**T.C.**
**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

# ATIK MERMER TOZU VE PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ KATKILI KÖPÜK BETONLARIN MEKANİK VE BAZI DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

**WIAM ABDELMAGİD TAHER ELABADE**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR**

**MAYIS - 2021**
**KASTAMONU**

## TEZ ONAYI

**WIAM ABDELMAGİD TAHER ELABADE** tarafından hazırlanan "**ATIK MERMER TOZU VE PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ KATKILI KÖPÜK BETONLARIN MEKANİK VE BAZI DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ**" adlı tez çalışmasının savunma sınavı **28.05.2021** tarihinde yapılmış olup aşağıda verilen jüri tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

| | | |
|---|---|---|
| **Danışman** | Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR<br>Kastamonu Üniversitesi | ..... |
| **Jüri Üyesi** | Prof. Dr. Hasbi YAPRAK<br>Kastamonu Üniversitesi | ..... |
| **Jüri Üyesi** | Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN<br>Atatürk Üniversitesi | ..... |

Jüri üyeleri tarafından kabul edilmiş olan bu tez Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulunca onanmıştır.

Enstitü Müdürü Prof. Dr. İzzet ŞENER .....

**TAAHHÜTNAME**

***Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu; ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını, bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini bildirir ve taahhüt ederim.***

Wıam Abdelmagid Taher ELABADE

İmza

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

## ATIK MERMER TOZU VE PİRİNÇ KABUĞU KÜLÜ KATKILI KÖPÜK BETONLARIN MEKANİK VE BAZI DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

**WIAM ABDELMAGİD TAHER ELABADE**

**KASTAMONU ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
**MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**DANIŞMAN: DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR**

Çimento ikamesi olarak pirinç kabuğu külünün (PK) ve kum ikamesi olarak atık mermer tozunun (AMT) yüksek sıcaklık ve donma-çözülme döngülerine maruz kalan köpüklü betonun mikroyapısal, mekanik ve taşıma özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için deneysel bir program gerçekleştirilmiştir. Bunun için, Sıradan Portland Çimentosu (PÇ), %10 ve ağırlıkça %20 bağlayıcıda PK ile değiştirildi ve silika kumu, köpük beton karışımlarını dökmek için ağırlıkça %25 ve ince agregaların ağırlıkça %50'sinde AMT ile değiştirildi. 0,70 su/çimento (s/ç) oranına sahip köpük betonların üretiminde 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ olmak üzere iki farklı köpük içeriği kullanılmıştır. Her köpük içeriğinde ince agregalar olarak kullanılan ve PK içermeyen silika kumunun kullanıldığı iki referans karışımı geliştirilmiştir. Diğer köpük karışımlar, ince agregalar olarak AMT ve çimento ikamesi olarak PK ile üretildi. Karışımların taze özellikleri çökme testi yapılarak değerlendirildi. 90 günlük kürlemeden sonra porozite, su emme ve kapilarite dahil olmak üzere köpük betonların taşıma özellikleri araştırılmıştır. 7, 28 ve 90 gün sonra basınç ve eğilme dayanımı ultrases geçiş hızı (UGH) dahil olmak üzere köpük betonların mekanik özellikleri araştırılmıştır. Beton numunelerin ısıl iletkenliği ve kuruma büzülmesi 90 gün sonra incelenmiştir. Köpük betonların yüksek sıcaklık ve donma-çözülme (D-Ç) dayanıklılıkları sırasıyla 200, 400, 600 ve 800°C ve 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonra mikroyapı incelemelerine ek olarak incelenmiştir. Sonuçlar, çimento ikamesi olarak %10 PK ve kum ikamesi olarak %50 AMT'nin 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde özellikle 90 günlük geç yaşlarda optimum yüzdeyi verdiğini göstermektedir. En düşük kuruma büzülmesi ve kapilarite, %10 PK ve %25 AMT kullanılarak elde edildi. Sonuçlar ayrıca su ile soğutulan numunelerin 200°C sonra hava ile soğutulan numunelere göre daha fazla mukavemet kaybı gösterdiğini de göstermektedir.

**ANAHTAR KELİMELER:** Köpük beton, atık mermer tozu, pirinç kabuğu külü, fiziksel-mekanik özellikler.

Mayıs 2021, 103 Sayfa

# ABSTRACT

## MSC THESIS

## MECHANICAL AND SOME DURABILITY CHARACTERISTICS OF WASTE MARBLE POWDER AND RICE SHELL ASH ADDED FOAM CONCRETE

**WIAM ABDELMAGİD TAHER ELABADE**

**KASTAMONU UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE**
**DEPARTMENT OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING**

**SUPERVISOR:ASSİST. PROF. DR. OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR**

An experimental program was performed to evaluate the impact of rice husk ash (RHA) as cement replacement and waste marble powder (WMP) as sand replacement on the microstructural, mechanical and transport properties of foamed concrete exposed to high temperature and freeze-thaw cycles. For this, Ordinary Portland Cement (OPC) was replaced by RHA at 10% and 20%wt of binder and silica sand was replaced by WMP at 25% and 50%wt of fine aggregates to cast foamed concrete mixtures. Two different foam contents of 40 kg/m 3 and 80 kg/m 3 were used in the production of foamed concretes with water/binder (w/b) ratio of 0.70. Two reference mixtures in which silica sand used as fine aggregates and containing no RHA were developed at each foam content. Other foamed mixtures were produced with WMP as fine aggregates and RHA as cement replacement. Fresh properties of mixtures were evaluated by performing yayılma çapı test. Transport properties of foam concretes were investigated, including porosity, water absorption and sorptivity after 90 days curing. Mechanical properties of foam concretes were investigated, including compressive and flexural strength ultrasonic pulse velocity (UPV) after 7, 28 and 90 days. Thermal conductivity and drying shrinkage of concrete specimens were also studied after 90 days. High temperature and freeze-thaw (F-T) durability of foamed concretes were also examined after 200, 400, 600 and 800°C and 100 and 200 F-T cycles respectively in addition to microstructure investigations. Results show that 10% RHA as cement substitute and 50% WMP as sand substitute give optimum percentage especially at late-age of 90 days at foam content of 40kg/m3. The lowest drying shrinkage and sorptivity were obtained by using 10%RHA and 25%WMP. The results also indicate that water cooled specimens showed more strength loss than air cooled specimens after 200°C.

**KEYWORDS:** foam concrete, waste marble powder, rice husk ash, physico-mechanical properties.

May 2021, 103 Page

## TEŞEKKÜR

Bu akademik araştırma için beni yönlendiren, tez danışmanlığımı üstlenen bilgi ve tecrübesi ile her aşmada bana yardımcı olan çok değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz Bayraktar'a teşekkürlerimi sunarım. Tez jürime katılan saygıdeğer hocalarım Prof. Dr. Hasbi YAPRAK ve Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN'a teşekkür ederim. Çalışmam süresince benden maddi ve manevi desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli aileme minnettarım.

WIAM ABDELMAGİD TAHER ELABADE

Kastamonu, 2021

# İÇİNDEKİLER

**Sayfa**


**TEZ ONAYI** ..... **ii**
**TAAHHÜTNAME** ..... **iii**
**ÖZET** ..... **iv**
**ABSTRACT** ..... **v**
**TEŞEKKÜR** ..... **vi**
**İÇİNDEKİLER** ..... **vii**
**ŞEKİLLER DİZİNİ** ..... **ix**
**TABLOLAR DİZİNİ** ..... **xi**
**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ** ..... **xii**
**1. GİRİŞ** ..... **1**
**2. LİTERATÜR TARAMASI** ..... **6**
2.1 Betonun Çevresel Etkileri ..... 6
2.2 Köpük Beton ..... 8
2.2.1 Köpük Betonun Tarihçesi ..... 9
2.2.2 Köpük Betonun Özellikleri ..... 9
2.2.2.1 Fiziksel özellikleri ..... 9
2.2.2.2 Mekanik özellikleri ..... 11
2.2.2.3 Fonksiyonel özellikleri ..... 11
2.2.3 Köpük Betonun Üretimi ..... 12
2.2.3.1 Ön köpüklendirme yöntemi ile köpük beton üretimi ..... 13
2.2.3.2 Geleneksel yöntem köpüklendirme ile köpük beton üretimi ..... 14
2.2.4 Köpük Betonun Avantajları ve Dezavantajları ..... 14
2.2.5 Köpük Betonun Kullanım Alanları ..... 15
2.3 Puzolanlar ..... 16
2.3.1 Puzolanların Tarihçesi ..... 16
2.3.2 Puzolanların Sınıflandırılması ..... 18
2.3.3 Puzolanların Aktivitesi ..... 21
2.3.4 Puzolanik Reaksiyon ve Reaksiyon Ürünleri ..... 23
2.3.5 Pirinç Kabuğu Külü ..... 24
2.3.5.1 Pirinç kabuğu külünün (PK) fiziksel ve kimyasal özellikleri ..... 25
2.4 Atık Mermer ..... 26
2.4.1 Mermerin Tanımı ..... 26
2.4.1.1 Bilimsel tanım ..... 26
2.4.1.2 Jeolojik tanım ..... 26
2.4.1.3 Ticari tanım ..... 26
2.4.2 Mermerlerin Sınıflandırılması ..... 27
2.4.3 Mermerin Tarihsel Süreci ..... 28
2.4.4 Mermer Atıklarının Oluşumu ..... 29
2.4.4.1 Mermer atıklarının parça (moloz) halindeki oluşumu ..... 29
2.4.4.2 Mermer atıklarının toz halindeki oluşumu ..... 30
2.4.4.3 Mermer atığının çamur halindeki oluşumu ..... 30
2.4.5 Mermer Atıklarının Betonda Kullanımı ve Değerlendirilmesi ..... 31
2.4.5.1 Mermer tozunun betonda belli oranlarda ince agrega yerine kullanımı ..... 32

**3. MATERYAL VE METOD ..... 34**
3.1 Materyal ..... 34
3.1.1 Çimento ve Pirinç Kabuğu Külü ..... 34
3.1.2 Atık Mermer Tozu ..... 35
3.1.3 Silis Agregası ..... 35
3.1.4 Karışım Suyu ..... 36
3.2 Metod ..... 36
3.2.1 Köpük Betonların Üretimi ..... 36
3.2.2 Taze Harç Özellikleri ..... 39
3.2.3 Fiziksel Özellikler ..... 39
3.2.4 Mekanik Özellikleri ..... 40
3.2.5 Kuruma Büzülmesi ..... 40
3.2.6 Kapilerite ..... 40
3.2.7 Donma-Çözülme Dayanıklılığı ..... 41
3.2.8 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı ..... 41
**4. BULGULAR VE TARTIŞMA ..... 42**
4.1 İşlenebilirlik ..... 42
4.2 Basınç Dayanımı ..... 43
4.3 Eğilme Dayanımı ..... 47
4.4 Köpük Betonların Kuru Birim Hacim Ağırlığı ve Isıl İletkenliği ..... 49
4.5 Porozite ve Su Emme ..... 52
4.6 Kuruma Büzülmesi ..... 55
4.7 Kapilarite ..... 57
4.8 SEM Analizi ..... 59
4.9 Yüksek Sıcaklık Dayanımının Değerlendirmesi ..... 61
4.9.1 Hava soğutmadan sonra basınç dayanımı ..... 61
4.9.2 Hava Soğutmadan Sonra Eğilme Dayanımı ..... 64
4.9.3 Hava Soğutmasından Sonra Ultrases Geçiş Hızı (UGH) Değerleri ..... 67
4.9.4 Su Soğutmasından Sonra Basınç Dayanımı ..... 70
4.9.5 Su Soğutmasından Sonra Eğilme Dayanımı ..... 73
4.9.6 Su Soğutmasından Sonra Ultrasses Geçiş Hızı (UGH) Değerleri ..... 76
4.10 Yüksek Sıcaklık Etkisine Ait SEM Analizi ..... 79
4.11 Donma – Çözülme (D-Ç) dayanıklılık değerlendirmesi ..... 80
4.11.1 Basınç dayanımı ..... 80
4.11.2 Eğilme Dayanımı ..... 82
4.11.3 Ağırlık Kaybı ..... 84
4.11.4 D-Ç Maruz Bırakıldıktan Sonra UGH Değerleri ..... 85
**5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER ..... 88**
**KAYNAKLAR ..... 90**
**ÖZGEÇMİŞ ..... 103**

# ŞEKİLLER DİZİNİ

**Sayfa**


Şekil 2.1 Puzolanların sınıflandırılması ..... 20
Şekil 2.2 Mermer atığının moloz halinde oluşumu ..... 30
Şekil 2.3 Mermer atığının toz halinde oluşumu ..... 30
Şekil 2.4 Mermer atığının çamur halinde oluşumu ..... 31
Şekil 3.1 PK'nın SEM görüntüleri ..... 34
Şekil 3.2 a) AMT XRD modülü b) TG analizi c) Partikül boyutu dağılımı ..... 35
Şekil 3.3 Silis kumu partikül boyutu ..... 36
Şekil 3.4 Yayılma tablasının şematik görünüşü ..... 39
Şekil 4.1 Karışımların çökme değerleri köpük içeriği a) 40kg/$m^3$ b) 80kg/$m^3$ ..... 43
Şekil 4.2 Basınç dayanımı sonuçları köpük içeriği a) 40 kg/$m^3$ b) 80 kg/$m^3$ ..... 46
Şekil 4.3 Eğilme dayanımı sonuçları köpük içeriği a) 40 kg/$m^3$ b) 80 kg/$m^3$ ..... 48
Şekil 4.4 a) Kuru birim hacim ağırlık b) 40 kg/$m^3$ ve 80 kg/$m^3$ köpük içeriğinde termal iletkenlik sonuçları c) basınç dayanımı ve kuru birim ağırlık arasında ki ilişki ..... 51
Şekil 4.5 a) Porozite ve kapilarite b) Porozite ve kuru birim hacim ağırlık sonuçları ..... 53
Şekil 4.6 c) Porozite ve kapilaritenin kuru birim ağırlık ile ilişkisi d) Porozite ve kuru birim ağırlık ile ısıl iletkenlik arasındaki ilişki ..... 54
Şekil 4.7 Kuruma büzülmesi köpük içeriği a) 40 kg/$m^3$ b) 80 kg/$m^3$ ..... 57
Şekil 4.8 Kapilarite değerleri köpük içeriği a) 40 kg/$m^3$ b) 80 kg/$m^3$ c) basınç dayanımı ve kapilarite ilişkisi ..... 59
Şekil 4.9 90 gün kürlendikten sonra numunelerin SEM görüntüleri (F: köpük içeriği, R: PK, M: AMT) ..... 60
Şekil 4.10 a-b) Basınç dayanımı sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı değişimleri ..... 64
Şekil 4.11 a-b) Eğilme dayanımı sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra eğilme dayanımı değişimleri ..... 66
Şekil 4.12 a-b) UGH sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra UGH varyasyonları e) UGH'ye karşı basınç dayanımı ..... 70
Şekil 4.13 a-b) Basınç dayanımı sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı değişimleri ..... 73
Şekil 4.14 a-b) Eğilme mukavemeti sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra eğilme mukavemeti değişimleri ..... 76
Şekil 4.15 a-b) UGH sonuçları c-d) UGH varyasyonları e) yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı ile UGH karşılaştırması ..... 79
Şekil 4.16 800℃'ye maruz kaldıktan sonra hava soğutmalı örneklerin (a, b, c ve d) ve su soğutmalı örneklerin (c, d, e, f) SEM görüntüleri. (F: köpük içeriği, R: PK, M: AMT) ..... 80
Şekil 4.17 a-b) Basınç dayanımı sonuçları c) D-Ç çevrimlerinden sonra basınç dayanımı değişimleri ..... 82
Şekil 4.18 a-b) Eğilme mukavemeti sonuçları c) D-Ç çevrimlerinden sonra eğilme mukavemeti değişimleri ..... 84
Şekil 4.19 D-Ç döngülerinden sonra kütle kaybı sonuçları ..... 85

Şekil 4.20 a-b) UGH sonuçları c) UGH varyasyonları d) D-Ç döngüleri sonrasında basınç dayanımı ile UGH karşılaştırması ..... 87

# TABLOLAR DİZİNİ

**Sayfa**


Tablo 2.1 Pirinç çeltiği ve pirinç kabuğu için dünyada üretim oranları ..... 27
Tablo 2.2 Mermerlerin kristal tane boyutuna göre sınıflandırılması ..... 27
Tablo 2.3 Mermerlerin yapısına göre sınıflandırılması ..... 27
Tablo 2.4 Mermerlerin bileşim oranlarına göre sınıflandırılması ..... 27
Tablo 2.5 Mermerlerin oluşturduğu minerallere göre sınıflandırılması ..... 28
Tablo 2.6 Mermerlerin ekonomik koşullara göre sınıflandırılması ..... 28
Tablo 2.7 Mermerlerin doğadaki rengine göre sınıflandırma ..... 28
Tablo 3.1 Çimento ve PK fiziksel ve mekanik özellikleri ..... 34
Tablo 3.2 Karışım ve kür de kullanılan suyun özellikleri ..... 36
Tablo 3.3 Karışım değişkenleri ..... 37
Tablo 3.4 1 $m^3$ için karışım malzeme miktarları ..... 38

# SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

## Simgeler

| | |
|---|---|
| **γÇ** | **:** Çimentonun Birim Hacim Ağırlığı. |
| **γmt** | **:** Mermer Tozunun Birim Hacim Ağırlığı. |
| **γy** | **:** Yaş Birim Hacim Ağırlık |
| **γk** | **:** Kuru Birim Hacim Ağırlık |
| **W** | **:** Su |
| **Ç** | **:** Çimento |
| **D** | **:** Yoğunluk |
| **K** | **:** Karışım |
| **kg** | **:** Kilogram |
| **t** | **:** Ton |
| **km** | **:** Kilometre |
| **m** | **:** Metre |
| **cm** | **:** Santimetre |
| **mm** | **:** Milimetre |
| **dm** | **:** Desimetre |
| **µm** | **:** Mikrometre |
| **g** | **:** Gram |
| **µs** | **:** Mikrosaniye |
| **°C** | **:** Santigrat derece |

## Kısaltmalar

| | |
|---|---|
| **AMT** | **:** Atık Mermer Tozu |
| **$Al_2O_3$** | **:** Alüminyum oksit |
| **CaO** | **:** Kalsiyum oksit (kireç taşı) |
| **C** | **:** Karbon |
| **$C_3S$** | **:** Trikalsiyum silikat |
| **$C_2S$** | **:** Dikalsiyum silikat |
| **$C_3A$** | **:** Trikalsiyum alüminat |
| **$C_4AF$** | **:** Tetrakalsiyum alüminoferrit |
| **$CaCO_3$** | **:** Kalsiyum karbonat |
| **$CaSO_4$** | **:** Kalsiyum sülfat |
| **$Ca(OH)_2$** | **:** Kalsiyum hidroksit |
| **$CaMg(CO_3)_2$** | **:** Kalsiyum magnezyum karbonat |
| **$CO_2$** | **:** Karbondioksit |
| **$CaMg(CO_3)_2$** | **:** Kalsiyum magnezyum karbonat |
| **$Fe_2O_3$** | **:** Demir oksit |
| **MgO** | **:** Magnezyum oksit |
| **$MgSO_4$** | **:** Magnezyum sülfat |
| **MT** | **:** Mermer Tozu |
| **$Na_2O$** | **:** Sodyum oksit |
| **$SiO_2$** | **:** Silisyum dioksit (silika) |

| | |
|---|---|
| **PK** | **:** Pirinç Kabuğu |
| **PÇ** | **:** Portlan Çimento |
| **TS** | **:** Türkiye Standartları |
| **SD** | **:** Silis Dumanı |
| **UGH** | **:** Ultrases Geçiş Hızı |
| **XRD** | **:** X-Işınları difraksiyonu |

# 1. GİRİŞ

İnce toz halindeki malzemelere su eklenmesi durumunda, akışkan hale gelip bir süre sonra akışkanlığını kaybedip katılaşıp suda çözünmeyen maddelere dönüşen malzemelere bağlayıcı malzemeler denir. Bu özelikleriyle bağlayıcı malzemelere istenilen şekil ve ebat verilebilmektedir. Günümüzde en çok bilinen ve kullanılan bağlayıcı malzeme çimento ve alçıdır. Belli oranlarda çimento agrega ve su karışımıyla beton elde edilir. Günümüzde en yaygın kullanım alanı bulan yapı malzemesi betondur (Baradan vd., 2012). Normal beton yapı sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesidir. Beton malzeme olarak iyi bir taşıyıcı olmasına karşın birim ağırlığı büyük ve ısı iletkenlik katsayısı yüksektir. Betonun ısı iletkenlik katsayısının yüksek olması onu yalıtım için çok kötü bir malzeme yapmaktadır. Betonun ısı yalıtımı gibi olumsuz yönlerini ortadan kaldırmak için hafif beton kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır (Serin vd., 2007).

Sürdürülebilir kalkınma programı kavramı artık geçici bir politika değil, uzun süreli ve önem kazanan bir politikadır. Dünyamızda artan fosil yakıt kullanımı sonucu sürekli artan hava kirliliği durumu, hükümetlerin enerji politikalarında değişikliğe zorlamaktadır. Enerji çeşitliliğini artırma isteğinin yanında enerji tasarrufu da aynı derece önem kazanmaktadır. Çevreci kentsel tasarım alanında özelikle enerji verimli binalar ön plana çıkmaktadır. Bu sayede fosil yakıt tüketimi azaltılarak atmosfere zehirli gaz salınımı azaltılması hedeflenmektedir. Bunun için yapının ısı kaybını düşürmeden aynı zamanda bina sakinlerinin de konfor seviyesini düşürmeyecek yalıtım malzemesine ihtiyaç vardır (Liu vd., 2014).

Tüm dünyada ve özelikle kentleşmenin yoğun olduğu gelişmekte olan ülkelerde artan enerji krizi ve çevre sorunlarını hafifletmek için ısı yalıtımı üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Birçok araştırmacı tarafından yalıtım problemlerini çözmek için birden fazla yalıtım malzemesi geliştirilmiştir. Bunlardan biride köpük ajanıyla elde edilen köpük solüsyonunun, çimento harcıyla karıştırılmasıyla oluşan köpük betondur. Köpük beton; enerji tasarrufu sağlamanın yanı sıra yapılarda hem ölü yükü azaltıp hem de yalıtım gereksinimlerini karşılar. Aynı zamanda şantiyede imal edilebilmesi de

diğer yalıtım 2 malzemelerine göre avantaj sağlar. Yapısında bulunan küçük hava kabarcıkları (genellikle çapı 0,1-1 mm) sayesinde ısı ve sesi normal betonlara göre daha az ileterek yalıtkan malzeme özelliği gösterir (Wei vd., 2013). Günümüzde yapıların hizmet ömrü giderek artmaktadır. Buda sürdürülebilirlik için yapıların ve kullanılan malzemelerin enerji verimliliği ve inşaat sırasında $CO_2$ emisyonunun azaltılması öncelikli konular arasına girmiştir.

Yapılarda kullanılan dış cephe yalıtım malzemeleri istenilen yalıtımı sağlasa da yangına karşı dayanıksız olması ve kolay yanması can ve mal güvenliğini tehlikeye atmaktadır. Bu gibi durumlar, yalıtım malzemelerinin yangına karşı dayanıklılığını ön plana çıkaran köpük betonun önemini artırmaktadır. Köpük beton; ısı iletim katsayısı düşük olması, yangına karşı dayanıklılığı, şantiye ortamında kolay üretimi, ucuz olması gibi nedenlerle son yıllarda kullanımı giderek artmaktadır (Huang vd., 2015). Köpük betonun ısı ve ses yalıtımı özelikleri göstermesi nedeniyle yapılarda güçlü kullanım potansiyeli vardır. Buna rağmen mekanik özelikleri normal betona göre düşüktür. Bugüne kadar hafif betonda yüksek sıcaklık etkisi ile ilgili birçok araştırma yapılmışsada, hafif agregalı köpük betonda yüksek sıcaklık etkisi ile ilgili araştırmalar sınırlıdır (Mydin ve Wang, 2012a). Köpük betonu yüksek sıcaklığa maruz bıraktıklarında; çimento harcının kimyasal bileşeni ve fiziksel yapısında önemli değişimler saptamışlardır. Bu değişimler köpük beton yapısında bozulmalara yol açarak mekanik davranışlarını olumsuz etkilemiştir. Köpük beton hakkında geçmişte yapılan deneysel çalışmalar incelendiğinde; yüksek sıcaklıklara maruz bırakılan köpük betondaki ısı iletkenlik katsayısı değişimleri, köpük betonun mekanik özelikleri (Jones ve McCarthy, 2005b), uçucu külün köpük beton dayanımına etkisi (Kearsley ve Wainwright, 2001), su emme özelikleri (Nambiar ve Ramamurthy, 2007), dijital görüntü analizi ve SEM görüntüleme (Wei vd., 2013), gibi alanlarda çalışma yapıldığı görülmüştür.

PK dünyanın pek çok bölgesinde özellikle de pirinç tarımının yoğun olduğu bölgelerde bol miktarda bulunan tarımsal bazlı bir atık malzemedir (Fapohunda vd., 2017). Pirinç kabuğu, çeltik ağırlığının yaklaşık %20 ila 23'ünü oluşturan pirinç öğütme işleminin bir yan ürünüdür. Dünya genelinde yılda 150 Milyon tondan fazla pirinç kabuğu elde edildiği tahmin edilmektedir. Bununla birlikte, bu miktarın yaklaşık %83'ü, su ve

toprağı kirleten atık olarak atılır (Kang vd., 2019). Atıkların zararlarını en aza indirmek için konu üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır. PK'nın beton karışımlarında kullanımı betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinde çeşitli iyileşmeler sağlamaktadır. Külün çimento ile yer değiştirilerek kullanması ile betonun en önemli ve en pahalı bileşeni olan çimentonun da kısmen azaltılması sağlanabilmektedir. Bu sayede hem maliyetler düşürülebilmekte hem de doğaya $CO_2$ salınımı azaltılabilmektedir. Ayrıca çevre kirliliğine neden olan pirinç kabukları bu sayede uygun şekilde değerlendirilmiş olmaktadır (Thomas, 2018).

PK, yüksek silisli bileşime bağlı olarak doğal bozunumu sınırlı olan bir tarımsal atıktır. Atık malzeme olarak biriktirilmeye çalışılsa çok fazla alan kaplayabilir aynı zamanda besin değerleri düşük olduğundan hayvanlar için yem olarak da kullanılamaz. PK'nın bertarafı için olası çözümlerden biri, onları PK külüne dönüştürmek ve bunları beton karışımlarına dahil etmektir. PK, pirinç kabuklarının yakılmasıyla elde edilen yüksek yüzey alanı ve içeriğinden dolayı yüksek oranda reaktif puzolan olarak kabul edilen bir malzemedir. %75 organik uçucu madde içeren PK, yanma sırasında ağırlığının yaklaşık %25'ini kül olarak üretir (Olutoge ve Adesina, 2019). Pirinç kabuğu kül partiküllerinin silika içeriği, silika partiküllerin yapısı, inceliği, kızdırma kaybı ve partiküllerin yüzey alanı külün reaktivitesini etkileyen ana faktörlerdir. Pirinç kabuklarının yakma aşaması uygun yapıdaki küllerin oluşabilmesi için büyük önem arz eder. Çünkü PK'nın yapısı yakma ortamlarından etkilenir. Başlangıçta, pirinç kabuğu yaklaşık %50 selüloz, %25–30 lignin ve %15-20 silika içerir. Kristal ve amorf silika formları farklı özelliklere sahiptir ve kullanım için doğru spesifikasyonlara sahip kül üretmek önemlidir. Çok kristal yapılı yapıya sahip silika formlu küller düşük reaktivite göstermektedirler. Kabuğun yanma sıcaklık aralığına ve yanma süresine bağlı olarak kristalin ve amorf silika formları elde edilir. Pirinç kabuğunu 700°C'nin altında bir sıcaklıkta yakmak, külün iç yapısında istenilen bir yapı olan amorf silika üretir. Bu kontrolsüz koşullarda, reaktivite elde etmek için külleri çok ince bir tanecik boyutuna öğütülmesi gerekebilir. Kontrollü yanma ile üretilen küller, yüksek konsantrasyonlu (ağırlıkça %85–95) amorf silika içeren gözenekli bir yapıya sahip olurlar. En yüksek amorf silika içeriğini elde etmek için en uygun yanma sıcaklığı 500–700°C'dir (Khan vd., 2018). Bununla birlikte, kontrollü koşullar altında, kristalimsi olmayan bir formu ve hücresel bir mikro yapıyı koruyan ve puzolanik

reaksiyonları kolaylaştıran geniş bir yüzey alanına sahip olan bir silika üretmek daha kolaydır (Miller vd., 2019). Yanma koşullarının dışında kabukların kimyasal yapısı da küllerin özelliklerini farklılaştırır. PK'nın kimyasal bileşimi büyük ölçüde pirinç kabuğunun kaynağına ve bunların organik bileşimine bağlıdır. Farklı kaynakların kimyasal bileşimi, bölgenin doğal iklim ve coğrafi durumuna bağlı olarak farklılık göstermektedir. Pirinç ekimi sırasında, bitkiler silikayı topraktan alırlar ve yüksek silika toprağı yüksek silika içerikli kül ile sonuçlanır. Coğrafi ve iklim koşulları, pirincin üretimini ve mineral içeriğini ve bunların küllerini etkileyebilir. Ayrıca, gübre seçimi, küllerin yanmadaki kimyasal bileşimini değiştirebilir ve bu da betondaki faydalarını etkileyebilir (Kaplan ve Elmekahal, 2021).

Kaynakların sınırlı olduğu, tüketimin hızla arttığı dünyamızda son yıllarda üzerinde önemle durulan konulardan birisi de geri dönüşüm veya daha çok bilinen adıyla recycle'dır. Kaynak israfını önlemenin yanında, hayat standartlarını yükseltme çabaları ve ortaya çıkan enerji krizi ile bu gerçeği gören gelişmiş ülkeler atıkların geri kazanılması ve tekrar kullanılması için yöntemler aramış ve geliştirmişlerdir. Ne yazık ki ülkemizde diğer gelişmiş ülkelere nazaran inşaat endüstrisinde geri dönüşüm miktarı yok denecek kadar azdır. Geri dönüşüm bir yana, atıkların bertaraf edilmesi bile hala çoğu sanayi işletmesinde göz ardı edilmektedir. Genel olarak cam, alüminyum, kâğıt gibi ürünlerde geri dönüşüm yaygın olarak yapılmaktadır. Bunun yanında diğer gelişmiş 4 ülkelerde asfalt, beton, agrega, ahşap vb. yapı malzemeleri geri dönüştürülerek yeniden hammaddeye dönüştürülmekte hem ekonomiye hem de çevreye olan zararlı etkileri en aza indirilmektedir (Gürer, 2005). Bu itibarla, "kaynakların optimum şekilde değerlendirilmesi" şüphesiz geleceğin en önemli araştırma konusu olacaktır. İnşaat sektörü hammadde ihtiyacının en fazla ve dolayısıyla açığa çıkan atık miktarının en yüksek olduğu sektörlerden birisidir. Özellikle mermer sanayisinde ocaklarda blok çıkarma işlemi sırasında blok üretiminin ortalama %40-60'ı mermer atığı olarak atılmaktadır (Gürer, 2005). Mermer atıklarının beton üretiminde kullanılması üzerine yapılan bir çalışmada, beton üretiminde ince malzeme oranının %10'u mermer tozu ile yer değiştirmesi halinde basınç dayanımında belirli bir artış yaptığını belirtmiştir (Ünal ve Uygunoğlu, 2004).

Mermer endüstrisini son yıllarda ilgilendiren en önemli konu çevresel kirliliğe neden olan atıklardır. Ancak mermer işletmeciliğinde moloz toz ve paledyen ürünleri satılabilir ve değerlendirilebilir bir hammadde olmaları sebebiyle artık bir madde olup, üretim esnasında ortaya çıkan havuz çökeltileri de çeşitli işlemlerden sonra işe yarayan hem bir hammadde hem de ekonomik açıdan değerli bir malzeme olabilir (Bayraktar vd., 2021). Mermer toz atıklarının değerlendirilmesine yönelik olarak uygulamaya sokulabilecek alternatifler, mermer fabrika işletmecilerine ve ülke ekonomisine kazançlar sağlayabileceği gibi, bu fabrikaların neden olduğu çevre kirliliğini de önemli ölçüde azaltacaktır. Mermer tozu, en küçük boyutlu mermer atıkları olup mermer işleme tesislerinde blokların ve plakaların kesilmesi esnasında açığa çıkan ve büyük çoğunluğu l mm'nin altında olan mermer tanecikleridir. Atıklar, değişik özelliklere sahip mermer tozlarından ve içine karışan yabancı maddelerden oluşmaktadır (Bayraktar vd., 2021).

Bu çalışmada, düşük maliyetli ve yerel kaynaklarımızdan biri olan AMT ve PK kullanılarak üretilen köpük betonların mekanik ve bazı durabilite özellikleri belirlenecektir.

# 2. LİTERATÜR TARAMASI

## 2.1 Betonun Çevresel Etkileri

Çevre dostu beton, enerji üretiminde kullanılan doğal kaynaklardan işlem sırasında meydana gelen sanayi atıklarının çevreye olan olumsuz etkisini azaltmak amacıyla beton karışımında kullanılarak üretilmiş beton türüdür. Bu tür betonlar yeşil beton olarak ta tanımlanmaktadır (Rai, 2012). Elbette isminin yeşil beton olması rengi ile herhangi bir ilişkisi yoktur sadece çevreye olan olumlu etkisinden dolayıdır. Çevre dostu betonun karışımında kullanılan atıkların sadece çevreye olan etkisi değil aynı zamanda dayanım, dayanıklı ve ekonomik olarak ta katkıda bulunması unutulmamalıdır. Ortaya çıkan bu atık malzemeler beton karışımında betonun esasını oluşturan agrega ve çimento ile belli oranlarda yer değiştirerek kullanılmaktadır (Hameed ve Sekar, 2009). Dünya çapında yapılan bir değerlendirmeye göre yaklaşık yıllık 109 metre küp beton üretilmektedir. Beton dayanımının artması, esasını oluşturan çimento kalitesine bağlıdır ve zamanla sertleşerek betonun dayanımını artırmaktadır. Üretilen betonun üretim esnasında ekonomik, dayanım, dayanıklı ve çevreci olması göz ardı edilmemelidir (Błaszczyński ve Król, 2015). Bu nedenle üretilen betonu ne kadar çevreci olarak üretebilirsek ekonomik olarakta o kadar fayda sağlamaktadır (Gomez, 2018). Dünya çapında yapı sektöründe en çok kullanılan bu malzemenin esasını oluşturan çimento, beton üretiminde aşırı miktarda kullanılmaktadır. Bu nedenle aşırı miktarda çimento üretiminde ihtiyaç duyulmaktadır. Çimento üretimi esnasında çevreyi etkileyen karbondioksit ($CO_2$) doğaya hem de insan sağlığına zarar vermektedir. Bu sebeple çevre dostu betonun üretiminde çimento mutlaka dikkate alınmalıdır (Vishwakarma ve Ramachandran, 2018). Normal beton veya geleneksel beton, agrega, çimento ve suyun birleşmesi ile üretilmektedir. Bu tür betonun üretiminde agrega veya çimento yerinde endüstriyel atık malzemelerin kullanılması ile üretilen beton çeşitlerine, çevre dostu beton denilmektedir (Baikerikar, 2014). Atık malzemelerin normal veya geleneksel betonun karışımında kullanılması birçok avantajlar sağlamaktadır. Geleneksel betonların oluşturduğu bazı çevresel ve ekonomik dezavantajlarını azaltarak, doğadaki kaynakların tüketimini aza indirerek, betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerine

olan etkisini arttırarak sürdürülebilir bir beton türü elde edilir. Günümüzde bu tür beton sahip olduğu bu özelliklerinden dolayı normal veya geleneksel betona göre daha çok tercih edilmektedir (Imbabi vd., 2012). Çevre dostu betonun üretimi yeni olduğu için kullanımı dünya çapında beton sektöründe daha yaygın hale gelmemiştir. Bu nedenle yaygın hale gelmesi için yapılması gereken bazı hususlar vardır. Bu hususlar ise, çevre dostu betonun kullanımı, büyük projelerde yer alması için uygun standartların önerilmesi, çevre dostu betonun üretimi ile ilgili gereken eğitimin halkı bilinçlendirerek teşvik edilmesini kapsar. Çevre dostu betonun kullanımını daha çok yaygınlaştırmak için konu ile ilgili daha da fazla çalışmalar yapılması gerekmektedir (Liew vd., 2017). Son yıllarda nüfusun artışı ile insanların ihtiyacı gittikçe artmaktadır. Bu nedenle insanların ihtiyaçlarını karşılamak için doğal kaynakların kullanımına ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece doğal kaynakların kullanım sırasında açığa çıkan atıkların çevreye olan olumsuz etkileri görülmektedir. Bu nedenle çalışmaların asıl amacı ise insanların sağlığı, doğal kaynakların az tüketilmesi ve çevre kirliğinin azaltılmasıdır (Marinković vd., 2010). Bu konular inşaat mühendisliğinde yapı malzemesi ana bilim dalını ilgilendirmektedir. Fakat bu kapsamda yapı malzemesi atık olarak çıkan malzemeler ile büyük sorunlar yaşamaktadır. Betonu oluşturan doğal agregaların ve çimentoların daha da çok kullanılması, inşaatların yıkımından ortaya çıkan molozların çevre kirliliğine neden olması, doğal kaynakların tüketilmesidir. Elbette bu gibi sorunlar bir çok ülkelerde mevcuttur (N. Singh vd., 2018). Avrupa ülkelerinde moloz olarak ortaya çıkan atıkların miktarı yıllık yaklaşık 180 milyon ton veya kişi başı yıllık 480 kg tahmin edilmektedir. Ortaya çıkan bu atıklar doğada açık alanlarda bırakılarak çok büyük çöplük alanların oluşumuna neden olmaktadır. Oluşan katı atık depolama alanları bilindiği gibi çevreyi kirleterek doğaya ve insanların sağlığına ciddi manada olumsuz etkiler oluşturmaktadır (Emir vd., 2011). Bu nedenle ortaya çıkan atıkların geri dönüşümü için beton karışımında atık agregaların tekrardan kullanılması ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır. Böylece geri dönüşümlü agregaların beton karışımında kullanılması kaynakların hızlı tüketilmesini önleyerek doğal kaynakların muhafaza edilmesinde büyük önem taşımaktadır (Radonjanin vd., 2013). Aynı zamanda çevre dostu beton için de büyük bir önem taşımaktadır. Fakat çevreyi etkileyen atıklar sadece doğal kaynaklardan değil yapay olarak üretilen malzemeler sonucu da ortaya çıkmaktadır. Yapısal olarak genel bir değerlendirme yapıldığında üretilen beton için sürdürülebilirlik üzerinde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalar

sonucu iki önemli tema gözükmektedir. Birinci, geri dönüşümlü malzemelerin belli oranlarda betonun içerisindeki agrega ile yer değiştirmesi. İkinci, betonun içerisinde bağlayıcılık özelliği olan çimento ile yer değiştirmesidir. Çimento yerine ikame edilen malzemelerin bağlayıcılık özeliği yoktur. Fakat çimento ile birlikte kullanıldığı zaman bağlayıcılık özelliği taşımaktadır. Bu özelliklere sahip olan malzemeleri silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, mermer tozu vb. söyleyebiliriz. Bu malzemelerin sahip oldukları birçok özelliklerinden dolayı beton sektöründe kullanımı gün geçtikçe artmaktadır (Marinković vd., 2017). Türkiye'deki termik santrallerin baca filtrelerinde yığışan uçucu kül miktarı her yıl milyonları aşmaktadır (Demirel vd., 2019). Bu nedenle bu çeşit malzemelerin depolanması zordur. Aynı şekilde çamur halinde oluşan AMT'nin da depolanması güçlük oluşturmaktadır. Depolanması zor olan bu malzemelerin, beton karışımında kullanılması birçok fayda sağlamaktadır (Bilgin, 2010).

## 2.2 Köpük Beton

Sahip olduğumuz hazır kaynakların verimli kullanılması için gelişen teknoloji ile az kaynakla üretilen kolay uygulanabilen yalıtım malzemeleri gerekmektedir. Bu konuda çalışılan konulardan biriside köpük beton olmuştur.

Köpük betonun, büyük çoğunluğunu hafif malzemeler oluşturur. İnce kum, çimento, su ve köpük bileşenleridir. Büyük agrega içermemesi ve hava boşluklarının harç içerisinde eşit dağılması sebebiyle homojen olarak değerlendirilebilir. Köpük beton, yüksek işlenebilirlik, düşük birim hacim ağırlık, minimum agrega kullanımı, kontrol edilebilir düşük basınç dayanımı ve oldukça iyi ısı yalıtım özelliklerine sahip olan hafif beton türüdür (Işıldar, 2018).

Kuru birim hacim ağırlığı 400 ile 1600 kg/m$^3$ ve basınç mukavemeti 1 ile 15 MPa değerleri aralığında almaktadır. Hidratasyon süresinin sonunda köpük beton istenilen dayanım ve dayanıklılığa sahip olmaktadır (Jones ve McCarthy, 2005a).

Köpük beton, hücreli veya boşluklu beton olarak da bilinir. Bağlayıcı (çimento), su ve agrega karışımına köpük ajanı ile yapılan köpüğün katılmasıyla üretilir. Hacmi %75 ile %80 oranında biri diğerinden bağımsız kapalı gözeneklerden oluşur. Köpük beton;

bir binanın dış ve iç duvarları ile zemininde kullanılan yapı elemanlarının yerine kullanılabilir. İçerisindeki malzemeler insan sağlığına zararlı değildir. Hafif, çevreci, ekonomik, uygulaması kolay, ses ve ısı izolasyonu sağlayan, tercih edilen yapı malzemesi ve yalıtım malzemesidir (Ekinci, 2014).

### 2.2.1 Köpük Betonun Tarihçesi

Köpük beton patenti ilk kez 1923 yılında alınmıştır. Ancak 2000' den sonra yarı taşıyıcı ya da taşıyıcı olmayan inşaat uygulamalarında yaygınlaşmaya başlamıştır. İstikrarlı köpük beton harcı oluşturulması; kullanılan köpük ajanının özellikleri ve miktarı, köpük hazırlama yöntemi ve hava boşluğu dağılımının homojenliği, karışım yöntemi gibi birçok etkene bağlıdır. Bu yüzden standart bir karışım hazırlama uygulaması yoktur (Ramamurthy vd., 2009).

### 2.2.2 Köpük Betonun Özellikleri

#### 2.2.2.1 Fiziksel özellikleri

Yoğunluk: Köpük betonda yoğunluk hacmindeki gözenek miktarına bağlı olarak, değişir. Düşük yoğunluklu köpük beton, yüksek yalıtım ve düşük basınç dayanımı değerleri elde edilirken, yüksek yoğunluklu köpük beton, düşük yalıtım ve yüksek basınç dayanımı elde edilir.

Köpük betonun kıvamı ağırlıklı olarak filler cinsine bağlıdır. Köpük ilavesiyle beraber karışımın yoğunluğu azalır. Köpük betonun yoğunluğunda ki bu azalma büyük ihtimalle kendi ağırlığının düşmesi ve yüksek hava içerdiğinden kaynaklanan güçlü kohezyon sebebiyledir (Demir vd., 2017). Köpük betonun yoğunluğunun azalması, sertlik ve dayanımının azalmasına neden olmaktadır (Mydin ve Wang, 2012a).

Karışımın su içeriğinin düşük olması, karışım kıvamının katılaşmasına neden olmaktadır. Katı kıvamdan dolayı karıştırma esnasında kabarcıklar sönümlenmektedir. Bu durumda köpük betonun yoğunluğu artmaktadır ve çökme meydana gelmektedir. Karışımın su içeriğinin fazla olması, harcı zayıflatır. Zayıflayan harç köpüğü

koruyamaz ve köpük karışımdan ayrılmaktadır. Bu durumda da nihai yoğunluk artmaktadır ve çökme meydana gelmektedir (Nambiar ve Ramamurthy, 2006)

Köpük betonu yoğunluklarına göre sınıflandıracak olursak (Bekaroğlu, 2012);

- 400 ile 600 kg/$m^3$ yoğunluklu: Tavan ve yer döşeme ısı ve ses izolasyonu
- 600 ile 900 kg/$m^3$ yoğunluklu: Blok ve panel yapımı
- 900 ile 1200 kg/$m^3$ yoğunluklu: Ara duvar, dış duvar, panel ve blok yapımı
- 1200 ile 1600 kg/$m^3$ yoğunluklu: Taşıyıcı duvar, panel ve blok üretiminde kullanılır.

Kuruma büzülmesi: Kuruma büzülmesindeki azalma köpük hacminin artmasıyla birlikte bireysel gözeneklerin büyüklüğü ve içindeki hava miktarına bağlıdır. Karışımda kullanılan köpük hacmi toplam hacmin %50'sine ulaştığında, kuruma büzülmesinde %36 seviyesinde azalma gözlemlenmiştir (Nambiar vd., 2009). Normal betona kıyasla köpük betonun kuruma büzülmesi, kompozisyonuna bağlı olarak 10 kata kadar yüksek ölçülebileceği ön görülmektedir (Ramamurthy vd., 2009).

Gözeneklilik ve kılcal su emme: Köpük betonun bireysel gözenek boyutu, gözeneklerin gösterdiği dağılım, gözeneklerin birbirleriyle olan bağlantıları, toplam gözenek miktarı, gibi özellikleri iç ve dış etkenler karşısındaki davranış şeklini etkilemektedir (Kaya, 2017). Köpük betondaki gözenekler;

- Jel (büzülme) gözenekleri,
- Kılcal gözenekler
- Makro gözenekler (hava hapsolan)
- Mikro gözenekler (hava hapsolan) olarak sınıflandırılmaktadır.

Köpük betonun gözenek yapısı: Karışımda bulunan bileşenlerin çeşitleri, kimyasal ve fiziksel özellikleri, oranlarının etkisi kapsamında şekillenir. Köpük betonun gözenek yapısını asıl belirleyici olan köpük ajanının gözenek yapısı olmaktadır (Işıldar, 2018).

Köpük ajanının oluşturduğu bu kılcal gözenekler betona su emme potansiyeli sağlar. Bunun bir sonucu olarak, kürleme uygulamasından alınacak sonucu da değiştirebilecektir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Isı ve ses yalıtımı sağlayan hava boşluklu yapının kapalı hücreli olması sebebiyle köpük beton aynı anda su yalıtımı da sağlamaktadır. Su emme değerleri oldukça düşük olabilmektedir (Bekaroğlu, 2012).

#### 2.2.2.2 Mekanik özellikleri

Basınç dayanımı: Köpük beton basınç dayanımı, köpük ajanının türü ve oranı, çimento-kum ve diğer bileşenlerin oranı, su-çimento oranı, köpük betonun yoğunluğu gibi faktörlerden etkilenmektedir. Beton hacminde köpük miktarının azalması, betonun yoğunluğunun artmasına ve buna paralel olarak betonun dayanımının artmasına neden olmaktadır (Awana ve Kumar, 2017).

Yarmada çekme ve eğilme dayanımları: Köpük betonun yoğunluğu azaldıkça yani hacimce köpük miktarı artışı ile birlikte yarmada çekme değeri azalmaktadır.

Elastisite modülü: Köpük betonun yoğunluğu, elastisite modülünü etkilemektedir. Yoğunluk azaldıkça elastisite modülü düşer (Mydin ve Wang, 2012b).

#### 2.2.2.3 Fonksiyonel özellikleri

İşlenebilirlik: Köpük beton, taze halde yüksek işlenebilirlik yeteneğine ve düşük birim hacim ağırlığa sahiptir. Köpük beton kolayca pompalanabilir sıkışma ve vibrasyon gerektirmeden yerleştirilebilir. Köpük beton harcı beton tesislerinde kalıplanıp, bloklar haline uygulama sahasına getirilebileceği gibi gerektiğinde inşaat sahasında hazırlanarak kolayca kullanılabilir (Kaya, 2017).

Köpük beton taze harcının akma dayanımı düşüktür. Bu durum kendiliğinden yerleşme özelliği gösterebilir. Köpük betonun işlenebilirlik özellikleri su/ince malzeme oranı,

kullanılan çimento tipi, su/çimento oranı, köpük yoğunluğu, köpük ajanı çeşidi, filler malzeme miktarı ile çeşidi, harcın yoğunluğu gibi faktörlerden etkilenir (Demir vd., 2017).

Akustik yalıtım direnci: Köpük beton, içerisindeki hava boşlukları nedeniyle iyi derecede bir ses yalıtımına sahiptir. Köpük beton, yapıları soğuk hava şartlarında sıcak, sıcak hava şartlarında ise serin kalmasını sağlayarak yıllık genel enerji sarfiyatını %40 oranda düşürür (Ekinci, 2014). Köpük betonun gözenek yapısı ve büyüklüğü betonun ses emme ve sesi yansıtma özelliklerini geliştirmektedir.

Isıl iletkenlik: Köpük beton, imal edildiği malzemenin yoğunluk ve bileşimine bağlı olarak normal yoğunluktaki betondan %10 ile %50 değerleri arasında daha düşük ısıl geçirgenlik katsayısı sunabilmektedir (Ramamurthy vd., 2009). Köpük betonda ısıl iletkenlik, köpük miktarı, karışım bileşenlerinin çeşidi ve oranlarından etkilenmektedir.

Köpük beton, içerisinde bulunan hava gözenekleri sebebiyle oldukça iyi yalıtım özelliği sunar. Isı iletim katsayısının (λ) düşük olması nedeniyle enerji tüketimini azaltmaktadır. Isı iletim katsayısı 0,060 ile 0,610 W/mK arasında köpük betonun yoğunluğuna göre değişir. Bu sebeple uygulamada köpük beton kullanılması ile ilave yalıtım malzemesine ihtiyaç duyulmaz (Ekinci, 2014).

Yüksek sıcaklığa direnci: Köpük betonun yüksek sıcaklığa direnci, karışım bileşenlerinin çeşidi ve oranlarından etkilenmektedir. Köpük betonun yoğunluğundaki artışla yangın direnci artmaktadır. Yapılan bir çalışmada 400 kg/m$^3$ yoğunluktaki ultra hafif köpük betonun yangın direnci 150 kg/m$^3$ yoğunluklu köpük betona göre üç kat fazladır. Köpük betonun yeterli yangın direnci gösterebilmesi için 250 kg/m$^3$'ten yüksek yoğunluğa sahip olması gerektiği bulunmuştur (Vilches vd., 2012).

### 2.2.3 Köpük Betonun Üretimi

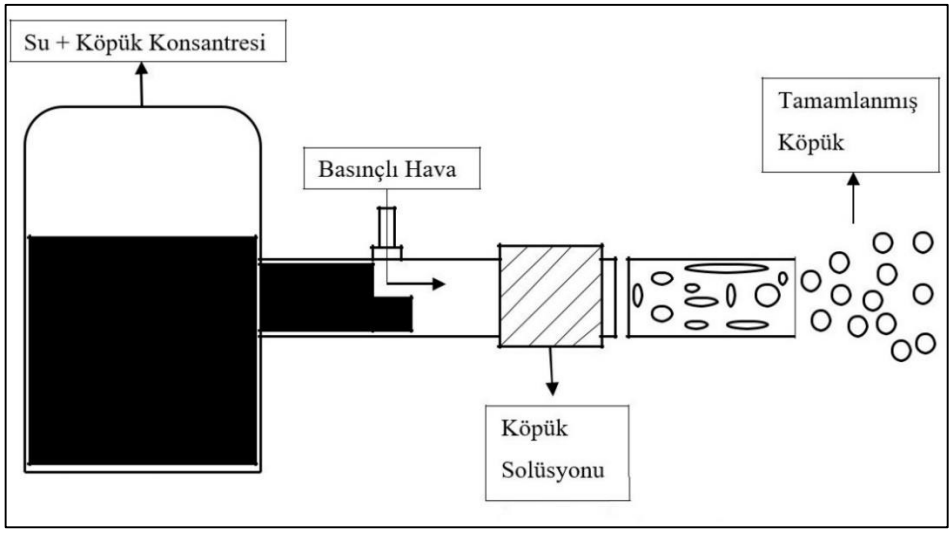
Köpük betonlar, geleneksel yöntem köpüklendirme veya ön köpüklendirme yöntemleriyle üretilirler. Ön köpüklendirme yöntemi, önceden hazırlanmış sulu köpüğün harç karışımına ilavesiyle elde edilir. Geleneksel yöntem köpüklendirme

yöntemi ise yüzey aktif maddenin, harcın bileşenleriyle karıştırılması ve köpüğün bu işlem esnasında, harç içerisinde üretilmesiyle elde edilir (Ramamurthy vd., 2009).

Köpük üretilirken çok büyük kabarcıkların oluşması istenmemektedir. Çünkü büyük kabarcıklar kararlı davranış göstermezler. Beton karıştırılırken, taşınırken, yerleştirilirken çökme durumu artar. Bu sırada betondaki havanın büyük bir kısmı kaybedilirse, köpük betondan istenilen performans sağlanamaz (Ören ve Gençel, 2017).

### 2.2.3.1 Ön köpüklendirme yöntemi ile köpük beton üretimi

Önceden oluşturulmuş köpük yönteminde köpük jeneratöründeki karışım suyuna köpük ajanı ilave edilir. Sonra köpük jeneratörü çalıştırılır ve karışım basınçlı hava ile püskürtülür (Ören ve Gençel, 2017). Şekil 2.7'de köpüğün üretilme yöntemi gösterilmiştir (Bindiganavile ve Hoseini, 2008). Elde edilen köpük daha önceden hazırlanan taze köpük beton harcına katılır. Homojen bir görüntü alıncaya kadar karıştırılır. Köpüğün harçta sönmemesi için hızlı bir şekilde kalıba dökülür. Üretilen köpük yeterince kararlı olmalıdır ki çimento pastasının priz başlangıcına kadar olan sürede harcın köpük üzerinde oluşturduğu basınca karşı direnç gösterebilsin ve boşluklu bir iskelet yapısı elde edilebilsin (Ramamurthy vd., 2009).




Şekil 2.7 Önceden oluşturulmuş köpük beton yönteminde köpük üretimi (Bindiganavile ve Hoseini, 2008).

#### 2.2.3.2 Geleneksel yöntem köpüklendirme ile köpük beton üretimi

Karşım köpüğü yönteminde, köpük ajanı; su, çimento ve ince agrega, gerekli katkılarıyla birlikte malzemeye eklenmektedir. Karışıma eklenen köpük ajanları, karışımda biri diğerinden bağımsız mikro hava gözeneklerinin elde edilmesine imkân tanır. Elde edilen bu hava gözeneklerinin beton sertleşmeye başlayıncaya kadar harç basıncına dayanabilmesi için köpüğün sabit ve kararlı olması gerekmektedir (Amran vd., 2015). Hidrojen peroksit ($H_2O_2$) ve Alüminyum tozu, gözenekli betonda kullanılan yaygın kimyasal köpük ajanlarıdır.

### 2.2.4 Köpük Betonun Avantajları ve Dezavantajları

- Hafif beton harcı gerektiğinde bir mikser yardımıyla basit bir şekilde uygulama sahasına nakliyesi gerçekleştirilebilir ve sıkıştırma, vibrasyon ya da mastar işlemi gerektirmez (Bayraktar vd., 2021).

- İçeriğinde bulundurduğu malzemeler sağlığa zararlı değildir. Çevre dostudur.

- Donma çözünme direnci yüksektir.

- Çeşitli kullanımlara sahip olmasıyla yüksek performansı düşük üretim maliyetiyle üretimini sağlar (Bayraktar vd., 2021).

- Hafiftir, büyük oranda yük bindirmez, yanal yük baskısı yapmaz (Awana ve Kumar, 2017).

- Mükemmel ses ve ısı yalıtım özellikleri vardır

- Yanıcı değildir bu yüzden mükemmel yangın dayanım özelliği vardır.

- Köpük beton, kapalı alanları soğuk hava şartlarında sıcak, sıcak hava şartlarında ise serin tutarak yıllık genel enerji sarfiyatını önemli ölçüde düşürür (Ekinci, 2014).

- Boşluk miktarının fazla olması betonun basınç dayanımlarını düşürür.
- Gözenekli olması sebebiyle rutubete ve suya karşı dirençleri zayıftır.
- Elastisite modülleri normal betonlara kıyasla daha düşüktür.
- Köpük betonlarda segregasyon normal betona kıyasla daha yüksektir. Yüksek çökme değerinde, köpüğün yüzeye çıkması şeklinde ayrışma kendini gösterir.
- Rötre değerleri normal betonun rötre değerinden yüksektir.
- Aşınmaya karşı dirençleri zayıftır (Gencel vd., 2021).

### 2.2.5 Köpük Betonun Kullanım Alanları

- Yangına dayanıklı hafif beton üretiminde kullanılabilir.
- Dekoratif amaçlı panel imalatında kullanılabilir.
- Isı ve ses yalıtımlı hafif beton, hafif tuğla üretiminde kullanılabilir.
- Düz olmayan zeminlerde düz bir yüzey oluşturarak aynı zamanda ısı ve ses yalıtımı sağlayan şap betonları için kullanılabilir (Bekaroğlu, 2012).
- Çimento ve alçı içeren hafif plaka yapımında kullanılabilir.
- Toprak altında su drenajı amaçlı hücreli dolgu betonu,
- Köprü ve köprü yolunda buzlanmayı engellemek amacıyla yol altında dolgu betonu olarak kullanılabilir. Hafif olduğu için köprüye yüklenen yük azaltılmış olunur (Awana ve Kumar, 2017).

.

## 2.3 Puzolanlar

Puzolanlar, çok yüksek sıcaklıklarda silikatlar ve alimino silikatların çok hızlı bir şekilde soğutulmaları sonucu amorf bir yapıya dönüşmesi neticesinde oluşmuşlardır. İçerisinde çok fazla oranda kolloidal tane içeren özellikle aktif silis barındıran malzemelerdir. Puzolanların doğal hallerinde bağlayıcılık özelliği yok denecek kadar az olup; öğütüldüklerinde, normal sıcaklık ve sulu ortamlarda kalsiyum hidroksit ile birleştikleri zaman bağlayıcılık özelliğini kazanan silisli veya silissiz ve alüminli malzemeler olarak tanımlanmaktadır (Alkaya, 2009; Erdoğan, 2010a)

Puzolan terimi, her ülkeye göre özel olarak adlandırılmış olup "Tras" ismini Almanya'da, "Santorin toprağı" ismini ise Yunanistan'da görebilmekteyiz. Türkiye'de ise volkanik tüf karakterli puzolanlar tras olarak adlandırılmaktadır. Son zamanlarda tras ve katkılı çimentolar önemli hale geldikten sonra puzolan ismini almıştır (Gündeşli ve Tanrıkulu, 2008).

Puzolanlar, çeşitli açıdan benzerlik göstermektedir. Bunlar genellikle, kimyasal, fiziksel ve minerolojik açından benzerliklerdir. Ancak puzolanları kimyasal bileşim bakımından değerlendirildiğinde puzolan malzemeleri $SiO_2$ esaslı iken, Portland çimentosu CaO esaslıdır. Bundan dolayıdır ki çoğu puzolanın kendi başlarına bağlayıcı özellikleri yoktur (Alkaya, 2009).

Puzolanlara örnek olarak, yüksek fırın cürufu, silis dumanı, tras, diatomit, zeolit ve pişmiş killer örnek gösterilebilir. Puzolanlar ciddi olarak ekonomik ve teknik olarak yarar sağlamaktadır. Betonun özelliklerine de etki etmektedir. Puzolanların beton içeriğinde iki temel etkisi bulunmaktadır. Bunlardan biri Puzolanik etki iken bir diğeri ise boşlukları doldurma etkisidir. Bazı araştırmacılara göre boşluk doldurma özelliği puzolanik etkiden daha önemlidir(Şengül vd., 2007).

### 2.3.1 Puzolanların Tarihçesi

Volkanik kül içerikli toprak malzemelerinin sönmüş kireç ve kum ile birleşme sağlanarak, su içerisinde çözünmeyen harç yapım çalışmaları çok uzun yıllar öncesine dayandığını bilmekteyiz (Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Romalılar, MÖ 300. yıllarda bu malzemeleri puzolan olarak tanımlanmış ve beton, harç gibi malzemelerinin yapımında yaygın bir şekilde kullanmışlardır. Vitruvius adındaki mimar, 'Mimarlık Üzerine' ismini verdiği bir kitap yazmış ve bu eserde puzolandan bahsetmiştir. Mimar Vitruvius'un tezinde Romalılar, pişirilen kil malzemenin, öğütülen tuğlanın veya kiremitin puzolan özelliğine sahip bir malzeme olduğunu düşünmüştür. Romalı insanlar volkanik külü, sönmüş kireç ve su ile karıştırarak, suyun içerisinde de sertleşme ve bağlayıcılık özelliği gösterebilen harç elde etmeyi; aynı zamanda bu harcın içine taş ve benzeri parçacıkları ekleyerek, günümüzdeki betona benzer malzeme yapmayı başarmışlardır. Osmanlı Devletinde çok yaygın bir kullanım alanı olan "Horasan harcı" isimdeki malzeme de, pişirilen kil içerikli tuğla, kiremit ve çömlek tarzında malzemelerin öğütüldükten sonra sönmüş kireç ile karıştırılması neticesinde ortaya çıkmıştır (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). En başta; tarifi edilen özelliklerdeki toprak malzeme Napoli şehri yakınlarında bulunan Puzzuoli adındaki kasabada bulunmuştur. Kasaba yakınlarında bulunan Vezüv yanardağı çevrelerinde bulunan bu toprak malzeme ilerleyen zamanlarda günümüze kadar Puzolan adı ile gelmektedir (Urhan, 2000).

Bilim adamlarının Çatalhöyük'teki Neolitik çağda yapılan yapıların üzerindeki harçlardan alarak yaptıkları araştırmalar sonucu orada kullanılan harçların 8000 yıl öncesine dayandığını öğrenmişlerdir. Kullanılan harçlar, çok yüksek ihtimalle içeriği volkanik kül olan toprak malzemelerle yapıldığı düşünülmektedir. 3000-4000 yıl önce Girit'te ve Rodos'ta yapılmış olan su inşaatları ve mozaik tarzdaki işler, günümüze kadar herhangi bir şekilde dayanıklılığını kaybetmemiş durumdadır. Yapılan çalışmalar sonucunda da mevcut olan bu ve benzeri inşaatlarda da puzolan ve sönmüş kireçten meydana gelen bağlayıcılar kullanılmıştır (Urhan, 2000).

Puzolanik malzeme kullanımındaki azalma XIX. yüzyılın sonlarına doğru Portland çimentosunun bulunması ile başlamıştır. Ülkemizde ise, puzolanların çimento malzemesi olarak kabul edilmesi 1950 yılından sonra olmuştur. Bu kabulün nedeni ise Portland çimento ve puzolanik madde karışımlarının kullanılmasıyla beraber beton ve harçlarda bağlayıcılık niteliklerinde etken faydalar görülmesidir (Okucu, 1998).

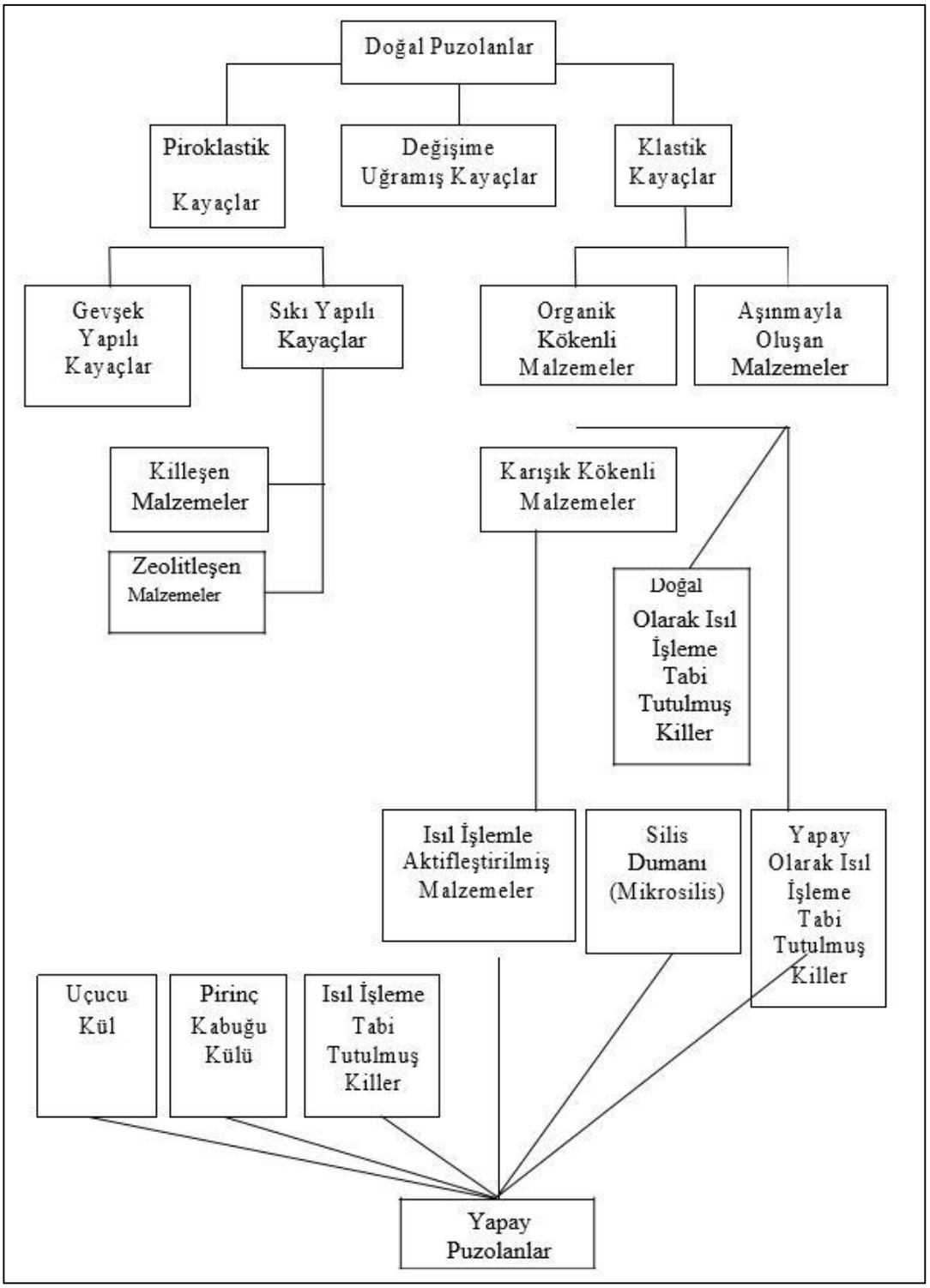
### 2.3.2 Puzolanların Sınıflandırılması

Puzolanlar doğal ve yapay olarak iki başlık altında incelebilir. Doğal puzolan ve yapay puzolan olarak kullanılan birçok puzolanik malzeme, çimentoya karıştırılarak veya bir miktar ilave edilerek kullanılmaktadır (Kırıkoğlu vd., 1990). Doğal puzolanları örneklendirecek olursak; doğada bulunan volkanik küller, tüfler ve volkanik camlar, zeolitler, diyatomitler ve diatomlu toprak malzemelerdir (Erdoğan, 2010b). Doğal puzolanları çimentoda kullanmak için sadece öğütmek yeterlidir. Yapay puzolanlar ise; puzolanik özelliğe çok az miktarda sahip ya da hiç bünyesinde puzolanik özellik barındırmayan malzemelerin kimyasal ve fiziksel değişkenliklerinin bir sonucudur (Özkan, 2009).

Doğal olan puzolanların ana oluşumu volkanik tortul kayalardan meydana gelmiştir. Ancak bünyesinde farklı malzemelerden oluşmuş maddeleri de içermektedirler (Gündeşli, 2008). Puzolanik malzemelerin oluşumunda rol alan doğal ürünler; silissi doğal, aliminyum silikatlı doğal veya her ikisinin bileşimi sonucu meydana gelen doğal malzemelerdir. Yalnız başına puzolanik özelliğe sahip malzemeler suya katıldıklarında kendi başlarına sertleşemezler. Ancak ince taneli olarak öğütülme işlemine tabi tutulduğunda ve su ile birleştiğinde, çözünmüş olan $Ca(OH)_2$, dayanımı iyileştiren $Ca_2SiO_3$ ile $C_3A$ bileşiklerini meydana getirmek için reaksiyona girerler. Oluşan bu bileşikler aslında hidrolik olan maddelerin de sertleşmesi ile meydana gelen bileşiklere oldukça benzerdir. Puzolanların oluşumunda tepkimeye sebep olan $SiO_2$ ve $Al_2O_3$ iken, diğer kısım ise $Fe_2O_3$ ve diğer oksitleri kapsamaktadır. Reaktif olan CaO miktarı sertleşme olması için ihmal edilebilir. Puzolanik malzemelerin reaktif $SiO_2$ oranı ağırlıkça %25,0'den az olmamalıdır (Gündeşli, 2008).

Suni puzolanlar endüstriyel atıklardır. Bunlar arasında en çok karşımıza çıkanlar ise; yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanıdır. Bunlardan başka doğal malzemelerin ısıl işlem görmesi sonucu ortaya çıkan puzolanik malzemeler de bir başka puzolan sınıfında ayrılabilir ya da yapay puzolan olarak da sınıflandırılmaktadır. Puzolanların sınıflandırılması konusunda birçok tablo ve şekil bulunmaktadır. Bu sınıflandırmalar içerisinde F. Massazza'nın yapmış olduğu sınıflandırma Şekil 2.1'de verilmiştir (Koçak, 2008).

Doğal puzolanları gruplandıracak olursak; piroklastik kayaç, değişime maruz kalmış kayaç ve klastik kayaç olmak üzere üç gruptadır. Piroklastik kayaçların oluşumu; eriyik magmanın çok hızlı ve kuvvetli bir şekilde dışarı fırlaması sonucunda şekil kazanması ve hızla soğuması ile de yüzeyinde kırıntılar oluşarak meydana gelmektedir. Değişim geçirmiş kayaçlar; yüksek oranda silis içerikli malzemeden oluşmaktadır. Bu kayaçlar, suyun içerisinde eriyebilen oksitlerin çözülmesi ile kimyasal değişikliğe maruz kalan kayaların, durgun sularda değişik orijinli maddelerle birlikte çökelmesiyle biçim kazanmaktadırlar. Klastik kayaçlar ise, kil ve diatomit malzemesini bünyesine alan klastik köklü kayaçlardır. Kil malzemesinin puzolanik davranışının az olması, Portland çimento ile kullanılmasına olanak vermemektedir. Ancak kil malzemeye uygun sıcaklıklarda yapılacak işlemlerin ardından, kilin puzolanik özelliğini istenilen miktarda artırmak mümkündür (Aruntaş, 1996; Koçak, 2008).




Şekil 2.1 Puzolanların sınıflandırılması

### 2.3.3 Puzolanların Aktivitesi

Puzolanik aktivite, puzolanın içerisindeki aktif amorf silisin kalsiyum hidroksit ile reaksiyona girebilme ve sertleşebilme özelliğine denir. Tam anlamıyla puzolanik aktivitede bu iki ana özelliğin aynı anda oluşması büyük önem arz etmektedir. Aşağıdaki bir takım özellikler, yüksek miktarda aktiviteye sahip olan puzolanlarda yapılan çalışmalar sonucu elde edilmiştir (Dayı, 2006).

- Yüksek miktarda alkali ve $SiO_2$, $Al_2O_3$, $Fe_2O_3$.
- Üst sınırlarda camsı faz miktarları
- Alan olarak, büyük özgül yüzeydir.

Puzolanik malzemelerin istenilen düzeyde puzolanik aktiviteye sahip olabilmesi, bu malzemenin ince öğütülmesine, amorf bir yapıya sahip olmasına, istenilen oranda silis, alümin ve demir oksite sahip olmasına bağlıdır. Dayanım aktivite indeksinin hesaplanması ile puzolanik aktivite hesaplanabilir. Bu değer ise aşağıdaki hesaplanma yöntemiyle bulunabilir (Erdoğan, 2003).

Dayanım aktivite indeksleri= (A/B)x100

Formüldeki;

A= Puzolan katkılı harç örneklerinin ortalama basınç dayanımı,

B= Kontrol harç örneklerinin ortalama basınç dayanımıdır.

Buradaki puzolanlı harç numuneleri ve kontrol harç numunelerini meydana getiren malzeme miktarları ve deney aşamaları ASTM C 311 (2019) ve TS EN 450 - 1 (2012) standartlarında gösterilmektedir (Gündeşli, 2008).

Puzolanik aktivite deneyinden sonra istenilen değer elde edildiği taktirde o malzemenin puzolanlığı kanıtlanabilir. Bu deneyler mekanik deneylerin yanı sıra

kimyasal deneyler ile de gerçekleştirilebilir. Mekanik deney içeriği, puzolan kireç ve puzolan-çimento harç örnekleri için uygulanan eğilme-basınç testi deneyidir. Kimyasal deney ise puzolan içerikli çimentonun su ile gerçekleştirdiği hidratasyonun sonucunda oluşan kalsiyum hidroksiti belirlemeye dayanır. Puzolanik malzemeleri irdelemenin başka kıstası ise puzolan içerikli çimento pastasındaki özgül yüzeyin artış hızı belirlemektir. Farklı kalsiyum hidroksitin emme hızına karşılık, aynı özgül yüzey artış hızı denk gelmektedir (Dayı, 2006).

Puzolanların homojen olmayan bir formda olmaları ve hidratasyonun karışık formu sebebiyle, puzolanik aktiviteyi daha net açıklayabilir bir sistem bulunmamaktadır. Bu durumda ancak genel bir özet ile açıklama yapılabilir. Bu açıklamanın özet hali şu şekildedir ( Koçak, 2008; Erdoğdu vd., 2009);

- Diğer bütün özelikleri aynı kalmak üzere puzolanın bağladığı karbon hidroksit oranın yüksek olması, puzolandaki aktif durumdaki madde miktarının fazlalığını göstermektedir.

- Puzolanik aktivite kısa süre zarfında özgül yüzey alanına, uzun süre zarfında mineralojik ve kimyasal karışım miktarına göre değişir.

- Puzolanların bağladığı $Ca(OH)_2$ oranı, aktif puzolanın faz içeriğindeki $SiO_2$ değeri ile alakalıdır.

- Puzolan ve kireç karışımında kireç/puzolan miktarı yükselmesi, $Ca(OH)_2$ bağlanmasını yükseltir.

- Camsı puzolanlara göre zeolitik puzolanlar daha aktiflerdir.

- Değişik puzolanlardaki mevcut fazlar, değişik kireç bağlayabilme özelliğine sahiptirler.

- Kireç ve puzolan karışımlarındaki suyun miktarı bağlanan kirecin miktarı ile orantılıdır.

### 2.3.4 Puzolanik Reaksiyon ve Reaksiyon Ürünleri

Puzolanik reaksiyon, nemli ortamda ince taneli olarak öğütülmüş puzolanların CH ile reaksiyonu olarak tanımlanır. Puzolanın kalsiyum hidroksit ile reaksiyonu, birtakım parametrelere bağlı olarak ilişkilendirilebilir. Bunlar kısaca aralarındaki davranış, incelik, bileşik miktarı, sıcaklık ve katkı malzemeleri gibi bazı faktörlerdir (Aruntaş, 1996).

Puzolanların bileşimi büyük oranda silis ve alüminden meydana gelmektedir. Küçük taneli puzolan, sönmüş kireç ve su ile birleştirildiğinde, malzemeler arasında kimyasal reaksiyonlar oluşmaktadır. Bu reaksiyonlar sonucunda oluşan reaksiyon ürünleri aşağıdaki gibidir (Erdoğdu vd., 2009).

- C-S-H formunda kalsiyum silikat hidrat,
- Kalsiyum alüminat hidrat ($C_4ASHx$), x: 9-13 aralığında,
- Hidrate olmuş, $C_2ASH_8$ (gehlenit),
- Kalsiyum karboalüminat, $C_3A.CaCO_3H_{12}$,
- Etrenjit, $C_3A.3CaSO_4.H_{12}$,
- Kalsiyum alüminatmonosülfat, $C_4A.CaSO_4.H_{12}$.

Ancak bahse konu bu ürünlerin tamamı aynı zamanda oluşmayabilir. Reaksiyon sonucu kireç ürününün kalsiyum hidroksiti kullanması, hidratasyon reaksiyon derecesi, hidratasyon anındaki çevre durumu ve puzolanların mineralojik ve kimyasal bileşeni bu ürünlerin oluşmaları için etkide bulunabilir (Aruntaş, 1996; Erdoğdu vd., 2009).

### 2.3.5 Pirinç Kabuğu Külü

Dünya genelinde pirinç üretimini Çin, Hindistan, Bangladeş ve Tayland çekmekte olup, toplam üretim yaklaşık olarak 500 milyon ton civarındadır (Şapaloğlu, 2015). Pirinç kabuğu, pirinç ürününün %20'sini; Pirinç külü de pirinç kabuğunun %20'sini oluşturmaktadır. Bu bağlamda yaklaşık 20 milyon ton PK meydana geldiği söylenebilir (İşbilir, 2012). Pirinç çeltiği ve pirinç kabuğu için dünyada üretim oranları üretilen ülkelere göre Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Pirinç çeltiği ve pirinç kabuğu için dünyada üretim oranları

| Ülke | Pirinç Çeltiği | Pirinç Kabuğu |
|---|---|---|
| Bangladesh | 27 | 5,4 |
| Brazil | 9 | 1,8 |
| Burma | 13 | 2,6 |
| China | 180 | 36 |
| India | 110 | 22 |
| Indonesia | 45 | 9 |
| Japan | 13 | 2,6 |
| Korea | 9 | 1,8 |
| Philippines | 9 | 1,8 |
| Taiwan | 14 | 2,8 |
| Tailand | 20 | 4 |
| US | 7 | 1,4 |
| Wietnam | 18 | 3,6 |
| Others | 26 | 5,2 |

Birçok ülkede pirinç kabukları yakıt olarak kullanılmaktadır. Yakılan pirinç kabuklarından elde edilen kül miktarı, pirinç kabuğu miktarının ağırlıkça %20'si kadardır. Diğer bir değişle, yılda 500 milyon ton pirinç üretimi ile 100 milyon ton pirinç kabuğunun yakıt olarak yakılması sonucunda, hemen hemen 20 milyon ton kül ortaya çıkmaktadır (Yıldız vd., 2007). Bu nedenle atık olan pirinç kabuğu yakılarak PK elde edilmektedir. Külün kullanım alanına göre kabuğun yakma şekli ve derecesi de değişebilmektedir. Eğer pirinç kabuğu (PK) yakıt olarak kullanılıcak ise yakılma koşullarının sabit olmasına gerek yoktur. Ancak elde edilecek kül çimento ve beton sektöründe kullanılacaksa yakılması kadar elde edilen külün soğutulması da bellirli koşullarda gerçekleştirilmelidir (Givi vd., 2010).

PK'nın içerisinde yer alan ağırlıkça hemen hemen %92 ile %93 kadar silikanın yanı sıra çok küçük miktarlarda alümina, demir oksit, kalsiyum oksit, magnezyum oksit ve alkaliler de bulunmaktadır. PK'yı yakma işlemi 400 ℃ ile 600 ℃ aralığında kontrollü olarak yapılırsa ve elde edilen PK'nın soğutulması hızlı olursa PK'deki silika, amorf yapıya dönüşmektedir. Daha fazla amorf silika içeren PK, yüksek yüzey alanına ve çok ince tanelere sahip yüksek reaktiflikte puzolanik özellikli bir malzeme olarak elde edilmektedir (Erdoğan ve Erdoğan, 2007; Yıldız vd., 2007). 800 ℃ ve üstündeki sıcaklıklarda PK'nın yakılması ile elde edilen külün düşük sıcaklık derecelerine kıyasla yüksek SiO içeriği, yüksek puzolanik reaktiviteli olduğu ve daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olduğu ortaya konulmuştur. Puzolanik bir malzeme olan PK'nın çimento ve betonda kullanımı ile betonun geçirimliliğin azaltılması, kimyasal taarruzlara karşı dayanıklılık, alkali-silika reaksiyonuna (ASR) karşı direnç, akışkanlık özelliklerinde iyileşme ve bundan dolayı betonun dayanım ve durabilitesinde iyileşme gibi avantajlar sağlanmaktadır ( Hwang ve Wu, 1989; Hwang ve Chandra, 1996; Erdoğan ve Erdoğan, 2007; Yıldız vd., 2007; Givi vd., 2010; İşbilir, 2012).

#### 2.3.5.1 Pirinç kabuğu külünün (PK) fiziksel ve kimyasal özellikleri

Pirinç kabuğu külünün yapısı, pirinç kabuğunun yapısı ile ilgilidir. Yakılması sonucu oluşan külde organik bileşiklerden gelen eser miktarda karbon bulunur. Kabuktaki karbon miktarına göre kül iki farklı şekilde tanımlanır (Kaplan ve Elmekahal, 2021). Karbon miktarı %1,5'den az ise kül, %1,5'den fazla ise odun kömürü denir. PK'de silis %80 ile %90 oranında bulunur.

Gözeneklilik; kabuklar yandığı zaman organik yapı bozularak gözenekli boşluklu kül oluşur. Külün gözenekliliği ile spesifik yüzey arasında lineer bağlantı olduğu belirtilmiştir (Kaplan ve Elmekahal, 2021).

Özgül yüzey; külün gözenekliliğinin yanısıra spesifik yüzey de önemlidir. BET adsorpsiyon yöntemi külün spesifik yüzeyini saptamada kullanılır. Spesifik yüzey; kabuğun yakılma sıcaklığına, süresine, öğütme şekline ve süresine göre değişir. Puzolanik özellikte spesifik yüzey ile değişir (Bayraktar, 2020).

## 2.4 Atık Mermer

### 2.4.1 Mermerin Tanımı

Mermer, yeryüzünde doğal olarak bulunan bir çeşit maden türüdür. Mermerlerin genelde tanımı dört farklı şekilde yapılmaktadır, bilimsel, jeolojik, ticari ve petrografik.

#### 2.4.1.1 Bilimsel tanım

Bünyesinde yüksek miktarda kalsiyum karbonat, az miktarda ise magnezyum karbonat ve farklı metal oksitler bulunduran kayaçlardır. Metamorfizma olayı ile başkalaşma sonucundan oluşan yeryüzünde bulunan bir nevi maden türüdür. Yer küresinde oluşan derzler ise yer sarsıntısının meydana gelmesi ile oluşmaktadır. Bu derzler ise zamanla kalsitle dolarak mermer damarlarının oluşumuna neden olmaktadır (Kişman ve Kan, 2011).

#### 2.4.1.2 Jeolojik tanım

Mermerler, kalsiyum karbonat ($CaCO_3$) ve dolomitik kireçtaşının basınç ve ısı ile metamorfizma olayı sonucu oluşan bir çeşit kayaç türüdür (Kuşçu vd., 2001). Aynı zamanda mermerler doğada kayaç olarak farklı türlerde bulunmaktadırlar. Metamorfik kökenli granit, magmatik kökenli granit, bazalt, şist, konglomera, kayrak taşı vb. gibi isimlerle tanınmaktadır (Kun, 2013).

#### 2.4.1.3 Ticari tanım

Ticarette metamorfik, magmatik, ve tortul olarak tanımlanan mermer ise, 3213 sayılı Maden Kanunu'na göre, bulunduğu kaynaklardan farklı yöntemler ile farklı boyutlarda, blok şeklinde, soğuma derzlerine göre ve kullanım amacına göre kesilerek elde edilen kayaçlardır (DPT, 2001).

### 2.4.2 Mermerlerin Sınıflandırılması

Kristal tane boyutuna, yapısına, bileşim oranlarına, oluşturduğu minerallere, ekonomik koşullara ve rengine göre sınıflandırılmaktadır. Bu sınıflandırılmalar aşağıda Tablo 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6 ve 2.7'de sunulmaktadır.

Tablo 2.2 Mermerlerin kristal tane boyutuna göre sınıflandırılması (Köktürk, 2002)

| Mermerin Boyutuna Göre Çeşidi | Mermerin Tane Boyutu |
|---|---|
| İnce | 0 <tane boyutu <1mm den küçük olan mermerlerdir |
| Orta | 1 ≤ tane boyutu ≤ 5 mm arasında olan mermerlerdir |
| İri | 5 mm <tane boyutu büyük olmalıdır |

Tablo 2.3 Mermerlerin yapısına göre sınıflandırılması (Tosun ve Tatar, 2007)

| Mermerin Yapısına Göre Çeşidi | Mermerin Yapısına Göre Özellikleri |
|---|---|
| Saf ve katkısız mermerler | Katı, boyut olarak ince ve iri olan mermerlerdir. |
| Laminal mermer | Katmer ve tabaka halinde bulunan ince taneli mermerlerdir. |
| Breşik mermer | Fay şeklinde tali mineraller ile oluşan mermerlerdir. |
| Şisti mermer | Kolayca yapraklanabilen yapısında silis ve alüminyum bulunduran mermerlerdir. |

Tablo 2.4 Mermerlerin bileşim oranlarına göre sınıflandırılması (BDTM, 2001)

| Mermerin Bileşim Çeşitleri | Mermerin Bileşim Özellikleri |
|---|---|
| Mermer | Yaklaşık %95 kalsiyum karbonat içermektedir. Saf ve katkısız bir yapıya sahiptir. Aynı zamanda Kuvars ve Mika gibi mineraller de içermektedir. |
| Mermer-Skarn | % (80-90) Kalsiyum karbonat içermektedir. Bunlar, Diopsit, Olivin, Epidot grona mineraller olarak adlandırılır. |
| Spolen | Bonyasında %80 kalsiyum karbonat bulundurmaktadır. Diopsit, Grona, Flonapit ve Tremotil gibi minerallere denir. |

Tablo 2.4 devamı

| | |
|---|---|
| Kalsit | % (60-70) kalsiyum karbonattan oluşmaktadır. Bloklar şeklinde olup cilalandırılabilen kayaçlardır. |

Tablo 2.5 Mermerlerin oluşturduğu minerallere göre sınıflandırılması (Erkek ve Özdemir, 2011; B. Öztürk, 2006; Şentürk vd., 1996)

| Mermerlerin Mineral Çeşidi | Mermerlerin Mineral Özellikleri |
|---|---|
| Sedimanter (tortul) mermerler | Kayaçların tortulaşması, parçalanması ya da aşınması gibi ayrışmalar sonucu oluşan tortul kayaçlar. |
| Metamorfik (başkalaşma) mermerler | Kayaçların fizikçe ve kimyaca değişmesi sonucu, başkalaşma olarak oluşan mermerledir. |
| Magmatik mermerler | Tüm magmatik kayaçların oluştuğu erimiş veya yarı erimiş doğal malzemedir. Yer yüzünde yer kabuğundan sokulması sonucu oluşan mermerlerdir. Bunlar, bazalt, siyenit, granit, diyabaz, gabro ve serpantin gibi kayaç türleridir. |

Tablo 2.6 Mermerlerin ekonomik koşullara göre sınıflandırılması (DPT, 1996)

| Ekonomik Sınıflandırma | Ekonomik Sınıflandırma Çeşitlerinin Türleri |
|---|---|
| Normal mermerler | Dolomit, konglomera gibi mermerlerdir. |
| Sert mermerler | Diyabaz, serpantin, granit gibi mermerlerdir. |
| Oniks ve traverten mermerler | |

Tablo 2.7 Mermerlerin doğadaki rengine göre sınıflandırma (Kişman ve Kan, 2011)

| | |
|---|---|
| Renk | Genellikle beyaz ve gri renklere sahiptir ama bünyesinde bulunduran farklı elementler vasıtasıyla doğada değişik renklerde de bulunmaktadır. Pembe, gri, yeşil, siyah gibi olarak bulunmaktadır. |

### 2.4.3 Mermerin Tarihsel Süreci

Tarihsel olarak bakıldığı zaman, insanoğlu kendi geçim ve yaşam ihtiyaçlarını karşılamak için doğal kaynaklara başvurmaktadır. Zamanla insan nesli artarken

ihtiyaçları da artmaktadır. Böylece insanların ihtiyaçlarını karşılamak için birçok çalışmalar yapılarak doğadaki kaynakların kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Eskiden yer altı kaynakları; sanat yapılar, tarihi eserler, barınma ve korunmak için kullanılıyordu. Teknolojinin gelişmesiyle kullanım alanları da artmıştır. Doğal kaynaklar ekonomik bakımdan ülkeler arasında çok büyük farklar yaratmaktadır. Bir ülke doğal kaynak olarak ne kadar zenginse o kadar gelişme hızına sahiptir (DPT, 1996). 1939 yılında başlayıp 1945 yılında son bulan ikinci dünya savaşının nedeni de yer altı kaynaklarıdır. Zamanla yer altı kaynakların ehemmiyeti bir ülkenin gelişimine ve kalkınmasına sebep olması fark edilmiştir. Böylece her ülke kendini güvence altına almak için gereken çabayı göstermiştir. Aynı zamanda sanayi sektörleri gelişen ülkeler, yer altı kaynağı bulunan bölgeleri kendi aralarında paylaşamama nedeniyle ikinci dünya savaşının gerçekleşmesine neden olmuştur (Sarıtaş, 2006). Bu nedenle birçok insan hayatını kaybetmiştir. Çevrede bırakılan atık mermerlerin ve diğer atık malzemelerin geri dönüşümü ve tekrardan değerlendirilmesi doğal kaynaklara olan ihtiyacı azaltmaktadır. Geri dönüşüm, çevreye ve insanların sağlıklı yaşamasına katkıda bulunmaktadır.

### 2.4.4 Mermer Atıklarının Oluşumu

Genel bir değerlendirme yapıldığında mermer atıklarının oluşumuna neden olan faktörleri yerine ve boyutuna göre şu şekilde değerlendirme yapabiliriz; kaynaklardan mermer sektörüne getirilen mermer taşları ilk başta çok farklı ve değişik geometrik şekillere sahiptir. Bu taşları kullanım amacına göre istenilen geometrik şekli verebilmek için kesme işlemi yapılmaktadır (Başpına vd., 2008).

#### 2.4.4.1 Mermer atıklarının parça (moloz) halindeki oluşumu

Mermer taşlarının ocaklarda işlenmesi sırasında blok biçiminde elde edilirken ve mermer sektöründe kesme işlemi yapılırken oluşan ve ticari anlamda ekonomiye katkısı olmayan çevreye bırakılan atık parçalardır (Tummer, 2013). Mermer atıklarının moloz halindeki oluşumu Şekil 2.2'de gösterilmektedir.



Şekil 2.2 Mermer atığının moloz halinde oluşumu

### 2.4.4.2 Mermer atıklarının toz halindeki oluşumu

AMT oluşumu iki şekilde oluşmaktadır. Birincisi mermer taşlarının kesme sırasında oluşur. İkincisi ise taşıma sırasında mermer bloklarının ezilmesi sonucu oluşmaktadır (Bilgin ve Koç, 2013; Kun, 2013). Oluşan mermer tozu mermer sektörleri tarafından değerlendirilmeden çevrede açık alanda bırakılmaktadır. Mermer atıklarının toz halindeki oluşumu Şekil 2.3'de gösterilmektedir.



Şekil 2.3 Mermer atığının toz halinde oluşumu

### 2.4.4.3 Mermer atığının çamur halindeki oluşumu

Mermer atıklarının çamur olarak oluşumu sırasında kesici makinelerin ucunda bulunan aletin çok çabuk ısınmasını ve mermer tozunun etrafa uçuşmasını önlemek için soğutucu su kullanılarak kesilmektedir. Böylece su ile karışıp akan mermer çamuru, doğrudan arazide bulunan kuyulara toplanıp atık mermer çamurunu oluşturur (Başpına

vd., 2008). Türkiye'de yapılan bir değerlendirmede mermer sektörlerinde yıllık 1.750.000 ton mermer işlenmektedir (İMMİB, 2014). Yapılan bir araştırmaya göre üretim sırasında yaklaşık %30'u atık olarak çevrede bulunan açık alanlarda bırakılmaktadır. Böylece çevreyi kirleterek doğada olumsuz etkiler yaratmaktadır (DPT, 2001). Çevrede bırakılan bu atıklar yukarda hatırlatıldığı gibi farklı şekillerde oluşmaktadır. Mermer atıklarının çamur halindeki oluşumu Şekil 2.4'te gösterilmektedir.



Şekil 2.4 Mermer atığının çamur halinde oluşumu

### 2.4.5 Mermer Atıklarının Betonda Kullanımı ve Değerlendirilmesi

Mermer atıkların beton karışımı içerisinde kullanılmasının birçok nedeni vardır. Mermer ocaklarında ve mermer sektöründe meydana gelen mermer atıklarının, çevreye ve insanların sağlığına olan olumsuz etkisini ortadan kaldırmak veya azaltmaktır (Ceylan, 2000). Dünya genelinde değerlendirecek olursak birçok uluslararası kuruluşlar kaynakların hızlı bir şekilde tüketilmesini önleyerek verimli bir şekilde kullanılması konusunda çalışmalar yapmaktadır. Bu kapsamda şu anki ilerlemekte olan gelişmeler, gereken ihtiyacı karşılayabilir. Fakat gelecekte bizden sonraki kuşakların ihtiyaçlarını karşılama konusunda bir sorun yaratılmaması unutulmamalıdır (Akbulut ve Gurer, 2003). Bu nedenle çevreye bırakılan mermer atıklarının beton içerisinde değerlendirilmesi, doğal kaynakların az tüketilmesine neden olabilmektedir. Böylece ülke ekonomisinde katkı sağlamaktadır. Şu ana kadar dünya çapında üretilen mermer miktarı yaklaşık 7 milyon ton'a ulaşmaktadır (Alyamaç ve Ince, 2009). Bu miktarın üretim aşamasında küçük parçalar ve toz

şeklinde yaklaşık %30'u, atık olarak çevreye bırakılmaktadır (Güler ve Polat, 2018). Türkiye'de yapılan araştırmalara göre mermer sektörlerinde $1m^3$ mermer bloğunun makinelerle işlenme sırasında yaklaşık %48'i toz halinde atık olarak çevreye bırakıldığı bilinmektedir. Türkiye'de 2021 yılanda üretilen mermer miktarı 11.500.000 ton olarak hesaplanmıştır. Buna göre çevreye atık olarak bırakılan miktarı üretimin %50'si olarak belirlenmiştir (İhracat Genel Müdürlüğü, 2021). Başka bir yandan, gün geçtikçe betonun inşaat sektöründe kullanımı artarak beton karışımında kullandığımız agrega ve çimento ihtiyacının artmasını da görmekteyiz. Türkiye'de her yıl yaklaşık 290.000.000 ton doğal ve yapay agrega üretilerek kullanılmaktadır (Öztürk vd., 2007). Yaklaşık 70.000.000 ton çimentonun da üretilerek kullanılması görülmektedir (DAKA, 2015). Bu nedenle, silis dumanı, uçucu kül ve mermer tozu gibi mineral katkılar agrega ve çimento ihtiyacını azaltarak ekonomiye bir katkıda bulunmaktır. Aynı zamanda daha yüksek dayanım, dayanıklı ve daha kaliteli bir beton türü elde etmektir (Corinaldesi ve Moriconi, 2003). Literatüre bakıldığında mermer atıklarının beton karışımı içerisinde iki farklı şekilde kullanıldığı müşahede edilmektedir, birincisi betonun esasını oluşturan çimento, ikincisi ise maliyeti daha yüksek olan ince agregalardır.

#### 2.4.5.1 Mermer tozunun betonda belli oranlarda ince agrega yerine kullanımı

Ünal, O. ve Kibici, A. (2001), çalışmalarında; Havuz çökeltisinde oluşan mermer atıklarının beton karışımındaki ince malzeme yerinde ikame edilerek üretilen beton numunelerinin basınç dayanımı araştırılmaktadır. Üretilen betonda agrega olarak kalker ve kırma taşı, çimento sınıfı olarak ta PÇ 32.5 N tipi seçilerek kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarının tamamında s/ç oranı sabit tutularak çimento dozajları 300 ile 350 kg seçilerek iki farklı beton serisi üretilmiştir. Mermer tozu ise belli oranlarda (%0; %10; %15 ve %20) olarak hacimce ince agrega ile yer değiştirerek kullanılmıştır. Üretilen beton numuneleri üzerinde taze beton (yaş birim hacim ağırlık ve çökme) deneyleri, sertleşmiş beton deneyleri, 28 günlük basınç mukavemeti, çekme mukavemeti, ultrases geçiş hızı ve kılcallık gibi testler yapılmaktadır. Sonuç olarak beton karışımı içerisinde kullanılan mermer tozunun beton dayanımına herhangi bir olumsuz etkide bulunmadığı görülmektedir. Böylece belli oranlarda kullanılması

önerilerek çevreye ve ekonomiye fayda sağlayacağı söylenmektedir (Ünal ve Kibici, 2001).

Demirel ve Yazıcıoğlu (2010) çalışmalarında; Atık mermer tozunu ince agrega yerine belli oranlarda ikame ederek kullanmışlardır. Üretilen beton numuneleri üzerinde basınç dayanımı, elastiste modülü ve ultrases geçiş hızı araştırılmaktadır. İnce agrega yerine ağırlıkça ikame edilen mermer tozu %0; %25; %50 ve %100 oranlarında kullanılmıştır. İkame edilen ince agreganın dane çapı da 0,25 mm olarak seçilmektedir. Bu çalışmada üretilen beton numunelerinin boyutu ise (150x150x150) mm'dir. Üretilen beton numunelerin kürleme işlemi standarda uygun olarak yapılıp 3,7 ve 28 günlük testleri uygun bir şekilde yapılmıştır. Elde edilen elastiste modülü ve ultrases geçiş hızının sonuçları basınç dayanımının sonuçları ile kıyas yapılarak belli bir sonuca ulaşılmıştır. Bu sonuçlara göre mermer tozu, dane çapı 0.25 mm olarak seçilen agreganın belli bir yüzdesi ile veya hepsi ile yer değiştirerek üretilen numunelerin dayanımının artması gözlenmiştir. Böylece AMT'nin betonda kullanılarak çevreye olan olumsuz etkisinin azaltılması ve doğal kaynakların az tüketilmesinin mümkün olması görülmektedir (Demirel ve Yazıcıoğlu, 2010).

Filiz vd. (2010) Çalışmalarında; Mermer tozunu parke taşlarında kullanarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada iki farklı çimento tipi (CEM II 32.5 N, CEM I 42.5 R), su/çimento oranını da iki farklı değer (0,50; 0,55) ve karışımların tamamında çimento dozajı 400 kg/$m^3$ seçilerek kullanılmıştır. Mermer tozu birinci tip çimento için hacimce %0; %10; %20 ve %30 ikinci tip çimento için%0, %10; %20; %30 ve %40 agrega ile ikame edilerek (150x150x150) mm ebatlarına sahip beton numuneleri üretilmiştir. Bu numuneler üzerinde tahribatlı ve tahribatsız test metotları uygulanarak sonuçları kaydedilmiştir. Bu sonuçlara göre iki tip çimento için de fiziksel ve mekaniksel özelliklerinin referans betona göre artışı görülmektedir. Bu artışlar yüzde olarak şu şekilde hesaplanmaktadır, %32,3 basınç dayanımı, %13,5 yarma dayanımını, %15,2 elastisite modülü, %25,8 su emme oranı, %8,4 aşınma değeridir. Elde edilen bu sonuçlar standardı sağladığına göre mermer tozu atıklarının parke taşları üretiminde kullanılması önerilmiştir (Filiz vd., 2010). Literatüre bakıldığında mermer tozunun birçok atık malzemeler (Silis dumanı, uçucu kül, atık lastikler vb.) ile beraber değerlendirildiği görülmektedir.

# 3. MATERYAL VE METOD

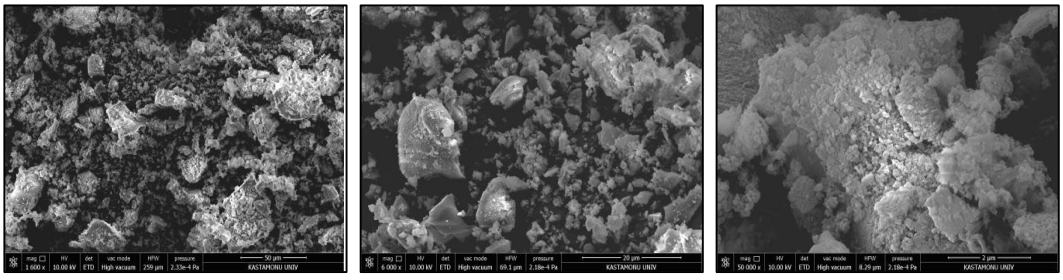
## 3.1 Materyal

### 3.1.1 Çimento ve Pirinç Kabuğu Külü

Bu çalışmada kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1'de verilen CEM I 42,5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Bağlayıcı olarak çimentonun yanı sıra PK kullanılmıştır. Bu çalışmada su/bağlayıcı (çimento+PK) oranı 0,70 olarak sabit tutulmuştur. 0 değiştirme oranlarında çimento yerine 14750 $cm^2/g$ özgül yüzeyli PK kullanılmıştır. Bu çalışmada ağırlıkça %0; %10 ve %20 kullanılan PK'nın fiziksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.1'de verilmiştir. PK'nın SEM görüntüleri ve XRD Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Tablo 3.1 Çimento ve PK fiziksel ve mekanik özellikleri

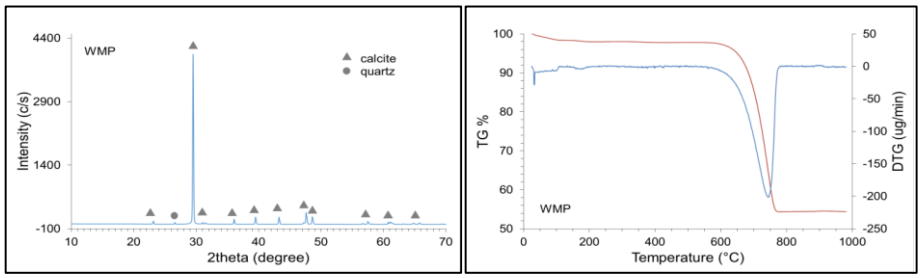
| **Kimyasal Bileşimler** | **Çimento** | **PK** |
|---|---|---|
| CaO | 63,48 | 0,68 |
| $SiO_2$ | 18,93 | 95,24 |
| $Al_2O_3$ | 5,22 | 0,82 |
| $Fe_2O_3$ | 3,42 | 0,18 |
| MgO | 1,76 | 0,33 |
| $SO_3$ | 2,69 | 0,16 |
| $Na_2O$ | 0,45 | 0,11 |
| $K_2O$ | 0,71 | 1,33 |
| Ateşleme kaybı | 3,17 | 1,45 |
| Özgül ağırlık | 3,14 | 2,12 |
| Özgül yüzey ($cm^2/g$) | 3400 | 14750 |
| 2 günlük basınç dayanımı (MPa) | 28,9 | |
| 28 günlük basınç dayanımı (MPa) | 51,1 | |
| Başlangıç/bitiş zamanı ayarlama (dk) | 165/210 | |



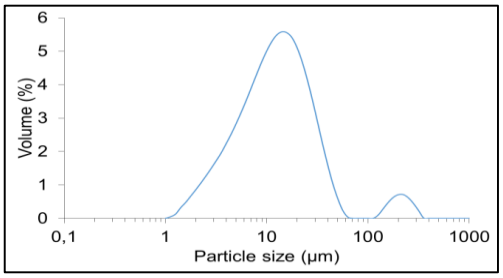
Şekil 3.1 PK'nın SEM görüntüleri

### 3.1.2 Atık Mermer Tozu

İnce agrega olarak silis kumu yerine kullanılan AMT, Kastamonu'da bir mermer üreticisinden temin edilmiştir. Şekil 3.2a, AMT'nin X-Işını Kırınımı (XRD) spektrumlarını ve küçük kuvars piklerini ($SiO_2$) olan ana kristalin mineral olarak kalsitin ($CaCO_3$) varlığını göstermektedir. Şekil 3.2b, TGA'yı vermektedir. Atık mermer tozu eğrisi, fiziksel olarak emilen suyun neredeyse ortadan kaldırılması nedeniyle 1000 °C aralığında toplam ağırlık kaybı %45,6'dır. 100 °C ve başlıca kalsitin 570 °C ile 780 °C arasında ayrışmasını göstermektedir. Şekil 3.2c'de verildiği gibi, partikül boyutu AMT dağılımı 300 µm'nin altında kalmaktadır. D50 (ortalama partikül boyutu) yaklaşık 11,8 µm'dir ve bu tozların D90'ı yaklaşık 31,7 µm olduğunu göstermektedir. AMT özgül ağırlığı 2,68 g/cm$^3$'tür.




(a) (b)

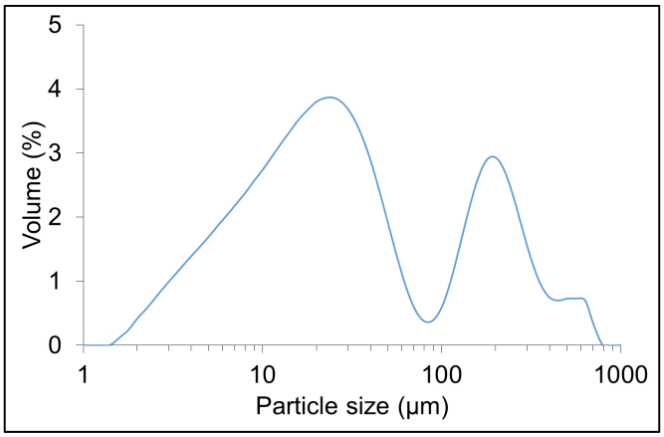



(c)

Şekil 3.2 a) AMT XRD modülü b) TGA analizi c) Partikül boyutu dağılımı

### 3.1.3 Silis Agregası

Bu çalışmada özgül ağırlığı 2,62 g/cm$^3$ su emme özelliği %0,98 olan silis kumu kullanılmıştır. İnce agreganın boyut dağılımı Şekil 3.3'te verilmiştir. Agrega içeriği ağırlıkça %40'tır. Silis kumunun boyut dağılımı 800 µm'nin altındadır. D50 (ortalama parçacık boyutu) yaklaşık 23,8 µm'dir ve D90 yaklaşık 227,5 um'dir.




Şekil 3.3 Silis kumu partikül boyutu

### 3.1.4 Karışım Suyu

Karışımın üretimi ve kürlenme sürecinde Kastamonu Üniversitesi kampüsündeki içilebilir nitelikte, betona zararlı olabilecek organik madde ihtiva etmeyen ve sıcaklığı 20±5°C sıcaklığında TS-EN 1008 standartlarına uygun şebeke suyu kullanılmıştır. Karışım ve kür de kullanılan suyun özellikleri Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Karışım ve kür de kullanılan suyun özellikleri

| Analizler | Deney Sonuçları | Limit Değerler |
|---|---|---|
| Koku | Yok | Yok |
| Amonyum (mg/L) | 0,02 | |
| İletkenlik (mS/cm) | <2500 | 0- 2500 (TS 97, 2019) |
| Ph | 7,93 | |

## 3.2 Metod

### 3.2.1 Köpük Betonların Üretimi

Numuneler Kastamonu Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Yapı Malzemeleri Laboratuvarında hazırlanmıştır. Tablo 3.3'te gösterildiği gibi köpük 40-80 oranlarında, PK %0, %10 ve %20 oranlarında ve AMT ise %0, %25 ve %50 oranlarıyla Tablo 3.4'de gösterildiği malzeme miktarları ile toplamda 18 seri üretim yapılmıştır. Bunlardan 9 adet 40*40*160 mm numune eğilme basınç dayanımı için, 4 adet 25*25*285 mm numune kuruma büzülmesi için, deney olarak 3'er adet 40*40*160mm numune 200°C-400°C-600°C-800°C hava ve su soğutmalı yüksek

sıcaklık dayanıklılığı için, 3'er adet 40*40*160 mm numuneler 100 ve 200 döngü donma-çözülme dayanıklılığı için, 3'er adet 50*50*50 mm küpler arşimet ve kapilerite deneyleri için, 20*50*100 mm numune ısıl iletkenlik için dökülmüştür.

Tablo 3.3 Karışım değişkenleri

| Karışım No. | Karışım Kodu | Köpük (Kg/m$^3$) | Pirinç Külü (%) | Atık Mermer Tozu (%) |
|---|---|---|---|---|
| **1** | **F40R0M0** | 40 | 0% | 0% |
| **2** | **F40R0M25** | | | 25% |
| **3** | **F40R0M50** | | | 50% |
| **4** | **F40R10M0** | | 10% | 0% |
| **5** | **F40R10M25** | | | 25% |
| **6** | **F40R10M50** | | | 50% |
| **7** | **F40R20M0** | | 20% | 0% |
| **8** | **F40R20M25** | | | 25% |
| **9** | **F40R25M50** | | | 50% |
| **10** | **F80R0M0** | 80 | 0% | 0% |
| **11** | **F80R0M25** | | | 25% |
| **12** | **F80R0M50** | | | 50% |
| **13** | **F80R10M0** | | 10% | 0% |
| **14** | **F80R10M25** | | | 25% |
| **15** | **F80R10M50** | | | 50% |
| **16** | **F80R20M0** | | 20% | 0% |
| **17** | **F80R20M25** | | | 25% |
| **18** | **F80R20M50** | | | 50% |

Tablo 3.4 1 $m^3$ için karışım malzeme miktarları

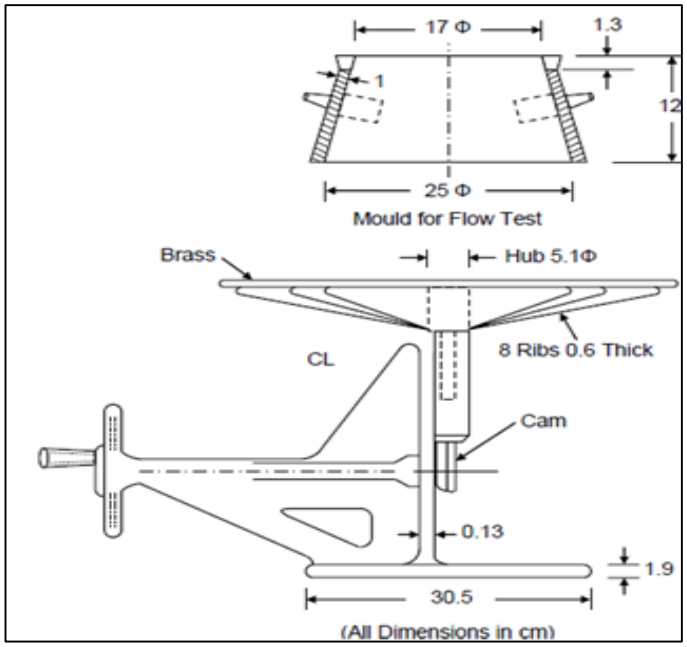
| Karışım Kodu | Çimento | Pirinç Külü | Silis Agregası | Mermer Tozu | Su | Köpük |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **F40R0M0** | 3500 | 0 | 13227,8 | 0,0 | 2450 | 400 |
| **F40R0M25** | 3500 | 0 | 9920,9 | 3307,0 | 2450 | 400 |
| **F40R0M50** | 3500 | 0 | 6613,9 | 6613,9 | 2450 | 400 |
| **F40R10M0** | 3150 | 350 | 13125,7 | 0,0 | 2450 | 400 |
| **F40R10M25** | 3150 | 350 | 9844,3 | 3281,4 | 2450 | 400 |
| **F40R10M50** | 3150 | 350 | 6562,9 | 6562,9 | 2450 | 400 |
| **F40R20M0** | 2800 | 700 | 13023,6 | 0,0 | 2450 | 400 |
| **F40R20M25** | 2800 | 700 | 9767,7 | 3255,9 | 2450 | 400 |
| **F40R25M50** | 2800 | 700 | 6511,8 | 6511,8 | 2450 | 400 |
| **F80R0M0** | 3500 | 0 | 9761,2 | 0,0 | 2450 | 800 |
| **F80R0M25** | 3500 | 0 | 7320,9 | 2440,3 | 2450 | 800 |
| **F80R0M50** | 3500 | 0 | 4880,6 | 4880,6 | 2450 | 800 |
| **F80R10M0** | 3150 | 350 | 9659,1 | 0,0 | 2450 | 800 |
| **F80R10M25** | 3150 | 350 | 7244,3 | 2414,8 | 2450 | 800 |
| **F80R10M50** | 3150 | 350 | 4829,5 | 4829,5 | 2450 | 800 |
| **F80R20M0** | 2800 | 700 | 9557,0 | 0,0 | 2450 | 800 |
| **F80R20M25** | 2800 | 700 | 7167,7 | 2389,2 | 2450 | 800 |
| **F80R20M50** | 2800 | 700 | 4778,5 | 4778,5 | 2450 | 800 |

Taze çimento esaslı kompozitler Tablo 3.4'de yer alan malzeme miktarları ile aşağıdaki işlem sırası ile hazırlanmıştır.

- İlk olarak çimento (varsa PK ile) ve karışım suyu düşük hızda 1 dakika ardından 1 dakika yüksek hızda karıştırılmıştır.
- Hazırlanan çimento pastası 1 dakika dinlendirilmiştir.
- Hazırlanan köpük pastaya eklenerek 1'er dakika düşük ve yüksek hızlarda karıştırılmıştır.
- Tartılan agrega (varsa AMT ile) karışıma ilave edilerek 1'er dakika düşük ve yüksek hızlarda karıştırılmıştır.
- Karıştırma işlemi tamamlanan taze haldeki kompozitin işlenebilirliğini belirlemek amacıyla yayılma tablası kullanarak yayılma çapı ölçülmüştür.
- İşlemleri tamamlanan karışım belirlenen kalıplara yerleştirilmiştir.

### 3.2.2 Taze Harç Özellikleri

Çimento esaslı kompozitlerin işlenebilirliği Şekil 3.4'te gösterilen yayılma tablası yardımıyla ölçülmüştür. Taze haldeki kompozitlerin yayılma çapları ASTM C 1437 standardına göre belirlenmiştir. Çimento esaslı kompozitlerin yayılma çapları, X ve Y yönlerinin ortalama uzunluğu ile belirlenmiştir.




Şekil 3.4 Yayılma tablasının şematik görünüşü

### 3.2.3 Fiziksel Özellikler

Çimento esaslı kompozitlerden elde edilen 50*50*50 mm boyutlarındaki numuneler ilk olarak fiziksel özelliklerinin belirlenmesi için kullanılmıştır. Fiziksel özellikler arasında porozite, su emme ve birim hacim ağırlık yer almaktadır. Kalıptan çıkardıktan sonra 90 gün su küründe bekletilen numuneler suya doygun bir halde iken arşimet terazisi yardımı ile su içindeki ağırlığı tartılmıştır. İşlemi tamamlanan numuneler bez yardımıyla kurulanarak DKY elde edilip ağırlığı tartılmıştır. Bu işlemi de tamamlanan numuneler 3 gün boyunca 50°C (±5°C) etüvde kurulmuştur. Kurutulan bu numunelerin etüv kurusu ağırlığı tartılmıştır. Elde edilen veriler ile aşağıdaki denklemler sayesinde istenilen fiziksel özellikler hesaplanmıştır.

$$\text{Su Emme (\%)} = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \quad (3.1)$$

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

$$\text{Birim Hacim Ağırlık} = \frac{W_0}{W_1 - W_2}, \frac{t}{m^3} \quad (3.3)$$

Burada ;

$W_0$ = Etüv kurusu ağırlık

$W_1$ = Suya doygun, kuru yüzey ağırlık

$W_2$ = Suyun içerisindeki ağırlık olarak belirtilmiştir.

### 3.2.4 Mekanik Özellikleri

Çimento esaslı kompozitlerin 7-28-90 günlerinin ardından eğilme basınç testine tabi tutulmuştur. Bu testlerde 40*40*160 mm boyutlarında prizma numune kullanılmıştır. Eğilme testleri ASTM C 348 standartına, basınç testi ise ASTM C 349 standartına göre gerçekleştirilmiştir. Eğilme testi 3 noktalı eğilme cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Eğilme testinde 2'ye ayrılan numuneler sonrasında basınç testi için kullanılmıştır.

### 3.2.5 Kuruma Büzülmesi

Çimento esaslı kompozitlerin kuruma büzülmesi amacıyla 25*25*285 mm boyutlu numuneler üretilmiştir. Üretilen numuneler 7 gün su küründe beklemesinin ardından ilk boyu DKY elde edilip dijital komparatör ile ölçülmüştür. İlk ölçümün ardından 3. günde tekrar boyu ölçülüp sonrasında ise her 7 günde bir olmak üzere 120 gün boyunca ölçüm gerçekleştirilmiştir. Bu boy ölçme işlemleri ASTM C 596 standartına göre gerçekleştirilmiştir.

### 3.2.6 Kapilerite

Çimento esaslı kompozitlerin kapilerite özelliklerini belirlemek amacıyla üretilen 50*50*50 mm boyutlarındaki numuneler 90 gün su küründe beklemesinin ardından 3

gün boyunca 50 ℃ (±5℃) etüvde bünyesindeki suyun buharlaşması sağlanmıştır. Etüv kurusu haline gelen bu numenelerin sadece tabandan su işlemesine müsaade edildiğinden yan yüzeyleri su geçirimsiz su-tut malzemesi ile yalıtılmıştır. Yalıtılan bu numuneler yaklaşık 5 mm yüksekliğe sahip bir aparata yerleştirilerek ASTM C 1585 standartında belirlenen ölçüm aralıkları ile 28 gün boyunca kapiler su işleme derinliği ölçülmüştür.

### 3.2.7 Donma-Çözülme Dayanıklılığı

Çimento esalı kompozitlerin donma-çözülme dayanıklılığını belirlemek amacıyla 40*40*160 mm boyutlarında dökülen numuneler 90 gün su küründe tutulmasının ardından döngü sonrasında karşılaştırmak üzere ilk ağırlıkları ve ultrases geçiş hızı ölçümü yapılarak 100 ve 200 donma-çözülme döngüsüne koyulmuştur. 7 saat donma, 5 saat çözülme süresine sahip bu döngüler ile günde 2 döngü yapacak şekilde döngüler tamamlanmıştır. Döngüsü tamamlanan numunelerin tekrar ağırlığı ve ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. İşlemleri tamamlanan numunelerin mekanik özelliklerilerindeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla eğilme basınç testine tabi tutulmuştur.

### 3.2.8 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı

Çimento esaslı kompozitlerin yüksek sıcaklık dayanıklılığının incelenmesi 40*40*160 mm boyutlu 90 gün su küründe beklemiş numuneler en az 24 saat 105℃ (±5℃) etüvde kurutulup ilk ağırlğı ve ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. Numunelerin yüksek sıcaklık dayanıklılığını belirlemek için 2 tip soğutma yöntemi izlenmiştir. Bunlardan ilki hava soğutmadır. Hava soğutma tipinde belirlenen sıcaklıktan çıkarılan numune oda sıcaklığında 24 saat bekletildikten sonra ağırlığı ve ultrases geçiş hızı ölçülür. İkinci tip ise su soğutma tipidir. Bu tipte belirlenen sıcaklıktan çıkarılan numuneler itfaiyeleme yöntemi ile su ile temas ettirilip soğuması beklenir ve yine 24 saat oda sıcaklığında bekledikten sonra ağırlık ve ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. İşlemleri tamamlanan numunelerin mekanik özelliklerilerindeki değişimlerin belirlenmesi amacıyla eğilme basınç testine tabi tutulmuştur.

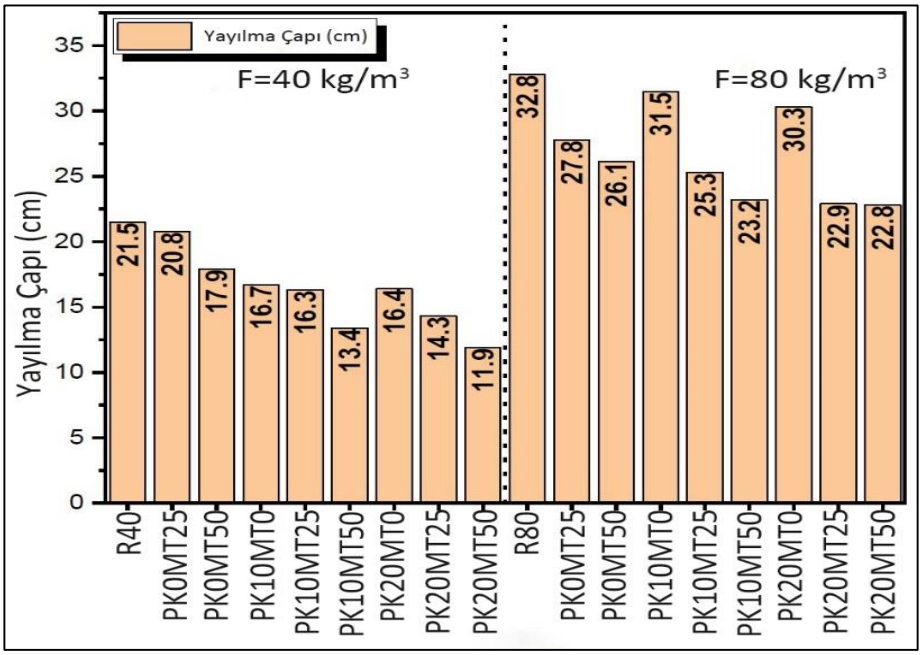
# 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

## 4.1 İşlenebilirlik

40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeren karışım oranı ile üretilen taze köpük beton karışımlarının yayılma çapı değerleri Şekil 4.1'de değerlendirilmiştir. Şekil 4.1'de incelendiğinde, köpük içeriğinin 40 kg/m$^3$'ten 80 kg/m$^3$'e çıkartılıp agrega içeriğinin azaltılması nedeniyle yayılma çapı değerlerinde önemli ölçüde artış gözlemlenmiştir. İnce agrega içeriğinin AMT ile ikame edilmesi ve çimento içeriği yerine PK ikame edilmesi yayılma çapı değerlerini düşürmüştür ve PK'nın AMT'ye göre yayılma çapı azalması üzerindeki etkisi daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Köpük içeriği 40 kg/m$^3$ olan karışımların yayılma çapı değerleri 21,5 cm ile 11,9 cm arasında değişmiştir. En yüksek yayılma çapı değeri 21,5 cm R40 referans karışımından elde edilmiştir. Çimentonun %20 PK ve silis kumunun %50 AMT ile değiştirilmesi, R40'a kıyasla %44,65 oranında 11,9 cm'lik en düşük yayılma çapı değerine yol açtı. %10 ve %20 PK eklenmesinden kaynaklanan yayılma çapı azalmaları, R40 ile karşılaştırıldığında sırasıyla %22,32 ve %23,72 olmuştur. PK ve AMT'nin birlikte kullanımı, artan değiştirme seviyesi ile yayılma çapı değerini daha da azalttı.

80 kg/m$^3$ köpük içerikli tüm taze köpüklü karışımların yayılma çapı değerleri 32,8 cm ile 22,8 cm arasında değişmiştir. Köpük içeriğindeki artış, önceki köpük içeriğine kıyasla tüm karışımlar için daha yüksek yayılma çapı değerleri ortaya çıkarmıştır. Bu daha düşük agrega oranı nedeniyle su oranının azalmasına neden olan köpük oranının artmasına bağlanabilir (Onprom vd., 2015). Bu köpük karışımı içeriğinde çimento ikamesi olarak PK ve ince agrega ikamesi olarak AMT ilavesinin yayılma çapı değerleri üzerindeki etkisi çok açıktır. Bu köpük içeriğinde yayılma çapı değerleri 32,8 cm ile 22,8 cm arasında değişmiştir. En yüksek yayılma çapı değeri referans karışım R80'den elde edildi ve en düşük yayılma çapı değeri 22,8 cm'lik karışımdan %20 PK ve %50 AMT'nin birlikte kullanılmasıyla elde edilmiştir. Betonda çimento ikamesi veya agrega ikamesi olarak PK ve AMT'nin eklenmesi nedeniyle yayılma çapı değerlerinde azalma, literatürdeki birçok çalışmada bildirilmiştir (Chao-Lung vd., 2011; Munir vd., 2017; Kabeer ve Vyas, 2018; Varadharajan vd., 2020; Yifru ve

Mitikie, 2020; Zhang vd., 2020). Bu azalmanın nedeni, AMT varlığından dolayı su ihtiyacının artmasıdır. Atık mermer tozu agregaları köşeli bir şekle sahip olduğundan, daha fazla yüzey alanının ıslak olması gerekir ve bu da işlenebilirliğin azalmasına neden olur. Köşeli ince agregaların belirli bir işlenebilirlik için daha fazla su gerektirdiği, bu nedenle köşeli atık mermer atığı ince agregaların kullanımının işlenebilirlikte bir azalmaya neden olduğu bildirilmiştir. Atık mermer tozu agregalarının bir beton karışımına dahil edilmesinin, karışımı oldukça yapışkan ve daha az işlenebilir hale getirerek su ihtiyacını artırdığı bildirilmiştir (Vardhan vd., 2019b). PK nedeniyle yayılma çapı'nın azalması, PK yüzdesindeki artışın, doldurma kabiliyetini korumak için daha büyük miktarda su gerektiren toplam bağlayıcı yüzey alanında bir artışa neden olduğu gerçeğine bağlanabilir (Varadharajan vd., 2020).




Şekil 4.1 Karışımların çökme değerleri köpük içeriği a) 40kg/m$^3$ b) 80kg/m$^3$

## 4.2 Basınç Dayanımı

Şekil 4.2'de köpük içeriği 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ olan 7, 28 ve 90 günlük köpük beton numunelerinin ortalama basınç dayanımı test sonuçları grafiksel olarak gösterilmiştir. Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b'de görüldüğü gibi agrega içeriğindeki azalmaya bağlı olarak basınç dayanımındaki azalma ortaya çıkmıştır. 40 kg/m$^3$ köpük içeriğine sahip tüm karışımlar, tüm kürleme günlerinde 80 kg/m$^3$ köpük içeriğine sahip karışımlardan daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir ve PK ve AMT veya her ikisinin

kombinasyonunu içeren tüm karışımlar, referans karışımlar R40 ve R80'den daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Şekil 4.2a'da her iki köpük içeriğinde, köpük içeriği 40 kg/m$^3$ olan köpük beton numunelerinin basınç dayanımını göstermektedir. Gösterildiği gibi, tüm karışım numunelerinin basınç dayanımı, artan kürlenme günleri ile artmıştır. Silis kumu yerine %50 AMT içeren karışım, 40 kg/m$^3$ köpük içeriği ile tüm köpük beton karışımlarında en yüksek 7 ve 28 günlük basınç dayanımını göstermiştir ve en yüksek 90 günlük basınç dayanımını çimento yerine %10 PK ve silis kumu yerine %50 AMT içeren karışımdan elde edilmiştir (F40R10M50). Referans karışımı R40, tüm kürleme günlerinde en düşük basınç dayanımını göstermiştir. 7. günde köpük betonların basınç dayanımları 11,39 ile 24,62 MPa arasında değişmektedir. Ortalama en düşük basınç dayanımı referans numunesi R40'a aittir ve ortalama en yüksek basınç dayanımı %50 AMT içeren ve R40 numunelerine kıyasla 7 günde %116,15'lik çok yüksek basınç dayanımı artışı sağlayan PK içermeyen (F40R0M50) karışıma aittir. 28. günde köpük betonların basınç dayanımları 12.79 ile 29,52 MPa arasında değişmektedir. 7 gün kürlenmiş karışımlara benzer şekilde, referans karışımı R40 en düşük basınç dayanımına sahiptir ve %50 AMT içeren ve PK içermeyen karışım (F40R0M50) referans karışım R40 ile karşılaştırıldığında 28. günde %130,80 artışla en yüksek basınç dayanımını elde etti.

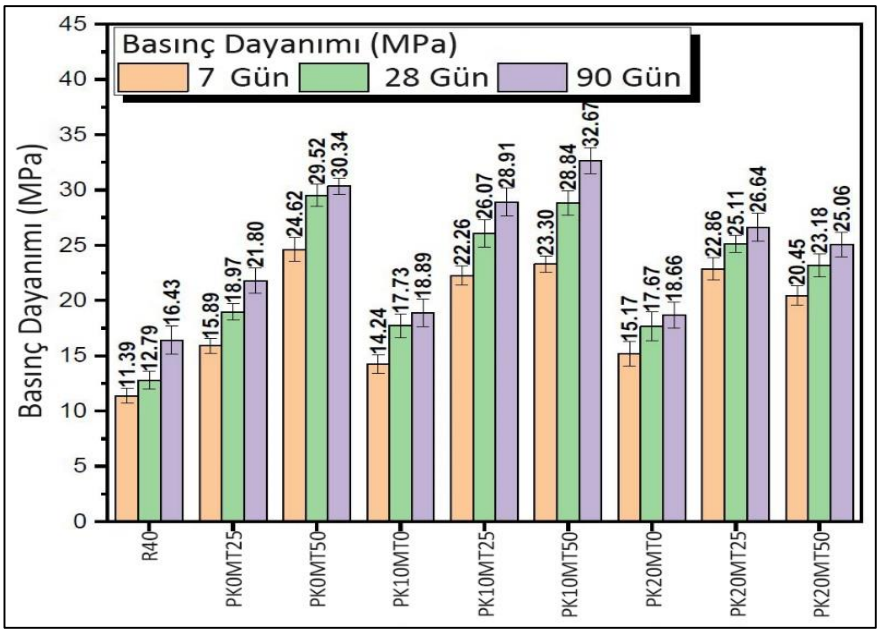
F40R10M50 karışımı, referans karışım R40 ile karşılaştırıldığında %98,84'lük bir artışla 32,67 MPa'lık 90 günlük basınç dayanımına sahiptir. Çimento ikamesi olarak %10 PK ve silis kumu ikamesi olarak %50 AMT'nin birlikte kullanımının, 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde özellikle 90 günlük nihai yaşta optimum yüzdeyi verdiği sonucuna varılabilir. Silis kumu ikamesi olarak AMT içeren ve PK içermeyen karışımların, çimento ikamesi olarak AMT içeren ve AMT içermeyen karışımlardan daha yüksek mukavemet gösterdiği de söylenebilir. Silis kumunun AMT ile değiştirilmesinden kaynaklanan basınç dayanımı artışı birçok yazar tarafından rapor edilmiştir. Ghani ve diğerleri silis kumunun %40 AMT ile değiştirilmesinin maksimum basınç mukavemetini iyileştirmesine yol açtığını kaydetti (Ghani vd., 2020). Ulubeyli ve Artir (2015), ince agrega ikamesi olarak mermer tozu ilavesiyle ortalama mukavemette %5-10 artış göstermiştir. Demirel (2010), ince agrega olarak artan AMT oranı ile basınç dayanımının arttığını belirtmiştir. Binici ve Aksogan (2018), ince agrega olarak artan AMT oranıyla, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımının sırasıyla %10 ve %100

AMT oranında %14 ve %32 arttığını belirtmiştir. Bu, ince mermer tozunun gözenek doldurma etkisinin agregayı çevreleyen geçiş bölgesinin özelliklerini artırmasıyla açıklanabilir (Aliabdo vd., 2014). Atık mermer tozu içermeyen %10 ve %20 PK içeren iki karışım (F40R10M0 ve F40R20M0) neredeyse aynı 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımlarına sahipti ve PK ve AMT'nin kombine kullanımı ile karışımlardan daha düşük mukavemet ve referans karışım R40'tan daha yüksek mukavemet gösterdiler. Bu sonuç aynı zamanda Chao-Lung ve arkadaşları (2011) tarafından da doğrulanmıştır. Betonun mukavemetini ve dayanıklılığını olumsuz etkilemeden PK'nın çimento ile %20'ye kadar karıştırılabilineceğini belirttiler. Çimentonun PK ile değiştirilmesinden kaynaklanan basınç dayanımı artışı da birçok yazar tarafından rapor edilmiştir. Varadharajan vd. (2020) çimentonun PK ile optimum ikamesinin %15 olduğunu bulmuştur. Benzer gözlemler, diğer birçok çalışmada çimentonun %15 PK ile değiştirilmesiyle mükemmel sertleştirilmiş özellikler başarısının elde edildiği bildirilmiştir (Rahman vd., 2014; Safiuddin vd., 2010, 2012). Karıştırılmış çimento betonunun basınç dayanımının iyileştirilmesi, PK'da Portland çimentosu ile reaktif silikanın hidrasyonu sırasında oluşan portlandit ($Ca(OH)_2$)'nin puzolanik reaksiyonuna bağlanmaktadır. Bu puzolanik reaksiyonla oluşan İkincil Kalsiyum Silikat-Hidrat (C-S-H), Kalsiyum Hidroksit (CH) miktarını azaltarak C-S-H miktarını arttırır ve böylece geniş kılcal damarları doldurarak ve gözenek sistemini incelterek poroziteyi azaltır (Praveenkumar vd., 2019). Şekil 4.2b, köpük içeriği 80 kg/$m^3$ olan köpük beton numunelerinin basınç dayanımını göstermektedir. Gösterildiği gibi, tüm karışım numunelerinin basınç dayanımı, artan kürleme günleri ile artmıştır ve PK ve AMT içeren tüm karışımlar, referans karışım R80'den daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. PK ve AMT'nin katılma oranı arttıkça karışımların basınç dayanımı arttı.

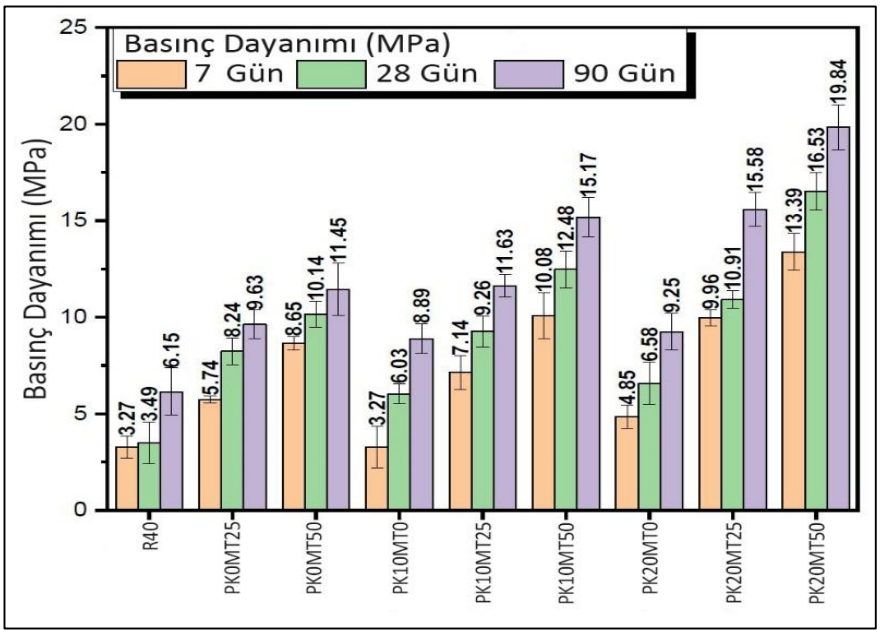
80 kg/$m^3$ köpük içeriğine sahip tüm karışımlar arasında %20 PK ve %50 AMT içeren karışım sırasıyla %309,48; %373,63 ve %222,6 artışlarla 7, 28 ve 90 günlük 13,39 MPa, 16,53 MPa ve 19,84 MPa'lık en yüksek basınç dayanımını sergilemiştir.

Çimento ikamesi olarak %20 PK ve silis kumu ikamesi olarak %50 AMT'nin birlikte kullanımının 80 kg/$m^3$ köpük içeriğinde optimum yüzdeyi verdiği sonucuna varılabilir. %50 AMT içeren ve PK içermeyen karışım (F80R0M50) sırasıyla %164,52; %190,54 ve %86,17 artışlarla 8,65; 10,14 ve 11.45 MPa'lık 7, 28 ve 90

günlük basınç dayanımını göstermiştir. %10 ve %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışımlar benzer basınç dayanımına sahipti ve %20 PK içeren karışım, %10 PK'dakinden biraz daha yüksek mukavemet göstermiştir. Referans karışım R80 ile karşılaştırıldığında %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışım için %48,31; %88,53 ve %50,40'lık 7, 28 ve 90 günlük dayanım artışı elde edilmiştir.




(a)



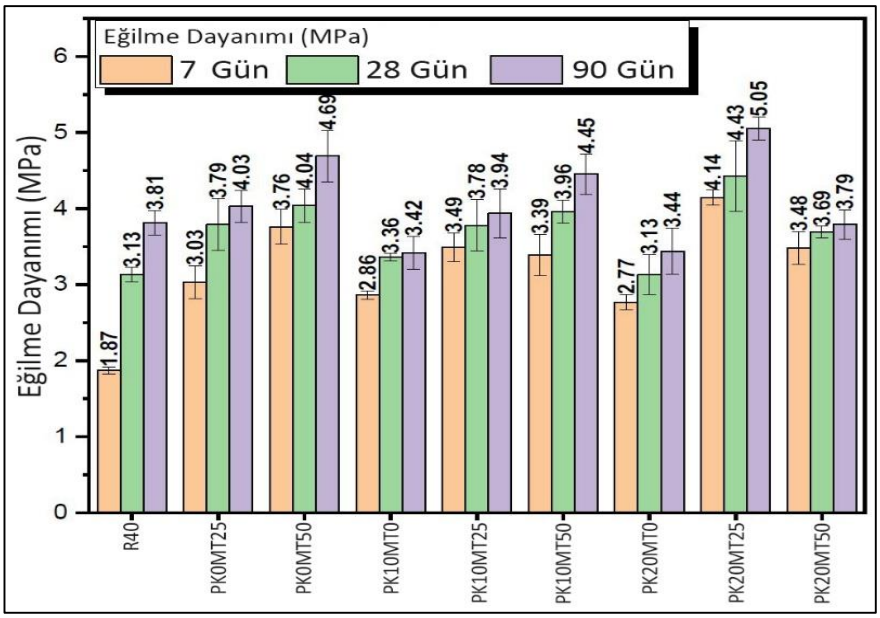

(b)

Şekil 4.2 Basınç dayanımı sonuçları köpük içeriği a) 40 kg/m$^3$ b) 80 kg/m$^3$

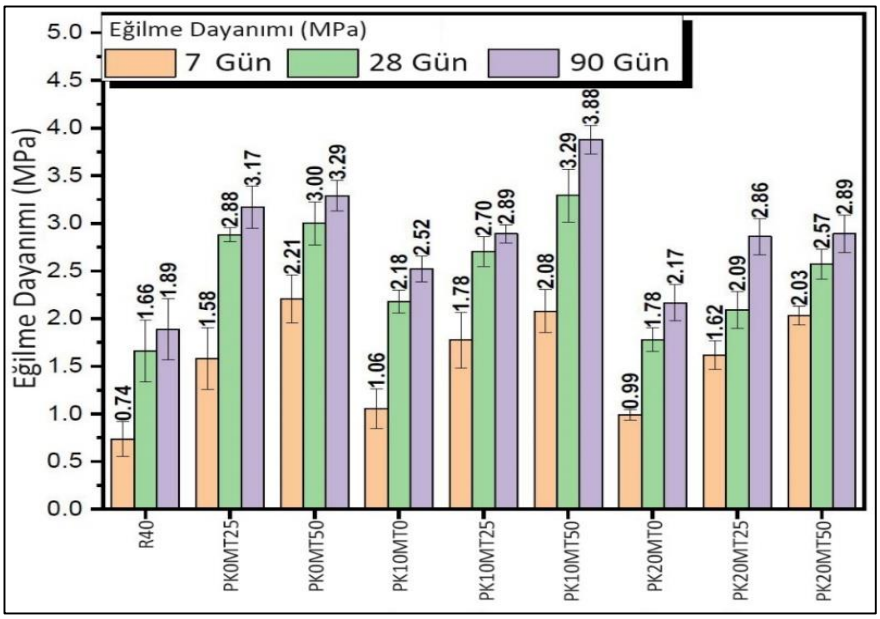
## 4.3 Eğilme Dayanımı

40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 7, 28 ve 90 günlük köpük beton numunelerinin ortalama eğilme mukavemeti testi sonuçları Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Kum ikamesi veya AMT ve PK kombinasyonu olarak sadece AMT içeren karışımlar 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde referans karışım R40'tan daha yüksek eğilme mukavemeti göstermiştir, ancak çimento ikamesi olarak sadece PK içeren karışım, 7. ve 28. günlerde daha yüksek mukavemet sergilemiştir, ancak 90. günde referans karışım R40'tan çok az daha düşük mukavemet sergilemiştir. Öte yandan, köpük içeriği 80 kg/m$^3$ olan tüm karışımlar, referans karışım R80'den daha yüksek mukavemet ortaya koymuştur. Şekil 4.3a, 40 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren köpük beton numunelerinin eğilme mukavemeti sonuçlarını göstermektedir. Özellikle tüm kürlenme zamanlarında silis kumunun AMT ile değiştirilmesinin köpük betonun eğilme dayanımı üzerindeki etkisi dikkate değerdi ve eğilme dayanımı değişim seviyesi ile artmıştır. Kum ikamesi olarak %50 AMT ve PK içermeyen karışım için R40 ile karşılaştırıldığında sırasıyla %101,06, %29,07 ve %23,09 eğilme dayanımı artışı elde edilmiştir. AMT'nin betona dahil edilmesi, çimentolu matrisi güçlendirilmiş bağlama özellikleri ile yoğunlaştırır. Yine de, trikalsiyum alüminat ile kalsit arasındaki reaksiyona bağlı olarak karbano-alüminat oluşumu eğilme mukavemetini arttırır (Varadharajan vd., 2020; Vardhan vd., 2019a). 4,14; 4,43 ve 5,05 MPa'lık en yüksek 7, 28 ve 90 günlük eğilme mukavemetleri, sırasıyla %121,39; %41,53 ve %32,54 artışlarla %20 PK ve %25 AMT içeren karışım için elde edilmiştir. Şekil 4.3b, 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren köpük beton numunelerinin eğilme mukavemeti sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.3b'de gösterildiği gibi, PK ve AMT içeren tüm karışımlar veya her ikisinin kombinasyonu, referans karışım R80'den daha yüksek mukavemet sergilemiştir. AMT'nin kum ikamesi olarak eklenmesi, artan AMT oranıyla dayanımı arttırmıştır. Sadece AMT ve PK içermeyen karışımda, R80 ile karşılaştırıldığında kum ikame maddesi olarak %50 AMT ve PK'sız karışım için sırasıyla 7, 28 ve 90 günlük eğilme mukavemeti artışı %198,64; %80,72 ve %74,07 olarak elde edilmiştir. Sadece PK içeren karışımın eğilme dayanımındaki gelişme, sadece AMT veya AMT ve PK kombinasyonunu içeren karışımınkinden daha düşüktü ve bu köpük içeriği 7, 28 ve 90. günlerde R80 ile karşılaştırıldığında %10 PK ilavesi %43,24; %31,32 ve %33,33 eğilme dayanımı artışı ile sonuçlanmıştır. Eğilme dayanımındaki artış esas olarak, daha yoğun mikroyapı ile

sonuçlanan daha fazla C-S-H üretmek için kalsiyum hidroksit ile reaksiyona giren PK'nın puzolanik reaksiyonuna atfedilir (Molaei Raisi vd., 2018; Praveenkumar vd., 2019). 2,08; 3,29 ve 3,88 MPa'lık en yüksek 7, 28 ve 90 günlük eğilme mukavemetleri, bu köpük içeriğinde R80'e kıyasla sırasıyla %181,08; %98,19 ve %105,29 iyileştirmeler olan %10 PK ve %50 AMT içeren karışım için elde edilmiştir.




(a)




(b)

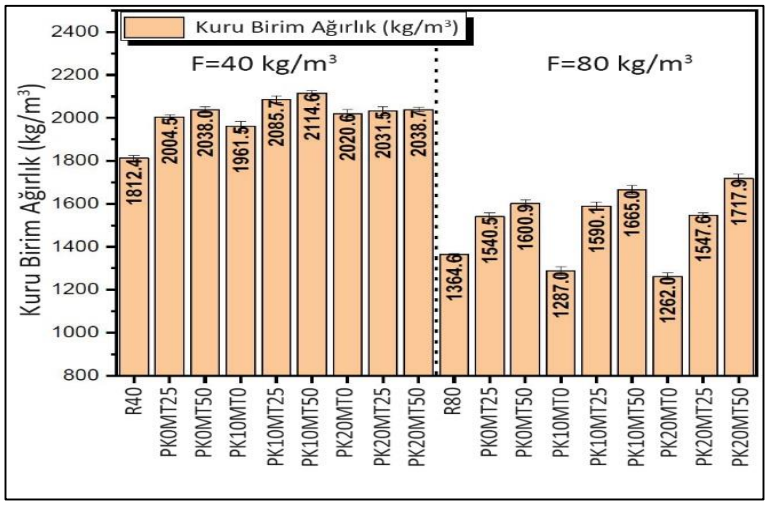
Şekil 4.3 Eğilme dayanımı sonuçları köpük içeriği a) 40 kg/m$^3$ b) 80 kg/m$^3$

## 4.4 Köpük Betonların Kuru Birim Hacim Ağırlığı ve Isıl İletkenliği

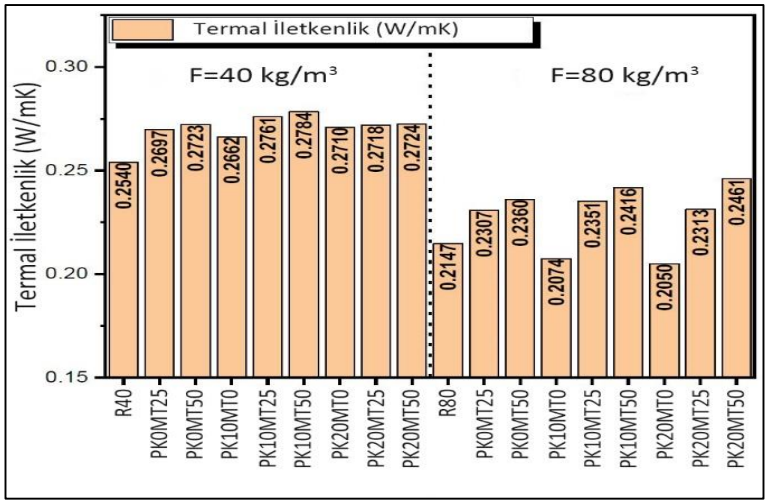
40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içerikli 90 günlük köpük beton numunelerinin kuru birim hacim ağırlığı ve ısıl iletkenlik testi sonuçları Şekil 4.4a'da grafiğe dökülmüştür. Şekil 5'de gösterildiği gibi, ısıl iletkenlik büyük ölçüde birim hacim ağırlığa bağlı olduğundan, çok benzer birim hacim ağırlık ve ısıl iletkenlik değişimleri elde edilmiştir. Şekil 4.4a, köpük beton karışımlarının kuru birim hacim ağırlığını göstermektedir, görüldüğü gibi 80 kg/m$^3$'te artan köpük içeriği birim hacim ağırlığını önemli ölçüde azaltmıştır. 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, PK ve AMT ile tüm karışımlar, referans karışım R40'tan daha yüksek birim hacim ağırlık sergilemiştir. Kuru birim hacim ağırlık artışları, R40 karışımına göre %10 ve %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışımlarda sırasıyla %8,22 ve %11,47 olarak bulunmuştur. Bu artış, PK'nın çimentoya kıyasla daha küçük tane boyutuna bağlı olarak taze betondaki fiziksel bağlanmayı iyileştirmeye bağlanabilir (Safiuddin vd., 2012). AMT içeren karışımlar için kuru birim hacim ağırlıkta daha fazla artış elde edilmiştir, ancak en yüksek birim hacim ağırlık 40 kg/m$^3$'te PK ve AMT'nin kombine kullanımını içeren karışımlar için elde edilmiştir. Bu sonuç diğer çalışmalarla uyum içindedir ve AMT ve PK'nın eklenmesine bağlı olarak daha kompakt ve daha yoğun matris oluşumuna atfedilebilir (Vardhan vd., 2019a, 2019b). Evram vd. (2020) AMT ilavesiyle kuru birim ağırlığının %1,6 ile %3,5 arasında arttığını belirtti. 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde en yüksek basınç dayanımına sahip olan %10 PK ve %50 AMT içeren karışım için en yüksek kuru birim hacim ağırlık, R40'a göre %16,66 artışla 2114,6 kg/m$^3$ olarak bulunmuştur. 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, PK ve AMT içeren tüm karışımlar, yalnızca %10 ve %20 PK içeren karışımlar dışında, R80 ile karşılaştırıldığında birim ağırlıkta sırasıyla %5,6 ve %7,47 azalma göstermesi dışında, referans karışım R80'den daha yüksek birim hacim ağırlık sergilemiştir. En yüksek kuru birim hacim ağırlık, 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde en yüksek basınç dayanımına sahip olan %20 PK ve %50 AMT içeren karışım için %80'e göre %25,87 artışla 1717,9 kg/m$^3$ olarak bulunmuştur.

40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin ısıl iletkenlik test sonuçları Şekil 4.4b'de gösterilmektedir. Isıl iletkenlik değerlerinin değişimi kuru birim hacim ağırlığa çok benzerdir. Görüldüğü gibi, 80 kg/m$^3$ köpük içeriği ile birim hacim ağırlığını önemli ölçüde azaltmıştır ve buna bağlı olarak ısıl

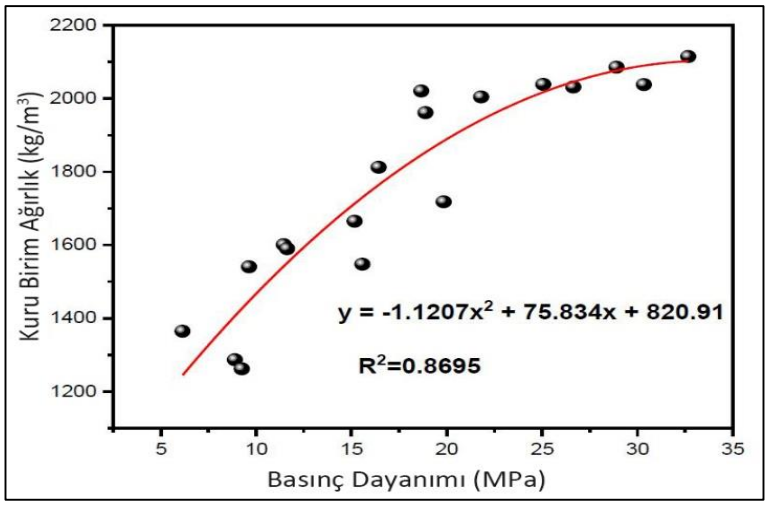
iletkenlik önemli ölçüde azalmıştır. 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, PK ve AMT ile tüm karışımlar, referans karışım R40'tan daha yüksek termal iletkenlik sergilemiştir. Isıl iletkenlik artışları %10 ve %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışımlarda R40 karışımına göre sırasıyla %4,80 ve %6,69 olarak bulunmuştur. Isı iletkenliğindeki azalmanın betonun birim ağırlığını azaltan boşluk oranındaki artıştan kaynaklandığı kaydedilmiştir. Hava, moleküler yapısı nedeniyle katı ve sıvıya göre daha az ısıl iletkenlik gösterdiği için gözenekli betonda daha düşük ısıl iletkenliğe neden olur (Liu vd., 2014). AMT içeren karışımlar için termal iletkenlikte daha fazla artış elde edilmiştir, ancak en yüksek termal iletkenlik 40 kg/m$^3$'te PK ve AMT'nin kombine kullanımını içeren karışımlar için elde edilmiştir. 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde en yüksek birim hacim ağırlığa sahip olan %10 PK ve %50 AMT içeren karışım için en yüksek ısıl iletkenlik R40'a göre %9,60 artışla 0,2784 (W/mK) olarak bulunmuştur. 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, PK ve AMT içeren tüm karışımlar yalnızca %10 ve %20 PK içeren karışımlar dışında, R80 ile karşılaştırıldığında termal iletkenlikte sırasıyla %3,4 ve %4,51 azalma göstermesi dışında, referans karışım R80'den daha yüksek termal iletkenlik sergilemiştir. En yüksek ısıl iletkenlik, 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde en yüksek kuru birim hacim ağırlığa sahip olan %20 PK ve %50 AMT içeren karışım için %14,62 artışla 0.2461 (W/mK) olarak bulunmuştur. PK'nın gözenekli yapısı ve düşük özgül ağırlığının, bu köpük içeriğinde köpük betonların ısıl iletkenliğinde bir azalmaya yol açtığı sonucuna varılabilir (Kunchariyakun vd., 2015). Şekil 4.4c, köpük betonların basınç dayanımı ile kuru birim hacim ağırlığı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Basınç dayanımı ile kuru birim hacim ağırlık arasında güçlü bir ilişkinin 0,86 katsayılı bir korelasyon katsayısı ile olduğu bulunmuştur.




(a)




(b)



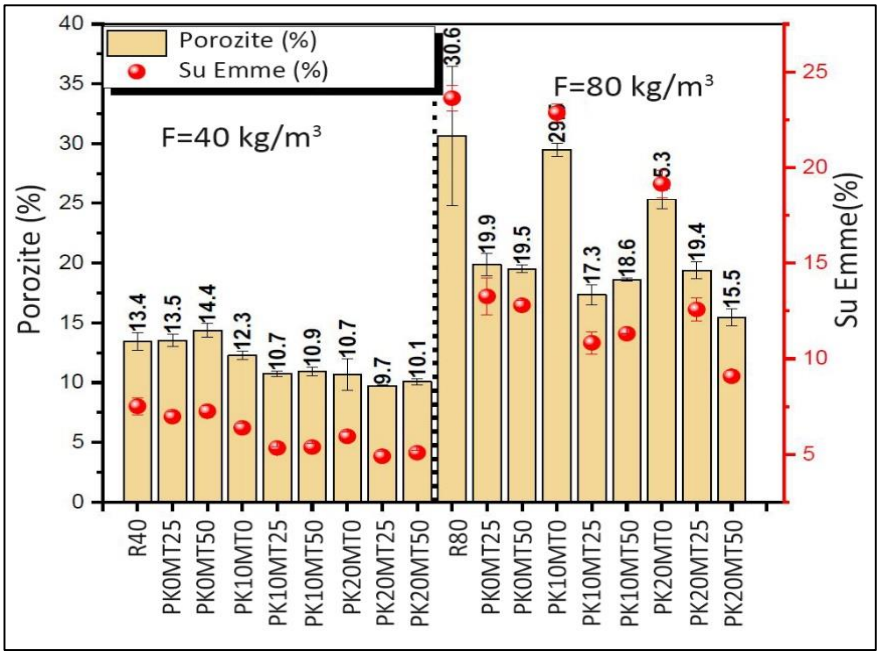

(c)

Şekil 4.4 a) Kuru birim hacim ağırlık b) 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde termal iletkenlik sonuçları c) basınç dayanımı ve kuru birim ağırlık arasında ki ilişki

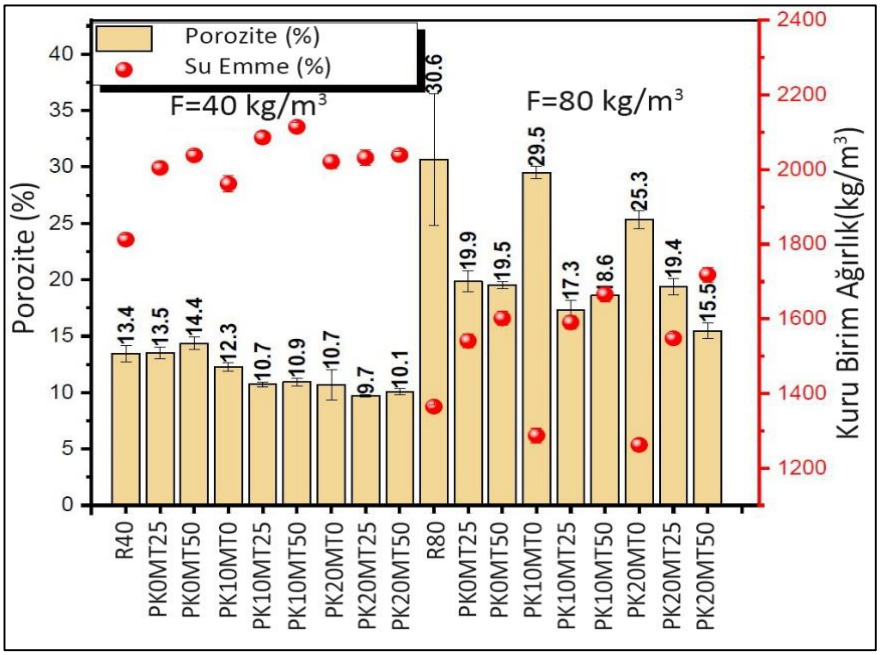
## 4.5 Porozite ve Su Emme

40 kg/$m^3$ ve 80 kg/$m^3$ köpük içerikli 90 günlük köpük beton numunelerinin porozite ve kapilarite deney sonuçları Şekil 4.5a'da gösterilmektedir. Şekil 4.5a'da gösterildiği gibi, %50 AMT içeren karışım en yüksek poroziteye sahiptir ve R40 en yüksek kapilarite değerlerini göstermiştir ve %20 PK ve %25 AMT içeren karışım 40 kg/$m^3$ köpük içeriğinde en düşük porozite ve kapilarite değerlerini göstermiştir. Referans karışımı R80 en yüksek porozite ve kapilarite değerlerini göstermiş ve %20 PK ve %50 AMT içeren karışım 80 kg/$m^3$ köpük içeriğinde en düşük porozite ve kapilarite değerlerini sergilemiştir. Görüldüğü gibi, PK ve AMT ilavesi porozite ve kapilarite değerlerini düşürmüştür ancak AMT'nin porozite ve kapilarite üzerindeki etkisi yüksek köpük içeriğinde dikkat çekicidir. PK gibi puzolanik malzemelerin karışımların porozite ve kapilarite özellikleri üzerindeki etkin rolü aşağıdaki faktörlerle açıklanabilir. Puzolanik malzemeler (PK) bir dolgu görevi görerek ortalama gözenek boyutunu azaltır ve daha az geçirgen bir pasta elde edilmesini sağlar. Ayrıca betondaki hem PK hem de AMT partiküllerinin puzolanik reaksiyonu ve dolgu etkisi nedeniyle arayüz geçiş bölgesinin iyileştirilmesidir (Miyandehi vd., 2016). AMT, beton karışımında etkili partikül bağlanması sağlayarak, porozitenin azalmasına yol açan bir dolgu etkisi sağladığı bulunmuştur ( Corinaldesi vd., 2010; Aliabdo vd., 2014; Singh vd., 2019). Porozitedeki en yüksek azalma 40 kg/$m^3$ köpük içeriğinde %20 PK ve %25 AMT içeren karışımda R40 karışımına göre %27,61 olarak bulunmuştur. 80 kg/$m^3$ köpük içeriğinde, %20 PK ve %50 AMT içeren karışım, %49,34'lük en yüksek porozite azalmasını sergilemiştir. Kapilaritede de benzer azalma gözlendi. 40 kg/$m^3$ ve 80 kg/$m^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin porozite ve kuru birim ağırlık ilişkisi Şekil 4.5b'de gösterilmiştir. Şekil 4.5b'den görülebileceği gibi, düşük poroziteye sahip karışımlar daha yüksek kuru birim ağırlık göstermiştir. Şekil 4.6c, köpük betonların porozite ile kapilarite arasındaki ilişkiyi ve kuru birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Porozite ve kapilarite arasında ve porozite ile kuru birim hacim ağırlık arasında güçlü bir ilişki olduğu, sırasıyla 0,99 ve 0,91 korelasyon katsayıları ile olduğu bulunmuştur. Şekil 4.6d'de gösterildiği gibi köpük betonların ısıl iletkenliğine karşı porozite ve kuru birim hacim ağırlığı arasında da benzer güçlü bir ilişki vardır. Isıl iletkenlik büyük ölçüde betonun porozitesine ve kuru birim ağırlığına bağlı olduğundan gösterildiği gibi, sırasıyla 0,90 ve 0,995

korelasyon katsayıları ile termal iletkenlik ve porozite, kuru birim hacim ağırlık arasında güçlü ilişkiler vardır.

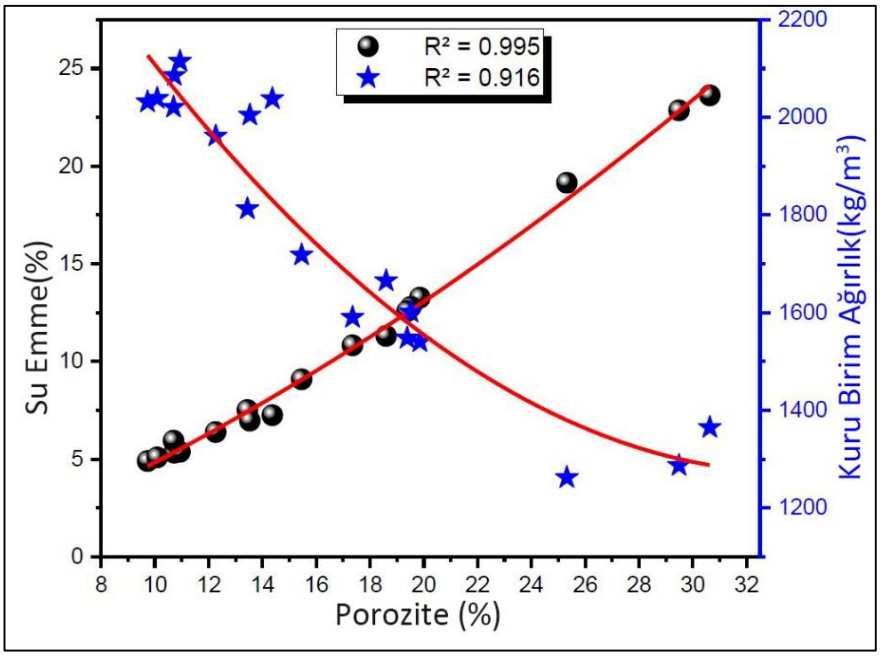



(a)

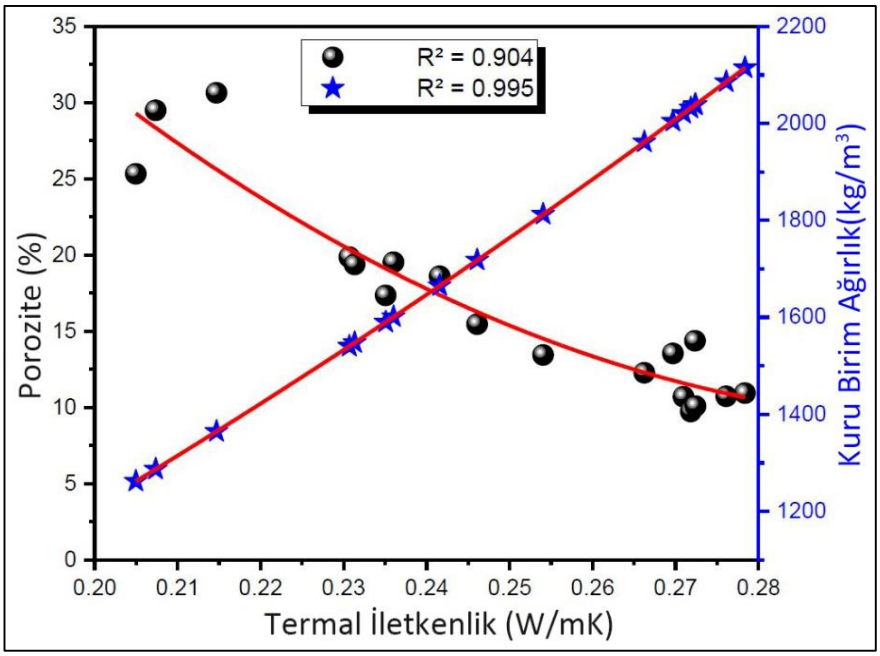



(b)

Şekil 4.5 a) Porozite ve kapilarite b) Porozite ve kuru birim hacim ağırlık sonuçları




(c)



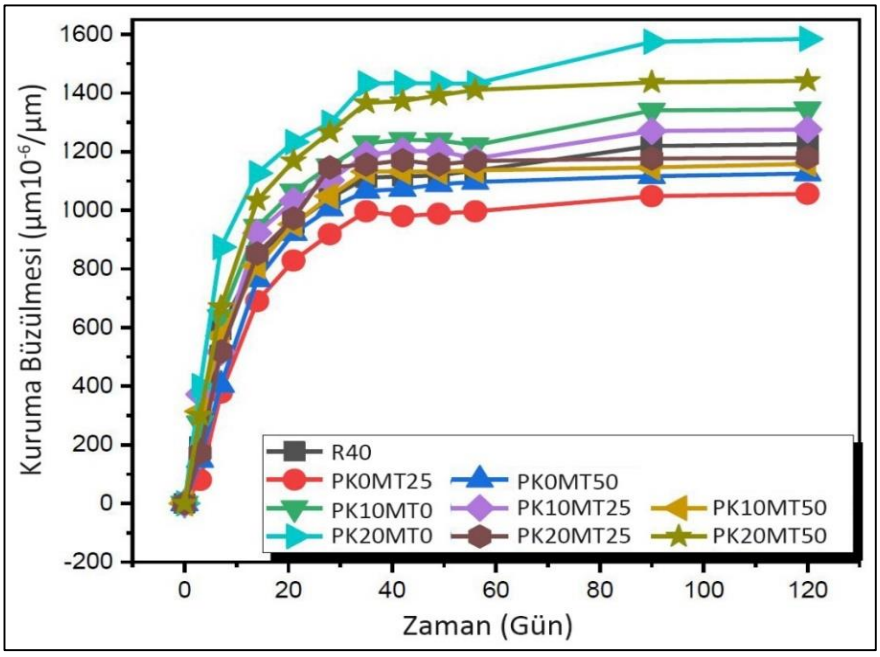

(d)

Şekil 4.6 c) Porozite ve kapilaritenin kuru birim ağırlık ile ilişkisi d) Porozite ve kuru birim ağırlık ile ısıl iletkenlik arasındaki ilişki

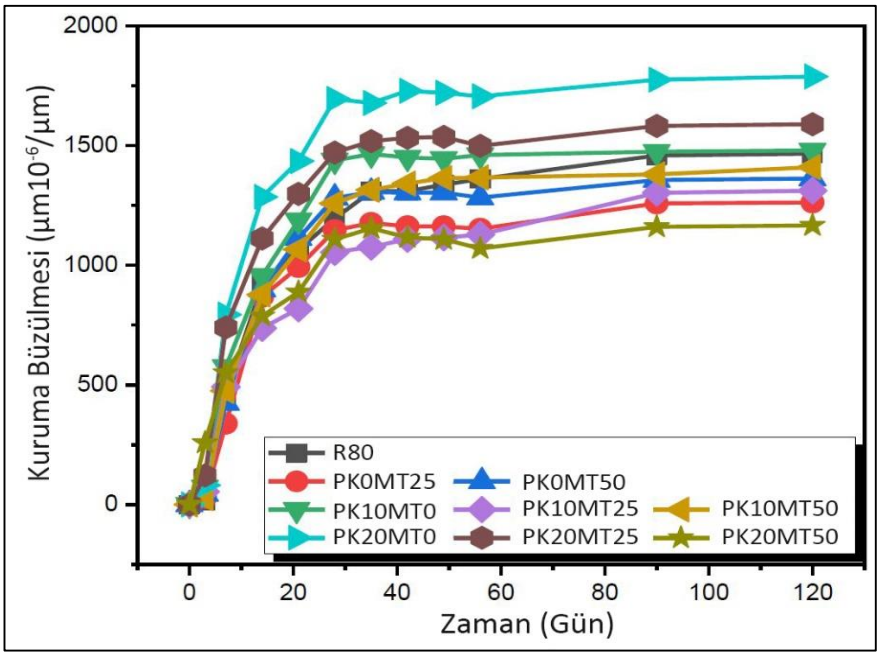
## 4.6 Kuruma Büzülmesi

Şekil 4.7, 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 120 günlük köpük beton numunelerinin kuruma büzülmesini göstermektedir. Büzülme ilk 28 günde daha hızlı gerçekleştir, ardından büzülme hızı her iki köpük içeriğinde 120 güne kadar yavaşlamıştır. Şekil 4.7a, 40 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren köpük beton numunelerinin kuruma büzülmesini göstermektedir. Şekil 4.7a'da gösterildiği gibi, AMT ince agrega olarak eklenmesinin, hemen hemen tüm kuruma süreleri boyunca karışımların kuruma büzülmesini önemli ölçüde azalttığı daha açıktır (Vardhan vd., 2019b). En düşük büzülme değerleri %25 ve %50 AMT içeren ve PK içermeyen karışımlarda elde edilmiştir. Silis kumunun %25 ve %50 AMT ile değiştirilmesi, 120 günlük kurumada referans karışım R40'a kıyasla sırasıyla %13,79 ve %8,16 kuruma büzülme azalması ile sonuçlanmıştır. Görüldüğü gibi AMT içeriği arttıkça kuruma büzülmesi azalmıştır. Silis kumunun AMT ile değiştirilmesiyle kuruma büzülmesinin azalması, AMT'nin tane şekli ve gözenek boyutu dağılımının neden olduğu gözenek incelmesinden kaynaklanıyor olabilir. Betonun gözenek yapısındaki iyileştirme, kuruma sırasında kapiler gözeneklerden su buharlaşmasını azaltarak kuruma büzülmesini azaltır (Vardhan vd., 2019b). Vardhan vd. (2019b) atık mermer agregalarının betonun dayanım ve büzülme özelliklerini iyileştirmek için kullanılabileceğini belirmiştir. Atık mermer agregalarının dahil edilmesi ile basınç dayanımında %20, kuruma büzülmesinde %30 azalma sağlanmıştır. Çimentonun %10 ve %20 PK ile değiştirildiği ve AMT içermeyen karışımlar, 120 günlük kurumada referans R40 karışımına kıyasla büzülmeyi sırasıyla %9,71 ve %29,30 artırmıştır. 120 günde %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışım için maksimum 1584x10$^{-6}$ µm/µm büzülme elde edildi. İnce PK, büzülme değerlerini önemli ölçüde artıran mikro ince parçacıkların etkisine bağlı olarak en yüksek büzülme değerini sergilemiştir (Habeeb ve Fayyadh, 2009). Gastaldini vd (2014) ayrıca artan PK içeriği ile toplam büzülme artışı bildirmiştir. Büzülme değerlerinde PK ve AMT'nin birlikte kullanılması, bunların ikame oranına bağlıdır. %25 AMT ile %10 PK ve %50 AMT ile %20 PK'nın birlikte kullanılması, R40'a kıyasla kuruma büzülmesini sırasıyla %4,08 ve %17,63 artırmıştır. Öte yandan, %50 AMT ile %10 PK ve %25 AMT ile %20 PK'nın kombine kullanımı, R40'a kıyasla kuruma büzülmesini sırasıyla %5,46 ve %3,75 azaltmıştır. Şekil 4.7b, 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren köpük beton numunelerinin kuruma büzülmesini göstermektedir. Şekil

4.7b'de görüldüğü gibi, R80'e göre %21,96 artışla %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışım için en yüksek kuruma büzülmesi 1788x10$^{-6}$ µm/µm, en düşük kuruma büzülmesi ise 1166x10$^{-6}$ µm/µm olmuştur, AMT'nin ince agrega olarak eklenmesi ile %20,46 azalma elde edilen %20 PK ve %50 AMT içeren karışım için R80 ile karşılaştırıldığında hemen hemen tüm kuruma süreleri boyunca karışımların kuruma büzülmesini önemli ölçüde azaltmıştır (Vardhan vd., 2019b). Silis kumunun %25 ve %50 AMT ile değiştirilmesi, 120 günlük kurumada referans karışım R80'e kıyasla sırasıyla %13,91 ve %7,09 kuruma büzülme azalması ile sonuçlanmıştır. Görüldüğü gibi AMT içeriği arttıkça kuruma büzülme azalmıştır. Çimentonun %10 ve %20 PK ile değiştirildiği ve AMT içermeyen karışımlar, 120 günlük kurumada referans karışım R80 ile karşılaştırıldığında büzülmeyi sırasıyla %0,88 ve %21,96 artırmıştır. %25 AMT ile %10 PK ve %50 AMT ile %10 PK'nın birlikte kullanılması, kuruma büzülmesini sırasıyla %10,57 ve %3,88 azaltmıştır. Öte yandan, %20 PK'nın %25 AMT ile birlikte kullanılması, kuruma büzülmesini sırasıyla R80'e kıyasla %8,39 artırmıştır. Silis kumunun %50 AMT ile değiştirilmesiyle %20 PK'nın olumsuz etkisinin ortadan kaldırılabileceği sonucuna varılabilinir.




(a)



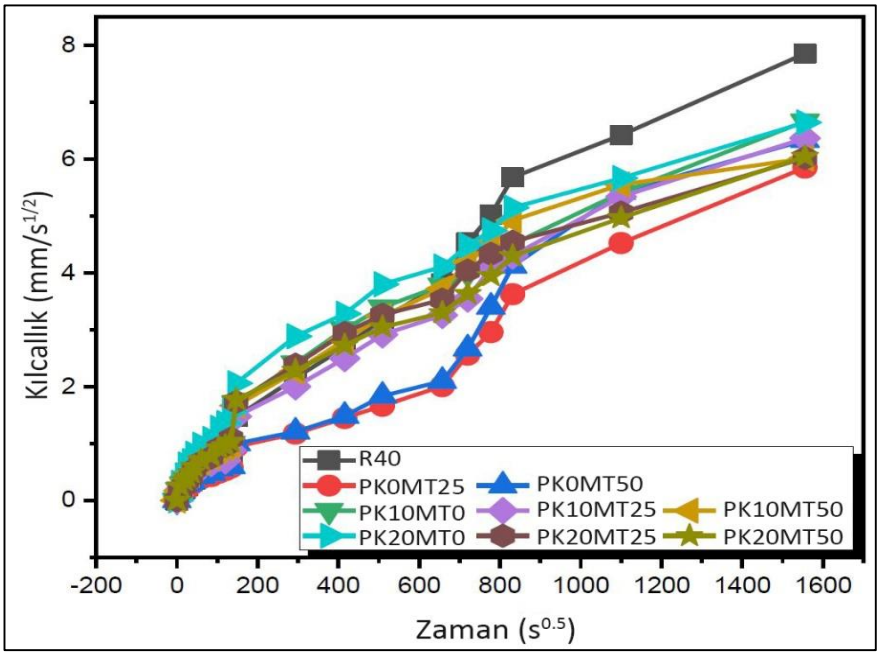

(b)

Şekil 4.7 Kuruma büzülmesi köpük içeriği a) 40 kg/m$^3$ b) 80 kg/m$^3$

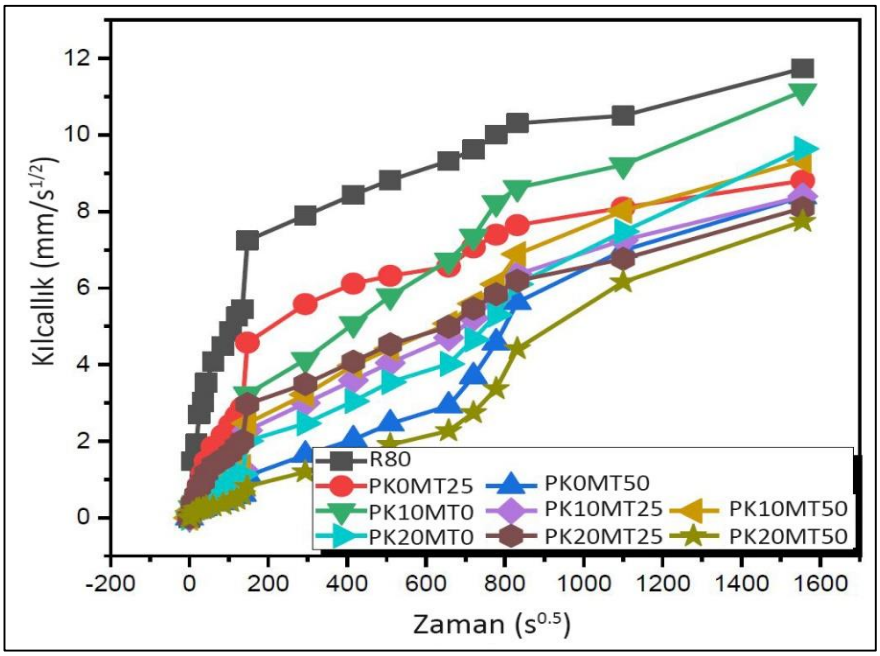
## 4.7 Kapilarite

Betonun nem taşınmasını anlamak, betonun servis ömrünü değerlendirmek ve bir yapı malzemesi olarak kalitesini artırmak açısından çok önemlidir. Betona giren su kapilarite testi ile ölçülerek beton yüzeyinden, beton ve çeliğe su alımı kontrol edilerek betonun yüzeye yakın performansı belirlenebilir. Betonun su emme kabiliyeti sadece dolaylı olarak porozitesini temsil etmekle kalmaz, aynı zamanda betondaki gözenek geçirgenliğinin hacmi ve gözenekler arasındaki bağlantı hakkında faydalı bilgiler sağlar (Niu vd., 2020). Şekil 4.8, 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük kürlenmiş köpük beton numunelerinin 28. güne kadar kapilaritesini göstermektedir. Şekil 4.8a, b'den daha yüksek köpük içeriğine sahip karışımların, daha düşük agrega içeriği nedeniyle daha düşük köpük içeriğine sahip olanlardan daha yüksek kapilarite değerleri gösterdiği gözlemlenebilir. Görüldüğü gibi, referans karışımları R40 ve R80, her iki köpük içeriğinde en yüksek kapilarite değerlerini göstermiştir. PK ve AMT ilavesi ile 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde %25 AMT içeren ve PK içermeyen karışımda %25,47 ile en yüksek kapilarite azalması elde edilmiş ve %20 PK ve %50 AMT içeren karışım için 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde %34,07 ile en yüksek kapilarite azalması elde edilmiştir. PK ve AMT'nin birlikte kullanılması kapilariteyi tek başına olduğundan daha fazla azaltmıştır. Çeşitli çalışmalar (Ganesan vd., 2008; Varadharajan vd., 2020),

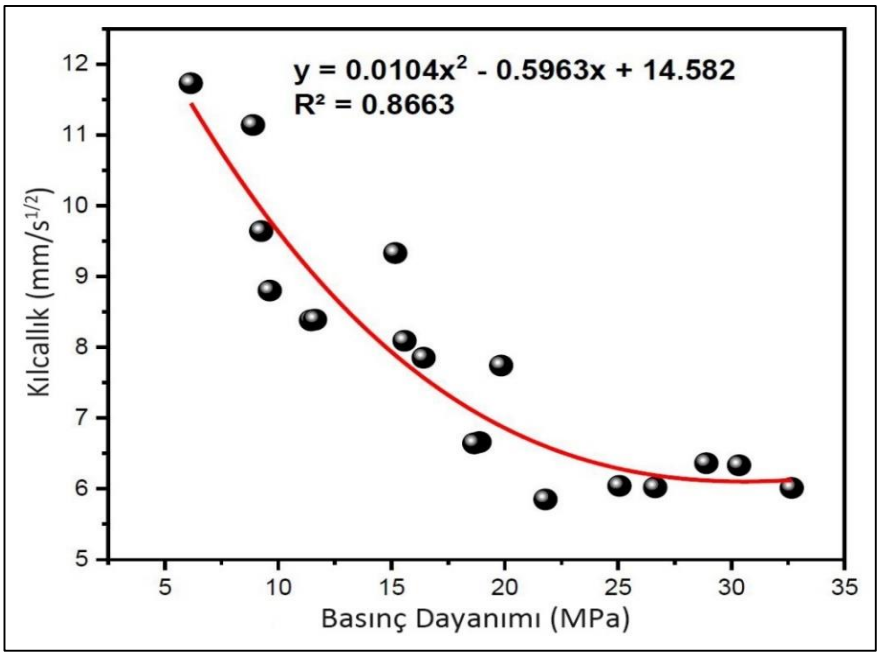
çimento ikamesi olarak PK eklenmesinin kapilariteyi %20 PK ve %30 AMT ikamesinde %27 ve %30 PK içeriğinde %45 azalttığını göstermiştir. Silis kumunun AMT ile ve çimentonun PK ile değiştirilmesinin kapilaritede dikkate değer bir azalmaya yol açtığı sonucuna varılabilinir. Demirel (2010), AMT içeriğinin artmasıyla kapilaritenin azaldığına da dikkat çekmiştir. Gameiro vd. (2014) ayrıca, %20 AMT ile değiştirmenin kılcal hareket yoluyla su emilimini azalttığını bildirmiştir. Vardhan vd. (2019a) hem 28 hem de 365 gün testlerinde %40 AMT ile karışım için minimum kapilarite değerinin elde edildiğini bildirmişlerdir. Bu nedenle AMT'nin ince agrega olarak eklenmesi gözenek yapısını iyileştirebilir ve böylece beton matrisinin mikro yapısını iyileştirebilir. Bununla birlikte, atık mermer agregalarının açısal boyutları, daha iyi bağlanmaya ve ara bölgede ortaya çıkan karışımın iyileştirilmesine yardımcı olmuştur (Vardhan vd., 2019a). Şekil 4.8c, köpük betonların kapilaritesi ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Kapilarite ve basınç dayanımı arasındaki ilişki 0,86 korelasyon katsayısı ile mevcuttur. Basınç dayanımı ne kadar yüksekse, kapilarite o kadar düşük ve en yüksek basınç dayanımı en düşük kapilaritete değerlerine karşılık gelmektedir.




(a)




(b)



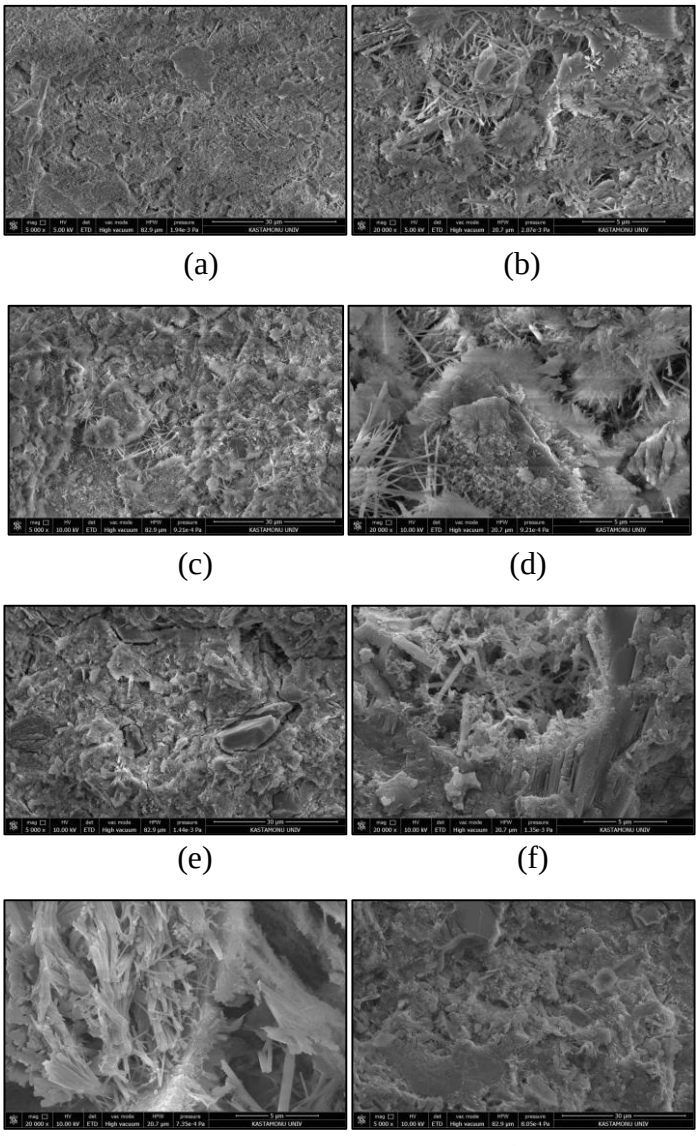

(c)

Şekil 4.8 Kapilarite değerleri köpük içeriği a) 40 kg/m$^3$ b) 80 kg/m$^3$ c) basınç dayanımı ve kapilarite ilişkisi

## 4.8 SEM Analizi

90 gün sertleştikten sonra örneklerin SEM analizi Şekil 4.9'da verilmiştir. Şekil 4.9a ve b'de katkısız F40R0M0 kodlu köpük beton, çimento ve silis kumu parçacıklarının

CSH jeli ile kompakt bir yapı oluşturduğunu göstermektedir. F80R0M40 kodlu köpük beton, AMT ilaveli, mikro yapıda ince CSH kristallerinin arttığını göstermektedir (Şekil 4.9c ve d). F40R10M0 kodlu köpük betonun SEM görüntülerinde (Şekil 4.9e ve f) PK ilavesi ile jellerin kristal boyutlarının arttığı görülmüştür. Şekil 4.9g ve h'de, PK ve AMT içeren F80R20M50 kodlu köpük beton daha büyük CSH kristallerine sahiptir. AMT ince agregalar ve PK partikülleri köpük beton içinde homojen olarak dağılmış gibi görünmektedir ve gövde içinde CSH oluşumları gözlenmektedir. Örnekler, CSH jeli ve iyi kristalize edilmiş kalsiyum hidratın oldukça gözenekli ve lifli yapılarından oluşuyordu.



Şekil 4.9 90 gün kürlendikten sonra numunelerin SEM görüntüleri (F: köpük içeriği, R: PK, M: AMT)

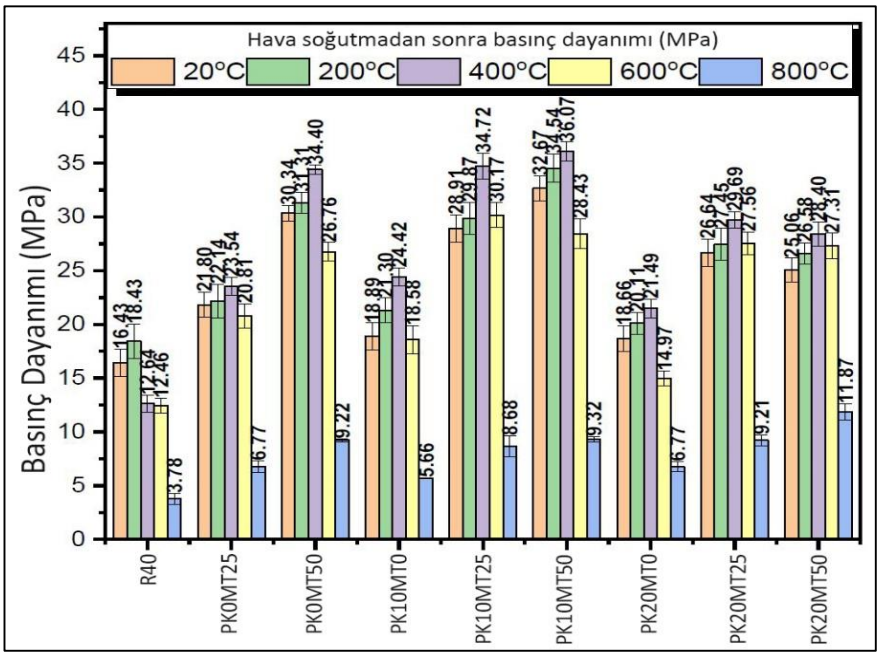
## 4.9 Yüksek Sıcaklık Dayanımının Değerlendirmesi

Örnekler 105°C'de 24 saat kurutulduktan sonra sırasıyla 200, 400, 600 ve 800°C'de 2 saat 10°C/dakika hızında ısıl işlem yapılmıştır. Isıtıldıktan sonra, havayla soğutma ve yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra su soğutma olmak üzere iki tür soğutma gerçekleştirildi ve örnekler hava soğutması için fırında yavaşça soğumaya bırakıldı ve su soğutması için oda sıcaklığında su püskürtüldükten sonra beş dakika süreyle soğutuldu. Basınç ve eğilme dayanımı ve ultrases geçiş hızı ölçümü, soğutma yöntemleri uygulandıktan sonra yapılmıştır.

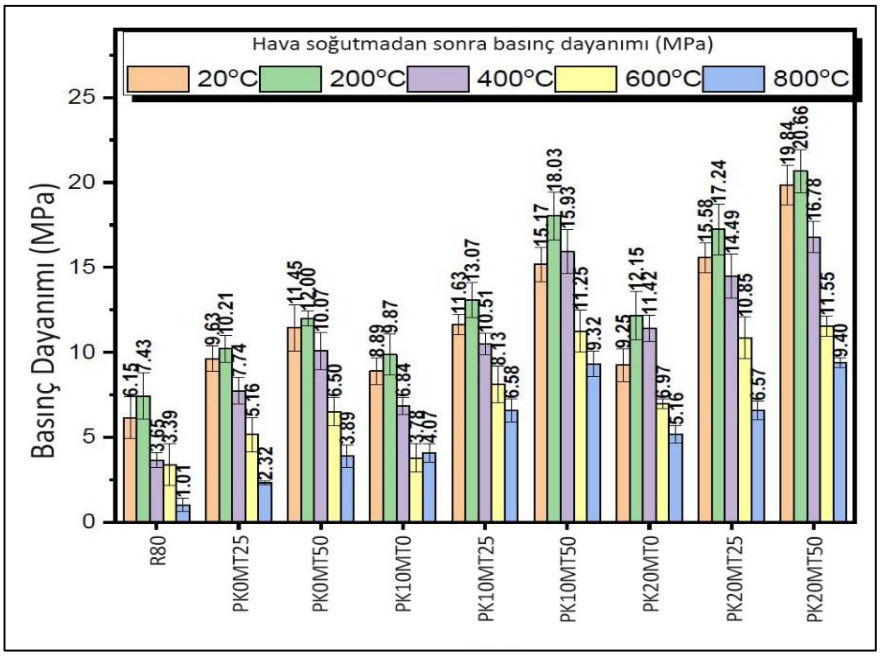
### 4.9.1 Hava soğutmadan sonra basınç dayanımı

Şekil 4.10 a-b, 40 kg/$m^3$ ve 80 kg/$m^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin yüksek sıcaklıktan ve oda sıcaklığında bekletilen sonra ki basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.10c-d, 200°C ile 800°C sıcaklık aralığında basınç dayanımındaki iyileştirmeleri ve azalmaları göstermektedir. Şekil 4.10a-c'de, tüm PK ve AMT katılmış karışımlarının basınç dayanımı 20°C'deki basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında 200°C ve 400°C'de sıcaklığa maruz kaldığında geliştirilmiştir. Bu olgu, literatürde bildirildiği gibi, esas olarak hızlandırılmış puzolanik reaksiyona ve susuz çimentonun hidratasyonuna bağlanmıştır (Bing ve Liu, 2004; Zheng vd., 2014). Şekil 12a-c'de gösterildiği gibi, 40 kg/$m^3$ köpük içeriğinde, referans numuneleri R40, sırasıyla 400°C, 600°C ve 800°C'de dayanımda %23,08; %24,17 ve %77 ile en yüksek düşüşle 200°C'den sonra en kötü yüksek sıcaklık performansını gerçekleştirmiştir, 200°C'de %12,2 artış görülmüştür. %25 ve %50 AMT içeren ve PK içermeyen karışımlar, 200°C ve 400°C'de dayanım artışı göstermiş ve 600°C'den sonra dayanımda düşüşler gözlenmiştir, ancak %25 AMT içeren karışım, %50 AMT'ya göre daha iyi dayanım göstermiştir. Betonların basınç dayanımındaki azalma, özellikle 400 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara maruz kalan numunelerde daha belirgindi. Bu sonuç, kristalleşmedeki su kaybından kaynaklanmaktadır, bu da morfolojideki değişikliklere ve mikro çatlakların oluşumuna ek olarak $Ca(OH)_2$ içeriğinde bir azalmaya neden olur (Keleştemur vd., 2014). Çimento ikamesi olarak %10 PK içeren ve AMT içermeyen karışımlar, %12,8 ve %29,3'lük dayanım artışı ile 200°C ve 400°C'de en iyi performansı göstermiştir. Bu artış, literatürde bildirildiği

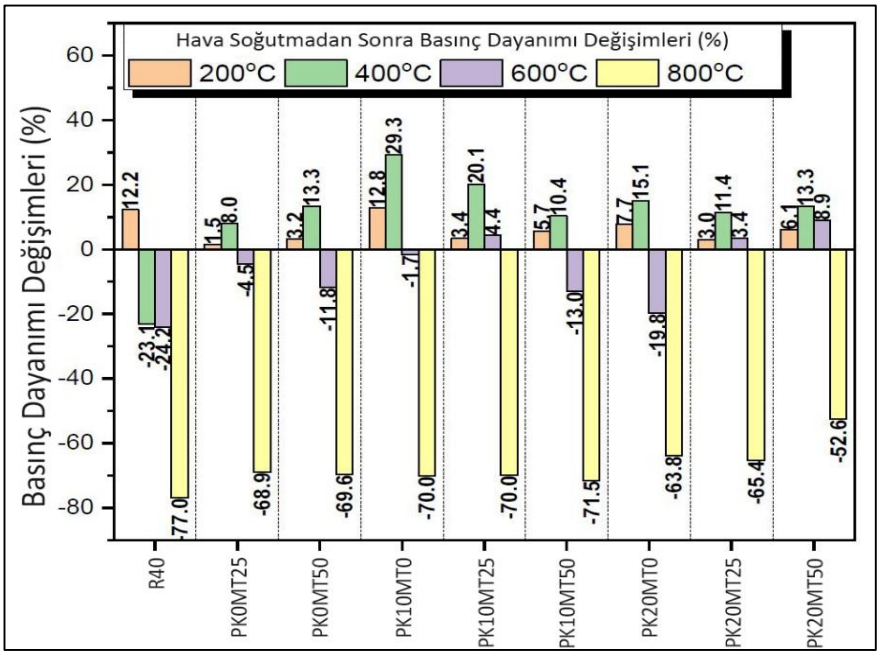
gibi, esas olarak hızlandırılmış puzolanik reaksiyona ve hidrate olmamış çimento hidratasyonuna bağlanabilir (Bing ve Liu, 2004; Zheng vd., 2014). Çimento ikamesi olarak %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışımlar da %7,7 ve %15,1'lik mukavemet artışı ile 200°C ve 400°C'de iyi performans göstermiştir. 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, %20 PK ve %50 AMT içeren karışım, sırasıyla 200°C; 400°C ve 600°C'de %6,1; %13,3 ve %8,9'luk dayanım artışı ve 800°C'de %52,6 azalma ile en iyi yüksek sıcaklık performansını göstermiştir. Köpük içeriği 80 kg/m$^3$ olan karışımlar üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi Şekil 12b-d'de verilmiştir. Şekil 12b-d'de gösterildiği gibi, PK ve AMT ile karışımlar, Şekil 12a-c'de verildiği gibi, referans karışım R80'den ve 40 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren karışımlardan daha iyi performans sergilemiştir. %10 PK ve %50 AMT'nin dahil edildiği karışım, sırasıyla 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C sıcaklık maruziyetlerinde %18,9 ve %4,9 iyileştirmeler ve %25,9 ve %38,6 azalımlarla en iyi yüksek sıcaklık performansını elde etmiştir. %20 PK içeren karışım, sırasıyla 200°C ve 400°C sıcaklık maruziyetlerinde %31,4 ve %23,5 ile en yüksek dayanım artışlarını elde etmiştir.



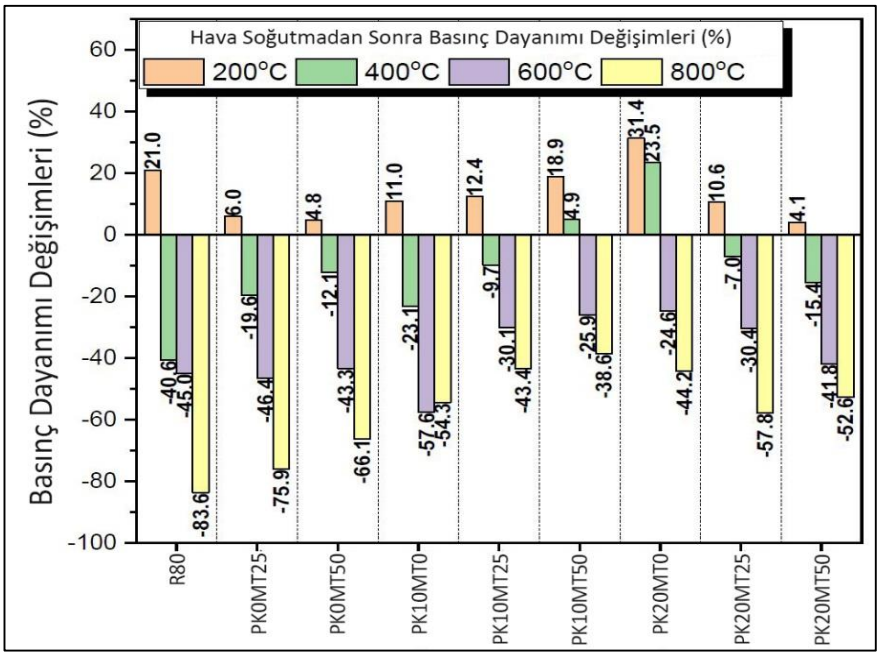

(a)


Hava soğutmadan sonra basınç dayanımı (MPa)
20°C
200°C
400°C
600°C
800°C
Basınç Dayanımı (MPa)
0
5
10
15
20
25
6.15
7.43
3.65
3.39
1.01
9.63
10.21
7.74
5.16
2.32
11.45
12.00
10.07
6.50
3.89
8.89
9.87
6.84
3.78
4.07
11.63
13.07
10.51
8.13
6.58
15.17
18.03
15.93
11.25
9.32
9.25
12.15
11.42
6.97
5.16
15.58
17.24
14.49
10.85
6.57
19.84
20.66
16.78
11.55
9.40
R80
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(b)


Hava Soğutmadan Sonra Basınç Dayanımı Değişimleri (%)
200°C
400°C
600°C
800°C
Basınç Dayanımı Değişimleri (%)
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
12.2
-23.1
-24.2
-77.0
1.5
8.0
-4.5
-68.9
3.2
13.3
-11.8
-69.6
12.8
29.3
-1.7
-70.0
3.4
20.1
4.4
-70.0
5.7
10.4
-13.0
-71.5
7.7
15.1
-19.8
-63.8
3.0
11.4
3.4
-65.4
6.1
13.3
8.9
-52.6
R40
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(c)



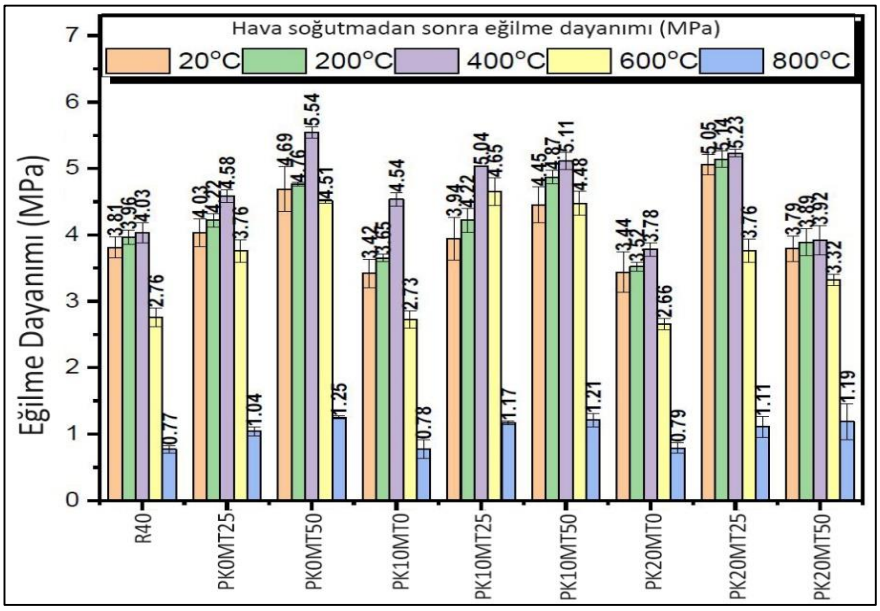

(d)

Şekil 4.10 a-b) Basınç dayanımı sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı değişimleri

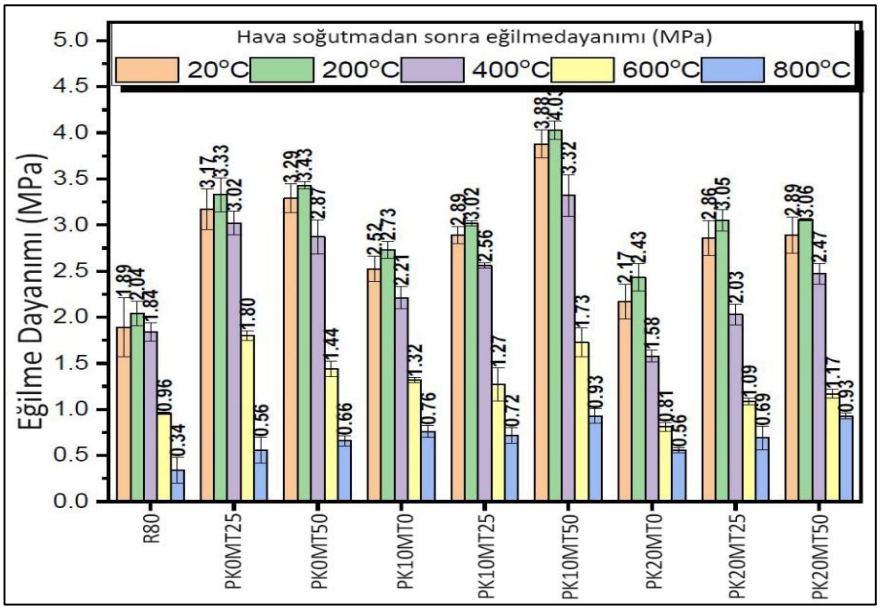
### 4.9.2 Hava Soğutmadan Sonra Eğilme Dayanımı

Şekil 4.11a-b, 40 kg/m$^3$ ve 100 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin yüksek sıcaklık ve oda sıcaklığında bekletildikten sonra ki eğilme dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.11c-d, 200°C ile 800°C sıcaklık aralığında köpük betonların eğilme dayanımındaki gelişmeleri ve azalmaları göstermektedir. Şekil 4.11'de açıkça görüldüğü gibi, 20°C'de 40kg/m$^3$ köpük içeriğinde betonların 80 kg/m$^3$ köpük içeriğine sahip karışımlar eğilme dayanımı ile karşılaştırıldığında 200°C ve 400°C sıcaklıkta artan tüm beton karışımlarının eğilme dayanımı artışları sadece 200°C'de görülmüştür. Referans karışımı R40, 600°C ve 800°C'de sırasıyla %27,6 ve %79,8'lik dayanım kaybı ile 600°C'den sonra en kötü yüksek sıcaklık performansını sergilemiştir. PK ve AMT içeren karışımlar, 800°C'den sonra %78,0 ve %68,6 aralığında dayanım kaybı sergilemiştir. İlgili literatüre göre ( Mendes vd., 2007; Wang, 2008; Jia vd., 2019), bu önemli güç azalması, matrisin çatlamasına neden olan CSH'nin ayrışmasına bağlanabilir. Sıcaklık yükseldikçe, kontrol numunelerinin dayanımı önemli ölçüde azalmaya devam edmiştir. %10 PK ve %25 AMT içeren karışım, sırasıyla %7,1; %27,9 ve %18'lik dayanım artışlarıyla 200°C, 400°C ve 600°C sıcaklığa maruz kalma için en iyi yüksek sıcaklık direncini

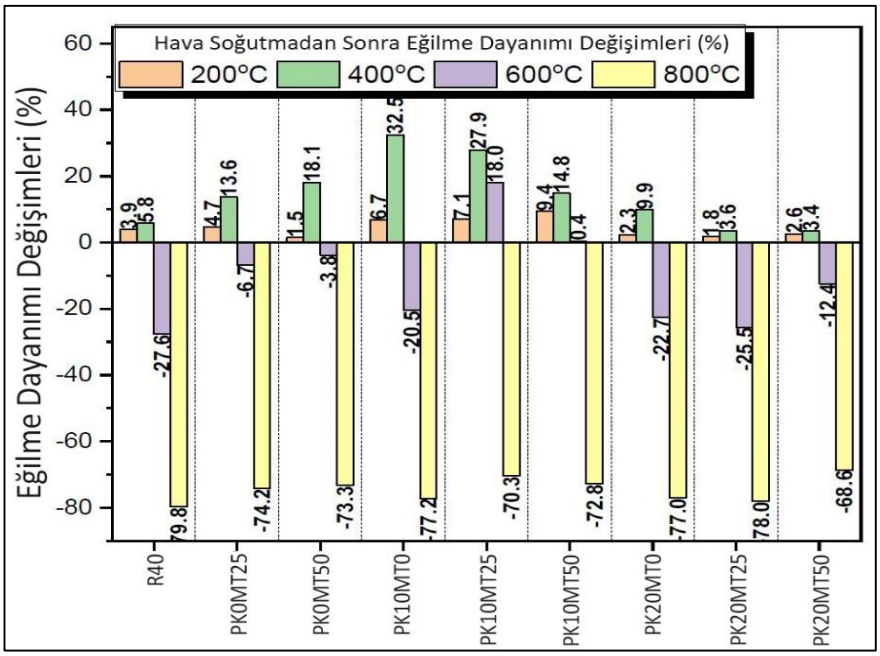
göstermiştir. Şekil 4.11b-d, 200-800°C'de 80 kg/m$^3$ köpük içeriğine sahip 90 günlük köpük beton numunelerinin eğilme dayanımı değişimini göstermektedir. Tüm karışımlar, 200°C'lik sıcaklığa maruz kaldıktan sonra dayanım artışına sahiptir ve %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışım, %12,5'lik bir artışla en yüksek dayanıma sahiptir. %20 PK ve %50 AMT içeren karışım, köpük içeriği 40 kg/m$^3$ olan karışıma benzer şekilde sırasıyla 600°C ve 800°C'lik sıcaklığa maruz kaldıktan sonra %59,5 ve %67,8'lik azalmalarla eğilme dayanımı açısından en iyi yüksek sıcaklık direncini ortaya koymuştur.



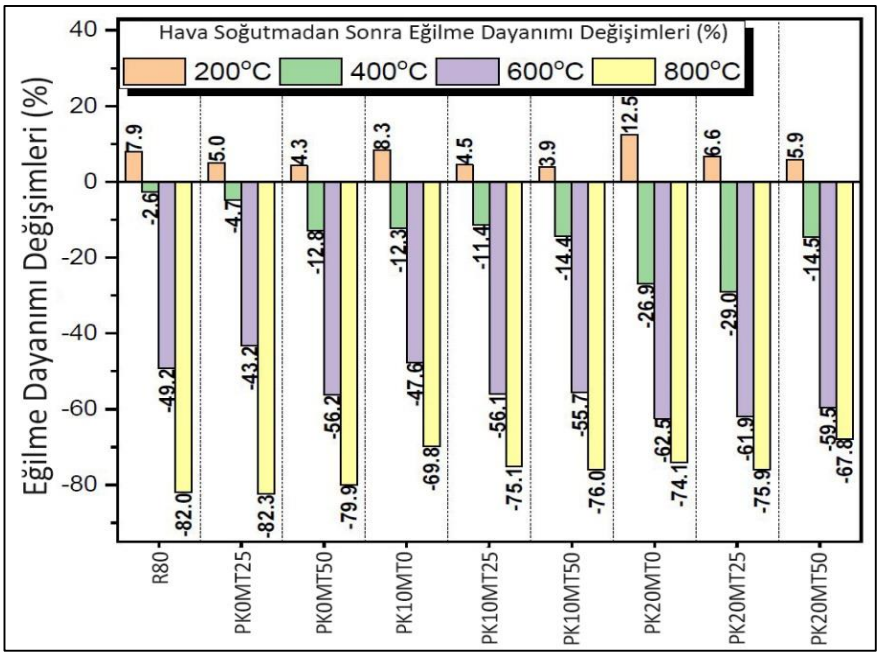

(a)




(b)




c)

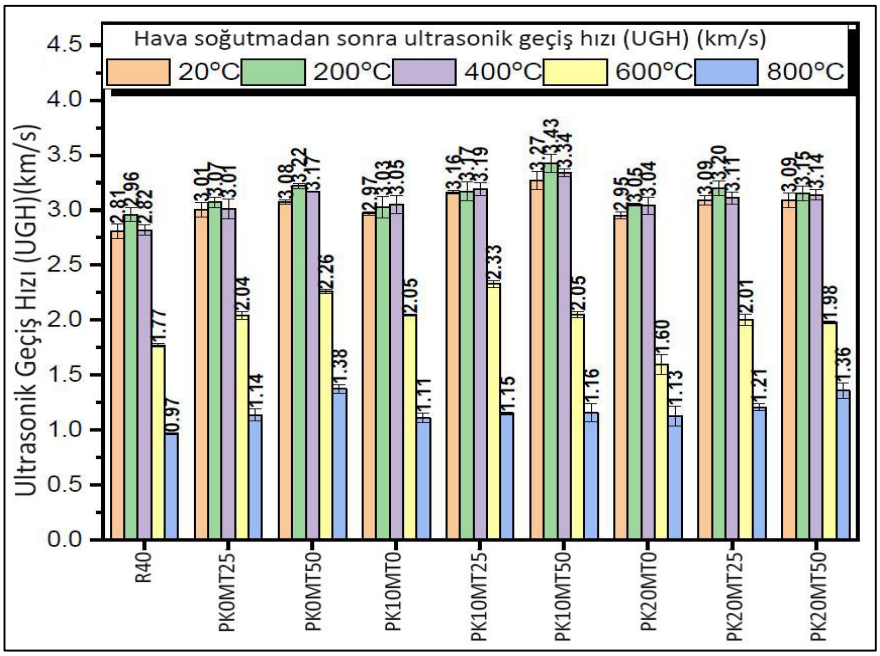



d)

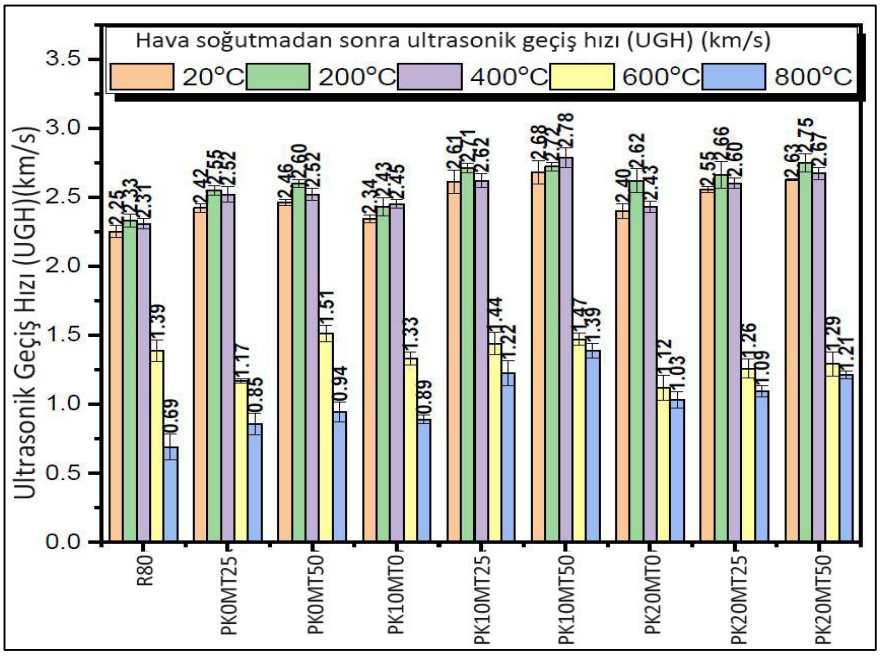
Şekil 4.11 a-b) Eğilme dayanımı sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra eğilme dayanımı değişimleri

### 4.9.3 Hava Soğutmasından Sonra Ultrases Geçiş Hızı (UGH) Değerleri

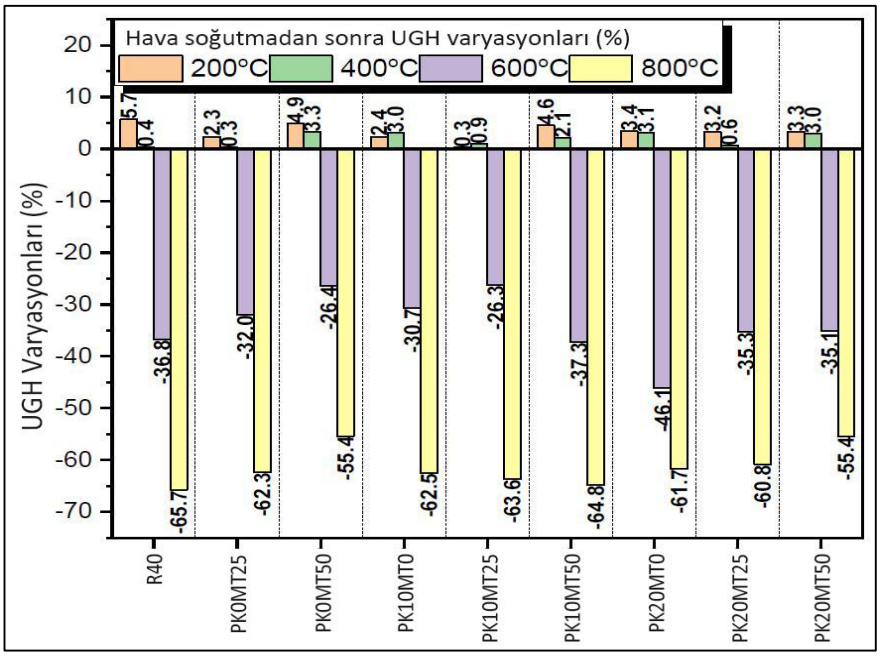
Şekil 4.12a-b, 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin yüksek sıcaklıkta ve oda sıcaklığında bekletildikten sonra ölçülen UGH sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.12c-d, 200℃ ile 800℃ sıcaklık aralığında köpük betonların UGH değerlerindeki iyileştirmeleri ve azalmaları göstermektedir. Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı sonuçlarına benzer UGH sonuçları elde edilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımlarında gösterilen performansta olduğu gibi, en yüksek UGH düşüşü, her iki köpük içeriğinde R40 ve R80 referans karışımlarından elde edilmiştir. Her iki köpük içeriğindeki tüm karışımlar, 200℃ ve 400℃'de küçük UGH artışlarına sahipti. 80 kg/m$^3$ karışımlar, daha düşük agrega içeriği ve daha yüksek porozite değerleri nedeniyle 40 kg/m$^3$ karışımlara göre daha yüksek UGH artışları sergilemiştir. Şekil 4.12c, köpük içeriği 40 kg/m$^3$ olan karışımların UGH varyasyonlarını göstermektedir. %4,9 ve %3,3 ile en yüksek UGH artışı sırasıyla 200℃ ve 400℃'de %50 AMT ve PK içermeyen karışımda elde edilmiştir ve ayrıca %50 AMT ve PK içermeyen karışımın en iyi sıcaklık direncini 600℃ ve 800℃, UGH sırasıyla %26,4 ve %55,4'lük düşüşlerle elde edilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımlarında gösterilen performansta olduğu gibi, en yüksek UGH düşüşü her iki köpük içeriğinde R40 ve R80 referans karışımlarından elde edilmiştir. Şekil 4.12d, 80 kg/m$^3$ köpük içeriğine sahip karışımların UGH varyasyonlarını göstermektedir. %9,6 ile en yüksek UGH artışı 200℃ ve 400℃'de %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışım için elde edilmiştir, en yüksek UGH artışı %4,7 ile %10 PK içeren ve AMT içermeyen karışım için elde edilmiştir. Ayrıca %50 AMT'li ve PK içermeyen karışımın %38,6 UGH azalması ile 600℃'de en iyi sıcaklık direncini gösterdiği söylenebilir. %50 AMT ve %10 PK içeren karışım, %48,3 UGH azalımı ile 800℃'de en iyi sıcaklık direncini göstermiştir. Şekil 4.12'de, yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı ile UGH arasındaki ilişki gösterilmiştir. 20℃, 200℃, 400℃, 600℃ ve 800℃'de sırasıyla 0,91; 0,93; 0.93; 0.81 ve 0.87 korelasyon katsayıları ile basınç dayanımı ile UGH arasında güçlü bir ilişki olduğu bulunmuştur. Daha yüksek basınç dayanımı, daha yüksek UGH değerleri ve en yüksek basınç dayanımının en yüksek UGH değerlerine karşılık geldiği söylenebilir.


Hava soğutmadan sonra ultrasonik geçiş hızı (UGH) (km/s)
20°C
200°C
400°C
600°C
800°C
Ultrasonik Geçiş Hızı (UGH)(km/s)
4.5
4.0
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
2.81 2.96 2.82 1.77 0.97
3.01 3.07 3.01 2.04 1.14
3.08 3.22 3.17 2.26 1.38
2.97 3.03 3.03 2.05 1.11
3.16 3.17 3.19 2.33 1.15
3.27 3.43 3.34 2.05 1.16
2.95 3.05 3.04 1.80 1.13
3.09 3.20 3.11 2.01 1.21
3.09 3.15 3.14 1.98 1.36
R40
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

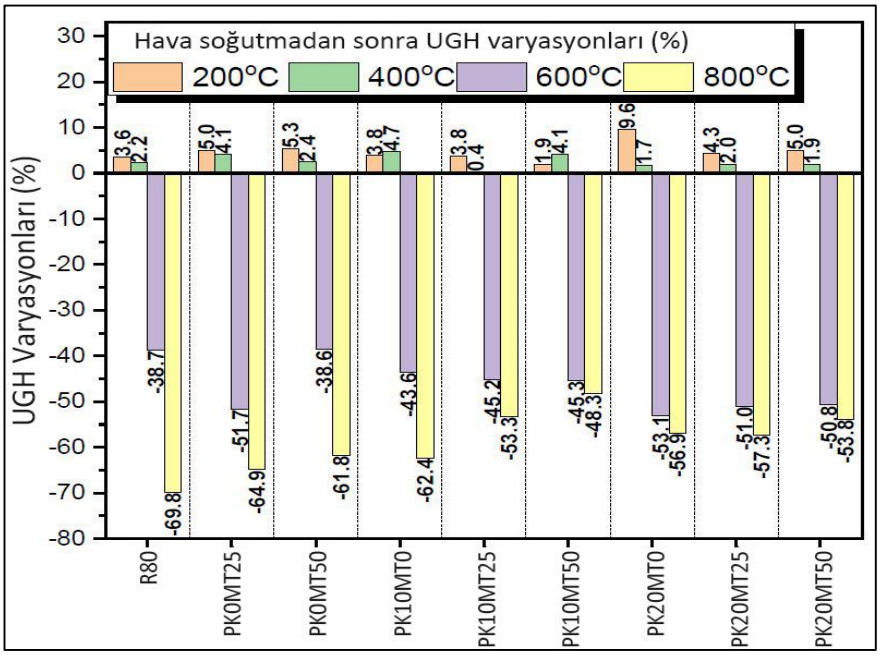
(a)


Hava soğutmadan sonra ultrasonik geçiş hızı (UGH) (km/s)
20°C
200°C
400°C
600°C
800°C
Ultrasonik Geçiş Hızı (UGH)(km/s)
3.5
3.0
2.5
2.0
1.5
1.0
0.5
0.0
2.25 2.33 2.31 1.39 0.69
2.42 2.55 2.52 1.17 0.85
2.46 2.60 2.52 1.51 0.94
2.34 2.43 2.45 1.33 0.89
2.61 2.71 2.62 1.44 1.22
2.68 2.72 2.78 1.47 1.39
2.40 2.62 2.43 1.12 1.03
2.55 2.66 2.60 1.26 1.09
2.63 2.75 2.67 1.29 1.21
R80
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

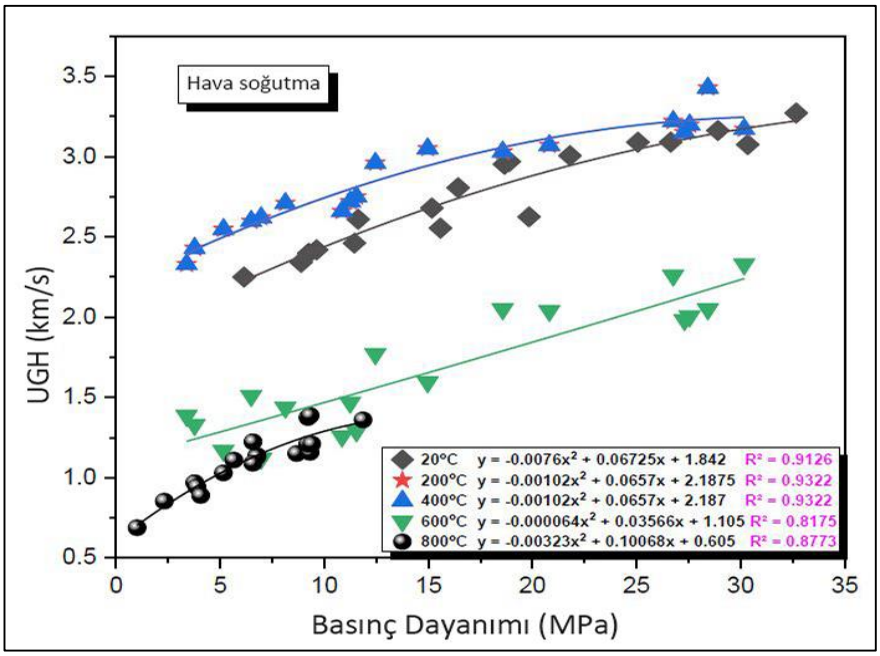
(b)


Hava soğutmadan sonra UGH varyasyonları (%)
200°C
400°C
600°C
800°C
UGH Varyasyonları (%)
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
5.7
0.4
-36.8
-65.7
2.3
0.3
-32.0
-62.3
4.9
3.3
-26.4
-55.4
2.4
3.0
-30.7
-62.5
0.3
0.9
-26.3
-63.6
4.6
2.1
-37.3
-64.8
3.4
3.1
-46.1
-61.7
3.2
0.6
-35.3
-60.8
3.3
3.0
-35.1
-55.4
R40
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(c)


Hava soğutmadan sonra UGH varyasyonları (%)
200°C
400°C
600°C
800°C
UGH Varyasyonları (%)
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
-80
3.6
2.2
-38.7
-69.8
5.0
4.1
-51.7
-64.9
5.3
2.4
-38.6
-61.8
3.8
4.7
-43.6
-62.4
3.8
0.4
-45.2
-53.3
1.9
4.1
-45.3
-48.3
9.6
1.7
-53.1
-56.9
4.3
2.0
-51.0
-57.3
5.0
1.9
-50.8
-53.8
R80
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(d)



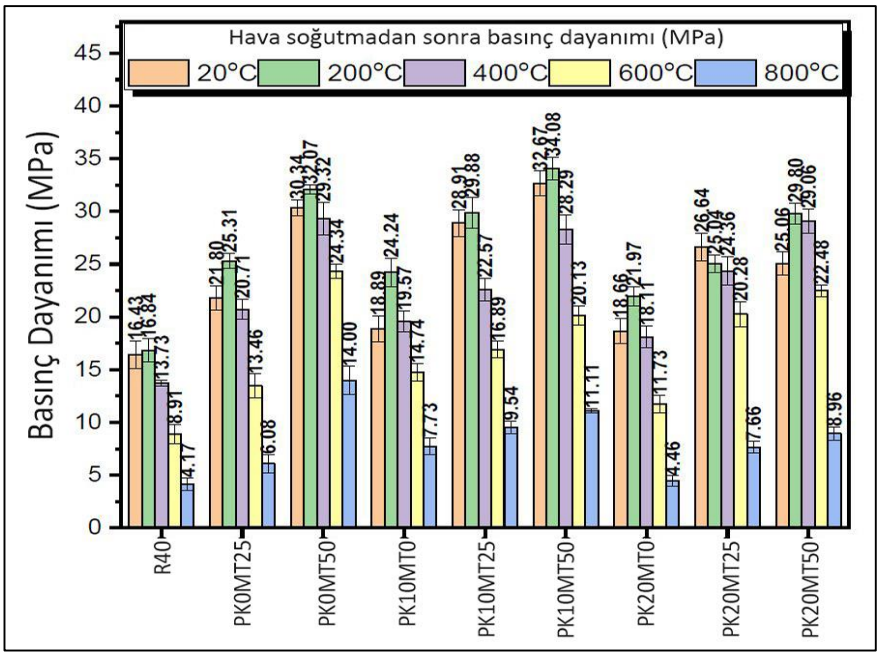

e)

Şekil 4.12 a-b) UGH sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra UGH varyasyonları e) UGH'ye karşı basınç dayanımı

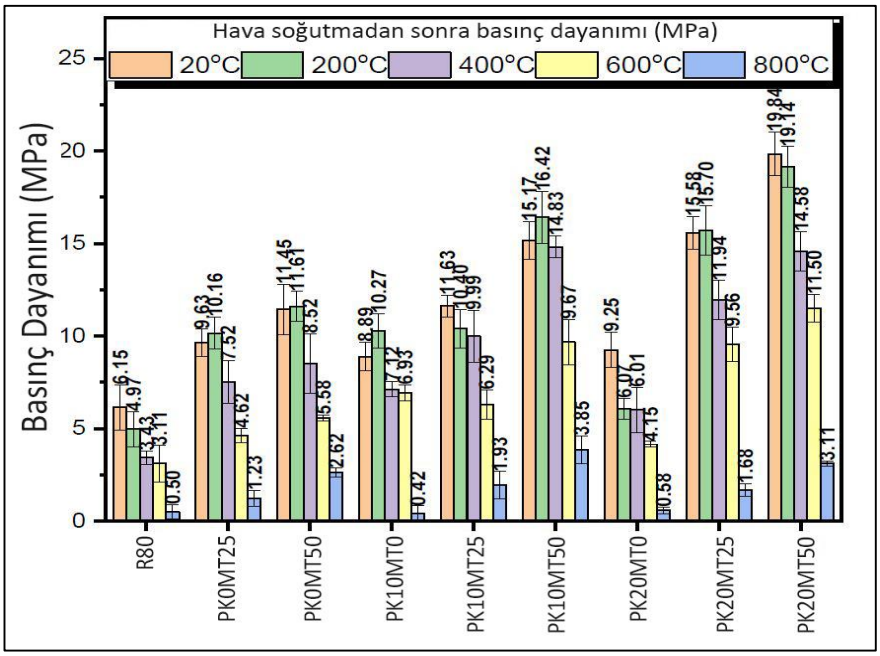
### 4.9.4 Su Soğutmasından Sonra Basınç Dayanımı

Şekil 4.13a-b, 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin yüksek sıcaklıktan sonra su soğutması yapılan ve oda sıcaklığında bekletip ölçülen basınç dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.13c-d, 200°C ila 800°C sıcaklık aralığında basınç dayanımındaki gelişmeleri ve azalmaları göstermektedir. Her iki sonuç karşılaştırıldığında, su soğutmalı numunelerin 200°C'den sonra hava soğutmalı numunelere göre daha fazla dayanım kaybı gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu, hava soğutmada hızla soğutulanlara göre daha küçük çatlakların oluşmasına bağlanabilir (Shaikh ve Vimonsatit, 2016). Bu sıcaklık aralığında böyle bir farkın oluşmasının bir nedeni termal şoktur. Termal şok, beton numunelerinin su ile soğutulmasından kaynaklanan ani sıcaklık dalgalanmasından kaynaklanır (Khodabakhshian vd., 2018). Şekil 4.13'de (Bingöl ve Gül, 2009; Shaikh ve Vimonsatit, 2016) açıkça gösterildiği gibi, termal şok, beton içinde çatlamayı teşvik eden ve mukavemette oldukça önemli bir azalmaya neden olan çekme gerilimine neden olur. 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, iki karışım (biri AMT içermeyen %10 PK diğeri %20 PK ve %50 AMT ile) 200°C ve 400°C'de dayanım artışı göstermiştir ve %20 PK ve %25 AMT içeren karışım tüm sıcaklıklarda dayanım azalması

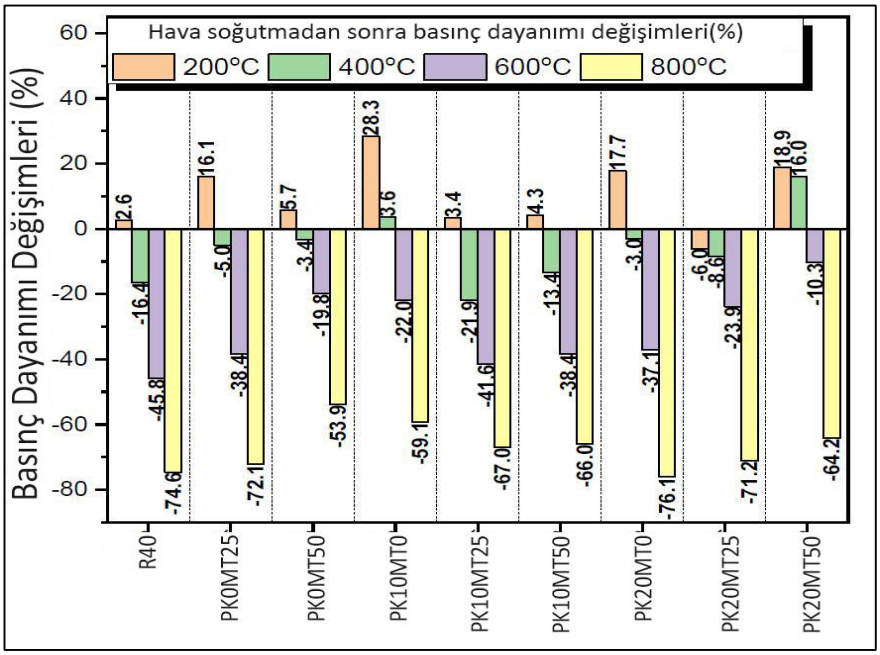
sergilenmiştir. 600°C'de, %20 PK ve %50 AMT içeren karışım, %10,3'lük en düşük dayanım azalması ile en iyi sıcaklık direncini göstermiştir, ancak 800°C'de, %20 PK ve %50 AMT içeren karışım, %53,9 ile en düşük dayanım azalması ve en iyi sıcaklık performansını sergilemiştir. Referans numune R40, 600°C ve 800°C'de sırasıyla %45,8 ve %74,6'lık en yüksek dayanım azalması ile 600°C'den sonra en kötü yüksek sıcaklık performansını göstermiştir. Köpük içeriği 80 kg/m$^3$ olan karışımlar üzerindeki yüksek sıcaklık etkisi Şekil 4.13b-d'de verilmiştir. Şekil 4.13b-d'de gösterildiği gibi, bu köpük içeriğinde hava soğutmaya maruz kalan karışımlara kıyasla benzer yüksek dayanım azalmaları da gözlenmiştir. 200°C'de, %20 PK içeren karışım en yüksek dayanım azalmasını %34,4 ile gösterirken, %10 PK içeren karışım %15,5 ile en yüksek dayanım artışını göstermiştir. %10 PK ve %50 AMT'nin dahil edildiği karışım, 200°C'de %2,3'lük en düşük azalma ile en iyi yüksek sıcaklık performansını elde ederken, referans karışımı R80 %44,1 ile en yüksek dayanım azalmasını göstermiştir. %10 PK ilavesiyle karışım, %22'lik azalma ile en iyi yüksek sıcaklık performansını elde etmiştir. %10 PK ve %50 AMT'nin dahil olduğu karışım, 800°C'de %74,6'lık en düşük azalma ile en iyi yüksek sıcaklık performansını elde etmiştir.



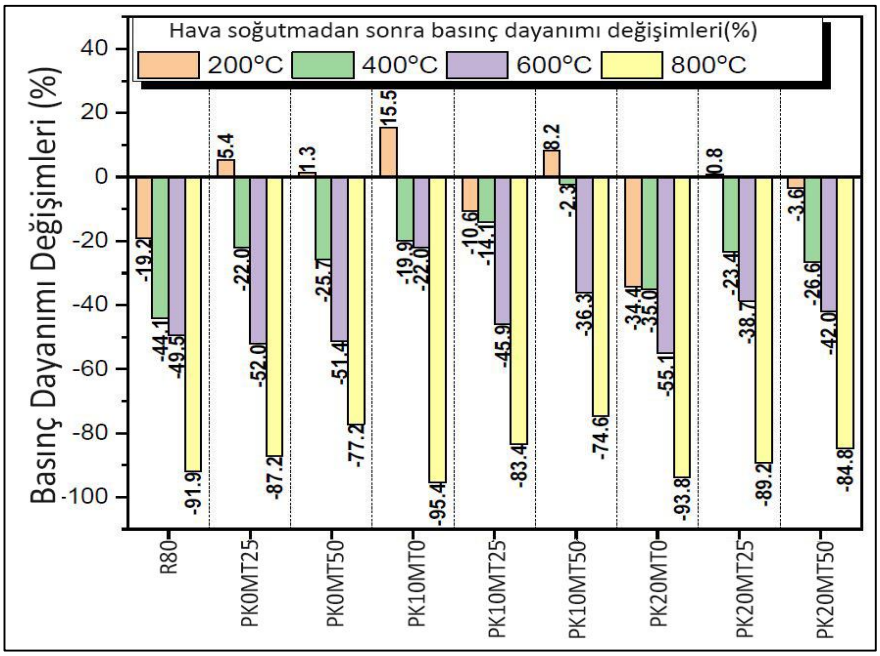

(a)


Hava soğutmadan sonra basınç dayanımı (MPa)
20°C
200°C
400°C
600°C
800°C
Basınç Dayanımı (MPa)
0
5
10
15
20
25
6.15
4.97
3.43
3.11
0.50
9.63
10.16
7.52
4.62
1.23
11.45
11.61
8.52
5.58
2.62
8.89
10.27
7.12
6.93
0.42
11.63
10.40
9.99
6.29
1.93
15.17
16.42
14.83
9.67
3.85
9.25
6.07
6.01
4.15
0.58
15.58
15.70
11.94
9.56
1.68
19.84
19.14
14.58
11.50
3.11
R80
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(b)


Hava soğutmadan sonra basınç dayanımı değişimleri(%)
200°C
400°C
600°C
800°C
Basınç Dayanımı Değişimleri (%)
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
2.6
-16.4
-45.8
-74.6
16.1
-5.0
-38.4
-72.1
5.7
-3.4
-19.8
-53.9
28.3
3.6
-22.0
-59.1
3.4
-21.9
-41.6
-67.0
4.3
-13.4
-38.4
-66.0
17.7
-3.0
-37.1
-76.1
-6.0
-8.6
-23.9
-71.2
18.9
16.0
-10.3
-64.2
R40
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(c)



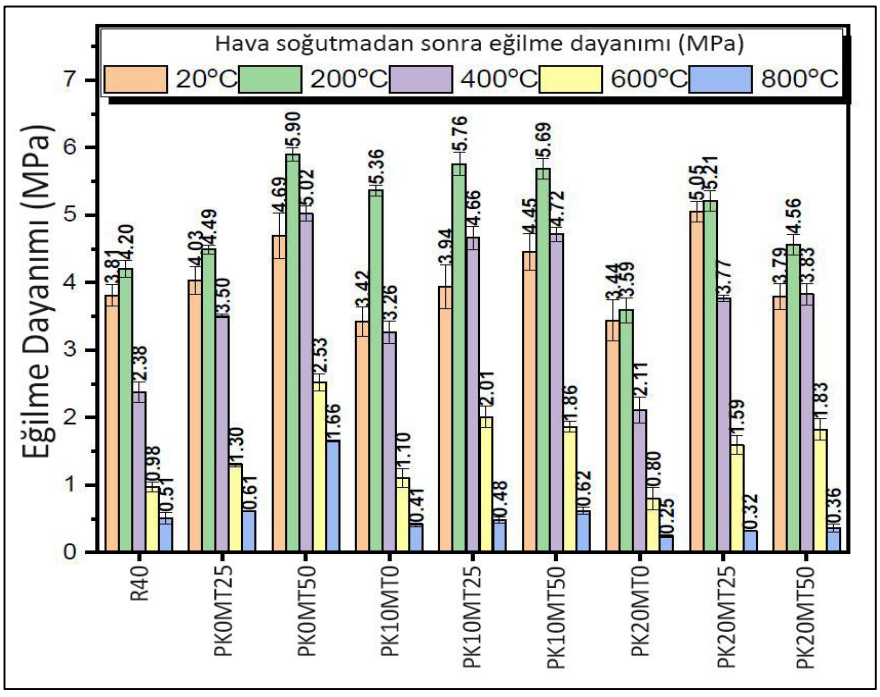

(d)

Şekil 4.13 a-b) Basınç dayanımı sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı değişimleri

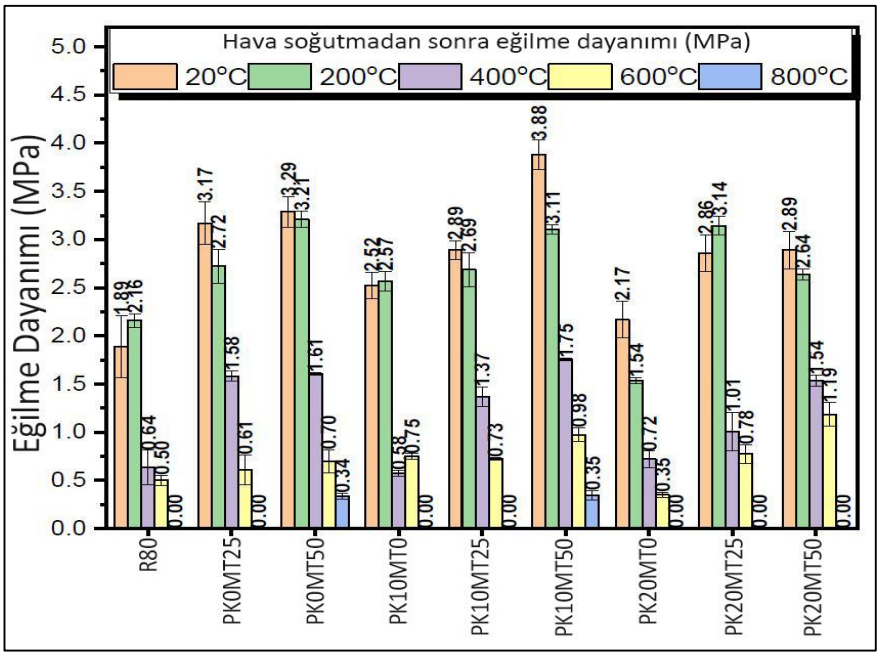
### 4.9.5 Su Soğutmasından Sonra Eğilme Dayanımı

Şekil 4.14 a-b, 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin yüksek sıcaklıkta bekletilip su soğutması yapılan ve oda sıcaklığında bekletip ölçülen eğilme dayanımı sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.14c-d, 200°C ile 800°C sıcaklık aralığında köpük betonların eğilme dayanımındaki gelişmeleri ve azalmaları göstermektedir. Yüksek köpük içeriği ile daha fazla dayanım azalması gözlenmiştir. Şekil 4.14c'de 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde açıkça görülmektedir, özellikle 200°C sıcaklığa maruz kaldıktan sonra suda soğutulan beton numunelerinin basınç dayanımı havada soğutulandan daha yüksektir. Bunun nedeni, çimento harcının yüksek sıcaklıklarda ayrışmasıdır, ancak su soğutma kullanıldığında bileşenler yeniden hidratlanır ve güç kazanır (Kara ve Arslan, 2020). Zhai vd. (2019) doğal soğutma ve suya daldırmalı soğutma işleminin test sonuçlarının karşılaştırıldığını, su soğutmalı numunelerin mukavemetinin doğal yolla soğutulan numunelere göre daha yüksek olduğunu bildirmişlerdir. Buna ek olarak, su soğutması betonda hava soğutmaya göre daha yoğun bir mikroyapıya neden olmuştur, çünkü beton bileşenlerinin yüksek sıcaklıkta kısmen sertleşmiş çimento harcının betondan ayrışmasına neden olmuştur (Chan vd., 2000; Karakoç, 2013; Luo vd., 2000).

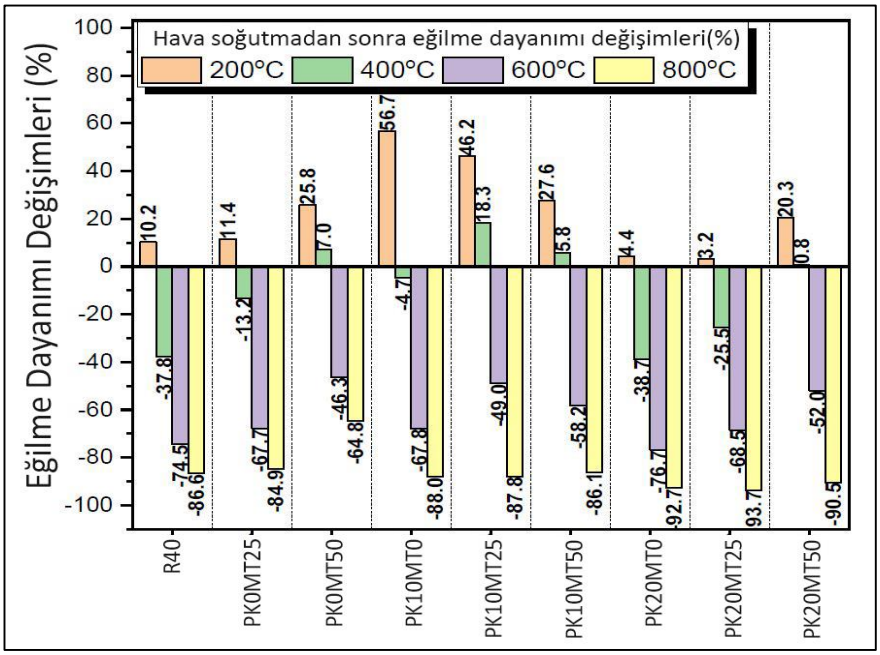
200°C'de, %10 PK içeren ve AMT içermeyen karışım, %56,7'lik en yüksek dayanım artışı ile en iyi sıcaklık direncini göstermiştir, ancak 400°C'de, %10 PK ve %25 AMT içeren karışım, %18,5 ile en yüksek dayanım artışı ile en iyi sıcaklık direncini göstermiştir. 600°C'de, %10 PK içeren ve AMT içermeyen karışım, %46,3'lük en düşük dayanım azalması ile en iyi sıcaklık direncini göstermiştir, ancak 800°C'de, %25 atık mermer tozlu karışım, %46,3'lük en düşük dayanım azalması ile en iyi sıcaklık direncini göstermiştir. 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, 200°C'de, referans karışımı R80, %14,3'lük en yüksek mukavemet artışı ile en iyi sıcaklık direncini göstermiştir, ancak 400°C ve 600°C'de, %20 PK ve %50 AMT içeren karışım, sırasıyla %47,1 ve %59,2 ile en düşük mukavemet azalmasıyla en iyi sıcaklık direncini göstermiştir. 800°C'de, %50 AMT içeren karışım, %90'lık en düşük mukavemet azalması ile en iyi sıcaklık direncini göstermiştir.



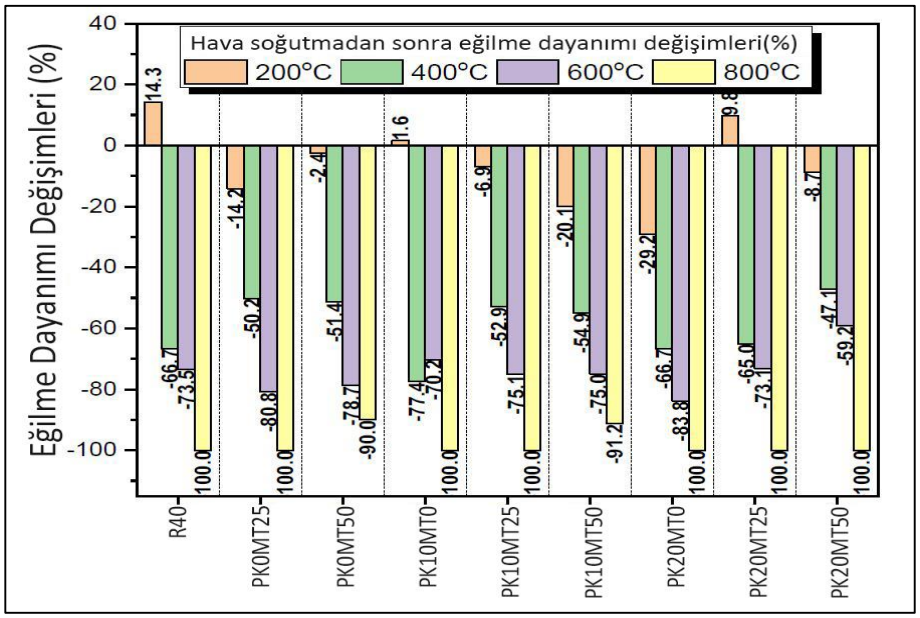

(a)


Hava soğutmadan sonra eğilme dayanımı (MPa)
20°C
200°C
400°C
600°C
800°C
Eğilme Dayanımı (MPa)
R80
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(b)


Hava soğutmadan sonra eğilme dayanımı değişimleri(%)
200°C
400°C
600°C
800°C
Eğilme Dayanımı Değişimleri (%)
R40
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(c)




(d)

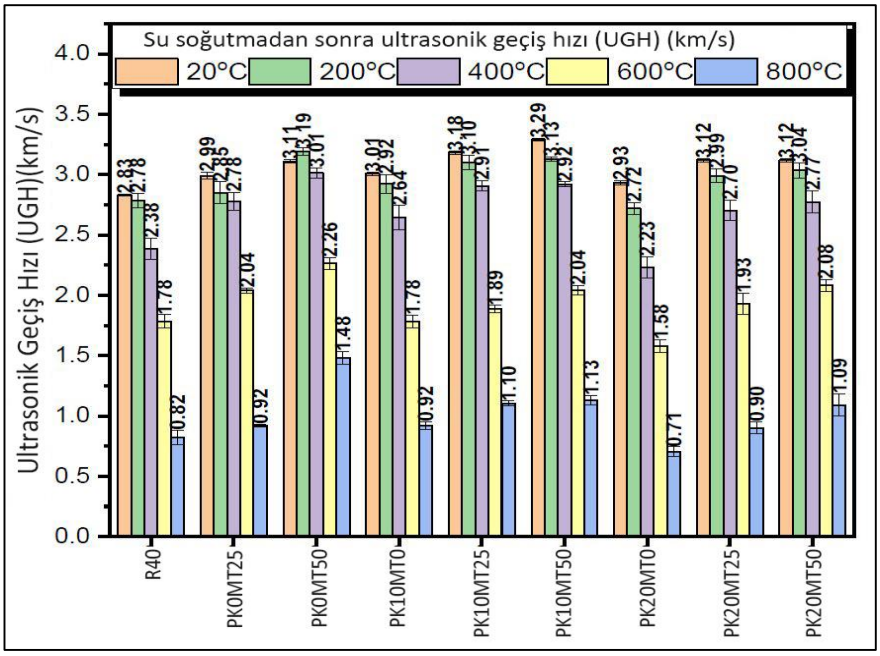
Şekil 4.14 a-b) Eğilme mukavemeti sonuçları c-d) Yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra eğilme mukavemeti değişimleri

### 4.9.6 Su Soğutmasından Sonra Ultrasses Geçiş Hızı (UGH) Değerleri

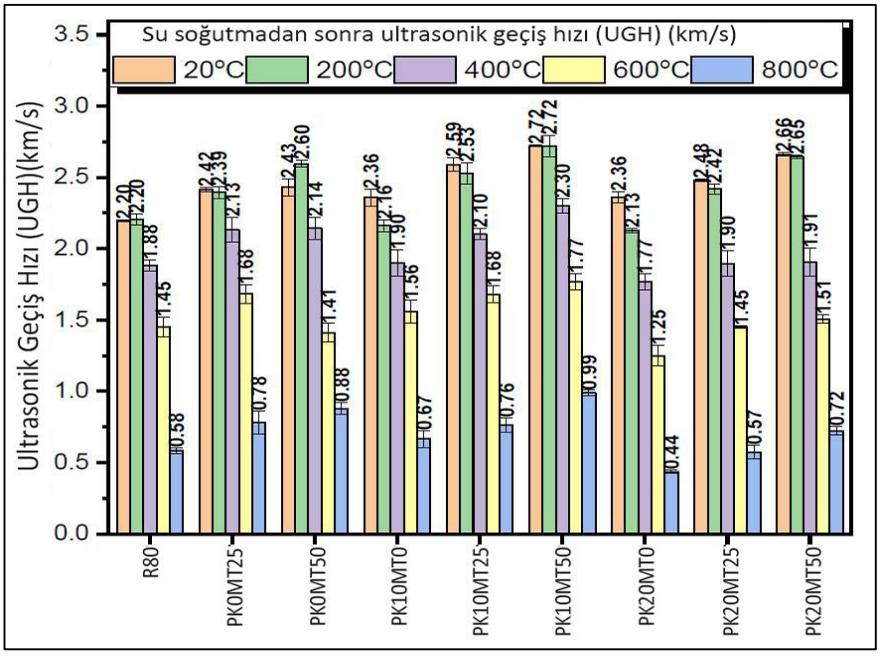
Şekil 4.15a-b, 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin yüksek sıcaklıkta bekletilip su soğutması yapılan ve oda sıcaklığında bekletip ölçülen UGH sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.15c-d, 200°C ile 800°C sıcaklık aralığında köpük betonların UGH değerlerindeki iyileştirmeleri ve azalmaları göstermektedir. Yüksek sıcaklıkta bekletilip su soğutması yapılıp ölçülen basınç dayanımı sonuçlarına çok benzer UGH sonuçları elde edilmiştir. Her iki köpük içeriğindeki hemen hemen tüm karışımlar, tüm sıcaklık aralıklarında UGH düşüşlerine sahiptir, ancak 200°C'de üç karışımda artışlar vardır.

Şekil 4.15c, köpük içeriği 40 kg/m$^3$ olan karışımların UGH varyasyonlarını göstermektedir. Tüm sıcaklık aralıkları için UGH değerleri açısından en iyi performansı %50 atık mermer tozlu ve PK içermeyen karışım göstermiştir ve ayrıca %50 AMT'li ve PK içermeyen karışımın en iyi sıcaklık direncini gösterdiği görülmüştür. Şekil 4.15d, 80 kg/m$^3$ köpük içeriğine sahip karışımların UGH varyasyonlarını göstermektedir. Ayrıca %25 AMT'li ve PK içermeyen karışımın %30,3 UGH azalması ile 600°C'de en iyi sıcaklık direncini gösterdiği söylenebilir. %50 AMT içeren ve PK içermeyen karışım, %63,8 UGH azalması ile 800°C'de en iyi

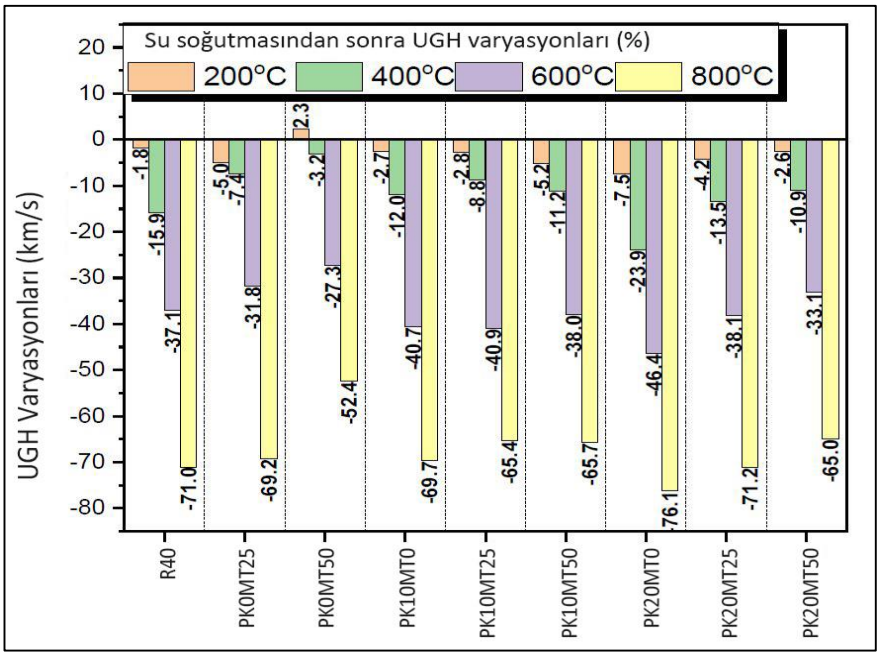
sıcaklık direncini göstermiştir. Şekil 4.15e, yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı ile UGH arasındaki ilişki gösterilmiştir. 20°C, 200°C, 400°C, 600°C ve 800°C'de sırasıyla 0,91; 0,89; 0,82; 0,72 ve 0,82 korelasyon katsayıları ile basınç dayanımı ile UGH arasında güçlü bir ilişki olduğu bulunmuştur. Daha yüksek basınç dayanımı, daha yüksek UGH değerleri ve en yüksek basınç dayanımının en yüksek UGH değerlerine karşılık geldiği söylenebilir.



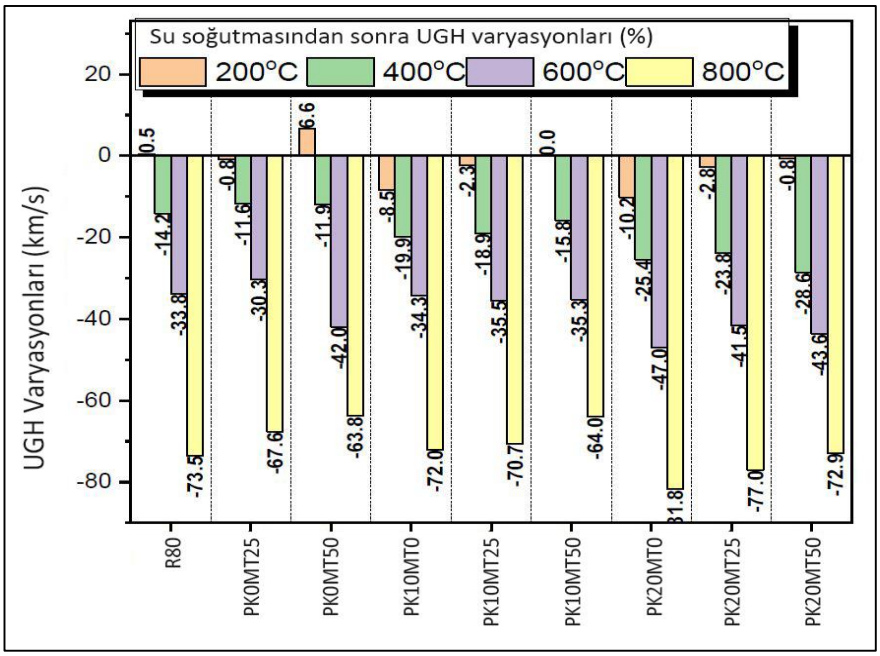

(a)



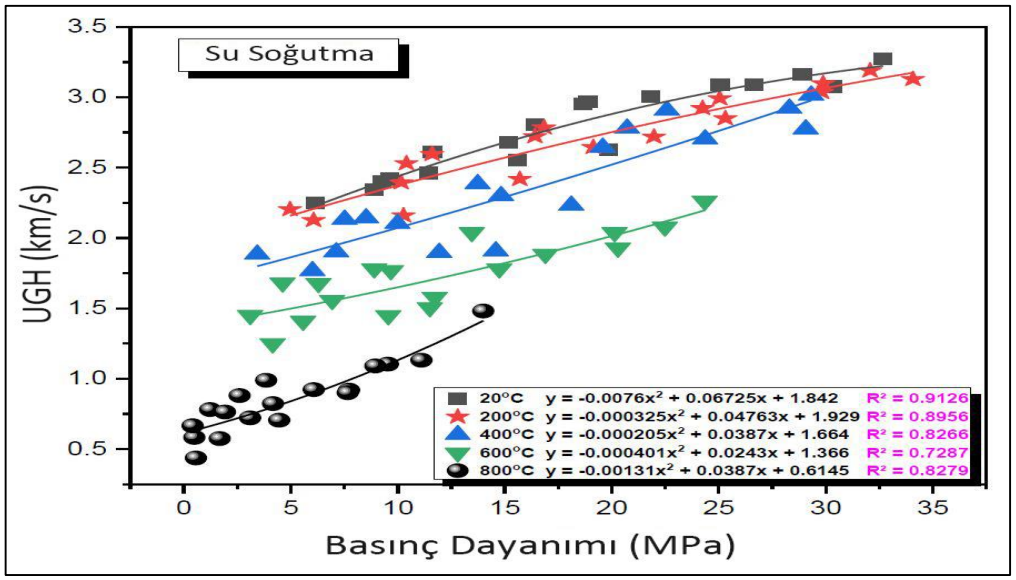

(b)


Su soğutmasından sonra UGH varyasyonları (%)
200°C
400°C
600°C
800°C
UGH Varyasyonları (km/s)
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
-80
-1.8
-15.9
-37.1
-71.0
-5.0
-7.4
-31.8
-69.2
2.3
-3.2
-27.3
-52.4
-2.7
-12.0
-40.7
-69.7
-2.8
-8.8
-40.9
-65.4
-5.2
-11.2
-38.0
-65.7
-7.5
-23.9
-46.4
-76.1
-4.2
-13.5
-38.1
-71.2
-2.6
-10.9
-33.1
-65.0
R40
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(c)


Su soğutmasından sonra UGH varyasyonları (%)
200°C
400°C
600°C
800°C
UGH Varyasyonları (km/s)
20
0
-20
-40
-60
-80
0.5
-14.2
-33.8
-73.5
-0.8
-11.6
-30.3
-67.6
6.6
-11.9
-42.0
-63.8
-8.5
-19.9
-34.3
-72.0
-2.3
-18.9
-35.5
-70.7
0.0
-15.8
-35.3
-64.0
-10.2
-25.4
-47.0
-81.8
-2.8
-23.8
-41.5
-77.0
-0.8
-28.6
-43.6
-72.9
R80
PK0MT25
PK0MT50
PK10MT0
PK10MT25
PK10MT50
PK20MT0
PK20MT25
PK20MT50

(d)

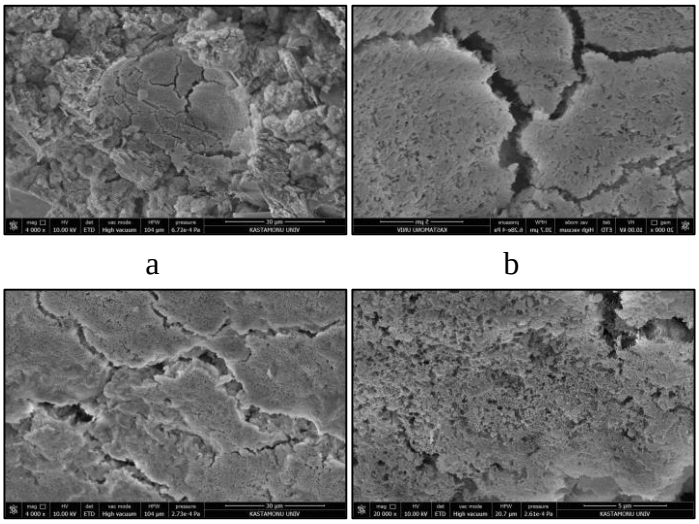



(e)

Şekil 4.15 a-b) UGH sonuçları c-d) UGH varyasyonları e) yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonra basınç dayanımı ile UGH karşılaştırması

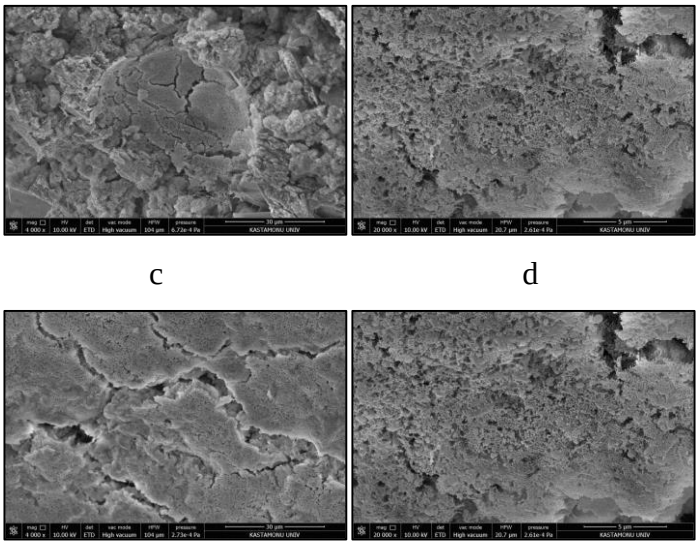
## 4.10 Yüksek Sıcaklık Etkisine Ait SEM Analizi

800°C'ye maruz kaldıktan sonra hava soğutmalı ve su soğutmalı numunelerin SEM analizi Şekil 4.16'da verilmiştir. 800 °C'de, numunelerdeki kimyasal olarak bağlı su ve jel benzeri hidratasyon ürünlerinin fiziksel olarak bağlı suyu ayrıştıyor gibi görünmektedir. 800 °C'de ısıl işlemden sonra tüm numunelerin SEM görüntüleri, köpük betonda termal yırtılmalara neden olan ayrışmış kalsiyum silikat fazlarından kaynaklanan mikro çatlakların varlığını ortaya çıkarmıştır.



a b

c d



c d

e f

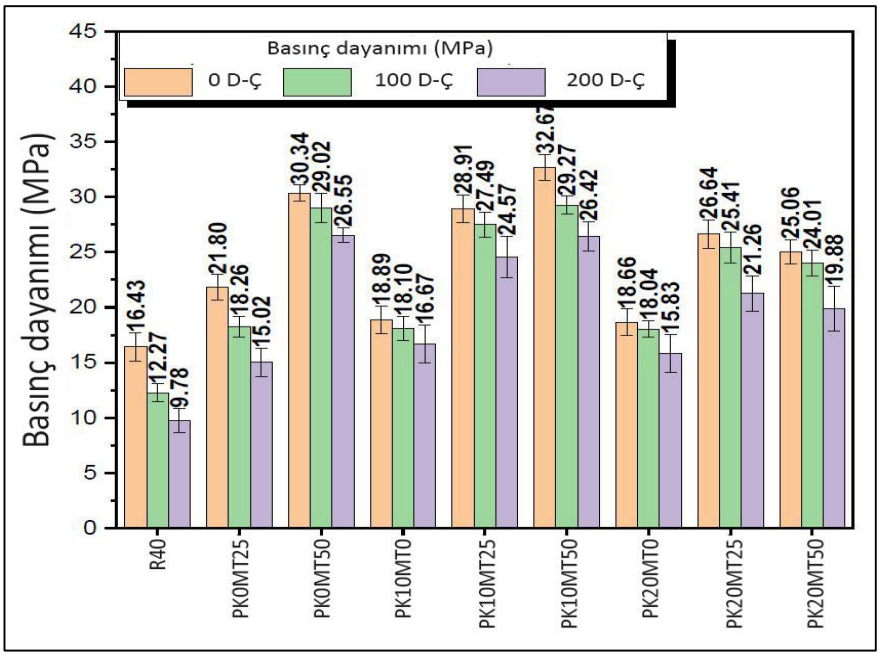
Şekil 4.16 800°C'ye maruz kaldıktan sonra hava soğutmalı örneklerin (a, b, c ve d) ve su soğutmalı örneklerin (c, d, e, f) SEM görüntüleri. (F: köpük içeriği, R: PK, M: AMT)

## 4.11 Donma – Çözülme (D-Ç) dayanıklılık değerlendirmesi

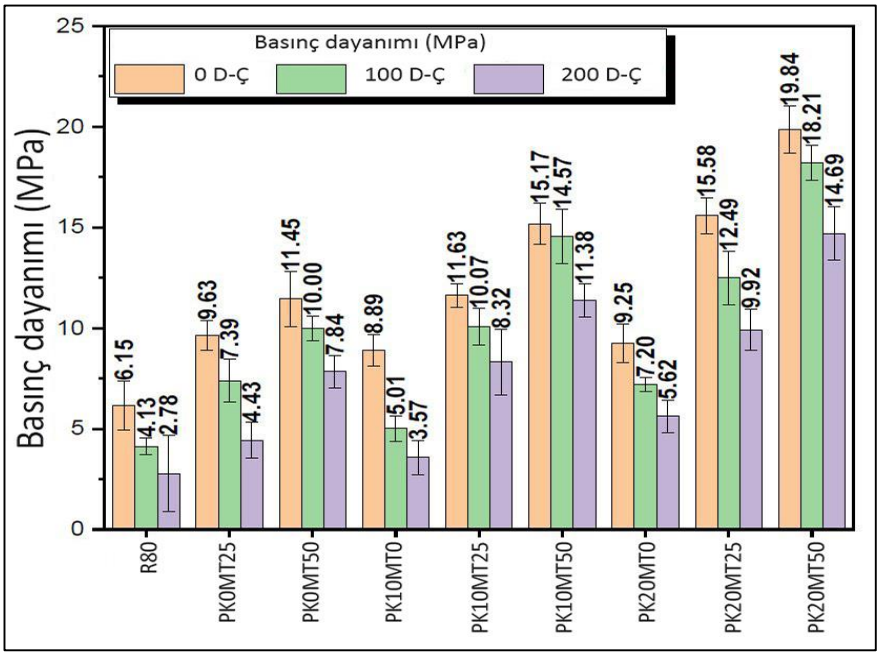
### 4.11.1 Basınç dayanımı

Şekil 4.17 a-b, 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 0, 100 ve 200 D-Ç çevrimlerinde 90 günlük köpük beton karışımlarının basınç dayanımını göstermektedir. Şekil 4.17c, 100 ila 200'lük D-Ç döngülerindeki basınç dayanımı düşüşlerini göstermektedir. Şekil 4.17'da gösterildiği gibi, tüm karışımlar, D-Ç döngülerinden sonra mukavemet azalması sergilemiştir ve daha düşük katı içeriği ve daha yüksek porozite nedeniyle daha yüksek köpük içeriği için daha yüksek mukavemet azalması elde edilmiştir. Şekil 4.17c'de gösterildiği gibi, referans karışımı R40, 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonra %25,3 ve %40,4'lük en yüksek basınç dayanımı azalışlarını sergilemiştir. Dayanım azalması AMT'nin değiştirilmesiyle ve ayrıca artan AMT içeriği ile azalmıştır. 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde sırasıyla 100 ve 200 D-Ç'den sonra %20 ve %10 PK içeren karışımlarda %3,3 ve %11,8'lik en düşük dayanım azalmaları elde edilmiştir. PK ve AMT'nin birlikte kullanımı da R40'tan daha iyi performans göstermiştir. Çimento ikamesi olarak PK ile karışımların en iyi D-Ç direncini gösterdiği sonucuna varılabilir. Bununla birlikte, 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, en kötü D-Ç performansı, %10 PK içeren ve AMT içermeyen karışım için %43,8 ve %59,8 dayanım azalmaları ile elde edilmiştir. Bu, o karışımın yüksek su

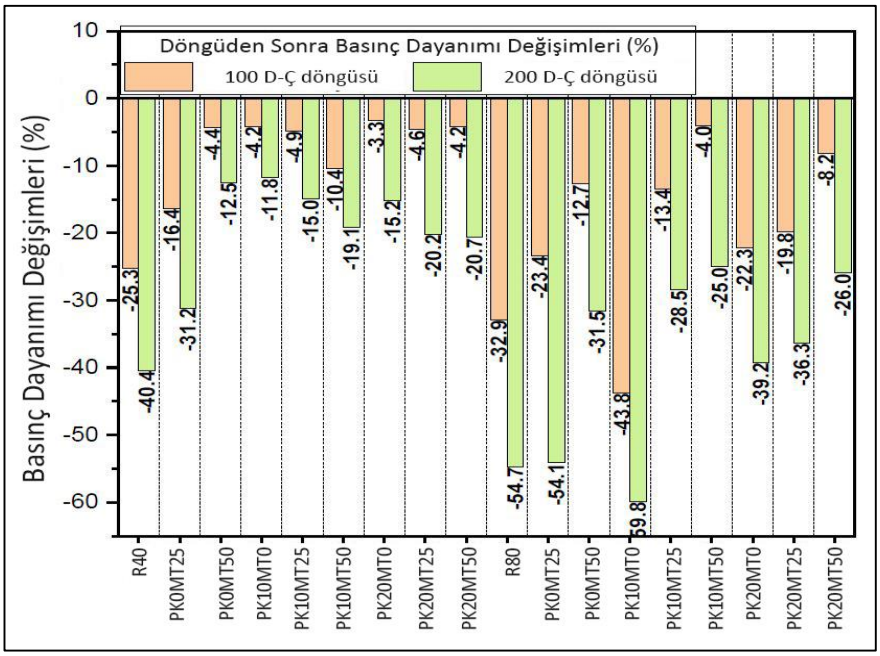
emme değerine bağlanabilir. %10 PK ve %50 AMT içeren karışım, 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde %4 oranında en iyi D-Ç direncini ve %25 dayanım azalmasını sergilemiştir.




(a)




b)



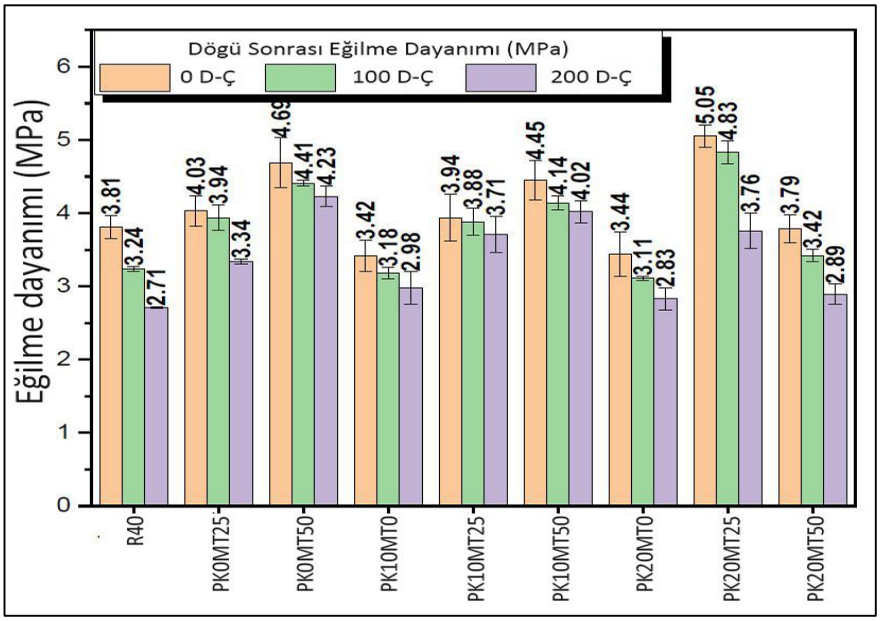

(c)

Şekil 4.17 a-b) Basınç dayanımı sonuçları c) D-Ç çevrimlerinden sonra basınç dayanımı değişimleri

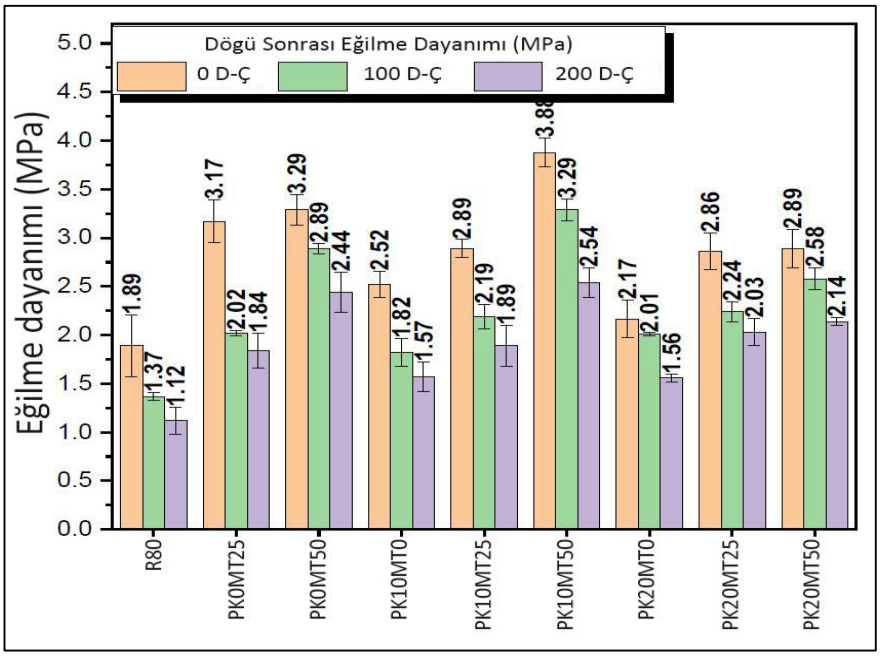
### 4.11.2 Eğilme Dayanımı

Şekil 4.18a-b, 50 kg/m$^3$ ve 100 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 0, 100 ve 200 D-Ç çevrimlerinde 90 günlük köpük beton karışımlarının eğilme dayanımını göstermektedir. Şekil 4.18c, 100 ile 200 D-Ç döngülerinde köpük betonların eğilme mukavemetindeki azalmaları göstermektedir. Şekil 4.18'de açıkça görüldüğü gibi, tüm karışımların eğilme dayanımı 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonra azalmıştır ve daha yüksek köpük içeriğinde dayanım azalması artmıştır. 40 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, referans karışımı R40, 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonra %15 ve %28,9'luk en yüksek dayanım azalmalarını ortaya koymuştur. AMT ilavesi ile dayanım azalması azalmıştır ve 100 D-Ç döngülerden sonra %25 AMT içeren karışımda %2,2 azalma elde edilmiş ve %10 PK ve %25 AMT içeren karışımda %1,5 ve %5,8 azalma ile en iyi D-Ç performansı elde edilmiştir. Sırasıyla 100 ve 200 D-Ç döngülerden sonra %10 PK ve %25 AMT'nin birlikte kullanımının D-Ç dayanımına karşı en iyi eğilme dayanımı direncini gösterdiği sonucuna varılabilir. 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde, %25 AMT'li 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonra %35 ve %42'lik en yüksek dayanım azalmalarını ortaya koymuştur. %20 PK içeren karışım, 100 D-Ç döngüsünden sonra

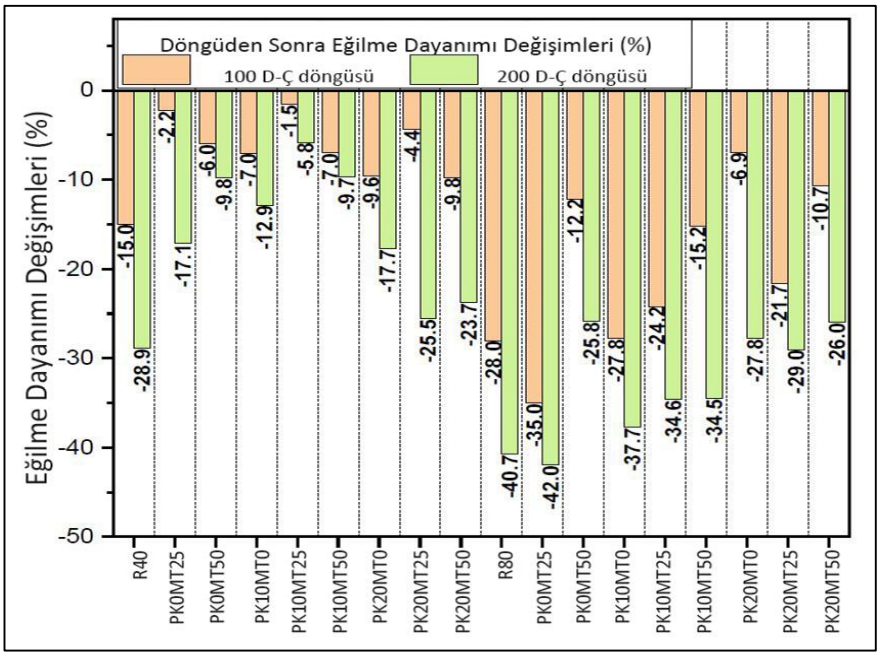
%6,9'luk en düşük azalmayı sergilemiştir ve %26'lık en düşük dayanım azalması, 200 D-Ç döngüsünden sonra %20 PK ve %50 AMT içeren karışım için elde edilmiştir.




(a)




b)




(c)

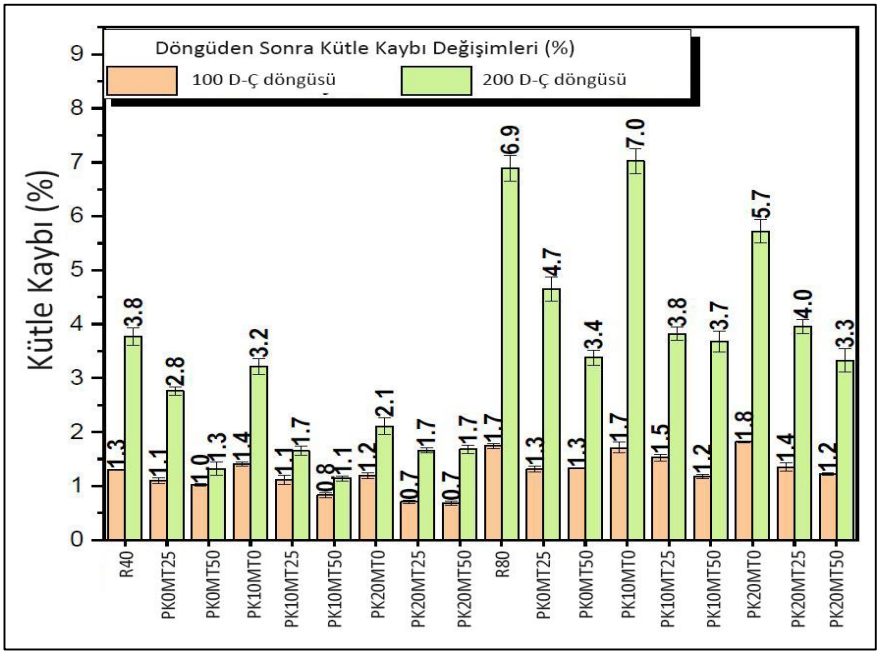
Şekil 4.18 a-b) Eğilme mukavemeti sonuçları c) D-Ç çevrimlerinden sonra eğilme mukavemeti değişimleri

### 4.11.3 Ağırlık Kaybı

Şekil 4.19, 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonraki kütle kaybı değerlerini göstermektedir.

D-Ç döngüleri arttıkça tüm karışımların kütle kaybı artmıştır. Tüm karışımların kütle kaybı da artan köpük içeriği ile artmıştır. Şekil 4.19'da gösterildiği gibi, köpük içeriği 40 kg/m$^3$ olan karışımlar için referans karışımı R40 ve %10 ve %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışımlar, kütle kaybı açısından 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonra en kötü performansı göstermiştir. PK ve AMT'nin birlikte kullanılması, kütle kaybını azaltmıştır ve tek başına kullanımlarından daha fazla olumlu etkilemiştir. 90 günde en yüksek basınç dayanımına sahip olan karışım için en düşük %1,1'lik kütle kaybı, 200 D-Ç döngüsünden sonra %10 PK ve %50 AMT içeren karışım için elde edilmiştir. Şekil 4.19'de gösterildiği gibi, köpük içeriği 80 kg/m$^3$ olan karışımlar için, köpük içeriği 40 kg/m$^3$ olan karışımlara benzer, referans karışımı R80 ve %10 ve %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışımlar, kütle kaybı açısından 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonra en kötü performansı göstermiştir. AMT içeriğindeki artış, hem

köpük içeriğindeki kütle kaybını azaltmıştır hem de PK ve AMT'nin birlikte kullanımı, tek başına kullanılandan daha iyi performans göstermiştir. 90 günde en yüksek basınç dayanımına sahip olan karışım için en düşük %3,3 kütle kaybı, 200 D-Ç döngüsünden sonra %20 PK ve %50 AMT içeren karışım için elde edilmiştir.

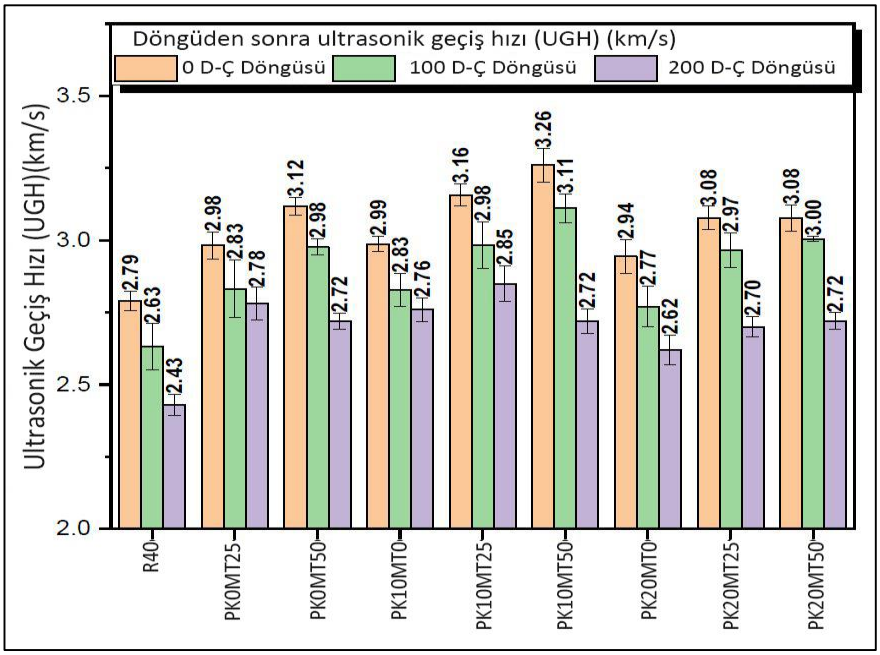



Şekil 4.19 D-Ç döngülerinden sonra kütle kaybı sonuçları

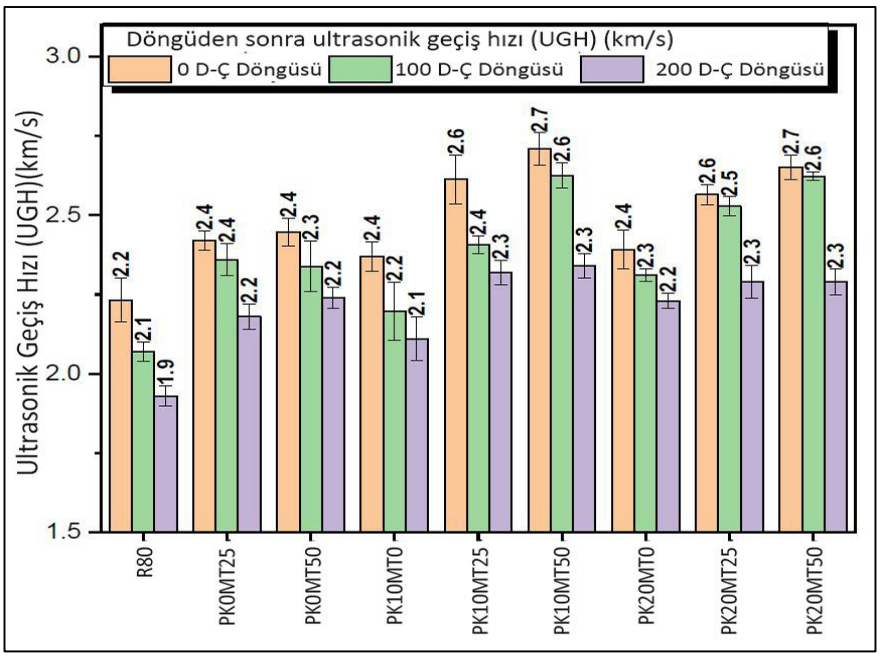
### 4.11.4 D-Ç Maruz Bırakıldıktan Sonra UGH Değerleri

Şekil 4.20 a-b, 0, 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonra 40 kg/m$^3$ ve 80 kg/m$^3$ köpük içeriği içeren 90 günlük köpük beton numunelerinin UGH değişiminin sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.20c, tüm karışımların UGH değerlerindeki düşüşü göstermektedir, görüldüğü gibi UGH değerlerindeki düşüş D-Ç döngüleri ile artmıştır. Köpük içeriği 40 kg/m$^3$ olan karışımlar için 100 D-Ç döngüsünden sonra en düşük UGH azalması %20 PK ve %50 AMT içeren karışıma ve 200 D-Ç döngüsünden sonra %6,7 ile en düşük UGH azalması %25 AMT ve PK içermeyen karışıma aittir. 80 kg/m$^3$ köpük içerikli karışımlar için 100 D-Ç döngüden sonra en düşük %1,1'lik UGH azalması, %20 PK ve %50 AMT içeren karışıma ve 200 D-Ç döngüden sonra %6,7'lik en düşük UGH azalması, %20 PK ve AMT içermeyen karışıma aittir. Şekil 4.20c, D-Ç döngülerinden sonra basınç dayanımı ile UGH arasındaki ilişkiyi gösterir. D-Ç döngülerinden sonra basınç dayanımı ile UGH arasında güçlü bir ilişkinin 0.88 korelasyon katsayısı ile mevcut olduğu bulunmuştur. Daha yüksek basınç dayanımı,

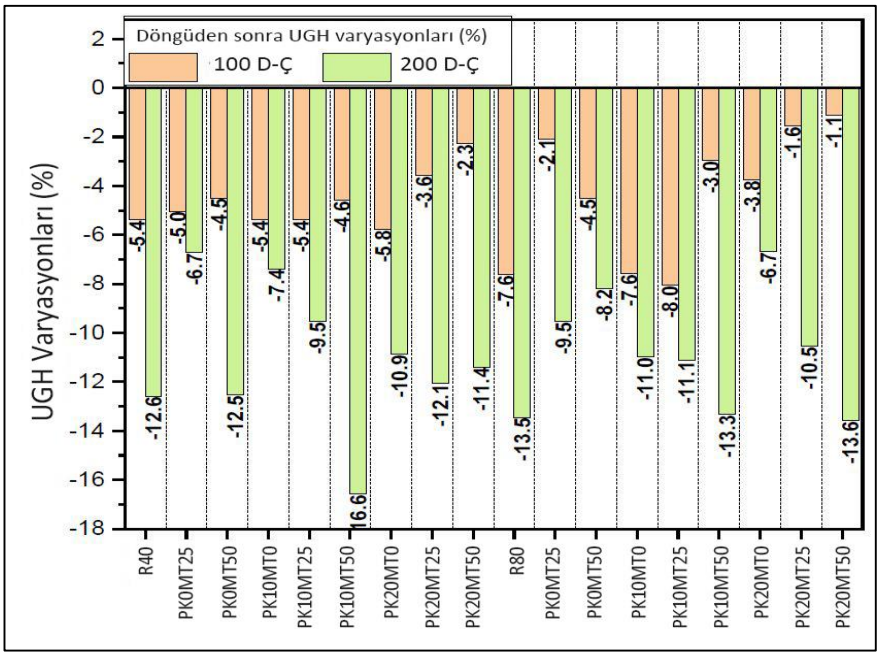
daha yüksek UGH değerleri ve en yüksek basınç dayanımının en yüksek UGH değerlerine karşılık geldiği söylenebilir.



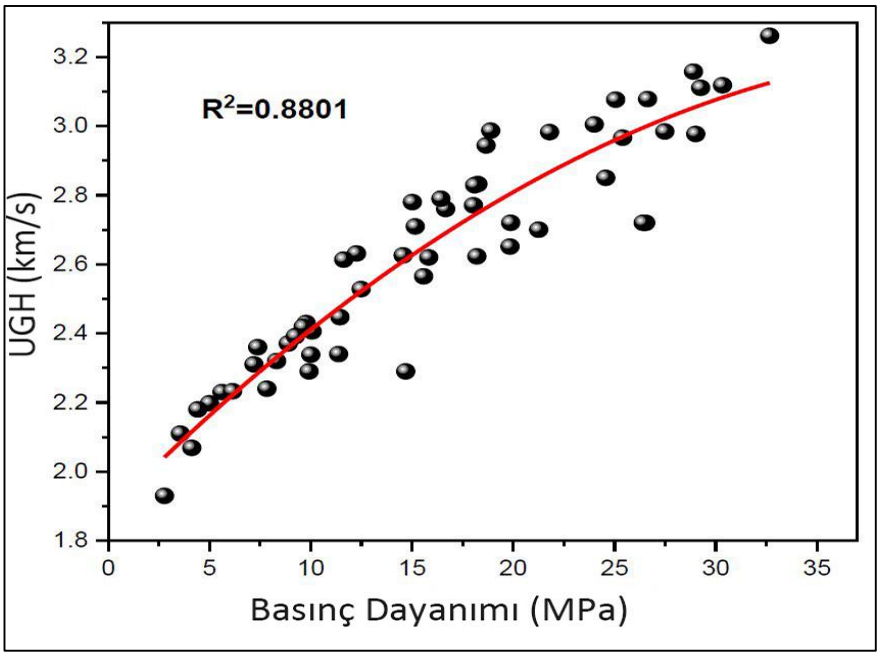

(a)




(b)




(c)




(d)

Şekil 4.20 a-b) UGH sonuçları c) UGH varyasyonları d) D-Ç döngüleri sonrasında basınç dayanımı ile UGH karşılaştırması

# 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, silis kumu ikamesi olarak AMT'nin ve çimento ikamesi olarak PK'nın yüksek sıcaklık ve donma-çözülme döngülerine maruz kalan köpük betonun mikro yapısal ve mekanik özelliklerine etkisi değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- İnce agregaların AMT ile ve çimentonun PK ile değiştirilmesi de çökme değerlerini düşürmüştür ve PK'nın çökme azalması üzerindeki etkisi AMT'ye göre daha fazlaydır.
- En yüksek 90 günlük basınç dayanımı, çimento yerine %10 PK ve silis kumu yerine %50 AMT (F40R10M50) içeren karışımdan elde edilmiştir. Referans karışımı R40, tüm kürleme günlerinde en düşük basınç dayanımını göstermiştir.
- 80 kg/m$^3$ köpük içerikli tüm köpük beton karışımları arasında %20 PK ve %50 AMT içeren karışım 7, 28 ve 90 günlük 13,39 MPa, 16,53 MPa ve 19,84 MPa basınç dayanımını sırasıyla %309,48; %373,63 ve %222,6 artışlarla sergilemiştir. 80 kg/m$^3$ köpük içeriğinde çimento ikamesi olarak %20 PK ve kum ikamesi olarak %50 AMT'nin birlikte kullanımının optimum yüzdeyi verdiği sonucuna varılabilir.
- Silis kumu ikamesi olarak %50 AMT ve PK içermeyen karışım için R40 ile karşılaştırıldığında sırasıyla 7, 28 ve 90 günlük %101,06; %29,07 ve %23,09 eğilme mukavemeti artışı elde edilmiştir.
- PK ve AMT içeren tüm karışımlar, referans karışım R40'tan daha yüksek termal iletkenlik sergilemiştir. Isıl iletkenlik artışları %10 ve %20 PK içeren ve AMT içermeyen karışımlarda R40 karışımına göre sırasıyla %4,80 ve %6,69 olarak bulunmuştur.
- İnce agrega olarak AMT'nin eklenmesi, neredeyse tüm kuruma süreleri boyunca karışımların kuruma büzülmesini önemli ölçüde azaltmıştır. En düşük büzülme değerleri %25 ve %50 AMT içeren ve PK içermeyen karışımlarda elde edilmiştir.

- PK ve AMT’nin birlikte kullanılması kapilariteyi tek başına olduğundan daha fazla azaltmıştır. Çimento ikamesi olarak PK’nın eklenmesinin kapilariteyi, %20 PK ve %30 AMT ikamede %27 ve %30 PK içeriğinde %45 azalttığını göstermiştir.
- Tüm PK ve AMT ikame edilmiş karışımların basınç dayanımı, 20℃'deki basınç dayanımı ile karşılaştırıldığında 200℃ ve 400℃ sıcaklığa maruz kaldığında artmıştır.
- Su ile soğutulan numuneler, 200℃'den sonra hava ile soğutulan numunelere göre daha fazla dayanım kaybı göstermiştir. Bu, hava ile soğutmada suyla soğutulanlara göre daha küçük çatlakların gelişmesine bağlanabilir.
- Referans karışımı R40, 100 ve 200 D-Ç döngülerinden sonra %25,3 ve %40,4'lük en yüksek basınç dayanımı düşüşlerini sergilemiştir. Dayanımın azalması AMT değişimi ve ayrıca artan AMT içeriği ile azalmıştır. 100 ve 200 D-Ç'den sonra AMT içermeyen %20 ve %10 PK içeren karışımlarda en düşük dayanım azalmaları %3,3 ve %11,8 olarak elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR


Akbulut, H., & Gurer, C. (2003). Mermer Atıklarının Çevresel Etkileri Ve Yol Katmanlarında Kullanarak Faydalanma ve Atık Azaltma İmkanları. *Türkiye IV. Mermer Sempzoyumu Bildiriler Kitabı*, 8.

Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Auda, E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, *50*, 28-41. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005

Alkaya, D. (2009). *Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanilmasinin İncelenmesi*.

Alyamaç, K. E., & Ince, R. (2009). A preliminary concrete mix design for SCC with marble powders. *Construction and Building Materials*, *23*(3), 1201-1210. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.012

Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., & Abang Ali, A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, *101*, 990-1005. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.112

Aruntaş, H. Y. (1996). "Diatomitlerin çimentolu sistemlerde puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği," Doktora tezi, Mimarlık, Fen Bilimleri Enstiüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara.

Awana, M., & Kumar, C. (2017). *Cellular Lightweight Concrete*. 241-246.

Baikerikar, A. (2014). A Review on Green Concrete. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, *1*, 472-474.

Baradan, B., Yazıcı, H., & Aydın, S. (2012). Yazıcı, H. ve Aydın. *S., Beton, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir*.

Başpına, M., Görhan, G., & Kahraman, E. (2008). *Mermer Tozu Ve Atıklarının Kullanım Alanlarının Araştırılması*. 6. Mermer Ve Doğaltaş Sempozyumu.

Bayraktar, O. Y. (2020). The Use of Rice Husk Waste in Foam Concrete Production. *Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology*, *8*(12), 2716-2722. https://doi.org/10.24925/turjaf.v8i12.2716-2722.4010

Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Gencel, O., Benli, A., & Sutcu, M. (2021). Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag. *Construction and Building Materials*, *288*, 123128. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123128

BDTM. (2001). Doğal Taşlar Dış Pazar Araştırması. *T.C. Başbakanlık Dış Ticaret Müsteşarlığı, İhracatı Geliştirme Etüt Merkezi Yayını, Ankara*.

Bekaroğlu, M. (2012). *Kompozit Yapıda Pomza Agregası İçeren Köpük Betonun Özellikleri Ve Teknik Parametrelerinin İrdelenmesi, Süleymen Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi,*. 124.

Bilgin, N. (2010). *Mermer Tozu Atıklarının Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanımı, Yıldız*

*Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.

Bilgin, Ö., & Koç, E. (2013). Mermer Madenciliğinde Çevresel Etkiler. *Madencilik Türkiye Dergisi*, *28*, 68-79.

Bindiganavile, V., & Hoseini, M. (2008). *Developments in The Formulation and Reinforcement of Concrete Foamed Concrete, University of Alberta, Canada, 223-251*.

Bing, C., & Liu, J. (2004). Residual strength of hybrid-fiber-reinforced high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Research*, *34*(6), 1065-1069. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.11.010

Bingöl, A. F., & Gül, R. (2009). Effect of elevated temperatures and cooling regimes on normal strength concrete. *Fire and Materials*, *33*(2), 79-88. https://doi.org/10.1002/fam.987

Błaszczyński, T., & Król, M. (2015). Usage of Green Concrete Technology in Civil Engineering. *Procedia Engineering*, *122*, 296-301. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.039

Ceylan, H. (2000). *Mermer Fabrikalarındaki Mermer Toz Atıklarının Ekonomik Olarak Değerlendirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Süleyman Demirel Üniversitesi.

Chan, S. Y. N., Luo, X., & Sun, W. (2000). Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete. *Construction and Building Materials*, *14*(5), 261-266. https://doi.org/10.1016/S0950-0618(00)00031-3

Chao-Lung, H., Anh-Tuan, B. L., & Chun-Tsun, C. (2011). Effect of rice husk ash on the strength and durability characteristics of concrete. *Construction and Building Materials*, *25*(9), 3768-3772. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.009

Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2003). The Influence of Mineral Additions on the Rheology of Self-Compacting Concrete. *Special Publication*, *217*, 227-240. https://doi.org/10.14359/12916

Corinaldesi, V., Moriconi, G., & Naik, T. R. (2010). Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete. *Construction and Building Materials*, *24*(1), 113-117. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.08.013

DAKA. (2015). *Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı, TR63 Bölgesi Çimento Sektörü Raporu, http://www.dogaka.gov.tr/Icerik/Dosya/www.dogaka.gov.tr_626_KN2F58CG_cimento-Sektor-Raporu-2015.pdf,.*

Dayı, M. (2006). *Doğal ve yapay puzolanların kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliğinin araştırılması, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye*.

Demïr, İ., Başpinar, M. S., & Kahraman, E. (2017). Köpük Betonun Reolojik Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. *Cumhuriyet Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi*, *38*(1), 109-118.

Demïrel, B., & Yazıcıoğlu, S. (2010). *İnce Malzeme Olarak Kullanılan Atık Mermer Tozunun Betonun Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi*. 172-175.

Demïrel, S., Öz, H. Ö., Çïner, F., & Güneş, M. (2019). Türkiye'de Atık Malzemeden Yapılmış Kendiliğinden Yerleşen Harç Üretiminin Yaşam Döngüsü Analizi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *8*(1), 1-8. https://doi.org/10.28948/ngumuh.516780

DPT. (1996). *"Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Endüstriyel Hammaddeler Alt Komisyonu Çimento Hammaddeleri Çalısma Grubu Raporu", Cilt-III (Mermer), Yayın No: DPT: 2434-:491, Ankara*.

DPT. (2001). *"Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu"*.

Ekinci, D. (2014). *Türkiye'de Köpük Beton, Dünya İnşaat Dergisi, 376, 35-55.* http://www.mimarlikdergisi.com/index.cfm?sayfa=mimarlik&DergiSayi=390&RecID=3355

Emir, E., Konuk, A., & Daloğlu, G. (2011). Strength enhancement of Eskisehir tuff ashlars in Turkey. *Construction and Building Materials*, *25*(7), 3014-3019. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.02.005

Erdoğan, S. T., & Erdoğan, T. Y. (2007). *Puzolanik mineral katkılar ve tarihi geçmişleri, 2.Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara, Türkiye, ss. 264-329.* 68.

Erdoğan, T. Y. (2003). *Beton* (3. bs, s. 741). Orta Doğu Teknik Üniversitesi Geliştime Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.

Erdoğan, T. Y. (2010a). *Beton* (2. bs, ss. 188-189). Orta Doğu Teknik Üniversitesi Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.

Erdoğan, T. Y. (2010b). *Beton* (3. bs, ss. 156-158). Orta Doğu Teknik Üniversitesi Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.

Erdoğdu, K., Tokyay, M., & Türker, P. (2009). *Traslar ve Traslı Çimentolar, 8. Baskı, Ankara, Türkiye: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2009, ss. 16-23.* yumpu.com. https://www.yumpu.com/tr/document/read/16427517/traslar-ve-trasli-cimentolar-ekatalogco

Erkek, D., & Özdemir, S. (2011). *Mermer ve Traverten Sektörüne Küresel ve Bölgesel Yaklaşım*. 42.

Evram, A., Akçaoğlu, T., Ramyar, K., & Çubukçuoğlu, B. (2020). Effects of waste electronic plastic and marble dust on hardened properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*, *263*, 120928. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120928

Fapohunda, C., Akinbile, B., & Shittu, A. (2017). Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement–A review. *International Journal of Sustainable Built Environment*, *6*(2), 675-692.

Filiz, M., Özel, C., Soykan, O., & Ekiz, Y. (2010). Atık Mermer Tozunun Parke Taşlarında Kullanılması. *Usage of Waste Marble Dust at Paving Stones.*, *6*(2), 57-72.

Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, *22*(8), 1675-1683. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011

Gencel, O., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Benli, A., Martínez-Barrera, G., Brostow, W., Tek, M., & Bodur, B. (2021). Characteristics of hemp fibre reinforced foam concretes with fly ash and Taguchi optimization. *Construction and Building Materials*, *294*, 123607. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123607

Ghani, A., Ali, Z., Khan, F. A., Shah, S. R., Khan, S. W., & Rashid, M. (2020). Experimental study on the behavior of waste marble powder as partial replacement of sand in concrete. *SN Applied Sciences*, *2*(9), 1554. https://doi.org/10.1007/s42452-020-03349-y

Givi, A. N., Rashid, S. A., Nora, F., Aziz, A., Amran, M., & Salleh, M. (2010). *Contribution of rice husk ash to the properties of mortar and concrete: A Review, Journal of American Science, c. 6, sayı 3, ss. 157-165,*.

Gomez, J. (2018, Ekim 8). *Düşük maliyetli ve çevre dostu çimento üretmek mümkün mü?* euronews. https://tr.euronews.com/2018/10/08/dusuk-maliyetli-ve-cevre-dostu-cimento-uretmek-mumkun-mu

Güler, T., & Polat, E. (2018). *MERMER MADENCİLİĞİNDE ÇEVRESEL YAKLAŞIMLAR*. 278.

Gündeşli, U. (2008). Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması, Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye.

Gündeşli̇, U., & Tanrıkulu, A. H. (2008). *Uçucu Kül, Silis Dumanı Ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması*. 9.

Gürer, C. (2005). *Atık Mermer Parçalarının Bitümlü Yol Kaplamalarında Değerlendirilmesi* [Master's Thesis].

Habeeb, G., & Fayyadh, M. (2009). Rice Husk Ash Concrete: The Effect of RHA Average Particle Size on Mechanical Properties and Drying Shrinkage. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, *3*, 1616-1622.

Hameed, M., & Sekar, A. (2009). Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, *4*.

Huang, Z., Zhang, T., & Wen, Z. (2015). Proportioning and characterization of Portland cement-based ultra-lightweight foam concretes. *Construction and Building Materials*, *79*, 390-396.

Hwang, C. L., & Chandra, S. (1996). *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing, 1st Edition, New Jersey, United States of America: Noyes Publications, 1996, ss. 198*. Elsevier.

Hwang, C.-L., & Wu, D.-S. (1989). Properties of Cement Paste Containing Rice Husk Ash. *Special Publication*, *114*, 733-762. https://doi.org/10.14359/2368

Imbabi, M. S., Carrigan, C., & McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment*, *1*(2), 194-216. https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2013.05.001

Işıldar, N. (2018). *Köpük Betonda Kuruma Büzülmesi,* Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 67s, Isparta. *https://tez.yok.gov.tr/UlusalTezMerkezi/tezSorguSonucYeni.jsp*

İhracat Genel Müdürlüğü. (2021). *Maden Metal ve Orman Ürünleri Dairesi. Doğal Taşlar Sektör Raporu. Ankara: Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı.* 10.

İMMİB. (2014). *Available: Www.immib.org.tr*. www.immib.org.tr

İşbilir, B. (2012). *Pirinç kabuğu külü ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Düzce Üniversitesi.

Jia, Z., Chen, C., Shi, J., Zhang, Y., Sun, Z., & Zhang, P. (2019). The microstructural change of C-S-H at elevated temperature in Portland cement/GGBFS blended system. *Cement and Concrete Research*, *123*, 105773. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.018

Jones, M. R., & McCarthy, A. (2005a). Preliminary views on the potential of foamed concrete as a structural material. *Magazine of Concrete Research*, *57*(1), 21-31. https://doi.org/10.1680/macr.2005.57.1.21

Jones, M. R., & McCarthy, A. (2005b). Behaviour and assessment of foamed concrete for construction applications. *Use of foamed concrete in construction: Proceedings of the international conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 5 July 2005*, 61-88.

Kabeer, K. I. S. A., & Vyas, A. K. (2018). Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. *Construction and Building Materials*, *165*, 321-332. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.061

Kang, S.-H., Hong, S.-G., & Moon, J. (2019). The use of rice husk ash as reactive filler in ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, *115*, 389-400.

Kaplan, G., & Elmekahal, M. A. S. (2021). Microstructure and durability properties of lightweight and high-performance sustainable cement-based composites with rice husk ash. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-27. https://doi.org/10.1007/s11356-021-14489-y

Kara, İ. B., & Arslan, M. (2020). Effects of plasticizer and antifreeze on concrete at elevated temperatures and different cooling regimes. *Revista de La Construcción. Journal of Construction*, *19*(3), 347-357. https://doi.org/10.7764/rdlc.19.3.347-357

Karakoç, M. B. (2013). Effect of cooling regimes on compressive strength of concrete with lightweight aggregate exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, *41*, 21-25. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.104

Kaya, Z. R. (2017). *Krom Atıklarının Köpük Beton Yapımında Agrega Olarak Kullanılmasının Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 71s*. http://tez.sdu.edu.tr/Tezler/TF04038.pdf

Kearsley, E. P., & Wainwright, P. J. (2001). The effect of high fly ash content on the compressive strength of foamed concrete. *Cement and concrete research*, *31*(1), 105-112.

Keleştemur, O., Arıcı, E., Yıldız, S., & Gökçer, B. (2014). Performance evaluation of cement mortars containing marble dust and glass fiber exposed to high temperature by using Taguchi method. *Construction and Building Materials*, *60*, 17-24. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.061

Khan, W., Shehzada, K., Bibi, T., Islam, S. U., & Khan, S. W. (2018). Performance evaluation of Khyber Pakhtunkhwa Rice Husk Ash (RHA) in improving mechanical behavior of cement. *Construction and Building Materials*, *176*, 89-102.

Khodabakhshian, A., de Brito, J., Ghalehnovi, M., & Asadi Shamsabadi, E. (2018). Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Construction and Building Materials*, *169*, 237-251. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.192

Kırıkoğlu, M. S., Yavuz, F., Okyay, U. S., & Yıldız, A. (1990). *Çimento Hammadeleri, Ders Notları, İstanbul*.

Kişman, Z. A., & Kan, Ö. D. (2011). *"Elazığ Mermeri Sektörel Arastırması", Fırat Kalkınma Ajansı Raporu, Elazığ, Türkiye.*

Koçak, Y. (2008). *"Çimento-puzolan etkileşiminde molüküler ve elektrokinetik davranışların araştırılması," Doktora tezi, Yapı Eğitim, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye,*. https://docplayer.biz.tr/57274994-Cimento-puzolan-etkilesiminde-molekuler-ve-elektrokinetik-davranislarin-arastirilmasi-yilmaz-kocak-doktora-tezi-yapi-egitimi.html

Köktürk, U. (2002). *"Endüstriyel Hammaddeler", Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Yayını, Maden Mühendisliği Bölümü, İzmir*.

Kun, N. (2013). *Mermer Jeolojisi ve Teknolojisi* (2. bs, s. 222).

Kunchariyakun, K., Asavapisit, S., & Sombatsompop, K. (2015). Properties of autoclaved aerated concrete incorporating rice husk ash as partial replacement for fine aggregate. *Cement and Concrete Composites*, *55*, 11-16. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.021

Kuşçu, M., Bağci, M., & Yildiz, A. (2001). *AFYON MERMER ENDÜSTRİSİ VE TÜRKİYE MERMER SEKTÖRÜNDEKİ KONUMU*. 8.

Liew, K. M., Sojobi, A. O., & Zhang, L. W. (2017). Green concrete: Prospects and challenges. *Construction and Building Materials*, *156*, 1063-1095. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.008

Liu, M. Y. J., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., & Mo, K. H. (2014). Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete. *Energy and Buildings*, *72*, 238-245.

Luo, X., Sun, W., & Chan, S. Y. N. (2000). Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, *30*(3), 379-383. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00264-1

Marinković, S., Dragaš, J., Ignjatović, I., & Tošić, N. (2017). Environmental assessment of green concretes for structural use. *Journal of Cleaner Production*, *154*, 633-649. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.015

Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., & Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, *30*(11), 2255-2264. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012

Mendes, A., Sanjayan, J., & Collins, F. (2007). Phase transformations and mechanical strength of OPC/Slag pastes submitted to high temperatures. *Materials and Structures*, *41*(2), 345. https://doi.org/10.1617/s11527-007-9247-8

Miller, S. A., Cunningham, P. R., & Harvey, J. T. (2019). Rice-based ash in concrete: A review of past work and potential environmental sustainability. *Resources, Conservation and Recycling*, *146*, 416-430.

Miyandehi, B. M., Feizbakhsh, A., Yazdi, M. A., Liu, Q., Yang, J., & Alipour, P. (2016). Performance and properties of mortar mixed with nano-CuO and rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, *74*, 225-235. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.006

Molaei Raisi, E., Vaseghi Amiri, J., & Davoodi, M. R. (2018). Mechanical performance of self-compacting concrete incorporating rice husk ash. *Construction and Building Materials*, *177*, 148-157. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.053

Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., & Wu, Y.-F. (2017). Efficiency of waste marble powder in controlling alkali–silica reaction of concrete: A sustainable approach. *Construction and Building Materials*, *154*, 590-599. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.002

Mydin, M. A. O., & Wang, Y. C. (2012a). Thermal and mechanical properties of lightweight foamed concrete at elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research*, *64*(3), 213-224.

Mydin, M. A. O., & Wang, Y. C. (2012b). Mechanical properties of foamed concrete exposed to high temperatures. *Construction and Building Materials*, *26*(1), 638-654. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.06.067

Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, *28*(5), 475-480. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.12.001

Nambiar, E. K. K., & Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and Concrete Research*, *37*(2), 221-230. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.009

Nambiar, E. K. K., Ramamurty, K., & Asce, M. (2009). *Shrinkage Behavior of Foam Concrete, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol 21, No 11, 631-636*. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)0899-1561(2009)21:11(631)

Nambiar, E. K., & Ramamurthy, K. (2007). Sorption characteristics of foam concrete. *Cement and concrete research*, *37*(9), 1341-1347.

Niu, D., Su, L., Luo, Y., Huang, D., & Luo, D. (2020). Experimental study on mechanical properties and durability of basalt fiber reinforced coral aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, *237*, 117628. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117628

Okucu, A. (1998). *"Bigadiç ve turna tepe yörelerindeki zeolitik ve perlitik tüflerin puzzolonik özellikleri," Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir,*. http://dspace.balikesir.edu.tr/xmlui/handle/20.500.12462/2626

Olutoge, F. A., & Adesina, P. A. (2019). Effects of rice husk ash prepared from charcoal-powered incinerator on the strength and durability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, *196*, 386-394.

Onprom, P., Chaimoon, K., & Cheerarot, R. (2015). *Influence of Bottom Ash Replacements as Fine Aggregate on the Property of Cellular Concrete with Various Foam Contents,Advances in Materials Science and Engineering*. https://www.hindawi.com/journals/amse/2015/381704/

Ören, O. H., & Gençel, O. (2017). *Köpük Beton, Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, 5, 129-136.* https://docplayer.biz.tr/109293761-Bartin-universitesi-muhendislik-ve-teknoloji-bilimleri-dergisi.html

Özkan, Ş. (2009). *Kimyasal etkilere dayanıklı çimento üretimi üzerine bir araştırma, Yüksek lisans tezi, Yapı Eğitimi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye*. https://docplayer.biz.tr/107911099-T-c-suleyman-demirel-universitesi-fen-bilimleri-enstitusu-kimyasal-etkilere-dayanikli-cimento-uretimi-uzerine-bir-arastirma.html

Öztürk, B. (2006). *"Mermer Sanayisindeki İşletmelerin Üretim ve Pazarlama Sorunlarının Arastırılması"* [Yüksek Lisans Tezi]. Muğla Üniversitesi.

Öztürk, Ö., Çelikkol, M., & Ertan, M. (2007). Türkiye Agrega Sektör Raporu. *Hazır Beton Dergisi, Kasım-Aralık*.

Praveenkumar, T. R., Vijayalakshmi, M. M., & Meddah, M. S. (2019). Strengths and durability performances of blended cement concrete with TiO2 nanoparticles and rice husk ash. *Construction and Building Materials*, *217*, 343-351. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.045

Radonjanin, V., Malešev, M., Marinković, S., & Al Malty, A. E. S. (2013). Green recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, *47*, 1503-1511. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.076

Rahman, M. E., Muntohar, A. S., Pakrashi, V., Nagaratnam, B. H., & Sujan, D. (2014). Self compacting concrete from uncontrolled burning of rice husk and blended fine aggregate. *Materials & Design*, *55*, 410-415. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.10.007

Rai, B. (2012, Haziran 21). *Green Concrete – An Emerging Trend in India*.

Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E. K., & Indu Siva Ranjani, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, *31*(6), 388-396. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006

Safiuddin, Md., West, J. S., & Soudki, K. A. (2010). Hardened properties of self-consolidating high performance concrete including rice husk ash. *Cement and Concrete Composites*, *32*(9), 708-717. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.006

Safiuddin, Md., West, J. S., & Soudki, K. A. (2012). Properties of freshly mixed self-consolidating concretes incorporating rice husk ash as a supplementary cementing material. *Construction and Building Materials*, *30*, 833-842. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.066

Sarıtaş, A. (2006). *Burdur ili mermer sektörünün kurumsal ve ekonomik yapısı*. http://acikerisim.akdeniz.edu.tr/xmlui/handle/123456789/1597

Serin, G., ÇANKIRAN, O., BAŞYİĞİT, C., TAŞ, H. H., & FENKLİ, M. (2007). Normal, Hafif ve Yarı Hafif Beton Blokların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, *3*(1), 15-22.

Shaikh, F. U. A., & Vimonsatit, V. (2016). Effect of cooling methods on residual compressive strength and cracking behavior of fly ash concretes exposed at elevated temperatures. *Fire and Materials*, *40*(2), 335-350. https://doi.org/10.1002/fam.2276

Singh, M., Srivastava, A., & Bhunia, D. (2019). *Analytical and Experimental Investigations on Using Waste Marble Powder in Concrete | Journal of Materials in Civil Engineering | Vol 31, No 4*. https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002631

Singh, N., M., M., & Arya, S. (2018). Influence of coal bottom ash as fine aggregates replacement on various properties of concretes: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *138*, 257-271. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.025

Şapaloğlu, A. (2015). *Pirinç üretim-tüketim zincirinde pazarlama kanallarının yapısı ve pirinç pazarlama marjları, Yüksek lisans tezi, Tarım Ekonomisi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Namık Kemal Üniversitesi, Tekirdağ, Türkiye*. http://acikerisim.nku.edu.tr:8080/xmlui/handle/20.500.11776/772

Şengül, Ö., Ta, M. A., & Gjørv, O. E. (2007). *Puzolanik malzemelerin betonun mekanik özelikleri ve klor iyonu yayınımına etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi Mühendsilik Dergisi, c. 6, sayı 01, ss. 53-64*. 12.

Şentürk, A., Gündüz, L., Tosun, İ. T., & Sarıışık, A. (1996). "Mermer Teknolojisi". *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü*, 242.

Thomas, B. S. (2018). Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material–A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *82*, 3913-3923.

Tosun, A., & Tatar, Ç. (2007). TÜRKİYE'NİN MERMER İHRACATINI ARTIRMA OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, *9*(3), 13-20.

TUMMER. (2013). *(Türkiye Mermer ve Doğaltaş Makine Üreticileri Birliği), "Mermer ve Doğaltaş Atıklarının Ekonomiye Kazandırılması Toplantısı Raporu"*.

Urhan, S. (2000). Temel yapı malzemesi çimentonun öyküsü. *Metalurji-Malzeme Dergisi*, *24*(124), 124.

Ünal, O., & Kibici, A. (2001). *Mermer Tozu Atıklarının Beton Üretiminde Kullanılmasının Araştırılması*. 317-325.

Ünal, O., & Uygunoğlu, T. (2004). Afyon Mermer Tozu ve Soma Uçucu Kül Katkılı Betonların Donma-Çözülme Özellikleri ve Ekonomik Değerlendirilmesi. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 83-88.

Varadharajan, S., Jaiswal, A., & Verma, S. (2020). *Assessment of mechanical properties and environmental benefits of using rice husk ash and marble dust in concrete, Structures 28, 389-406.* https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235201242030480X

Vardhan, K., Siddique, R., & Goyal, S. (2019a). Strength, permeation and micro-structural characteristics of concrete incorporating waste marble. *Construction and Building Materials*, *203*, 45-55. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.079

Vardhan, K., Siddique, R., & Goyal, S. (2019b). Influence of marble waste as partial replacement of fine aggregates on strength and drying shrinkage of concrete. *Construction and Building Materials*, *228*, 116730. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116730

Vilches, J., Ramezani, M., & Neitzert, T. (2012). Experimental investigation of the fire resistance of ultra lightweight foam concrete. *International Journal of Advanced Engineering Applications*, *5*, 15-22.

Vishwakarma, V., & Ramachandran, D. (2018). Green Concrete mix using solid waste and nanoparticles as alternatives – A review. *Construction and Building Materials*, *162*, 96-103. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.174

Wang, H. Y. (2008). The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS. *Cement and Concrete Composites*, *30*(10), 992-999. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.12.003

Yıldız, S., Balaydın, İ., & Ulucan, Z. Ç. (2007). *Pirinç kabuğu külünün beton dayanımına etkisi, Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 19, sayı 1, ss. 85-91*. https://openaccess.firat.edu.tr/xmlui/handle/11508/8321

Yifru, B. W., & Mitikie, B. B. (2020). *Partial replacement of sand with marble waste and scoria for normal strength concrete production, SN Applied Sciences 2(12).* https://link.springer.com/article/10.1007/s42452-020-03716-9

Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X., Wang, J., & Sun, B. (2020). Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete. *Construction and Building Materials*, *241*, 117980. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117980

Zheng, W., Luo, B., & Wang, Y. (2014). Microstructure and mechanical properties of RPC containing PP fibres at elevated temperatures. *Magazine of Concrete Research*, *66*(8), 397-408. https://doi.org/10.1680/macr.13.00232