarındaki ölü yükün azaltılması hafif beton üretiminin temel amacıdır. Isı ve ses yalıtımını sağlamak için hafif beton kullanılması ve ikinci bir yalıtım malzemesine ihtiyaç duyulmaması aynı zamanda masrafları da azaltır (Gündüz ve Uğur, 2005).

Hafif beton üretmek için hafif agregaların kullanılması en yaygın kullanılan tekniktir. Söz konusu betonlar, genişletilmiş kil, pomza, uçucu kül, pirinç kabuğu ve talaş gibi çeşitli hafif agregalar kullanılarak yapılıyor. Bu betonların bir kısmı taşıyıcı olarak kullanılsa da asıl amacı izolasyondur (Topçu, 1997; Şimşek, 2020).

### Yalıtım hafif betonu

Yalıtım hafif betonu, mükemmel termal dirence sahip, düşük yoğunluklu, düşük mukavemetli, yük taşımayan bir malzemedir. Bu betonlar perlit ve vermikülit gibi düşük yoğunluklu ve düşük mukavemetli agregalardan yapılır. Yalıtıcı hafif betonun yoğunluğu  $800 \text{ kg/m}^3$ 'ten azdır ve basınç dayanımı 0,70 ile 3,40 MPa arasında değişir. Köpük, gaz veya hücreli hafif beton, yük taşımanın beklenmediği ve tek amacın ısı, ses ve düşük yoğunluk olduğu durumlarda kimyasal maddeler, alüminyum tozu vb. kimyasalların kullanımıyla yapılır. İnce ve silisli agrega ve inorganik bir bağlayıcı (kireç veya çimento) içeren bir kombinasyona gözenek oluşturu bir madde eklenerek hafifletilir ve gaz beton oluşturulur. Bu betonlar düşük ısı iletkenlik katsayılarından dolayı tipik olarak dolgu veya ısı yalıtımı için kullanılır. Ağırlığı desteklemesi amaçlanmayan betonların yoğunluğu genellikle  $0,80 \text{ kg/dm}^3$ 'tür. Basınç dayanımı değerleri 0,70 ile 7,0 MPa arasında değişebilir (ACI Committee 213R-14, 2014).

Hafif betonu, kullanılan agrega cinsine ve karışıma eklenen kimyasallara göre iki üretim grubuna ayırabiliriz.

### 2.2.3. Agregalarına göre hafif betonlar

Hafif betonun isimleri genellikle kullanılan (imal edilen) agregalardan türetilir. Bu hafif agrega (pomza, diatomit, perlit, volkan tüfü gibi) bakımından Türkiye inanılmaz derecede büyük ve zengin kaynaklara sahiptir. Bu doğal agrega kaynaklarını değerlendirmek için çok sayıda araştırma projesi yürütülmektedir. Ses ve ısı yalıtımında yarı taşıyıcı hafif betonun yanı sıra doğal agregayla üretilen hafif beton da kullanılıyor. Pomza, doğal olarak oluşan en yaygın olarak bulunan hafif agregadır. Volkanik aktivite, asidik ve bazik bileşime ve volkanik cam yapıya sahip bir tür volkanik kayaç olan pomza üretir. Asidik pomza dünya çapında en sık kullanılan türdür; kirli beyaz bir tonu var. Asidik içerikli pomzanın yoğunluğu 0,5 ile 1,0 g/cm<sup>3</sup> arasında olup, bazik pomzaya göre daha düşüktür. Bazik pomzanın rengi daha koyu olup yoğunluğu 1,0 ile 2,0 g/cm<sup>3</sup> arasında değişmektedir. Asidik ve bazik pomzanın oluşumu sırasında hızlı soğuması ve bünyesinden hızlı gaz çıkışı, son derece gözenekli bir yapıya neden olur. Pomzadaki boşlukların birbirinden kopuk olması en dikkat çeken özelliklerindedir (Ceylan, 2005).

Orta ve Doğu Anadolu'da özellikle pomza taşı rezervlerinin oldukça büyük olduğu bilinmektedir (Sancak ve Şimşek, 2008; Mouli ve Khelafi, 2008).

Volkanik cürufur: Volkanik patlamalar nedeniyle etrafa yayılan magma parçacıklarından oluşur. Ani bir basınç düşüşü, sıvı magma içinde çözülmüş halde bulunan gazları açığa çıkarır. Gaz çıkışı boşlukları oluşturur. Malzeme gözenekler içerir. Magmanın ani soğuması malzemede camsı bir yapı oluşturur (Genç, 2006).

Diatomit: İlk olarak organik bir maddedir. Çünkü tek hücreli ve küçük bir canlıdır. Volkanik alanların yakınında yaşayan göllerde ve deniz sularında yaşarlar. Silis içerikli kabuklarının bir araya gelmesiyle, bir çeşit deniz yosunu olan diatomelerin ölmesi ile oluşur. Sarımsı gri bir tondadır (Genç, 2006).

Perlitli ısı izolasyon betonu, yalnızca çimento, alçı veya suni reçine bağlayıcılı, agrega olarak yalnızca genişletilmiş perlit ile tabii agrega karışımı içeren, ısı yalıtım tabakaları oluşturmak için kullanılan bir beton türüdür. Taşıyıcı yapı parçalarının yapılmasına izin verecek kadar taşıyıcılık niteliği olmayan betondur. Genleştirilmiş perlit, tuf, uçucu kül ve sünger (ponza veya bims taşı) taşından oluşan betonlar, yüksek fırın cürufu gibi agregalar

kullanılarak ısı ve ses yalıtımı için sıklıkla kullanılır. Taşıyıcı beton olarak kullanıldığı gibi, vermikulit, geliştirilmiş kil ve şist gibi agregalardan yapılan betonlar yaygın olarak ısı ve ses yalıtım amacıyla kullanılır. İnşaat sektörü, geliştirilmiş perlit betonun ısı yalıtım sıvası veya şapında kullanılmasının avantajlarından yararlanılmaktadır. Geliştirilmiş perlitli betonun yoğunluğundan dolayı hem ev hem de işyeri döşemelerinde tercih edildiği açıktır. Geliştirilmiş perlit agregasının yüksek ısı yalıtım özellikleri nedeniyle gerekenden fazla talep görmektedir. Bu özelliği nedeniyle perlitli şap beton ısı yalıtımı açısından daha iyidir. Benzer betonun şaplardan on kat daha hafif olması, binalara daha fazla yük yüklediğini göstermektedir. Bu durum, binaların depreme karşı daha dayanıklı hale gelmesine de yardımcı olur. Isı yalıtımı nedeniyle katlar arasında ısı transferi olmadığından enerjiyi de tasarruf eder. Sadece ısı değil, aynı zamanda ses izolasyonu üzerinde de etkisi vardır. Odun talaşı ve ahşap yonga kullanılarak yapılan çimento bağlayıcılı levhalar, ısı ve ses yalıtımı için yaygın olarak betopan, heraklir, Velox board, duripanel vb. olarak bilinir. Bu agregalar, organik kökenli oldukları için betonda direkt olarak kullanılabilir. Organik kökenli agregalar, selüloz, çözülebilir şeker, asit, yağ, reçine ve diğer çok sayıda organik bileşim içerdikleri için çimentonun sertleşmesi ve dökümü üzerinde kalıcı ve zararlı bir etkiye sahiptir (Şimşek, 2020; Kalaycıoğlu ve Özen, 2009).

Yonga, uzun şeritler halindeki odun yünü, yıllık bitki atıkları ve portland çimentosu bağlayıcı maddesi olarak ve çimento/beton kompozitlerin yapımında kullanılır (Kalaycıoğlu ve Özen, 2009).

#### **2.2.4. Kimyasal katkı maddesiyle üretilen hafif betonlar**

Hafif (yalıtım) beton üretmek için bir dizi farklı kimyasal kullanılır. Bu maddelerin bir kısmı katı, diğerleri ise sıvı olarak nitelendirilir. Ajan ismi, sıvı olan bu katkı maddelerini ifade eder. İster katı ister sıvı olsun, kimyasal katkı maddeleri beton içinde küçük hava habbecikleri oluşturur ve gözenekli süngerimsi bir yapı oluşturur.

- a. Hava sürükleyici kimyasal katkı maddesi ile yapılan beton: Birim hacim ağırlığının 2000 kg/m<sup>3</sup>'ün altında olması gerekir. Hava sürüklenmemiş betonda hava muhtevası tipik olarak %5,0 ile 3,0 'tür. Hava sürükleyici katkı kullanıldığı takdirde bu oran % 4,0;8,0'e yükselir. Bu teknik köpürtme yöntemi olarak da bilinir.

- b. Alüminyum tozu katkı maddesi kullanılarak yapılan beton: Taze betona çimento ve alüminyum tozu ekleyerek boşluklar oluşturur.
- c. Taze betona hidrojen peroksit ile beyazlatma tozu eklenerek yapılan beton: Boşluklar oluşturulur. Köpük oluşturucu ajanlar da beton üretiminde kullanılır. Farklı köpük ajanları kullanılarak elde edilen betonların mikro yapısal özelliklerini belirlemek için yapılan çalışmalar devam etmektedir. Köpük betonlarda, köpüğün stabilizesi, boşluk oranı ve su-çimento oranı tipik olarak malzemenin boşluklarına bağlı parametrelerini belirler. Hava boşluğu boyutu daraldıkça daha yüksek basınç dayanımı elde edilir ve hava boşluğu boyutu genişledikçe daha düşük basınç dayanımı elde edilir. Köpük betonun özellikleri ve kullanımı, boşluk mikro yapısı ve boşluk parametreleri ile birlikte betonun bileşimi tarafından doğrudan etkilenir.

Sanayi ülkelerinin çoğunda, normal betonların zararlı yönlerini ortadan kaldırmak için hafif betonlar kullanılmaktadır.

#### Köpük betonun tanımı

Köpük ajanı eklendikten sonra homojen bir yapıya sahip, bünyesinde % 75-80 oranında birbirinden müstakil kapalı hava boşlukları olan hafif beton türüdür. Bu tür beton dolgu harcı olarak kullanılabilir. Köpük beton, çimento, ince kum, uçucu kül ve diğer malzemelere su ekledikten sonra mikserde karıştırılır ve akıcı bir kıvam elde edilir. Taze beton harcına köpük ilave edildiğinde, bünyede gözenek oluşur. Köpük beton olarak bilinir. Köpük betonu köpürtülmüş bir harçtan oluşur. Köpük beton, ağır agregalardan oluşmaz. Bu nedenle yapısı homojendir. Köpük beton ACI 523.2R-96 (1996)'ya göre, hücresel veya gaz beton olarak bilinen hafif bir yapı malzemesinden meydana gelir. Köpük beton, yukarıda belirtilen özelliklerle birlikte, uygun köpük ajanı kullanılarak ve hava boşlukları harcın içerisinde homojen olarak dağıtılmak üzere tutulabildiği hafif bir beton türüdür. Akışkanlığı yüksek, yoğunluğu düşük, agrega tüketimi minimum, düşük dayanım ve yüksek ısı yalıtımı sağlar. Köpük beton, uygun dozlarda ve yoğunluğunun 400 ile 1600 kg/m<sup>3</sup> arasında olması nedeniyle yapılabilir. Köpük betonun patenti ilk olarak 1923 yılında alınmasına rağmen, köpük betonun karışım oranı, kullanılan köpük ajanının özellikleri ve miktarı, köpük üretim yöntemi, hava boşluğu durumu, homojenlik durumu ve diğer birçok faktöre bağlıdır. Bu nedenle, belirli bir karışım hazırlama yöntemi yoktur (Yarar, 2021).

Köpük betonların tipik birim hacim ağırlığı 300 ile 1800 kg/m<sup>3</sup> arasındadır. Köpük betonların yapısında çok sayıda boşluk bulunur. Bu nedenle, elastisite modülleri ve diğer mekanik özellikleri düşüktür. Bu nedenle yapıda taşıyıcı olarak kullanılması uygun değildir. Köpük beton, ses yalıtımı, yangın önleme ve yararsız boşlukları doldurmak için ısı yalıtımı ve dolgu malzemesi olarak idealdir (Şimşek ve Ünal, 2024).

Bu özellikleri nedeniyle daha çok detay gerektiren malzemelerdir. Köpük beton, ısı yalıtımı açısından daha ekonomik ve üstün bir yapı malzemesidir. Günümüzde inşaat endüstrisi, ısı yalıtım performansını dikkate alırken, enerji performansı yüksek binalar için yeterli dayanım ve dayanıklılık özelliklerini sağlayan yapı elemanlarını geliştirmeye çalışmaktadır. Köpük betondan yapılmış yapı elemanları, yapısal işlevselliği ve yalıtım özelliklerini birleştirir. Köpük beton, malzemenin birim ağırlık ve kompozisyonuna bağlı olarak normal yoğunluktaki betonlardan %10 ile 50 daha düşük ısıl iletkenlik katsayısına sahiptir. Köpük beton, çimento, agrega ve su karışımına köpük ajanının ilave edilmesiyle oluşturulan alternatif bir yapı ve yalıtım malzemesidir. Hacminin %75-80'i oranında bağımsız kapalı gözenekler içerir. Taze halde düşük viskoziteye, sertleşmiş halde düşük yoğunluğa ve düşük ısıl iletkenliğe sahip olan köpük betonlar genellikle 300 ile 1600 kg/m<sup>3</sup> kuru yoğunluğa sahiptir. 28 gün boyunca, köpük betonun basınç mukavemeti 0,2 ile 10,0 MPa'dır. Çalışmalar normal betonla ilgili olmasının yanı sıra köpük betonlarla da ilgilidir. Köpük ajanının özellikleri, köpük oluşturma yöntemi, katkı türü ve karışım oranı, kararlı bir köpük beton tasarımını etkiler. Köpük beton, plastik harca mekanik olarak sürüklenen çimentolu bir malzemedir ve en az yüzde yirmi boşluktan oluşur. Köpük beton, fiziksel, mekanik ve termal özellikleri nedeniyle kullanım yerine tercih edilen bir yapı malzemesidir. Kendiliğinden yayılan ve sıkıştırma gerektirmeyen hafif beton türüdür (Şimşek ve diğerleri,2024).

#### Köpük beton üretiminde kullanılan malzemeler

Köpük betonun temel bileşenleri kum, çimento, su ve köpük ajanı olsa da, bazı özelliklerini geliştirmek için uçucu kül, silis dumanı, tuğla unu, perlit, priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcı gibi ek bileşenler kullanılabilir (Işıldar, 2023; Özçelik ve Şimşek, 2024).

Köpük betonla ilgili tarihsel olarak çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu çalışma köpük betonun özelliklerini geliştirmeyi amaçlamaktadır (Kılıçer, 2018).

Portland çimentosu (CEM I), köpük beton yapımında yaygın olarak önerilmekte ve tercih edilmektedir çünkü bağlayıcı olarak prizini (sertleşmesini) hızlı almaktadır. Bir köpük beton üretmek için uygun malzeme, kum boyutu en yüksek 5 mm ve % 60 ile 95'i 600 mikron ile 2 mm arasında olması gerekir. Karşımda kullanılan su içilebilir olmalıdır. Köpük betonun su tüketimi, harç tasarımı karışımın işlenebilirliğini belirler (Işıldar, 2023).

Köpük ajanı, betonun ana bileşeni ve temel özelliklerini sağlamaktadır. Köpük ajanı üzerinde kapsamlı bir şekilde durulacaktır. Köpük beton üretmek için kullanılan köpük ajanları iki çeşittir: sentetik ve protein esaslı olanlar. Sentetik köpükler ise naftalin sülfonat formaldehitten ve amin ve aminoksitlerden oluşur. Sentetik köpük ajanları, köpük kabarcıklarının daha fazla genişmesini ve sıvı üzerindeki yüzey gerilmelerini önleyerek daha düşük birim hacim ağırlığına sahip beton üretmeyi sağlar. Daha yüksek yoğunluklara sahip köpük beton üretmek için sentetik köpük ajanları tercih edilmektedir. Köpük ajanı ile su karıştırılarak elde edilen kimyasalın hava yardımıyla elde edilmesi sürecinde harcanan enerji köpüğün özelliklerini etkiler. Çalışmalarda en sık kullanılan köpük ajanları protein ve sentetik temelli ürünlerdir; bunlar deterjanlar, alüminyum tozu, tutkal reçineleri, hidrojen peroksit ve hatta saponinlerdir (Işıldar, 2023).

Sentetik köpüklerin bir kısmı, çevre için tehlikeli olarak sınıflandırılan maddeler içerebilir. Sonuç olarak, bu ürünlerin (özellikle formaldehit kondensatlarına dayanan ürünlerin) kullanımında çok dikkatli olmamız gerekir. Sentetik ajanlar bir yıla kadar saklanabilir. KB üretmek için köpük oluşturmak çok önemlidir. Köpük, daha küçük hava habbecikleri ile yapılırsa betonda daha verimli olur. Yüzey aktif maddeler, hidrofobik ve hidrofilik gruplar içeren, iki veya bir sıvı ile bir katı arasındaki yüzey gerilimini azaltan moleküllerden oluşur. Yüzey aktif maddeler iki kategoriye ayrılır: doğal ve sentetik olanlar (Işıldar, 2023).

Köpük betonun özelliklerini geliştirmek için kullanılan destekleyici malzemeler arasında uçucu kül ve öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve diğerleri köpük beton yapımında sıklıkla kullanılır. Yapılan araştırmalar, köpük beton üretmek için %30 ile %70 uçucu kül kullanmanın daha uygun olduğunu göstermektedir. Tras karışımında kullanılırsa, çimento miktarı azaltılabilir ve bu da daha ucuz beton üretilebilir. Köpük betonu daha dayanıklı hale getirmek ve boşluk çapını azaltmak için tane boyutu oldukça küçük olan silis dumanı yüzde on ilave edilebilir (Kılıçer, 2018; Işıldar, 2023).

Köpük beton yapımında en büyük sorun, köpüğün karışımdaki stabilitesini koruyamamasıdır. Köpük beton hızlı priz almazsa, çökme veya köpükte göçme meydana gelir ve yani şeklini koruyamaz. Bunun nedenleri arasında kimyasal ajanın cinsi, karışımın malzeme özellikleri, karıştırma için kullanılan aletler, karıştırma süresi ve hava sıcaklığı yer alır. Köpük betonunda kullanılan doğal ve sentetik lifler, betonun mekaniksel özelliklerini geliştirir. Liflerin hem boyutu hem de miktarı farklılık gösterir. Köpük betona normalden daha farklı özellikler kazandırmak, belirli katkı maddelerinin kullanılmasını gerektirmektedir. Bu sebeple tipik olarak suyu azaltan, geciktiren, itici ile hızlandırıcılar kullanılır. Bununla birlikte, katılacak katkı maddesinin karışımdaki bileşenlerle uyumlu olup olmadığının test edilmesi gerekir (Işıldar, 2023).



Resim 2.1. Köpük görünümü ve köpük beton harcı (Özçelik, 2022)

### Köpük betonun yeri ve önemi

Hafif beton üretmek için betonun yoğunluğunun azaltılması gerekmektedir. Betonun yoğunluğunu azaltmak için malzemelerin bir kısmının yerine hava boşlukları oluşturmak gerekir. Hücresel köpük beton, hava kabarcıkları ve hücresel boşlukları nedeniyle ısı ve sesi izole eden hafif ve akışkan yapısı nedeniyle talep görmektedir. Hafif beton veya hafif şap sistemi, jeneratörlü köpük beton makineleri kullanılarak hazırlanan hazır beton santrallerinde yüzsek doz beton şerbeti ve su formülü kullanılarak köpük beton ajanı şerbeti köpürterek hava kabarcıkları oluşturur (Kocakerimoğlu, 2020).

Köpük betonun en yaygın kullanımı, öncelikle konut dairelerinin içinde tesviye olarak kullanılır. Ayrıca, her türlü yapısal boşluğu doldurmak tünel, altgeçit, metro gibi yapıların karstik boşluklarını doldurmak, peyzaj yapmak ve apron altı dolgu yapmak için kullanılır. Günümüzde üretilen köpük betonların yoğunlukları  $250 \text{ kg/m}^3$  ile  $1600 \text{ kg/m}^3$  arasında

değişmektedir. Köpük betonun düşük yoğunluğu nedeniyle ölü yükü azaltarak hem ısı hem de ses yalıtımı sağladığı bilinmektedir. İnşaat sektöründe köpük betonum kullanım alanlarının hem şu anda hem de gelecekte çok olacağı tahmin edilmektedir. Düz çatılar ve zeminler buna örnektir. Tuğla boyutlarında yapılan duvarların uygulanması, ısı yalıtımını artıracaktır. Prefabrik yapılar için hızlı ve kolaydır. Geleneksel betonlardan daha iyi kesme ve zımbalama dayanımı gösterir. Bu, çevreye duyarlı bir yapı malzemesidir. Bu tür beton daha ucuzdur. Daha az personel gereklidir. Köpük beton yüksek akıcılığa sahip olması nedeniyle kolayca pompalanıp kalıba yerleştirilebilir. Herhangi bir titreşim ve sıkıştırmaya ihtiyaç duymaz. Su ve donmaya karşı son derece dirençlidir. Köpük betonda dengeyi koruyabilmek adına taze ve sertleşmiş betonun yoğunlukları birbirine yakın olmalıdır. Köpük beton, bloklar halinde üretim tesislerinde yapılabilir veya şantiye ortamında yapılabilir. Isı yalıtım betonu, ısı yalıtım paneli, boşluklu tuğla ve duvar karosu gibi prefabrik yapı parçaları olarak da kullanılabilir (Yılmaz ve diğerleri, 2021).

#### Köpük betonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Köpük betonun fiziksel özellikleri, birim hacim ağırlığı, kılcal su emme özellikleri ve basınç dayanımı açısından çok önemlidir. Köpük betonun temel amacı, maksimum basınç dayanımı ve minimum birim hacim ağırlıktır. Yani hem hafif olmalı hem de basınç dayanımı 1,5 MPa'dan yüksek olmalıdır (Yanardağ, 2020).

Birim hacim ağırlık: Kuru birim hacim ağırlığı ile taze birim hacim ağırlığı arasındaki fark 100 ile 120 kg/m<sup>3</sup> arasında olması önerilir. Kuru birim hacim ağırlığı için teorik değer ile gerçek birim hacim ağırlığı arasındaki fark  $\pm 50$  kg/m<sup>3</sup> olmalıdır. Köpük betonun birim hacim ağırlığının azalması, mukavemeti ve sertliğini düşürür (Yanardağ, 2020).

Kılcal su emme ve gözeneklilik: Gözeneklilik yapısı, köpük betonun mekanik, fiziksel ve fonksiyonel özelliklerini etkiler. Gözenegin boyutu, gözenek miktarı toplamı, dağılımı, gözeneklerin birbiri arasındaki bağlantılar, yük taşıma ve diğer faktörler gözeneklerin davranışını etkiler (Yanardağ, 2020).

Gözenekler üçe ayrılır: Makro gözenekler, kılcal gözenekler ve jel gözenekleri. Betonun su emici özelliği nedeniyle, kılcal gözenekler kür işleminden sonra sonuçları değiştirebilir.

Köpük betonun gözenek yapısı, karışımı oluşturan malzemelerin cisinden ziyade, maddenin kendi gözenek yapısından etkilenir (Yanardağ, 2020).

Basınç dayanımı: Köpük maddesinin türü ve oranı, kumun özellikleri, çimentonun türü, diğer bileşenlerin oranları, su/çimento oranı, yoğunluk ve kütleme tekniği köpük betonun basınç dayanımını etkileyen önemli bileşenlerdir. Köpük betonun dayanımı, yoğunluğunun artmasıyla katlanarak artar. Köpüğün hacmi azaldıkça mukavemeti artar. Köpük hacminin %50'si basınç dayanımını önemli ölçüde azaltırken, köpük hacminin %30'u basınç dayanımını önemli ölçüde azaltır. Su miktarı karışımın stabilitesini ve kıvamını etkiler. Karışımlarda kullanılacak kum ile öteki malzemelerin tane büyüklükleri betonun mukavemetine etki eder (Yanardağ, 2020).

### 2.3. Diatomit

Mikroskobik ve tek hücreli alglerin fosilleşmiş silis içeren kabukları diatomiti oluşturur. Amorf silis birikmesi diatomit çökeliğini oluşturur. Volkanik kül, organik kalıntı ve kumdan oluşmaktadır. Diatomitler, denizlerde, karada, tuzlu veya tatlı sularda, nemli kayaların üzerinde yaşayabilirler. Organizma öldükten sonra tortu haline gelir ve organik kısmı çürür. Diatomit yatakları birikerek taşlaşır. Dağ unu, pekmez toprağı, beyaz turba isimleri halk arasında kullanılmaktadır. Doğal olarak bulunan tek mineraldir. Feldispatlar, diatomit karbonat, kil mineralleri ve düşük miktarda kuvars içerir. Diatomit, açık ocaklardan çıkarılır (Taş ve Çetin, 2012).

#### 2.3.1. Türkiye'de diatomit rezervleri

Aydın, Afyon, Ankara, Balıkesir, Denizli, Bingöl, Çanakkale, Çankırı, Eskişehir, Kütahya, Kayseri, Konya, Niğde, Sivas ile Van, ülkemizin diatomit yataklarıdır. Kayseri-Hırka, Türkiye'nin en büyük diatomit yatağıdır (Taş ve Çetin, 2012).

Bu yataklar içinde sıklıkla bulunan alanları üç grupta toplamak mümkündür:

1. Niğde, Nevşehir ile Kayseri bölgesi; İç Anadolu bölgesinde Niğde, Nevşehir ve Kayseri en büyük diatomit yataklarına sahiptir. Kayseri'deki Emmiler-Hırka bölgesinin diatomitleri 21 metre kalınlığa ulaşmaktadır. Bu bölgede dört farklı diatomit çeşidi bulunmaktadır: kireçli, killi, kumlu ve saf olarak gruplanmaktadır. Ürgüp yakınlarında da

diatomit kaynakları bulunmaktadır. Aksaray ilinin Ihlara vadisinde bulunan Melendiz çayı çevresinde 15-20 metre kalınlığında diatomit kaynağı bulunmuştur. Tespit edilen diatomitlerin tamamının tatlı sudan kaynaklandığı belirlenmiştir (Taş ve Çetin, 2012).

2. Ankara ile Çankırı bölgesi; Çankırı'nın Şabanözü, Orta ile Çerkeş ilçeleri büyük miktarda diatomit rezervleri içermektedir. Ankara merkez yakınlarında bulunan Gürcüköy-Güvem ve Gücügöz-Başberket bölgelerinde diatomit kaynakları bulunmaktadır. Bu bölgede bulunan diatomitler amorf ve saftır. Nem oranı ile su emmeleri yüksektir. Çok gözeneklidir ve yoğunluğu  $2,0 \text{ g/cm}^3$ 'den küçüktür (Taş ve Çetin, 2012).
3. Kütahya ve Uşak ile Denizli ve Aydın bölgesi; Bazı illerimize bağlı ilçelerde diatomit yatakları öne çıkmaktadır. Kütahya-Alayunt, Uşak-Kayağıl, Denizli-Tırkaz, Aydın-Karacasu bölgelerinde diatomitler bulunmaktadır. Bursa-Orhaneli ve Balıkesir-Gönen diatomitleri de bulunmaktadır. Kütahya diatomitleri yaklaşık 15 milyon ton kadardır. Üç farklı damar bulunduran bu yataklar %55, %75 ve %92 oranlarında  $\text{SiO}_2$  içermektedir. Afyon bölgesi diatomitlerinin hücreleri çubuğa benzemektedir ve kabuk şekillidirler (Taş ve Çetin, 2012).

Yukarıda görüldüğü gibi Anadolu'nun birçok bölgesinde diatomit yatakları oldukça yaygın olarak bulunmaktadır. Bu yataklar yeterince değerlendirilememektedir.

### **2.3.2. Diatomitin fiziksel ve kimyasal özellikleri**

Ocaktan çıkarılan diatomitler büyük bir kütle görünümündedir. Ancak işlendikten sonraki boyutları yaklaşık 2-200 mikron kadardır. Diatomitin %86-94'ü silistir. Renkleri beyazdan griye kadar değişir ve bünyesinden su uzaklaştıkça rengi beyazlaşır, gevşek bir yapıya sahip olur ve tozlaşır. Demir, kil ve alüminyumdan gelen alkaliler diğer bileşenleridir. Denizden gelenler daha incedir. En önemli özelliği gözeneklilik ve düşük birim hacim ağırlığıdır. Su emme yetenekleri yüksektir (Aruntaş, 1996). Diatomit maddesinin işlenmemiş hali Resim 2.2 'de gösterilmektedir.



Resim 2.2. İşlenmemiş diatomit

Diatomitler, denizlerde, karada, tuzlu ve tatlı sularda, nemli kayalar üzerinde yaşayabilirler. Diatomit, açık ocaklardan çıkarılır. Önceleri açık havada kurutulur iken, ancak son zamanlarda gelişmiş işletme tesislerinde işlenmeye başlanmıştır. Diatomit 100 ila 900 derece arasında fırınlanır ve fındık büyüklüğünde ufalanır. Bünyesinden organik maddeler çıkarılır. Diatomitin yapısında en fazla bulunan bileşiklerden birisi de genel olarak  $\text{SiO}_2$  bileşiğidir (Yaşar, 2016).

Diatomitin fiziksel özelliklerine ait veriler Çizelge 2.2' de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Diatomitin fiziksel özellikleri (Yaşar, 2016)

Fiziksel özellikleri						
Değer		Ham		Kalsine edilmiş		
pH		7,91		8,58		
Yoğunluk(kg/dm <sup>3</sup> )		2,29		1,90		
Geçirgenlik(m <sup>2</sup> )		2,15 / 10 -15		4,74 / 10-15		
Minerolojik ve kimyasal bileşim (%)						
SiO <sub>2</sub> en az	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en çok	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> en çok	CaO en çok	MgO en çok	Alkali oksitler en çok	K.K
85	5	1,5	%1	0,5	1	6

Aruntaş, Albayrak, Saka ve Tokyay (1997) yaptıkları çalışmada, Ankara-Kızılcahamam ve Çankırı-Çerkeş' de bulunan iki ayrı yataktan sağlanan diatomitlerin fiziksel özellikleri, kimyasal kompozisyonları, mineralojik bileşimleri ve mikroskobik yapılarını incelenmiştir. Diatomitler, saf, amorf, genellikle yumuşak, kolayca ufalanabilir ve tane irilikleri 5–50  $\mu\text{m}$  arasındadır. Yüksek su emme ve gözenekliliğe sahip oldukları, yapılarında plajyoklas, smektit ve kuvars mineralleri bulunduğu belirlenmiştir. Yoğunlukları 2,0 g/cm<sup>3</sup>'ten daha azdır. Diatomitlerin, hem birbirleri hem de ilgili standart ve literatürle karşılaştırılması

sonucunda filtrasyon malzemesi, puzolanik malzeme ve yalıtım malzemesi olarak çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilceği belirlenmiştir.

### 2.3.3. Literatür taraması

Diatomit, uzun süredir kullanılan bir malzemedir. MS 530 yıllarında, Ayasofya camisinin kubbesi hafif olduğu için diatomit tuğlalardan yapılmıştır. Diatomit, sahip olduğu olumlu özellikler nedeniyle çok çeşitli alanlarda kullanılabilir. Nobel, 1867 yılında ilk kez bilimsel olarak kullanmıştır. Diatomit ayrıca izolasyon ve dolgu için kullanılırken, 20. yüzyılda üretim ve elde etme süreci hızlanmıştır. Santra Barbara Country, Kaliforniya'da 1912 yılında diatomit kaynakları işletilmeye başlanmış ve daha sonra çeşitli isimlere sahip olmuştur. Günümüzde bu şirket en büyük diatomit üreticilerinden birisidir. 1950'lerden sonra çimento sanayisinde kullanılmaya başlanmıştır. Diatomit, katkı veya dolgu olarak, katalizör taşıyıcısı olarak, filtrasyon işlemlerinde, gıda sektöründe, boyalarda ve çimento yapımında kullanılmaktadır. Bunun en önemli nedenlerinden bir tanesi diatomitin hafif, kimyasal maddelere karşı dirençli, ısı, ses yalıtımı sağlaması ve elektrik geçirgenliği az olmasından kaynaklandığı belirtilmektedir (Örklemez, 2019).

Yılmaz ve diğerleri (2006) yapmış oldukları çalışmada “Çimento klinkerinin öğütülmesi esnasında %5, %10 ve %20 oranlarında katılan kilin diatomit ilave beraber öğütülerek çimentolar elde etmişlerdir. Araştırma sonucunda % 10 ve % 20 killi diatomit katkılı çimento ile 28 gün sonunda 50 MPa basınç dayanımının CEM I çimento elde edilebileceğini vurgulamışlardır. Benzer başka bir çalışmada ise ağırlıkça, çimentonun %0, %5, %10 ve %15'i oranlarında diatomit ilave edilerek karışımdaki su ve kum miktarları sabit tutularak harç numuneleri üretmişlerdir. Yapılan deney sonuçlarına göre, %5 diatomit içeren çimento harcının standarda en yakın sonuç verdiğini belirtmişlerdir”.

Aruntaş (1996) yaptığı çalışmada diatomitinin çimento harçları üretiminde puzolanik katkı olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. “Bu amaçla diatomitleri, çimento ağırlığının %10, %20 ve %40'ı oranında, ilk olarak doğrudan klinkerle birlikte öğütülerek, ikinci olarak ise çimentonun bir kısmı yerine ikame edilerek, diatomit ikameli çimentolar (DİÇ) ile diatomit katkılı çimentolar (DKÇ) elde edilmiştir”.

Aydın ve Gül (2000) yaptıkları çalışmada diatomit ve pomza belirli boyuta getirildikten sonra beton içine çimento ağırlığınca belirli oranlarda katılarak betonun priz süresi, çökme basınç dayanımı üzerine etkileri araştırılmıştır. Benzer bir çalışma, diatomit çimento ağırlığının % 10, %20 ve %30'u kadar betona ilave edilmiş ve son olarak yine diatomitin çimento ağırlığının %10 ve %20'si ile yer değişimi yapılmıştır. Diatomitin gözenekli bir yapıya sahip olmasından dolayı bütün karışımlarda çok fazla slump kayıpları görülmüştür (Bahadır, 2001).

Yılmaz ve diğerleri (2008) bu çalışmada, "Doğal amorf ve gözenekli olarak saf ve kalsine edilmiş diatomit kullanarak çimento üretimini araştırmışlardır. Portland çimentosuna %5, %10, %20 saf ve kalsine edilmiş diatomit ilave edilerek fiziksel, kimyasal, mineralojik, mikro yapısal ve mekanik testleri yapılmıştır. Aynı zamanda reaktif SiO<sub>2</sub> içeriği de artmıştır. Kalsinasyon işlemi diatomitin gözenekli yapısını değiştirdiğinden %20 oranından daha yüksek oranda kullanılabilir".

Kastis ve diğerleri (2006) yapmış oldukları çalışmada "Diatomit ile harmanlanmış çimentonun özellikleri ve hidrasyonu üzerinde çalışmışlardır. Denelerde %0, %10, %20 ve %35 diatomit kullanılarak çimento harcı oluşturulmuştur. %10 diatomit katkılı karışıma kadar, basınç dayanımları Portland çimentosuna göre daha da iyileşmiştir. EN 197-1'e göre aktif SiO<sub>2</sub> içerdiğinden dolayı doğal bir puzolan olmanın özelliklerini taşımaktadır".

Ünal ve Uygunoğlu (2007) yaptıkları hafif beton çalışmasında "Diatomit agrega olarak kullanılmıştır. Diatomitle hafif betonun mekanik ve fiziksel özellikleri araştırılmıştır. Betonların çimento miktarı 250 ve 400 kg/m<sup>3</sup> arasında değiştirilerek S/Ç oranı 0,15 olarak sabit tutulmuştur. Üretilen numuneler üzerinde, basınç dayanımı, ısı iletkenlik, su emme, birim hacim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve görünen porozite deneyleri yapılmıştır".

Yapılan bu çalışmada "Tuğla üretiminde kullanılan kil, Ankara Şeker Fabrikasından alınan atık diatomit malzemesi kullanılmıştır. TSE 705'e göre 1,8/100 tuğla sınıfına sahip olan tuğlanın fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Farklı deney numunelerinin 800, 900 ve 1000 °C'de pişirilmesi ve daha sonra standart testler uygulanarak tuğla üretimine başlanmıştır. Çalışmalar, %20 oranında diatomit katkılı numuneleri 900 °C'de pişirerek fiziksel ve mekanik özelliklere sahip ürünlerin elde edilebileceğini göstermiştir" (Bideci, 2003).

Çalışmada “Diatomit ile beton işlenebilme özelliği, priz süresi ile eksenel yük altındaki davranışının nasıl etkilendiği incelenmiştir. Çalışmada, S/Ç oranının karışımlar üzerindeki etkisini belirlemek için iki farklı S/Ç oranı (0,50 ile 0,55) kullanılmıştır. Karışımdaki çimento oranı azaltılmıştır. Son olarak, çeşitli miktarlarda diatomit içeren betonlar üretilmiştir. 108 tane diatomitli numune üretilmiştir. Üretilen numunelere çökme ile priz süresi ve basınç dayanımı testleri uygulanmıştır. Çökme sonuçlarına göre diatomit miktarındaki artış sonucu çökme değerinin azaldığı ve bu da diatomitin işlenebilirliğini zorlaştırdığını göstermiştir. Priz süresi deneylerinde, diatomitlerin inceliği ve miktarı arttıkça priz gecikmesi meydana geldi. Basınç dayanımı deneyi sonuçlarına göre, S/Ç oranının düşürüldüğü durumlarda sonuçlar daha yüksek çıkmıştır” (Genç, 2006).

Başka bir çalışmada “Portland çimentosuna %10 ile %20 zeolit, %10 ile %20 diatomit, %5 ile %10+10 diatomit ve zeolit eklenmesi yoluyla yedi farklı çimento kompozisyonu üretilmiştir. Çalışmada numuneler 7 ile 10 cm çökme değerine sahip bir karışım tasarımıyla hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde birim hacim ağırlığı, su emme ve boşluk oranı, kapiller su emme, ultra ses geçiş hızı ve yarmada çekme basınç dayanımı gibi çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Hem diatomit hem de zeolit katılımı, beton örneklerinin dayanım ve dayanıklılığı üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. Sonuçlar, diatomit ve zeolit katkılı numuneler için en iyi katkı oranının yüzde on olduğunu göstermiştir” (Savaş, 2012).

Yapılan çalışmada “Nervürlü donatı, %20 diatomit ve %20 zeolit katkılı beton numuneler içerisine yerleştirilmiştir. 1 M HCl ve 0,5 M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> asit içindeki korozyon mekanizması araştırılmıştır. EIS yöntemi kullanılarak yapılan deneyler, zeolit katkılı %20'lik numunelerdeki betonun donatı direncinin diatomit katkılı %20'lik betona göre daha yüksek olduğunu göstermiş ancak korozyon miktarının ise daha düşük olduğu tespit edilmiştir” (Durgun, 2015).

Bu çalışmada “Diatomit, sıva harcında ve tarımsal yapılarda nasıl kullanılabilceği araştırılmıştır. Diatomitin, birim hacim ağırlığı, su emme, kılcal su emme, eğilme ile basınç dayanımı ve buhar geçirgenliği açısından tarımsal yapılarda kullanılabilir kanaatine varılmıştır” (Yazarel, 2016).

Yapılan çalışmada “Köpük betonda krom atıklarının agrega olarak kullanımını incelemiş TS’ ye göre basınç ve eğilme dayanımı, ısı iletkenlik ve rötre deneyleri yapılmış ve krom atıklarının belirli şartlar altında köpük betonda kullanılabilceği saptanmıştır” (Kaya, 2017).

Çalışmada “Endüstride bir yan ürün olarak granüle yüksek fırın cürufu ile çimento dozajının köpük betonun özelliklerini nasıl etkilediği incelenmiştir. Yüksek fırın cürufu, kum ile %50 ile %100 oranlarında köpük beton karışımında yer değiştirmiş ve çimento dozajı 300, 400 ,500 kg/m<sup>3</sup> kullanılmıştır. Numunelere ısıl, mekanik ve fiziksel testler yapılmıştır. Granüle yüksek fırın cürufunun, kumun yerine kullanılabilceği ancak boşluk oranının dayanım için daha önemli olduğu keşfedilmiştir” (Ören, 2017).

Yapılan çalışmada “F sınıfı uçucu kül kullanılarak üretilen geopolimer numunelere diatomit eklenmesinin mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkisini incelenmiş. Çalışmada yapılan numunelerde su/çimento oranı 0,31 ve kum/çimento oranı 3,0 olmuştur. NaOH, aktivatör olarak kullanılmış ve çimentoya göre yaklaşık yüzde on oranında Na+ kullanılmıştır. Diatomit ile çimento, karışımlar hazırlanırken çimentoya göre ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 olarak yer değiştirilmiştir. Numuneler 24, 48 ve 72 saat boyunca 60, 75 ve 90 derecelik bir ısı küründe tutulmuştur. Numunelerin işlenebilirlik, birim ağırlık, basınç ve eğilme dayanımı, su emme ve boşluk oranı, kılcal su emme, yangına dayanıklılık, aşınma direnci ve XRD ve FESEM analizleri ile incelenmiştir. Sonuç olarak, üretilen geopolimer örnekleri %1, %2 ve %3 oranında diatomit içerdiğinde dayanımın arttığı bulunmuştur” (Örklemez, 2019).

Çalışmada “F sınıfı uçucu kül kullanılarak yapılan bir geopolimer çalışması, diatomit ilavesinin mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çeşitli sıcaklıklarda ve farklı NaOH oranları kullanılarak üretilen geopolimerlerin mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. NaOH aktivatör olarak kullanılmıştır ve karışımlara %8, %10 ve %12 Na+ katılmıştır. Karışımlarda diatomit, uçucu külle yer değiştirilerek ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında kullanılmıştır. Numuneler 60, 75 ve 90 derece sıcaklıklarda üretilmiş ve 24 ila 72 saat boyunca ısı kürüne bırakılmıştır. Numunelerin işlenebilirlik, birim ağırlık, basınç ve eğilme dayanımı, su emme ve boşluk oranı, kılcal su emme, yangına dayanıklılık, aşınma direnci analizi ve deneyleri yapılmış ve XRD ve FESEM analizleri ile incelenmiştir. Sonuç olarak, üretilen numunelerde %1 ve %2 diatomit ikamesi ile dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir” (Özsoy, 2021).

Bir çalışmada “Diatomit tozunun hafif harçların teknik özelliklerine nasıl etkisi olduğu araştırılmıştır. Alkali eklenmiş hafif harçların kuru birim hacim ağırlığı, termal iletkenliği, eğilme ve basınç dayanımı, donma çözülme dayanıklılığı, kuru büzülme ve yüksek sıcaklık değerleri ve diatomit tozu, silis kumu, andezit kumu ve yüksek fırın cürufunun farklı oranlarda karıştırılması incelenmiştir. Bu nedenle, tamamen andezit kumu içeren ancak diatomit tozu içermeyen karışım kullanılarak 60 MPa’lık bir dayanım elde edilmiştir. Diatomit tozu, yüksek fırın cürufunun yerini alarak basınç dayanımını önemli ölçüde azaltmıştır. %20 ve %30 diatomit tozu içeren karışımlar en düşük termal iletkenlik değerlerini göstermiştir. %10 diatomit tozu içeren karışımlar donmaya ve çözülmeye yüksek direnç göstermiştir” (Yakupoglu, 2023).

Başka bir çalışmada “Köpük betonun reolojisi, kum tane boyutları ve miktarı sabit tutulurken, su ve çimento oranı, çimento dozajı ve köpük miktarı dahil olmak üzere çeşitli değişkenlerin etkilerini araştırılmıştır. Sonuç olarak, köpük Herschel-Bulkley modeli, beton davranışının reoloji özelliklerini belirlemek için kullanılabilir. Bu model, ısı iletkenlik değerlerinin ve dayanımın birim hacim ağırlık ile ilişkili olduğunu göstermektedir” (Tuzlak, 2017).

Bu çalışmada “Köpük betonun teknik özellikleri, mermer tozu, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi endüstriyel atıklar kullanılarak analiz edilmiştir. Örnekler 0,14 ile 0,20 W/m K ısı iletkenliği göstermiştir. Rötire değerleri %0,09, filler ve tamamı uçucu kül içeren seride %0,11’dir. Basınç dayanım değerleri 1,60 ile 4,35 MPa arasında değişmiştir” (Atabey, 2018).

Çalışmada “İnce kum, uçucu kül ve kimyasal bir hidrojen peroksit katkısı kullanılarak yapılan köpük betonun yoğunluğu 370 ile 440 kg/m<sup>3</sup>tür. Yapılan araştırmaya göre uçucu kül katkısı köpük betonun basınç dayanım değerlerini artırmaktadır” (Dede, 2019).

Bu çalışmada “Köpük yapmak için kalsiyum alüminat çimentosu, potasyum iyodür, lityum karbonat, karboksimetil selüloz, hidrojen peroksit ile genleşmiş perlit kullanılmıştır. Bu çalışma için genleştirme yöntemini kullanarak üretilen köpük beton numuneleri en iyi sonuçları vermiştir” (Yanardağ, 2020).

Yapılan çalışmada “Köpük beton araştırması için sentetik esaslı köpük ajanı, CEM I 42,5 çimento, uçucu kül, genleştirilmiş perlit ve doğal kum belirli oranlarda kullanılmıştır. Bu

karışım, polikarboksilik akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kimyasal maddenin etkisinin yanı sıra, taze betonun priz süresini kısaltmak ve hidrasyon sürecini hızlandırmak için  $\text{CaCl}_2$ 'nin belirli miktarda ilave edilmesini içerir. Birim hacim ağırlığı 460 ile 630  $\text{kg/m}^3$  arasında üretilmiştir. Köpük beton numunelerinin mikroyapısı, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Genleştirilmiş perlit katkılı karışımlarla elde edilen örneklerin ısı iletim değerleri oldukça iyi olsa da, mekanik özellikleri beklenen düzeyde değildir” (Kocakerimoğlu, 2020).

Çalışmada “Bazalt lif ve atık mermer tozu içeren köpük betonun özellikleri incelenmiştir. Köpük betonun, kapilaritesi, kuruma ve büzülmesi, sülfata dayanıklılığı, yüksek sıcaklığa dayanıklılığı, donma ve çözülme dayanıklılığı ve ısı iletkenlik değerleri üç farklı tip köpük muhtevası ve bazalt lif muhtevası araştırılmıştır. Araştırma sonucu üretilen köpük beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayıları 0,645 ile 0,757  $\text{W/m K}$ , kuruma büzölmeleri 90 günde 75 ile 1951  $\mu\text{m}$ , su emme oranı %16,91 ile 6,86, eğilme dayanımı 28. günde 12,22 ile 4,09 MPa, kuru birim hacim ağırlığı 1924 ile 1370  $\text{kg/m}^3$ , basınç dayanımı 28. günde 33,53 ile 19,4 MPa, kapilarite 1,91 ile 6,72 mm ve porozite oranı 24,43 ile 12,6 arası bulunmuştur” (Yarar, 2021).

Yapılan bir çalışmada “Köpük beton üreten numunelerin fiziksel, mineralojik ve mikro yapılarını incelemek için pomza ve diatomit kombinasyonunu farklı oranlarda kullanarak köpük betonun ideal karışım oranları belirlenmiştir. Araştırmada, diatomit ve pomzanın çimentoya ayrı ayrı ya da birlikte dahil edilmesi ile meydana gelen reaksiyonları belirlendi. XRD, FT-IR ve DTA-TGA analizleri, 90. günde hem diatomit, pomza hem de diatomit ve pomza içeren çimentonun yüksek bir hidrasyon seviyesine sahip olduğunu göstermiştir. Bu nedenle, puzolanik malzemeler kullanıldığında, harçların basınç dayanımı düşmekte ve 28. günde, PÇ 42,5 R tipi çimentosunun basınç dayanımı minimum dayanım değerlerinin üzerinde çıkmaktadır. 90. günde hem %10 pomza ilaveli hem de %5+5 pomza ilaveli diatomit harçlarının basınç dayanımı referans harçtan daha iyi çıkmıştır” (Pınarcı, 2022).

Çalışmada “İnşaat yıkıntı atıklarının 4 mm'den küçük boyutlarında bulunan malzemeler için en uygun su-çimento oranlarını belirlemek için köpük betonun en uygun karışım oranları belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımına sahip olan ve minimum birim hacim ağırlığına sahip olan karışımlardan elde edilen köpük betonun ısı iletkenlik katsayıları, su emme kapasiteleri ve diğer özellikleri tespit edilip, yıkıntı atığının dayanımı üzerinde olumsuz bir

etkisi olmasına rağmen, duvar doldu malzemesi olarak kullanılabilceği tespit edilmiştir” (Özçelik, 2022).

Yapılan köpük beton çalışmasında “Köpük betonun yüksek derecedeki kuruma büzülmesine engel olmak için, yangın direncini artırarak ve ısı yalıtım özeliğini artırarak karışımlar hazırlanarak numuneler üretilmiştir. Öncelikle havada ve sonrada otoklavda 300, 400 ve 500 kg/m<sup>3</sup> birim hacim ağırlığına sahip köpük beton numuneleri üretilmiştir. Kuruma büzülmesi, mekanik özellikler ile ısı iletkenliği açısından en uygun birim hacim ağırlığı olarak 300 kg/m<sup>3</sup> belirlendi. 300 kg/m<sup>3</sup> ile üretilen köpük betonun mekanik özellikleri üzerine, yüksek incelikte silika esaslı farklı mineral katkıları C-S-H bağının oluşumunu desteklemek için % 5, 10 ile 15 çimentoya silika esaslı mineral ilave edilmiştir. Kapiler su emme katsayısı, kuru yoğunluk, hidrasyon ürünlerinin mineralojik değişiklikleri, ısı iletkenliği, ultrasonik ses hızı, basınç ile eğilme dayanımları ve dinamik elastisite modülü araştırılmıştır” (Işıldar, 2023).

### 3. MATERYAL VE METOT

#### 3.1. Materyal

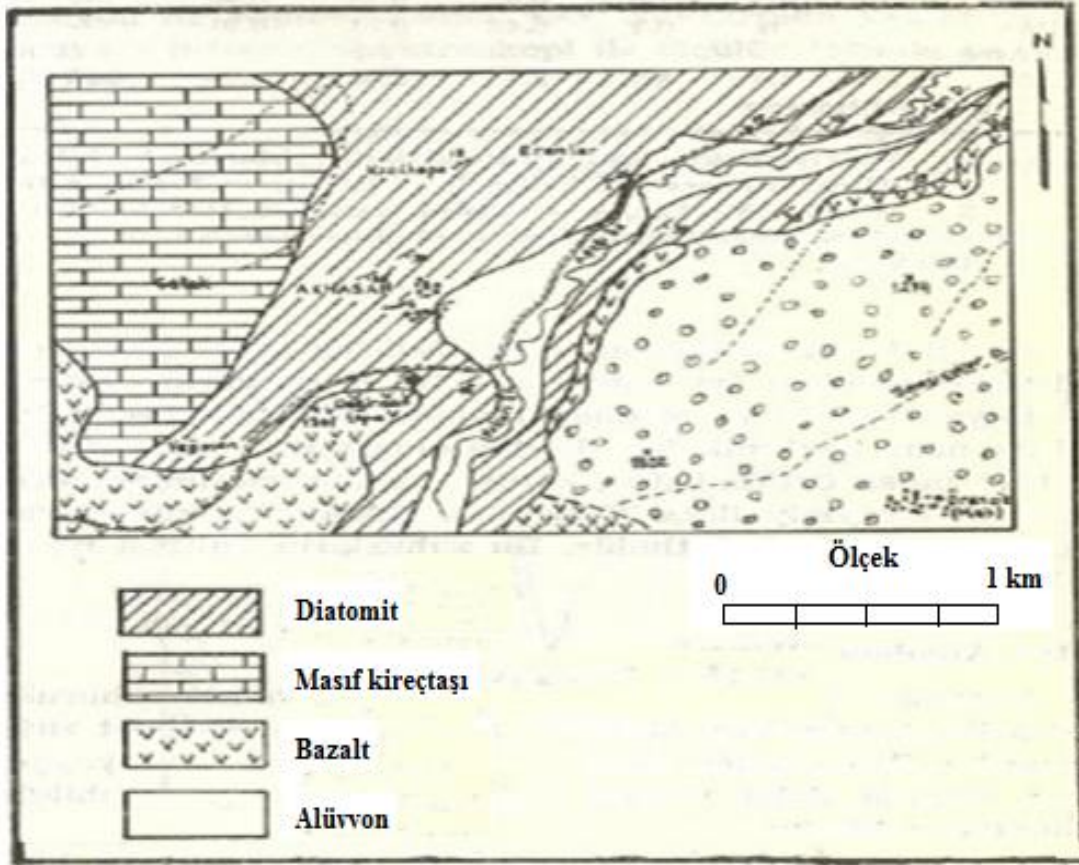
Bu çalışmada, Çankırı-Çerkeş yöresi Akhasan köyü ve civarında işletilmekte olan ocaktan alınan diatomit, silis kumu, CEM I 42,5 R çimento, şehir şebeke suyu ve köpük ajanı belirli oranlarda kullanarak köpük betonu tasarımı yapılmıştır. Üretilen köpük betonu tasarımıyla üretilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, birim hacim kütle, su emme, boşluk oranı, kapilarite, ısı yalıtım katsayısı, yanıcılık ve ısı geçirgenliği, gözenek yapısı gibi özellikleri araştırılmıştır.

##### 3.1.1. Diatomit ve silis kumu

*Diatomit:* Araştırmanın temel bileşeni olan diatomit, Çankırı-Çerkeş Akhasan köyü bölgesinden elde edilmiştir. Şekil 3.1’de diatomitin sağlandığı yatak olan Akhasan Köyü, Çerkeş’in 10 km güney batısında işletilmekte olan bir yerdir. Sediman menşeyli bu yatakların tabakasının doğrultu ve eğimi mevzii olarak değişmekte ve kıvrımlardan oluşmaktadır. Maden Tetkik Arama’nın 1968’deki raporuna göre, bu bölge 9 km<sup>2</sup> büyüklüğündedir ve görünür rezervi 4 milyon tondur. Muhtemel rezerv 19 ile 20 milyon ton civarında olabilir. Çankırı yöresi diatomitleri amorf yapıda, yüksek gözenekli mikro yapıya sahip, su emmeleri ve nem değerleri yüksek ve yoğunlukları 2.0 g/cm<sup>3</sup>’den küçüktür. İnşaat işlerinde hafif yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir (MTA, 2023).



Şekil 3.1. Akhasan (Çankırı- Çerkeş) diatomit yatağının yer haritası



Şekil 3.2. Akhasan (Çankırı- Çerkeş) diatomit yatağının jeolojik haritası (Kurhan, 1969)

Çizelge 3.1. Diatomitlerin fiziksel özellikleri (Özbeý ve Atamer, 1987)

Fiziksel özellikler		TS 9773 sınırları
Nem oranı (%) (laboratuvara getirildiği zaman) ve (kurutulduğunda)	72	En çok 15
Su emme oranı (%)	188	En az 180
Yoğunluk (kg/dm <sup>3</sup> )	1,83	
Gevşek ağırlığı (kg/m <sup>3</sup> )	225	En çok 500
pH	7,08	
200 µm elek üstü (%)	38,6	
90 µm elek üstü (%)	60,1	
Doğal nem (%)	4+/-1	
Rengi	Bej (sarımtırak)	Beyaz
Beyaz yabancı madde	Yok	-
Diğer	Yumuşak- hafif	Yumuşak- hafif

Çizelge 3.2. Diatomitlerin kimyasal kompozisyonları (Özbey ve Atamer, 1987)

Kimyasal kompozisyon	%	Ticari ham diatomit % sınırları
SiO <sub>2</sub>	83,0	En az 85,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,37	En çok 5,0
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,20	En çok 1,5
CaO	1,14	En çok 1,0
MgO	0,68	En çok 0,5
Na <sub>2</sub> O	0,67	En çok 1,0
K <sub>2</sub> O	0,82	En çok 1,0
TiO <sub>2</sub>	0,40	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,10	-
Kızdırma kaybı	5,62	En çok 6,0
Toplam	99,99	



Resim 3.1. Araştırmada kullanılan diatomit ve silis kumu

*Silis kumu:* Silis kumu Pomza Export A.Ş. firmasının Manisa-Salihli Kaletepe bölgesinde mevcut olan işletmeden temin edilmiştir. Tane boyutu 0-400 µm olan ve yoğunluğu 2.65 g/cm<sup>3</sup>'tür Silis kumu kimyasal yapısı % 99 oranında SiO<sub>2</sub> içermektedir. İşletmenin gereksinimleri doğrultusunda çeşitli gradasyonlarda silis kumu sınıflandırılmıştır. Bu kumların sıcaklık ve kimyasal etkilere dayanıklı olması nedeniyle birçok sektörde kullanılmaktadır. Döküm, tekstil, arıtma tesisleri, yüzey temizleme (kumlama ve raspa), yapı malzemeleri, kimya, spor alanları, akvaryum ve pist kumu, söve, prekast sistemleri, boru imalatı vb. bazılarıdır.

Çizelge 3.3. Karışımda kullanılan silis kumunun özellikleri

Kimyasal bileşenler	% Ağırlıkça
SiO <sub>2</sub>	99,31
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,29
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,05
TiO <sub>2</sub>	0,009
CaO	0,05
MgO	-
Na <sub>2</sub> O	-
K <sub>2</sub> O	0,02
Kızdırma kaybı	0,09

### 3.1.2. Çimento ve su

*Çimento:* Araştırmada CEM I 42,5 R Portland çimentosu kullanılmıştır (TS EN 197-1). Çimentonun teknik ve kimyasal bileşenleri Çizelge 3.4’te verilmiştir. Karışımda Ankara şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Çizelge 3.4. CEM I 42,5 R bileşenleri (OYAK, 2022)

Kimyasal içerik		Fiziksel özellikler	
Bileşen	%	Hacimsel genleşme(mm)	<1
SiO <sub>2</sub>	20,63	İncelik (90 mm, %)	0,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,71	İncelik (200 mm, %)	1,1
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,41	Özgül yüzey alanı (cm <sup>2</sup> /g)	3340
CaO	63,64	Priz başlangıcı(dk.)	185
MgO	1,24	Priz sonu(dk.)	120
SO <sub>3</sub>	2,2	Yoğunluk(g/cm <sup>3</sup> )	3,12
Na <sub>2</sub> O	0,23	Mekanik özellikler	
K <sub>2</sub> O	0,91	7 günlük eğilme dayanımı (MPa)	5,8
Cl-	0,0357	28 günlük eğilme dayanımı (MPa)	7,2
Serbest CaO	1,26	7 günlük basınç dayanımı (MPa)	39,3
Kızdırma kaybı	2,63	28 günlük basınç dayanımı (MPa)	51

### 3.1.3. Köpük ajanı

Yapılan deneylerde; boşluklu hafif beton ve hafif yapı elemanları elde etmek için sentetik esaslı köpük ajanı kullanılmıştır. Konsantre halde bulunan ajan tarafından üretilen köpük, çimento şerbetiyle birleştiğinde bağ kurarak hızlı bir şekilde homojen bir karışım oluşturur. Oluşan sürtünmeler için köpük taneleri bölünerek betonda bağımsız şekilde kapalı hücreler oluşturur. Yapılan çalışmalarda, hafif beton ile yapı elemanlarını oluşturmak için hazırlanmış yüksek

verimli sentetik köpük ajanı kullanılmıştır. Bu ajan köpük kabarcıklarının daha fazla genişmesini ve sıvı üzerindeki yüzey çekme gerilmelerini önleyerek daha düşük birim hacim ağırlığına sahip beton üretmeyi sağlar. Köpük ajanının, şebeke suyuna  $2 \pm 0,5$  oranında eklenmesi gerekmektedir. Önceden hazırlanmış köpük üretim makinesi, hazırlanan solüsyondan köpük oluşturur. Köpük hazır hale geldiğinde, üretici firmanın deneyler sonucunda tavsiye ettiği değer yaklaşık 85 g/l' dir.

Çizelge 3.5. Köpük ajanının özellikleri

İçerik	Sentetik
Konsantre haldeki yoğunluk(kg/l)	1,20±0,02
Köpük yoğunluğu (g/l)	85
Su/köpük ajanı oranı	50/1
Köpük yüzey suyunu bırakma süresi(saat)	3
Rengi	Bulanık beyaz
pH değeri	6,0
Raf ömrü((ay)	24
Saklama koşulu	Ağız kapalı ve serin ortamda

Köpük konsantrasyonu kısa bir süre sonra çimento şerbeti ile birleşir ve homojen bir karışım oluşturur. Her bir tanecik, karışım sırasında oluşan köpükler çimento içinde eşit bir şekilde dağıldığından, birbirinden ayrı bir çatı oluşturur. Köpük tanesi karışım sırasında sürtünmelerle bölünür ve kabarcıklar yeni bir katman oluşturur. Köpükler betonda birbirinden ayrı kapalı hücreler oluşturur. Tozma yapmadan betonun yüzeyinde kırılğan bir tabaka oluşmaz.

### 3.2. Metot

Araştırmada kullanılan diatomitin tane büyüklük dağılımı TS EN 933-1(2012) Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi esas, 0–4 mm diatomit malzemenin elek analizleri yapılmıştır. Birim hacim kütleinin tayininde, TS EN 12390-7(2019) Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun birim hacim kütleinin tayini” standardına göre yapılmıştır. Basınç dayanım testinde, “TS EN 12390-3(2019) Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deneysel numunelerinin basınç dayanımının tayini” esas alınarak yapılmıştır. Ultrases geçiş hızı tespiti testinde, “TS EN 12504-4(2021) Yapılarda Beton Deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini” standardı esas alınarak yapılmıştır. Su emme ve

boşluk oranının belirlenmesinde “TS EN 480-11(2008) Kimyasal Katkılar - Beton, Harç ve Şerbet için - Deney Metotları - Bölüm 11: : Sertleşmiş betonda hava boşluğu özelliklerinin tayini” esas alınmıştır. Köpük betonun kapiler su emme hızının tayininde “TS EN 772-11(2012) Kâgir Birimler - Deney Metotları - Bölüm 11: Betondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kâgir birimlerde kapiler su emme ve kil kâgir birimlerde ilk su emme hızının tayini” esas alınmıştır. Termal iletkenlik özelliklerinin TS EN 12664 (2001) Yapı malzemeleri ve mamulleri - ısı direncin, korumalı tablalı ısıtıcı ve ısı akı ölçerin kullanıldığı metotlarla tayini - ısı direnci orta ve düşük seviyede olan kuru ve rutubetli mamuller” standardı ve bu plaka numuneler “TS ISO 8301(2015) Isı yalıtımı - kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini - ısı akış tayini için metotlar” standartlarına göre tayin yapılmıştır.

### **3.2.1. Optimum karışım oranlarının belirlenmesi**

Genel olarak köpük betonda hedef, en düşük birim hacim kütle ( $\delta$ ) ile maksimum basınç dayanımı( $\sigma$ ) ilişkisini elde edebilmek, köpük beton malzeme karışım oranları belirlemek için tasarımlar planlanmıştır. Bu tasarımlarla temel kriter uygun akış süresi ve sürekli akış veren karışım oranları içinde sertleşmiş köpük beton basınç dayanımı / birim hacim kütle oranının en büyük değeri veren karışım oranı ile optimum malzeme karışımlarının bulunması amaçlanmıştır. Bunun için önceki çalışmalardan, çimento miktarı  $500 \text{ kg/m}^3$  bütün karışımlarda sabit olarak alınmıştır. Diğer bileşenler değişken olarak alınarak ön denemeler yapılarak optimum oranlar belirlenmiştir. Çalışmada 4 farklı (S/Ç oranı, silis kumu, diatomit ve köpük miktarı) optimum kriter esas alınarak, 5 farklı %'lik oranlarda tasarım karışımları oluşturmak ve optimum köpük beton bileşenlerini belirlemektir. Çizelge 3.6'da köpük beton tasarımlarında kullanılan malzeme %'leri verilmiştir;

1. Optimum S/Ç oranını belirlemek amacıyla 0,60; 0,65; 0,70; 0,75 ve 0,80 oranlarıyla tasarım karışımları yapılarak en uygun S/Ç oranını belirlemektir.
2. Optimum silis kumunun belirlenmesi: Optimum S/Ç oranı esas alınarak değişken olarak silis kumunu, çimento ağırlığının % 8, 16, 24, 32 ve 40 oranlarıyla köpük beton tasarımı hazırlanarak birim hacim kütle ve basınç dayanımına bağlı olarak optimum silis kumu miktarı belirlenmiştir.

3. Optimum diatomit miktarının belirlenmesi: Optimum S/Ç oranı ve silis kumu esas alınarak, çimento ağırlığının %32, 36, 40, 44 ve 48 oranlarıyla diatomit miktarı ilave edilerek üretilen köpük betonun birim hacim kütlesi ve basınç dayanımına bağlı olarak optimum diatomit miktarı belirlenmiştir.
4. Optimum köpük oranının saptanması: Daha önceki aşamalarda belirlenen S/Ç oranı, silis kumu ve diatomit miktarı esas alınarak optimum köpük miktarın bulunması için çimento ağırlığının % 6, 8, 10, 12 ve 14 oranlarıyla köpük betonu tasarımı hazırlanarak birim hacim kütle ve basınç dayanımına bağlı olarak optimum köpük miktarı belirlenecektir.

Çizelge 3.6. Köpük beton optimum karışım oranları

Optimum	Bileşenler	1.tasarım	2.tasarım	3.tasarım	4.tasarım	5.tasarım
S/Ç oranı	S/Ç oranı	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
	Çimento	1	1	1	1	1
	Su	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
	Diatomit	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
	Köpük	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	Silis kumu	0	0	0	0	0
Silis kumu	S/Ç oranı	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Çimento	1	1	1	1	1
	Su	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Diatomit	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
	Köpük	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	Silis kumu	0,08	0,16	0,24	0,32	0,40
Diatomit	S/Ç oranı	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Çimento	1	1	1	1	1
	Su	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Diatomit	0,32	0,36	0,40	0,44	0,48
	Köpük	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
	Silis kumu	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16
Köpük	S/Ç oranı	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Çimento	1	1	1	1	1
	Su	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75
	Diatomit	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
	Köpük	0,06	0,08	0,10	0,12	0,14
	Silis kumu	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16

Bu dört tasarım sonucu karar verilen optimum malzemelerle köpük beton üretimi yapılarak basınç dayanımı, birim hacim ağırlığı, su emme, ısı iletkenlik, yanıcılık ve ısı geçirgenlik özelliklerini belirlemektir.

### 3.2.2. Temin edilen malzemelerin hazırlanması

Etüv kurusu diatomit kumu 4 mm elekten geçecek seviyeye gelene kadar ezilmiştir. Bu işlem bittikten sonra diatomit 4 mm'lik elekten geçirilerek 0-4 mm arası malzeme elde edilmiştir. Elde edilen malzeme deneylerde kullanılmıştır



Resim 3.2. Diatomitin eleme işlemi

### 3.2.3. Köpüğün üretilmesi

Köpük üretmek için köpük pompası ve hava kompresörü bağlantı elemanları hava kaçağı olmadan birbirine bağlanmalıdır. Üretici firma, pompanın tankına ilave edilen su hacminin %2'si oranında köpük ajanı önermektedir. 2 litre su ile pompanın tankına 40 gram köpük ajanı eklenmiş ve 3 bar hava basıncı uygulanmıştır. Köpük ortalama  $85 \text{ g/dm}^3$  yoğunluğa sahiptir. Köpüğün içinde aşırı hava olması, birim hacim kütesini ve basınç dayanımını azaltmaktadır.



Resim 3.3. Üretilen köpük

### 3.2.4. Köpük betonun üretilmesi

Köpük beton karışım tasarımlarında, katı malzemeler belirli miktarda su ile karıştırılarak bulamaç haline getirilir. Bulamacın içine önceden hazırlanmış köpük miktarı eklenir ve uygun hızda harç karma mikseriyle köpüğü kırmadan karıştırılır. Ardından marshal hunisi ile köpüğün vizkozitesi ölçülür. Homojen olarak hazırlanan köpük harcı, viskozitesi belirlendikten sonra 100 x 100 x 100 mm'lik kalıplara yerleştirilmiştir. Çizelge 3.6'ya göre her dört tasarım serisi için beş tane 100 x 100 x 100 mm küp numunesi hazırlanmıştır. Araştırmada en uygun karışım oranları 4 tasarım sonucunda elde edilecektir. Bu karışım malzeme oranlarıyla köpük betonun fiziksel, mekanik ve termik özelliklerinin belirlenmesi için numuneler hazırlanacaktır. Numunelerin kalıptan kolay çıkarılabilmesi için kalıplar yağlanmıştır. Numunelerde herhangi bir çökme gözlenmemiştir. Numunelerin dış ortamdan etkilenmemesi için kalıpların üzerleri naylonla örtülmüştür. Elde edilen numunelerin yapısının bozulmaması için yedi gün kalıpta bekletilmiş daha sonra kalıptan çıkarılmıştır. Numuneler kalıpta kaldığı sürece nemli bir bez aracılığıyla kürlenmiştir. Hazırlanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımının birim hacim kütlelerine oranları ölçülmüştür. Tasarımlarda en uygun değerleri veren oranlar optimum oran olarak belirlenmiştir.



Resim 3.4. Köpük beton üretimi

### 3.2.5. Deneysel yöntemler ve uygulamalar

Bu araştırmada bütün deneysel alışmalar Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri ve Beton Laboratuvarlarında yapılmıştır.

#### Kıvam tayini deneyi

Köpük betonun kıvam tayin için marsh hunisi kullanılmıştır. Huninin boyutları Çizelge 3.7 'da verilmiştir. Deneyin yapıldığı laboratuvarın ortam sıcaklığı ortalama olarak  $22 \pm 2$  °C dir. Köpük beton harcı huniye doldurularak 1 dakika içerisinde alttaki 1 litrelik hazneye akması gözlenmiştir. Bu gözlem süresince akış hızı ve akışın sürekliliği kayıt altına alınmıştır.

Çizelge 3.7. KB harcının akış süresine göre sınıflandırılması (Demir ve diğerleri, 2017)

Ana sınıflar	Tanımlamalar	Alt sınıflar	Açıklamalar	Marsh hunisi
1	1 lt < 1 dak	A	Sabit/düzenli akış durumu	
2	1 dak < Akış < 2 dak	B	Kesikli akış durumu	
3	0,5 lt < Akış < 1 lt	C	Hafifçe sıkıştırma ile akışın tamamlanması	
4	Akış < 0,5 lt	-	Sadece 1. ve 2. sınıflar	
5	Akış yok	-		

#### Birim hacim kütlenin tespiti

Birim hacim kütlenin tayininde, TS EN 12390-7(2019) Beton - Sertleşmiş beton deneyleri - Bölüm 7: Sertleşmiş betonun birim hacim kütlesinin tayini” standardına göre yapılmıştır.

Deneyde 100 x 100 x 100 mm' lik numuneler kullanılmıştır. Birim hacim kütlenin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$d = m/V$  formülü ile hesaplanmaktadır. Burada;

d: Numunenin yoğunluğu ya da birim hacim kütesidir ( $kg/m^3$ ).

m: Deneyde kullanılan numunenin kütesidir (kg).

V: Deneylerde kullanılan numunenin hacmidir ( $m^3$ ).

### Basınç dayanım tespiti

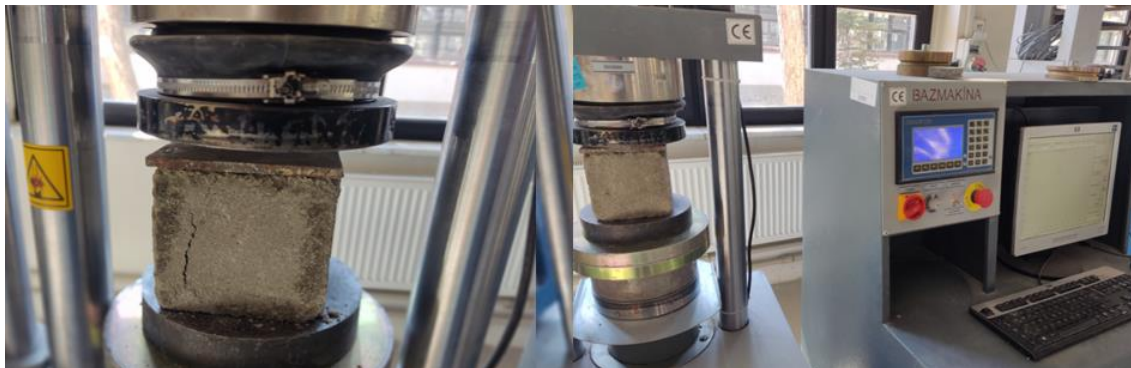
Basınç dayanım testinde, “TS EN 12390-3(2019) Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini” göre yapılarak 7 ve 28. günlerdeki dayanımları belirlenmiştir. Resim 3.6 araştırmada 100 x 100 x 100 mm' lik numuneler kullanılmıştır. Basınç dayanımı hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır.

$f_c = \frac{F}{A_c}$  formülü ile hesaplanmaktadır. Burada:

$f_c$ : Beton deney numunesi basınç dayanımıdır (MPa).

F: Kırılma yüküdür (N).

$A_c$ : Uygulama yönüne dik olacak şekilde deney numunesinin ortalama kesit alanı ( $mm^2$ ).



Resim 3.5. Deney presi ve numunelerin testi

### Ultras ses geçiş hızı tespit deneyi

Ultras ses geçiş hızı tespiti testinde, ‘‘TS EN 12504-4(2021) Yapılarda Beton Deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini’’ standardı esas alınarak 28. günlerdeki numuneler üzerinde direk yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Deneyde 100 x 100 x 100 mm' lik numuneler kullanılmıştır. Resim 3.6 Pundit aletiyle ultras ses geçiş hızı cihazı kullanılmıştır. Ultras ses hesaplamasında punditten ses geçiş süresi t mikro saniye (μ) saniye olarak okunur. Bu süre aşağıdaki eşitlikte yerine konularak hız (V) m/s cinsinden hesaplanır. Ultras ses geçiş hızı için bağıntı;

$$V = \left(\frac{S}{t}\right) \times 10^6$$

V: Ultras ses geçiş hızıdır (m/s).

S: Alıcı ve verici problar arası uzaklıktır (m).

t: Geçiş sresidir ( s).



Resim 3.6. Ultras ses geçiş süresinin tespiti

### Su emme ve boşluk oranının tespiti

Su emme ve boşluk oranının belirlenmesinde ‘‘TS EN 480-11(2008) Kimyasal Katkılar - Beton, Harç ve şerbet için - Deney Metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş betonda hava boşluğu özelliklerinin tayini’’ standardı esas alınarak 28 günlük hava etüv kurusu 100x100x100 mm

boyutlarındaki numuneler üzerinde yapılmıştır. Numunelerinin su emme değerleri ve boşluk oranları hesaplanmasında aşağıdaki bağıntısı kullanılmıştır.

$$m_{\text{su emme}} = ((M_{\text{doygun}} - M_{\text{kuru}}) / M_{\text{kuru}}) \times 100 \text{ Burada;}$$

$m_{\text{su emme}}$ : Su emme oranı ( %).

$M_{\text{kuru}}$ : Numunenin kuru kütleisidir (g).

$M_{\text{doygun}}$ : Numunenin suya doymuş kütleisidir (g).

Boşluk oranı bağıntısı;

$$P_{\text{b.o}}(\%) = V_{\text{boşluk}} / V_{\text{numune}}$$

$P_{\text{b.o}}$ : Boşluk oranı(%).

$V_{\text{boşluk}}$ : Boşluk hacmi ( $\text{cm}^3$ ).

$V_{\text{numune}}$ : Numune hacmi ( $\text{cm}^3$ ), ( $1000 \text{ cm}^3$  alınacaktır).

Suyun yoğunluğu ya da birim hacim kütleis  $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$  olduğuna göre;

$$V_{\text{boşluk}} = (M_{\text{doygun}} - M_{\text{kuru}}) / \rho \text{ ise } P_{\text{b.o}} = V_{\text{boşluk}} / V_{\text{numune}}$$

ya da formülü daha da sadeleştirilirse  $\rho = 1$  ve  $V_{\text{numune}} = 1000$  ise

$$P_{\text{b.o}} = (M_{\text{doygun}} - M_{\text{kuru}}) / 1000 \text{ bulunmaktadır.}$$

### Kapiler su emme hızının tayini

Köpük betonun kapiler su emme hızının tayininde “TS EN 772-11(2012) Kâgir Birimler - Deneysel Metotları - Bölüm 11: Betondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kâgir birimlerde kapiler su emme ve kil kâgir birimlerde ilk su emme hızının tayini” esas alınarak 28. günlerdeki numuneler üzerinde belirlenmiştir. Malzemenin her yüzünden yukarı doğru bu kılcallık olayı gerçekleşebilir. Örneğin, bu kılcallık sayesinde duvarda bulunan nem yükselebilir. Kılcallık deneyi (kapiler su emme) bu durumu incelemektedir (Şimşek,2020).

Numunelerin suya temas edecekleri yüzeylerin yan taraflarının su emmesi için 5 cm silikonla geçirimsiz hale getirilmiştir. Resim 3.7’de numunelerin alt yüzeyleri suya temas edecek şekilde önceden hazırlanmış aparat üzerine yerleştirilir. Her 5 dakikada bir ıslak numune hassas terazide tartılır. Bu işlem su emme durumu sabitleninceye kadar sürdürülür. Kapiler su emme değerleri aşağıdaki bağıntılara göre hesaplanmaktadır.

$C_{w,s} = (m_{so,s} - m_{dry,s} / A_s \times \sqrt{t}) \times 10^6$  (g / m<sup>2</sup>xs<sup>0,5</sup>). Burada;

$C_{w,s}$ : Kılcallık (kapiller su emme) katsayısıdır.

$m_{so,s}$ : Numunenin t süre suya temas ettikten sonraki kütlesi (g).

$m_{dry,s}$ : Numunenin kurutulduktan sonraki kütlesi (g).

$A_s$ : Numunenin suya temas eden yüzeyinin alanı (mm<sup>2</sup>).

t: Numunenin suya temas etme süresi (s).

Suya temas ettirilme süresinin karekökü ile ( $m_{so,s} - m_{dry,s} / A_s$ ) değerleri grafikte işaretlenmek suretiyle grafik çizilmektedir. Ayrıca grafiğin başlangıcındaki doğrusal parçanın eğimi  $C_{w,s}$  'i vermektedir.

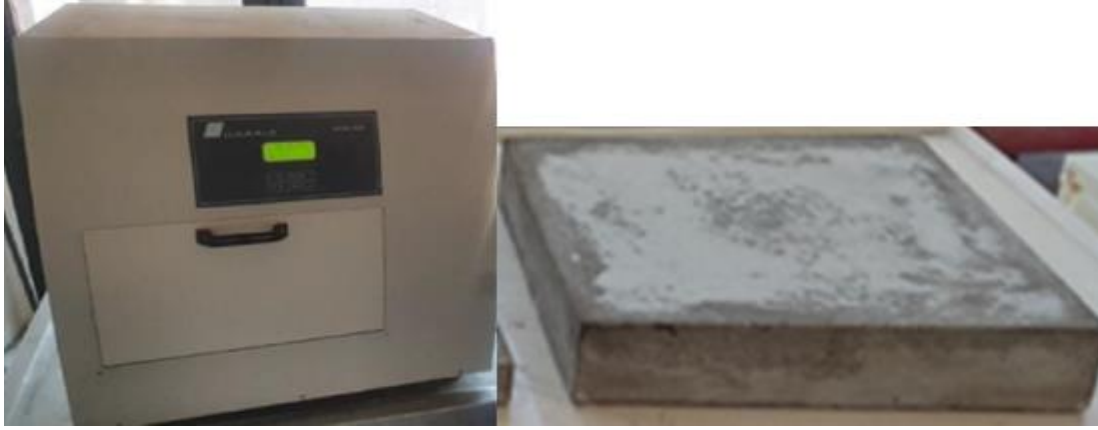


Resim 3.7. Numunelerin su içinde bekletilmesi

### Termal iletkenlik özelliklerinin belirlenmesi

Termal iletkenlik özelliklerinin TS EN 12664(2001) Yapı malzemeleri ve mamulleri - ısıl direncin, korumalı tablalı ısıtıcı ve ısı akı ölçerin kullanıldığı metotlarla tayini - ısıl direnci orta ve düşük seviyede olan kuru ve rutubetli mamuller” standardı esas alınarak 300x300x50 mm boyutunda örnekler üretilerek yapılmıştır. Bu plaka numuneler “TS ISO 8301(2015) Isı yalıtımı - kararlı halde ısıl direncin ve ilgili özelliklerin tayini - ısı akış tayini için metotlar” standartlarına göre köpük beton numuneleri 24 saat etüvde bekletilerek ısı iletim katsayıları tespit edilmiştir. Yapılarda kullanılan malzemelerin termal iletkenliği, malzemenin cinsine, içerisinde bulunan boşluklara, boşlukların miktarına ve büyüklüklerine, içindeki nem

miktarına ve birim hacim kütlesine bağlıdır (Koru,2017).Termal iletkenlik katsayısı hesaplanırken “LINSEIS HFM300”test cihazından yararlanılmıştır.



Resim 3.8. Termal iletkenlik ölçüm cihazı ve 300x300x50 mm deney numunesi

#### Yanıcılık ve ısı geçirgenliği testi

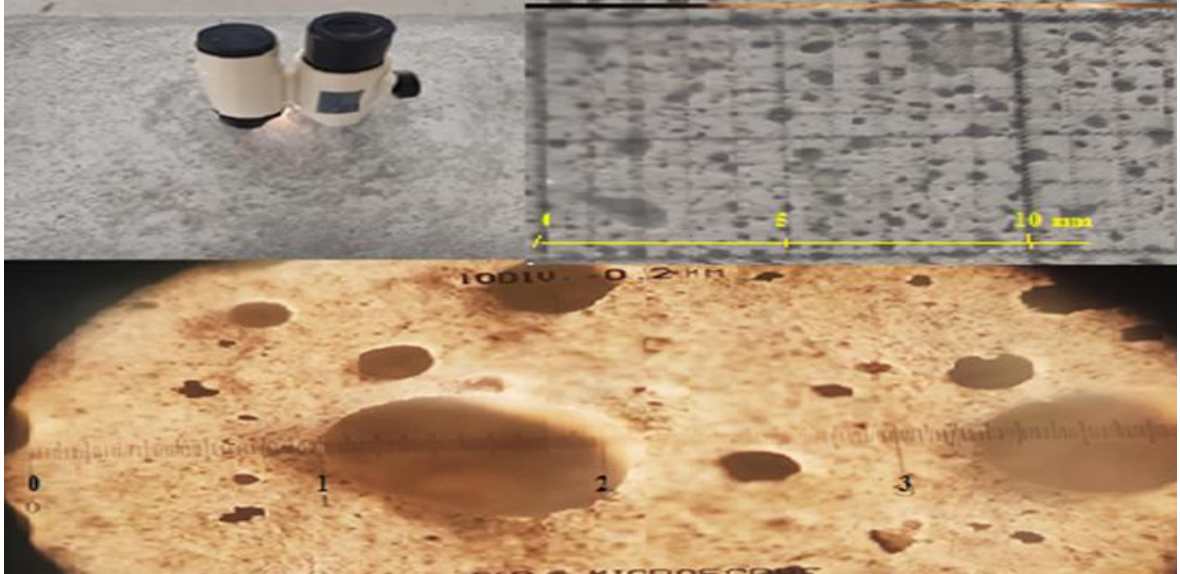
300x300x50mm boyutlarındaki köpük beton levhaların bir yüzeyine yaklaşık 1300 °C'lik bir sıcaklık uygulanmış ve arka yüzeydeki sıcaklık değişimi on dakika boyunca bir ısı ölçer ile ölçülmüştür. Yaklaşık 1300 °C'lik bir sıcaklık oluşturabilen bir alev tabancası, ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Deneyde, ısı kaynağı (alev tabancası) köpük beton levhalardan eşit mesafelerde yerleştirilmiştir. Alev tabancası açıldıktan sonra, sıcaklık değişimleri bir termometre ile ısı kaynağının temas ettiği ön yüzeyden ve plakanın arka yüzeyinden aynı yönde birer dakikalık aralıklarla ölçülmüştür. Arka yüzeydeki sıcaklık değişimi on dakika boyunca ölçülmüş ve kaydedilmiştir. Deney sonunda tutuşma ve yanma koşulları gözlemlenerek kayıt altına alınmıştır. Köpük beton levhaların yüksek sıcaklıklarda termal geçirgenlik ve yanma koşullarının etkileri ısı geçirgenliği testiyle test edilmiştir (Gökçe ve Toklu, 2021).



Resim 3.9. Alev tabancası ve termometre

### Makro boşlukların ve gözenekli yapının incelenmesi

Köpük betonun boşlukların ve gözenekli yapının çatlak mikroskobu ile incelenmesi için büyütme gücü 40x'e kadar olan çatlak mikroskobu kullanılmıştır. 40x büyütmeyle numunelerin boşluk yapısı incelenmiştir. Ayrıca milimetrik aydınlatma kağıdıyla da genel boşluk dağılımı incelenmiştir.

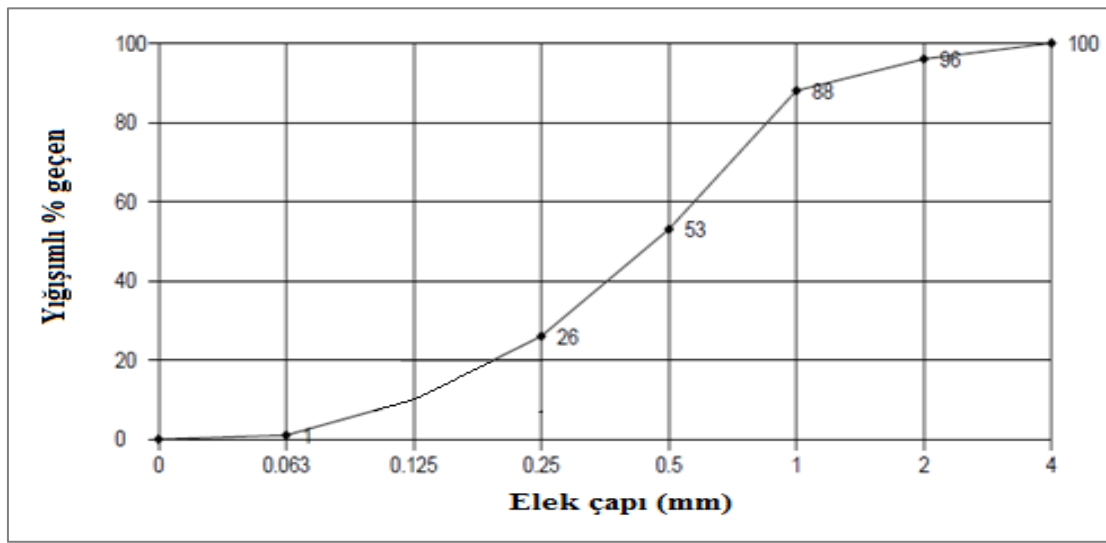


Resim 3.10. İncelemede kullanılan mikroskop ve boşluk yapısı

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Diatomitin Tane Kullanımı

Diatomitin etüv kurusu haldeki numunenin elek analizi ve tane dağılımı eğrisi Şekil 4.1’de görülmektedir. Diatomitin %53’ü 0,5 mm boyutundan küçük iken %47’si ise 0,5 mm’ den büyüktür. Kısaca kullanılan diatomit oldukça incedir. Bu durumda yüzey alanı fazla olacağından dolayı su emmeyi de dahada artıracığı düşünülmektedir.



Şekil 4.1. Diatomitin tane dağılımı

### 4.2. Köpük Beton Karışımlarında Optimum Oranların Belirlenmesi

#### 4.2.1. Optimum S/Ç oranının belirlenmesi

Taze köpük beton harcının kıvamının saptamasında Marsh hunisi yöntemi kullanılmıştır. Özellikle S/Ç oranının seçilmesinde köpük betonun akış süresi ve akış şekli literatüre göre uygun olması esas alınmıştır. Çizelge 4.1’ de görüldüğü gibi 5 farklı S/Ç oranına ile hazırlanan taze köpük betonun akış hızı ölçümü değerleri verilmiştir. S/Ç oranı 0,60 olan harcın kıvamı çok yoğun olduğu için huniden geçmediği gözlenmiş ve herhangi bir ölçüm alınamamıştır. S/Ç oranı 0,65; 0,70 oranıyla üretilen köpük betonun hunisinden geçiş süresi sırasıyla 100 ve 85 saniye iken akış şeklinin kesikli aktığını görülmüştür. Karışıma giren su artırılarak S/Ç oranı 0,75 çıkarıldığında köpük betonun huniden geçiş süresi 54 saniye olmakta iken akış da süreklilik göstermiştir. Daha da emin olmak için karışıma giren su

aynı oranda artırılarak S/Ç oranı 0,80 çıkarıldığında köpük betonun huniden geçiş süresi 45 saniye olmakta iken akışta süreklilik göstermiştir. Karışıma katılan su oranı arttıkça harcın akışkanlığı artmış ve geçiş süresi bir dakikanın altına düşmüştür. Su miktarının artması ile kıvamın akışı süreklilik gösterirken köpük betonun kalıplamasında problemler meydana gelmiştir. Köpük beton forumunu koruyamamıştır. Köpük betonda kısmen çökmeler olduğu görülmüştür. Buda köpük betonun birim hacim kütlelerini etkilemektedir.

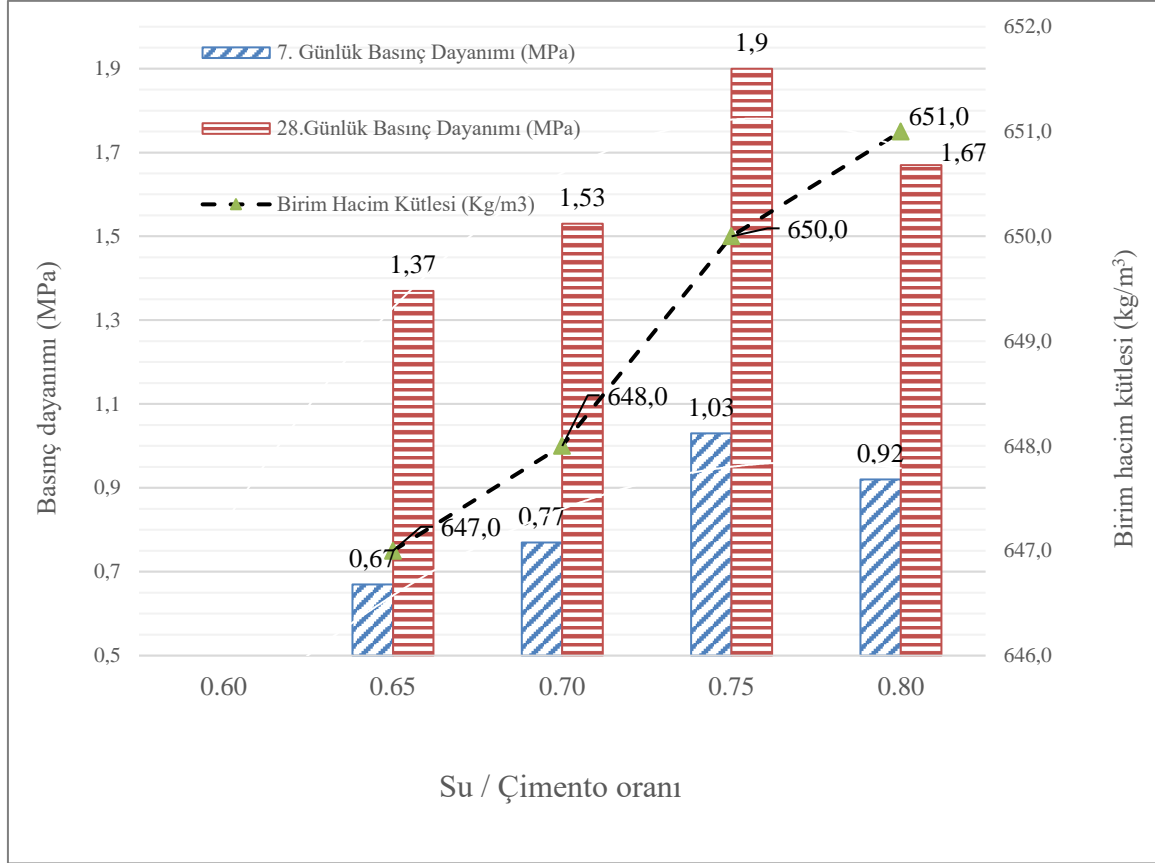
Çizelge 4.1. Optimum S/Ç oranının belirlenmesi ve köpük betonun özellikleri

Taze köpük beton karışım oranları						Sertleşmiş köpük betonun teknik özellikleri										
Değişken	Silis kumu	Diatomit	Köpük	Akış süresi	Akma sınıfı	Numune	Birim hacim kütle	Basınç Dayanımı (MPa)						Basınç dayanımı / Birim hacim kütle		
								7 günlük			28 günlük					
S/Ç	%	%	%	Saniye	Akış şekli		kg/m <sup>3</sup>	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{s}$	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{s}$	$\sigma/\delta$
0,80	0	0,40	0,10	45	Sürekli	3	651	0,92	0,7	1,0	0,150	1,67	1,4	1,9	0,252	0,0026
0,75				54	Sürekli	3	650	1,03	0,9	1,2	0,152	1,90	1,7	2,1	0,200	0,0029
0,70				85	Kesikli	3	648	0,77	0,6	0,9	0,153	1,53	1,3	1,7	0,208	0,0024
0,65				100	Kesikli	3	647	0,67	0,5	0,8	0,153	1,37	1,1	1,6	0,252	0,0021
0,6				-	Akış yok	3	'	'	'	'	'	'	'	'	'	'

Min.=Minimum değer  
Max.=Maksimum değer  
 $\bar{s}$ =Standart sapma  
 $\bar{x}$ =Aritmetik ortalama

S/Ç oranıyla üretilen köpük beton numunelerinin birim hacim kütleleri 647 ile 651 kg/m<sup>3</sup> arasında değişiklik göstermiştir. S/Ç oranının köpük betonun birim hacim kütleleri üzerine önemli bir etkisi olmadığını söyleyebiliriz. En büyük birim hacim kütle ile en küçük birim hacim kütle arasında 4 kg/m<sup>3</sup> 'lük bir fark vardır. Köpük betonun 7.gün ve 28. gün basınç

dayanımı incelendiğinde doğal olarak 28 günlük basınç dayanımları daha yüksektir. 7 günlük basınç dayanımı en düşük S/Ç oranı 0,65 olan karışımla üretilen örneklerde 0,67 MPa olur iken, en yüksek basınç dayanımı S/Ç oranı 0,75 olan karışımla üretilen köpük beton örneklerinden 1,03 MPa elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarında en düşük ve en yüksek basınç dayanım 7 günlük basınç dayanımına paralellik göstermiştir. S/Ç oranı 0,65 ile üretilen köpük betonun basınç dayanımı 1,37 MPa olarak saptanır iken, en yüksek basınç dayanımı S/Ç oranı 0,75 olan karışımla üretilen köpük beton örneklerinden 1,90 MPa elde edilmiştir. Bütün S/Ç oranlarıyla yapılan çalışmalar sonunda üretilen köpük beton numunelerinin basınç dayanımlarının birim hacim kütlelerine bölünmesiyle edilen birim hacme gelen, basınç gerilmesi optimum S/Ç oranını vermektedir. Çizelge 4.1 incelendiğinde optimum oran 0,0029 sonucunu veren S/Ç oranı 0,75 olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.2 incelendiğinde ise S/Ç oranı arttıkça birim hacim kütle artmaktadır, fakat bu artış miktarı oldukça düşüktür  $4 \text{ kg/m}^3$  civarındadır. S/Ç oranının birim hacim kütlesi üzerine önemli bir etkisi olduğunu söylemek zordur. S/Ç oranı 0,60 olan tasarımda Marsh hunisinde akış görülmemiştir ve böylece bu S/Ç oranıyla numune üretilmemiştir. Taze köpük betonda düşük S/Ç oranı ile üretilen karışımları kalıplara yerleştirmede problem yaşanırken, S/Ç oranı 0,80 olan tasarımda ise kalıplanan köpük betonların kalıplanmasında az da olsa göçmeler meydana geldiği gözlenmiştir. Basınç dayanımı analiz edildiğinde ise S/Ç oranı arttıkça basınç dayanımında 0,80' e kadar artış görülmekte, 0,80' de ise %12 oranda azalma olmuştur. En yüksek artış 0,75 S/Ç oranıyla üretilen köpük beton numunelerinde görülmüştür. Bu tasarımla üretilen numunelerin aritmetik ortalama basınç dayanımının (1,90 MPa) birim hacim kütle ortalamasına ( $650 \text{ kg/m}^3$ ) bölünmesi sonucu en yüksek (0,0029) katsayı elde edilmiştir. Sonuç olarak bu malzeme oranlarıyla üretilen köpük betonun optimum S/Ç oranının 0,75 olduğunu söylemek olasıdır.



Şekil 4.2. Köpük betonun basınç dayanımı ve birim hacim kütlesi- S/Ç oranı ilişkisi

#### 4.2.2. Optimum silis kumu oranının belirlenmesi

Optimum silis kumu oranının belirlenmesinde, Çizelge 4.2 'de görüldüğü gibi optimum olarak belirlen S/Ç oranı 0,75 ve değişken silis kumu, çimento ağırlığının % 8 oranıyla başlanarak %16, 32, 36 ve 40 oranlarıyla hazırlanmış 5 farklı taze köpük beton üretilmiş ve bu taze betonun akış hızı ve akış şekli incelenmiştir. Silis kumu % 8 oranıyla üretilen taze köpük betonun akış hızı 57 saniye ve akışı süreklilik göstermiştir. Silis kumu taze betonun akış hızı süresini azaltmıştır. Optimum S/Ç oranı 0,75 'te akış süresi 54 saniye iken silis kumu ilave edilmesiyle bu hızın 57 saniye olması kıvamın azaldığını göstermiştir. Karışımdaki silis kumu % 16 oranına çıkarıldığında akış hızı 60 saniyeye ulaşmış ve akış şekli süreklilik göstermiştir. Karışım tasarımlarında sadece değişken silis kumu olduğu için silis kum oranı arttıkça karışımdaki su gereksinimi artacağından akış süresi artması doğaldır. Karışımdaki silis kumu % 24 oranına çıkarıldığında akış hızı 63 saniye ulaşmış ve akış şeklinde kesiklik gözlenmiştir. Karışım tasarımına giren silis kum oranı arttıkça karışımdaki su gereksiniminde artış olacağından dolayı geçiş süresi artmıştır. Karışımdaki silis kumu % 32 ve % 40 oranına çıkarıldığında akış hızı 69 ve 72 saniyeye ulaşmıştır. Karışım

tasarımlarında sadece değişken silis kumu artışı olması doğal olarak su gereksinimi artacağından akış süresinin artması doğaldır.

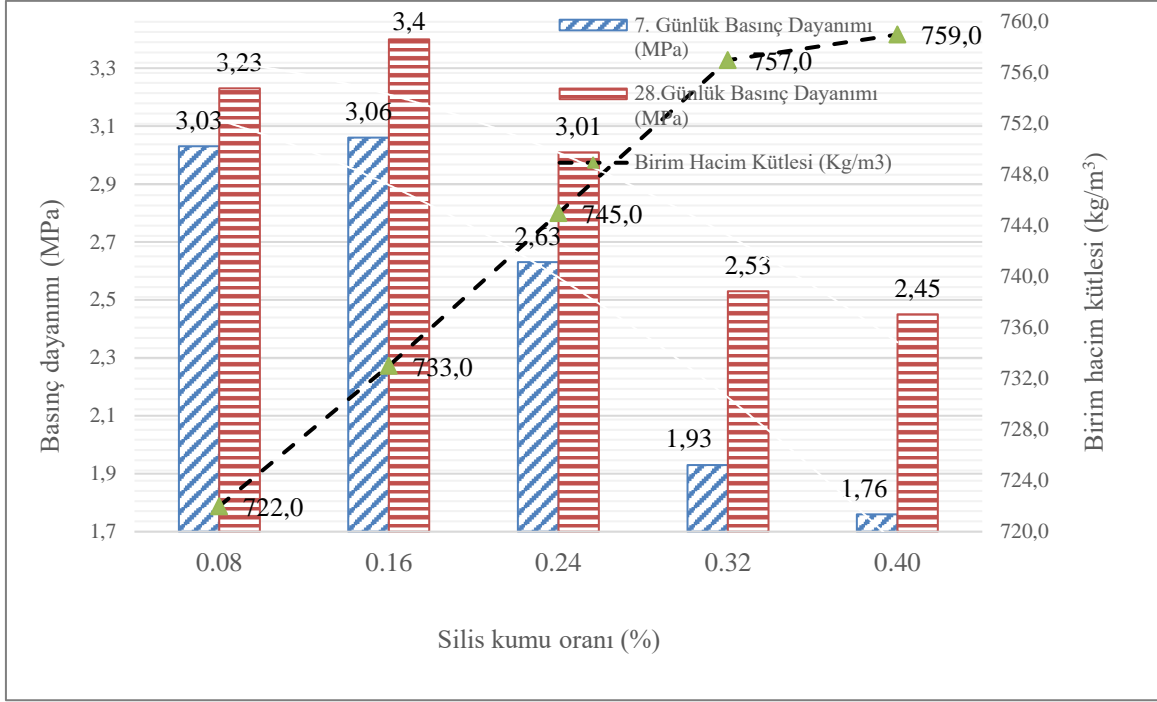
Çizelge 4.2. Optimum silis kumu oranının belirlenmesi ve köpük betonun özellikleri

Taze köpük beton karışım oranları						Sertleşmiş köpük betonun teknik özellikleri										
Değişken silis kumu	Su/Çimento	Diatomit	Köpük	Akış süresi	Akma sınıfı	Numune	Birim hacim kütle	Basınç Dayanımı (MPa)						Basınç dayanımı / Birim hacim kütle		
								7 günlük			28 günlük					
%	S/Ç	%	%	Saniye	Akış şekli		kg/m <sup>3</sup>	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{s}$	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{s}$	$\sigma/\delta$
0,08	0,75	0,40	0,10	57	Sürekli	3	722	3,03	2,8	3,4	0,321	3,23	3,1	3,4	0,53	0,0045
0,16				60	Sürekli	3	733	3,06	2,7	3,6	0,473	3,40	2,9	3,9	0,500	0,0046
0,24				63	Kesikli	3	745	2,63	1,5	2,9	0,115	3,01	2,8	3,0	0,252	0,0040
0,32				69	Kesikli	3	757	1,93	1,4	2,2	0,416	2,53	2,3	2,7	0,208	0,0033
0,40				72	Kesikli	3	759	1,76	1,60	1,8	0,153	2,43	2,2	2,6	0,208	0,0032

Min.=Minimum değer  
Max.=Maksimum değer  
 $\bar{s}$ =Standart sapma  
 $\bar{x}$ =Aritmetik ortalama

S/Ç oranıyla üretilen köpük betonun numunelerin birim hacim kütleleri 647 ila 651 kg/m<sup>3</sup> arasında değişiklik gösterirken silis kumu ile üretilen köpük betonun numunelerin birim hacim kütleleri 722 ila 759 kg/m<sup>3</sup> arasındadır. Silis kumu oranının köpük betonun birim hacim kütlesi üzerine etkisi olduğu görülmektedir. En büyük birim hacim kütleleri %40 silis kumu ile üretilen numunelerde bulunurken en küçük birim hacim kütle % 8 silis kumu ile üretilen numuneler arasında 37 kg/m<sup>3</sup> bir fark vardır. Köpük betonun 7.gün ve 28. gün basınç dayanımı incelendiğinde silis kumu oranı ile basınç dayanımı arasında parabolik bir ilişki olduğu söylenebilir. Silis kumu

oranıyla üretilen numuneler kendi içinde değerlendirildiğinde, en yüksek basınç dayanımı %16 oranıyla silis kumuyla üretilen köpük beton numunelerinde görülmüştür. En düşük basınç dayanımı ise %40 silis kumu oranıyla üretilen numunelerde bulunmuştur. 7 günlük basınç dayanımı en düşük silis kumu oranı % 40 olan karışımla üretilen örneklerde 1,76 MPa olurken, en yüksek basınç dayanımı silis kum oranı % 16 olan karışımla üretilen köpük beton örneklerinden 3,06 MPa elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımlarının en düşük ve en yüksek basınç dayanımı, 7 günlük basınç dayanımlarına oldukça yakın olduğu görülmüştür. Silis kumu oranı %40 ile üretilen köpük betonun basınç dayanımı 2,43 MPa olarak saptanırken, en yüksek basınç dayanımı silis kumu oranı %16 olan karışımla üretilen köpük beton örneklerinden 3,40 MPa elde edilmiştir. Silis kumu oranıyla yapılan köpük beton numunelerinin basınç dayanımlarını birim hacim kütlelerine bölünmesiyle edilen katsayılar Çizelge 4.2’de verilmektedir. Çizelge 4.2 incelendiğinde optimum oran 0,0046 sonucunu veren silis kumu oranı % 16 olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.3 incelendiğinde ise silis kumu oranı arttıkça birim hacim kütle artmaktadır, çünkü yoğunluk olarak diğer bileşenlere göre çimentodan sonra en yüksek köpük beton bileşenidir. Basınç dayanımı analiz edildiğinde ise silis kumu oranı arttıkça basınç dayanımında % 16'ya kadar artış görülmekte ve %16’dan sonra kademeli olarak azalmaktadır. Basınç dayanımlarının 0,16’ ya kadar artması ve bu değerden sonra azalma göstermesi malzeme miktarının artmasına bağlı olarak ilave malzemelerin çimentonun yerini almasından kaynaklanmıştır. Sonuç olarak bu malzeme oranlarıyla köpük beton üretiminde optimum silis kumu oranı %16’dır.



Şekil 4.3. Basınç dayanımı ve birim hacim kütlesi- silis kumu oranı ilişkisi

#### 4.2.3. Optimum diatomit oranının belirlenmesi

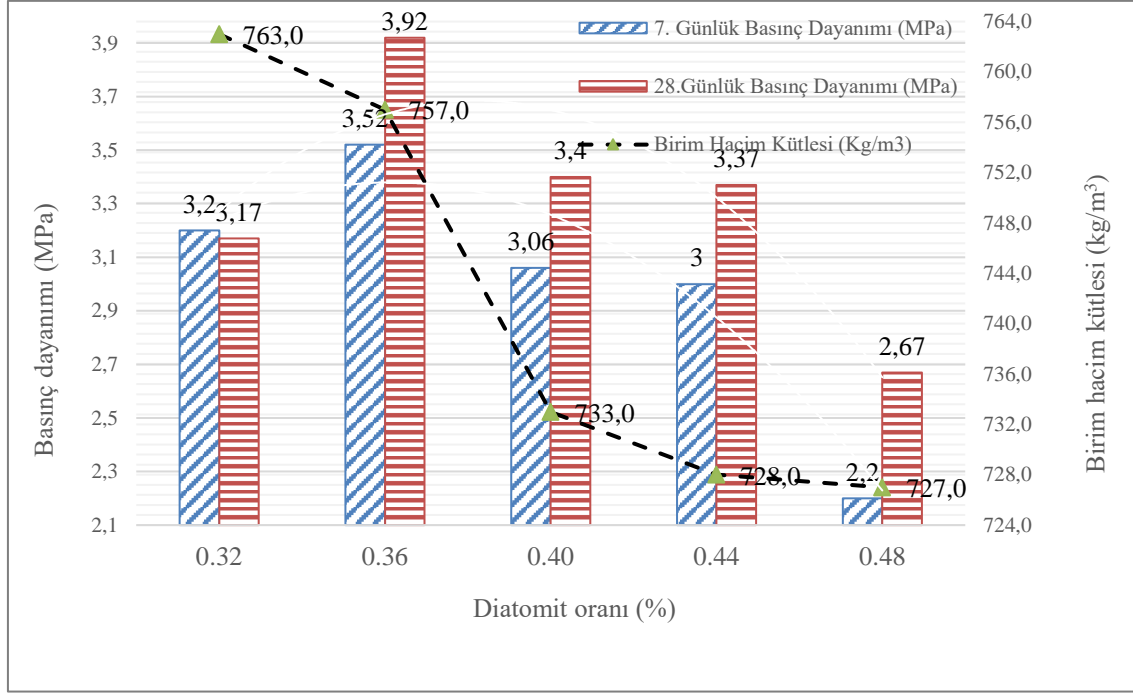
Optimum olarak belirlen S/Ç (0,75) ve silis kumu oranı (% 16) sabit tutularak değişken olarak diatomit alınmıştır. İlk karışımlarda diatomit oranı % 40 olarak alınmıştır. Bu oranın % 4 iki alt ve iki üst oranlarıyla olmak üzere 5 farklı (% 32, 36, 40, 44 ve 48 ) tasarım yapılarak en yüksek, basınç dayanımı/birim hacim kütle ( $\sigma/\delta$ ) oranını bulmak için tasarımlar yapılmıştır. Diatomit % 32 oranıyla üretilen taze köpük betonun akış hızı 48 saniye ve akış süreklilik göstermiştir. Şekil 4.4'te diatomit oranı ile taze betonun akış hızı süresi paralellik göstermiştir. Diatomit oranı arttıkça akış hızı süresi artmıştır. Optimum S/Ç oranında 0,75 'te akış süresi 54 saniye iken %16 oranı silis kumu ilave edince bu hız 57 saniye olmuş, diatomit %32 oranı üretilen taze köpük betonun kıvamının akış süresi 48 saniye olduğu saptanmıştır. Karışımdaki diatomit %48 oranı ile üretilen taze köpük betonun kıvamının akış süresi 72 saniye olduğu saptanmıştır. Çizelge 4.3 ve Şekil 4.4'te görüldüğü gibi diatomit oranı arttıkça akışın geçme süresi doğrusal olarak artarken akma şekli sürekliden kesikliye dönmüştür. Bu tasarımda birim hacim kütleler 727 ile 763 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmiş, basınç dayanımları 7 günlüklerde 2,20 ile 3,52 MPa arasında iken, 28 günlüklerde ise 2,67 ile 3,92 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. 0,36 oranından sonraki oranlarda basınç dayanımı düşüş göstermiştir. Bunun nedeni malzeme miktarının artmasına bağlı olarak ilave malzemelerin çimentonun yerini almasından kaynaklanmaktadır. Şekil 4.4

incelendiğinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının en düşüğü diatomit oranı %48 olan karışımla üretilen numunelerde olur iken, en yüksek basınç dayanımları diatomit oranı % 36 olan karışımla üretilen köpük beton örneklerinden elde edilmiştir. Diatomit oranıyla yapılan köpük beton numunelerinin basınç dayanımlarının birim hacim kütlelerine bölünmesiyle edilen katsayıları Çizelge 4.3 vermektedir. Çizelge 4.3 incelendiğinde optimum oran 0,0052 sonucunu veren diatomit oranı % 36 olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.4 incelenip analiz edildiğinde diatomit oranı artıkça birim hacim kütle azalmaktadır, çünkü yoğunluk olarak diğer bileşenlere göre en düşük köpük beton bileşenidir. Sonuç olarak bu malzeme oranlarıyla köpük beton üretiminde optimum diatomit oranı % 36' dır.

Çizelge 4.3. Optimum diatomit oranının belirlenmesi ve köpük betonun özellikleri

Taze köpük beton karışım oranları						Sertleşmiş köpük betonun teknik özellikleri										
Değişken Diatomit	Su/Çimento oranı	Süls kumu	Köpük	Akış süresi	Akma sınıfı	Numune	Birim hacim	Basınç Dayanımı (MPa)								Basınç dayanımı / Birim hacim
								7 günlük				28 günlük				
%	S/Ç	%	%	Saniye	Akış şekli		kg/m <sup>3</sup>	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{s}$	$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{s}$	$\sigma/\delta$
0,32	0,75	0,16	0,10	48	Sürekli	3	763	3,2	3,5	4,1	0,819	3,17	3,1	3,8	0,929	0,0042
0,36				53	Sürekli	3	757	3,52	3,5	3,8	0,265	3,92	3,8	4,27	0,503	0,0052
0,40				60	Sürekli	3	733	3,06	2,72	3,6	0,473	3,40	2,9	3,9	0,500	0,0046
0,44				66	Kesikli	3	728	3,0	2,8	3,2	0,200	3,37	3,2	3,5	0,153	0,0046
0,48				72	Kesikli	3	727	2,2	2,0	2,3	0,173	2,67	2,4	2,8	0,208	0,0037

Min.=Minimum değer  
Max.=Maksimum değer  
 $\bar{s}$ =Standart sapma  
 $\bar{x}$ =Aritmetik ortalama



Şekil 4.4. Köpük betonun basınç dayanımı ve birim hacim kütlesi- diatomit oranı ilişkisi

Karışım tasarımlarında değişkenin diatomit olması ve diatomitin hafif ve gözenekli yapıya sahip olmasından dolayı normal olarak su gereksinimi artacağından akış süresinin artması doğaldır. Diatomitin karakteristik özelliğinden dolayı karıştırılması, kalıplanması ve şeklini muhafaza etmesi, birim hacim kütle ve basınç dayanımı üzerine etkili olduğu düşünülmektedir. Bunun nedeni ise diatomit malzemesinin su emiciliğinin fazla olması ve malzemenin tanelerinin dağılma özelliğinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

#### 4.2.4. Optimum köpük oranının belirlenmesi

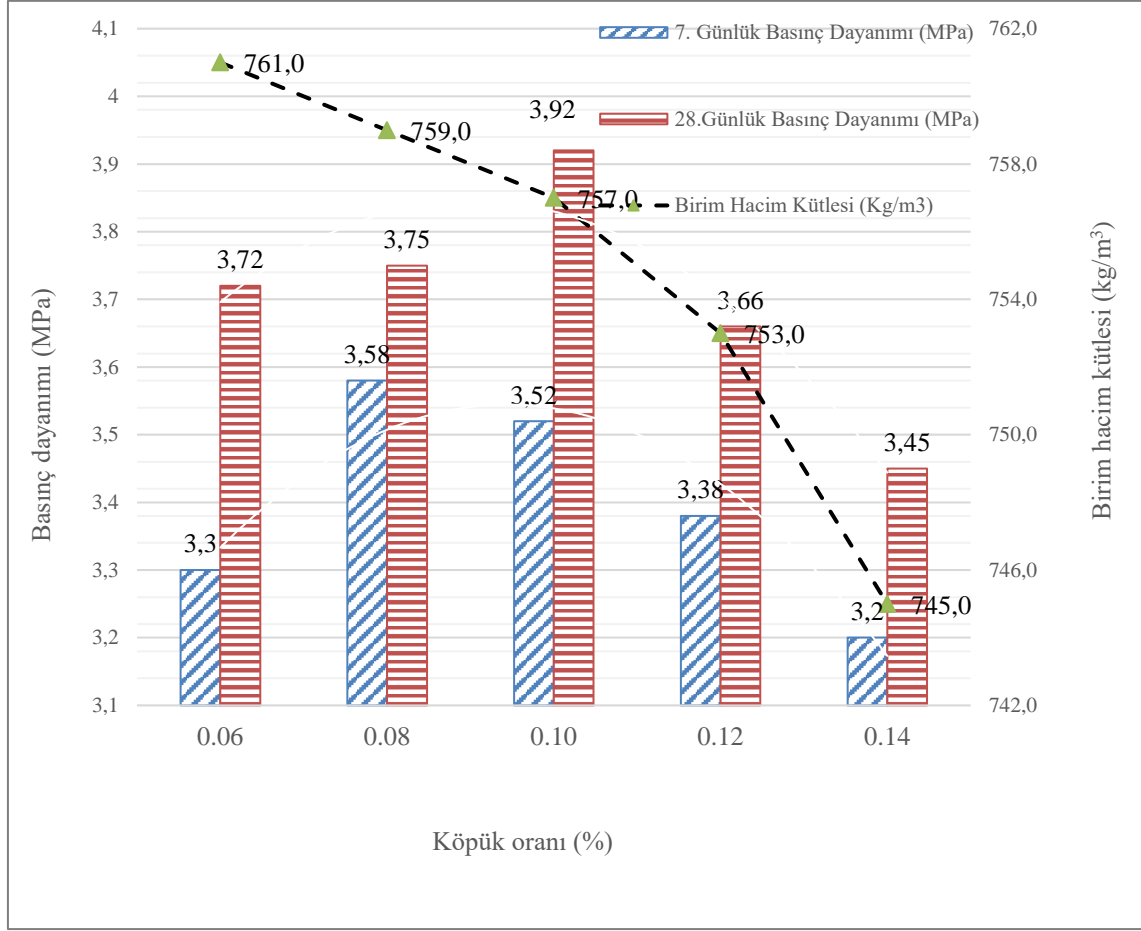
Köpük beton üretiminde optimum köpük oranının belirlenmesinde, optimum oranları belirleyen bileşenlerden; S/Ç (0,75), silis kumu oranı (%16) ve diatomit oranı (%36) sabit tutularak değişken olarak köpük oranı alınmıştır. Köpük beton üretiminde ilk karışımlarından itibaren köpük oranı % 10 olarak alınmıştır, bunun için bu oranın % 2 iki alt ve iki üst oranlarıyla olmak üzere 5 farklı (%6, 8, 10, 12 ve 14) tasarım yapılarak en yüksek basınç dayanımı / birim hacim kütle ( $\sigma/\delta$ ) oranını bulmak için tasarımlar yapılmıştır. Köpük beton üretiminde köpük ana ve etkili bir bileşendir. Bundan dolayı köpük oranları arttıkça taze betonun akış hızı artmış ve akış şekli süreklilik göstermiştir. Köpük %6 oranıyla üretilen taze köpük betonun akış hızı 66 saniye ve akış kesiklik göstermiştir. Şekil 4.5'te Köpük oranı ile taze betonun akış hızı süresi ters ilişki göstermiştir. Karışımdaki köpük %6 oranı ile üretilen taze

köpük betonun kıvamının akış süresi 66 saniye olduğu saptanmıştır. Çizelge 4.4 ve Şekil 4.5'te görüldüğü gibi köpük oranı arttıkça akışın süresi doğrusal olarak azalmış akma şekli süreklilik göstermiştir. Çizelge 4.4'te köpük oranı tasarımlarında birim hacim kütle 745 ile 761 kg/m<sup>3</sup> arasında değişmiş, basınç dayanımları 7 günlüklerde 3,20 ile 3,58 MPa arasında iken, 28 günlüklerde ise 3,45 ile 3,92 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. Şekil 4.5 incelendiğinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının en düşüğü köpük oranı %14 olan karışımla üretilen numunelerde olurken, en yüksek basınç dayanımları diatomit oranı % 10 olan karışımla üretilen köpük beton örneklerinden elde edilmiştir. Köpük beton numunelerinin basınç dayanımlarının birim hacim kütleyle bölünmesiyle edilen katsayıları Çizelge 4.4 vermektedir. Çizelge 4.4 incelendiğinde optimum oran 0,0052 sonucunu veren köpük oranı %10 olarak tespit edilmiştir. Şekil 4.5 incelenip analiz edildiğinde köpük oranı arttıkça birim hacim kütle azalmaktadır, çünkü yoğunluk olarak diğer bileşenlere göre en düşük köpük beton bileşenidir. Sonuç olarak bu malzeme oranlarıyla köpük beton üretiminde optimum köpük oranı % 10' dur.

Çizelge 4.4. Optimum köpük oranının belirlenmesi ve köpük betonun özellikleri

Taze köpük beton karışım oranları				Sertleşmiş köpük betonun teknik özellikleri												
Değişken Köpük	Su /çimento oranı	Diatomit	Silis kumu	Akış süresi	Akma sınıfı	Numune	Birim hacim kütle	Basınç Dayanımı (MPa)					Basınç dayanımı / Birim hacim kütle			
%	S/Ç	%	%	Saniye	Akış şekli		kg/m <sup>3</sup>	7 günlük			28 günlük			σ/δ		
								$\bar{x}$	Min.	Max.	$\bar{s}$	$\bar{x}$	Min.		Max.	$\bar{s}$
0,14	0,75	0,36	0,16	34	Sürekli	3	745	3,2	2,8	3,5	0,173	3,45	3,5	3,6	0,18	0,0046
0,12				42	Sürekli	3	753	3,38	3,2	3,3	0,058	3,66	3,7	4,0	0,13	0,0049
0,10				53	Sürekli	3	757	3,52	3,5	3,8	0,265	3,92	3,8	4,27	0,503	0,0052
0,08				60	Sürekli	3	759	3,58	3,5	3,8	0,152	3,75	3,6	3,9	0,503	0,0049
0,06				66	Kesikli	3	761	3,18	3,1	3,3	0,179	3,72	3,1	3,8	0,120	0,0048

Min.=Minimum değer  
Max.=Maksimum değer  
 $\bar{s}$ =Standart sapma  
 $\bar{x}$ =Aritmetik ortalama



Şekil 4.5. Köpük betonun basınç dayanımı ve birim hacim kütlesi- köpük oranı ilişkisi

### 4.3. Optimum Karışım Oranlarıyla Hazırlanan Köpük Betonun Teknik Özellikleri

Köpük beton bileşim elamanlarının farklı denemelerle belirlenen çimento ağırlığına bağlı olarak optimum karışım oranları Çizelge 4.5' te verilmiştir. Bu karışım oranlarıyla üretilen köpük beton örnekleri üzerinde 7 ve 28 günlük basınç dayanımı, kuru birim hacim kütlesi, suya doymun birim hacim kütlesi, su emme %'si, boşluk oranı, ultrases geçiş hızı, kapiler su emmesi, ısı iletkenlik ve yangın direnci özellikleri araştırılmıştır.

Çizelge 4.5. Çimento ağırlığının optimum % karışım oranları

S/Ç	Çimento (%)	Su (%)	Diatomit (%)	Silis kumu (%)	Köpük (%)
0,75	1	0,75	0,36	0,16	0,10

Çizelge 4.6. Optimum numunelere ait özellikler

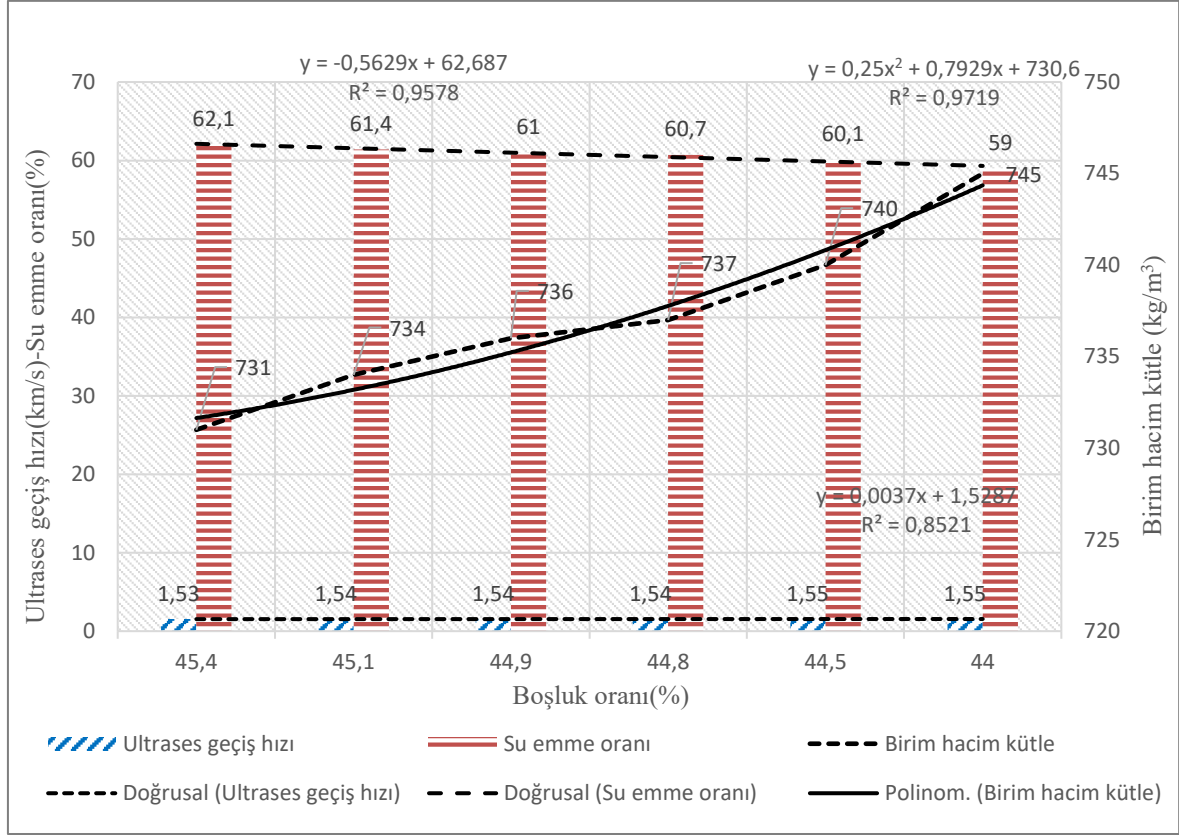
statistiksel	Kuru b.h.k	7 günlük basınç dayanımı	28 günlük basınç dayanımı	Su emme	Boşluk oranı	Ultrases geçiş hızı	Isıl iletkenlik numunelerinin birim hacim kütleli	Numunelerin ısı iletkenlik katsayısı
	(kg/m <sup>3</sup> )	(MPa)	(MPa)	(%)	(%)	(km/s)	(kg/m <sup>3</sup> )	(W/mK)
Max.	745	3,40	3,80	62,1	45,4	1,55	756	0,160
Min.	731	3,22	3,49	59,0	44,0	1,53	736	0,155
$\bar{x}$	737,17	3,29	3,64	60,7	44,8	1,54	746	0,157
$\bar{s}$	4,875	0,063	0,116	1,076	0,488	0,008	8,093	0,002
Min.=Minimum değer Max..=Maksimum değer $\bar{s}$ =Standart sapma $\bar{x}$ =Aritmetik ortalama								

Belirlenen optimum malzeme oranlarıyla mekanik, fiziksel özellikler için 6'şar adet 100\*100\*100 mm'lik küp numune üretilirken ısı ve yangın özelliklerini belirlemek için 5'er adet 300\*300\*50 mm boyutlarında plak numune üretilmiştir. Üretilen numuneler optimum köpük beton bileşenlerindeki kalıp sökme ve kür yöntemi kullanılmıştır. Optimum malzeme oranıyla üretilen köpük beton numuneler üzerinde yapılan deney sonuçları Çizelge 4.6' da verilmiştir. Çizelge 4.6 incelenip analiz edildiğinde, köpük betonun kuru birim hacim kütlelerinin aritmetik ortalaması 737,17 kg/m<sup>3</sup> ve standart sapması ise 4,875 olarak bulunmuştur. Ortalama su emmesi % 60,7 olarak hesaplanmıştır. Çizelge 4.6 incelendiğinde maksimum kuru birim hacim kütle 745 kg/m<sup>3</sup>, minimum kuru birim hacim kütle 731 kg/m<sup>3</sup> bulunmuştur. Birim hacim kütle azaldıkça su emme oranı ters orantılı olarak artış göstermektedir. Bu durum boşluk oranının fazla olması ile birim hacim kütlelerinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Boşluk ile su emme arasında doğrusal bir ilişki olduğu bilindiği için su emme oranı yüksek olan numunelerde boşluk oranı daha yüksektir.

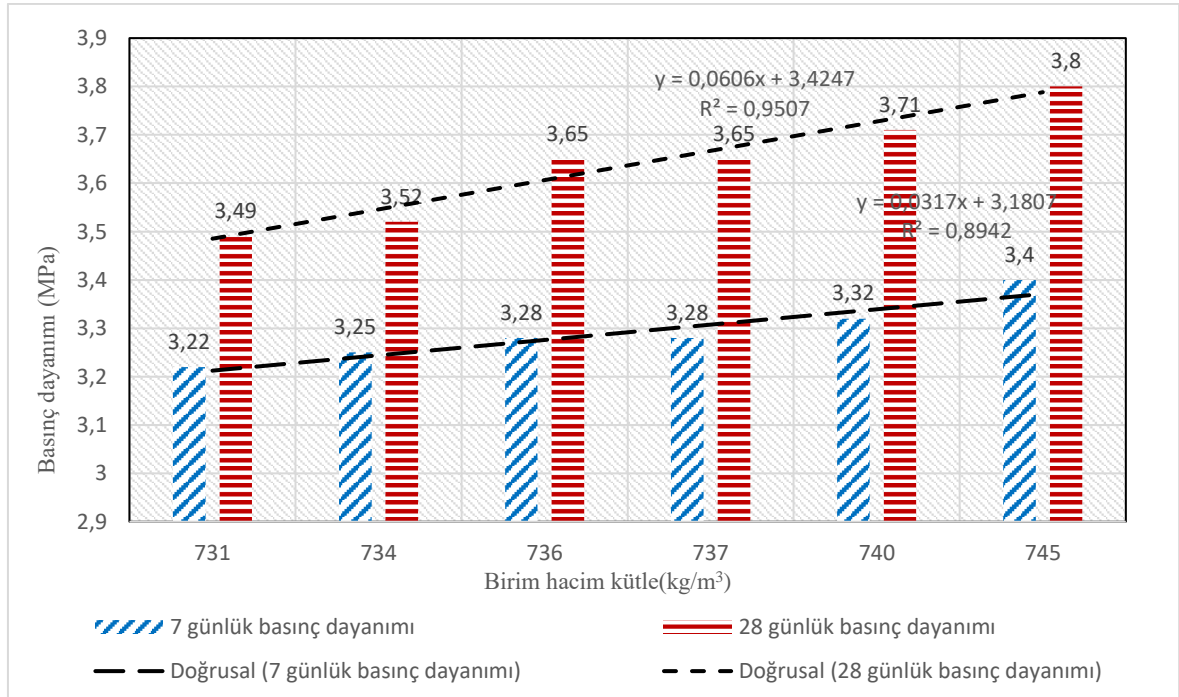
Ultrases geçiş hızı ortalaması 1,54 km/s'dir. Boşluk miktarı 4,0'dan-4,8'e arttıkça ultrases hızında azalmalar meydana gelmektedir. Literatürde ultrases ile yapılan çalışmalar incelendiğinde diatomit katkılı yapılan bu çalışmadaki ultrases hız değerlerinin diğer

çalışmalardaki değerlere göre daha küçük değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir. Diatomit malzemesinin köpük betonun ses yalıtım özelliğine olumlu yönde faydası olduğu tespit edilmiştir. Birim hacim kütle ile ultrases geçiş hızı arasında bir ilişki olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 4.6 incelendiğinde en yüksek değer  $745 \text{ kg/m}^3$ -  $1,55 \text{ km/s}$ , en düşük değer  $731 \text{ kg/m}^3$ - $1,53 \text{ km/s}$  olmuş birim hacim kütle azaldıkça ultrases geçiş hızları da azalmıştır. Bu durum birim hacim kütle ile ultrases hızı arasında doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ultrasonik ses dalgalarının boşlukta değil de maddesel ortam da en hızlı yayıldığı iyi bilinmektedir. Birim hacim kütle ile hız arasındaki doğrusal ilişkiden yararlanarak birim hacim kütle ve ses hızının azalması betonun boşluklu bir yapıya sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Su emme oranı, ultrases geçiş hızı, birim hacim kütle, boşluk oranı ilişkisi Şekil 4.6'da verilmiştir.

Basınç dayanımı deneylerinde Çizelge 4.6 incelendiğinde dayanım ile birim hacim kütle arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu görülmektedir. Birim hacim kütle arttıkça basınç dayanımı artmıştır. Ayrıca dayanımın artmasında uygun bir kütleme yönteminin uygulanması da dayanım artışında olumlu etki yaratmıştır. Optimum oranlarda hazırlanmayan numunelerde basınç dayanımı birim hacim kütle artışından değil, bağımsız değişken olan malzeme oranından etkilenmiştir. Optimum miktarlar tespit edilip sabitlendiğinde birim hacim kütle doğrudan etkilenmeye başlamıştır. Doğal olarak 7 günlük basınç dayanımlarına göre 28 günlük basınç dayanımlarının yüksek olduğu görülmektedir. Basınç dayanımı birim hacim kütle ilişkisi Şekil 4.7'de verilmiştir



Şekil 4.6. Ultrases geçiş hızı-su emme oranı-birim hacim kütle-boşluk oranı ilişkisi

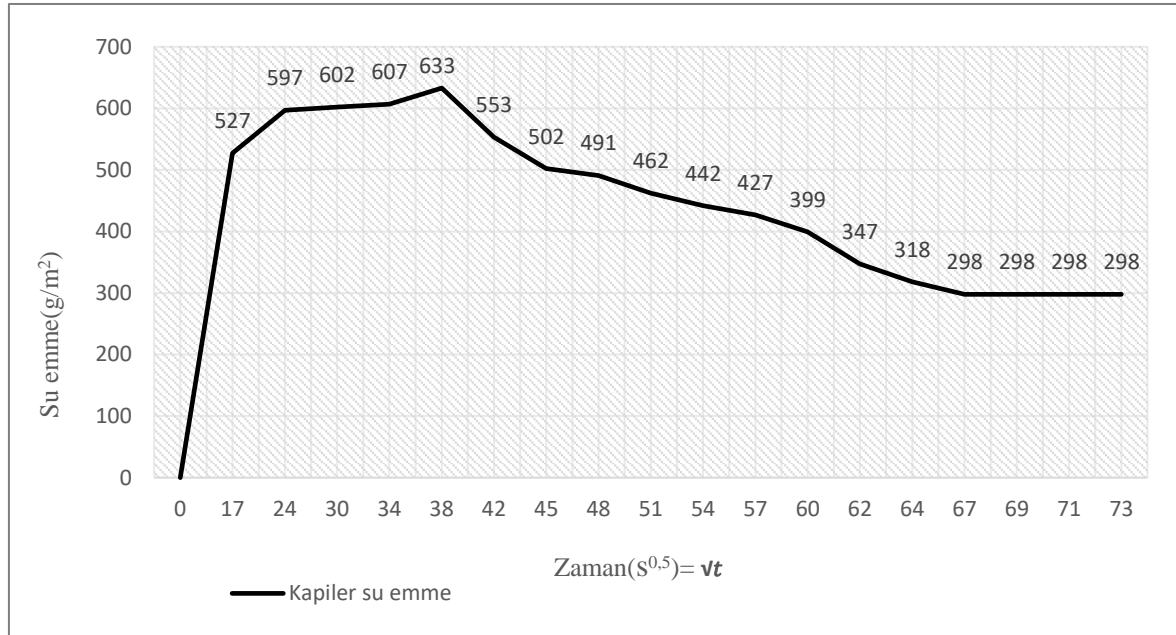


Şekil 4.7. 7 ve 28 günlük basınç dayanımı-birim hacim kütle ilişkisi

Kapilariteye ait veriler Çizelge 4.7’de verilmiştir. Numuneler 90 dakika teste tabi tutulmuştur. Testin ilk 25 dakikası numunelerin kapiler su emmesi hızlı bir artış göstermiş, 25.dakika ile 70.dakikalar arası su emme yavaşlamış, 70. dakikadan sonra sabitlemiştir. Çizelge 4.6’de görüldüğü üzere numunelerin ortalama su emme yüzdesi 60,7’dir. Bunun nedeni köpük beton içerisindeki hava boşluklarıdır. Boşluk oranı da yüzde 44,8’dir. Ayrıca 90 dakikalık kapilarite katsayısı  $2,53 \text{ g} / \text{m}^2 \text{xs}^{0,5}$  hesaplanmıştır. Kapilariteye ait grafik Şekil 4.7’de verilmiştir

Çizelge 4.7. Kapiler su emmeye ait özellikler

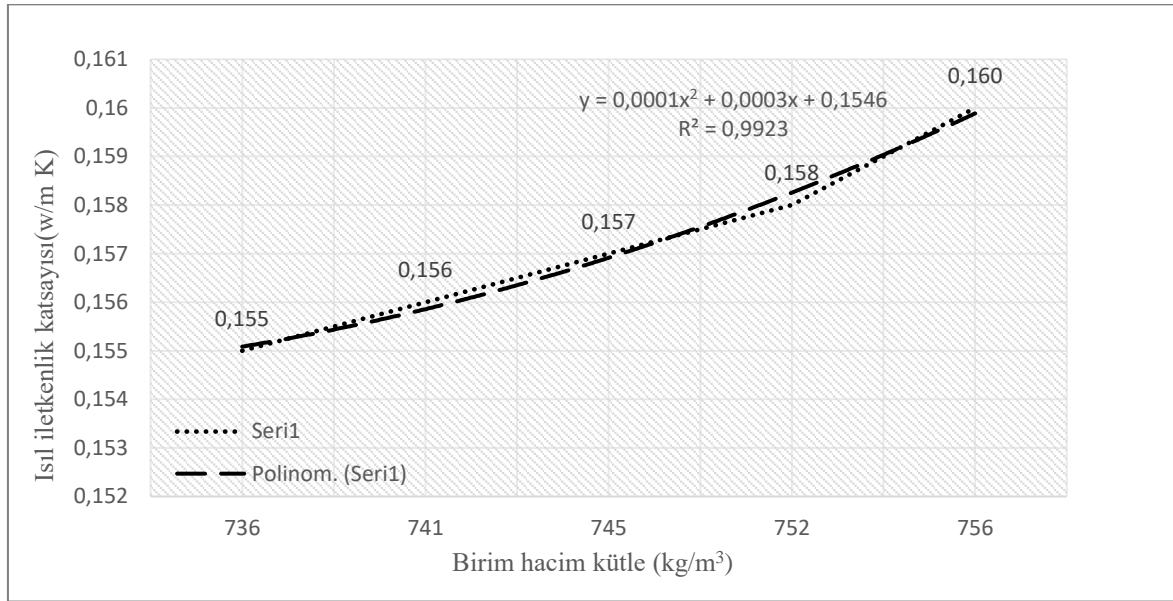
Zaman ( $\text{s}^{0,5}$ )= $\sqrt{t}$	17	24	30	34	38	42	45	48	51
Su emme ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	527	597	602	607	633	553	502	491	462
Zaman ( $\text{s}^{0,5}$ )= $\sqrt{t}$	54	57	60	62	64	67	69	71	73
Su emme ( $\text{g}/\text{m}^2$ )	442	427	399	347	318	298	298	298	298
$\sqrt{t}$ zamanı ifade eder. Örnek: 5 dk=300 s ise $\sqrt{t} = \sqrt{300}=17 \text{ s}^{0,5}$ olacaktır.									



Şekil 4.8. Kapilarite grafiği

Isıl iletkenlik katsayısı deneyinde ise birim hacim kütle ile ısı iletkenlik katsayısı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu Çizelge 4.6 incelendiğinde görülmektedir. Birim hacim kütle artması ısı iletkenlik katsayısını arttırmakta, azalması ise ısı iletkenlik katsayısını azaltmaktadır.  $736 \text{ kg}/\text{m}^3$  ile  $0,155 \text{ W}/\text{m K}$ ,  $756 \text{ kg}/\text{m}^3$  ile  $0,160 \text{ W}/\text{m K}$  olmaktadır. Ayrıca TS 825’te gaz beton için  $400 \text{ kg}/\text{m}^3$  birim hacim kütle için verilen ısı iletim katsayısı  $0,20$

W/m K' dir. 736-756 kg/m<sup>3</sup> arası birim hacim kütle için ortalama ısı iletkenlik katsayısı 0,157 W/m K'dir. Literatürdeki araştırmalar incelendiğinde bulunan sonuçlar birim hacim kütleler dikkate alındığında oldukça iyidir. Bunun en önemli nedeni diatomit malzemesinin ısı iletkenliğe olumlu katkıda bulunmuş olmasıdır. Köpük betonun çok iyi termal özelliklerinin olduğu bilinmektedir, bu özellik diatomit malzemesinin özellikleriyle birleştirildiğinde başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Isı iletkenlik katsayısı ile ilgili grafik Şekil 4.9'da verilmiştir.



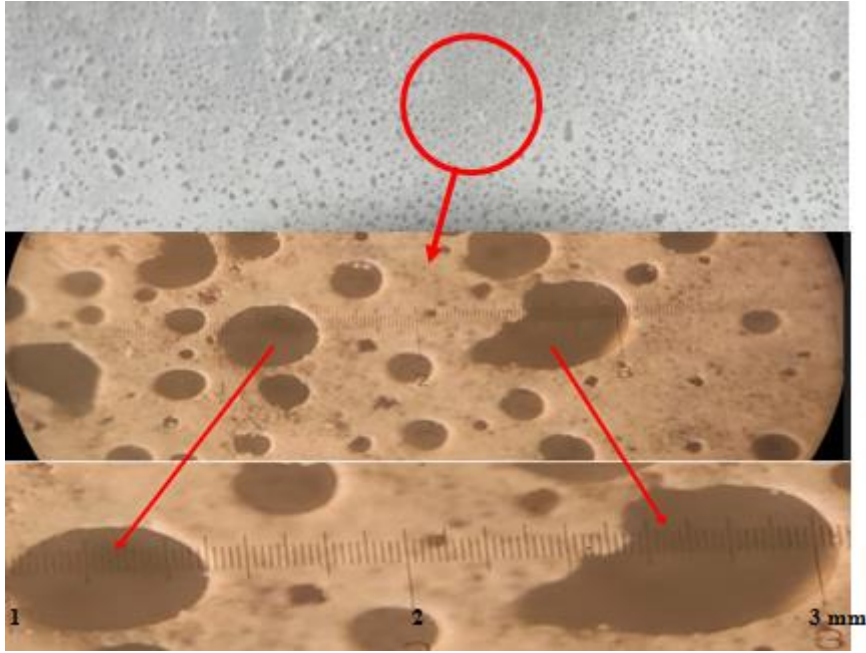
Şekil 4.9. Isı iletkenlik katsayısı- birim hacim kütle ilişkisi

Yanıcılık deneyi sonucunda deneye tabi tutulan numuneler 10 dakika boyunca 1300 °C sıcaklığa dayanıklılık göstermiştir. Numunelerde tutuşma olmamıştır. Numunelerdeki ortalama kütle kaybı % 0,9 olmuştur. Çizelge 4.8 incelendiğinde numunelerde 10 dakika boyunca sıcaklık artışı 10 °C'den daha küçük olmuştur. Numunelerde duman oluşumu, damlama, erime gibi durumlar tespit edilmemiştir. Diatomit malzemesi aynı zamanda yanmazlık özelliği iyi bir malzemedir. Bu sebeple köpük betonun yanmazlık özelliklerini geliştirmiştir.

Çizelge 4.8. 300x300x50 mm plakaların arka yüzeyindeki ortalama sıcaklık değişimleri

Sıcaklık değişimi ° C (300*300*50 mm)										
Süre(dk.)	1.dk.	2.dk.	3.dk.	4.dk.	5.dk.	6.dk.	7.dk.	8.dk.	9.dk.	10.dk.
$\bar{x}$	30,7	31,2	31,9	32,4	33,2	34,1	35,0	36,1	37,9	39,8
$\bar{x}$ =Aritmetik ortalama										

Köpük beton numunelerinin boşluk yapısı 40x büyütmeyle incelenmiştir. Çatlak mikroskopuyla yapılan incelemelerde de 1 mm' den 4' mm ye kadar boşlukların varlığı görülmüştür. Düzensiz olarak irili ve ufaklı farklı boyutlarda olan birbirinden bağımsız kapalı gözeneklerin varlığı tespit edilmiştir. Mikroskop altında yapılan incelemede bu boşluklar çok net bir şekilde görülmüştür



Resim 4.1. Köpük betonun gözenek yapısı (40x büyütmeyle)



## 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### Sonuçlar

Diatomitin köpük beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması isimli bu çalışmada şu sonuçlara ulaşılmıştır.

S/Ç oranı 0,60 olan numunelerde Marsh hunisinden akış sağlanamamıştır. S/Ç oranı 0,65'ten 0,80'e kadar akış sağlanmış, fakat akış hızı 1 dakikanın altına S/Ç oranı 0,75 ile sürekli bir akışla 54 saniyede tamamlanmıştır.

Deneyleerde S/Ç oranı yüksek çıkmıştır. S/Ç oranı arttıkça basınç dayanımı düşmüştür. 0,75'te maksimuma çıkarken 0,80' de azalma meydana gelmiştir. Birim hacim kütle ise lineer şekilde artmıştır. S/Ç oranı 0,65' te birim hacim kütle 647 kg/m<sup>3</sup>'e çıkarken 0,80' de 651 kg/m<sup>3</sup> olmuştur. Optimum oranı belirlemede kullanılan basınç dayanımı/ birim hacim kütle 0,0029 olarak S/Ç oranı 0,75' te saptanmıştır.

Silis kumu miktarı arttıkça birim hacim kütle buna paralel olarak artış göstermiştir. Silis kumu miktarı 0,08 iken birim hacim kütle 722 kg/m<sup>3</sup> çıkarken. 0,040 iken birim hacim kütle 759 kg/m<sup>3</sup> olarak bulunmuştur. Silis kumu basınç dayanımı ilişkisinde ise en yüksek basınç dayanımı 3,40 MPa veren silis kumu oranı 0,16'dır. Optimum silis kumu oranının belirlenmesinde kullanılan basınç dayanımı/birim hacim kütle 0,0046 olarak bulunmuştur.

Diatomit miktarı arttıkça birim hacim kütle azalmıştır. Diatomit miktarı 0,32 iken birim hacim kütle 763 kg/m<sup>3</sup>, 0,48 iken birim hacim kütle 722 kg/m<sup>3</sup> olmuştur. En yüksek basınç dayanımı 3,92 MPa ile 0,36 oranında tespit edilmiştir. Optimum oran ise basınç dayanımı/ birim hacim kütle 0,0052 olarak 0,36 diatomit miktarında saptanmıştır.

Köpük miktarı arttıkça birim hacim ağırlıklar azalmıştır. Optimum oran ise basınç dayanımı/ birim hacim kütle 0,0052 olarak 0,10 köpük miktarında saptanmıştır.

Optimum oranlar S/Ç 0,75, silis kumu miktarı 0,16, diatomit miktarı 0,36, köpük miktarı ise 0,10 olarak tespit edilmiştir.

Optimum oranlarla hazırlanan köpük beton numunelerinin kuru birim hacim kütleleri 737,17 kg/m<sup>3</sup>, 7 günlük basınç dayanımları 3,29 MPa, 28 günlük basınç dayanımları 3,64 MPa, ultrases geçiş hızları 1,54 km/s, su emme yüzdeleri 60,7, boşluk oranı yüzde 44,8, Isıl iletkenlik numunelerinin kuru birim hacim kütleleri 746 kg/m<sup>3</sup>, ısıl iletkenlik katsayıları 0,157 W/ m K bulunmuştur. Boşluk oranı arttıkça su emme oranı artmıştır. Ultrases geçiş hızı azalmıştır. Isıl iletkenlik katsayısı azalmıştır.

Sonuç olarak elde edilen veriler ve bulgular ışığında diatomitin köpük beton üretiminde kullanılabileceği kanaatine varılmıştır.

### Öneriler

Diatomitin köpük beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması isimli bu çalışmada şu öneriler yapılabilir.

Bundan sonraki çalışmalarda farklı oranlarda silis dumanı ve PVA lif ilavesi veya ikame yapılarak diatomitli köpük beton özellikleri incelenebilir.

İnşaat sektöründe yalıtım özeliği taşıyan doğal kaynaklara dayalı yapı malzemesi kullanarak küresel ısınma ve çevre kirliliğini önleyici yapı malzemesi kullanım alanları arttırılmalıdır.

## KAYNAKLAR

- Alduaij, J., Alshaleh, K., Haque, N. and Ellaithy, K. (1999). Lightweight concrete in hot coastal areas. *Cement and Concrete Research*, 21, 453-458.
- Al-Khaiat, H., and Haque, M.N. (1998). Effect of initial curing on early strength and physical properties of lightweight concrete. *Cement And Concrete Research*, 28, 859-866.
- Amran, Y. M., Farzadnia, N., and Ali, A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 101, 990-1005.
- Aruntaş H. Y. (1996). *Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Aruntaş H., Albayrak M., Saka H. ve Tokyay M.(1998), Ankara-Kızılcahamam ve Çankırı – Çerkeş Yöresi diyatomitlerinin özelliklerinin araştırılması. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Science*, 22, 337-343.
- Atabey, V. (2018). *Mermer atıklarından köpük beton blok üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Aydın, A. C., ve Gül, R. (2000, 1-3 Kasım). *Diyatomitin beton priz süresine etkisi*. Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Sempozyumu, Gazimağusa, KKTC, 543-556.
- Babu, K. G. and Babu, D., S. (2003). Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 33, 755-762.
- Bideci, A. (2003). *Diatomit hammaddesinin tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Bideci, A. ve Bideci, Ö. S. (2008). Diatomit hammaddesinin tuğla üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 69-76.
- Bouguerra, A., Ledhem, A., De Barquin, F., Dheilily, R. M., and Quéneudec, M. (1998). Effect of microstructure on the mechanical and thermal properties of lightweight concrete prepared from clay, cement, and wood aggregates. *Cement and Concrete Research*, 28(8), 1179-1190.
- Ceylan, H. (2005). *Farklı pomza agrega türlerinden elde edilen hafif betonun sıcaklık etkisindeki karakteristiği*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.
- Chandra, S. and Berntsson, L. (2003). *Lightweight aggregate concrete science, technology, and applications*. New York: Noyes Publications, William Andrew Publishing.
- Clarke, J. L. (1993). *Structural lightweight aggregate concrete*. Great Britain: Chapman & Hall, 54.

- Dede, H. (2019). *Köpük beton üretiminde genleştirme yönteminin deneysel yöntemlerle optimize edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Demir, İ., Başpınar, M. S. ve Kahraman, E. (2017). Köpük betonun reolojik özelliklerinin deneysel olarak incelenmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, 38(1), 109-118.
- Durgun, H. (2015). *Diatomit ve zeolit ikameli beton içerisindeki donatı korozyonunun elektrokimyasal empedans spektroskopisi (EIS) yöntemi ile incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Eliküçük, H. ve Şimşek, O. (Baskıda). Köpük beton üretiminde optimum diatomit oranının belirlenmesi. *Kırıkkale Üniversitesi Uluslararası Mühendislik ve Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, (Aralık Ayı özel sayısı) .
- Genç, S. S. (2006). *Diatomit katkılı betonların yük altındaki davranış ve kullanılabilirlik özelliklerinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuzmayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun.
- Gökçe, M., and Toklu, K. (2021). Ultra-low density foam concrete production using electrolyzed water. *Journal of Testing and Evaluation*, 50(2), 1212-1223.
- Gündüz, L., and Uğur, İ. (2005). The Effects of different fine and coarse aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures. *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1859-1864.
- Haque, M., N., Al-Khaiat, H. and Kayali, O. (2004). Strength and durability of lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 26, 307-314.
- Işıldar, N. (2023). *Silika esaslı katkıların otoklavlanmış köpük beton mühendislik özelliklerine etkilerinin araştırılması*. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- İnternet: ACI 213R-03. (2003). *Guide for structural lightweight-aggregate concrete*. Web: <https://www.concrete.org/publications/internationalconcreteabstractsportal/m/details/id/12965>, Son Erişim Tarihi: 29.04.2023.
- İnternet: ACI Committee 213R-14 (2014). *Guide for structural lightweight aggregate Concrete*, Web: [https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/213R-14\\_preview.pdf](https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/213R-14_preview.pdf), Son Erişim Tarihi: 29.04.2023.
- İnternet: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2023). *Diatomit*. Web: <https://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/diatomit>, Son Erişim Tarihi: 29.03.2024.
- İnternet: OYAK (2022). *CEM I 42,5 R Portland Çimento*. Web: <https://www.oyakcimento.com/tr/urunler/cem-i/oyak-cimentoaslauretimi/cemi-425-r/>, Son Erişim Tarihi: 30.09.2023.
- İnternet: RILEM/CEB. (1978). *Functional classification of lightweight concretes, recommendation LC I*. (Second edition). Web: <https://www.rilem.com/functional-classification-of-lightweight-concretes/> Son Erişim Tarihi: 30.09.2023.

- Jalal, M. D., Tanveer, A., Jagdeesh, K., and Ahmed, F. (2017). Foam concrete. *International Journal of Civil Engineering Research*, 8(1), 1-14.
- Kahraman E. (2024). *Köpük beton duvar panelleri üretim parametreleri*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Kalaycıoğlu, H. ve Özen, R. (2009). *Yonga levha endüstrisi ders notları*, Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi, 22-43.
- Kastis D., Kakali G., Tsivilis S., and Stamatakis M.G. (2006). Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. *Cement and Concrete Research*, 36, 1821–1826.
- Kaya, R. Z. (2017). *Krom atıklarının köpük beton yapımında agrega olarak kullanımının araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Kılıçer, A. (2018). Pomza ve genleştirilmiş perlit madenlerinin köpük betonda agrega olarak kullanılması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(3), 268-285.
- Kılınçarslan, Ş. ve Tuzlak, F. (2018). Uçucu kül katkıli köpük betonların termo-mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Uluslararası Sürdürülebilir Mühendislik ve Teknoloji Dergisi*, 2(1), 1-5.
- Kocakerimoğlu, F. (2020). *Köpük beton üretiminde farklı mineral katkıların fiziksel ve mekanik özelliklere etkisinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar.
- Kok, S. C., and Min-Hong, Z. (2002). Water permeability and chloride penetrability of high-strength lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 32, 639-645.
- Koru, M. (2017). Köpük betonun yoğunluk ve sıcaklığa bağlı ısı iletkenlik katsayısının ısı akış ölçer yöntemiyle belirlenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 614-622.
- Kurhan, M. (1969). Çankırı ili Akhasan Köyü diyatomit yatakları hakkında rapor: M.T.A. End. Hammaddeler Dairesi Arşivi Rapor, Ankara, 586.
- Lamond, J. F., and Pielert, J. (2006). *Significance of tests and properties of concrete and concrete- making materials*. London: ASTM Publication, 44-48.
- Lo, T. Y., Tang, W. C., and Cui, H. Z. (2007). The effects of aggregate properties on lightweight concrete. *Building and Environment*, 42, 3025-3029.
- Megri, A. C., Achard, G. and Haghighat, F. (1998). Using plastic waste as thermal insulation for the slab-on-grade floor and basement of a building. *Building and Environment*, 33(2-3), 97-104.
- Miled, K., Le Roy, R., Sab, K., and Boulay, C. (2004). Compressive behavior of an idealized EPS lightweight concrete: size effects and failure mode. *Mechanics of Materials*, 36(11), 1031-1046.

- Mouli, M., and Khelafi, H. (2008). Performance characteristics of lightweight aggregate concrete containing natural pozzolan. *Building and Environment*, 43(1), 31-36.
- Neville, A. M. (2000). *Properties of concrete* (4th Edition). New York: Longman, England, 51-57.
- Ören, H.O. (2017). *Granüle yüksek fırın cürufunun köpük beton özelliklerine etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın.
- Örklemez, E. (2019). *Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlarda diatomit ikamesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Özbey, G. ve Atamer, N. (1987). *Kizelgur (diatomit) hakkında bazı bilgiler*. 10. Türkiye Madencilik Bilimsel Teknik Kongresi, Ankara, 493-502.
- Özçelik, Y. (2022). *İnşaat yıkıntı atıklarının köpük beton üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Özçelik, Y. ve Şimşek, O. (2024). Köpük beton üretiminde inşaat yıkıntı atığı ince agregası kullanımı ve optimum su/çimento oranının belirlenmesi. *Politeknik Dergisi*, 27(1), 263-271.
- Özsoy, A. (2021). *Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlarda farklı sıcaklık ve NaOH oranlarında diatomit ikamesinin fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.
- Papadopoulos, A. M. (2005). State of the art in thermal insulation materials and aims for future developments. *Energy and Buildings*, 37(1), 77-86.
- Pınarcı, İ. (2022). *Diatomit ve pomza ikameli çimentoların hidrasyon reaksiyonlarının ve yüzey özelliklerinin spektroskopik yöntemlerle araştırılması*. Doktora Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Postacıoğlu, B. (1987). *Agregalar, beton* (Cilt 2). İstanbul: Teknik Kitaplar Yayınevi, 397-400.
- Ries, J. P., and Holm, T. A. (2003, January 1). *High-Performance lightweight concrete*. In Theodore W. Bremner Symposium, New York, 31-39.
- Sancak, E., and Şimşek, O. (2008, July 8-10). *Effect of high temperature on the lightweight structural pumice aggregate concrete with silica fume*. In 7th International Congress Concrete: Construction's Sustainable Option, Concrete Fire Engineering Section, Dundee, Scotland, 89-102.
- Sancak, E., Sarı, Y. D., and Şimşek, O. (2008). Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the lightweight concrete with silica fume and superplasticizer. *Cement & Concrete Composites*, 30, 715-721.

- Savaş, M. (2012). *Diatomit ve zeolit ikameli betonların kimyasal etkilere karşı davranışlarının araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- Şener, F. (1999). *Yalıtımlı hafif yapı hammaddeleri*. Enerji Tasarrufunda Jeotermal Enerjinin ve Yalıtımlı Hafif Yapı Malzemelerinin Önemi Sempozyumu, Ankara, 31-47.
- Şimşek, O. (2020). Beton ve beton teknolojisi. Ankara: Seçkin Yayıncılık, 28-35.
- Şimşek, O., Ünal, M. T., and Gökçe, H. S. (2024). Performance of foam concrete developed from construction and demolition waste. *Materials Today Sustainability*, 27, 100822.
- Taş, B. ve Çetin, M. (2012). Biyolojik orijinli tek doğal mineral: diatomit. *Tübav Bilim Dergisi*, 5(2), 28-46.
- Topçu, I. B. (1997). Semi-lightweight concretes produced by volcanic slags. *Cement and Concrete Research*, 27, 15-21.
- TS 13655 (2015). *Kagir birimler özellikler, köpük beton kagir birimler*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 11-78.
- TS 9773 (1992). *Diyatomit-Isı yalıtımında kullanılan*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 7.
- TS EN 12390-3 (2019). *Beton- sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 9-14.
- TS EN 12390-7 (2019). *Beton- Sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 7: Sertleşmiş betonun birim hacim kütlelerinin tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 22-43.
- TS EN 12504-4 (2021). *Yapılarda beton deneyleri- Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 15-19.
- TS EN 12664 (2009). *Yapı malzemeleri ve mamulleri- Isıl direncin, korumalı tablalı ısıtıcı ve ısı akı ölçerinin kullanıldığı metotlarla tayini- Isıl direnci orta ve düşük seviyede olan kuru ve rutubetli mamuller*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 11-43.
- TS EN 197-1 (2012). *Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 2-7.
- TS EN 480- 11 (2008). *Kimyasal katkıları- Beton, harç ve şerbet için-deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş betonda hava boşluğu özelliklerinin tayini*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 6-11.
- TS EN 772-11 (2011). *Betondan, gaz betondan, yapay ve doğal taştan yapılmış kagir birimlerde kapiller su emme ve kil kagir birimlerde ilk su emme hızının tayini, Kagir birimler-Deney yöntemleri-Bölüm 11*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 67.69.
- TS EN 933-1 (2012). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler bölüm 1: tane büyüklüğü dağılımının tayini- eleme yöntemi*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 5-9.

- TS EN ISO 1182 (2010). *Yapı mamullerinin yangın deneylerine tepkisi-Tutuşmazlık deneyi*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 9-12.
- TS ISO 8301/A1 (2015). *Isı yalıtımı- Kararlı halde ısı direncin ve ilgili özelliklerin tayini-Isı akış tayini için metotlar*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 4.18.
- TSE 825 (2013). *Binalarda ısı yalıtım kuralları*. Ankara: Türk Standartları Enstitüsü, 6-12.
- Tuzlak, F. (2017). *Taze beton reolojisinin köpük beton özelliklerine etsinin incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Ünal, O. ve Uygunoğlu, T. (2007). Diatomitin hafif beton üretiminde kullanılması. *Teknik Dergi*, 18(86), 4025-4034.
- Yakupoğlu, U. (2023). *Diatomit ve bingöl andezitinin geopolimer kompozit üretiminde kullanılabilirliği*. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Yanardağ, B. (2020). *Kalsiyum alüminat çimentolu köpük beton tasarımı mühendislik özelliklerinin belirlenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Yarar, G. (2021). *Kalsiyum alüminat çimentolarının köpük beton üretiminde bazalt lif ile kullanımının incelenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kastamonu.
- Yaşar, Ö. (2016). *Su Yalıtım malzemesinin doğal puzolanlar ve endüstriyel atık malzemeler kullanılarak geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Yazarel, S. (2016). *Diatomit katkılı sıva harcının tarımsal yapılarda kullanılabilme olanakları*. Yüksek Lisans Tezi, Gaziosmanpaşa Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tokat.
- Yılmaz B., Ediz N. ve Bentli İ. (2006). An investigation into the use of clay bearing diatomites of Kutahya Alayunt region in cement production. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, (12), 95-104.
- Yılmaz, B., and Ediz, N. (2008). The use of raw and calcined diatomite in cement production. *Cement & Concrete Composites*, 30, 202–211.
- Yılmaz, M., Gökhanoglu, B.H., Alparslan, G., ve Özgan, Y.M.(2021). Köpük beton hakkında inceleme. *Sürdürülebilir Mühendislik Uygulamaları ve Teknolojik Gelişmeler Dergisi*, 4(1), 16-21.







*Gazili olmak ayrıcalıktır*