

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



POLİPROPİLEN LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KÖPÜK
BETONLARDA TABAN KÜLÜNÜN HAFİF AGREGA OLARAK
KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

DUYGU ÖZTÜRK YARAR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

TEMMUZ - 2021

KASTAMONU

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.

DUYGU ÖZTÜRK YARAR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POLİPROPİLEN LİF İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ KÖPÜK BETONLARDA TABAN KÜLÜNÜN HAFİF AGREGA OLARAK KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

DUYGU ÖZTÜRK YARAR

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

DANIŞMAN:DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

Köpük beton, geleneksel betona göre daha yüksek akışkanlığı, azaltılmış ağırlığı, artırılmış ısı ve yangın direnci ve daha düşük maliyeti nedeniyle günümüzde inşaat sektöründe büyük önem kazanmaktadır. Bu çalışma, ince agregalar ve polipropilen lifler olarak taban külü içeren köpük betonun özelliklerinin incelenmesine odaklanmaktadır. Bu amaçla, iki farklı dozajda çimento (300 ve 400 kg/m³), üç farklı dozajda köpük maddesi (40, 50 ve 60 kg/m³) ve üç polipropilen lif içeriği (hacimce %0, 0.5 ve 1), taban külü içeren fiber takviyeli köpük betonun taze, fiziksel, mekanik, termal ve dayanıklılık özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca, yüksek sıcaklığın köpük betonun özellikleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Sonuçlar, köpük içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun görünür porozitesinde, su emmesinde ve kapilaritesinde bir artış olduğunu göstermektedir. Sırasıyla köpük maddesi, çimento ve polipropilen lif içeriğinin artmasıyla köpük betonun ısı iletkenliğinde, gözenekliliğinde ve büzülmesinde bir azalma gözlenir. Yüksek sıcaklık altında, köpük ajan içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun kütle kaybında azalma ve basınç ve eğilme dayanımlarında artış gözlenmektedir. Köpük beton numunelerinin yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra yapılan SEM analizinde, kalsiyum silikat fazlarının ayrıştığını termal gerilmelerden kaynaklanan çatlaklar ve birbirine bağlı gözenekler görülmüştür. Ayrıca yüksek miktarda köpük içeriği, polipropilen lif ve çimento içeriğine sahip köpük betonun donma-çözülme direncinin arttığı belirlenmiştir. Sonuçlar, ince agregalar ve polipropilen lifler olarak taban külü içeren tüm köpük beton karışımlarının, Amerikan Beton Enstitüsü yönergelerine göre orta mukavemetli beton olarak kullanılabilirliğini ve bunun da gelişmiş köpük beton performansı ve sürdürülebilir yapı tasarımına katkı sağlayacağı görülmüştür.

ANAHTAR KELİMELEER:Taban külü, Sürdürülebilirlik, Durabilite, Köpük beton, Yüksek sıcaklık

Temmuz 2021, 64 Sayfa

ABSTRACT

MSC THESIS

UTILIZATION OF BOTTOM ASH AS LIGHTWEIGHT AGGREGATE IN FOAM CONCRETES

DUYGU ÖZTÜRK YARAR

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

SUPERVISOR:DR. ÖĞR. ÜYESİ OĞUZHAN YAVUZ BAYRAKTAR

Foam concrete is gaining a lot of importance in the construction industry nowadays due to its higher flowability, reduced weight, enhanced thermal and fire resistance, and lower cost than traditional concrete. This study focuses on examining the properties of foam concrete having bottom ash as fine aggregates and polypropylene fibers. For this purpose, two different dosages of cement (300 and 400 kg/m³), three different dosages of foam agent (40, 50, and 60 kg/m³), and three polypropylene fiber content (0, 0.5, and 1% by volume of mix) are considered to investigate the fresh, physical, mechanical, thermal and durability properties of fiber-reinforced foam concrete having bottom ash. Furthermore, the effect of elevated temperature on the properties of foam concrete is also studied. Results show an increase in apparent porosity, water absorption, and sorptivity of foam concrete with the increase in foam agent content. A decrease in foam concrete's thermal conductivity, porosity, and shrinkage is also observed with the increase in foam agent, cement, and polypropylene fiber content, respectively. Under elevated temperature, a decrease in mass loss and an increase in compressive and flexural strengths of foam concrete are observed with the increase in foam agent content. Scanning electron microscopic analysis of the foam concrete samples after exposure to the elevated temperature shows the cracks and inter-connected pores due to the thermal stresses by decomposing calcium silicate phases. Furthermore, improved freeze-thaw resistance of foam concrete having high amounts of foaming agent, polypropylene fiber, and cement content is noticed. Results show that all the foam concrete mixes incorporating bottom ash as fine aggregates and polypropylene fibers can be used as moderate-strength concrete following American Concrete Institute guidelines, leading to enhanced foam concrete performance and sustainable construction.

KEYWORDS: Bottom ash, Sustainability, Foam concrete, High temperature, Durability

July 2021, 64 Page

TEŞEKKÜR

Tez alıőmam boyunca danıőmanlıęımı yapan, bilgi birikimiyle alıőmama ıőık tutan ok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Oğuzhan Yavuz BAYRAKTAR'a őükranlarımı sunarım. Tez jürime katılan sayın Prof. Dr. Hasbi YAPRAK hocama ve sayın Dr. Öğr. Üyesi Gökhan KAPLAN hocama teşekkür ederim. Çalıőmam süresince desteklerini hiç esirgemeyen kıymetli aileme minnettarım. Yaptığım tez çalıőmasının, bilim dünyasına yararlı olmasını temenni ederim.

DUYGU ÖZTÜRK YARAR

Kastamonu, 2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEZ ONAYI	ii
TAAHHÜTNAME	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
TABLolar DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	4
2.1 Köpük Beton.....	4
2.1.1 Köpük Ajanı.....	5
2.1.2 Köpük Betonun Özellikleri ve Kullanım Alanları	5
2.2 Taban Külü	7
2.2.1 Taban Külünün Genel Özellikleri.....	8
2.2.2 Taban Külünün Kimyasal Bileşimi.....	9
2.2.3 Taban Külünün Elde Edilmesi	9
2.3 Köpük Beton ve Taban Külü ile ilgili Çalışmalar	12
3. MATERYAL VE METOD	14
3.1 Materyal.....	14
3.1.1 Çimento.....	14
3.1.2 Agrega.....	14
3.1.3 Karışım Suyu	15
3.1.4 Polipropilen Lif	16
3.1.5 Köpük Ajanı.....	16
3.2 Metod.....	17
3.2.1 Köpük Beton Numune Üretimi	17
3.2.2 Taze Özellikler.....	18
3.2.3 Fiziksel Özellikler	19
3.2.4 Mekanik Özellikler	19
3.2.5 Kapilerite Özellikleri	20
3.2.6 Kuruma Büzülmesi	20
3.2.7 MgSO ₄ Dayanıklılığı.....	20
3.2.8 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı	21
3.2.9 Donma Çözülme Dayanıklılığı	21
3.2.10 Isıl İletkenlik	22
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	23
4.1 Taze Hal Özelliklerinin Değerlendirilmesi	23
4.2 Fiziksel Özelliklerin Değerlendirilmesi	24
4.3 Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi	28
4.4 Kapilerite Özelliklerinin Değerlendirilmesi	31
4.5 Kuruma Büzülmesi Özelliklerinin Değerlendirilmesi	32
4.6 Sülfat Dayanıklılığının Değerlendirilmesi	34

4.7	Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı.....	36
4.7.1	Hava Soğutma Sonrasında Kütle Kaybı	36
4.7.2	Su Soğutma Sonrası Kütle Kaybı	38
4.7.3	Hava Soğutma Sonrasında Basınç Dayanımı	39
4.7.4	Su Soğutma Sonrası Basınç Dayanımı	41
4.7.5	Hava Soğutma Sonrası Eğilme Dayanımı	42
4.7.6	Su Soğutma Sonrası Eğilme Mukavemeti	43
4.7.7	Hava Soğutma Sonrası Ultrases Geçiş Hızı.....	45
4.7.8	Su Soğutma Sonrası Ultrases Geçiş Hızı	46
4.7.9	Mikroyapı İncelemeleri.....	47
4.8	Donma-Çözülme Dayanıklılığının Değerlendirilmesi	49
4.8.1	Kütle Kaybı.....	49
4.8.2	Basınç Dayanımındaki Azalma	50
4.8.3	Eğilme Mukavemetinde Azalma	51
4.8.4	Ultrases Geçiş Hızındaki Azalma	52
4.9	Isıl İletkenliklerin Değerlendirilmesi	53
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	56
	KAYNAKLAR	59
	ÖZGEÇMİŞ.....	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2. 1 Taban külü genel görünümü	7
Şekil 3. 1 Taban külünün ve taban külü agregasının görünümü	15
Şekil 3. 2 Polipropilen lif görünümü.....	16
Şekil 3. 3 Yayılma tablasının görünümü.....	19
Şekil 4. 1 Köpük beton karışımlarının işlenebilirliği	24
Şekil 4. 2 Köpük beton karışımlarının kuru birim hacim ağırlıkları.....	25
Şekil 4. 3 Köpük beton karışımlarının poroziteleri	26
Şekil 4. 4 Köpük beton karışımlarının su emmeleri.....	27
Şekil 4. 5 Köpük beton karışımlarının basınç dayanımı	29
Şekil 4. 6 Köpük beton karışımlarının eğilme dayanımları	30
Şekil 4. 7 Köpük beton karışımlarının kapileritesi.....	31
Şekil 4. 8 Köpük beton karışımlarının kuruma büzülmesi.....	33
Şekil 4. 9 Köpük beton karışımlarının sülfat direnci	34
Şekil 4. 10 Sülfat maruziyeti sonrasındaki SEM görüntüleri.....	35
Şekil 4. 11 Hava soğutma tipi sonrasında köpük betonun kütle kaybı	38
Şekil 4. 12 Su soğutma tipi sonrasında köpük betonun kütle kaybı	39
Şekil 4. 13 Hava soğutma tipi sonrasında köpük betonun basınç dayanımları .	40
Şekil 4. 14 Su soğutma tipi sonrasında köpük betonun basınç dayanımları	42
Şekil 4. 15 Hava soğutma tipi sonrasında köpük betonun eğilme dayanımları	43
Şekil 4. 16 Su soğutma tipi sonrasında köpük betonun eğilme dayanımları ...	44
Şekil 4. 17 Hava soğutma tipi sonrası köpük betonun ultrases geçiş hızındaki azalması.....	46
Şekil 4. 18 Su soğutma tipi sonrasında köpük betonun UGH'deki azalması	47
Şekil 4. 19 900 °C sonrası hava ve su soğutma tipi sonrası SEM görüntüleri ..	48
Şekil 4. 20 Köpük beton karışımlarının donma-çözülme sonrası kütle kaybı ..	49
Şekil 4. 21 Köpük beton numunelerinin donma-çözülme sonrası basınç dayanımı azalması	50
Şekil 4. 22 Köpük beton numunelerinin donma-çözülme sonrası eğilme mukavemetindeki azalma	52
Şekil 4. 23 Köpük beton numunelerinin donma-çözülme sonrasında UGH azalması.....	53
Şekil 4. 24 Köpük beton karışımlarının termal iletkenlikleri.....	54

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 2. 1 Köpük beton yoğunlukları ve kullanım alanları	6
Tablo 2. 2 Taban külünün mühendislik özellikleri	8
Tablo 2. 3 Taban külünün kimyasal bileşimi	9
Tablo 2. 4 Türkiye'deki bazı kömür ve linyit yakıtlı santrallere ait bilgiler	10
Tablo 3. 1 Cem I 42.5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri	14
Tablo 3. 2 Taban külünün kimyasal özellikleri.....	15
Tablo 3. 3 Karışım ve kürde kullanılan suyun özellikleri.....	16
Tablo 3. 4 Polipropilen lifin teknik özellikleri.....	16
Tablo 3. 5 Karışım oranları (kg/m ³).....	17

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

kg	: Kilogram
cm	: Santimetre
µm	: Mikrometre
g	: Gram
Na₂SO₄	: Sodyum sülfat
°C	: Santigrat derece

Kısaltmalar

DKY	: Doygun kuru yüzey
UGH	: Ultrases geçiş hızı
vd.	: ve diğerleri
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
ASTM	: American Society For Testing and Materials
ACI	: American Concrete Institute

1. GİRİŞ

Son birkaç on yılda, köpük beton inşaat endüstrisinde büyük önem kazanmıştır (Serin vd. 2007). Yüksek akışkanlık, hafiflik, geliştirilmiş ısı performans, yüksek yangın dayanımı ve düşük maliyet, köpük betonun geleneksel betona göre üstün özellikleridir (Altera vd. 2020; Bodur vd. 2021). Köpük beton, çeşitli Asya ve Avrupa ülkelerinde etkin bir şekilde kullanılan optimize edilmiş ve yenilikçi bir inşaat teknolojisidir (Landva ve Clark, 1990). Çimento, dolgu, köpük ve su içeren hafif bir betondur (Tuzlak, 2017). Geleneksel betonun aksine, herhangi bir iri agrega içermez ve bina bölmeleri, yol bentleri ve dolgu dereceleri dahil olmak üzere çeşitli uygulamalara sahiptir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007).

Genellikle gözenekli beton, hava sürükleyici maddeler veya hafif agregalar kullanılarak geliştirilir (Bodur vd. 2021). Ancak köpük beton, taze çimento hamuru veya harcı içerisine köpürtücü madde formunda prefabrik köpüğün eklenmesiyle üretilir (Ören, 2017; Ramamurthy vd. 2009). Köpürtücü ajan, sertleştirilmiş köpük beton hacminin %10-90'ını işgal etmek için hava ile doldurulmuş gözeneklere sahip kritik bileşendir (Davraz vd. 2015; Serin vd. 2007). Hava gözeneklerinin dağılımı, şekli, içeriği ve yapısı, köpük betonun mekanik ve dayanıklılık performansını doğrudan etkileyen köpük ajanı, çimento veya harç macununun özelliklerine ve macun ile köpürtücü ajanın etkileşimine bağlıdır (Bekaroğlu, 2012; Davraz vd. 2015). Sentetik ve protein bazlı köpürtücü maddeler, köpük beton üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Ören, 2017; Valore, 1954). Ancak saponinler, yapıştırıcı reçineler ve deterjanlar da bu bağlamda tüketilebilir (Bodur vd. 2021). Protein bazlı köpürtücü ajanlar güçlü bir gözenek yapısı geliştirir ve köpük betonun sentetik köpürtücü ajanlardan daha iyi basınç dayanımı ile sonuçlanır (Dakman, 2017).

Son zamanlarda, sürdürülebilirlik inşaat sektörünün önemli bir yönü haline geldi. Sonuç olarak, yüksek performanslı, sürdürülebilir yapı malzemelerine büyük bir talep var (Çobanlı, 1993). Farklı araştırmacılar sürdürülebilir köpük beton geliştirmeye çalıştı (ACI Committee 226, 1987; Toprak, 2011). Ören, (2017), köpük beton üretmek için ince agrega olarak granüle yüksek fırın cürufu kullanmıştır. Kontrol köpük

betonuna göre 0,68 su/bağlayıcı oranında %100 granüle yüksek fırın cürufu içeren köpük beton için daha düşük ısı iletkenlik, kütle yoğunluğu ve daha yüksek basınç dayanımı ile gözeneklilik gözlemlenmiştir (Ören, 2017). Benzer şekilde, Bayraktar vd. (2020), herhangi bir lif içermeyen kontrol köpük betona kıyasla, %2 bazalt lifli (çimento ağırlığına göre) ve %100 atık mermer tozuna (ince agrega olarak) sahip köpük betonun basınç dayanımında %135 artış bildirmiştir. Köksal vd. (2012) ve Gencel vd. (2014) ayrıca köpük beton üretiminde ince agregalar olarak genişletilmiş vermikülit tozu ve geri dönüştürülmüş beton atıkları ve çimento ikamesi olarak silis dumani ve uçucu kül kullandıktan sonra köpük betonun özelliklerini iyileştirdiğini gözlemlemiştir.

Son birkaç yılda endüstriyel atık üretimi endişe verici bir düzeye çıkmıştır (Nadig vd. 2015; Yıldırım, 2007). Bu nedenle, çeşitli çalışmalar endüstriyel atıkların inşaat malzemeleri olarak geri dönüştürülmesine odaklanmaktadır (Bayraktar, 2020; Yüksel vd. 2006). Alt kül, kömürle çalışan elektrik santrallerinden üretilen en çok üretilen endüstriyel atıklardan biridir (Yaprak ve Kaplan, 2013). Arsenik ve çeşitli ağır metalleri içerir ve çevreye ve canlı organizmalara çok zararlı olduğu kabul edilir. Kim ve Lee, yüksek dayanımlı beton üretiminde ince ve iri agrega olarak taban külünün kullanımını araştırmış ve elde edilen betonun basınç dayanımı üzerinde belirgin bir etki olmadığını bildirmiştir (Kim ve Lee, 2011). Benzer şekilde Muthusamy vd. (2020), betonda kum yerine taban külü kullanımını gözden geçirdi. Sonuçlar, daha yüksek bir taban külü oranı için daha düşük basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve betonun elastisite modülünün gözlemlendiğini göstermektedir (Muthusamy vd. 2020). Bununla birlikte, ince agrega olarak taban külünün eklenmesi, termal performansı ve betonun kuruma büzülmesine ve klorür penetrasyonuna karşı direncini artırır (Muthusamy vd. 2020).

Bu çalışma, ince agrega olarak taban külü içeren köpük betonun özelliklerinin incelenmesine odaklanmaktadır. İnce agregalar olarak taban külü içeren köpük betonla ilgili mevcut literatürde sınırlı çalışma mevcuttur. Bu nedenle literatürdeki bu boşluğu doldurmak için detaylı bir deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Genel olarak, köpük beton daha yüksek büzülme gösterir (Gencel vd. 2021b). Bu nedenle, köpük betonun büzülmesinin üstesinden gelmek için bu çalışmada polipropilen lifler de

kullanılmıştır. Daha önce, çeşitli araştırmacılar köpük beton özelliklerini geliştirmek için polipropilen ve diğer lif türlerini kullandılar (Gencel vd. 2021b). Bu makale, taban külü ve polipropilen liflere sahip köpük betonun taze, fiziksel, mekanik ve dayanıklılık özelliklerini araştırmaktadır. Ayrıca, yüksek sıcaklığın köpük betonun özellikleri üzerindeki etkisi de incelenmiştir. Köpük beton üretiminde taban külü ve polipropilen liflerin kullanılması, sürdürülebilirliğin sağlanmasına yardımcı olur ve köpük betonun performansını artırır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Köpük Beton

Hafif betonun bir türü olan köpük beton, hücreli veya gözenekli beton olarak da adlandırılmaktadır. Köpük beton, çimento, su ve agrega karışımına köpük ajanı yardımıyla oluşturulan köpüğün ilavesi ile oluşmaktadır. Yapısında hacminin %75-80 oranında birbirinden bağımsız kapalı gözenekler bulunmaktadır. Köpük beton, yapılarda iç ve dış duvar imatları ve yapı zeminlerde uygulanan tesviye imatları yerine kullanılması öngörülen hafif, ısı ve ses yalıtımını sağlayan alternatif bir yapı ve yalıtım malzemesidir (Tuzlak, 2017).

Köpük beton ilk olarak 1914 yılında Aylsworth ve Dyer tarafından daha sonra 1923'te Bayern ve Erikson tarafından patenti alınmıştır. Ancak 21. yüzyılın başlarında hafif bir yapı malzemesi olarak kullanımı yaygınlaşmaya başlamıştır (Nambiar ve Ramamurthy, 2006). Jones ve McCarthy, 2005 yılında köpük beton tarihçesini, yangın dayanımı, ısıl iletkenlik ve akustik özelliklerini araştırmışlardır. Ayrıca dünya üzerinde yapılmış olan çalışmalar üzerine değerlendirmelerde bulunmuşlardır. Yangın dayanımı, ısı iletkenlik ve akustik özellikleri üzerine görüşlerini bildirmelerine rağmen köpük betonun taze beton özellikleri, durabilitesi ve hava boşluğu sistemi gibi konularla ilgili oldukça sınırlı bilgi vermişlerdir (Jones ve McCarthy, 2005).

Köpük jeneratörü yardımıyla üretilen karakteristik (kararlı) köpüğün beton harcın içerisine homojen bir şekilde karıştırılması ile elde edilen gözenekli yapıya sahip hafif beton türüdür. Köpük beton, hafif agrega kullanılarak üretilen betonlarla karıştırılmamalıdır. Üretim sırasında kimyasal reaksiyon olarak sadece çimentonun hidratasyonu gerçekleşmektedir. Sıva, şap, blok harcı ve betonarme betonu olarak kullanılmaktadır. İçerisinde çimento ve agrega haricinde malzeme bulunmamaktadır. Köpük yapımında kullanılan köpük ajanı tamamen doğal bir malzeme olup insan sağlığına hiçbir şekilde zarar vermemektedir (Gencel vd. 2021a).

2.1.1 Köpük Ajanı

Köpük ajanı, beton içerisine hava sürüklemek amacıyla köpük kabarcıklarının elde edilmesini sağlayan köpüğün ana malzemesidir. Köpük ajanı, içerdiği milyonlarca 0-2mm boyutlarındaki hava kabarcıkları sayesinde farklı yoğunluklarda ve yalıtım özelliklerinde beton harç üretimi gerçekleştirmektedir (Tuzlak, 2017).

Köpük ajanları, beton üretiminde iki farklı yöntemle kullanılmaktadır. Birinci yöntemde köpük ajanında elde edilen köpük, harca ilave edilerek beton üretimi yapılmaktadır. Diğer yöntemde ise köpük ajanı harca, harç yapım esnasında ilave edilip köpük oluşturulmaktadır (Nambiar ve Ramamurthy, 2007; Ören, 2017).

- Organik ajanlar
- Bitkisel esaslı
- Reçine esaslı
- Protein (kan, keratin vb.) esaslı olmak üzere üç türü bulunmaktadır.
- Sentetik ajanlar

Kimya sektöründe deterjan olarak kullanılan kimyasal maddelerden üretilen çözücü esaslı ajanlardır (Bayraktar vd. 2021; Tuzlak, 2017).

2.1.2 Köpük Betonun Özellikleri ve Kullanım Alanları

Köpük beton, köpük ajanı kullanılarak oluşturulan köpüğün harç içerisinde hava boşlukları meydana getirerek hafif beton olarak da adlandırılan çimento harcıdır. Düşük birim hacim ağırlık, çok az miktarda agrega kullanımı, yüksek akışkanlık, düşük dayanım ve çok iyi ısı ve ses yalıtımı özelliklerine sahiptir. Köpük miktarı ayarlanarak 400-1000 kg/m³ aralığında birim hacim ağırlığına sahip köpük beton üretimi yapılmaktadır. Köpük beton; oda bölmesi, yalıtım malzemesi, dolgu ve taşıyıcı duvar gibi birçok amaç için kullanılmaktadır (Bekaroğlu, 2012; Valore, 1954).

Köpük beton, yapısında bulunan boşluk miktarına bağlı olarak yoğunluğunda değişiklikler göstermektedir(Gencel vd. 2021b) .Yoğunluğu düşük köpük beton, yüksek yalıtım özelliklerine ve düşük dayanım değerlerine sahipken, yoğunluğu yüksek köpük beton, daha düşük yalıtım özelliklerine ve yüksek dayanım değerlerine sahiptir. Köpük beton, üretiminde kullanılan malzemelerin yoğunluğu ve yapısına bağlı olarak normal yoğunluktaki betondan %10-50 daha düşük bir ısı iletkenlik katsayısına sahiptir (Ramamurthy vd. 2009).

Köpük beton, yoğunluğa bağlı olarak yapıların iç ve dış duvarlarında ve zeminlerde kullanılan yapı elamanlarının (tuğla, bims, tesviye betonu (şap), sıva, dış cephe mantolama ve süs malzemeleri vb.) yerine kullanılmaktadır. Bünyesinde doğal agrega, çimento ve köpük haricinde malzeme bulunmayan hafif, ısı ve ses yalıtım değerleri uygun ve üretim maliyetleri düşük bir yapı malzemesidir (Tuzlak, 2017).

Yoğunluğuna ve kullanım alanlarına göre sınıflandırılarak Tablo 2.1’de verilmiştir (Tuzlak, 2017).

Tablo 2. 1 Köpük beton yoğunlukları ve kullanım alanları (Tuzlak, 2017)

No	Yoğunluk kg/m ³	Kullanım Alanları
1	400-600 kg/m ³	Isı ve ses yalıtımı (Tavan ve yer döşemesi)
2	600-900 kg/m ³	Blok ve panel üretimi
3	900-1200 kg/m ³	Dış ve ana duvar, blok ve panel üretimi
4	1200-1600 kg/m ³	Taşıyıcı özellikli duvar, blok ve panel üretimi

Köpük betonun son yıllarda kullanım alanları aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

- Isı yalıtımlı hafif beton üretiminde
- Isı yalıtımlı hafif tuğla, blok tuğla, bims ve duvar panel üretiminde
- Isı ve ses yalıtımlı şap üretiminde
- Çimento ve alçı esaslı hafif plaka üretiminde

- Isı yalıtımlı hafif kiremit ve seramik üretiminde
- Yapılarda bodrum kat, ısı yalıtım amaçlı toprak altı dolgu betonu olarak
- Yapı etrafında oluşabilecek çökmeleri önlemek için hafif dolgu betonu olarak
- Toprak altı su drenajı amaçlı gözenekli dolgu betonu olarak
- Köprü ve köprü yolunda buzlanmayı önlemek amacıyla yol altı dolgu betonu
- Tünel ve kuyu dolgu amaçlı hafif beton üretiminde
- Perlitli sıva ve perlitli hafif beton üretiminde
- Prefabrik bina üretiminde kullanılır (Tuzlak, 2017).

2.2 Taban Külü

Taban külü, fırınların tabanından toplanan kaba, granüle ve yanmaz yanma ürünüdür. Termik santralde üretilen, gözenekli bir yapıya sahip olan taban külünün içeriğini ağırlıklı olarak SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 ve CaO bileşikleri oluşturur (Huang ve Lovell, 1990). Çoğu taban külü kömürle çalışan elektrik santrallerinde üretilmektedir. Ülkemizde 42 termik santral kömürle çalışmaktadır ve bu santraller her yıl yaklaşık 20 milyon ton kül açığa çıkar maktadır. Bu küllerinde %75-80'i uçucu kül, %20-25'i taban külüdür (Özkan vd. 2007). Taban külünün genel görünümü Şekil 2.1.'de verilmiştir.



Şekil 2. 1 Taban külü genel görünümü (Singh ve Siddique, 2014)

2.2.1 Taban Külünün Genel Özellikleri

Taban külleri çok gözenekli, boyutları ince agrega boyutları arasında yer almaktadır. Yani boyutları 1 mm ile 15 mm arasında değişmektedir. Taban külünün özgül ağırlığı Fe_2O_3 içeriğine göre artışlar göstermektedir (Singh ve Siddique, 2014). Tablo 2.2’de bazı mühendislik özellikleri gösterilmektedir.

Tablo 2. 2 Taban külünün mühendislik özellikleri (Singh ve Siddique, 2014)

Tane özgül ağırlığı	21-27
Kuru birim hacim ağırlık (kn/m^3)	7,2-16
Plastisite	-
Su emme (%)	0,8-2,0
Permeabilite katsayısı (cm/s)	2,5x0,01-9,4x0,01
Optimum nem içeriği (%)	13,8-26,2
Boşluk oranı (n)	0,66-1,05

Taban külünün kullanım alanları;

- Agrega
- Gürültü bariyerleri
- Temel malzemesi
- Yol inşası
- Sanat malzemeleri

Ayrıca çimento ile karıştırılarak yalıtımlı yol yapımında kullanılabilir. Taban külünün beton atıkları ve metallerle kimyasal olarak birleşimi izolasyon sağlar (Yüksel ve Bilir, 2007).

2.2.2 Taban Külünün Kimyasal Bileşimi

Taban külü; silis, demir, magnezyum, kalsiyum, alüminyum oksit ve sülfat içermektedir. Taban külünün kimyasal bileşimi kömürün cinsine ve yanma sıcaklığına göre değişmektedir (Kim ve Lee, 2011). Tablo 2.3'te taban külünün kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 2. 3 Taban külünün kimyasal bileşimi (Kim ve Lee, 2011)

Bileşikler	Taban Külü
CaO	%0-22
SiO ₂	%21-60
Al ₂ O ₃	%10-37
Fe ₂ O ₃	%5-37
MgO	%0-4
SO ₃	-

Ayrıca taban külünün bileşiminde titanyum, fosfor, berilyum, yanmamış karbon ve mangan da çok az miktarda bulunabilmektedir (Albuquerque vd. 2011; Binici vd. 2008).

Taban külü bazı durumlarda çürütücü özellik gösterebilmektedir. Taban külünün çürütücü özelliğini tespit etmek için pH, elektrik direnci, çözünebilir klorür ve sülfat içeriği incelenmelidir. Yani pH değeri 5,5'tan fazla, elektrik direnci 1500 ohm-santimetreden fazla, çözünebilir klorür içeriği 200 ppm'den az ve çözünebilir sülfat içeriği 1000 ppm'den az olması gerekir (Kim ve Lee, 2011). Tablo 3 incelendiğinde SiO₂ oranı oldukça yüksektir. Bu nedenle, sıkıştırma işlemlerinde iyi bir sıkışmanın elde edilmesinde problem ortaya çıkmaktadır (Özkan vd. 2007).

2.2.3 Taban Külünün Elde Edilmesi

Taban külleri termik santraller ve atık yakma tesislerinde oluşmaktadır. Türkiye'de 42 kömür ve linyit yakıtlı santral bulunmaktadır ve kurulu gücü 20.323 MWe'dır. Yıllık elektrik üretimi yaklaşık 106.464 GWh'dır. Bazı santrallere ait bilgiler Tablo 2.4.'te gösterilmiştir (URL-1).

Tablo 2. 4 Türkiye'deki bazı kömür ve linyit yakıtlı santrallere ait bilgiler (URL-1)

No	Santral Adı	İl	Firma	Yakıt Tipi	Kurulu Güç (MW)
1	Zonguldak Eren (ZETES)	Zonguldak	Eren Enerji	İthal Kömür	2.790 MW
2	Afşin-Elbistan B Termik Santrali	Kahramanmaraş	EÜAŞ	Linyit	1.440 MW
3	Afşin-Elbistan A Termik Santrali	Kahramanmaraş	Çelikler Enerji	Linyit	1.355 MW
4	Cenal Karabiga Termik Santrali	Çanakkale	Alarko Enerji	İthal Kömür	1.320 MW
5	İSKEN Sugözü Termik Santrali	Adana	Steag Enerji	İthal Kömür	1.308 MW
6	İÇDAŞ Bekirli Termik Santrali	Çanakkale	İÇDAŞ Elektrik	İthal Kömür	1.200 MW
7	İskenderun Atlas Termik Santrali	Hatay	Diler Holding Enerji Grubu	İthal Kömür	1.200 MW
8	Soma B Termik Santrali	Manisa	Konya Şeker Enerji	Linyit	990 MW
9	Kemerköy Termik Santrali	Muğla	Limak Enerji	Linyit	630 MW
10	Yatağan Termik Santrali	Muğla	Yatağan Termik Enerji Üret	Linyit	630 MW
11	Çayırhan Termik Santrali	Ankara	Ciner Enerji	Linyit	620 MW
12	Seyitömer Termik Santrali	Kütahya	Çelikler Elektrik	Linyit	600 MW

Tablo 2.4'ün devamı

13	Soma Kolin Termik Santrali	Manisa	Kolin Enerji	Linyit	510 MW
14	Kangal Termik Santral	Sivas	Konya Şeker Enerji	Linyit	457 MW
15	Tufanbeyli Termik Santrali	Adana	Enerjisa Elektrik	Linyit	450 MW
16	Yeniköy Termik Santrali	Muğla	İC İctaş Enerji	Linyit	420 MW
17	İÇDAŞ Biga Termik Santral	Çanakkale	İÇDAŞ Elektrik	İthal Kömür	405 MW
18	Silopi Termik Santral	Şırnak	Ciner Enerji	Asfaltit	405 MW
19	İzdemir Enerji Aliğa Termik Santrali	İzmir	İzmir Demir Çelik	İthal Kömür	370 MW
20	Tunçbilek Termik Santrali	Kütahya	Çelikler Enerji	Linyit	365 MW

Ülkemizde kömürle çalışan santrallerin 13'ünde yaklaşık olarak yılda 4 milyon ton taban külü elde edilmektedir (Yüksel vd. 2011). Taban külleri TS EN 450-1 standartına uygun olmadığından kül dağları ve barajlarda depolanmaktadır. Buralarda depolanan küller çevreye zarar vermektedir. Ayrıca depolanması yüksek masraflara sebep olmaktadır (Valcuende vd. 2015; Yüksel vd. 2011).

Çimento ve beton üretiminde taban külü kullanmanın faydaları şöyle sıralanabilir (Maier ve Durham, 2012):

- Stok sahasının ömrü uzar.
- Yer altı suyu korunmuş olur.
- Hava kirliliği önlenmiş olur.

2.3 Köpük Beton ve Taban Külü ile ilgili Çalışmalar

Dakman tarafından yapılan çalışmada farklı oranlarda köpük ajanı kullanarak hazırlanmış olduğu köpük beton numunelerine yüksek sıcaklık uygulayarak dayanım olarak en iyi değere ulaşmayı amaçlamıştır. Hazırlanan numuneler 28 gün kür havuzunda tutularak 20, 100, 400 ve 700°C olarak belirlenmiş sıcaklıklarda 3 saat bekletilmiştir. Belirlenen sıcaklıklarda bekletilen numuneler 1 gün (24 saat) soğumaya bırakılmıştır. Numunelerin birim ağırlıkları, basınç dayanımları ve ultra ses geçiş süreleri hesaplanmıştır. Daha sonra EDS analizi ve SEM ile mikro yapıları incelenmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda, köpük solüsyonu oranı arttıkça basınç dayanımının, ultra ses geçiş hızının ve elastisite modülünün azaldığı gözlemlenmiştir. 100°C'ye kadar sıcaklığa maruz kalan numunelerde büzülmeden kaynaklı hacimsel küçülmeler meydana gelirken, 100°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda mikro çatlaklar oluşumu nedeniyle boşluk hacimde artış olduğu anlaşılmıştır (Dakman, 2017).

Ören tarafından yapılan çalışmada çimento dozajı ile yüksek fırın cürufunu farklı oranlarda kullanılarak köpük beton numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere fiziksel ve mekanik deneyler uygulanmıştır. Deneyler sonucunda numunelerin birim hacim ağırlıkları 926–1132 kg/m³, basınç dayanımları 1–1,62 MPa ve ısı iletkenlik katsayıları 0,208 –0,264 W/mK aralığında tespit edilmiştir. Köpük beton üretiminde, çimento dozajında artışa gerek görülmediği ve kum yerine yüksek fırın cürufu kullanılması uygun bulunmuştur (Ören, 2017).

Tuzlak tarafından yapılan çalışmada agreganın miktarı ve dane boyutları sabit bırakılarak su/çimento oranında, köpük ajanı ve çimento miktarında değişiklik yapılarak köpük beton üretilmiştir. Üretilen numunelerde, numunelerin reolojisini, dayanım ve ısı iletkenliği özellikleri incelenmiştir. Dayanım ve ısı iletkenlik deneyleri sonucunda elde edilen değerlerin birim hacim ağırlıkla ilişkili olduğu ve numunelerin reoloji özelliklerinin Herschel-Bulkley modeline uygun olduğu saptanmıştır (Tuzlak, 2017).

Atabey tarafından yapılan çalışmada mermer tozu, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi sanayi atıklarını hammadde olarak kullanılarak köpük beton blokları üretilmiştir.

Bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42,5 R tipi Portland çimento ve polipropilen elyafını da çimento bağlayıcının %0,5'ine denk gelecek şekilde kullanmıştır. Köpük beton bloklarının üretimi sırasında ön köpük metodu tercih edilmiştir. Köpük yoğunluk ölçümlerini köpük makinesinde ürettikten sonra karışıma ilave edilmiştir. Karışımda bulunan tüm bileşenler karışıma eklendikten sonra mekanik yöntemler uygulanarak karışım hazırlanmıştır. 15x15x15 cm boyutlarındaki kalıplar kullanılarak numuneler elde edilmiştir. Numunelerin ısı iletkenlik değerleri 0,14 – 0,20 W/mK arasında elde edilmiştir. Elde edilen değerlerin ticari amaçla hazırlanan gaz betonlarla aynı olduğu saptanmıştır. Mermer tozu kullanılıp hazırlanan numunelerde rötre değerleri % 0.09 iken rötre değerinin maksimum olduğu değer filler olarak tamamen uçucu kül kullanılan numunelerde olup %0,11 değeri elde edilmiştir. Numunelerin basınç dayanım değerleri ise 1,60 MPa – 4,35 MPa arasında bir değer almaktadır (Atabey, 2018).

Yıldırım tarafından yapılan çalışmada Nevşehir bims agregası ve uçucu kül kullanarak hafif beton üretimi ve üretilen betonların farklı agresif ortamlardaki dayanım özelliklerini incelemiştir. Ayrıca geliştirilen deneyler sonucunda beton dozajının ve beton yaşının da dayanım özelliklerine etkisini incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda, beton üretiminde dozaj artırımının beton dayanımını da artırdığını gözlemlemiştir. Agresif ortam şartlarına bakıldığında tuzlu suda kürlenmiş numunelerin dayanımları normal şartlarda kürlenmişlere göre %12, asidik suda kürlenmiş numunelerin dayanımları da normal şartlarda kürlenmişlere göre %17 azaldığını gözlemlemiştir (Yıldırım, 2007).

Yüksel tarafından yapılan çalışmada taban külünün briket yapımında ince agrega olarak kullanılmasını araştırmıştır. Çalışmada taban külü ile kumun deneysel olarak yer değiştirmesi sağlanmıştır. Üretilen numunelerde taban külünün basınç dayanımı ve donmaya karşı dayanıklılığı düşürdüğü tespit edilmiştir. Aynı zamanda yapı ağırlığını düşürdüğü tespit edilmiştir (Yüksel vd. 2011).

3. MATERYAL VE METOD

3.1 Materyal

3.1.1 Çimento

Bu çalışmada, çimento esaslı kompozitleri üretmek için TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42,5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 1 Cem I 42.5 R çimentosunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal özellikler (%)		Fiziksel özellikler	
CaO	64,4	Özgül Ağırlık	3,13
SiO ₂	19,6	Priz baş. süresi (dk.)	90
Al ₂ O ₃	5,5	Priz sonu süresi (dk.)	145
Fe ₂ O ₃	2,9	Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3300
MgO	2,1		
SO ₃	2,7		
Cl	<0,01		
Kızdırma Kay.	2,1		

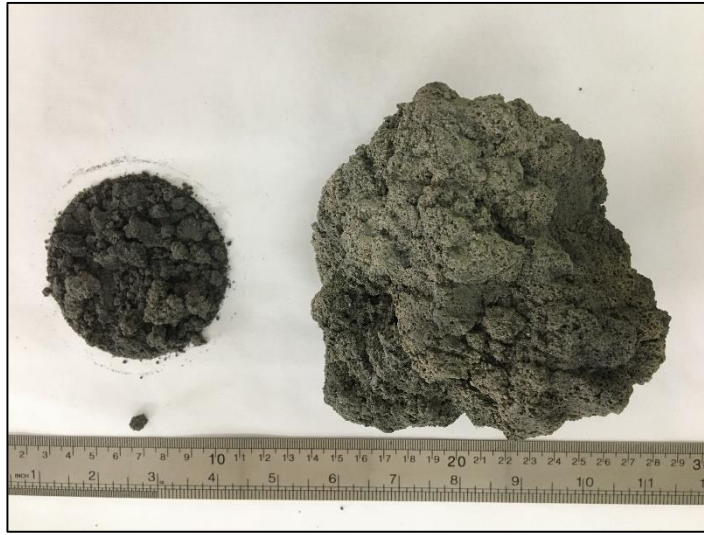


3.1.2 Agregat

Bu çalışmada, çimento esaslı kompozitleri üretmek için Zonguldak ilinde faaliyet gösteren termik santralden temin edilen taban külü, konkasörde kırılıp 2 mm çapındaki elekten elenerek hafif agregat olarak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan taban külünün kimyasal analizi Tablo 3.2’de gösterilmektedir. Taban külünün genel görünümü Şekil 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3. 2 Taban külünün kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşim	% Ağırlık
SiO ₂	58
Al ₂ O ₃	22,91
Fe ₂ O ₃	3,97
K ₂ O	0,55
MgO	2
Na ₂ O	0,54
TiO ₂	1,37
CaO	4,2
P ₂ O ₅	0,2
SO ₃	0,38



Şekil 3. 1 Taban külünün ve taban külü agregasının görünümü

3.1.3 Karışım Suyu

Karışımın üretimi ve kürlenme sürecinde Kastamonu Üniversitesi kampüsündeki içilebilir nitelikte, betona zararlı olabilecek organik madde ihtiva etmeyen ve sıcaklığı $20\pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında TS-EN 1008 standartlarına uygun şebeke suyu kullanılmıştır. Karışım ve kür de kullanılan suyun özellikleri Tablo 3.3'de verilmiştir.

Tablo 3. 3 Karışım ve kürde 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	

3.1.4 Polipropilen Lif

Bu çalışmada, çimento esaslı kompozitleri üretmek için polipropilen lif kullanılmıştır. Üretici firmadan temin edilen life ait teknik özellikler Tablo 3.4'te belirtilmiştir. Polipropilen lifin görünümü Şekil 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 4 Polipropilen lifin teknik özellikleri

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Yumuşama Noktası (°C)	Erime Noktası (°C)	Özgül Yoğunluk (kg/l)	Görünüm	Fiber Uzunluğu (mm)
Polipropilen	350	140	165-170	0,91	Doğal Beyaz	19



Şekil 3. 2 Polipropilen lif görünümü

3.1.5 Köpük Ajanı

Bu çalışmada, çimento esaslı kompozitleri üretmek için protein esaslı bir köpük ajanı kullanılmıştır. Üretilen köpük yoğunluğu yaklaşık olarak 120 g/l'dir.

3.2 Metod

3.2.1 Köpük Beton Numune Üretimi

Bu çalışmada çimento esaslı kompozitler Kastamonu Üniversitesi Meslek Yüksek Okulu İnşaat Atölyesinde hazırlanmıştır. Numuneler Tablo 3.5'te gösterildiği gibi 300-400 kg/m³ oranlarında çimento, 40-50-60 kg/m³ köpük, 0-0,5-1 oranında polipropilen lif değişkenleri ile Tablo 3.5'te gösterildiği malzeme miktarları ile toplamda 18 seri üretim yapılmıştır. Bunlardan 7 ve 28. gününde basınç dayanımına bakılması için 6 adet 40*40*160 mm prizma numune, 300-600-900°C su soğutma tipi için 9 adet ve hava soğutma tipi için 9 adet olmak üzere yüksek sıcaklık için 18 adet 40*40*160 mm prizma numune, 200 döngü donma-çözülme deneyi için 3'şer adet 40*40*160 mm numune, kuruma büzülmesi için 3'şer adet 25*25*285 mm numune, Na₂SO₄ içerisinde büzülme deneyi için 3'şer adet 25*25*285 mm numune, kompozitlerin su emme, porozite, birim hacim ağırlık, kapiler su işlemesi verilerini elde etmek için 3'er adet 50*50*50 mm numune, ısı iletkenlik katsayılarını belirlemek için 3'er adet 20*30*50 mm numune dökülmüştür.

Tablo 3. 5 Karışım oranları (kg/m³)

Karışım No	Çimento	Taban Külü (Agrega)	Su	Köpük	Polipropilen Lif
M1		860,9			0
M2		850,2		40	4,6
M3		839,4			9,1
M4		681,8			0
M5	300	671,1	171	50	4,6
M6		660,3			9,1
M7		502,6			0
M8		491,8		60	4,6
M9		481,1			9,1
M10		670,1			0
M11		659,4		40	4,6
M12		648,6			9,1
M13		491,1			0
M14	400	480,2	228	50	4,6
M15		469,5			9,1
M16		311,8			0
M17		301,0		60	4,6
M18		290,2			9,1

Taze haldeki kompozitlerin üretimi Tablo 3.5'te yer alan karışım hesaplarına göre aşağıdaki işlem sırası ile yapılmıştır.

- Çimento ve hesaplanan karışım suyu kullanılan karıştırıcı yardımıyla düşük hızda 1 dakika ardından yüksek hızda 1 dakika olarak karıştırılmıştır.
- Hazır hale gelen çimento pastası 1 dakika dinlendirilmiştir.
- Hazırlanan köpük pastaya eklenerek 1'er dakika düşük ve yüksek hızda karıştırılmıştır.
- Taban külü agregası karışıma ilave edilerek 1'er dakika düşük ve yüksek hızlarda karıştırılmıştır.
- Polipropilen lifi karışıma ilave ederek 1'er dakika düşük ve yüksek hızda karıştırılmıştır.
- Karıştırma işleminin tamamlanmasının ardından işlenebilirliğinin belirlenmesi amacıyla yayılma tablası kullanılarak yayılma çapı ölçülmüştür.
- İşlemleri tamamlanan karışım belirlenen kalıplara yerleştirilmiştir.

3.2.2 Taze Özellikler

Elde edilen taze haldeki kompozitlerin işlenebilirliğinin belirlenmesi için yayılma çapları ASTM C 1437 standartına göre X ve Y doğrultusunda ölçülerek tespit edilmiştir. Taze haldeki kompozitlerin yayılma çaplarını ölçmek için Şekil 3.3'te verilen yayılma tablası kullanılmıştır.



Şekil 3. 3 Yayılma tablasının görünümü

3.2.3 Fiziksel Özellikler

Çimento esaslı kompozitlerin fiziksel özelliklerini belirlemek amacıyla ASTM C 642 standartına uygun olarak 50*50*50 mm boyutlu küp numuneler ile arşimet deneyi yapılmıştır. Taze haldeki kompozit belirtilen boyutlardaki küp kalıplara 2 tabaka halinde ve vibratör masası ile yerleştirilerek kalıplanan numuneler 24 saat sonrasında kalıptan çıkarılmıştır. Kalıptan çıkarılan numuneler 28 boyunca su kürüne tabi tutulmuştur. Belirlenen kütleme süresi sonunda arşimet terazisi yardımı ile su içindeki ağırlığı ölçülmüştür. Daha sonrasında sudan çıkarılan numuneler bez ile kurularak DKY elde edilmiş ve terazi ile ağırlığı ölçülmüştür. Su içindeki ağırlığı ve DKY ağırlığı belirlenen numuneler 3 gün boyunca 50 °C (±5°C) fanlı etüvde bekletilerek etüv kurusu haline gelmesi sağlanmıştır. 3.günün sonunda etüv kurusu halindeki numunelerin ağırlığı ölçülmüştür.

3.2.4 Mekanik Özellikler

Çimento esaslı kompozitlerin 40*40*160 mm kalıplara iki tabaka halinde ve vibratör masası yardımıyla kalıplanan numuneler 24 saat sonrasında kalıptan çıkarılarak numuneler belirlenen günlerde su kürüne tabi tutulmuş sonrasında günü geldiğinde oda sıcaklığında bekletilerek kuruması beklenmiş sonunda ise EN 196-1 standartına uygun olarak eğilme basınç testlerine tabi tutulmuştur. İlk olarak atölyede bulunan makine yardımı ile 3 noktalı eğilme dayanımı deneyi gerçekleştirilmiştir. Eğilme testi yapılan numuneler yine aynı makine yardımı ile basınç testine tabi tutulmuştur. Kompozitlerin 7. ve 28.gün eğilme basınç testleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.5 Kapilerite Özellikleri

Çimento esaslı kompozitlerin su işleme derinliklerinin bulunabilmesi için ASTM C 1585 standartına göre 50*50*50 mm boyutlu küp numuneleri kullanılarak kapilerite deneyi yapılmıştır. 28 gün boyunca su küründe bekletilen numuneler su küründen çıkarılıp 3 gün boyunca 50 °C (±5°C) fanlı etüvde bekletilmiştir. Kapilerite deneyi ile su işleme derinliklerinin bulunabilmesi için numunenin sadece tabanının su ile temas etmesi beklenir bu yüzden yan yüzeylerin su ile temasını kesmek amacıyla su yalıtım malzemesi olan su-tut malzemesi fırça yardımıyla kaplanmıştır. Deneye hazır hale getirilen numuneler belirlenen kap içerisinde yüksekliği 5 mm olan parçalar yerleştirilmiştir. Bu işlem vasıtasıyla numunenin tüm tabanının su ile temas etmesini sağlanmıştır. Standartta belirtilen sürelerle göre su işleme derinlikleri 28 gün boyunca ölçülmüştür.

3.2.6 Kuruma Büzülmesi

Çimento esaslı kompozitlerin boy değişimleri ASTM C 596 standartına göre 25*25*285 mm boyutlu kuruma büzülmesi çubukları dijital komparatör ile ölçülmüştür. Kalıptan çıkarılan bu çubuklar 7 gün su kürüne tabi tutulmuş sonrasında bez yardımıyla DKY elde edilerek ilk boyu ölçülmüştür. Bu işlemler sonrasında çubuklar oda sıcaklığında açık havada bekletilmiştir. İkinci ölçümü 3.günde yapıldıktan sonra 28 gün boyunca her 7 günde bir ölçülmüştür. 28. gününden sonra 56.-90. ve 120. gününde boy ölçüm işlemi yapılmıştır.

3.2.7 MgSO₄ Dayanıklılığı

Çimento esaslı kompozitlerin MgSO₄ içeren kür içerisindeki boy değişimini ölçmek amacıyla ASTM C1012 standartlarına uygun olarak 25*25*285 mm çubuklar üretilmiştir. Kalıptan çıkarılan bu çubuklar 7 gün su kürüne tabi tutulmuştur. Kür havuzuna %5 MgSO₄ solüsyon içeren çözelti hazırlanmıştır. Çubuklar bu çözeltinin içerisine konularak yeni kürlenme işlemi başlatılmıştır. Kür içerisinde 1 gün bekleyen numuneler bez ile DKY elde edilip ilk boyu dijital komparatör ile ölçülmüştür. Sonrasında 28 gün boyunca her 7 günde bir boyları ölçülmüştür. 28.günün ardından 56.-90. ve 120. gününde boyu ölçülmüştür.

3.2.8 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı

Kalıptan çıkarılan 40*40*160 mm boyutlu numuneler TS EN 1363-1'e uygun olarak 28 boyunca su kürüne tabi tutulmuştur. Bu işlem sonrasında numuneler 24 saat oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan numunelerin tamamen su içeriğinden arındırılması amacıyla 105 °C(±5°C) fanlı etüvde 24 saat bekletilmiştir. Bünyesinde su içeriği kalmayan numuneler yüksek sıcaklık fırınına konulmadan önce ilk ağırlıkları ve TS EN 12504-4 standartına göre ultrases geçiş hızları kaydedilmiştir. 300, 600 ve 900°C yüksek sıcaklık uygulanması amacıyla içine numuneler yerleştirilen fırın dakikada 10 °C ısınma ısıya ayarlanmıştır. İstenilen sıcaklığa ulaşan numuneler 120 dakika fırında sabit sıcaklıkta bekletilmiştir. İşlemi tamamlanan numuneler fırından çıkarılarak 2 farklı tipte soğutma işlemine tabi tutulmuştur. Soğutma işleminin ilki hava soğutma tipidir. Bu işlem tipinde fırından çıkarılan numuneler oda sıcaklığında 24 saat bekletilerek soğutulmuş ve ardından son ağırlık ve ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. İkinci soğutma tipi su soğutma tipidir. Bu işlem tipinde fırından çıkarılan numune itfaiyeleme metodu kullanılarak su ile teması sonucu soğutulmuştur. Su ile teması sonucu soğuyan numune 24 saat oda sıcaklığında bekletilip son ağırlığı ve ultrases geçiş hızı kaydedilmiştir. İlk ve son verileri kaydedilen numuneler son olarak eğilme basınç testine tabi tutulmuştur. Yüksek sıcaklık sonrasında numunelerin Kastamonu Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde FEİ marka Quanta FEG 250 model taramalı elektron mikroskobu(SEM) ile mikroyapı incelemeleri yapılmıştır.

3.2.9 Donma Çözülme Dayanıklılığı

Çimento esaslı kompozitlerin donma çözülme direncini belirlemek amacıyla dökülen 40*40*160 mm boyutlu numuneler kalıptan çıkardıktan sonra ASTM C 666 standartına uygun olarak 28 boyunca su kürüne tabi tutulmuştur. Hali hazırda suya doygun olan numuneler sudan çıkarılmasının hemen ardından bez ile DKY elde edilip ilk ağırlığı ve ultrases geçiş hızı kaydedilmiştir. Bu işlemlerin ardından numuneler, -20 °C'de 300 dakika donma ve 420 dakika +4 °C'de çözülme döngüsüne ayarlanan cihaz içerisine konulmuştur. Her 12 saatte 1 döngü tamamlayan cihaz günde 2 döngü tamamlamıştır. Bu donma çözülme işlemi 200 döngü tekrarlanması sonucu cihazdan

suya doygun halde çıkarılan numuneler bez ile DKY elde edilerek son ağırlığı ve ultrases geçiş hızı ölçülmüştür. İşlemleri tamamlanın numuneler eğilme basınç deneyine tabi tutulmuştur.

3.2.10 Isıl İletkenlik

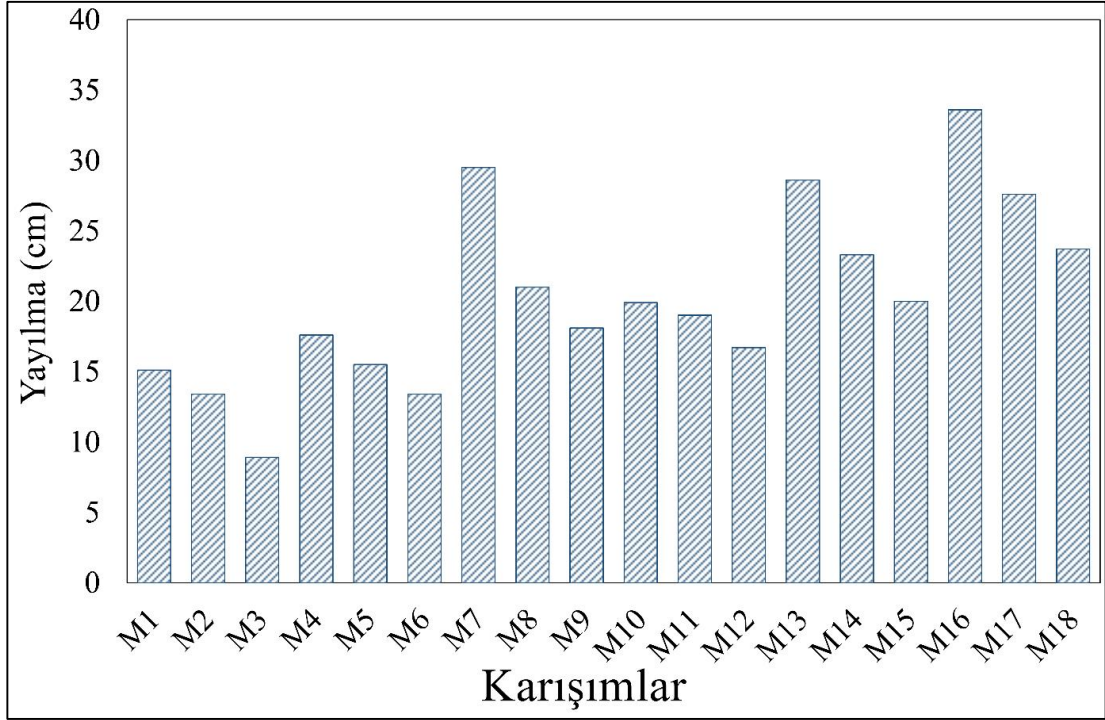
Köpük betonların ısı iletkenlik katsayıları 20*30*50 mm numuneler ile Tci Thermal Conductivity Analyzer cihazı kullanılarak yapılmıştır. Cihaz değiştirilmiş geçici düzlem kaynağı (Modified Transient Plane Source) metoduna göre ölçüm yapmaktadır.

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

4.1 Taze Hal Özelliklerinin Değerlendirilmesi

İşlenebilirlik, özellikle polipropilen elyaf takviyeli köpük beton için, köpük betonun önemli bir yönüdür. Şekil 4.1, bu çalışmada ele alınan tüm karışımların 9 ile 34 cm arasında değişen yayılma çaplarını göstermektedir. Beklendiği gibi, köpük betonun yayılması, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğindeki artışla azalmaktadır. %0,5'lik polipropilen lif dozajı için, köpük beton yayılmasındaki azalma, lifsiz köpük beton yayılmasının %5 ile %29'u arasında değişmektedir. Benzer şekilde, köpük betonun yayılmasındaki azalma, %1 dozaj polipropilen lifler için lifsiz köpük beton yayılmasının %16 ile %41'i arasında değişmektedir. Tablo 3.5'te sunulan diğer karışımlara kıyasla yüksek lif dozajı, en düşük köpük maddesi dozajı ve yüksek miktarda taban külünün birleşik etkisinden dolayı M1'e kıyasla M3 için en yüksek %41'lik yayılma azalması gözlemlenmiştir. Taban külünde belirgin bir su emme eğilimi vardır ve köpük betonun işlenebilirliğini azalmaktadır (Onprom vd. 2015). Benzer şekilde, köpük betona polipropilen lif ilavesi, mekansal ağ yapısı ile sonuçlanır ve lifleri örtmek için çimento macunu tüketerek lifsiz köpük betonu göre daha düşük yayılma sağlar (Bayraktar vd. 2021).

Tüm karışımlar için, köpük maddesi miktarındaki bir artış, köpük beton yayılmasını açıkça artırmaktadır. 50 kg/m³ köpük ajanı içeriğine sahip köpük beton karışımları için, köpük ajan içeriği 40 kg/m³ olan köpük beton karışımlarından %16 ile %51 daha yüksek yayılma aralığına sahiptir. Benzer şekilde, 60 kg/m³ köpük ajan içeriğine sahip köpük beton karışımları için yayılma, 40 kg/m³ köpük ajan içeriğine göre %19 ile %95 daha yüksektir. Yayılmada en yüksek %95'lik artış, M1'e kıyasla M7 için gözlenir bu da en yüksek köpük maddesi dozajından ve polipropilen liflerin dahil edilmemesinden kaynaklanmaktadır. Köpük ajan içeriğindeki bir artış, katı içerik miktarını azaltır ve köpük betonun akışının artmasına neden olur (Onprom vd. 2015).



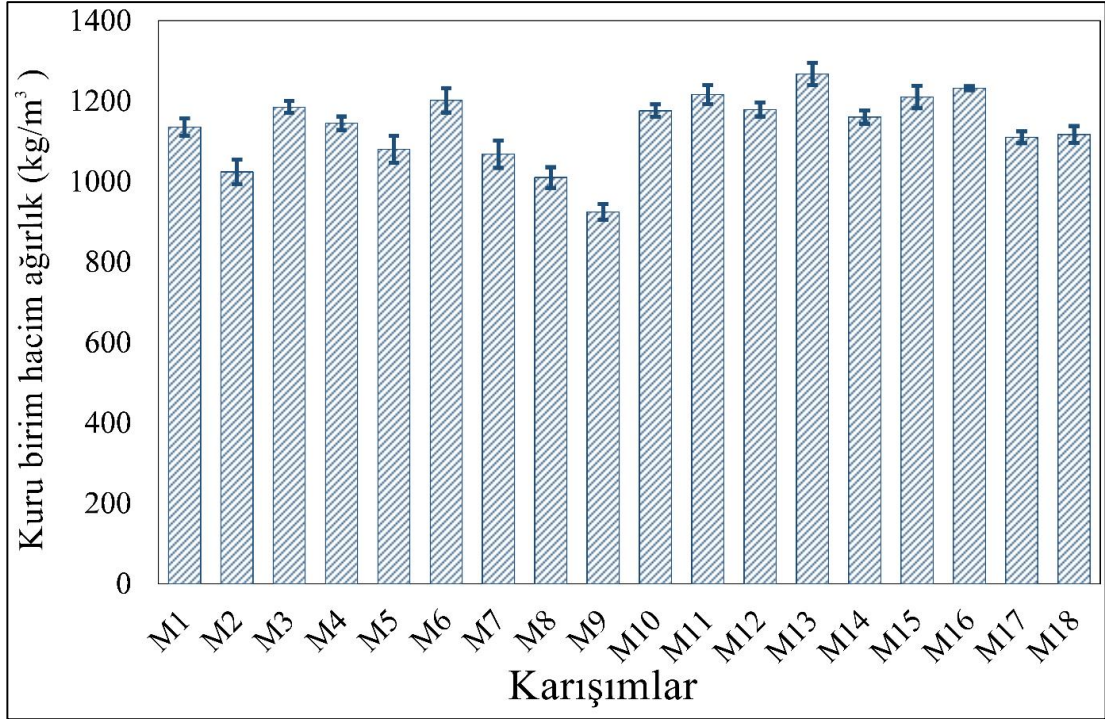
Şekil 4. 1 Köpük beton karışımlarının işlenebilirliği

Daha yüksek çimento içeriği için köpük beton yayılması, düşük çimento içeriğine göre artmaktadır. 400 kg/m^3 çimento içeren karışımlar için, yayılmadaki artış 300 kg/m^3 çimento içeren karışımların yayılmasının %14 ile %88'i arasında değişmektedir. M3'e kıyasla en yüksek %88'lik yayılma artışı M12'de gözlenir bu da çimento içeriğinin düşük köpük ajan içeriğine sahip karışımın yayılma üzerinde diğer karışımlara göre daha belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Çimento içeriğindeki artış taban külü miktarını azaltmaktadır ve köpük beton yayılmasının artmasına neden olmaktadır.

4.2 Fiziksel Özelliklerin Değerlendirilmesi

Fiziksel, termal ve mekanik özellikler gibi birçok özellik köpük betonun yoğunluğundan etkilendiğinden yoğunluk önemli bir parametredir (Bayraktar vd. 2021). Şekil 4.2, bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin 924 ile 1267 kg/m^3 arasında değişen kuru birim hacim ağırlık göstermektedir. Genel olarak, diğer tüm değişkenler sabit tutulduğunda köpük ajan içeriğindeki artış ile köpük betonun kütle yoğunluğunda bir azalma gözlemlenmektedir. Bu durum, artan köpük içeriği ile katı içeriğinin azalmasına bağlanmaktadır (Onprom vd. 2015). Artan köpük ajanı

içeriği, daha düşük çimento/ince agrega oranı ve Tablo 3.5'te sunulan diğer karışımlara kıyasla daha yüksek polipropilen lif içeriğinin birleşik etkisinden dolayı M3'e kıyasla M9 için %22'lik en yüksek kütle yoğunluğu azalması gözlenmektedir. İnce agregalar olarak taban külü, çimentodan daha hafiftir ve sonuç olarak, düşük çimento/ince agrega oranı, köpük betonun kuru birim hacim ağırlığını azaltmaktadır.

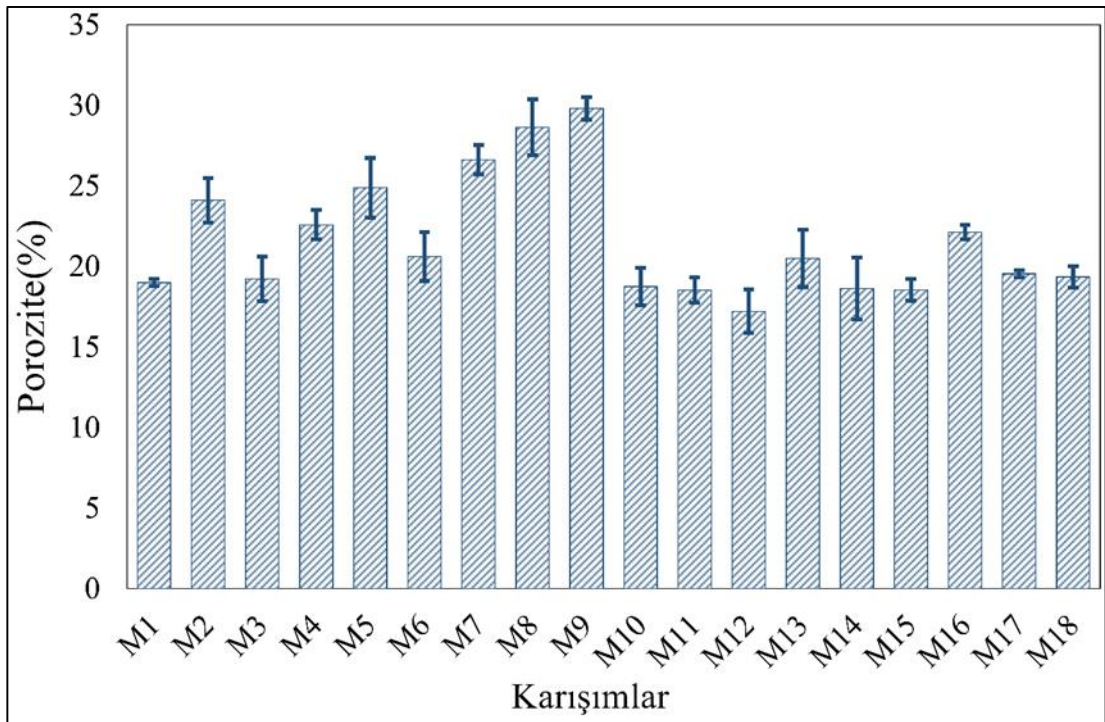


Şekil 4. 2 Köpük beton karışımlarının kuru birim hacim ağırlıkları

Köpük betonun kütle yoğunluğu, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artışla azalmaktadır. M7'ye kıyasla M9 için %13'lük en yüksek kuru birim hacim ağırlık azalması gözlenmektedir. Polipropilen lifler hafif malzemelerdir ve bunların betona eklenmesi boşluklara neden olur (Kazmi vd. 2018, 2019). Sonuç olarak, polipropilen lif içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun yoğunluğunun azaldığı gözlenmektedir. Tüm köpük beton numunelerinin kütle yoğunluğu, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğinden daha yüksek gözlenmektedir. Kuru birim hacim ağırlığında en yüksek %21 artış, M9'a kıyasla M18'de gözlenmektedir. Çimento ince bir malzemedir ve özgül ağırlığı taban külünden daha yüksektir (Bayraktar vd. 2021). Bu nedenle, yüksek miktarda çimento, gözenekleri doldurarak köpük betonun kütle yoğunluğunu arttırmaktadır.

Hafif orta dayanımlı betonun yoğunluğu, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 213R-14) yönergelerine göre 800 ile 1400 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu çalışmada, taban külü içeren tüm köpük beton numunelerinin kütle yoğunluğu 924 ile 1267 kg/m³ arasında değişmektedir. Bu nedenle, orta mukavemetli beton için ince agrega olarak taban külü içeren köpük beton kullanılabilir.

Şekil 4.3, bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin %17 ile %30 arasında değişen porozite gösterdiği gözlenmiştir. Genel olarak, yüksek boşluk oranı ve azalan katı içeriği nedeniyle köpük ajan içeriğindeki artış ile köpük betonun porozitesinde bir artış gözlenmiştir (Bayraktar vd. 2021). Tablo 3.5’te sunulan diğer karışımlara kıyasla artan köpük ajanı içeriği, daha düşük çimento içeriği ve daha yüksek polipropilen lif içeriğinin birleşik etkisi nedeniyle M3’e kıyasla M9’da en yüksek porozite artışı gözlenmektedir. Malzeme, taban külü de düşük çimento/ince agrega oranı yoluyla köpük betonun gözenekliliğine katkıda bulunur (Andrade vd. 2009).

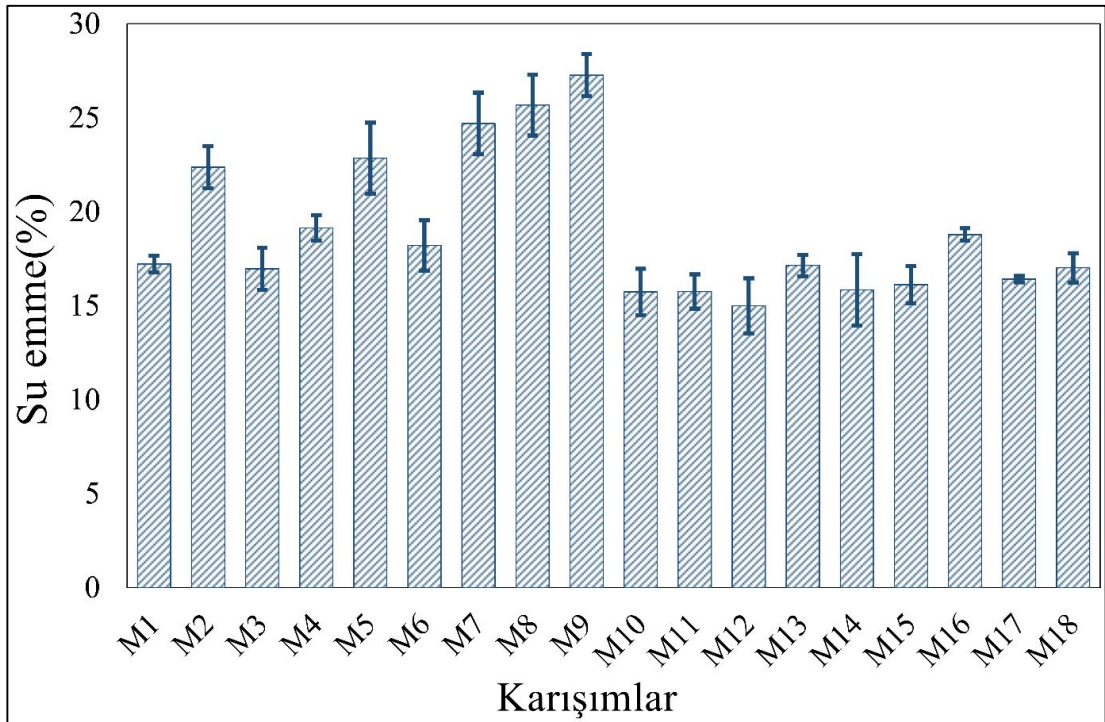


Şekil 4. 3 Köpük beton karışımlarının poroziteleri

Köpük betonun porozitesi, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artışla artar. Gözeneklilikte en yüksek artış %27 ile M2’de M1’e göre

gözlenmektedir. Genel olarak, polipropilen lifler boşluklar oluşturur ve betonun gözenekliliğini arttırmaktadır (Kazmi vd. 2018, 2019). Bununla birlikte, bu olay yüksek çimento içerikli karışımlardan daha az çimento içerikli karışımlar için belirgindir. Tüm köpük beton numunelerinin gözenekliliği, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmektedir. Yüksek miktarda çimento, gözenekleri doldurarak köpük betonun gözenekliliğini azaltır. Porozitede en yüksek %35 azalma, M9'a kıyasla M18 için gözlenmektedir.

Şekil 4.4, bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin %15 ile %27 arasında değişen su emmesini göstermektedir. Genel olarak, köpük betonun artan köpük maddesi içeriği ile artan gözenekliliğinden kaynaklanan köpük maddesi içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun su emmesinde bir artış gözlenir (Bayraktar vd. 2021). Örneğin, artan köpük maddesi içeriği, daha çimento/ince agrega oranı, daha düşük çimento içeriği ve daha düşük çimento içeriğinin birleşik etkisine bağlı olarak artan gözenekliliğe atfedilen M3'e kıyasla M9 için %61'lik en yüksek su emme artışı gözlenmektedir. Tablo 3.5'te sunulan diğer karışımlara kıyasla daha yüksek polipropilen lif içeriğine sahiptir.



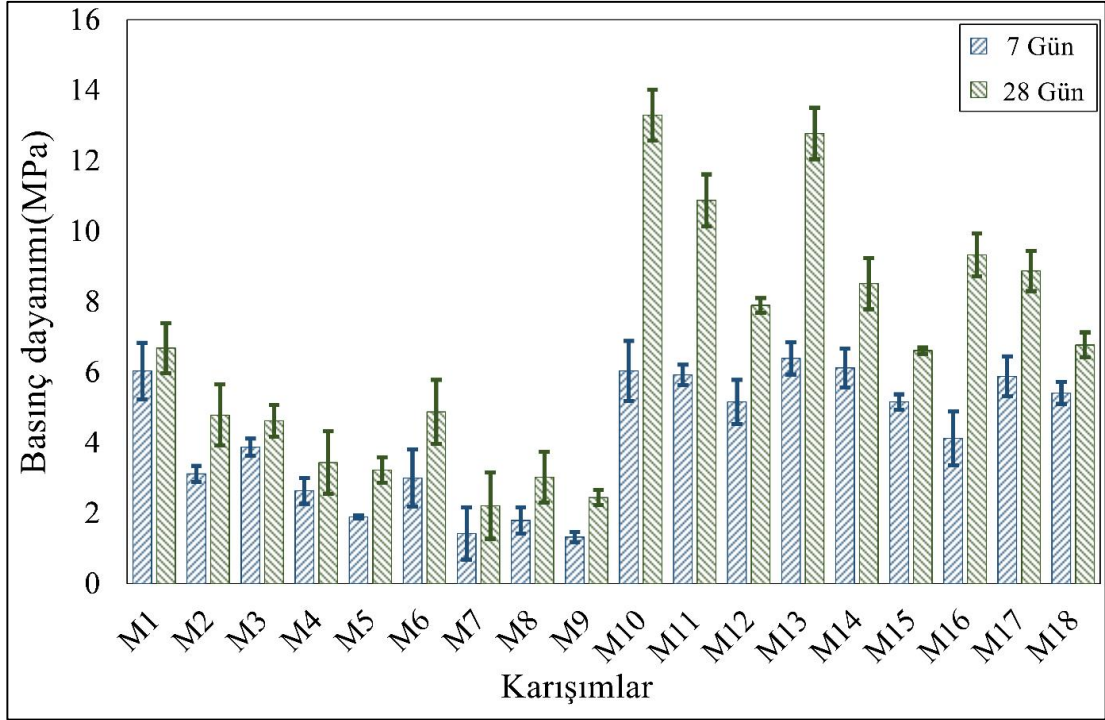
Şekil 4. 4 Köpük beton karışımlarının su emmeleri

Tüm köpük beton numunelerinin su emmesi, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmektedir. Diğer tüm değişkenler sabit tutulmuştur bu da artan çimento içeriği ile köpük betonun gözenekliliğinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Su emmede en yüksek %38 azalma M9'a kıyasla M18 için gözlenmektedir. Köpük betonun su emmesi, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artış ile artmaktadır. Artan lif içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliğinden dolayı M1'e kıyasla M2 için %30'luk en yüksek su emme artışı gözlenmektedir (Kazmi vd. 2018, 2019). Tüm su emme sonuçları köpük betonun gözenekliliğine göre gözlenmektedir.

4.3 Mekanik Özelliklerin Değerlendirilmesi

Şekil 4.5, bu çalışmada ele alınan tüm karışımların 7 günde 1 ile 6 MPa ve 28 günde 2 ile 13 MPa arasında değişen basınç dayanımını göstermektedir. Beklendiği gibi, köpük maddesi miktarındaki bir artış, köpük betonun 7 ve 28 günlük basınç dayanımını açıkça azaltmaktadır. Köpük betonun basınç dayanımındaki azalma, yüksek boşluk oranına ve artan köpük maddesi içeriği ile azalan katı içeriğine atfedilir ve bu da köpük betonun gözenekliliğinin artmasıyla sonuçlanır (Bayraktar vd. 2021). Sonuç olarak 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında M1'e göre %76 ve %67 ile en yüksek azalma M7'de gözlenmektedir.

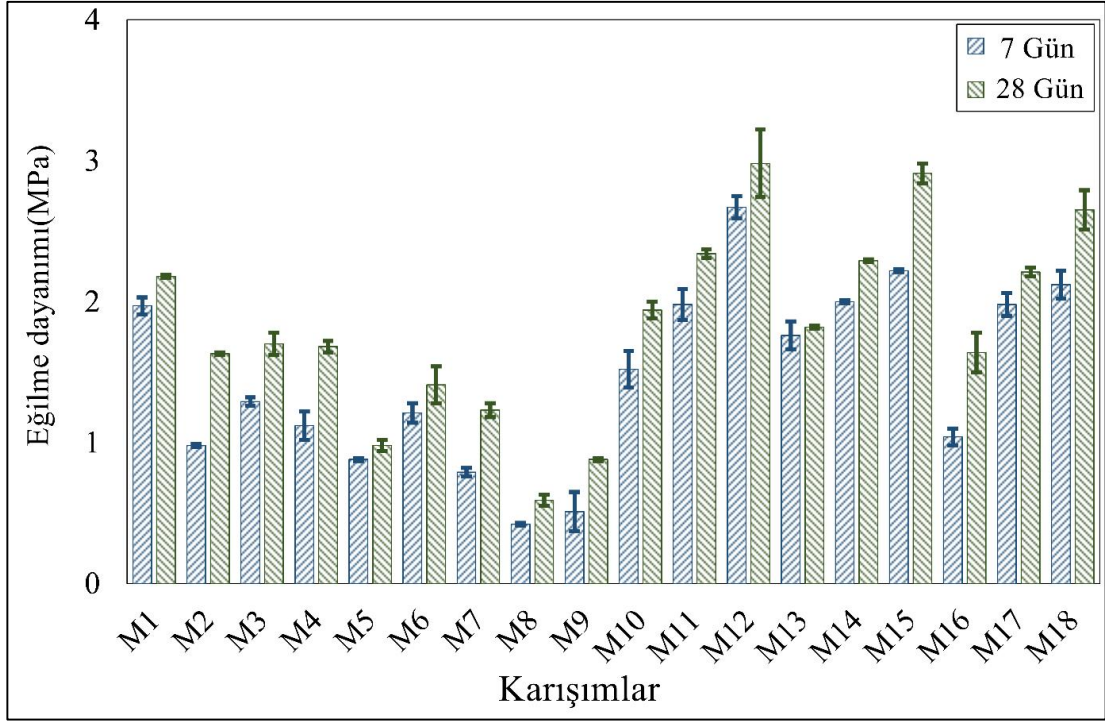
Köpük betonun basınç dayanımı, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. Örneğin, M1'e kıyasla M2 için 7 günlük en yüksek %48'lik basınç dayanımı düşüşü gözlenmektedir. Benzer şekilde, M13'e kıyasla 28 günlük en yüksek %48'lik basınç dayanımı düşüşü M15 için gözlenmektedir. Genel olarak, polipropilen lifler betonun basınç dayanımına çok fazla katkıda bulunmaz (Kazmi vd. 2018, 2019) Köpük betonun basınç dayanımındaki azalma, lif ilavesinin köpük betonun konsolidasyonu üzerindeki etkisine bağlanabilir (Suksawang vd. 2018). Ayrıca yükleme yönüne paralel lifler boşluk gibi davranır ve ayrıca köpük betonun mekanik özelliklerinin azalmasına neden olmaktadır (Neves ve Fernandes de Almeida, 2005).



Şekil 4. 5 Köpük beton karışımlarının basınç dayanımı

Çimento, mukavemete önemli ölçüde katkıda bulunan köpük betonun ana bileşenidir (Chica ve Alzate, 2019). Beklendiği gibi, köpük betonun basınç dayanımı, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre çok daha yüksek gözlenmektedir. Geçmişteki çalışmalarda da benzer sonuçlar bildirilmiştir (Amran vd. 2015; Raj vd. 2019). 400 kg/m³ çimento içeren karışımlar için, 300 kg/m³ çimento içeren karışımlara kıyasla 7 günlük basınç dayanımındaki artış %1 ile %228 arasında değişmektedir. Benzer şekilde 400 kg/m³ çimentolu karışımlarda 28 günlük basınç dayanımı artışı 300 kg/m³ çimentolu karışımlara göre %36 ile %322 arasında değişmektedir. 28 günlük basınç dayanımında M7'ye kıyasla %322'lik en yüksek artış M16'da görülmektedir.

Şekil 4.6, bu çalışmada ele alınan tüm karışımların 7 günde 0,4 ile 2,7 MPa ve 28 günde 0,6 ile 3 MPa arasında değişen eğilme mukavemetini göstermektedir. Köpük maddesi miktarındaki bir artış, köpük betonun 7 ve 28 günlük eğilme mukavemetini açıkça azaltmaktadır. Köpük betonun eğilme mukavemetindeki azalma, artan köpük maddesi içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliğine bağlanmaktadır (Bayraktar vd. 2021). 28 günlük eğilme mukavemetinde %64'lük en yüksek azalma M2'ye kıyasla M8 için gözlenmektedir.

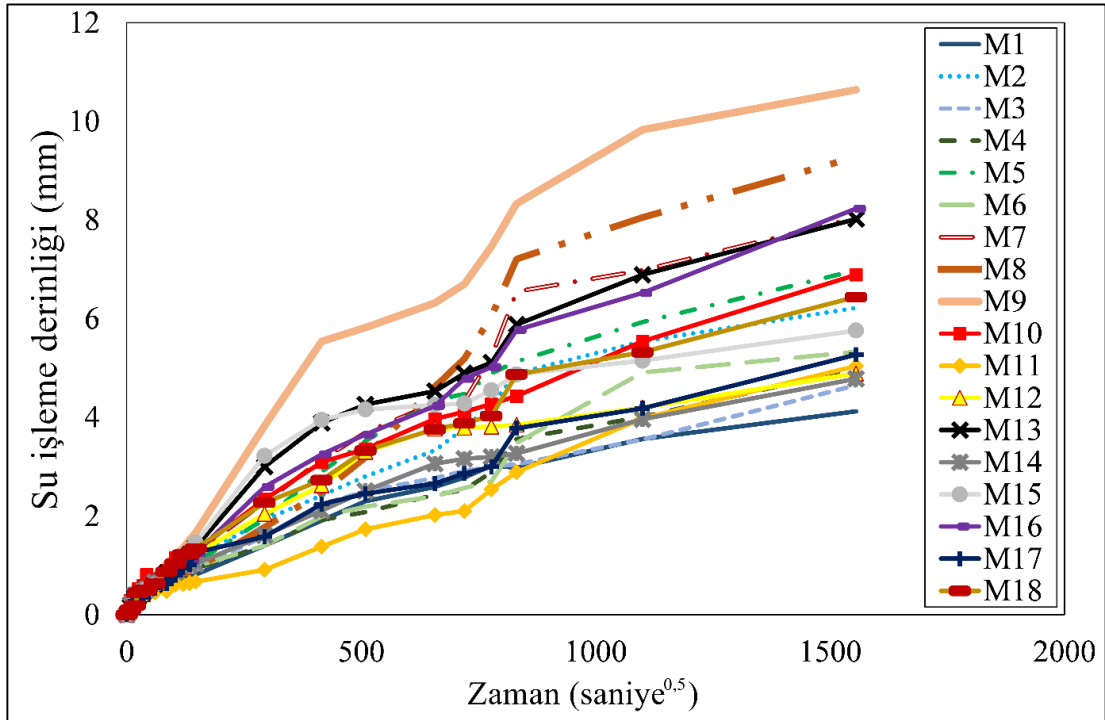


Şekil 4. 6 Köpük beton karışımlarının eğilme dayanımları

400 kg/m³ çimento içeren karışımlar için, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğindeki artışla köpük betonun eğilme dayanımı artmaktadır. M16'ya kıyasla 7 ve 28 günlük en yüksek eğilme mukavemeti artışı %104 ve %62 ile M18 için gözlenmektedir. Köpük betonun geliştirilmiş eğilme mukavemeti, lifler tarafından çatlakların köprülenmesine atfedilir (Bayraktar vd. 2021). 300 kg/m³ çimentolu karışımlar için, artan polipropilen lif içeriği ile köpük betonun eğilme mukavemetinde bir azalma gözlenmektedir. M1'e kıyasla M2 için 7 günlük en yüksek %50'lik eğilme mukavemeti azalması gözlenmektedir. Benzer şekilde, M7'ye kıyasla 28 günlük en yüksek eğilme mukavemeti azalması %52'lik M8 için gözlenmektedir. Köpük betonun eğilme mukavemetindeki azalma, çeşitli faktörlere bağlanabilir: lifleri örtmek için çimento hamuru tüketimi, lif ilavesinin köpük betonun konsolidasyonu üzerindeki etkisi ve liflerin boşluk olarak yüklemeye paralel davranışı şeklinde sıralanabilir (Neves ve Fernandes de Almeida, 2005; Suksawang vd. 2018). Köpük betonun eğilme dayanımı, geçmiş bir çalışmaya benzer şekilde, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre çok daha yüksek gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021). 28 günlük eğilme mukavemetinde %275'lik en yüksek artış M8'e kıyasla M17'de gözlenmektedir.

4.4 Kapilerite Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Kılcallık artışı ile su emme olarak tanımlanan kapilerite, betonun dayanıklılığını değerlendirmek için önemli bir özelliktir (Niu vd. 2020). Şekil 4.7, 28 günde 4 ile 11 mm arasında değişen bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin kapileritesi göstermektedir. Genel olarak, artan köpük ajan içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliğinden dolayı köpük ajan içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun kapileritesinde bir artış gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021). Örneğin, artan köpük beton maddesi içeriği, daha düşük çimento içeriği, daha yüksek polipropilen lif içeriği ve daha düşük çimento içeriğinin birleşik etkisine bağlı olarak artan gözenekliliğe atfedilen M3'e kıyasla M9 için %129'luk en yüksek kapilerite artışı gözlenmektedir. Tablo 3.5'te sunulan diğer karışımlara kıyasla ince agrega oranına sahiptir.



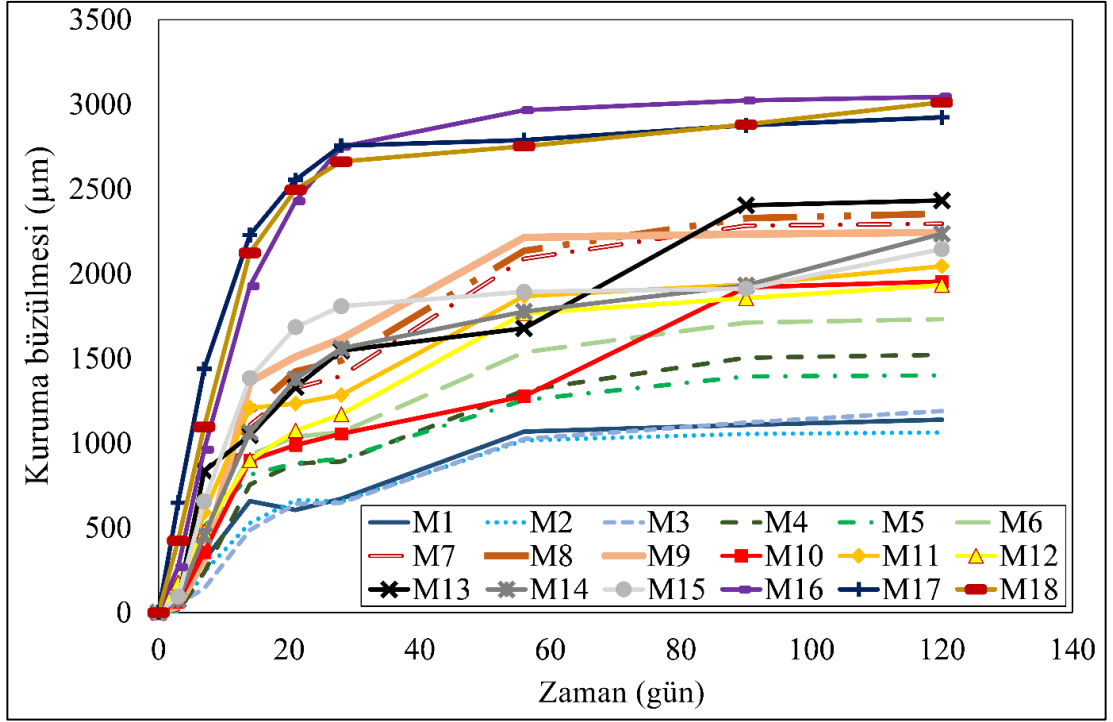
Şekil 4. 7 Köpük beton karışımlarının kapileritesi

Köpük betonun kapileritesi, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artışla artmaktadır. Kapileritede en yüksek artış %51 ile M1'e kıyasla M2 için gözlenmektedir. Genel olarak polipropilen lifler betonun gözenekliliğini arttırmaktadır ve kapileritenin de artmasına neden olmaktadır (Kazmi vd. 2018, 2019). Bununla birlikte, bu olay yüksek çimento içerikli karışımlar için belirgindir. Köpük

beton numunelerinin kapileritesi, diğerk tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmektedir. Yüksek miktarda çimento, köpük betonun gözenekliliğini azaltarak kapileritesini azaltmaktadır. Kapileritede %43'lük en yüksek azalma M8'e kıyasla M17 için gözlenmektedir. Bu çalışmada gözlemlenen kapilerite sonuçları, köpük betonun gözeneklilik ve su emme sonuçlarıyla uyumludur.

4.5 Kuruma Büzülmesi Özelliklerinin Değerlendirilmesi

Şekil 4.8, bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin 120 günde 1063 ile 3044 µm arasında değişen kuruma büzülmesini göstermektedir. Erken yaşta hızlı serbest su kaybı nedeniyle köpük betonun kuruma büzülmesinde ilk 14 gün için keskin bir artış gözlenmektedir (Zhang vd. 2020). Daha sonra, nem kaybı ve sürekli hidratasyon işlemi nedeniyle zamanla artan köpük betonun büzülmesindeki artış oranı hemen hemen düzgün olarak gözlenmektedir (Zhang vd. 2020). Genel olarak, köpük ajan içeriğinin artmasıyla köpük betonun kuruma büzülmesinde bir artış gözlenmektedir. 50 kg/m³ köpük ajanı içeriğine sahip köpük beton karışımları için, 40 kg/m³ köpük ajan içeriğine sahip köpük beton karışımlarına göre kuruma büzülmesindeki artış %9 ile %46 arasında daha fazladır. Benzer şekilde, 60 kg/m³ köpük maddesi içeriğine sahip köpük beton karışımları için kuruma büzülmesindeki bir artış, 40 kg/m³ köpük maddesi içeriğine göre %43 ile %121 daha yüksektir. M2'ye kıyasla %121 ile en yüksek kuruma büzülmesi artışı M8 için gözlenmektedir. Köpük betonun geleneksel betona göre daha yüksek büzülmesi, iri agregaların olmamasına bağlanmaktadır (Nambiar ve Ramamurthy, 2009). Artan köpük ajan içeriği ile köpük betonun yüksek kuruma büzülmesi, artan köpük ajan içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliğinden kaynaklanmaktadır (Bayraktar vd. 2021). Kuruma büzülmesi için köpük betonun gözenek yapısı oldukça önemlidir ve yüksek gözenek bağlantısı köpük betonun kuruma büzülmesini önemli ölçüde artırabilmektedir (Sun vd. 2018).

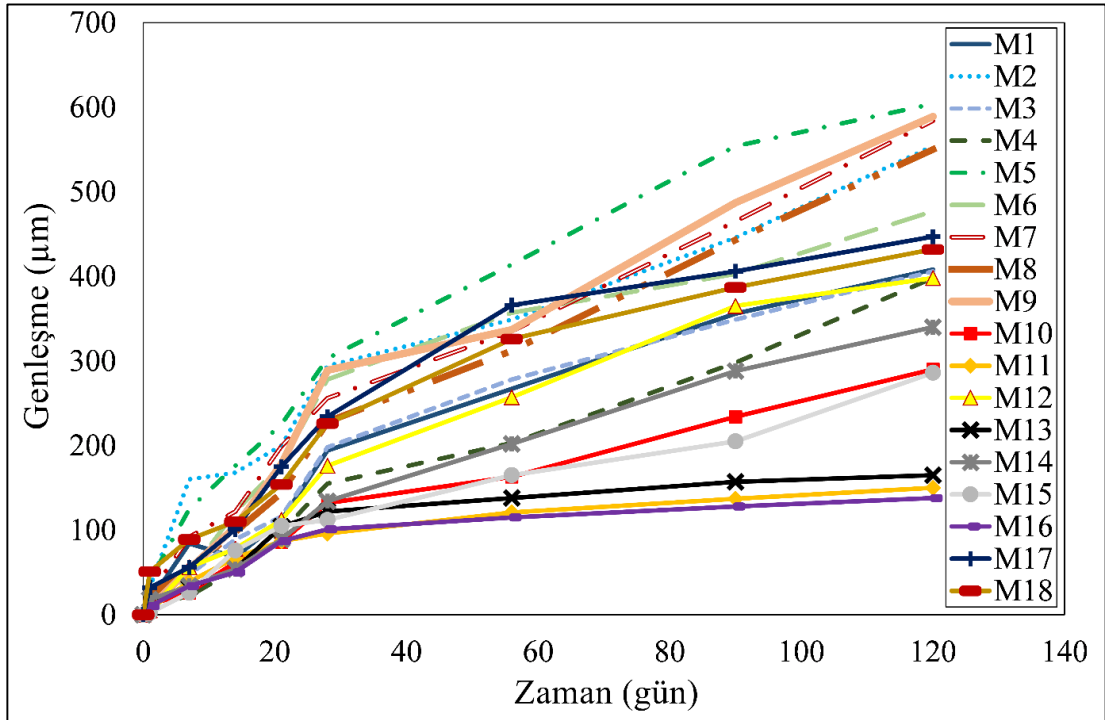


Şekil 4. 8 Köpük beton karışımlarının kuruma büzülmesi

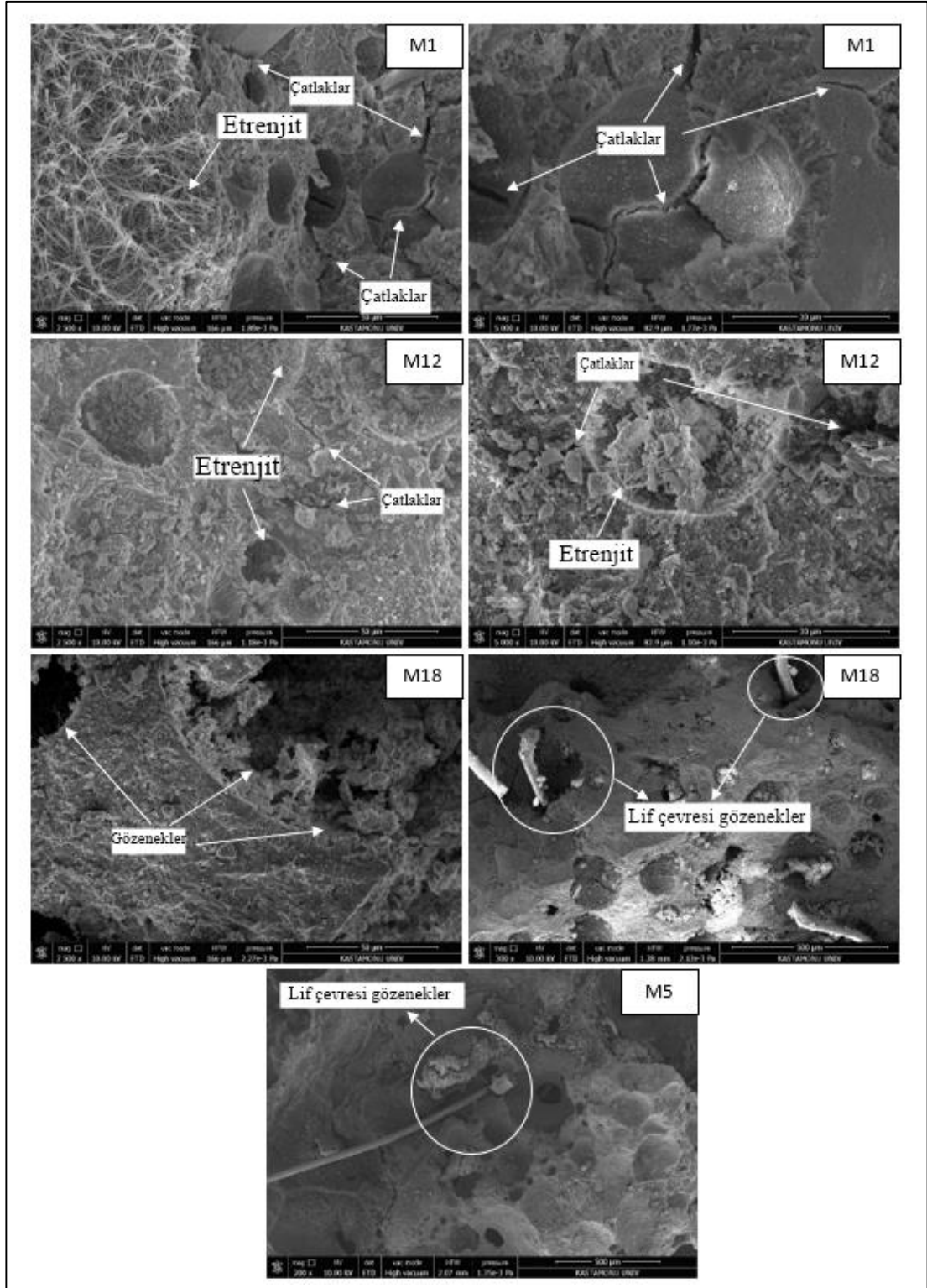
Köpük betonun kuruma büzülmesi, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğindeki artışla azalmaktadır. M13'e kıyasla %12'lik kuruma büzülmedeki en yüksek azalma M15'te gözlenmektedir. Benzer bulgular önceki bir çalışmada bildirilmiştir (Roslan vd. 2013). Polipropilen lifler, bir anti-mikro çatlak ajanı görevi görür ve köpük betonun kuruma büzülmesini azaltmaktadır (Roslan vd. 2013). Köpük beton numunelerinin kuruma büzülmesi, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha yüksek gözlenmektedir. 400 kg/m³ çimento içeren karışımlar için, kuruma büzülmesindeki artış, 300 kg/m³ çimento içeren karışımların kuruma büzülmesinin %24 ile %92'si arasında değişmektedir. M2'ye kıyasla kuruma büzülmesinde en yüksek %92'lik artış M11'de gözlenmektedir. 400 kg/m³ çimento içeren köpük beton karışımları için, su-katı oranı 300 kg/m³ çimento içeren karışımlardan daha yüksektir ve bu da büzülmeye önemli ölçüde katkıda bulunur (Nambiar ve Ramamurthy, 2009). Sonuç olarak, yüksek çimento içeriği için köpük betonun düşük çimento içeriğine göre daha yüksek kuruma büzülmesi gözlenmektedir.

4.6 Sülfat Dayanıklılığının Değerlendirilmesi

Şekil 4.9, 120 günde 138 ile 604 μm arasında değişen, bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin magnezyum sülfat çözeltisi ile genişleme açısından sülfat direncini göstermektedir. Genel olarak, köpük ajan içeriğindeki artışla birlikte sülfat atağı nedeniyle köpük betonun genişmesinde bir artış gözlenmektedir. M11'e kıyasla %198'lik genişlemedeki en yüksek artış M17'de gözlenmektedir. Genel olarak, dayanıklılık betonun gözenekliliğinden etkilenmektedir (Kazmi vd. 2020b). Yüksek gözeneklilik, betona agresif maddelerin nüfuz etme şansını artırarak betonun düşük dayanıklılık performansına yol açmaktadır (Kazmi vd. 2020a). Sonuç olarak, artan köpük ajan içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliği, sülfat atağı nedeniyle genişmeyi artırmaktadır (Bayraktar vd. 2021).



Şekil 4. 9 Köpük beton karışımlarının sülfat direnci



Şekil 4. 10 Sülfat maruziyeti sonrasındaki SEM görüntüleri

Köpük betonun genişmesi, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğindeki artışla artmaktadır. M16'ya kıyasla %224'lük sülfat atağı nedeniyle genişmedeki en yüksek artış M17 için gözlenmektedir. Genel olarak polipropilen

lifler betonun gözenekliliğini arttırmaktadır. Ayrıca genleşmenin artmasına neden olmaktadır (Kazmi vd. 2018, 2019). Köpük beton numunelerinin genleşmesi, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmektedir. Yüksek miktarda çimento köpük betonun gözenekliliğini azaltarak genleşmeyi azaltmaktadır. Genleşmede en yüksek % 76 azalma, M7'ye kıyasla M16 için gözlenmektedir. Bu çalışmada gözlemlenen sülfat saldırısına bağlı genleşmenin sonuçları, köpük betonun gözeneklilik ve su emme sonuçlarıyla uyumludur. Şekil 4.10, sülfata maruz kaldıktan sonra köpük beton numunelerinin SEM görüntülerini göstermektedir. Sülfat saldırısı sırasında sülfat iyonları, alçıtaşı üretmek için çimento hidrasyon ürünleri ile reaksiyona girer. Daha sonra alçı, betondaki trikalsiyum alüminatı (C_3A) etrenjite dönüştürür, bu da betonun çatlamasına neden olan yüksek iç gerilimlere neden olur. M1 ve M12 örneklerinin SEM görüntüleri, sülfat maruziyeti nedeniyle etrenjit ve çatlamanın varlığını göstermektedir. Bununla birlikte, yüksek miktarda çimento, köpük betonun gözenekliliğini azaltmaktadır. Sonuç olarak, M12 numunelerinde M1 numunelerine göre düzgün dağılımlı ve daha az etrenjit iğne kristali gözlenmektedir. Ayrıca M12 numunelerinde M1 numunelerine göre daha yoğun yapı ve daha az çatlama gözlenmektedir. M18 numunelerinin SEM görüntüsünün M1 ve M12 numuneleri ile karşılaştırılması, köpük ajan içeriğindeki artışla artan gözeneklilik göstermektedir. Lif ilavesine bağlı olarak artan gözeneklilik, M18 ve M5 numunelerinin SEM görüntülerinde de gözlenmektedir ve bu da sülfat atağı nedeniyle artan genleşme ile sonuçlanmaktadır.

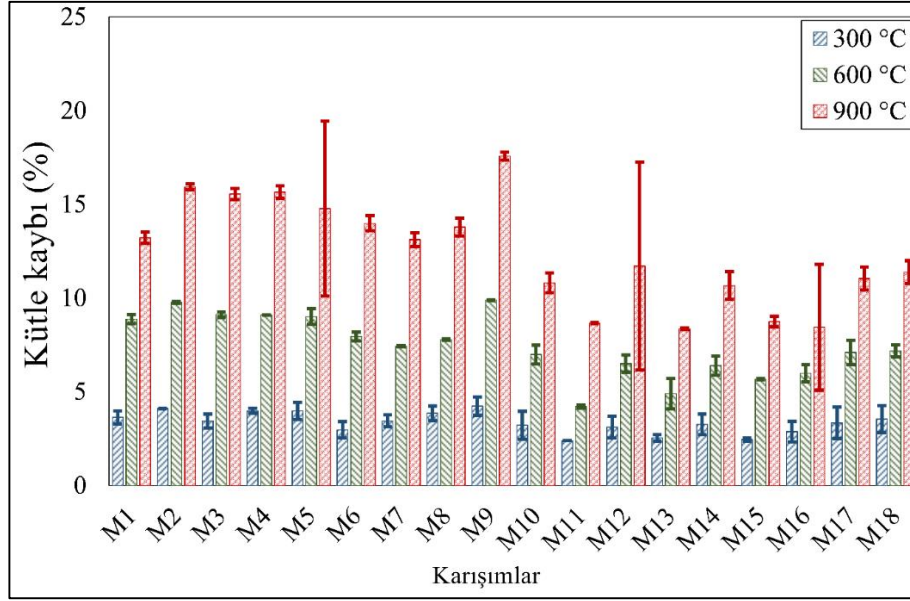
4.7 Yüksek Sıcaklık Dayanıklılığı

4.7.1 Hava Soğutma Sonrasında Kütle Kaybı

Şekil 4.11, hava soğutmasından sonra yüksek sıcaklıkta köpük betonun 300 °C'de %2 ile %4, 600 °C'de %4 ile %10 ve 900 °C'de %8 ile %18 arasında değişen kütle kaybını göstermektedir. Beklendiği gibi, sıcaklığın artmasıyla köpük betonun kütle kaybında bir artış gözlenmektedir. Ancak köpük ajan içeriğinin artması ile köpük betonun kütle kaybında bir azalma gözlenmektedir. M13 için M10'a kıyasla kütle kaybında en yüksek %30 azalma gözlenmektedir. Artan köpük ajan içeriği ile köpük betonun artan

gözenekliliği, yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan su buharlarının ve gazların tahliyesine izin verir (Akca ve Zihnioğlu, 2013). Sonuç olarak, artan köpük maddesi içeriği, köpük betonun kütle kaybını azaltmaktadır.

Köpük betonun kütle kaybı, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artışla artmaktadır. 900 °C de M16'ya kıyasla %35'lik kütle kaybındaki en yüksek artış M18 için gözlenmektedir. Polipropilen lifler 160 ile 170 °C civarında erir ve köpük betonun kütle kaybının artmasına neden olur (Uysal ve Tanyildizi, 2012). Bununla birlikte, tüm köpük beton numunelerinin kütle kaybı, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmektedir. M2'ye kıyasla kütle kaybında en yüksek %57'lik azalma M11'de gözlenmektedir. Yüksek çimento içeriği, köpük betonun daha düşük gözenekliliğine yol açmaktadır. Sonuç olarak, düşük gözeneklilik, yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan gazların salınımını sınırladığı için basınç dayanımı gelişir ve betonun kütle kaybını arttırmaktadır (Akca ve Zihnioğlu, 2013). Ancak, çimento içeriğinin artmasıyla köpük betonun artan mukavemetine ve köpük ajanına bağlı gözeneklerin varlığına atfedilen bu çalışmada böyle bir olgu gözlenmemektedir. Köpük ajanından kaynaklanan gözeneklilik, gazların salınmasına izin verirken, yüksek çimento içeriği nedeniyle betonun yüksek mukavemeti gazlı basınca direnir. Bu birleşik etkinin bir sonucu olarak, tüm köpük beton numunelerinin kütle kaybı, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmiştir.



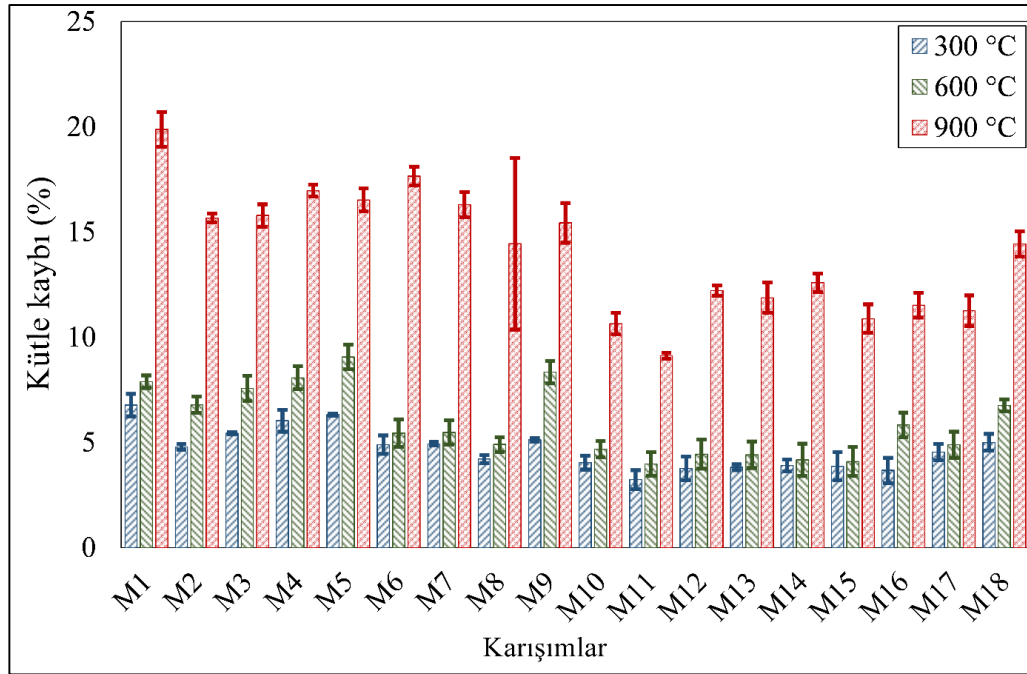
Şekil 4. 11 Hava soğutma tipi sonrasında köpük betonun kütle kaybı

4.7.2 Su Soğutma Sonrası Kütle Kaybı

Şekil 4.12, suyla soğutulduktan sonra yüksek sıcaklıkta köpük betonun 300 °C'de %3 ile %7, 600 °C'de %4 ile %9 ve 900 °C'de %9 ile %20 arasında değişen kütle kaybını göstermektedir. Sıcaklığın artmasıyla köpük betonun kütle kaybında bir artış gözlenmektedir. Köpük betonun su soğutmasından sonra kütle kaybı, hava soğutmasından daha fazla su soğutması sonrası sıcaklıktaki ani değişiklik nedeniyle köpük betonda oluşan gerilmelere atfedilen hava soğutmasından daha yüksek gözlenmektedir (Gencel vd. 2021a). Köpük ajan içeriğinin artması ile köpük betonun kütle kaybında bir azalma gözlenmektedir. M1'e kıyasla %31'lik kütle kaybındaki en yüksek azalma M7 için gözlenmektedir. Daha önce tartışıldığı gibi, artan köpük maddesi içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliği, yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan gazların salınmasına izin vererek köpük betonun kütle kaybını azaltmaktadır (Akca ve Zihnioğlu, 2013).

Diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğinin artmasıyla köpük betonun kütle kaybı azalmaktadır. M4'e kıyasla %33'lük kütle kaybındaki en yüksek azalma M6'da gözlenmektedir. Genel olarak, polipropilen lifler 160 ile 170 °C civarında erir ve köpük betonun kütle kaybını arttırmaktadır (Uysal ve Tanyildizi, 2012). Bununla birlikte, polipropilen liflerin eritilmesinden sonra betonda bir

mikrokanal ağı geliştirilir ve bu da gerilim salınımına katkıda bulunur (Han vd. 2005; Kalifa vd. 2001). Sonuç olarak, polipropilen lif içeriğinin artmasıyla köpük betonun su soğutması nedeniyle kütle kaybında azalma gözlenmektedir. Tüm köpük beton numunelerinin kütle kaybı, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmektedir. M5'e kıyasla kütle kaybında en yüksek %54'lük azalma M14 için gözlenmektedir. Düşük çimento içeriğine göre yüksek çimento içeriği için köpük beton numunelerinin daha düşük kütle kaybı, köpük ajanı tarafından gözenekliliğin ve yüksek çimento içeriği nedeniyle yüksek beton mukavemetinin birleşik etkisine bağlanır (Akca ve Zihnioğlu, 2013).



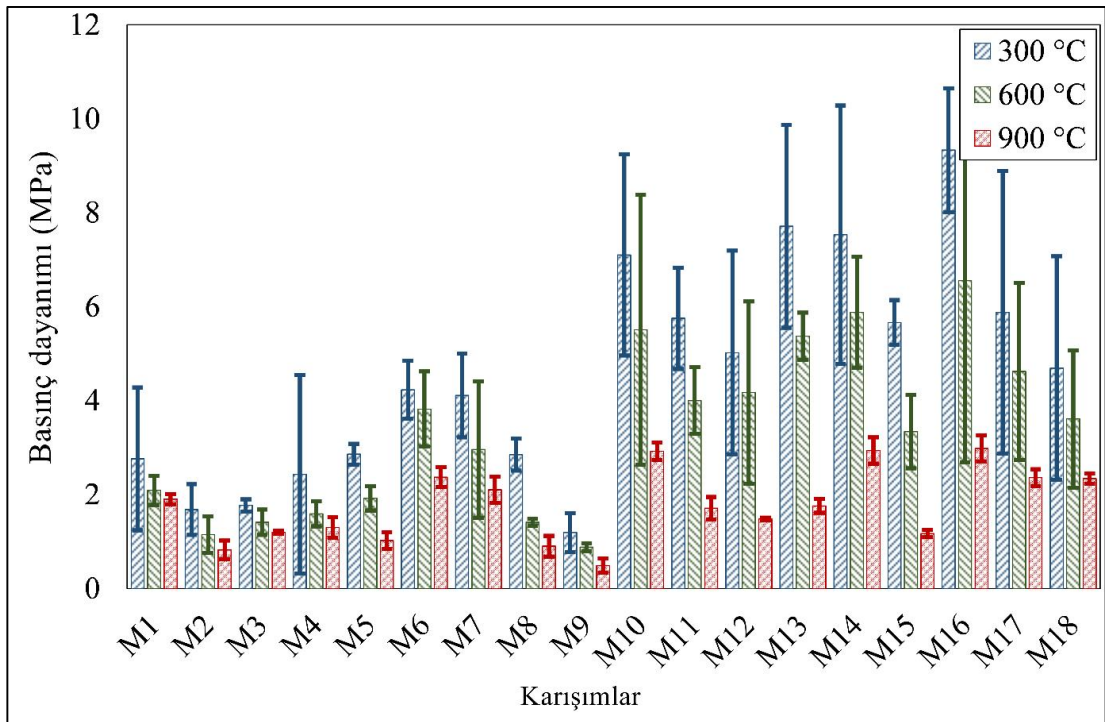
Şekil 4. 12 Su soğutma tipi sonrasında köpük betonun kütle kaybı

4.7.3 Hava Soğutma Sonrasında Basınç Dayanımı

Şekil 4.13, köpük betonun hava soğutmasından sonra 300 °C'de 1 ile 9 MPa, 600 °C'de 1 ile 7 MPa ve 900 °C'de 0,5 ile 3 MPa arasında değişen yükseltilmiş bir sıcaklıktaki basınç dayanımını göstermektedir. Bilindiği gibi, sıcaklığın artmasıyla köpük betonun basınç dayanımında bir azalma gözlenmektedir. Ancak köpük ajan içeriğinin artması ile köpük betonun basınç dayanımında bir artış gözlenmektedir. M3'e kıyasla %171'lik basınç dayanımındaki en yüksek artış M6'da gözlenmektedir. Artan köpük maddesi içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliği, yüksek sıcaklık nedeniyle

oluşan gazların salınmasına izin verir ve yüksek sıcaklığın köpük beton üzerindeki etkisini azaltmaktadır (Akca ve Zihnioğlu, 2013). Sonuç olarak, artan köpük maddesi içeriği ile köpük betonun basınç dayanımının arttığı gözlenmektedir.

Köpük betonun basınç dayanımı, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. 900 °C de M7'ye kıyasla %77 ile en yüksek basınç dayanımı düşüşü M9'da gözlenmektedir. Daha önce tartışıldığı gibi, polipropilen lifler betonun basınç dayanımına pek katkıda bulunmaz (Kazmi vd. 2018, 2019). Ancak polipropilen liflerin yüksek sıcaklıklarda erimesi mikroyapıyı etkiler ve köpük betonun basınç dayanımının düşmesine neden olur (Uysal ve Tanyildizi, 2012). Tüm köpük beton numunelerinin basınç dayanımı, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha yüksek gözlenmektedir. Yüksek çimento içeriğine bağlı yüksek beton dayanımının ve köpük ajan tarafından oluşturulan gözenekliliğin birleşik etkisi nedeniyle, M9'a kıyasla basınç dayanımında en yüksek %377'lik artış M18 için gözlenmektedir (Akca ve Zihnioğlu, 2013).

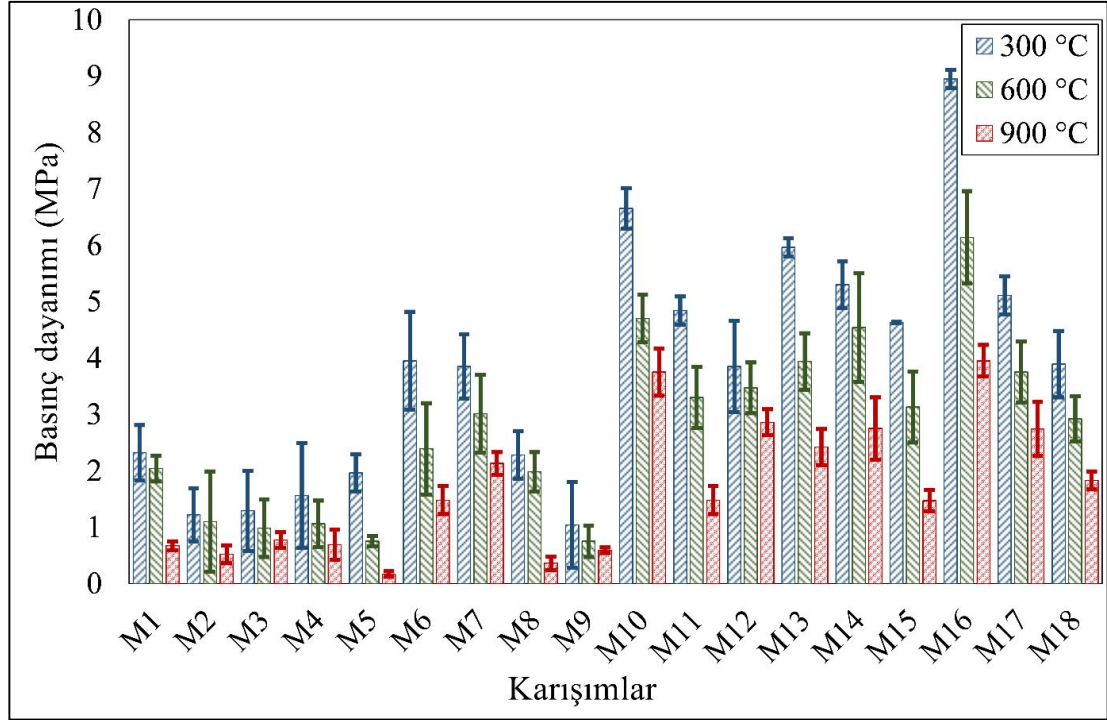


Şekil 4. 13 Hava soğutma tipi sonrasında köpük betonun basınç dayanımları

4.7.4 Su Soğutma Sonrası Basınç Dayanımı

Şekil 4.14, köpük betonun su soğutmasından sonra 300 °C'de 1 ile 9 MPa, 600 °C'de 1 ile 6 MPa ve 900 °C'de 0,2 ile 4 MPa arasında değişen yükseltilmiş bir sıcaklıktaki basınç dayanımını göstermektedir. Sıcaklığın artmasıyla köpük betonun basınç dayanımında bir azalma gözlenmektedir. Köpük betonun su soğutma sonrası basınç dayanımı, su soğutması yoluyla ani sıcaklık değişiminden sonra gelişen gerilmelerden dolayı hava soğutmasından daha düşük gözlenir (Gencel vd. 2021a). Köpük ajan içeriğinin artması ile köpük betonun basınç dayanımında bir artış gözlenmektedir. M1'e kıyasla %218'lik basınç dayanımındaki en yüksek artış M7'de gözlenmektedir. Daha önce tartışıldığı gibi, artan köpük maddesi içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliği, yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan gazların salınmasına izin vererek köpük betonun basınç dayanımını arttırmaktadır (Akca ve Zihnioğlu, 2013).

Köpük betonun basınç dayanımı, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. Polipropilen liflerin yüksek sıcaklıklarda ergitilmesinin köpük betonun mikroyapısı üzerindeki etkisinden dolayı M7'ye kıyasla M8 için %83 ile en yüksek basınç dayanımı düşüşü gözlenmektedir (Uysal ve Tanyildizi, 2012). Köpük beton numunelerinin basınç dayanımı, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha yüksek gözlenmektedir. Basınç dayanımında en yüksek artış %151,7 ile M5'e kıyasla M14'te gözlenmektedir. Yüksek çimento içeriği için köpük beton numunelerinin düşük çimento içeriğine göre daha yüksek basınç dayanımı, köpük ajan tarafından gözenekliliğin ve yüksek çimento içeriği nedeniyle yüksek beton dayanımının birleşik etkisine atfedilir (Akca ve Zihnioğlu, 2013).



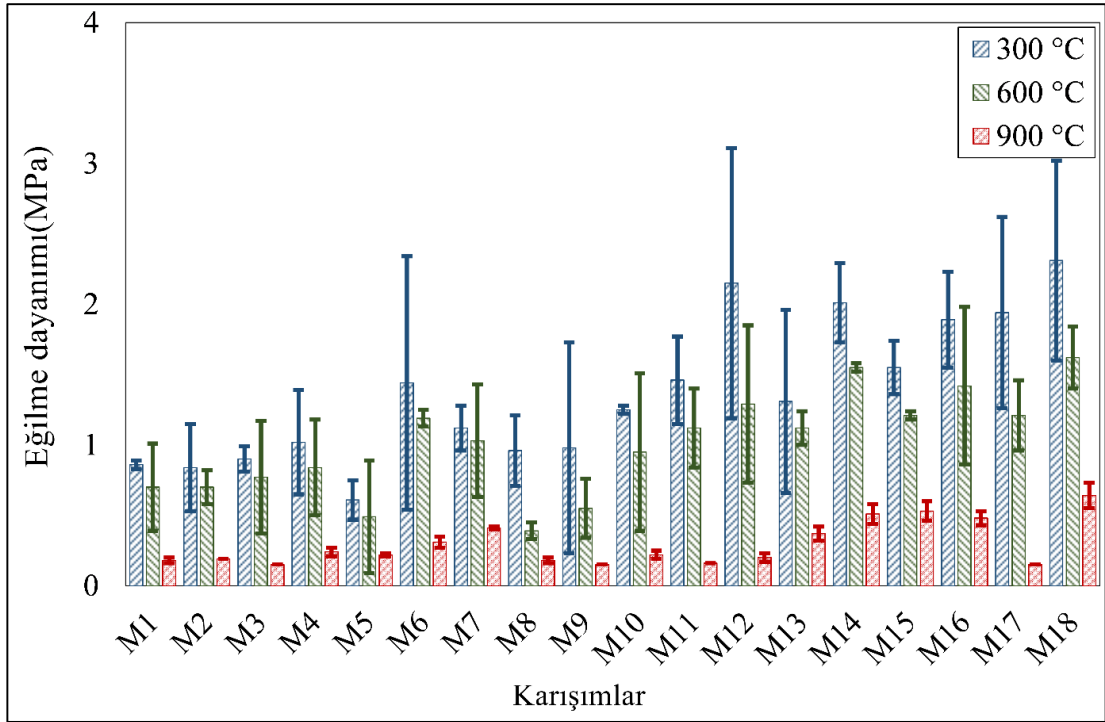
Şekil 4. 14 Su soğutma tipi sonrasında köpük betonun basınç dayanımları

4.7.5 Hava Soğutma Sonrası Eğilme Dayanımı

Şekil 4.15, köpük betonun havayla soğutulduktan sonra yükseltilmiş bir sıcaklıkta, 300 °C'de 0,6 ile 2,3 MPa, 600 °C'de 0,4 ile 1,6 MPa ve 900 °C'de 0,2 ile 0,6 MPa arasında değişen eğilme mukavemetini göstermektedir. Köpük betonun eğilme mukavemetindeki azalma, sıcaklığın artmasıyla gözlenmektedir. Ancak köpük ajan içeriğinin artması ile köpük betonun eğilme mukavemetinde bir artış gözlenmektedir. Artan köpük maddesi içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliği, yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan gazların salınmasına izin verir ve yüksek sıcaklığın köpük beton üzerindeki etkisini azalmaktadır (Akca ve Zihnioğlu, 2013). Sonuç olarak, artan köpük ajan içeriği ile köpük betonun artan eğilme mukavemeti gözlenmektedir. Yüksek çimento, polipropilen elyaf ve köpük maddesi içeriklerinin birleşik etkisi sayesinde, M12'ye kıyasla eğilme mukavemetinde %220'lik en yüksek artış gözlenmektedir.

Köpük betonun mukavemeti, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artışla artmaktadır. Polipropilen liflerin eritilmesinden sonra betonda bir mikrokanal ağının gelişmesi nedeniyle gerilme salınımına katkıda bulunan M10'a kıyasla M12 için %72'lik eğilme mukavemetindeki en yüksek artış gözlenmektedir.

(Han vd. 2005; Kalifa vd. 2001). Tüm köpük beton numunelerinin eğilme mukavemeti, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha yüksek gözlenmektedir. Yüksek çimento içeriğine bağlı yüksek beton dayanımının ve köpük ajanın oluşturduğu gözenekliliğin ve polipropilen liflerin erimesinin birleşik etkisi nedeniyle, M9'a kıyasla eğilme dayanımında en yüksek %327'lik artış M18 için gözlenmektedir (Akca ve Zihnioğlu, 2013).



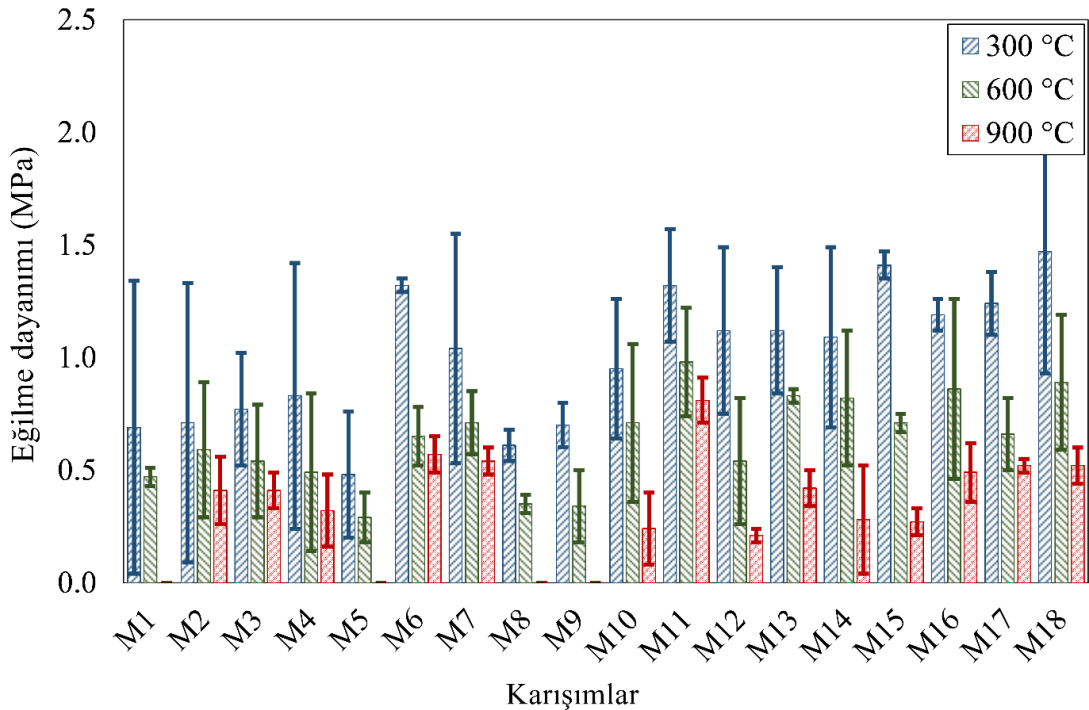
Şekil 4. 15 Hava soğutma tipi sonrasında köpük betonun eğilme dayanımları

4.7.6 Su Soğutma Sonrası Eğilme Mukavemeti

Şekil 4.16, köpük betonun su soğutmasından sonra yükseltilmiş bir sıcaklıkta, 300 °C'de 0,5 ile 1,5 MPa, 600 °C'de 0,3 ile 1 MPa ve 900 °C'de 0 ile 0,8 MPa arasında değişen eğilme mukavemetini göstermektedir. Köpük betonun eğilme mukavemetindeki azalma, sıcaklığın artmasıyla gözlenmektedir. Köpük betonun su soğutmasından sonraki eğilme mukavemeti, su soğutma yoluyla ani sıcaklık değişiminden sonra gelişen gerilmelere atfedilen hava soğutmasından daha düşük gözlenmektedir (Gencel vd. 2021a). Ancak köpük ajan içeriğinin artması ile köpük betonun eğilme mukavemetinde bir artış gözlenmektedir. Artan köpük maddesi içeriği, köpük betonun gözenekliliğini artırarak yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan gazların

salınmasına izin verir ve yüksek sıcaklığın köpük beton üzerindeki etkisini en aza indirmektedir (Akca ve Zihnioğlu, 2013). Sonuç olarak, köpük betonun artan eğilme mukavemeti, artan köpük maddesi içeriği ile fark edilmektedir. Yüksek köpük maddesi, çimento ve polipropilen lif içeriğinin birleşik etkisi nedeniyle, M12'ye kıyasla eğilme mukavemetinde %148'lik en yüksek artış gözlenmektedir.

Köpük betonun eğilme dayanımı, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artışla artmaktadır. Polipropilen liflerin eritilmesinden sonra betonda bir mikra kanal ağının gelişmesinden dolayı gerilim salınımı nedeniyle M10'a kıyasla M11 için %238'lik en yüksek eğilme mukavemeti artışı gözlenmektedir (Han vd. 2005; Kalifa vd. 2001). Tüm köpük beton numunelerinin eğilme dayanımı, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha yüksek gözlenmektedir. Eğilme mukavemetinde en yüksek %183'lük artış, M5'e kıyasla M14 için gözlenmektedir bu da yüksek çimento içeriği nedeniyle yüksek beton mukavemetinin birleşik etkisine ve polipropilen liflerin erimesi ve köpük ajanının varlığı tarafından oluşturulan gözenekliliğe bağlanmaktadır (Akca ve Zihnioğlu, 2013).

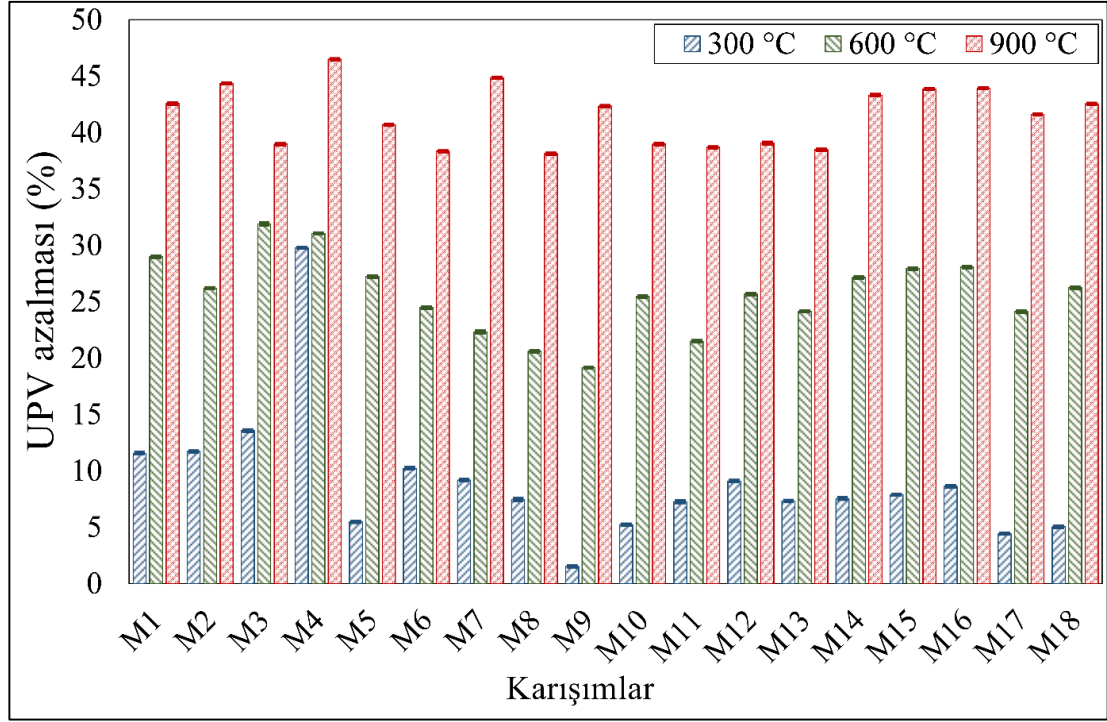


Şekil 4. 16 Su soğutma tipi sonrasında köpük betonun eğilme dayanımları

4.7.7 Hava Soğutma Sonrası Ultrases Geçiş Hızı

Şekil 4.17, hava soğutmasından sonra yükseltilmiş bir sıcaklıkta köpük betonun UGH'sindeki azalmayı göstermektedir. 300 °C'de %2 ile %30, 600 °C'de %19 ile %32 ve 900 °C'de %38 ile %46 arasında değişmektedir. Köpük betonun UGH azalmasındaki artış, sıcaklığın artmasıyla gözlenmektedir. Bununla birlikte, artan köpük ajan içeriği ile köpük betonun UGH azalmasında bir azalma gözlenmektedir. Artan köpük maddesi içeriği ile köpük beton üzerindeki yüksek sıcaklığın azaltılmış etkisinden dolayı, M3'e kıyasla M9 için %89'luk UGH azalmasında en yüksek düşüş gözlenmektedir (Akca ve Zihnioğlu, 2013).

Köpük betonun UGH azalması, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artışla azalmaktadır. UGH'de %83'lük en yüksek azalma, polipropilen liflerin eritilmesinden sonra betondaki bir mikrokanallar ağı yoluyla gerilim salınımı nedeniyle M7'ye kıyasla M9 için gözlenmektedir (Han vd. 2005; Kalifa vd. 2001). Köpük betonun UGH azalması, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğinden daha düşük gözlenmektedir. Yüksek çimento içeriğine bağlı yüksek beton dayanımının birleşik etkisi ve köpük ajanı tarafından oluşturulan gözeneklilik ve polipropilen liflerin erimesi nedeniyle M13'e kıyasla UGH'de %75'lik en yüksek düşüş M13 için gözlenmektedir (Akca ve Zihnioğlu, 2013).



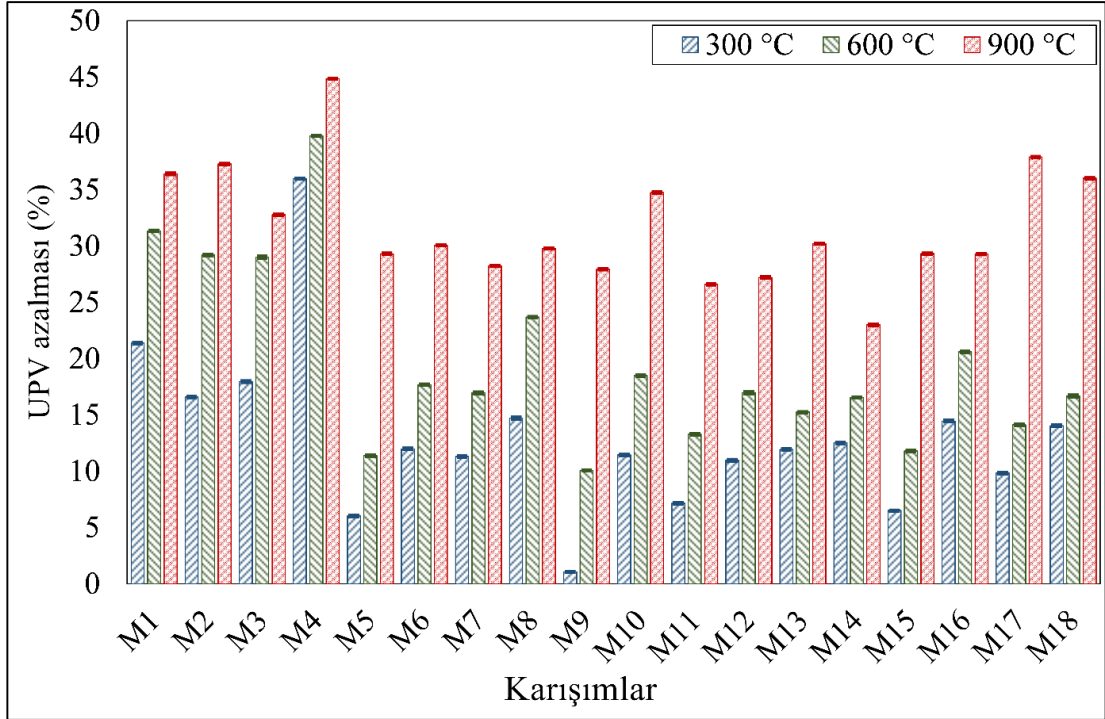
Şekil 4. 17 Hava soğutma tipi sonrası köpük betonun ultrases geçiş hızındaki azalması

4.7.8 Su Soğutma Sonrası Ultrases Geçiş Hızı

Şekil 4.18, suyla soğutulduktan sonra köpük betonun UGH'sindeki, 300 °C'de %1 ile %36, 600 °C'de %10 ile %40 ve 900 °C'de %23 ile %45 arasında değişen UGH'deki azalmayı göstermektedir. Köpük betonun UGH azalmasındaki artış, sıcaklığın artmasıyla gözlenmektedir. Köpük betonun su soğutmasından sonra UGH azalması, su soğutması yoluyla ani sıcaklık değişiminden sonra oluşan gerilmelerden dolayı hava soğutmasından daha yüksek gözlenmektedir (Gencel vd. 2021a). Bununla birlikte, artan köpük ajanı içeriği ile köpük betonun UGH azalmasında bir azalma gözlenmektedir. Artan köpük ajanı içeriği ile köpük beton üzerindeki yüksek sıcaklığın azaltılmış etkisinden dolayı M3'e kıyasla M9 için %94'lük UGH azalmasındaki en yüksek düşüş gözlenmektedir (Akca ve Zihnioğlu, 2013).

Köpük betonun UGH azalması, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artışla azalmaktadır. %91'lik UGH azalmasındaki en yüksek düşüş, polipropilen liflerin ergitilmesinden sonra betondaki bir mikroçatlak ağı tarafından gerilimin serbest bırakılması nedeniyle M7'ye kıyasla M9 için gözlenmektedir (Han vd. 2005; Kalifa vd. 2001). Köpük betonun UGH azalması, diğer tüm değişkenleri

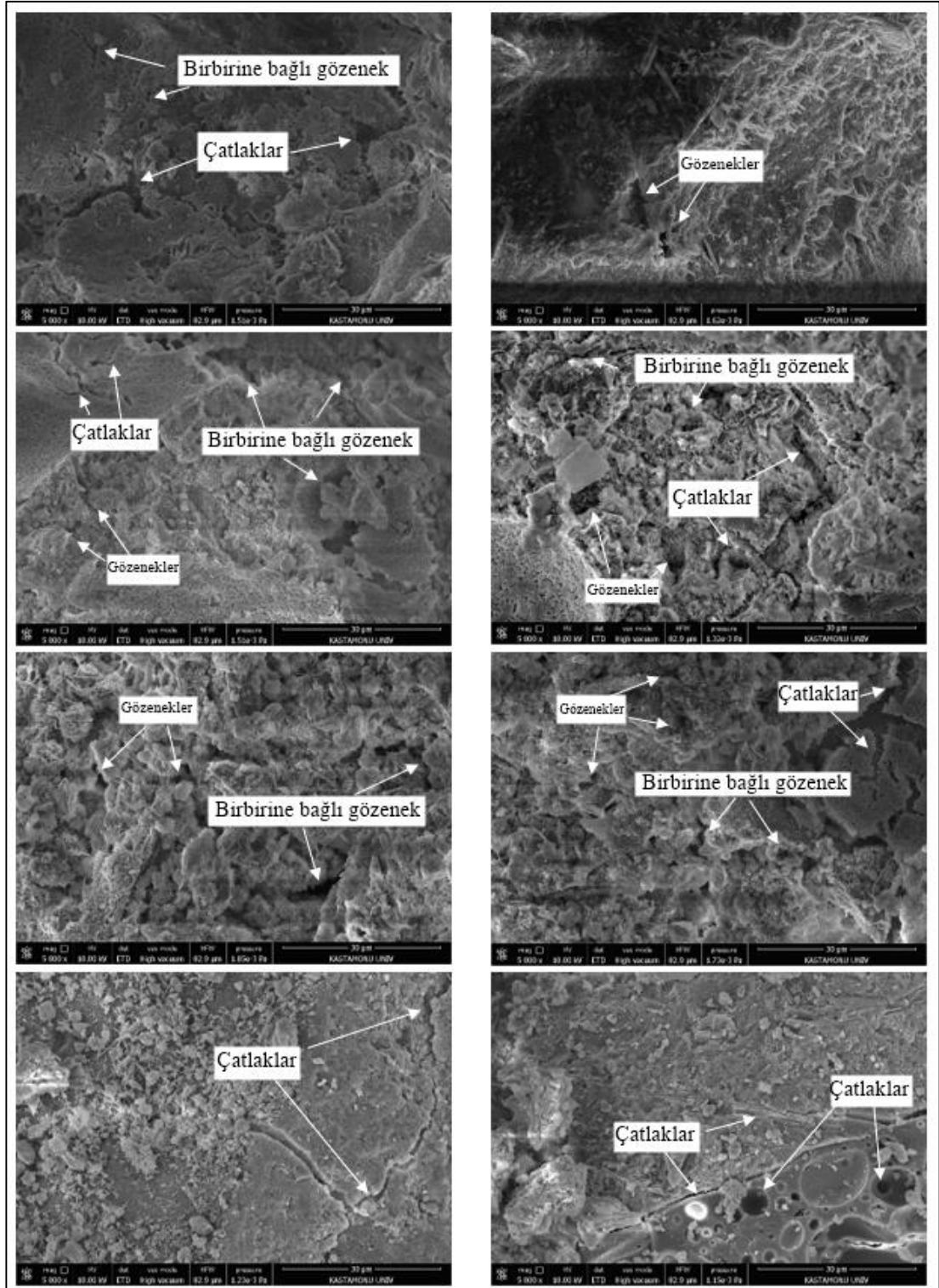
sabit tutarak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğinden daha düşük gözlenmektedir. Yüksek çimento içeriği ve polipropilen liflerin ergimesi ve köpük ajanı tarafından oluşturulan gözeneklilik nedeniyle yüksek beton dayanımının birleşik etkisi nedeniyle M4'e kıyasla UGH'de %67'lik en yüksek düşüş M13 için gözlenmektedir (Akca ve Zihniöglü, 2013).



Şekil 4. 18 Su soğutma tipi sonrasında köpük betonun UGH'deki azalması

4.7.9 Mikroyapı İncelemeleri

Şekil 4.19, hava ve su soğutması altında 900 °C'lik yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonra örneklerin SEM görüntülerini göstermektedir. Görüntüler, betondaki hidratasyon ürünlerinin kimyasal ve fiziksel olarak bağlı suyunun ayrışmasını göstermektedir. Köpük beton numunelerinde kalsiyum silikat fazlarının bozunmasıyla oluşan termal gerilmeler nedeniyle çatlaklar ve birbirine bağlı gözenekler de gözlenmektedir. Geçmiş çalışmalarda betonda benzer tipte termal çatlaklar gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021; Gencel vd. 2021a).

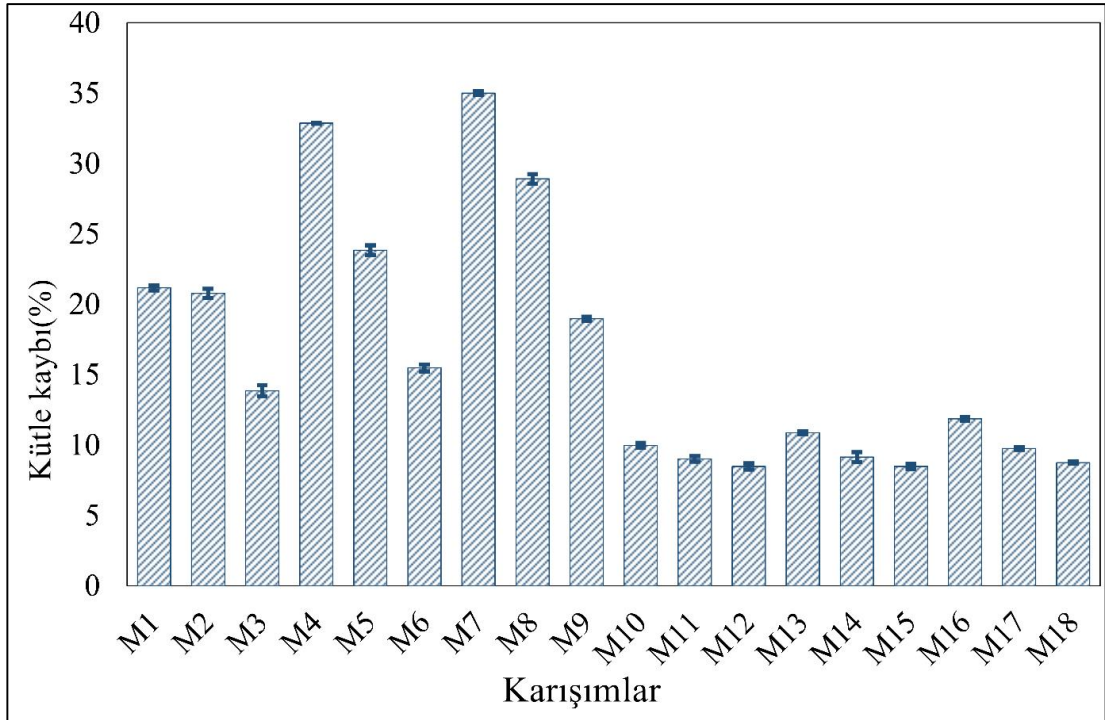


Şekil 4. 19 900 °C sonrası hava ve su soğutma tipi sonrası SEM görüntüleri

4.8 Donma-Çözülme Dayanıklılığının Değerlendirilmesi

4.8.1 Kütle Kaybı

Şekil 4.20, bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin donma-çözülme testinden sonra %8 ile %35 arasında değişen kütle kaybını göstermektedir. Genel olarak, köpük betonun artan köpük maddesi içeriği ile artan gözenekliliğinden kaynaklanan köpük maddesi içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun kütle kaybında bir artış gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021). %65'lik kütle kaybındaki en yüksek artış, Tablo 3.5'te sunulan diğer karışımlara kıyasla artan köpük ajanı içeriği ve düşük çimento içeriğinin birleşik etkisine bağlı olarak artan gözenekliliğe atfedilen M1'e kıyasla M7 için gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021, Yıldız vd. 2016).



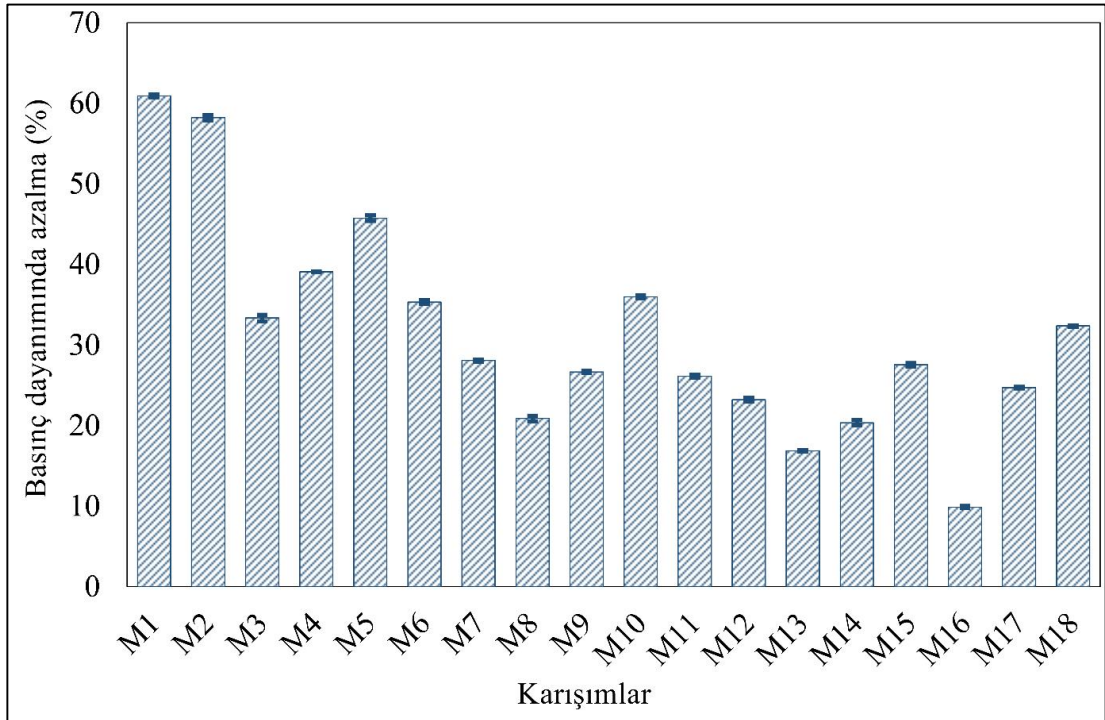
Şekil 4. 20 Köpük beton karışımlarının donma-çözülme sonrası kütle kaybı

Tüm köpük beton numunelerinin kütle kaybı, artan çimento içeriği ile köpük betonun gözenekliliğinin azalması nedeniyle, diğer tüm değişkenler sabit tutularak düşük çimento içeriğine göre yüksek çimento içeriği için daha düşük gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021; Gencel vd. 2021a). M4'e kıyasla kütle kaybında %67'lik en yüksek azalma M13 için gözlenmektedir. Köpük betonun kütle kaybı, diğer tüm

değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. Lifler tarafından donma-çözülme çatlaklarının köprülenmesinden dolayı M4'e kıyasla M6'da %53'lük kütle kaybındaki en yüksek azalma gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021).

4.8.2 Basınç Dayanımındaki Azalma

Şekil 4.21, donma-çözülme testinden sonra bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin basınç dayanımındaki %10 ile %61 arasında değişen azalmayı göstermektedir. Genel olarak köpük ajan içeriğinin artmasıyla köpük betonun basınç dayanımının azalmasında bir azalma gözlenmektedir. Genel olarak köpük betonun gözenekliliği, köpük ajan içeriğindeki artışla artar ve donma-çözülme testi sırasında oluşan gerilmeyi azalmaktadır (Bayraktar vd. 2021). Sonuç olarak, artan köpük ajan içeriği ile köpük betonun basınç dayanımı düşüşünde bir azalma gözlenmektedir.



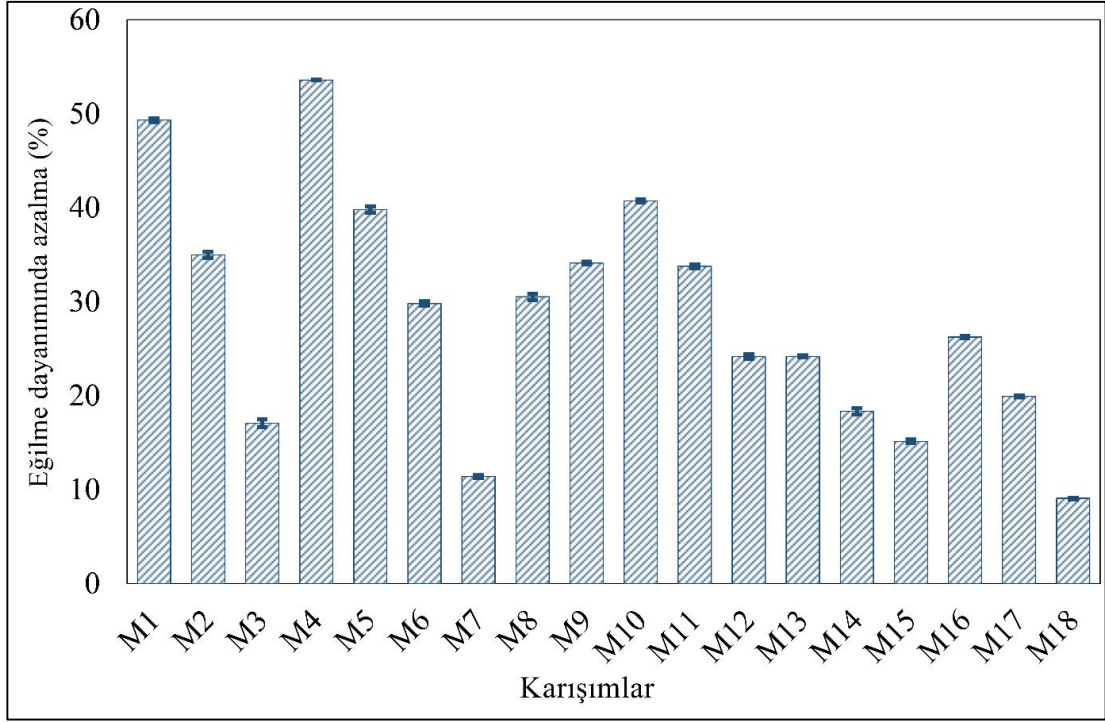
Şekil 4. 21 Köpük beton numunelerinin donma-çözülme sonrası basınç dayanımı azalması

Köpük betonun basınç dayanımındaki azalma, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. M1'e kıyasla %45'lik basınç dayanımı düşüşündeki en yüksek azalma M3 için gözlenmektedir. Genel olarak

polipropilen lifler, donma-çözülme döngüleri nedeniyle çatlak gelişimine direnmektedir ve betonun basınç dayanımındaki azalmayı azaltmaktadır (Bayraktar vd. 2021). Diğer tüm değişkenler sabit tutularak köpük beton numunelerinin basınç dayanımındaki azalma da yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmektedir. Yüksek miktarda çimento, donma-çözülme döngüleri nedeniyle oluşan gerilmelere direnen köpük betonun basınç dayanımını arttırmaktadır (Kazmi vd. 2020a). M7'ye kıyasla basınç dayanımındaki azalmada en yüksek %65'lik düşüş M16'da gözlenmektedir.

4.8.3 Eğilme Mukavemetinde Azalma

Şekil 4.22, donma-çözülme testinden sonra bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin eğilme mukavemetindeki %9 ile %54 arasında değişen azalmayı göstermektedir. Genel olarak, köpük ajan içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun eğilme mukavemetindeki azalmada bir azalma gözlenmektedir. M3'e kıyasla %77 ile eğilme mukavemeti düşüşündeki en yüksek düşüş M9 için gözlenmektedir. Köpük maddesi içeriğindeki bir artış, köpük betonun gözenekliliğini artırarak donma-çözülmeye maruz kalmadan kaynaklanan stres oluşumunu en aza indirmektedir ve donma-çözülme etkisinden dolayı köpük betonun eğilme mukavemetinin azalmasına neden olmaktadır (Bayraktar vd. 2021).



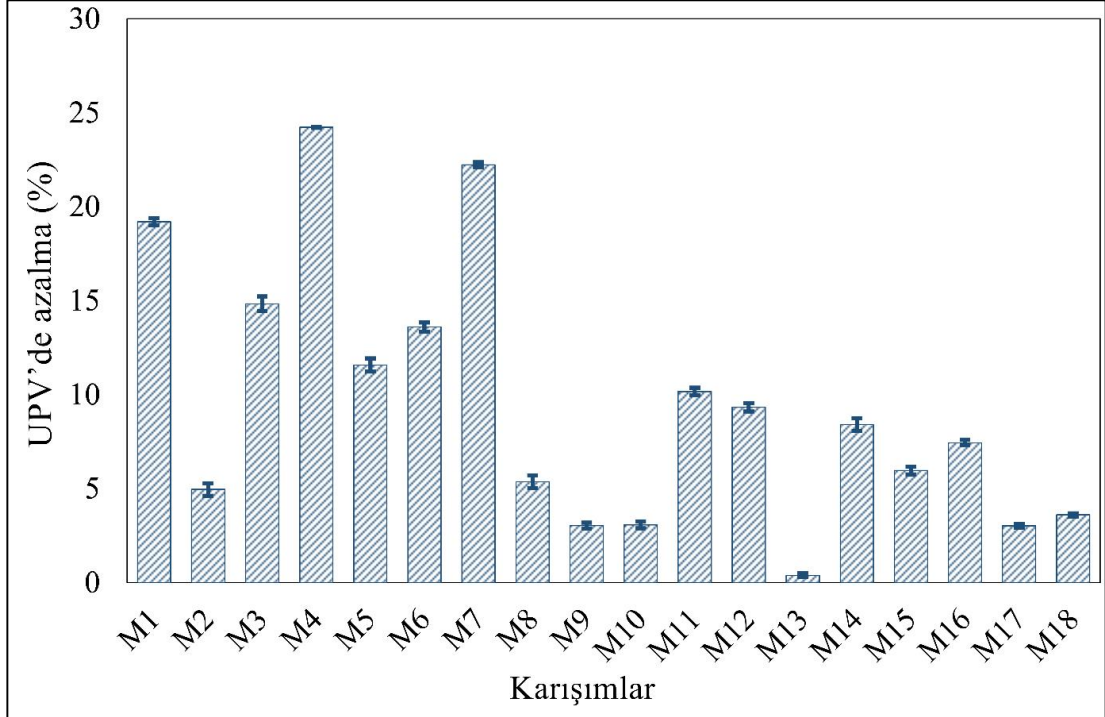
Şekil 4. 22 Köpük beton numunelerinin donma-çözülme sonrası eğilme mukavemetindeki azalma

Köpük betonun eğilme mukavemetindeki azalma, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğindeki artışla azalmaktadır. Polipropilen liflerin donma-çözülme çatlağı gelişimine karşı direnci nedeniyle, M16'ya kıyasla %65'lik eğilme mukavemetindeki en yüksek azalma M18 için gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021). Köpük beton numunelerinin eğilme mukavemetindeki azalma, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmektedir. Yüksek çimento içeriği nedeniyle yüksek beton dayanımının birleşik etkisine, yüksek köpük madde içeriği nedeniyle yüksek gözenekliliğe ve çatlak oluşumuna karşı yüksek direncin birleşik etkisine atfedilen M9'a kıyasla eğilme dayanımı azalmasında en yüksek %73'lük azalma M18 için gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021; Kazmi vd. 2020a).

4.8.4 Ultrases Geçiş Hızındaki Azalma

Şekil 4.23, %0,4 ile %24 arasında değişen, donma-çözülme testinden sonra bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin UGH'sindeki azalmayı göstermektedir. Genel olarak, köpük ajan içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun UGH'sindeki azalmada bir artış gözlenmektedir. Örneğin, artan köpük maddesi içeriği

ile köpük betonun artan gözenekliliğinden dolayı M16'ya kıyasla M16 için %142'lik UGH azalmasında en yüksek artış gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021).



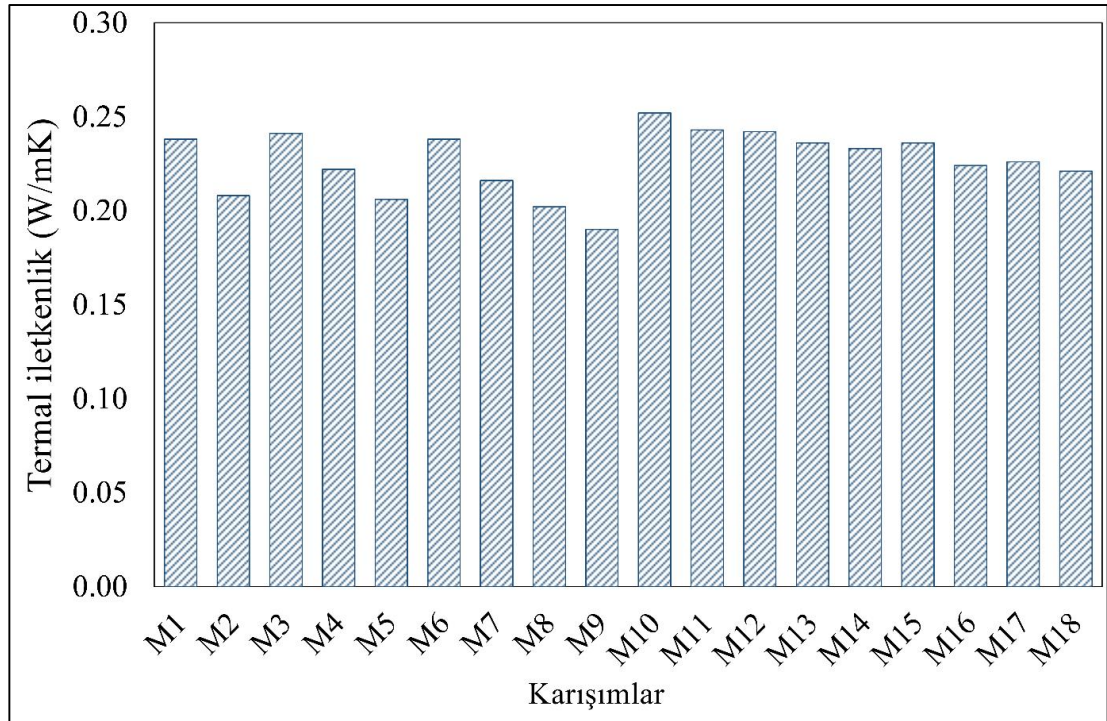
Şekil 4. 23 Köpük beton numunelerinin donma-çözülme sonrasında UGH azalması

Köpük betonun UGH azalması, diğer tüm değişkenleri sabit tutarak polipropilen lif içeriğindeki artışla azalmaktadır. M7'ye kıyasla %86'lık UGH düşüşündeki en yüksek düşüş M9 için gözlenmiştir. Genel olarak polipropilen lifler, donma-çözölmeye maruz kalma nedeniyle çatlakların gelişmesine direnmektedir ve betonun UGH azalmasını azaltmaktadır (Bayraktar vd. 2021). Köpük beton numunelerinin UGH azalması, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha düşük gözlenmiştir. Yüksek miktarda çimento, köpük betonun gözenekliliğini azaltarak UGH'deki azalmayı azaltmaktadır. UGH'de %98'lik en yüksek düşüş, M4'e kıyasla M13 için gözlenmektedir.

4.9 Isıl İletkenliklerin Değerlendirilmesi

Şekil 4.24, bu çalışmada ele alınan tüm köpük beton numunelerinin 0,19 ile 0,25 W/mK arasında değişen termal iletkenliğini göstermektedir. Genel olarak köpük betonun ısıl iletkenliğinde, köpük ajan içeriğindeki artışla birlikte köpük betonun daha

yüksek gözenekliliğine bağlı olarak, köpük ajan içeriğindeki artış gözlenmektedir (Bayraktar vd. 2021). 50 kg/m^3 köpük ajan içeriğine sahip köpük beton karışımları için, 40 kg/m^3 köpük ajan içeriğine sahip köpük beton karışımlarına göre ısı iletkenlikteki azalma %1 ile %7 arasında değişmektedir. Benzer şekilde, 60 kg/m^3 köpük ajan içeriğine sahip köpük beton karışımları için, 40 kg/m^3 köpük ajan içeriğine göre termal iletkenlikteki azalma %3 ile %21 arasında değişmektedir. M3'e kıyasla %21'lik termal iletkenlikte en yüksek azalma M9 için gözlenmektedir. Aynı köpük beton karışımı, köpük ajan içeriğindeki artışla gözeneklilikte en yüksek artışı göstermektedir.



Şekil 4. 24 Köpük beton karışımlarının termal iletkenlikleri

Köpük betonun ısı iletkenliği, diğer tüm değişkenler sabit tutularak polipropilen lif içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. Polipropilen liflerin eklenmesinden sonra boşlukların oluşması ve köpük betonun gözenekliliğinin artması nedeniyle M7'ye kıyasla M9 için %12'lik en yüksek ısı iletkenlik düşüşü gözlenmektedir (Kazmi vd. 2018, 2019). Köpük beton numunelerinin ısı iletkenliği, diğer tüm değişkenler sabit tutularak, yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha yüksek gözlenmektedir. Yüksek miktarda çimento, gözenekliliği azaltır ve köpük betonun ısı iletkenliğini artırır. M9'a kıyasla ısı iletkenlikte en yüksek %16'lık artış M18'de

görülmektedir. Bu çalışmada gözlemlenen ısı iletkenliğin sonuçları, köpük betonun gözenekliliğinin sonuçlarıyla uyumludur.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmaya dayanarak, aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır:

- Taban külünün belirgin bir su emme eğilimi vardır ve köpük betonun işlenebilirliğini azaltmaktadır. Benzer şekilde, köpük betona polipropilen lif eklenmesi, üç boyutlu ağ yapısı ile sonuçlanır ve lifleri örtmek için çimento macunu tüketerek lifsiz köpük betondan daha düşük yayılma sağlamaktadır. Bununla birlikte, köpük maddesi miktarındaki bir artış, azalan katı içeriği nedeniyle köpük betonun yayılmasını açıkça arttırmaktadır. Çimento içeriğindeki bir artış taban külü miktarını azaltır ve ayrıca köpük beton yayılmasının artmasına neden olmaktadır.
- Bu çalışmada, ince agrega olarak taban külü içeren tüm köpük beton karışımları, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI 213R-14) yönergelerine göre orta dayanımlı beton olarak kullanılabilir. Köpük maddenin artması ile katı içeriğinin azalmasından dolayı köpük betonun kütle yoğunluğunda bir azalma gözlenmektedir. İnce agregalar olarak taban külü, çimentodan daha hafiftir ve sonuç olarak, düşük çimento/ince agrega oranı, köpük betonun kuru birim hacim ağırlığını azaltmaktadır. Köpük betonun kütle yoğunluğu, polipropilen lif içeriğindeki artışla birlikte azalmaktadır. Bununla birlikte, yüksek miktarda çimento, gözenekleri doldurarak köpük betonun kütle yoğunluğunu arttırmaktadır.
- Yüksek boşluk oranı ve azalan katı içeriği nedeniyle köpük ajan içeriğinin artması ile köpük betonun porozite, su emme ve kapileritesinde bir artış gözlenmektedir. Gözenekli bir malzeme olan taban külü, düşük çimento/ince agrega oranı ile köpük betonun gözenekliliğine de katkıda bulunmaktadır. Polipropilen lif içeriğindeki artışla köpük betonun porozite, su emme ve kapilerite artar. Bununla birlikte, bu olay, düşük çimento içerikli karışımlarda, yüksek çimento içerikli karışımlardan daha belirgin gözlenmektedir. Yüksek miktarda çimento, gözenekleri doldurarak köpük betonun porozitesini, su emilimini ve kapileritesini azaltır.
- Köpük maddesi miktarındaki artış, köpük betonun 7 ve 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarını net olarak azaltmaktadır. Bununla birlikte, liflerin çatlakları

köprülmesi nedeniyle polipropilen lif içeriğinin artmasıyla köpük betonun eğilme mukavemeti artmaktadır. Köpük betonun basınç ve eğilme dayanımları da yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre çok daha yüksek gözlenmektedir.

- Köpük ajan içeriğinin artması ile köpük betonun ısı iletkenliğinde bir azalma gözlenmektedir. M3'e kıyasla %21'lik termal iletkenlikte en yüksek azalma M9 için gözlenmektedir. Aynı köpük beton karışımı, köpük ajan içeriğindeki artışla gözeneklilikte en yüksek artışı göstermektedir. Köpük betonun ısı iletkenliği de polipropilen lif içeriğindeki artışla azalmaktadır. Ancak yüksek miktarda çimento gözenekliliği azaltmaktadır ve köpük betonun ısı iletkenliğini arttırmaktadır.

- Erken yaşta hızlı serbest su kaybı nedeniyle köpük betonun kuruma büzülmesinde ilk 14 günde keskin bir artış gözlenmektedir. Köpük ajan içeriğinin artması ile köpük betonun kuruma büzülmesinde bir artış gözlenmektedir. Köpük beton numunelerinin kuruma büzülmesi de yüksek çimento içeriği için düşük çimento içeriğine göre daha yüksek gözlenmektedir. Ancak, polipropilen lif içeriğinin artmasıyla köpük betonun kuruma büzülmesi azalmaktadır.

- Köpük ajanı ve polipropilen lif içeriğinin artması ile köpük betonun sülfat atağına bağılı genleşmesinde bir artış gözlenmektedir. Numunelerin SEM görüntüleri, sülfat maruziyeti nedeniyle etrenjit ve çatlamanın varlığını göstermektedir. Ancak yüksek miktarda çimento, köpük betonun gözenekliliğini azaltarak genleşmeyi azaltmaktadır. Sonuç olarak, sülfat ortamına maruz bırakılan köpük beton numunelerinde düzgün dağılımlı ve daha az etrenjit iğne kristalleri gözlenmektedir.

- Hava ve su soğutması ile yüksek sıcaklıklarda, köpük ajan içeriğinin artmasıyla köpük betonun kütle kaybında artış, basınç ve eğilme dayanımlarında azalma gözlenmektedir. Artan köpük maddesi içeriği ile köpük betonun artan gözenekliliği, yüksek sıcaklık nedeniyle oluşan gazların salınmasına izin vermektedir ve yüksek sıcaklığın köpük beton üzerindeki etkisini azaltmaktadır. Tüm köpük beton numunelerinde daha yüksek basınç ve eğilme dayanımları ile daha düşük kütle kaybı, düşük çimento içeriğine göre yüksek çimento içeriği için de gözlenmektedir. Bununla birlikte, polipropilen lif içeriğinin artmasıyla köpük betonun kütle kaybı artmaktadır.

Numunelerin yüksek sıcaklığa maruz bırakıldıktan sonraki SEM görüntüleri, kalsiyum silikat fazlarının bozunmasıyla oluşan termal stresler nedeniyle çatlakları ve birbirine bağlı gözenekleri göstermektedir.

- Donma-çözülme testi sırasında köpük betonun basınç ve eğilme dayanımlarındaki azalma, köpürtücü ajan, polipropilen lif ve çimento içeriğinin artmasıyla azalmaktadır. Bu nedenle, yüksek miktarda köpük ajanı, polipropilen lif ve çimento içeriği, donma-çözülme ortamında köpük beton numunelerinin mekanik özellikleri üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 226. (1987). *Use of fly ash in concrete*.
- Akca, A. H., & Zihnioğlu, N. Ö. (2013). High performance concrete under elevated temperatures. *Construction and building materials*, 44, 317-328.
- Albuquerque, M. C., Balbo, J. T., Sansone, E. C., & Pinto, P. C. (2011). Fracture characterization of roller compacted concrete mixtures with blast furnace slag and industrial sand. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(4), 244.
- Alterra, A., Bayraktar, O., Bodur, B., & Kaplan, G. (2020). *Investigation of Properties of Concrete Produced with Recycled Aggregates*. 26-34.
- Amran, Y. M., Farzadnia, N., & Ali, A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; a review. *Construction and Building Materials*, 101, 990-1005.
- Andrade, L. B., Rocha, J. C., & Cheriaf, M. (2009). Influence of coal bottom ash as fine aggregate on fresh properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 23(2), 609-614.
- Atabey, V. (2018). *Mermer atıklarından köpük beton blok üretimi* [Master's Thesis].
- Bayraktar, O., Kaplan, G., Gencil, 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>
- 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.
- Bekaroğlu, M. (2012). *Kompozit yapıda pomza agregası içeren kopuk betonun özellikleri ve teknik parametrelerinin irdelenmesi* [PhD Thesis]. SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Binici, H., Shah, T., Aksogan, O., & Kaplan, H. (2008). Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of materials processing technology*, 208(1-3), 299-308.
- Bodur, B., Bayraktar, O., & Kaplan, G. (2021). *Kalsiyum Alüminat Çimentolarının Köpük Beton Üretiminde Kullanımının İncelenmesi*.
- Chica, L., & Alzate, A. (2019). Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*, 200, 637-647.
- Çobanlı, M. R. (1993). *Isı Direnci Yüksek Hafif Yapı Malzemesi Üretimi* [PhD Thesis]. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Dakman, M. H. (2017). *Köpük betonda yüksek sıcaklık etkisi* [Master's Thesis]. ESOGÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., & Kuru, M. (2015). Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri. *Ulusal beton kongresi, Antalya*, 93-102.
- Gencil, O., Benli, A., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Sutcu, M., & Elabade, W. A. T. (2021a). Effect of waste marble powder and rice husk ash on the microstructural, physico-mechanical and transport properties of foam concretes exposed to high temperatures and freeze–thaw cycles. *Construction and Building Materials*, 291, 123374. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123374>
- Gencil, O., del Coz Diaz, J. J., Sutcu, M., Koksall, F., Alvarez Rabanal, F. P., Martinez-Barrera, G., & Brostow, W. (2014). Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results. *Energy and Buildings*, 70, 135-144. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.047>
- Gencil, O., Bayraktar, O.Y., Kaplan, G., Benli, A., Martínez-Barrera, G., Brostow, W., Tek, M., & Bodur, B. (2021b). 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>
- Han, C.-G., Hwang, Y.-S., Yang, S.-H., & Gowripalan, N. (2005). Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement. *Cement and concrete research*, 35(9), 1747-1753.
- Huang, W.-H., & Lovell, Cw. (1990). Bottom ash as embankment material. İçinde *Geotechnics of waste fills—Theory and practice*. ASTM International.
- Jones, M. R., & McCarthy, A. (2005). 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/mac.2005.57.1.21>
- Kalifa, P., Chene, G., & Galle, C. (2001). High-temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres: From spalling to microstructure. *Cement and concrete research*, 31(10), 1487-1499.
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y.-F., & Patnaikuni, I. (2018). Effect of macro-synthetic fibers on the fracture energy and mechanical behavior of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 189, 857-868.
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y.-F., Patnaikuni, I., Zhou, Y., & Xing, F. (2019). Axial stress-strain behavior of macro-synthetic fiber reinforced recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 97, 341-356.
- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y.-F., Patnaikuni, I., Zhou, Y., & Xing, F. (2020a). Effect of different aggregate treatment techniques on the freeze-thaw and sulfate resistance of recycled aggregate concrete. *Cold Regions Science and Technology*, 178, 103126.

- Kazmi, S. M. S., Munir, M. J., Wu, Y.-F., Patnaikuni, I., Zhou, Y., & Xing, F. (2020b). Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: A comparative evaluation. *Construction and Building Materials*, 264, 120284.
- Kim, H.-K., & Lee, H.-K. (2011). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 1115-1122.
- Koksal, F., Gencel, O., Brostow, W., & Lobland, H. E. H. (2012). Effect of high temperature on mechanical and physical properties of lightweight cement based refractory including expanded vermiculite. *Materials Research Innovations*, 16(1), 7-13. <https://doi.org/10.1179/1433075X11Y.0000000020>
- Landva, A. O., & Clark, J. I. (1990). Geotechnics of waste fill. İçinde *Geotechnics of waste fills—Theory and practice*. ASTM International.
- Maier, P. L., & Durham, S. A. (2012). Beneficial use of recycled materials in concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 29, 428-437.
- Muthusamy, K., Rasid, M. H., Jokhio, G. A., Mokhtar Albshir Budiea, A., Hussin, M. W., & Mirza, J. (2020). Coal bottom ash as sand replacement in concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 236, 117507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117507>
- Nadig, V. R., Sanjith, J., Ranjith, A., & Kiran, B. M. (2015). Bottom Ash as Partial Sand Replacement in Concrete-A Review. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN*, 2278-1684.
- Nambiar, E. K., & Ramamurthy, K. (2006). Influence of filler type on the properties of foam concrete. *Cement and concrete composites*, 28(5), 475-480.
- Nambiar, E. K., & Ramamurthy, K. (2007). Air-void characterisation of foam concrete. *Cement and concrete research*, 37(2), 221-230.
- Nambiar, E. K., & Ramamurthy, K. (2009). Shrinkage behavior of foam concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 21(11), 631-636.
- Neves, R. D., & Fernandes de Almeida, J. C. O. (2005). Compressive behaviour of steel fibre reinforced concrete. *Structural concrete*, 6(1), 1-8.
- 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.
- 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*, 2015.
- Ören, O. H. (2017). *Granüle yüksek fırın cürufunun köpük beton özelliklerine etkisi* [Master's Thesis]. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Özkan, Ö., Yüksel, I., & Muratoğlu, Ö. (2007). Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag. *Waste management*, 27(2), 161-167.
- Raj, A., Sathyan, D., & Mini, K. M. (2019). Physical and functional characteristics of foam concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 221, 787-799.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E. K., & Ranjani, G. I. S. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and concrete composites*, 31(6), 388-396.
- Roslan, A. F., Awang, H., & Mydin, M. A. O. (2013). Effects of various additives on drying shrinkage, compressive and flexural strength of lightweight foamed concrete (LFC). *Advanced Materials Research*, 626, 594-604.
- Serin, G., Çankıran, O., Başığit, C., Taş, H. H., & Fenkli, M. (2007). Normal, Hafif ve Yarı Hafif Beton Blokların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 3(1), 15-22.
- Singh, M., & Siddique, R. (2014). Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 50, 246-256.
- Suksawang, N., Wtaife, S., & Alsabbagh, A. (2018). *Evaluation of elastic modulus of fiber-reinforced concrete*.
- Sun, C., Zhu, Y., Guo, J., Zhang, Y., & Sun, G. (2018). Effects of foaming agent type on the workability, drying shrinkage, frost resistance and pore distribution of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 833-839.
- Toprak, M. U. (2011). Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyon ile Geopolimer Üretilmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi Cilt: XXII*, 2.
- Tuzlak, F. (2017). *Taze beton reolojisinin köpük beton özelliklerine etkisi*. Süleyman Demirel Üniversitesi.
- Uysal, M., & Tanyildizi, H. (2012). Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network. *Construction and Building Materials*, 27(1), 404-414.
- Valcuende, M., Benito, F., Parra, C., & Miñano, I. (2015). Shrinkage of self-compacting concrete made with blast furnace slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 76, 1-9.
- Valore, R. C. (1954). Cellular concrete part 1: Compositon and method of production. *ACI Journal*, 50, 773-796.
- Yaprak, H., & Kaplan, G. (2013). Farklı kür koşullarının taban külü katkılı geopolimerlerin termal ve mekanik özelliklerine etkisi. *TÜBAV Bilim Dergisi*, 9(3), 41-51.

- Yıldırım, A. N. (2007). *Pomza ve uçucu kül kullanılarak imal edilen hafif betonların agresif su ortamlarında mekanik özelliklerinin araştırılması* [PhD Thesis]. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yıldızıl, S. A., Kaplan, G., & Öztürk, A. U. (2016). Cost optimization of mortars containing different pigments and their freeze-thaw resistance properties. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016.
- Yüksel, İ., & Bilir, T. (2007). Usage of industrial by-products to produce plain concrete elements. *Construction and Building Materials*, 21(3), 686-694.
- Yüksel, İ., Özkan, Ö., & Bilir, T. (2006). Kazanaltı külü ile briket üretimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(3).
- Yüksel, İ., Siddique, R., & Özkan, Ö. (2011). Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Construction and building materials*, 25(2), 967-972.
- Zhang, Y., Chen, D., Liang, Y., Qu, K., Lu, K., Chen, S., & Kong, M. (2020). Study on engineering properties of foam concrete containing waste seashell. *Construction and Building Materials*, 260, 119896.