

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

**KÖPÜK BETONLARIN MEKANİK VE YALITIM
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

DOKTORA TEZİ

HÜSEYİN GÜVEN

DENİZLİ, EYLÜL - 2023

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



KÖPÜK BETONLARIN MEKANİK VE YALITIM
ÖZELLİKLERİNİN GELİŞTİRİLMESİ

DOKTORA TEZİ

HÜSEYİN GÜVEN

DENİZLİ, EYLÜL - 2023

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

HÜSEYİN GÜVEN

ÖZET

**KÖPÜK BETONLARIN MEKANİK VE YALITIM ÖZELLİKLERİNİN
GELİŞTİRİLMESİ
DOKTORA TEZİ
HÜSEYİN GÜVEN
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. MEHMET İNEL)**

DENİZLİ, EYLÜL - 2023

Çalışma traverten atıkları, uçucu kül gibi farklı malzemelerle üretilen köpük betonun mekanik ve yalıtım özelliklerini araştırmayı amaçlamaktadır. Köpük beton üretiminde atık malzeme oranı, su/bağlayıcı oranı ve lif kullanımının etkileri dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Köpük beton üretiminde çimento, UK ve TA kullanılarak ikili ve üçlü kompozitler kullanılmıştır. Su/bağlayıcı 0.50, 0.40 ve 0.35 oranları, birim hacim ağırlık (BHA) için 450 ile 1200g/dm³ değerleri arasında değişen numuneler üretilmiştir. Üçlü kompozit aşamalarında 0.35 su/bağlayıcı ile 600 ve 800 g/dm³ birim hacim ağırlıktaki numuneler kullanılmıştır. Yapılan denemeler sonucunda BHA düştükçe numunelerin basınç dayanımlarının da düştüğü görülmüştür. UK içeren numunelerin basınç dayanımlarının TA içeren numunelere göre yaklaşık %95 daha yüksek olduğu gözlenirken TA içeren numunelerin ısı iletim katsayıları UK içeren numunelere göre yaklaşık %23 daha düşüktür. Farklı birim hacim ağırlıklarda üretilen numunelerde çimento oranı azaldıkça basınç dayanımlarının beklenildiği gibi azaldığı, fakat kuruma büzülmelerinin de ciddi anlamda azaldığı görülmüştür. Lifli köpük beton üretiminde kullanılan cam elyafların, beklenilen aksine basınç dayanımlarını düşürdüğü fakat ısı iletim katsayılarına olumlu katkı yaptığı belirlenmiştir. Üçlü kompozit lifli üretilen numunelerde ise bağlayıcı kütlelerinin %0.5'i oranında cam elyaf içeren numunelerde basınç dayanımları şahit numuneye göre daha yüksek çıkarken ısı iletim katsayı değerlerinin de daha düşük çıktığı görülmüştür. Su oranı düştükçe basınç dayanımlarının yükseldiği, ısı iletim katsayılarının ise düştüğü gözlemlenmiştir. Bu sonuç, köpük beton üretiminde optimum su/bağlayıcı oranını seçmenin ne kadar önemli olduğunu ortaya koymuştur. Yüksek ısı veya basınç işlemi gerektirmeyen ve atık malzeme kullanımı ile üretilen köpük beton enerji verimliliği ve çevre dostu olması yönü ile de önemli katkılar sunmaktadır.

ANAHTAR KELİMELEER: Köpük Beton, Traverten Atığı, Uçucu Kül, Isıl İletkenlik Katsayısı, Kuruma Büzülmesi, Cam Elyaf Lif

ABSTRACT

IMPROVEMENT OF MECHANICAL AND INSULATION PROPERTIES OF FOAM CONCRETE

PH.D THESIS

HÜSEYİN GÜVEN

PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE

CIVIL ENGINEERING

(SUPERVISOR: PROF. DR. MEHMET İNEL)

DENİZLİ, SEPTEMBER 2023

The study aims to investigate the mechanical and insulation properties of foam concrete produced with different materials such as travertine waste and fly ash. An evaluation was made by considering the waste material ratio, water/binder ratio and the effects of fiber use in foam concrete production. In the production of foam concrete, binary and triple composites using cement, fly ash (FA) and travertine waste (TW) were used. Samples were produced with water/binder ratios of 0.50, 0.40 and 0.35, with values ranging from 450 to 1200g/dm³ for unit weight density. Samples with density of 600 and 800 g/dm³ with 0.35 water/binder were used in the triple composite stages. As a result of the experiments, it was seen that as the density decreased, the compressive strength of the samples also decreased. It is observed that the compressive strength of samples containing FA is approximately 95% higher than that of samples containing TW, while the thermal conductivities of samples containing TW are approximately 23% lower than that of samples containing FA. It was observed that as the cement ratio decreased in the samples produced in different densities, the compressive strength decreased as expected, but the drying shrinkage also decreased significantly. It has been determined that the glass fibers used in the production of fiber foam concrete reduce the compressive strength, contrary to expectations, but contribute positively to the thermal conductivities. In the samples produced with triple composite fibers, it was observed that the compressive strengths of the samples containing glass fiber at the rate of 0.5% of the binder mass were higher than the reference sample values, while the thermal conductivity values were lower. It has been observed that as the water content decreases, compressive strength increases, and thermal conductivities decrease. This result revealed the importance of choosing the optimum water/binder ratio in foam concrete production. Foam concrete, which does not require high heat or pressure treatment and is produced using waste materials, also offers significant contributions in terms of energy efficiency and environmental friendliness.

KEYWORDS: Foam Concrete, Travertine Waste, Fly Ash, Thermal Conductivity, Drying Shrinkage, Fiber

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	v
TABLO LİSTESİ	vii
KISALTMALAR LİSTESİ.....	x
ÖNSÖZ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI	7
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	14
3.1 Materyal.....	14
3.1.1 Çimento.....	14
3.1.2 Traverten Atığı.....	14
3.1.3 Uçucu Kül	17
3.1.4 Köpük Ajanı.....	18
3.1.5 Cam Elyaf Lif	18
3.1.6 Kullanılan Kalıplar ve Cihazlar	19
3.1.6.1 Kalıplar.....	19
3.1.6.2 Cihazlar	20
3.2 Yöntem	22
3.2.1 Travertenin Puzolanik Aktivite İndeksinin Bulunması	22
3.2.2 Kıvam Denemeleri	27
3.2.3 Köpük Beton Üretimi.....	30
3.2.3.1 İkili Kompozitlerin Üretimi	33
3.2.3.2 Üçlü Kompozitlerin Üretimi	41
3.2.3.3 Lifli Köpük Betonların Üretimi	43
3.2.4 Testler	45
3.2.4.1 Basınç Dayanımı	45
3.2.4.2 Isıl İletkenlik Katsayısı Ölçümü.....	47
3.2.4.3 Su Emme Deneyi.....	48
3.2.4.4 Kuruma Büzülmesi Ölçümleri	49
4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	51
4.1 Basınç Dayanımı Sonuçları	51
4.2 Su Emme Deneyi Sonuçları.....	59
4.3 Isıl İletkenlik Katsayısı Sonuçları	63
4.4 Lifli Köpük Betonların Test Sonuçları	71
4.5 Maliyet Analizi	72
4.6 Sonuçların Yorumlanması	74
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	88
5.1 Sonuçlar	89
5.2 Çalışmanın Kısıtları.....	91
5.3 Öneriler.....	92
6. KAYNAKLAR.....	93
7. EKLER.....	101
EK A Ortalama Sonuçlar	101

8. ÖZGEÇMİŞ.....	108
-------------------------	------------

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1: Traverten atıklarının kullanılabilir hale getirilmesi.....	15
Şekil 3.2: Traverten atıklarının mikro yapısı: (A) SEM ; (B) EDS	16
Şekil 3.3: Kullanılan kalıplar	19
Şekil 3.4: Kullanılan cihazlar (1: Üç noktalı eğilme aparatı; 2: Basınç aparatı; 3: Isıl iletkenlik ölçüm cihazı; 4: Kuruma kaynaklı büzülme test cihazı).....	21
Şekil 3.5: Toz haline getirilen traverten atığı	23
Şekil 3.6: Karışım suyunun sisteme verilmesi.....	24
Şekil 3.7: Mikserde karıştırılan numune.....	25
Şekil 3.8: Numunelerin kalıba yerleştirilmesi	26
Şekil 3.9: Basınç dayanımı tayini	26
Şekil 3.10: 1: Ace450 oranı=%0.4 çok koyu kıvam; 2: Ace450 oranı=%0.6 çok koyu kıvam; 3: Ace450 oranı=%0.7 koyu kıvam; 4: Ace450 oranı=%0.8 koyu kıvam	28
Şekil 3.11: Ace450 oranı=%0.9 normal kıvam.....	29
Şekil 3.12: 1: Ace450 oranı=%0.4 yayılma tablası değeri 15,5cm; 2: Ace450 oranı=%0.5 yayılma tablası değeri 19cm; 3: Ace450 oranı=%0.6 yayılma tablası değeri 30cm; 4: Ace450 oranı=%0.5 (tekrar deneme) yayılma tablası değeri 22 cm.....	29
Şekil 3.13: İlk üretilen köpük beton denemeleri.....	31
Şekil 3.14: İlk üretimlerdeki çökme problemi	32
Şekil 3.15: Çimento ve uçucu kül ile oluşturulan kuru karışım.....	33
Şekil 3.16: Karışım suyunun sisteme verilmesi	34
Şekil 3.17: Köpük ajanı+ su karışımının hazırlanması	34
Şekil 3.18: Köpüğün sisteme verilmesi ve birim hacim ağırlığın belirlenmesi	35
Şekil 3.19: Kalıpların hazırlanması	36
Şekil 3.20: KYB kıvamındaki köpük betonlar.....	36
Şekil 3.21: Çökme gözlemlenen 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip numuneler ..	37
Şekil 3.22: Çelik kesici ile düzeltilen numuneler	37
Şekil 3.23: Numunelerde büzülme.....	38
Şekil 3.24: 1 No'lu elekten geçirilen traverten atığı.....	39
Şekil 3.25: Köpük betonların mikroskop altındaki görüntüleri: (1) %50Çim- %50UK, su/bağlayıcı=0.35, BHA=800g/dm ³ ; (2) %50Çim- %50UK, su/bağlayıcı=0.35, BHA=600g/dm ³ ; (3) %50Çim-%50Tra, su/bağlayıcı=0.35, BHA=800g/dm ³ ; (4) %75Çim- %25UK,su/bağlayıcı=0.35, BHA=600g/dm ³	39
Şekil 3.26: Çimentosuz harç denemesi	41
Şekil 3.27: Lifli köpük betonların petrografik yapıları.....	42
Şekil 3.28: Üçlü kompozit numunelerin üretilmesi	43
Şekil 3.29: Lifli köpük beton üretimi.....	45
Şekil 3.30: Basınç dayanımı testi.....	46
Şekil 3.31: Isıl iletkenlik katsayısı ölçümleri.....	48
Şekil 3.32: Su emme deneyi.....	49
Şekil 3.33: Kuruma büzülmesi ölçümleri	50
Şekil 3.34: Dağılan kuruma büzülmesi numuneleri.....	50

Şekil 4.1: %75 Çimento %25 UK içeren su/bağ=0.35 olan numunelerde Basınç Dayanımı-BHA grafiği.....	75
Şekil 4.2: %75 Çimento %25 TA içeren su/bağ=0.40 olan numunelerde Basınç Dayanımı-BHA grafiği.....	75
Şekil 4.3: Çimento-Uçucu kül içeren ve 0.35 su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde basınç dayanımı-ısıl iletim katsayısı grafiği.....	76
Şekil 4.4: Çimento-Traverten atığı içeren ve 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde basınç dayanımı-ısıl iletim katsayısı grafiği.....	76
Şekil 4.5: Birim hacim ağırlıkları 800g/dm ³ ve su/bağlayıcı oranları 0.35 olan ikili kompozitlerin basınç dayanımları kıyaslaması.....	77
Şekil 4.6: Birim hacim ağırlıkları 800g/dm ³ ve su/bağlayıcı oranları 0.35 olan ikili kompozitlerin ısıl iletim katsayıları kıyaslaması	78
Şekil 4.7: Birim hacim ağırlıkları 600g/dm ³ ve su/bağlayıcı oranları 0.35 olan ikili kompozitlerin ısıl iletim katsayıları kıyaslaması	78
Şekil 4.8: %75Çimento-%25UK içeren ve birim hacim ağırlığı 800g/dm ³ olan numunelerin farklı su/bağlayıcı oranlarında basınç dayanımı-ısıl iletim katsayısı karşılaştırması	79
Şekil 4.9: İkili kompozit lifli köpük betonların lif oranına göre ısıl iletim katsayısı-basınç dayanımı grafiği.....	80
Şekil 4.10: Üçlü kompozit lifli köpük betonların lif oranına göre basınç dayanımları grafiği	81
Şekil 4.11: Üçlü kompozit lifli köpük betonların lif oranına göre ısıl iletim katsayısı grafiği	81
Şekil 4.12: Üçlü kompozit 800 g/dm ³ birim hacim ağırlıktaki numuneler için çimento oranına göre basınç dayanımı değişimi	82
Şekil 4.13: Üçlü kompozit 800 g/dm ³ birim hacim ağırlıktaki numuneler için çimento oranına göre ısıl iletkenlik katsayısı değişimi	83
Şekil 4.14: %40Çim-%30UK-%30TA içeren Su/Bağlayıcı=0.35 ve birim hacim ağırlığı=600g/dm ³ olan numunelerde elyaf lif kullanımının kuruma büzülmesine etkisi.....	84
Şekil 4.15: BHA=800g/dm ³ üçlü kompozit numunelerin kuruma büzülmesi ölçümleri.....	85
Şekil 4.16: BHA=600g/dm ³ üçlü ve ikili kompozit numunelerin farklı lif oranlarındaki su emme değerleri	86
Şekil 4.17: Maliyet analizi sonuçları	87

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1: Traverten atıklarının kimyasal özellikleri	17
Tablo 3.2: Uçucu külün kimyasal özellikleri	18
Tablo 3.3: Puzolanik aktivite indeksi test sonuçları.....	27
Tablo 3.4: İkili kompozit karışım oranları	40
Tablo 3.5: Üçlü kompozitlerin karışım oranları	42
Tablo 3.6: Lif eklenen ikili kompozit karışım oranları	44
Tablo 3.7: Lif eklenen üçlü kompozit karışım oranı	44
Tablo 4.1: %50 Çimento-%50 UK içeren numunelerin basınç dayanımları....	52
Tablo 4.2: %75 Çimento-%25 UK içeren numunelerin basınç dayanımları....	53
Tablo 4.3: %75 Çimento-%25TA içeren numunelerin basınç dayanımları	54
Tablo 4.4: %50 Çimento-%50TA içeren numunelerin basınç dayanımları	55
Tablo 4.5: %50 Çimento-%25UK-%25TA içeren numunelerin basınç dayanımları.....	56
Tablo 4.6: %50 Çimento-%40TA-%10UK içeren numunelerin basınç dayanımları.....	56
Tablo 4.7: %50 Çimento-%40UK-%10TA içeren numunelerin basınç dayanımları.....	57
Tablo 4.8: %40 Çimento-%30UK-%30TA içeren numunelerin basınç dayanımları.....	57
Tablo 4.9: %30 Çimento-%35UK-%35TA içeren numunelerin basınç dayanımları.....	58
Tablo 4.10: %20 Çimento-%40UK-%40TA içeren numunelerin basınç dayanımları.....	58
Tablo 4.11: %50 Çimento- %50 UK içeren numunelerin su emme değerleri .	59
Tablo 4.12: %75 Çimento- %25 UK içeren Numunelerin Su Emme Değerleri60	
Tablo 4.13: %75 Çimento- %25 TA içeren numunelerin su emme değerleri ..	60
Tablo 4.14: %50 Çimento- %50 TA içeren numunelerin su emme değerleri ..	61
Tablo 4.15: %50 Çimento- %25 UK- %25 TA içeren numunelerin su emme değerleri.....	61
Tablo 4.16: %50 Çimento- %40 UK- %10 TA içeren numunelerin su emme değerleri.....	62
Tablo 4.17: %50 Çimento- %40 TA- %10 UK içeren numunelerin su emme değerleri.....	62
Tablo 4.18: %40 Çimento- %30 UK- %30 TA içeren numunelerin su emme değerleri.....	62
Tablo 4.19: %30 Çimento- %35 UK- %35 TA içeren numunelerin su emme değerleri.....	63
Tablo 4.20: %20 Çimento- %40 UK- %40 TA içeren numunelerin su emme değerleri.....	63
Tablo 4.21: %50 Çimento- %50 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri.....	64
Tablo 4.22: %75 Çimento- %25 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri.....	65
Tablo 4.23: %75 Çimento- %25 TA içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri.....	66

Tablo 4.24: %50 Çimento- %50 TA içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri.....	67
Tablo 4.25: %50 Çimento- %25 UK- %25 TA içeren Numunelerin Isıl İletkenlik Katsayı Değerleri	68
Tablo 4.26: %50 Çimento- %40 UK- %10 TA içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri	68
Tablo 4.27: %50 Çimento- %40 TA- %10 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri	69
Tablo 4.28: %40 Çimento- %30 TA- %30 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri	69
Tablo 4.29: %30 Çimento- %35 TA- %35 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri	70
Tablo 4.30: %20 Çimento- %40 TA- %40 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri	70
Tablo 4.31: Kullanılan lif oranlarına göre UK katkılı ikili kompozit numune sonuçları	71
Tablo 4.32: Kullanılan lif oranına göre TA katkılı ikili kompozit numune sonuçları	71
Tablo 4.33: Üçlü kompozit lifli numunelerin lif oranlarına göre test sonuçları	72
Tablo 4.34: 1m ³ KB1 numune için maliyet analizi	73
Tablo 4.35: 1m ³ KB2 numune için maliyet analizi	73
Tablo 4.36: 1m ³ KB3 numune için maliyet analizi	73
Tablo 4.37: Kıyaslama yapılan malzemelerin teknik özellikleri ve maliyetleri	74
Tablo A.1: %50Çim %50UK su/bağ=0.50 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	101
TabloA.2: %50Çim %50UK su/bağ=0.50 BHA=1200g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	101
TabloA.3: %50Çim %50UK su/bağ=0.40 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	101
TabloA.4: %50Çim %50UK su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	101
TabloA.5: %50Çim %50UK su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	102
TabloA.6: %75Çim %25UK su/bağ=0.50 BHA=1200g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	102
TabloA.7: %75Çim %25UK su/bağ=0.50 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	102
TabloA.8: %75Çim %25UK su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	102
TabloA.9: %75Çim %25UK su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	102
TabloA.10: %75Çim %25UK su/bağ=0.35 BHA=450g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	103
TabloA.11: %75Çim %25UK su/bağ=0.40 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	103
TabloA.12: %75Çim %25UK su/bağ=0.40 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	103
TabloA.13: %75Çim %25TA su/bağ=0.40 BHA=450g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	103

TabloA.14: %75Çim %25TA su/bağ=0.40 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	103
TabloA.15: %75Çim %25TA su/bağ=0.40 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	104
TabloA.16: %75Çim %25TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	104
TabloA.17: %75Çim %25TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	104
TabloA.18: %50Çim %50TA su/bağ=0.40 BHA=450g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	104
TabloA.19: %50Çim %50TA su/bağ=0.40 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	104
TabloA.20: %50Çim %50TA su/bağ=0.40 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	105
TabloA.21: %50Çim %50TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	105
TabloA.22: %50Çim %50TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	105
TabloA.23: %100Çim su/bağ=0.35 BHA=1200g/dm ³ (yaklaşık) numunelerde ortalama sonuçlar	105
TabloA.24: %50Çim %25UK %25TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	105
TabloA.25: %50Çim %25UK %25TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	106
TabloA.26: %50Çim %40UK %10TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	106
TabloA.27: %50Çim %40UK %10TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	106
TabloA.28: %50Çim %40TA %10UK su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	106
TabloA.29: %50Çim %40TA %10UK su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	106
TabloA.30: %40Çim %30UK %30TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	106
TabloA.31: %40Çim %30UK %30TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	107
TabloA.32: %30Çim %35UK %35TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	107
TabloA.33: %30Çim %35UK %35TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	107
TabloA.34: %20Çim %40UK %40TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	107
TabloA.35: %20Çim %40UK %40TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm ³ numunelerde ortalama sonuçlar	107

KISALTMALAR LİSTESİ

Çim	:	Çimento
UK	:	Uçucu Kül
TA	:	Traverten Atığı
TW	:	Travertine Waste
FA	:	Fly Ash
BHA	:	Birim Hacim Ağırlık
σ	:	Basınç Dayanımı
P	:	Kırılma Yüğü
A	:	En Kesit Alanı
R_f	:	Eğilme Dayanımı
b	:	Prizmanın Kare Kesitinin Kenar Uzunluğu
F_f	:	Prizmanın Kırıldığı Anda Ortasına Uygulanan Kuvvet
l	:	Mesnet Silindirleri Arasındaki Uzaklık

ÖNSÖZ

Çok zor zamanlar yaşadığım doktora sürecimde yeri gelip bana kapısını açan, yeri gelip bana kalbini açan, yol gösteren canım anniş Feride Asuman GÜVEN'e, canım babam Zühtü GÜVEN'e, canım ablam Elif GÜVEN'e sonsuz teşekkürlerimi borç bilirim.

Hiçbir yol göstericimin olmadığı, “galiba ben bu doktorayı bitiremeyeceğim” dediğim dönemlerde bana yol gösteren, eğitim hayatım boyunca hiçbir hocamın benimle ilgilenmediği kadar ilgilenen, arabam yolda kaldığında bana kahve getiren, köpük tankı patladığında sırılsıklam olan ama bir an için bile şikayet etmeyen canım hocam Doç. Dr. Hüseyin YİĞİTER'e çok teşekkür ederim.

Her daim güler yüzüyle yüzümü güldüren, beni çekip çeviren, yeri geldiğinde benimle İzmir'e gelip numune üretimime yardım eden, dönüşte de çekiciyle dönen canım Gamze KABAŞ'a sonsuz teşekkürler.

Karanlık günlerimde hep yanımda olan, makale yazım sürecinde benden yardımlarını esirgemeyen çok muhterem hocam Dr. Öğr. Üyesi Bayram Tanık ÇAYCI'ya çok teşekkür ederim.

Danışmansız kaldığım dönemlerde tereddüt etmeden beni danışmanlığına alan, önemli yerlerde bana yol gösteren danışman hocam sayın Prof. Dr. Mehmet İNEL'e çok teşekkür ederim.

Karşı komşum, kötü gün dostum, okuldaki gülen yüzüm Esra ÖZER'e; Gerek grafik çizimlerindeki yardımları ile, gerekse samimi dostluğu ile hep yanımda olan Pinar Gökçe Durgut'a; beni hep güldüren ve tez yazımında yardımcı olan sevgili dostum Çiğdem Çırac Karakaş'a sonsuz teşekkürler.

Buğrahan Canlı, Birkan Aydoğmuş, İzzet Dönmez, Derviş Tat, Ahmet Selim Akbıyık, Bahar Toprakçı, Tugay Çelik hep yanımdaydınız. İyi ki.

Doktora sürecim boyunca hayattan çok da keyif almadığım çok günüm oldu. Bu dönemde yaptığımız sahnelerle hala çok keyifli şeyler yapabileceğimizi bana gösteren müzik grubum Dikkatband'e de sonsuz teşekkürler.

Son olarak da binlerce kere bırakmanın kıyısına geldiğim, hayata sıfırdan başladığım, çok da kolay geçmeyen doktora sürecimde benden ümidini kesmeyen, bana herşeye rağmen inanmaya devam eden Hüseyin GÜVEN'e teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Köpük betonun ilk patenti 1923 yılında alınmasına rağmen, ancak son yıllarda yarı taşıyıcı ve taşıyıcı olmayan inşaat uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. (Ramamurthy vd., 2009). Normal ağırlıktaki beton elemanların zati ağırlıkları yüksek olup, yapıya gelen yüklerin büyük oranını teşkil etmektedirler. Yapılarda hafif betonların kullanılması, düşük birim hacim ağırlıkları nedeniyle yapıya gelen deprem yüklerinin ve yapıdaki düşey yüklerin azalmasını sağlar. Düşük yoğunluklu beton kullanımı, düşük yük taşıma kapasiteli yapıların doğrudan zemine yapılmasına izin vermektedir.

Binalarda ısı konfor için ısıtma ve soğutmaya harcanan enerjinin tasarruf edilmesinde duvar ve döşeme malzemeleri önemli rol oynamaktadır. Köpük beton, içerdiği hava kabarcıkları nedeniyle çok iyi yalıtım özellikleri gösterir. Düşük ısı iletkenliği (λ) nedeniyle enerji tüketimini büyük ölçüde azaltır. Isı iletkenliği (λ), yoğunluğa bağlı olarak 0.040 ile 0.610 W/mK arasında değişmektedir (H. Weigler vd., 1980) (M.A.O. Mydin., 2011). Bu nedenle ek yalıtım malzemesi gerektirmez.

Literatürde köpük betonun dayanımının su/bağlayıcı oranından çok köpük hacmine bağlı olduğu belirtilmektedir (Y.K.Cai ve diğerleri, 2013). Düşük su oranının karışımın katı olmasına, köpüklerin kırılmasına ve yoğunluğun artmasına neden olduğu bilinmektedir (N. Beningfield vd., 2005). Literatürde su oranının basınç dayanımı ve ısı iletkenlik üzerindeki doğrudan etkisi ile ilgili çok fazla çalışma bulunmamaktadır.

Lif kullanımı, mikro çatlakları önlediği ve enerji emme kapasitesini arttırdığı için köpük beton üretiminde çok yaygındır (E.P. Kearsley ve diğerleri, 1999). Lif kullanımı belirli oranlara kadar büzülme riskini en aza indirebilir (N. Elvija ve diğ., 2016). Literatürde genel olarak kullanılan lif oranı, kullanılan bağlayıcının ağırlığının %0,5'i kadardır (V. Atabey, 2018). Ancak kullanılan lif miktarı arttıkça köpük betonun davranışı gevrek bir hal alabilmektedir (F. Matalkah ve diğ., 2017).

Atık malzemelerin beton üretiminde kullanımı önemli bir konu olup, son yıllarda bununla ilgili çalışmaların sayısı artmaktadır. Literatürde beton üretiminde kullanılan atıklar arasında seramik atıkları, mermer atıkları, kullanılmış lastikler, uçucu kül, beton atıkları, plastik atıkları yer almaktadır (Pacheco-Torgal, F ve diğerleri, 2010), (Zimbili, O ve diğerleri, 2014), (Pacheco-Torgal, F ve diğerleri, 2011), (Limbachiya, M ve diğerleri, 2012), (Helmuth, R., 1987), (CC Fan ve diğerleri, 2016), (R, Sharma ve diğerleri, 2016), (AJ, Babafemi ve diğerleri, 2018).

Köpük beton üretiminde genellikle hidrasyon ısısını düşürerek büzülme riskini azalttığı için uçucu kül kullanımı oldukça yaygındır (N.Uddin vd., 2006). Uçucu küller, termik santrallerde kullanılan taşkömürü veya linyit kömürünün yakılması sonucu oluşan ve fabrikaların bacalarına yerleştirilen elektro filtreler yardımıyla tutulan atıklardır. Beton endüstrisinde yapay puzolan olarak kullanılırlar. Hidrasyon ısısını düşürücü ve çatlak oluşumunu önleyici özelliklere sahiptirler. Sertleşmiş betonun su geçirgenliğini azaltırlar. Bu nedenlerle, rötire riski yüksek bir beton türü olan köpük betonda uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül genellikle kendi başına bağlayıcı değildir. Hidrasyon sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek C-S-H jeli oluşturarak bağlayıcı özelliği kazanırlar. Uçucu külün köpük betonda su talebini arttırdığı (R. Gowri vd., 2016), ancak dayanımda yavaş ve sürekli bir artış sağladığı ve köpük kıvamını düzenlediği bilinmektedir. (E.P. Kearsley ve diğerleri, 2001).

Beton üretimi sırasında uçucu kül yerine mermer atıkları kullanılabilir (V. Atabey, 2018), (O.Y. Bayraktar vd,2021), (O. Gencel vd, 2021). Traverten atıkları puzolanik aktivitelerinden dolayı hidrasyon ısısını azalttığı için köpüğün stabilizasyonunda da önemli rol oynamaktadırlar. Traverten, Denizli ile özdeşleşmiş özel bir kayaç türüdür. Her yıl binlerce ton traverten çıkarılmakta ve bunlardan tonlarca yüzey kaplama malzemesi vb. ürünler üretilmektedir. Ancak üretime alınan traverten blokların yarısından fazlası atık olarak ayrılmaktadır. Bu atıklar fabrikalardan belirli mesafelerdeki boş alanlara toplu olarak dökülmektedir. Atık yığınları topraklar tarımsal olarak işlenemez hale gelmektedir (H. Güven, 2015). Türkiye'de traverten mermer üretimi ve kullanımı artmasına rağmen, kullanılmayan traverten mermer atıklarının katkı maddesi olarak kullanımı ile ilgili literatürde sınırlı

sayıda çalışma bulunmaktadır (Çobanoğlu vd. 2014, Tekin 2016). Ayrıca bu çalışmaların hiçbirinde köpük beton üretimi düşünülmemiştir.

Hafif betonlarda birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayısı belirli sınır değerlere kadar doğru orantılı olarak değişir. Hafif betonlarda birincil öncelik parametresi "dayanım" değil "düşük birim hacim ağırlık"tır. Binalarda ısı konfor için ısıtma ve soğutmaya harcanan enerjiden tasarruf edilmesinde duvar ve dōşeme malzemeleri önemli rol oynamaktadır. Köpük beton, içerdığı hava kabarcıkları nedeniyle çok iyi yalıtım özellikleri gösterir. Literatürde su/bağlayıcı oranının ısı iletkenlik ve basınç dayanımı üzerindeki doğrudan etkisi yeterince incelenmemiştir.

Bu çalışmada atık kullanımı, su/bağlayıcı oranı ve lif kullanımının köpük beton üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmanın amacı, üretilen köpük betonda optimum su/bağlayıcı oranını görmek ve traverten atıklarının köpük beton üzerindeki etkilerini gözlemlemektir. Traverten çamuru, mermer fabrikalarında üretilen, depolanması ve boşaltılması için ciddi maliyetler yaratan bir atıktır. Atıldıkları topraktaki mikroorganizmaları öldürdüğü için tarımı olumsuz etkiler. Deneysel çalışmada traverten çamuru kullanılmasının nedeni bu atık yığınlarını azaltmak ve maliyetleri minimize etmektir. Uçucu kül ise termik santrallerde kullanılan taşkömürü veya linyit kömürünün yakılması sonucu oluşan ve fabrikaların bacalarına yerleştirilen elektrofiltreler yardımıyla tutulan atıklardır. Beton endüstrisinde yapay puzolan olarak kullanılırlar. Hidratasyon ısını düşürücü ve çatlak oluşumunu önleyici özelliklere sahiptir. Sertleşmiş betonun su geçirgenliğini azaltır. Bu nedenlerle, rötre riski yüksek bir beton türü olan köpük betonda uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül genellikle kendi başına bağlayıcı değildir. Çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek C-S-H jeli oluşturarak bağlanma kazanırlar.

Bu amaçla deneysel çalışmanın ilk aşamasında uçucu kül ve traverten atığı %25 ve %50'lik oranlarda çimento yerine kullanılarak köpük beton deneyleri yapılmıştır. Bu denemeler sırasında 0.50, 0.40 ve 0.35 su/bağlayıcı oranlarında numuneler üretilmiş, basınç dayanımları, su emme değerleri, kuruma büzülmesi değerleri ve ısı iletkenlik katsayıları karşılaştırılmıştır. Çalışmanın başında yoğunlukları 450 ile 1200 g/dm³ arasında değişen numuneler üretilmiştir.

Sonraki aşamalarda optimum değerler olduğuna karar verilen 600 ve 800 g/dm³ birim ağırlıktaki numuneler üzerinde deneysel çalışmaya devam edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında %35 su oranı ve 600 g/dm³ yoğunluğu ile %75 çimento-%25 traverten atığı ve %75 çimento-%25 uçucu kül karışım oranlarına sahip numunelere cam elyaf takviyesi uygulanmıştır. Bağlayıcı ağırlığının %0.5'i, %1'i, %1.5'i ve %2'si oranında cam elyaf içeren numunelerin basınç dayanımları ve ısı iletkenlikleri kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

Atıkların değerlendirilmesi son yılların popüler konularından biridir. Traverten atıkları çok değerlendirilen atıklar arasında yer almamaktadır. Çobanoğlu et al. (2014) çalışmalarında traverten atıklarını konvansiyonel betonda agrega olarak kullanmışlardır. Tekin (2016), çalışmasında traverten ve mermer atıklarını kullanarak çimentosuz geopolimer kompozit malzemeler üretmiştir. Köpük beton üretiminde genellikle hidrasyon ısını düşürerek büzülme riskini azalttığı için uçucu kül kullanımı oldukça yaygındır (N. Uddin vd., 2006). Uçucu küller, termik santrallerde kullanılan taşkömürü veya linyit kömürünün yakılması sonucu oluşan ve santrallerin bacalarına yerleştirilen elektrofiltreler yardımıyla tutulan atıklardır. Beton endüstrisinde yapay puzolan olarak kullanılırlar. Hidrasyon ısını düşürücü ve çatlak oluşumunu önleyici özelliklere sahiptirler. Sertleşmiş betonun su geçirgenliğini azaltırlar. Bu nedenlerle, rötre riski yüksek bir beton türü olan köpük betonda uçucu kül kullanılmıştır. Uçucu kül genellikle kendi başına bağlayıcı değildir. Hidrasyon sonucu oluşan Ca(OH)₂ ile reaksiyona girip C-S-H jeli oluşturarak bağlayıcı özelliği kazanırlar. Uçucu külün köpük betonda su talebini arttırdığı (R. Gowri vd., 2016), ancak dayanımda yavaş ve sürekli bir artış sağladığı ve köpük kıvamını düzenlediği bilinmektedir (E.P. Kearsley vd., 2001). Mermer tozunun atık olarak ikame edilerek köpük beton üretiminde kullanılması ile ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (V. Atabey , 2018); (O.Y. Bayraktar vd.,2021); (O. Gencel vd., 2021). Ancak traverten atıklarının köpük betonda kullanımı ile ilgili literatürde herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Traverten atıkları puzolanik aktiviteleri sayesinde hidrasyon ısını azalttığı için köpüğün stabilizasyonunda önemli rol oynamıştır (H. GÜVEN, 2015).

Beton üretimi sırasında uçucu kül yerine mermer atıkları kullanılabilir (V. Atabey , 2018) (O.Y. Bayraktar vd.,2021) (O. Gencel vd., 2021). Traverten atıkları

puzolanik aktivitelerinden dolayı hidrasyon ısısını azalttığı ve hidrasyonu yavaşlattığı için köpüğün stabilizasyonunda ve sonrasındaki oluşabilecek büzülme çatlaklarını önlemede önemli rol oynamıştır. Traverten, Denizli ile özdeşleşmiş özel bir kayaç türüdür. Her yıl binlerce ton traverten çıkarılmakta ve bunlardan tonlarca yüzey kaplama malzemesi vb. ürünler üretilmektedir. Ancak üretime alınan traverten blokların yarısından fazlası atık olarak ayrılmaktadır. Bu atıklar fabrikalardan belirli mesafelerdeki boş alanlara toplu olarak dökülmektedir. Atık yığınlı topraklar tarımsal olarak işlenemez hale gelmektedir (H. Güven, 2015). Ocakta ortalama 100 m³ traverten alanı boşaltıldığında 15 m³ traverten işlenerek kullanılmak üzere fabrikalara gönderilebilmektedir. Bu da traverten ocaklarının yaklaşık veriminin %15 mertebelerinde olduğunu göstermektedir. Fabrikalarda ise, traverten ocağından getirilen traverten kütlelerin işlenebilme verimliliği %30'a kadar düşebilmektedir (H. Güven, 2015). Traverten çamuru, mermer fabrikalarında üretilen, depolanması ve boşaltılması için ciddi maliyetler oluşturan bir atık malzemedir. Depolandığı alandaki mikroorganizmaları öldürdüğü için çevreyi olumsuz etkilemekte ve toprağı tarım yapılamaz hale getirmektedir. Deneysel çalışmada traverten çamuru kullanılmasının nedeni bu istenmeyen atık malzemeleri azaltmak ve maliyetleri minimize etmektir. Türkiye'de traverten mermer üretimi ve kullanımı artmasına rağmen, kullanılmayan traverten mermer atıklarının katkı maddesi olarak kullanımı ile ilgili literatürde sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır (Çobanoğlu vd. 2014; Tekin 2016). Ayrıca bu çalışmaların hiçbirinde köpük beton üretimi düşünülmemiştir.

Hafif betonlarda belli sınır değerlere kadar birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayısı doğru orantılı olarak değişir. Binalarda termal konfor için ısıtma ve soğutmaya harcanan enerjinin tasarrufunda duvar ve döşeme malzemeleri önemli rol oynamaktadır. Köpük beton, bünyesinde bulunan hava boşlukları nedeniyle çok iyi yalıtım özelliği gösterir.

Ülkemizde kullanım oranı oldukça düşük olan köpük betonların, günümüz yapı teknolojilerine önemli kazanımlar sağlayacağı düşünülmektedir. Birim hacim ağırlığının, kullanılan özel üretim yöntemleri ile 600 g/dm³ seviyesinin bile altına düşürülebilmesi ve içerisindeki yaklaşık %80 oranında bulunan bağımsız kapalı hava boşlukları sayesinde ısı köprülerini engelleyerek çok iyi ısı yalıtımı sağlayan bu

malzemenin daha uygulanabilir hale getirilerek kullanım sıklığının artırılması, ülkemizdeki enerji maliyetlerini azaltacaktır.

Çalışmanın amacı, optimum su/bağlayıcı oranını araştırmak ve traverten atıklarının köpük beton üzerindeki etkilerini gözlemlemektir. Köpük beton üretiminde atık malzeme oranı, su/bağlayıcı oranı ve lif kullanımının etkileri dikkate alınarak dikkatli bir değerlendirme yapılmıştır. Su/bağlayıcı oranının ısı iletkenlik ve basınç dayanımı üzerindeki doğrudan etkisi yeterince incelenmemiştir.

Bu amaçla doktora tezinin ilk aşamasında ikili kompozitlerin üretimine başlanarak uçucu kül ve traverten atığı %25 ve %50'lik ayrı karışımlarda kullanılarak köpük beton deneyleri yapılmıştır. Bu denemeler sırasında 0.50, 0.40 ve 0.35 su/bağlayıcı oranlarında numuneler üretilmiş, basınç dayanımları, su emme değerleri ve ısı iletkenlikleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın başında yoğunlukları 450 ile 1200 g/dm³ arasında değişen numuneler üretilirken, sonraki aşamalarda optimum değerler olduğuna karar verilen 600 ve 800 g/dm³ birim ağırlıktaki numuneler üzerinde deneysel çalışmaya devam edilmiştir.

Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında üçlü kompozitlerin üretimine geçilmiştir. Bu numunelerde traverten atığı, uçucu kül ve çimento farklı oranlarda birlikte karıştırılarak numuneler üretilmiştir. Bu numunelerde optimum değerler olduğuna kanaat getirilen 600 ve 800 g/dm³ birim hacim ağırlıktaki numuneler 0.35 su/bağlayıcı oranı ile üretilmiştir. Bu aşamadaki amaçlardan biri de üretilecek olan köpük betonların maliyetlerini minimize etmektir. Bu sebeple karışımlardaki çimento oranı en fazla %50 olarak seçilmiş ve farklı karışımlarda %20'ye kadar düşürülmüştür.

Çalışmanın son aşamasında 0.35 su oranı ve 600 g/dm³ yoğunlukta, %75 çimento-%25 traverten atığı ve %75 çimento-%25 uçucu kül karışım oranlarına sahip numunelere cam elyaf takviyesi uygulanmıştır. Bağlayıcı ağırlığının %0.5'i, %1'i, %1.5'i, %2'si oranında cam elyaf içeren numunelerin basınç dayanımı ve ısı iletkenlikleri kendi aralarında karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Beningfield ve dig (2005), Jones ve McCarthy (2005) köpük beton ile ilgili yapılan ilk çalışmaların Romalılar dönemine kadar uzadığını belirtmişlerdir. Romalılar; sıcak kireç, küçük çakıl ve kaba kuma hayvan kanı ekleyip su ile çalkaladıklarında köpük betonda olduğu gibi hava kabarcıklarının oluştuğunu görmüşlerdir. Patentli ilk köpük beton üretimi ise 1923 yılında Axel Eriksson tarafından gerçekleştirilmiştir. Kapsamlı sayılabilecek ilk köpük beton çalışması 1954 yılında Valore tarafından yapılmıştır (Kallunkal ve John, 2016).

Kearsley ve Wainwright (2001), Kearsley (1999) yaptıkları çalışmalarda köpük betonun suyu emme yeteneğinin, aynı su/çimento oranına sahip normal betonun neredeyse iki katı olduğunu bulmuşlardır. Yine Kearsley ve Wainwright (2001), köpük betonda çimentonun %67'ye varan bir kısmının, dayanımda önemli bir azalma olmadan uçucu kül ile değiştirilebileceğini, yaptıkları basınç dayanımı testleri ile göstermişlerdir. Köpük betonlarda çimento miktarını azaltmak maliyetler açısından önemli bir parametredir.

Hajimohammadi ve dig. (2017) yaptıkları çalışmada köpük betonun priz süresini kısaltmak ve erken dayanımını artırmak için Portland Çimentosu'nun yanı sıra kalsiyum sülfat çimentosu, yüksek alüminli çimento, alkalilerle aktive edilmiş çimento ve hızlı sertleşen Portland çimentosunun kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Ayrıca geopolimer kullanımının köpük betonlarda yangına dayanıklılığını olumlu etkilediği sonucuna varmışlardır.

Richard ve dig. (1975) yaptıkları çalışmada köpük betonların iyi ısı yalıtımı, mükemmel yakın donma/çözülme dayanıklılığı ve iyi yangın direnci sağladıklarını belirtmişlerdir. Yaklaşık 50 yıl önce yapılan bu çalışmada yaklaşık 1200 g/dm^3 birim hacim ağırlığa sahip numunelerde 0.2535 W/mK ısı iletim katsayı değerleri bulunmuş ve köpük betonda sonraki çalışmalar için büyük potansiyel olduğu belirtilmiştir.

Zhao ve dig. (2015), çok iyi özelliklere sahip bir inşaat malzemesi olmasına rağmen Kuzey Amerika'da %5,6. Avustralya'da %5.6; Avrupa'da %33.6; Afrika'da %5.6 yapı malzemesi olarak kullanım oranlarına sahip olmasının sebepleri olarak bilgi ve güven eksikliği vurgusu yapmışlardır. Bu da köpük betonların sahada neden bu

kadar az kullanıldığını bir miktar açıklamaktadır. Aynı çalışmada şahit numunelere ve çimento ağırlığının %50'si oranında cüruf eklenen numunelere basınç dayanımı, ultrasonik darbe hızı testi ve ısı iletkenlik testi yapılmıştır. Çalışma sonucunda tüm bulguların cüruf lu numunelerde pozitif anlamda değiştiği görölmüştür. Fakat basınç dayanımlarındaki artışlar kadar ultrasonik darbe hızı ve yalıtım özelliklerinde artış görölememiştir.

Jalal ve diğ. (2017), köpük betonların uzun bir mesafe boyunca boşlukları doldurmak için, herhangi bir sıkıştırma, titreşim işlemi uygulamaksızın endüstriyel yapılar da yapı malzemesi olarak kullanılabilircek dayanım özelliklerine sahip olduklarını belirtmişlerdir. Deneysel herhangi bir çalış ma içermeyen bu çalış mada köpük betonun düşük ısı iletim katsayısına sahip oluş u, mükemmel yangın direnci, donma-çözölme değerlerinin iyi oluş u, kendiliğinden yerleş en beton kıvamında oluş u gibi sebeplerle; menfez dolgusu, boşluk doldurma, metro dolgusu, tünel dolgusu gibi alanlarda kullanıldığ ından bahsedilmiştir.

Köpük beton üretebilmek için kullanılan iki farklı tip köpük ajanı vardır. Bunlar sentetik ve protein bazlı köpük ajanlarıdır. Nandi ve diğ. (2016) yaptıkları çalış mada sentetik köpük ajanının $1000\text{g}/\text{dm}^3$ birim hacim ağırlık civarındaki numunelerde, protein bazlı köpük ajanının ise 400 ila $1600\text{g}/\text{dm}^3$ arasındaki birim hacim ağırlığ a sahip köpük betonlarda kullanılabilirceğini belirtmişlerdir. Ayrıca protein bazlı köpük ajanlarının hayvansal proteinlerden elde edildiği ve içeriğindeki bakteriler dolayısı ile bozulma riskinin olduğu vurgulanmıştır.

Ekinci (2013), köpük beton hakkında genel bilgiler vererek köpük betonun ölkemizdeki yeri hakkında da açıklamalarda bulunmuştur. Hafifliği, maliyetinin düşük oluş u, yalıtım alanındaki başarısı ve ölkemizdeki yöresel bims ve ponza gibi hammaddelerin de içeriğinde kullanılması avantajları arasında gösterilmiştir. Köpük betonun mekânları kış mevsiminde sıcak, yaz mevsiminde ise serin tutarak yıllık genel enerji giderlerini %40 oranında düşürdüğünü ortaya koymuştur. Ölkemizde köpük betonun tam bir standardının olmayışı ve kalifiye eleman sayısının çok yetersiz oluş u da köpük betonun seçilmesini engelleyen faktörler olarak gösterilmiştir.

1988 yılında alınan patentte Dunton ve Rez, fazla köpük kullanımın betonun stabilitesini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Bu amaçla yapılan başka bir çalış mada

Panesar (2013), köpük betonda kullanılan köpük hacminin, toplam hacmin %6-%35 değerleri arasında olması gerektiğini bulmuştur. Köpük hacmi arttıkça, mukavemet değerlerinden çok fazla ödün verildiği yapılan basınç dayanımı testleri sonucu ortaya koyulmuştur. 3 farklı köpük ajanı kullanılan deneysel çalışmada köpük ajanı tipinin en çok ısı iletim katsayısı ölçümlerinde farklılıklara sebep olduğu, mukavemet özelliklerine etkisinin daha az olduğu belirtilmiştir.

Agarwal ve dig. (2000), Hoge (1983), Masood ve Agarwal (2012) yaptıkları çalışmalarda köpük betonda kullanılan akışkanlaştırıcıların, çimento ağırlığının %0.2'sini geçmemesi gerektiğini söylemişlerdir. Hindistan'da yapıldığı düşünülen deneysel çalışmalarda, Hindistan'da yaygın olarak kullanılan çimento sınıfları olan 33.43 ve 53 kullanılmıştır. 53 derece Portland çimentosunun, tüm akışkanlaştırıcılarla uyumlu olduğu sonucuna varılmıştır.

Köpük betonda hidrasyon ısısını kontrol altında tutabilmek önemli bir parametredir. Bu sebeple literatürde uçucu kül kullanımı yaygındır. Chindaprasirt ve dig. (2008), yaptıkları deneysel çalışmada, çimento ağırlığının %20-%40'lık dozajlarında puzolan olarak öğütülmüş yakıt külü, pirinç kabuğu külü ve uçucu kül kullanarak üretilen numunelere; basınç dayanımı, hızlı klorür penetrasyon testi (RCPT), hızlı migrasyon testi (RMT) ve %3'lük NaCl çözeltisine 30 gün daldırıldıktan sonra klorür penetrasyon derinliği testleri yapılmıştır. Test sonuçları, harcın klorür penetrasyonuna karşı direncinin, Portland çimentosunun kısmen puzolan katkıları ile değiştirilmesiyle önemli ölçüde arttığını ortaya koymaktadır. Direnç, değiştirme seviyesindeki artış, küllü puzolanlarda daha yüksektir. Nambier ve Ramamurthy, (2006); Bing ve dig. (2011) ise, betonda uçucu kül kullanımının basınç dayanımını %25'e kadar artırabildiğini ortaya koymuşlardır.

Köpük betonda büzülme, önemli bir sorundur. Bunun önüne geçebilmek için lif kullanımı literatürde yaygındır. Falliano ve dig. (2019) yaptıkları deneysel çalışmada üç farklı kürleme koşulunda (hava, selofan ve su), üç hedef kuru yoğunlukta (400, 600, 800g/dm³) ve üç farklı lif içeriğinde (%0.7, %2.0, %5.0) numuneler üretmişlerdir. Sonuç olarak özellikle düşük yoğunluklu ve yüksek lif içerikli numunelerde eğilme kapasitelerinin arttığı, fakat basınç dayanımlarındaki değişimin ihmal edilebilir boyutta olduğunu görmüşlerdir. Kuruma büzülmesi değerlerinin ise lif artışı ile birlikte sürekli olarak olumlu yönde etkilendiği sonucu bulunmuştur. Fadila

ve dig. (2008), İbrahim ve dig. (2014) ise, yaptıkları çalışmalarda lif kullanımının köpük betonda mikro çatlakları önleyip enerji yutma kapasitesini artırdığı için basınç dayanımını artırabildiğini ortaya koymuşlardır.

Köpük betonda, ağırlıklarından dolayı çelik lifler çok tercih edilmemektedirler (Ruiwen, 2004), (Van Deijk, 1991), (Brady, 2001). Büzülme riskine karşı lif kullanımı çok yaygın bir uygulamadır. Fakat köpük betonlar, hafiflikleri sayesinde de avantajlar sağlayan yapı malzemeleridir. Bu sebeple çelik lif kullanımının kuru birim hacim ağırlıkları artırma ihtimali sebebiyle köpük betonlarda çok tercih edilmemektedirler.

Awang ve Ahmad (2014) yaptıkları çalışmada, farklı türlerde lifleri karışım hacminin %0.25-%0.40 aralığında kullanarak sabit $1000\text{g}/\text{dm}^3$ 'lük numuneler üretmişlerdir. Bu numunelere su emme, ısı iletkenlik katsayısı tayini ve büzülme testleri uygulanmıştır. Kuruma büzülmesi ölçümlerinde en avantajlı lifin cam elyaf lif olduğu sonucuna varılmıştır. Yaptığımız deneysel çalışmada da bu sonuçlardan ötürü cam elyaf lif katkısı kullanılmıştır.

Büzülmenin önüne geçebilmek için köpük betonda agrega kullanılması ve nemin artırılması da literatürde kullanılan yöntemlerdendir (Regan ve Arasteh, 1990). Weigler ve Karl, (1980) yaptıkları deneysel çalışmada, düşük parçacık yoğunluğuna sahip agregalardan üretilen köpük betonlarda; $1200\text{g}/\text{dm}^3$ birim hacim ağırlığa sahip numunelerde 30MPa basınç dayanımı, $700\text{g}/\text{dm}^3$ birim hacim ağırlığa sahip numunelerde ise 5 MPa basınç dayanımı elde edebilmişlerdir. Nyame (1985) yaptığı çalışmada karışımdaki agrega hacmi arttıkça geçirimsizliğin de arttığını ortaya koymuştur.

Köpük betonda ilk 6 saatte su emmesi tamamlandığı için 6. saat ile 48. saatten sonraki su emmesi hemen hemen eşit bulunmuştur. Ma ve Chen (2016) yaptıkları çalışmada kalsiyum stearat, potasyum trimetilsilanolat ve siloksan bazlı polimer gibi su iticiler eklenerek su absorpsiyonu değiştirmişlerdir. Mukavemet tutma katsayısının iyileştiği ve su buharı ve gözenek yüzeyi arasındaki azalan yapışma kuvveti nedeniyle artan su itici içeriği ile higroskopik nem içeriğinin azaldığı bulunmuştur.

Serin ve diğ (2007) yaptıkları çalışmada normal, yarı hafif ve hafif betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini karşılaştırmışlardır. Çalışma sonucunda Atabey

agregası ile üretilen beton blokların dayanımlarının pomzalı ve diyatomitli beton bloklara göre yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca bu sonuçlardan pomzalı ve diyatomitli hafif ve yarı hafif beton blokların taşıyıcı beton olarak kullanılamayacağı fakat ara bölme duvar elemanı ve yalıtım blokları olarak kullanılabilir özellikte olduğu görülmüştür.

Faghihmaleki ve diğ (2016) yapılan çalışmada köpük beton ve uygulamaları üzerine deneysel çalışmaların sonuçları sunulmuştur. Ayrıca su/çimento oranı, çimento içeriği ve katkı maddeleri gibi parametrelerin köpük beton uygulamalarına etkisi ortaya koyulmuştur. ACI standartlarına göre yürütülen çalışma sonucunda su/çimento oranının köpük betonda basınç dayanımını ciddi şekilde etkilediği ve köpük beton uygulamalarında büzülme problemine dikkat edilmesi gerektiği ortaya koyulmuştur.

Davraz ve Kılınçarslan (2015) yaptıkları çalışmada farklı yoğunlukta köpük betonlar üreterek bunları basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısı iletkenlik özellikleri yönünden kıyaslamışlardır. Deneysel çalışma sonucunda kuru yoğunluk azaldıkça basınç dayanımının da azaldığı, farklı köpük beton tasarımları için, çimento dozajı, su/bağlayıcı oranı ve agrega türü sabit kalmak koşuluyla, kuru yoğunluk ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi yaklaşık doğrusal fonksiyonla tanımlamanın, dolayısıyla hedeflenen kuru yoğunluğa bağlı olarak basınç dayanımını yüksek bir kestirimle tahmin etmenin mümkün olduğu bulunmuştur.

Aldridge ve Ansell (2001) yaptıkları çalışmada konvansiyonel beton ile köpük betonların yalıtım özellikleri kıyaslanmıştır. 1000 g/dm^3 birim hacim ağırlıktaki köpük beton ile çimento-kum karışımı bir harcın ısı iletim katsayı değerleri karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonucunda köpük betonun yalıtım özelliklerinin, konvansiyonel betonun 6 katı daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Taylor (1969) yaptığı çalışmada, tuğla duvarın iç kısmının 800 g/dm^3 yoğunluğunda köpük beton ile kaplanması durumunda ısı yalıtımının %23'e kadar iyileştirilebildiğini rapor etmiştir.

Giannakou ve Jones 2002'deki çalışmalarında $800-1400 \text{ g/dm}^3$ birim hacim ağırlığa sahip köpük beton numunelerde çimento ağırlığının %30'u oranında uçucu

kül ikamesi yapılarak ısı iletim katsayısı değerleri kıyaslanmıştır. %30 uçucu kl ikamesine sahip numunelerin yalıtım özelliklerinin % 12-38 oranlarında olumlu yönde değiştiği gözlemlenmiştir.

Mikulica ve diğ.(2017), 5 farklı karışım oranıyla yaptığı deneysel ęalıřmada köpük betonları 28 günlük kr süreleri sonrası fırınlayarak ısı iletim katsayıları ve birim hacim ağırlıkları üzerinden yorumlar yapmışlardır. 350-1000 g/dm³ arasında birim hacim ağırlığa sahip numunelerde en yüksek basınę mukavemeti 2.8 MPa olarak bulunurken, yalıtım özelliklerinin birim hacim ağırlıkların düşmesi ile pozitif etkilendiği, en iyi ısı iletim katsayı değerinin de en düşük yoğunluktaki numunelerde 0.0808W/mK olarak lęldę belirtilmiştir.

Nambiar ve Ramamurthy (2014), birim hacim ağırlıktan sonra köpük betonların basınę dayanımını etkileyen diğer faktörleri araştırmışlardır. Farklı boyutlarda agregalar kullanılarak üretilen köpük beton numunelere basınę dayanım testleri uygulanmıştır. En yüksek basınę mukavemetine sahip numunelerin en düşük kum tane boyutuna sahip numunelerde görüldüğü tespit edilmiştir. Belirli bir yoğunluk için, kumun uçucu kül ile değiştirilmesi daha yüksek mukavemet ile sonuğlanmıştır.

Jones ve McCarthy (2006) yaptıkları ęalıřmada köpük betonların yoğunlukları ve ısı iletkenlikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Köpük betonun 1000-1200 g/dm³ yoğunluk aralığında 0.23-0.42 W/mK ısı iletkenlik katsayısına sahip olduklarını bildirmişlerdir. Ayrıca kullanılan ęimento oranının yarıya düşürüldüğü numunelerde hidrasyon ısısında %40 düşüş gözlemlenmiştir. Uçucu kl kullanımı sonrasında devreye giren puzolanik aktivite sebebiyle hidrasyon ısıları daha da dşmş, tepe sıcaklığa ulaşma sresinde 5 saate yakın gecikme gözlemlenmiştir. Bu da büzülme riskini minimize etmede önemli rol oynayabilmektedir.

Demirboğa ve Gl (2003) ęalıřmalarında genleştirilmiş perlit ve pomza agregası, bağlayıcı olarak ęimento ile ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun yalıtım özelliklerine etkileri üzerine deneyler yürütmüşlerdir. Hafif beton numune üretiminde hem genleştirilmiş perlit hem de pomza kullanılmıştır. Silis dumanı ve uçucu kl ise %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. En yüksek ısı iletkenlik değeri olan 0.318 W/m[]K pomza agregası ile elde edilmiştir. Silis dumanı ve uçucu kl arttıķa ısı iletkenlik değerinin azalma eğilimi gösterdiği rapor

edilmiştir. En düşük değer 0.1472 W/m²K ile geliştirilmiş perlit ve %30 uçucu kül içeren numunelerde gerçekleşmiştir. Pomza yerine, geliştirilmiş perlit kullanımı betonun yalıtım özelliklerini %43.5 oranında geliştirmiştir.

Demirboğa, 2007'deki kapsamlı çalışmasında silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve bu mineral katkıların ikili kombinasyonlarını kapsayan beton özelliklerini araştırmış ısı iletkenliğinin en düşük olduğu grubun çimento yerine %30 oranında uçucu kül içeren grup olduğunu bildirmiştir. Mineral katkı içeren tüm grupların ısı iletkenlik değerlerinde ise sadece çimento içeren kontrol numunelerine göre düşüş gözlemlendiği ifade edilmiştir. Bu da köpük betonda puzolan kullanımının, köpük stabilizasyonunda ne kadar önemli olduğunu bize göstermektedir.

Köpük beton karışımı hazırlanırken karışım süreleri normal betonlara göre daha çok önem arz etmektedir. Köpük, kendiliğinden sönebilen bir malzeme olduğu için uzun süreli karışımlarda köpüğün sönererek çimento hamuru içerisine girememesi riski ile karşılaşılabilir. Bu kapsamda Benningfield ve dig. (2005) yaptıkları deneysel çalışmada köpük betonun karıştırma süresindeki bir artışın daha fazla hava sürüklenmesine neden olduğu, ancak uzun süreli karıştırmanın daha az kararlı kabarcıklara, kabarcıkların kombinasyonuna ve dolayısıyla ayrışmaya neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Köpük kalitesinin, köpük betonun stabilitesi ve dayanımı için çok önemli olduğunu belirtmişlerdir.

Amran ve dig. (2015) yaptıkları derlemede köpük betonların kuruma büzülmesi değerlerinin, konvansiyonel betonlara göre 4-10 kat daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bazı çalışmaların çimento kullanımının da kuruma büzülmesini artırdığı sonucuna vardığını belirten derlemede, çimento yerine ikame edilen puzolanların hidratasyon ısını düşürerek kuruma büzülmesi davranışını pozitif yönde etkilediği belirtilmiştir (Chindapasirt ve dig, 2008).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Materyal

Deneysel çalışmada ana bağlayıcı olarak Portland çimentosu kullanılmıştır. Uçucu kül ve traverten atıkları farklı oranlarda ikame edilerek deneyler yapılmıştır. Köpük beton üretim aşamasında köpük jeneratörü kullanılarak karışıma köpük ajanı + su karışımı ilave edilmiştir.

3.1.1 Çimento

Köpük beton üretiminde CEM I 42,5 R çimento kullanılmıştır. Farklı tipte çimentolar kullanılabilirken, özellikle erken yüksek dayanım gerektiren beton imalatlarında ve soğuk hava koşullarında erken dayanımı nedeniyle CEM I 42.5 R tercih edilir. Yoğunluk azaldıkça basınç dayanımında beklenen azalmayı en aza indirmek için yüksek dayanımlı çimento tercih edilmiştir. B

3.1.2 Traverten Atığı

Deneysel çalışmada kullanılan traverten çamuru Denizli Irlıganlı bölgesinden alınmıştır. Deneysel çalışmada traverten fabrikalarındaki atıkların büyük çoğunluğunu oluşturan traverten çamuru kullanılmıştır. Traverten blokları fabrikalarda ıslak kesim işleminden sonra istenilen ölçülere getirilmektedir. Bu kesme işlemi sonucunda kesilen bloğun altında çamur oluşur. Bu çamurların fabrikalarda depolanması ve boşaltılması ciddi maliyetler oluşturmaktadır.

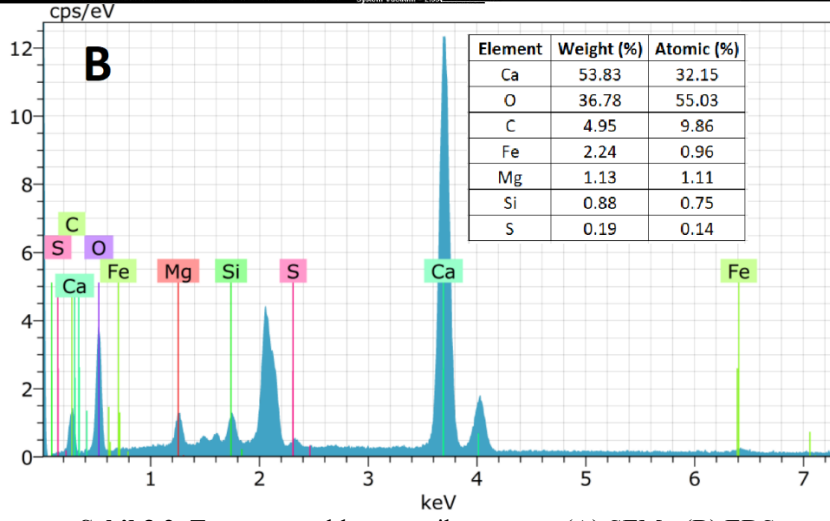
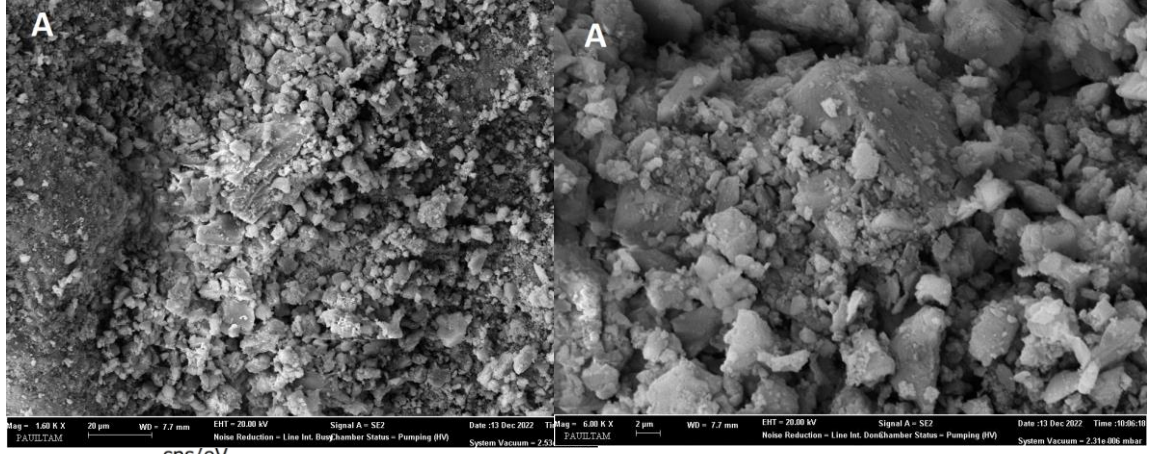
Fabrikadan getirilen traverten çamuru, etüvde 105 °C'de 24 saat kurutulmuştur. Daha sonra kırıcı yardımı ile toz haline getirilmiştir. Bu formda üretilen numunelerde topaklanma sorunu görüldüğü için öğütülmüş traverten atıkları 1 no'lu elekten geçirilmiştir. Daha homojen bir forma getirilen traverten atıkları numunelerde bu formda kullanılmıştır (Şekil 3.1).



Şekil 3.1: Traverten atıklarının kullanılabilir hale getirilmesi

Traverten atığının mikro morfolojilerini belirlemek ve kullanılan malzeme çapının belirlenmesi için SEM analizi gerçekleştirilmiştir. SEM analizine alınan traverten atığı, köpük betonda kullanıldıkları boyutlarda teste tabii tutulmuştur. Traverten atığının benzer tane çaplarına sahip olduğu ve tane boyutlarının 1-15 μm arasında değiştiği ve kalsiyum içeriğinin %53.83 olduğu bulunmuştur. SEM analizi sonuçları Şekil 3.2’de verilmiştir.

Bunların dışında traverten atığı, kimyasal bileşimini belirlemek için X-Ray Floresans (XRF) testine tabii tutulmuştur. XRF analiz sonuçlarına göre traverten atık malzemelerinin CaO bileşimi %56.95 bulunurken, diğer oksit bileşenleri %1’in altındadır. Tablo 3.1’de XRF analiz sonuçları yer almaktadır.



Şekil 3.2: Traverten atıklarının mikro yapısı: (A) SEM ; (B) EDS

Tablo 3.1: Traverten atıklarının kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşenler	Oran (%)
Na ₂ O	0.96
MgO	0.81
Al ₂ O ₃	0.24
SiO ₂	0.84
P ₂ O ₅	0.11
SO ₃	0.17
K ₂ O	≤0.0012
CaO	56.95
TiO ₂	0.01
Cr ₂ O ₃	0.000
MnO	0.003
Fe ₂ O ₃	0.26

3.1.3 Uçucu Kül

Deneysel çalışmada Yatağan Uçucu Külü kullanılmıştır. Yatağan uçucu külü, reaktif kireç miktarının % 10'a yakın olması nedeniyle TS EN 197-1'e göre W sınıfına (kalkersi uçucu kül) girmektedir. Ancak, ASTM C 618'e göre SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ değerinin %70'in üzerinde olması nedeniyle F sınıfı küle (silissi) uygun olmakla birlikte, yine CaO'in %10'u geçmesi sonucunda C sınıfına (kireçsi kül) girmektedir. Buna göre, bu külün her iki uçucu kül sınıfı için de sınırdaki olduğu düşünülmüştür. Yatağan külü, ASTM C 618 ve TS 639'daki SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃> 70 koşulunu sağlamaktadır (Türker vd, 2009). Deneysel çalışmada kullanılan uçucu külün XRF testi sonucunda SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ değerleri toplamı ortalama %80.65 olarak bulunmuştur (Tablo 3.2).

Tablo 3.2: Uçucu külün kimyasal özellikleri

Kimyasal Bileşenler	Oran (%)
SiO ₂	51.5
Al ₂ O ₃	23.08
Fe ₂ O ₃	6.07
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	80.65
CaO	10.53
MgO	2.42
SO ₃	1.32
K ₂ O	2.54
Na ₂ O	0.77

3.1.4 Köpük Ajanı

Köpük beton, çimento şerbetine, köpük ajanı + su karışımının ilavesiyle oluşan bir hafif beton türüdür. Deneysel çalışmada organik köpük ajanı kullanılmıştır. Organik köpük ajanları, sentetik köpük ajanlarına kıyasla daha fazla yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve basınç dayanımına sahiptir (Kuzielová vd, 2016). Organik köpük ajanları çevre dostu ürünlerdir. pH değerleri 7-8 civarında ve yoğunluğu 1085 g/dm³tür.

Köpük ajanı/su oranı burada önem arz etmektedir. Yapılan denemelerde 1/10 ve 1/15 oranlarında hazırlanan köpük numunelerde köpüğün renginin kahverengi olduğu ve çok sulu olduğu için çimento şerbetiyle birlikte çalışmakta zorlandığı görülmüştür. Bu sebeplerle köpük ajanı/su oranı deneysel çalışmada 1/20 olarak alınmıştır.

3.1.5 Cam Elyaf Lif

Çelik, cam ve polimer malzemelerden üretilen lif katkıları, betonda eğilme dayanımını artırmak ve çatlak oluşumlarını önlemek için yaygın olarak

kullanılmaktadır. Bu çalışma kapsamında beton üretiminde katkı maddesi olarak 12 mm uzunluğunda kırılmış cam elyaf lif malzeme kullanılmaktadır. Lif kullanılan numunelerin birim hacim ağırlığı ve su oranı sırasıyla 600 g/dm^3 ve 0.35 olarak alınmıştır. Bağlayıcı ağırlığının %0.5, %1, %1.5, %2'si oranında cam elyaf lif karışımlara ilave edilerek %75 çimento-%25 traverten atığı ve %75 çimento-%25 uçucu kül karışımları için testler yapılmıştır. Ayrıca üçlü kompozitlerden optimum sonuçlara sahip olduğu düşünülen %40 çimento-%30 uçucu kül-%30 traverten atığı içerikli numuneler de farklı lif oranlarında denenerek sonuçları kıyaslanmıştır.

3.1.6 Kullanılan Kalıplar ve Cihazlar

3.1.6.1 Kalıplar

Yapılan deneysel çalışmada eğilme ve basınç dayanımı testleri için $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki çelik prizma kalıplar kullanılmıştır. Su emme değerleri için $70 \times 70 \times 70$ mm boyutlarındaki ahşap kalıplar kullanılmıştır. Kuruma büzülmesi ölçümleri için $25 \times 25 \times 285$ mm boyutlarındaki çelik kalıplar kullanılmıştır. Çalışmanın ilerleyen aşamalarında ahşap kalıpların iç yüzey sertliğinin yetersiz olduğu ve ahşap materyallerin daha çok su tutması sebebiyle numunelerde dağınımalara neden olduğu kanaatine varılarak su emme değerleri de $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki numuneler üzerinden yapılmıştır. Kullanılan kalıplar Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Kullanılan kalıplar

3.1.6.2 Cihazlar

Pamukkale Üniversitesi Deprem ve Yapı Teknolojileri Araştırma Laboratuvarında yapılan eğilme ve basınç testleri için BESMAK firmasının 200kN kapasiteli BCO serisi servo-hidrolik beton presi kullanılmıştır. Eğilme dayanımı testi için servo-hidrolik beton presinin içerisine 3 noktalı eğilme aparatı eklenmiştir. Basınç testi için ise aynı servo-hidrolik presin içerisine küçültülmüş pres aparatı eklenmiştir. Kuruma büzülmesi testleri için ise çimento büzülme deney seti kullanılmıştır. Isıl iletim katsayısı ölçümlerinde KEM QTM-500 termal iletkenlik analiz cihazı kullanılmıştır. Kullanılan test cihazları şekil 3.4'te gösterilmiştir. Ayrıca köpük üretebilmek için köpük tankı ve köpük jeneratörü yaptırılmıştır. PVC borudan oluşan köpük jeneratörü İzmir'de özel üretim olarak yapılmıştır.



Şekil 3.4: Kullanılan cihazlar (1: Üç noktalı eğilme aparatı; 2: Basınç aparatı; 3: Isıl iletkenlik ölçüm cihazı; 4: Kuruma kaynaklı büzülme test cihazı)

3.2 Yöntem

3.2.1 Travertenin Puzolanik Aktivite İndeksinin Bulunması

Denizli ve çevresindeki traverten atıklarının beton içerisinde kullanılabilirliği kapsamında Denizli'deki bir fabrikadan temin edilen traverten atıkları kurutularak puzolanik aktivite indeksi ölçülmüştür.

Puzolanik aktivite indeksinin bulunmasında iki ayrı yöntem kullanılabilir. Biri kimyasal yöntem diğeri ise mekanik yöntemdir. Yapılan deneysel çalışmada mekanik yöntem kullanılmıştır.

Bu yöntemde iki ayrı numune seti hazırlanır. İlki kontrol numunesi denilen katkısız numunedir. Bu numunede bağlayıcı olarak %100 çimento kullanılır. Ölçme numunesi denilen ikinci numunede ise bağlayıcı olarak %65 çimento %35 aktivitesi ölçülecek puzolan kullanılır. Kullanılacak bağlayıcıların yakın incelik değerlerinde olması halinde aynı su/bağlayıcı oranı kullanılarak puzolanik aktivite ölçümü yapılabilir. Yapılan SEM analizleri sonucunda traverten atıklarının 15-25 µm çaplara kadar çıkabildiği gözlemlenirken çimentonun da 20-30 µm çaplarda tanelere sahip olduğu bilinmektedir. Dolayısı ile aynı su/bağlayıcı oranında numune üretimlerine geçilmiştir.

Karışımda 1 kısım bağlayıcı + 3 kısım kum + ½ kısım su kullanılır. Su/çimento oranı 0,50'dir.

- Önce kuru karışım (çimento + kum) karıştırılır. Ölçme numunesinde kuru karışıma toz haline getirilen traverten atığı (Şekil 3.5) da eklenir.



Şekil 3.5: Toz haline getirilen traverten atığı

- Hazırlanan kuru karışıma (şahit numunede çimentoya, ölçme numunesinde çimento traverten karışımına) su yavaşça eklenir (Şekil 3.6).



Şekil 3.6: Karışım suyunun sisteme verilmesi

- Karışımın homojen olması için hazırlanan karışım mikserde tekrar karıştırılır (Şekil 3.7).



Şekil 3.7: Mikserde karıştırılan numune

- 40x40x160 mm boyutlarındaki çelik kalıpların yarısına kadar doldurulan numuneler şişlenir sonra tamamlanır (Şekil 3.8) ve tokmaklanarak kalıba tam olarak bir yerleşme sağlanır.



Şekil 3.8: Numunelerin kalıba yerleştirilmesi

- Numuneler kür havuzunda geçen 7 ve 28 günlük kür süreleri ardından basınç testine tabi tutulur (Şekil 3.9).



Şekil 3.9: Basınç dayanımı tayini

Tablo 3.3: Pozolanik aktivite indeksi test sonuçları

Deney Seti	7 Günlük		28 Günlük	
	Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	Kırılma Yüğü (kN)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Şahit Numune	36.6	22.85	50.01	31.25
Ölçme Numunesi	27.17	17	37.59	23.49

TS 639'a göre ölçme numunelerinin 28 günlük basınç dayanımları, Portland çimentosuyla hazırlanmış şahit numunelerin basınç dayanımlarının %70'inden az olmamalıdır (TS 639, 1998). Testler sonucunda bu değer $23.49/31.25 = \%75.17$ çıkmıştır (Tablo 3.3). Uygulanan mekanik yöntem sonucunda traverten atıklarının pozolan olarak kullanılabilir olduğu ortaya koyulmuştur. Daha sonra aynı testler traverten atıklarının toz olarak değil de su ile karıştırılarak sisteme verilmesi şeklinde tekrarlanacaktır. Daha yüksek dayanım elde edileceği öngörülmektedir.

3.2.2 Kıvam Denemeleri

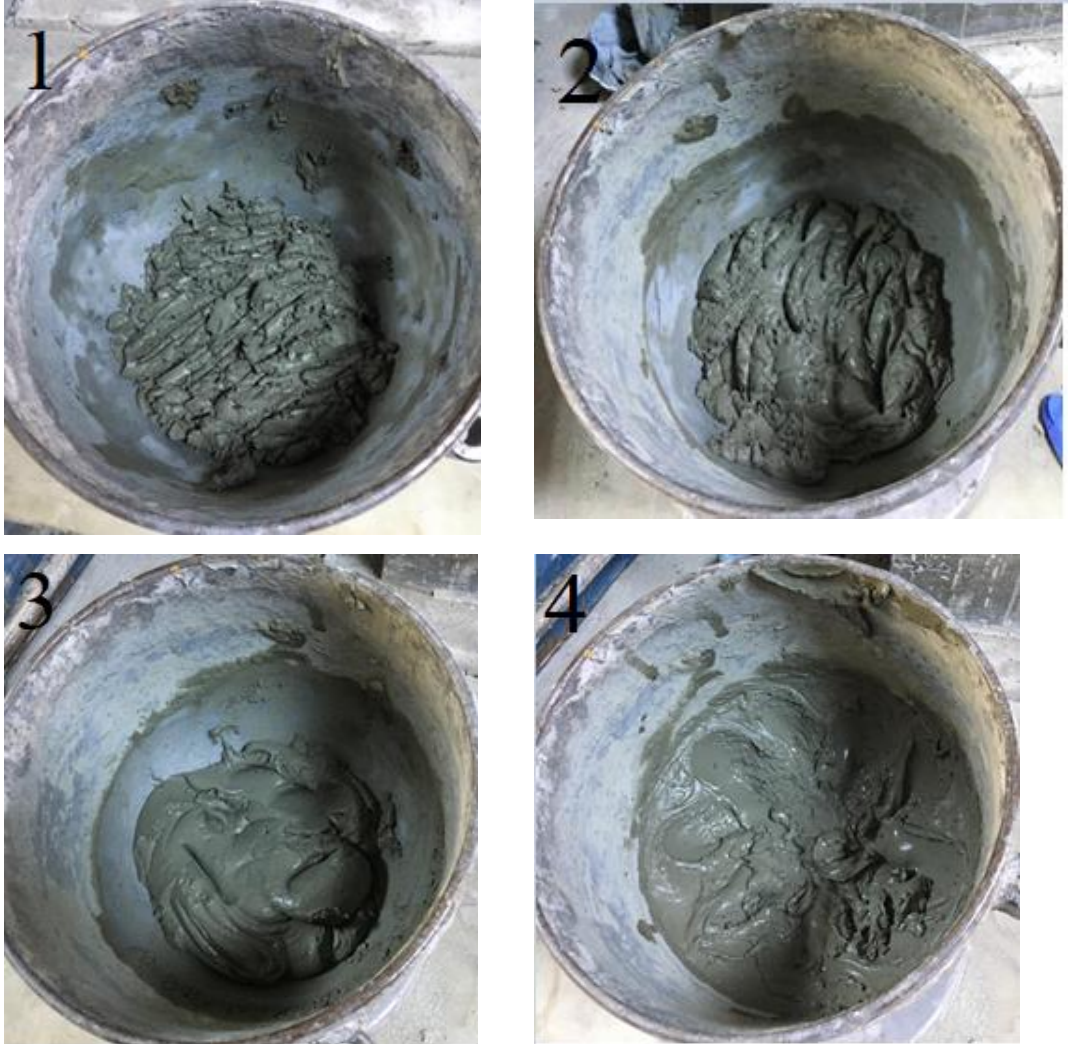
Köpük betonlar, kıvam olarak kendiliğinden yerleşen betonlara çok yakın bir akışkanlıkta olmalıdırlar. Bu yüzden ilk hipotez olarak güçlü bir çimento harcı oluşturup daha sonra köpük karışımını bu harcın içine ekleme fikri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Çimento ve uçucu kül farklı oranlarda karıştırılarak deneme karışımları hazırlanmıştır. Bu kapsamda ilk önce çimento harcı denemeleri yapıp yayılma tablası deneyi ile kıvamları hakkında yorum yapılmıştır. Aşağıda, üretilen harçların karışım oranları ve bazı kıvamlar değerleri verilmiştir.

- %100 çimento, %20 su/çimento, %1 Ace450(çimento ağırlığınca)---- hafif kuma
- %50 uçucu kül, %50 çimento, %20 su/çimento, %1.2 Ace450 -----
- %50 uçucu kül, %50 çimento, %20 su/çimento, %1.1 Ace450 -----çökme
- %50 uçucu kül, %50 çimento, %20 su/çimento, %1 Ace450 -----yayılma tablası 40cm üstü

- %50 uçucu kül, %50 çimento, %23 su/çimento, %0.4 Ace450 ----yayılma tablası 38.5cm
- %50 uçucu kül, %50 çimento, %23 su/çimento, %0.3 Ace450 ----yayılma tablası 23.5cm
- %100 çimento, %23 Su/çimento, %0.36 Ace450 -----yayılma tablası 19.5cm

Sonraki denemelerde su/çimento oranı 0.20 olarak sabit tutularak akışkanlaştırıcı miktarı değiştirilerek kıvam deneyleri yapılmıştır. Hiper akışkanlaştırıcı olarak polikarboksilik eter esaslı, su azaltan, ACE450 kullanılmıştır. Bu aşamada uçucu kül kullanılmamıştır. Bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılmıştır. Üretilen numunelerin kıvamları Şekil 3.10-11’de verilmiştir.

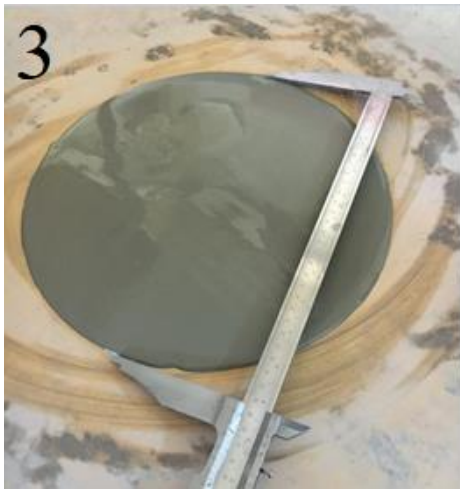
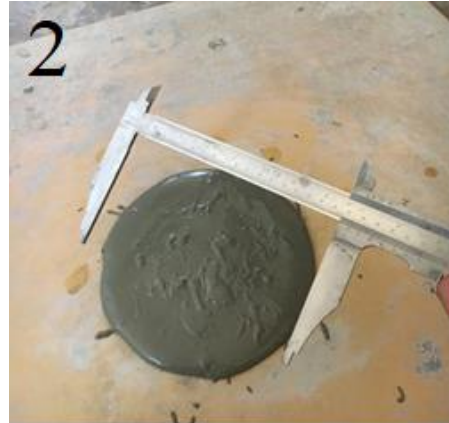


Şekil 3.10: 1: Ace450 oranı=%0.4 çok koyu kıvam; 2: Ace450 oranı=%0.6 çok koyu kıvam; 3: Ace450 oranı=%0.7 koyu kıvam; 4: Ace450 oranı=%0.8 koyu kıvam



Şekil 3.11: Ace450 oranı=%0.9 normal kıvam

Bu aşamada istenen kıvam sağlanamamıştır. Bu sebeple bir sonraki aşamada su/bağlayıcı oranı 0.23'e çıkarılmıştır. Bu aşamada da bağlayıcı olarak sadece çimento kullanılmıştır. Hiper akışkanlaştırıcı oranı değiştirilerek üretilen harç numunelere kıvam testleri yapılmıştır (Şekil 3.12).



Şekil 3.12: 1: Ace450 oranı=%0.4 yayılma tablası değeri 15,5cm; 2: Ace450 oranı=%0.5 yayılma tablası değeri 19cm; 3: Ace450 oranı=%0.6 yayılma tablası değeri 30cm; 4: Ace450 oranı=%0.5 (tekrar deneme) yayılma tablası değeri 22 cm

3.2.3 Köpük Beton  retimi

Karışım yapılırken önce karışım suyunun 2/3 kadarı mikserde dökülmektedir. Daha sonra kuru malzeme kendi içerisinde karıştırıldıktan sonra karışım suyunun üzerine mikserde koyulmaktadır. Tüm kuru malzeme ıslanana kadar karıştırıldıktan sonra, karışım suyunun kalan 1/3 l k kısmı, varsa akışkanlaştırıcıyla karıştırılarak mikserin içerisine eklenmektedir.

İlk  retim için en son üretilen harç numunelerinde kullanılan karışım oranları kullanılmıştır. %100  imento, su/ imento 0.23 ve  imento ağırlığının %0.5'i kadar hiper akışkanlaştırıcı önceki paragrafta tarif edildiği gibi karıştırılmıştır. Daha sonra hazırlanan  imento harcının üzerine köpük jeneratöründen elde edilen köpük eklenmiştir. 1 dakika köpüklü karışım karıştırıldıktan sonra kalıplara alınmıştır. Üretilen köpük betonun birim hacim ağırlığı, birim ağırlık kabı yardımıyla 816 g/dm³  l lm şt r (Şekil 3.13).



Şekil 3.13: İlk üretilen köpük beton denemeleri

Kalıptan çıkarıldıklarında köpük betonlarda çökme olduğu görülmüştür. Çimento hamuru kalıpların alt tarafına doğru çökelirken, köpüğün kalıpların üst taraflarında biriktiği görülmüştür (Şekil 3.14).



Şekil 3.14: İlk üretimlerdeki çökelme problemi

Yakın su/bağlayıcı kullanılan sonraki numunelerin hepsinde ya ciddi çökelmeler görülmüştür ya da köpük, sisteme girmeyi reddetmiştir. Bu problemin sebebi olarak çimento hamurunun fazla rijit olması ve köpüğün bu rijit sisteme girerken zorlandığı sonucuna varılmıştır.

Bu aşamada radikal bir karar vermek durumunda kalınmıştır. İlk üretimlere başlarken çok rijit bir çimento harcı oluşturup köpük karışımını bu sisteme eklemek planlanmıştır. Fakat üretilen çimento harçlarının aşırı rijit yapılarının köpüğün sisteme girişini engellediği kanaatine varılmıştır. Literatüre de bakıldığında su/bağlayıcı oranlarının 0.90 mertebelerine kadar çıkabildiği görülmüştür. Yapılan deneme karışımlarında 0.50 su/bağlayıcı kullanıldığında köpüğün sisteme rahat bir şekilde girebildiği sonucuna varılmıştır. Köpük ajanı ve hiper akışkanlaştırıcının uyum sorunu oluşturabileceği riskine karşı, sonraki üretimlerde numunelerde hiper akışkanlaştırıcı kullanılmamıştır.

3.2.3.1 İkili Kompozitlerin Üretimi

İlk üretim planlamasında birim hacim ağırlıkları 1200 ile 800 g/dm³ arasında değişen numuneler üretilmesi planlanmıştır. Üretimlerde bağlayıcı olarak çimento, uçucu kül ve traverten atığı farklı oranlarda karıştırılarak kullanılmışlardır. %100 çimento bağlayıcı oranına sahip numuneler, 0.50 su/çimento oranında üretilmemiştir. Karışım sağlanırken köpüğün çimento hamuruna tutunamadığı ve sıvıya dönüştüğü gözlenmiştir. Bu sebeple ikili kompozitlerin üretimine başlanmıştır. İlk olarak çimento ve uçucu kül birlikte kullanılarak numuneler üretilmiştir.

0.50 su/bağlayıcı oranına sahip numuneler 1200 ile 800g/dm³ birim hacim ağırlıklarında üretilmişlerdir. Bağlayıcı oranları %50 çimento-%50 uçucu kül ve %75 çimento-%25 uçucu kül olarak belirlenmiştir. Numune üretiminde ilk önce kuru karışım hazırlanmıştır. Kuru malzeme hazırlanırken malzemeler hassas bir şekilde tartı üzerinde ayrı ayrı tartılmış ve daha sonra aynı kap içerisinde karıştırılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15: Çimento ve uçucu kül ile oluşturulan kuru karışım

Daha sonra karışımın yapılacağı mikserin içerisine karışım suyunun 2/3'ü verilip, kuru karışım bu suyun içerisine koyulmuştur. Kuru karışım tamamen ıslandıktan sonra kalan karışım suyu da mikserin içine ilave edilip çimento hamuru hazırlanmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16: Karışım suyunun sisteme verilmesi

Köpük beton üretebilmek için köpük ajanı + su karışımına ve bunları köpüğe dönüştürecek bir köpük jeneratörüne ihtiyaç duyulmaktadır. Köpük ajanı/ su oranı tüm karışımlarda 1/20 olarak kullanılmıştır. Daha önce denenilen 1/10 ve 1/15 köpük ajanı/su oranına sahip numunelerde köpüğün yeterli stabiliteye sahip olmadığı belirlenmiştir. Hazırlanan köpük ajanı + su karışımı köpük tankına doldurulmuştur (Şekil 3.17). Deneysel çalışmada kullanılan köpük tankı 15 cm çapında ve 80 cm yüksekliğinde çelikten imal edilmiş bir tüptür. Daha sonra bu tanka yüksek basınç verilerek karışım, jeneratöre yönlendirilmiştir. Köpük jeneratörü; içerisindeki köpürmeyi hızlandıran bulaşık telleri ve kompresörden gelen yüksek basınç sayesinde içerisine tanktan gelen köpük ajanı + su karışımını betonda kullanılabilir köpük kıvamında dışarıya verebilmektedir.



Şekil 3.17: Köpük ajanı+ su karışımının hazırlanması

Hazırlanan çimento hamuru istenen kıvama getirildikten sonra köpük jeneratöründen gelen köpük, çimento hamurun içerisine eklenerek karıştırılmıştır. Köpük betonda birim hacim ağırlığı etkileyen birincil parametre köpük olduğu için, üretimlerde numuneler istenen birim hacim ağırlığa gelene kadar sisteme köpük verilmeye devam edilmiştir. Numunelerin birim hacim ağırlıkları, birim hacim ağırlık kabı ve tartı yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.18). Bulunan birim hacim ağırlıklarda $\pm 15 \text{ g/dm}^3$ değerler, bulunmak istenen değere yuvarlanmıştır.



Şekil 3.18: Köpüğün sisteme verilmesi ve birim hacim ağırlığının belirlenmesi

Üretimlerde 40x40x160 mm prizma kalıplar, 25x25x285mm prizma kalıplar, 70x70x70 mm küp kalıplar ve 40x100x160 mm prizma kalıplar kullanılmıştır. Ahşap küp kalıplar, iç yüzeylerinin sertlik derecesi numunelere zarar verdiği ve daha çok su tuttuğu için; 40x100x160 mm prizma kalıplar ise sonuçlarda afaki farklılık gösterdikleri için daha sonraki üretimlerde kullanılmamışlardır. Eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ısı iletkenlik katsayısı ve su emme değerlerinin ölçümünde 40x40x160 mm prizma kalıplar, kuruma büzülmesi ölçümlerinde ise 25x25x285mm prizma kalıplar kullanılmıştır. Numunelerin, büzülme test cihazına tam oturabilmeleri için ve ölçümlerde farklılık göstermemeleri için kuruma büzülmesi kalıplarının içerisinde bulunan vidaların uçları törpülenmiştir. Kullanılan kalıplar beton dökümünden önce yağlanmışlardır (Şekil 3.19).



Şekil 3.19: Kalıpların hazırlanması

İstenilen birim hacim ağırlıkta üretilen numuneler kalıplara yerleştirilirken herhangi bir sıkıştırma yöntemi uygulanmamıştır. Üretilen köpük betonlar kendiliğinden yerleşen beton (KYB) kıvamında oldukları için buna gerek duyulmamıştır (Şekil 3.20). Ayrıca köpüğün stabilitesi kaybolmadan numuneleri kalıplara koyabilmek, köpük beton üretiminde önem arz etmektedir.



Şekil 3.20: KYB kıvamındaki köpük betonlar

Üretimler sonucunda numuneler kalıpta iken bir miktar çökme gözlenmiştir (Şekil 3.21). Bu sebeple numuneler bir miktar kalıp boyutundan yüksek üretilerek bu çökmenin sonuçlara verebileceği olumsuz etkilerin önüne geçilmeye çalışılmıştır. Priz

süresi sonunda kalıp boyutundan yüksek kalan numuneler, çelik kesici testere yardımıyla kalıp boyutlarına getirilmiştir (Şekil 3.22).



Şekil 3.21: Çökme gözlemlenen 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip numuneler



Şekil 3.22: Çelik kesici ile düzeltilen numuneler

İkili kompozit numune üretimlerine traverten atığı + çimento ile üretilen numunelerle devam edilmiştir. Traverten atığı çamur halinde fabrikadan getirilmiştir. Mermer ve traverten üretimi yapılan fabrikalarda en çok meydana gelen atık çamurdur. Travertenler kesimhanelere blok şeklinde getirilip sulu kesime tabi tutulur. Bu kesim sonucunda da bloğun altına çamur depolanır. Ticari herhangi bir değeri olmayan bu çamurların depolanması ve atılması da ayrıca masraf kalemleridir. Traverten çamuru, etüvde 105°C'de 24 saat kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan traverten atığı canavar ağızlı kırıcı yardımıyla küçük parçalara ayrılmıştır. Bu haliyle de ikili kompozit malzeme üretiminde kullanılmışlardır. Kuru karışım oranları, %75 çimento- %25 traverten ve %50 çimento- %50 traverten olarak belirlenmiştir (Tablo 3.4).

0.50 su/bağlayıcı oranına sahip olan numunelerdeki çökme, istenilen bir durum olmadığı ve ileriki aşamalarda köpük betonun uygulamasında sorun teşkil edeceği için sonraki üretimlerde 0.40 ve 0.35 su/bağlayıcı oranları kullanılmıştır. Köpük; çok düşük su/bağlayıcı kullanımında çimento hamurunun içerisine giremezken, yüksek su/bağlayıcı kullanımında ise çökmeye neden olmaktadır. Bu yüzden yapılan deneysel çalışmada optimum su/bağlayıcı oranını bulmak çok önemlidir. Traverten atığı + çimento ile üretilen numunelerde su/bağlayıcı oranı 0.40 olarak alınmıştır. Fakat 0.50 su/bağlayıcı oranına sahip numuneler kadar olmasa da 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde de çökmeye rastlanmıştır (Şekil 3.23). Üçlü kompozitler üretilirken bu nedenle su/bağlayıcı oranı sabit 0.35 olarak kullanılmıştır. Bu oranda köpüğün, çimento hamuru içerisindeki stabilitesinin maksimum olduğu ve dayanımların az da olsa daha yüksek çıktığı görülmüştür.



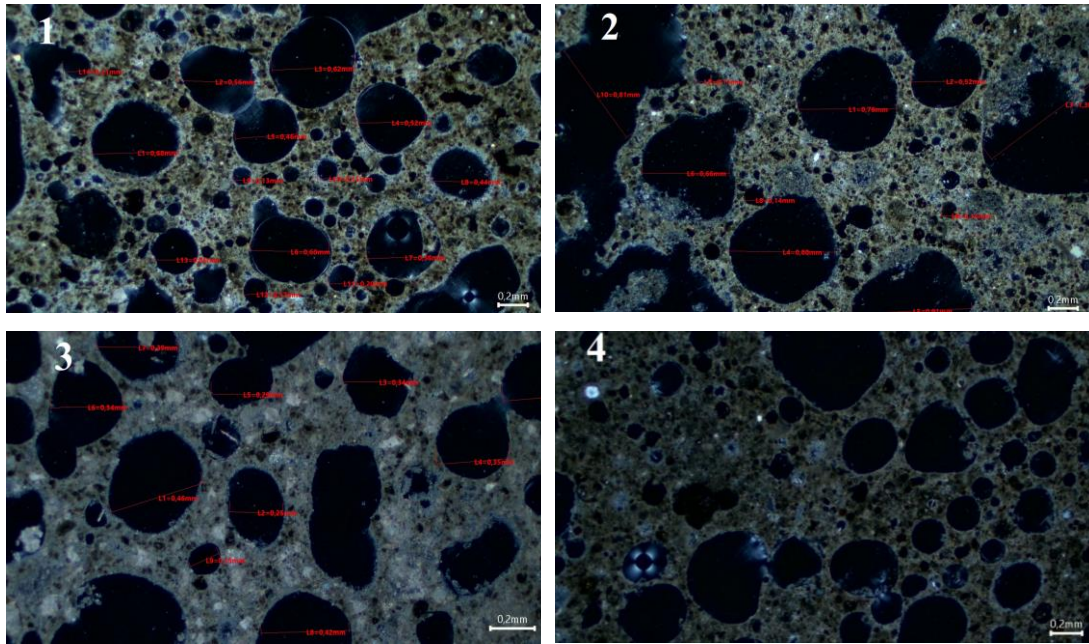
Şekil 3.23: Numunelerde büzülme

Üçlü kompozit malzeme üretimlerinde traverten atığı, uçucu kül ve çimento Tablo 3.7’de görülen oranlarda karıştırılmışlardır. Traverten atığı kullanılan ikili kompozit numunelerde topaklanma nedeniyle stabilitenin düşük olduğu fark edilmiştir. Bu sebeple üçlü kompozit üretimlerinde, kırıcıdan çıkan traverten, 1 no’lu elekten geçirilerek inceltilmiş ve homojen bir hale getirilmiştir (Şekil 3.24).



Şekil 3.24: 1 No'lu elekten geçirilen traverten atığı

İkili kompozit köpük beton üretimlerinin sonucunda seçilen bazı numunelerden ince kesitler alınarak mikroskop altında incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda köpük betonlarda birim hacim ağırlık düştükçe, köpük betonların içeriğindeki kapalı boşluk çaplarının arttığı görülmüştür (Şekil 3.25). Bu da birim hacim ağırlıklar düştükçe köpük betonların yalıtım özelliklerinin olumlu yönde değiştiği sonucunu destekler niteliktedir.



Şekil 3.25: Köpük betonların mikroskop altındaki görüntüleri: (1) %50Çim-%50UK, su/bağlayıcı=0.35, BHA=800g/dm³; (2) %50Çim-%50UK, su/bağlayıcı=0.35, BHA=600g/dm³; (3) %50Çim-%50Tra, su/bağlayıcı=0.35, BHA=800g/dm³; (4) %75Çim-%25UK, su/bağlayıcı=0.35, BHA=600g/dm³

İkili kompozit üretimleri sırasında farklı birim hacim ağırlıklarda, farklı su/bağlayıcı oranında ve farklı karışımlara sahip numuneler üretilmiştir. Bu üretimlerin sonuçları ışığında üçlü kompozitlerin üretimlerine daha kısıtlı parametreler kullanılmak üzere geçilmiştir. İkili kompozitlerin karışım oranları Tablo 3.4’de verilmiştir.

Tablo 3.4: İkili kompozit karışım oranları

Su/Bağlayıcı	0.5		0.4			0.35		
Taze BHA (g/dm³)	1200	800	800	600	450	800	600	450
%75Çim- %25UK	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓
%50Çim- %50UK	✓	✓	✓			✓	✓	
%75Çim- %25TA			✓	✓	✓	✓	✓	
%50Çim- %50TA			✓	✓	✓	✓	✓	

(Çim: Çimento ; UK: Uçucu Kül; TA: Traverten Atığı; BHA: Birim Hacim Ağırlık)

3.2.3.2 Üçlü Kompozitlerin Üretimi

Üçlü kompozit numune üretiminde çimento oranı maksimum %50 olarak belirlenmiştir. Üretimlerin devamında çimento oranı minimum %20'ye kadar düşürülmüştür. Çimento oranının olabildiğince düşürülmesinin sebebi üretilecek numunelerin maliyetlerini olabildiğince minimize etmek ve köpük betonda minimum kullanılacak çimento oranını belirlemektir. Ayrıca literatüre bakıldığında fazla çimento kullanımının büzülme riskini artırma tehlikesini doğurabileceği de görülmektedir (Chindaprasirt ve dig, 2008). Traverten atığı ve uçucu kül oranları kendi içerisinde değişkendir.

Deneme amaçlı çimentosuz ve köpüksüz bir numune de üretilmiştir. Buradaki amaç traverten atığı ya da uçucu külün tek başına bağlayıcı özelliklerinin olup olmadığını görebilmektir. Çimentosuz denemede %50 uçucu kül, %50 traverten atığı kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranı da 0.30 olarak belirlenmiştir (Şekil 3.26). Deneme sonucunda üretilen numune, kür havuzunda dağılmış, mukavemet kazanamamıştır. Sonuç olarak traverten atığı ve yatağan uçucu külünün tek başına bağlayıcı olarak kullanılamayacağı görülmüştür.



Şekil 3.26: Çimentosuz harç denemesi

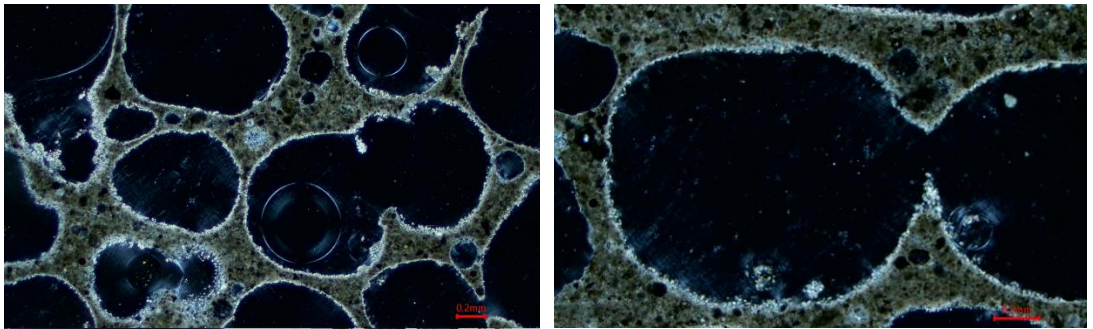
Çalışmanın amaçlarından biri de optimum karışım oranlarını bulmak olduğu için bu şekilde ilerlenmiştir. Üçlü kompozitlerin üretiminde su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuş ve 0.35 alınmıştır. Üçlü kompozit köpük betonların üretimleri süreci Şekil 3.28'de gösterilmiştir.

Üçlü kompozit numune üretiminde kullanılan karışım oranları Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5: Üçlü kompozitlerin karışım oranları

Su/Bağlayıcı	0.35	
	800	600
Taze BHA(g/dm ³)	800	600
%50Çim-%25UK-%25TA	✓	✓
%50Çim-%40UK-%10TA	✓	✓
%50Çim-%10UK-%40TA	✓	✓
%40Çim-%30UK-%30TA	✓	✓
%30Çim-%35UK-%35TA	✓	✓
%20Çim-%40UK-%40TA	✓	✓

Üretilen lifli köpük betonların petrografik yapıları hakkında fikir sahibi olabilmek açısından %75Çim-%25UK, %2 cam elyaf, su/bağlayıcı=0.35 ve BHA=600g/dm³ karışım oranlarına sahip köpük beton numuneler mikroskop altında incelenmiştir (Şekil 3.27). Elde edilen görsellerde, cam elyaf içeren köpük betonların içeriğindeki kapalı boşlukların, liflerle kaplandığı görülmüştür. Köpük betondaki büzülme riskinin sebebi içeriğindeki boşluklardır. Birim hacim ağırlıklar düştükçe boşlukların kapalı boşluk olarak davranmadığı gözlemlenmiştir. Lif kullanılan numunelerdeki boşlukların kapalı boşluk tanımına daha çok uyduğu görülmüştür. Bu da büzülme riski çok yüksek olan köpük betonlarda, lif kullanımının büzülme riskini azaltabileceği sonucunu doğurmuştur.



Şekil 3.27: Lifli köpük betonların petrografik yapıları



Şekil 3.28: Üçlü kompozit numunelerin üretilmesi

3.2.3.3 Lifli Köpük Betonların Üretimi

Deneysel çalışmanın son aşamasında deney sonuçları ışığında optimum olduğu düşünülen karışımlara belirli oranlarda cam elyaf lif eklenmiştir. Köpük beton, büzülme riski yüksek olan betonlardan birisidir. Lif kullanımı, betonda çatlak oluşumunu önleme, eğilme dayanımını geliştirme gibi özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Yapılan deneysel çalışmada da köpük betonlarda büzülmeleri minimize etmek için kullanılmıştır.

Bu bilgiler ışığında cam elyaf lif ilk olarak ikili kompozitlerde kullanılmışlardır. Isıl iletim katsayıları diğer numunelere göre düşük olan ve basınç dayanımları 1MPa üzeri olan numuneler lif eklenecek numuneler olarak seçilmişlerdir. İkili kompozitlerde toplam bağlayıcı kütlelerinin %0.5, %1, %1.5 ve %2 oranlarında cam elyaf lif kullanılmıştır. Seçilen karışım oranları Tablo 3.6’da verilmiştir.

Tablo 3.6 Lif eklenen ikili kompozit karışım oranları

1.Karışım	2.Karışım
%75 Çimento	%75 Çimento
%25 Uçucu Kül	%25 Traverten Atığı
Su/Bağlayıcı=0.35	Su/Bağlayıcı=0.35
BHA=600g/dm ³	BHA=600g/dm ³

Lifli ikili kompozit köpük betonların üretimleri sırasında bağlayıcı kütlesinin %2'si oranında lif içeren numunelerin üretiminde liflerin çok su tutması sebebiyle kıvamların çok koyu olduğu görülmüştür. Kullanılan lif oranı, kuru karışıma fazla geldiği için boşluklar oluştuğu görülmüştür. Üretilen köpük betonlar, lif oranı arttıkça homojenlikten uzaklaşma eğilimine geçmiştir. Bu sebeple optimum olduğu düşünülen üçlü kompozitlerden bir tanesine bağlayıcı kütlesinin %0.5'i, %1'i ve %1.5'i oranlarında cam elyaf lif ilave edilmiştir. Cam elyaf lif eklenen üçlü kompozit numunenin karışım oranı Tablo 3.7'de, üretim süreçleri de Şekil 3.29'da verilmiştir.

Tablo 3.7: Lif eklenen üçlü kompozit karışım oranı

Çimento oranı (%):	40
Uçucu kül oranı (%)	30
Traverten atığı (%):	30
Su/bağlayıcı	0.35
Birim Hacim Ağırlık (g/dm ³)	600



Şekil 3.29: Lifli köpük beton üretimi

3.2.4 Testler

Üretilen köpük beton numunelerine eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme, ısı iletim katsayısı ve kuruma büzülmesi testleri uygulanmıştır.

3.2.4.1 Basınç Dayanımı

Geleneksel betonlarda aranan birincil parametre basınç dayanımıdır. Betonarme yapılarda beton, daha çok basınca çalıştığı hesaba katılarak analizler yapılır. Fakat köpük betonda bu durum farklıdır. Köpük betonda aranan birincil parametre basınç dayanımı değil yalıtım özellikleridir. Tabi ki yalıtım özellikleri geliştirilirken basınç dayanımını da olabildiğince yüksek tutmak gerekmektedir. Aksi

taktirde blok elemanlarda çatlama, dağılma, çökme gibi sorunlarla karşılaşmaktadır.

Eğilme deneyi sonucunda iki parçaya bölünmüş olan yarım prizmalar basınç dayanımı deneyi için hazırlanmıştır. Her yarım prizma, beton presi içerisine koyulan küçük basınç aparatı kullanılarak yan yüzeylerinden yüklenmek suretiyle deneye tâbi tutulmuştur.

Yarım prizmalar, cihazın plâkaları arasına 0.5 mm'den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek ve prizmanın arka yüzü plâkadan veya yardımcı plâkalardan 10 mm taşacak şekilde uzunlamasına yerleştirilmiştir (Şekil 3.30).

Yük (2400 ± 200) N/s hızda olmak üzere düzgün şekilde, deney örneği dayanımını yitirene kadar artırılmıştır. Bulunan kırılma yükünün, yükleme en kesit alanına bölünmesiyle basınç dayanımları tayin edilmiştir (TS EN 196-1, 2002).

$$\sigma = P/A$$

σ : Basınç Dayanımı (MPa)

P: Kırılma Yüğü (N)

A: En kesit alanı (mm²)



Şekil 3.30: Basınç dayanımı testi

3.2.4.2 Isıl İletkenlik Katsayısı Ölçümü

Isıl iletkenlik katsayısı en basit haliyle bir maddenin ısıyı ne kadar ilettiğini sembolize eden bir ölçüm tekniğidir. Birimi W/mK'dir. Isıl iletkenlik katsayısı düştükçe, malzemenin ısı yalıtım özellikleri olumlu yönde ilerlemektedir. Literatürde ısı yalıtımı üzerine yapılan yorumların çoğu ısı iletkenlik katsayısı üzerinden yapılmaktadır. Dolayısı ile malzemelerin ısı yalıtım özelliklerini belirlemede en önemli parametrelerden birisi de ısı iletkenlik katsayısıdır. Isıl iletkenlik katsayısının, yapılan deneyler sonucunda birim hacim ağırlık ile doğru orantılı bir şekilde düştüğü görülmüştür.

Isı yalıtım testleri için KEM QTM-500 test cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz 0.023-11.63W/mK ölçüm aralığına sahiptir. Ölçüm hassasiyeti %5'tir. Test cihazının ölçüm sıcaklık aralığı -10 ile 200 °C arasındadır.

Her bileşimden 3 farklı numune için 22-26 °C sıcaklık aralığında 6 adet termal iletkenlik testi yapılmış ve testler iki farklı yüzey için tekrarlanmıştır.

Ölçümü yapılacak olan numunenin düzgün olan bir yüzeyi, cihazın ölçüm yüzeyine temas ettirilir ve 1 dakikalık ölçüm süresi başlar. Ölçümü yapılacak malzeme köpük kategorisinde olduğu için minimum 2 mm kalınlığa sahip olması gerekmektedir. Yapılan deneysel çalışmada ısı iletkenlik katsayısı ölçümleri 40x40x160 mm boyutlarındaki prizma numunelerde yapılmıştır. Ölçümün yapılabilmesi için numunelerde nem bulunmamalı ve oda sıcaklığı en fazla 26 °C olmalıdır. Bu sebeple numuneler teste tabi tutulmadan önce etüvde kurutulmuşlardır. Ölçüm cihazı kenarlarından hava aldığı zaman da ölçüm yarım kalabilmektedir. Bunun önüne geçebilmek için Şekil 3.31'de görüldüğü gibi 2 adet 40x40x160 mm numune birbirlerine temas ettirilerek aradaki boşluklar kapatılmış ve ölçüm yapılacak numunenin üzerine cihazın ölçüm yüzeyi temas ettirilerek ölçümler yapılmıştır.

Isıl iletim katsayı ölçümleri TS 825'e göre malzemenin içerisinde %80 bağıl nem varken ölçülür (TS 825, 2008). Fakat deneysel çalışmada kullanılan cihaz nemli malzemelerde ölçüm yapamadığı için ölçümler EN 1745 standardı esas alınarak etüvde kurutulmuş numuneler üzerinde yapılmıştır (TS EN 1745, 2004).



Şekil 3.31: Isıl iletkenlik katsayısı ölçümleri

3.2.4.3 Su Emme Deneyi

Betonun içerisindeki boşluklu yapı hakkında bilgi vermesi için yapılan bir deneydir. Köpük beton, içeriğindeki boşluklu yapı sayesinde ısı köprülerinin önüne geçerek yalıtım sağlamaktadır. Fakat içerisindeki boşlukların büyük ya da küçük olması, dayanımı dolaylı olarak etkilemektedir. İçeriğindeki boşluklar çok büyük olduğu zaman su emme değerleri de aynı oranda yüksektir.

Kür havuzundan çıkarılan numuneler ıslak yüzeyleri silinerek doygun kuru yüzey durumuna getirilir. Bu haliyle tartıldıktan sonra 24 saat boyunca 105°C'lik etüvde kurutulularak içeriğindeki tüm suyu kaybetmesi sağlanır. Kuru numune en son tekrar tartılır (Şekil 3.32). Su emme değeri % cinsinden aşağıdaki bağıntıyla bulunur (TS 4045, 1984).

$$S_a = 100 \times (W_2 - W_1) / W_1$$

S_a Su Emme Yüzdesi

W_2 Doygun kuru yüzey durumundaki numunenin kütlesi

W_1 Kuru numunenin kütlesi



Şekil 3.32: Su emme deneyi

3.2.4.4 Kuruma Büzülmesi Ölçümleri

Betonun priz alıp kurmasının ardından betonun hacminde meydana gelen büzülme kuruma büzülmesi denir. Betonun bileşenleri, betonun içerisindeki nem oranı ve ortam sıcaklığı kuruma büzülmesini etkileyen faktörler arasındadır. Köpük betonlar büzülmeğe çok meyilli betonlar olduğu için, kuruma büzülmesini belli oranlarda tutabilmek önem arz etmektedir.

Bu amaçla 25x25x285mm prizma kalıplar kullanılmıştır. Kuruma büzülmesi ölçümlerinde numunelerin zaman içerisindeki boy değışimleri ölçülmektedir. Kuruma büzülmesi arttıkça numunelerin boylarında kısalma meydana gelmektedir. Kuruma büzülmesi ölçümleri mikron hassasiyetinde oldukları için kalıpların uçlarına vidalar yerleştirilmiş, numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra da bu vidalar ölçüm cihazına oturtularak ölçümler yapılmıştır. Ölçümün yapılacağı yüzey ve yön belirlenerek her ölçümde aynı yerden ölçüm yapılması sağlanmıştır (Şekil 3.33). Kuruma büzülmesi ölçümleri ve hesaplamaları ASTM C596-09 esaslarınca yapılmıştır (ASTM C596-09,2017).



Şekil 3.33: Kuruma büzülmesi ölçümleri

Üretilen numuneler birim hacim ağırlıklarına bağlı olarak yerine göre çok narın numunelerdir. Numune kalıp boyutlarının çok narın ve numunelerin çok kırılğan olmasından dolayı; özellikle düşük birim hacim ağırlıktaki bazı numuneler kalıptan çıkarılırken, bazıları da ölçümler sırasında dağılmışlardır (Şekil 3.34). Bu sebeple kuruma büzülmesi karşılaştırmaları yapılırken sadece lifli üretilen numuneler üzerinden yorum yapılmıştır.



Şekil 3.34: Dağılan kuruma büzülmesi numuneleri

4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Yapılan deneysel çalışmada birden fazla değişken vardır. Bunlar; birim hacim ağırlık, kullanılan bağlayıcılar(atıklar), karışım oranları, su/bağlayıcı oranı, lif miktarı gibi değişkenlerdir. Bu parametrelerin her biri değiştirildiğinde çoğu test sonucuna direkt olarak etki etmektedir. Sonuçların kendi içerisinde daha tutarlı olabilmesi amacıyla deneysel çalışmada köpük ajanı/su oranı optimum olduğu düşünülen 1/20 oranı belirlenip, daha sonra hiç değiştirilmemiştir. Yine sonuçları etkilememesi açısından ve köpük ajanı ile uyum problemi yaşanmaması amacıyla hiper akışkanlaştırıcı, deneysel çalışma safhasında hiç kullanılmamıştır.

Test sonuçları ayrı ayrı değerlendirilmiş daha sonra hepsi bir araya getirilerek yorumlanmıştır. 47 farklı deney setine sahip olan deneysel çalışmada yüzlerce numune üretilmiş, bunların bir kısmı narinlik, kalıpların sertlik seviyeleri gibi sebeplerle kullanılamamıştır. Alt başlıklarda deney sonuçları ayrı ayrı verilmiştir.

4.1 Basınç Dayanımı Sonuçları

Bu bölümde basınç dayanımı testine tabi tutulan numunelerin tek tek sonuçları verilmiştir. Sağ tarafta da her bir BHA değeri için ortalama bulunan basınç dayanımı değerleri tablolarda gösterilmiştir (Tablo 4.1-4.10). Tablolar açıkça göstermektedir ki BHA değerleri düştükçe basınç dayanımları da düşmektedir. Literatürde yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu da bu durumu desteklemektedir. Çoğu karışım oranı için su/bağlayıcı oranı düştükçe basınç dayanımlarının daha yüksek çıktığı tablolarda görülmektedir.

Tablo 4.1: %50 Çimento-%50 UK içeren numunelerin basınç dayanımları

%50 Çimento- %50 UK			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
0.5	1200	12.5	12.9
		14.7	
		11.9	
		14.3	
		11.6	
		12.4	
	800	4.0	4.2
		4.3	
		3.8	
		4.2	
		4.2	
		4.6	
0.40	800	9.0	8.2
		8.7	
		8.8	
		9.3	
		7.2	
		6.2	
0.35	800	5.9	6.8
		7.3	
		6.2	
		6.9	
		6.8	
		7.6	
	600	2.8	3.1
		2.7	
		3.2	
		2.6	
		4.1	
		3.1	

Tablo 4.2: %75 Çimento-%25 UK içeren numunelerin basınç dayanımları

%75 Çimento- %25 UK			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
0.50	1200	13.4	14.6
		15.4	
		14.2	
		15.9	
		13.4	
		15.1	
	800	4.5	5.4
		5.3	
		5.6	
		6.6	
		4.9	
		5.7	
0.40	800	5.2	4.9
		6.4	
		3.4	
		3.8	
		4.8	
		6.1	
	600	2.3	2.3
		2.4	
		2.5	
		2.5	
		2.2	
		2.1	
0.35	800	5.6	7.4
		7.9	
		8.0	
		6.6	
		7.3	
		9.0	
	600	2.1	2.2
		2.1	
		1.7	
		2.1	
		2.7	
		2.7	
	450	0.7	0.8
		1.2	
		0.6	
		0.7	
		0.8	
		0.7	

Tablo 4.3: %75 Çimento-%25TA içeren numunelerin basınç dayanımları

%75 Çimento- %25 TA				
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	
0.40	800	3.6	4.0	
		3.2		
		4.4		
		4.1		
		4.4		
		4.7		
	600	1.8	1.1	
		1.2		
		0.7		
		0.6		
	450	0.6	0.6	
		0.5		
		0.7		
		0.7		
		0.7		
		0.6		
	0.35	800	4.9	4.6
			5.7	
4.6				
4.8				
3.5				
4.0				
600		2.3	2.3	
		2.4		
		2.0		
		2.1		
		2.6		
		2.7		

Tablo 4.4: %50 Çimento-%50TA içeren numunelerin basınç dayanımları

%50 Çimento- %50 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
0.40	800	2.0	1.8
		1.9	
		1.8	
		1.9	
		1.9	
		1.4	
	600	1.0	1.2
		1.7	
		0.8	
		1.3	
		1.3	
		1.2	
	450	0.3	0.3
		0.3	
		0.4	
		0.4	
		0.3	
		0.3	
0.35	800	1.7	2.0
		1.8	
		2.1	
		2.2	
		2.3	
		2.3	
	600	1.1	1.1
		1.0	
		1.0	
		0.9	
		1.3	
		1.1	

Üçlü kompozitlerin üretimlerinde, 3.2.3.2 bölümünde de anlatıldığı üzere su/bağlayıcı oranı 0,35'te sabit tutulmuş ve optimum değerler olduğu görülen 600 ve 800g/dm³ birim hacim ağırlıklar dışında numuneler üretilmemiştir. Üçlü kompozitlerin basınç dayanımı sonuçları Tablo 4.5-4.9'da verilmiştir.

Tablo 4.5: %50 Çimento-%25UK-%25TA içeren numunelerin basınç dayanımları

%50 Çimento- %25 UK- %25 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
0.35	800	3.7	3.82
		3.7	
		3.5	
		3.9	
		4.0	
		4.1	
	600	1.3	0.98
		1.5	
		0.7	
		0.7	
		0.6	
		1.1	

Tablo 4.6: %50 Çimento-%40TA-%10UK içeren numunelerin basınç dayanımları

%50 Çimento- %40 TA- %10 UK			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
0.35	800	3.4	3.5
		3.0	
		3.1	
		4.5	
		3.5	
		3.6	
	600	0.5	0.6
		0.4	
		0.7	
		0.9	
		0.7	
		0.4	

Tablo 4.7: %50 Çimento-%40UK-%10TA içeren numunelerin basınç dayanımları

%50 Çimento- %40 UK- %10 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
0.35	800	4.0	4.4
		4.0	
		5.2	
		4.9	
		4.5	
		4.0	
	600	1.1	0.8
		0.7	
		0.5	
		0.9	
		0.8	
		0.8	

Tablo 4.8: %40 Çimento-%30UK-%30TA içeren numunelerin basınç dayanımları

%40 Çimento- %30 UK- %30 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
0.35	800	3.5	3.1
		2.8	
		2.9	
		2.4	
		3.5	
		3.4	
	600	0.9	1.1
		1.0	
		1.1	
		1.1	
		1.3	
		1.1	

Tablo 4.9: %30 Çimento-%35UK-%35TA içeren numunelerin basınç dayanımları

%30 Çimento- %35 UK- %35 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
0.35	800	1.9	1.9
		1.7	
		1.9	
		2.3	
		1.9	
		1.8	
	600	0.7	0.8
		0.7	
		1.1	
		0.9	
		0.8	
		0.9	

Tablo 4.10: %20 Çimento-%40UK-%40TA içeren numunelerin basınç dayanımları

%20 Çimento- %40 UK- %40 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Basınç Dayanımları (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
0.35	800	1.5	1.6
		1.4	
		1.8	
		1.7	
		1.5	
		1.6	
	600	0.5	0.5
		0.5	
		0.4	
		0.5	
		0.5	
		0.7	

4.2 Su Emme Deneyi Sonuçları

Üretilen köpük betonların boşluk yapıları hakkında bilgi vermesi için su emme deneyleri yapılmıştır. Birim hacim ağırlıklar düştükçe ve yalıtım özellikleri iyileştikçe su emme değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Birim hacim ağırlıkları düşürmek için sisteme verilen köpük hacmi artırılmıştır. Bu sebeple de köpük beton içeriğindeki boşluk çapları büyüyerek numunelerin su emme kapasitelerini artırmıştır. Her karışım oranı için farklı farklı tablolarda su emme değerleri verilmiştir (Tablo 4.11-4.20).

Tablo 4.11: %50 Çimento- %50 UK içeren numunelerin su emme değerleri

%50 Çimento- %50 UK			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.50	1200	10	11
		11	
	800	22	24
		25	
0.40	800	17	18
		19	
0.35	800	26	26
		26	
	600	51	55
		60	
		54	

Tablo 4.12: %75 Çimento- %25 UK içeren Numunelerin Su Emme Değerleri

%75 Çimento- %25 UK			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.50	1200	13	14
		15	
	800	32	31
		30	
0.4	800	28	31
		37	
		29	
	600	78	72
		70	
		67	
0.35	800	51	38
		33	
		30	
	600	84	77
		75	
		72	
	450	95	88
		91	
		78	

Tablo 4.13: %75 Çimento- %25 TA içeren numunelerin su emme değerleri

%75 Çimento- %25 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.40	800	44	40
		46	
		30	
	600	139	94
		51	
		91	
	450	158	156
		153	
		156	
0.35	800	35	35
		35	
		34	
	600	53	53
		51	
		55	

Tablo 4.14: %50 Çimento- %50 TA içeren numunelerin su emme değerleri

%50 Çimento- %50 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.40	800	44	51
		51	
		58	
	600	48	53
		49	
		60	
	450	175	161
		137	
		171	
0.35	800	69	65
		67	
		58	
	600	109	112
		124	
		104	

Tablo 4.15: %50 Çimento- %25 UK- %25 TA içeren numunelerin su emme değerleri

%50 Çimento- %25UK- %25 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.35	800	47	40
		38	
		36	
	600	72	97
		102	
		117	

Tablo 4.16: %50 Çimento- %40 UK- %10 TA içeren numunelerin su emme değerleri

%50 Çimento- %40 UK- %10 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.35	800	34	41
		41	
		47	
	600	65	94
		122	
		96	

Tablo 4.17: %50 Çimento- %40 TA- %10 UK içeren numunelerin su emme değerleri

%50 Çimento- %40 TA- %10 UK			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.35	800	35	28
		24	
		24	
	600	129	111
		98	
		106	

Tablo 4.18: %40 Çimento- %30 UK- %30 TA içeren numunelerin su emme değerleri

%40 Çimento- %30 UK- %30 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.35	800	40	42
		48	
		37	
	600	74	70
		68	
		67	

Tablo 4.19: %30 Çimento- %35 UK- %35 TA içeren numunelerin su emme değerleri

%30 Çimento- %35 UK- %35 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.35	800	59	57
		55	
		55	
	600	80	86
		67	
		110	

Tablo 4.20: %20 Çimento- %40 UK- %40 TA içeren numunelerin su emme değerleri

%20 Çimento- %40 UK- %40 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Su Emme (%)	Ortalama Su Emme (%)
0.35	800	57	55
		53	
		57	
	600	140	137
		139	
		132	

4.3 Isıl İletkenlik Katsayısı Sonuçları

Isıl iletkenlik katsayı ölçümlerinin sonuçları, Tablo 4.21-4.30'da görüleceği üzere her karışım oranı için farklı farklı tablolar halinde verilmiştir. Sonuçlara bakılacak olursa 1200 g/dm³ birim hacim ağırlıktaki numunelerin yüksek ısıl iletim katsayıları dolayısı ile yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir olmadığı kanaatine varılmıştır. Literatürde de görüleceği üzere BHA değerleri düştükçe numunelerin yalıtım özelliklerinin geliştiği tablolarla gösterilmiştir. Lifli numunelerde ısıl iletim katsayı değerlerinin 0.1 W/mK değerinin altına düşebildiği gözlemlenmiştir.

Tablo 4.21: %50 Çimento- %50 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri

%50 Çimento- %50 UK			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.50	1200	0.516	0.467
		0.505	
		0.442	
		0.434	
		0.438	
	800	0.438	0.406
		0.436	
		0.345	
0.40	800	0.302	0.293
		0.347	
		0.272	
		0.295	
		0.296	
		0.248	
0.35	800	0.272	0.260
		0.234	
		0.263	
		0.278	
		0.248	
		0.264	
	600	0.144	0.156
		0.188	
		0.149	
		0.144	
		0.160	
		0.151	

Tablo 4.22: %75 Çimento- %25 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri

%75 Çimento- %25 UK			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.50	1200	0.525	0.556
		0.582	
		0.548	
		0.534	
		0.589	
	800	0.430	0.342
		0.326	
		0.253	
		0.461	
		0.331	
0.40	800	0.270	0.254
		0.296	
		0.219	
		0.139	
		0.212	
		0.356	
		0.286	
	600	0.155	0.153
		0.170	
		0.140	
		0.145	
		0.162	
		0.146	
0.35	800	0.207	0.211
		0.202	
		0.221	
		0.219	
		0.199	
		0.221	
	600	0.138	0.131
		0.117	
		0.136	
		0.136	
		0.115	
	450	0.146	0.121
		0.127	
0.134			
0.102			
0.128			
0.136			
		0.100	

Tablo 4.23: %75 Çimento- %25 TA içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri

%75 Çimento- %25 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.40	800	0.277	0.277
		0.305	
		0.250	
		0.258	
		0.299	
		0.302	
		0.248	
	600	0.164	0.128
		0.148	
		0.096	
		0.112	
		0.119	
	450	0.108	0.104
		0.113	
		0.109	
		0.085	
		0.105	
		0.103	
0.35	800	0.212	0.185
		0.180	
		0.180	
		0.195	
		0.166	
		0.179	
	600	0.123	0.128
		0.117	
		0.122	
		0.134	
		0.121	
		0.153	

Tablo 4.24: %50 Çimento- %50 TA içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri

%50 Çimento- %50 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.40	800	0.174	0.171
		0.169	
		0.164	
		0.187	
		0.179	
		0.200	
		0.127	
	600	0.151	0.166
		0.174	
		0.179	
		0.185	
		0.189	
		0.119	
	450	0.110	0.111
		0.107	
		0.105	
		0.115	
		0.134	
0.101			
0.35	800	0.153	0.153
		0.158	
		0.152	
		0.151	
	600	0.126	0.121
		0.114	
		0.117	
		0.133	
		0.117	

Tablo 4.25: %50 Çimento- %25 UK- %25 TA içeren Numunelerin Isıl İletkenlik Katsayısı Değerleri

%50 Çimento- %25 UK- %25 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.35	800	0.194	0.228
		0.280	
		0.238	
		0.215	
		0.186	
		0.307	
		0.194	
		0.214	
	600	0.131	0.117
		0.100	
		0.132	
		0.132	
		0.106	
		0.102	

Tablo 4.26: %50 Çimento- %40 UK- %10 TA içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayısı değerleri

%50 Çimento- %40 UK- %10 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.35	800	0.184	0.191
		0.197	
		0.200	
		0.187	
		0.175	
		0.200	
	600	0.198	0.146
		0.112	
		0.115	
		0.146	
		0.189	
		0.109	
		0.111	
		0.188	

Tablo 4.27: %50 Çimento- %40 TA- %10 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri

%50 Çimento- %40 TA- %10 UK			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.35	800	0.194	0.186
		0.180	
		0.197	
		0.184	
		0.175	
	600	0.100	0.121
		0.113	
		0.120	
		0.158	
		0.110	
		0.100	
		0.148	

Tablo 4.28: %40 Çimento- %30 TA- %30 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri

%40 Çimento- %30 UK- %30 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.35	800	0.259	0.202
		0.217	
		0.177	
		0.213	
		0.166	
		0.216	
		0.169	
	600	0.114	0.125
		0.122	
		0.126	
		0.141	
		0.119	
		0.126	
		0.126	

Tablo 4.29: %30 Çimento- %35 TA- %35 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri

%30 Çimento- %35 UK- %35 TA			
Su/Bağlayıcı	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.35	800	0.176	0.159
		0.152	
		0.143	
		0.157	
		0.175	
		0.151	
	600	0.128	0.114
		0.120	
		0.105	
		0.116	
		0.121	
		0.092	
		0.119	

Tablo 4.30: %20 Çimento- %40 TA- %40 UK içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri

%20 Çimento- %40 UK- %40 TA			
Su/Bağlayıcı 1	BHA(g/dm ³)	Isıl İletim Katsayıları (W/mK)	Ortalama Isıl İletim Katsayısı (W/mK)
0.35	800	0.140	0.159
		0.157	
		0.141	
		0.179	
		0.164	
		0.177	
		0.157	
	600	0.101	0.112
		0.136	
		0.103	
		0.111	
		0.109	
		0.111	
		0.110	

4.4 Lifli Köpük Betonların Test Sonuçları

Lifli köpük betonların basınç dayanımı, ısı iletkenlik katsayısı ve su emme yüzdesi değerleri aynı tablolarda verilmiştir. Tablolarda görülen lif oranları kuru karışım ağırlığının yüzdesi cinsinden verilmiştir. Lifli numunelerde su/bağlayıcı oranı 0,35; birim hacim ağırlık 600g/dm³ olarak sabit tutulmuştur. Yalıtım özelliklerinin en iyi olduğu numuneler bunlar olduğu için bu tercih yapılmıştır. Uçucu kül içeren ikili kompozit numunelerin lif katkılı sonuçları Tablo 4.31’de verilmiştir. Tablolardaki veriler ortalama verilerdir.

Tablo 4.31: Kullanılan lif oranlarına göre UK katkılı ikili kompozit numune sonuçları

%75 Çim-%25 UK su/bağ=0.35 BHA= 600 g/dm³				
Lif Oranı	%0.5	%1.0	%1.5	%2.0
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.1	2.1	1.6	1.0
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.115	0.120	0.098	0.093
Su Emme (%)	94	100	103	96

Traverten atıkları içeren ikili kompozit numunelerin lif katkılı sonuçları Tablo 4.32’de verilmiştir.

Tablo 4.32: Kullanılan lif oranına göre TA katkılı ikili kompozit numune sonuçları

%75 Çim-%25 TA su/bağ=0.35 BHA= 600 g/dm³				
Lif Oranı	%0.5	%1	%1.5	%2
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.4	1.4	1.5	0.8
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.129	0.117	0.124	0.099
Su Emme (%)	62	104	99	117

Üçlü kompozit lifli numunelerin tüm test sonuçları Tablo 4.33’te verilmiştir.

Tablo 4.33: Üçlü kompozit lifli numunelerin lif oranlarına göre test sonuçları

%40 Çimento %30 UK %30TA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³ için Lif Etkinliği			
Lif Oranı (%)	Basınç Dayanımı (MPa)	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Su Emme (%)
0	1.1	0.124	77
0.5	1.2	0.109	75
1	0.9	0.115	106
1.5	0.5	0.097	112

4.5 Maliyet Analizi

Günümüzde enerji maliyetlerinin artması sebebiyle yalıtım konusu üzerine düşülen konulardan birisidir. Enerji maliyetlerini minimize edebilmek için üstün yalıtım özelliklerine sahip blok elemanların kullanımı oldukça revaçtadır. İnşaat sektöründe en çok kullanılan duvar malzemesi tuğla olmakla beraber daha iyi yalıtım özelliklerine sahip ve daha hafif olan gaz beton da oldukça sık kullanılan yapı malzemelerindendir. Bu bölümde optimum sonuçlara sahip olduğu düşünülen 3 farklı köpük beton karışımı için maliyet analizleri yapılarak gaz beton ve tuğla ile kıyaslanmıştır. Maliyet hesabı yapılırken su için Deski'den alınan verilere göre Denizli'de 1m³ su kullanma bedeli atık su bedeli, kdv ve çtv dahil 14.27 TL olarak alınmıştır. Köpük ajanı fiyatlandırması dolar ile yapılmaktadır ve hesaplarda 1 dolar 27 TL olarak hesaba alınmıştır. Kıyaslamalar m³ fiyatları üzerinden yapılmıştır. Maliyet analizi yapılan köpük beton numunelerin karışım oranları aşağıda verilmiştir.

- **KB1-** %40Çim-%30UK-%30TA, %0.5 elyaf, su/bağ=0.35, BHA=600g/dm³
- **KB2-** %75Çim-%25TA, su/bağ=0.35, BHA=600g/dm³
- **KB3-** %20Çim-%40UK-%40TA, su/bağ=0.35, BHA=800g/dm³

Seçilen köpük betonların maliyet analizleri Tablo 4.34-4.36'da verilmiştir.

Tablo 4.34: 1m³ KB1 numune için maliyet analizi

Malzeme	Kullanılan miktar	Birim Fiyat	Maliyet
CEM I 42.5R	178.598 kg	1620.00 TL/ton	289.32 TL
Uçucu Kül	133.949 kg	63.00 TL/ton	8.43 TL
Traverten Çamuru	133.949 kg	0 TL	0 TL
Su (Köpük karışımı dahil)	165.004 kg	14.27 TL/m ³	2.35 TL
Cam Elyaf	2.232 kg	85.00 TL/kg	189.74 TL
Köpük Ajanı	0.433 kg	1.6 \$/kg	18.73 TL
TOPLAM			508.57 TL

Tablo 4.35: 1m³ KB2 numune için maliyet analizi

Malzeme	Kullanılan miktar	Birim Fiyat	Maliyet
CEM I 42.5R	329.236 kg	1620.00 TL/ton	533.36 TL
Traverten Çamuru	109.745	0 TL	0 TL
Su (Köpük karışımı dahil)	170.199	14.27 TL/m ³	2.42 TL
Köpük Ajanı	0.825 kg	1.6 \$/kg	35.64 TL
TOPLAM			571.42

Tablo 4.36: 1m³ KB3 numune için maliyet analizi

Malzeme	Kullanılan miktar	Birim Fiyat	Maliyet
CEM I 42.5R	116.707 kg	1620.00 TL/ton	189.06 TL
Uçucu Kül	233.414 kg	63.00 TL/ton	14.69 TL
Traverten Çamuru	233.414 kg	0 TL	0 TL
Su (Köpük karışımı dahil)	213.681	14.27 TL/m ³	3.04 TL
Köpük Ajanı	0.470 kg	1.6 \$/kg	20.31 TL
TOPLAM			227.10 TL

Seçilen karışım oranlarında üretilen köpük betonların m³ maliyetlerinin 227.10 TL ile 571.42 TL arasında değiştiği görülmektedir. Cam elyafın toplu alımlarda çok düşük ücretlere alınacağı düşünülecek olursa lifli köpük beton maliyetlerinin daha da düşeceği öngörülebilir. Belirlenen fiyatlarda işletme gideri, işçilik ve nakliye gibi kalemler dikkate alınmamıştır.

G2/0.4 gaz betonun güncel birim fiyatı (Nisan, 2023) ise 1299.00 TL olarak belirlenmiştir. Bu fiyat yüklenicilerin kullandığı birim fiyatlar olup kar marjı eklenmiştir. Ayrıca işletme gideri, işçilik ve nakliye gibi maliyetler için de %25'lik bir gider olduğu düşünülür ve bu oran düşülürse birebir olmasa da makul bir kıyaslama yapılabilir. Bu kabullerle G2/0.4 gaz betonun maliyeti 1039.20 TL olarak alınmıştır.

Çalışmada bu gaz betonla kıyaslama yapılma sebebi piyasada en çok kullanılan gaz beton oluşu ve yalıtım özelliklerinin, deneysel çalışma kapsamında üretilen köpük betonlara yakın oluşudur.

Duvar malzemesi olarak tuğla seçildiğinde ise 13.5'lik dökme yatay delikli tuğla fiyatı 05/03/2023 tarihli güncelleme ile birlikte 4.10 TL olarak geçmektedir. 1m³ hacim için yaklaşık 205 adet 13.5'lik yatay delikli tuğla gerektiğinden 1m³ tuğla satış fiyatı 205x4.10 TL=840.50 TL olarak karşımıza çıkmaktadır. Yukarıda bahsedilen kabullerle işletme giderleri, işçilik ve nakliye için %25 düşüldüğünde 1m³ tuğlanın maliyeti 672.40 TL olarak alınmıştır.

Kıyaslama yapılan malzemelerin teknik özellikleri ve maliyetleri aşağıda Tablo 4.37'de aynı tablo içerisinde verilmiştir.

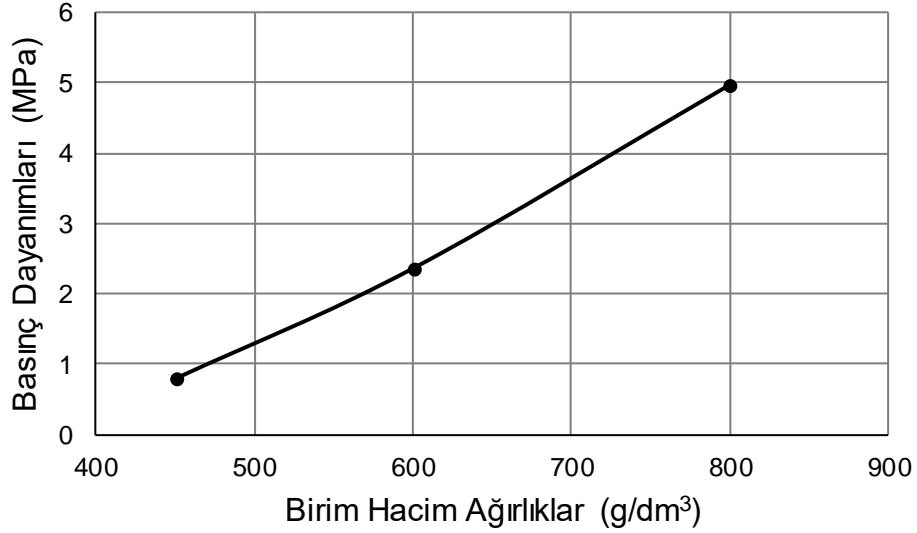
Tablo 4.37: Kıyaslama yapılan malzemelerin teknik özellikleri ve maliyetleri

Malzeme	Isıl İletim Katsayısı (W/mK)	Basınç Dayanımı (MPa)	Kuru Birim Hacim Ağırlık (g/dm ³)	Maliyet (TL/m ³)
Gaz Beton (G2/0.40)	0.123	2.0	400	1039.20
Tuğla (13.5)	0.32	2.0	650	672.40
KB1	0.109	1.23	450	508.57
KB2	0.123	2.27	490	571.42
KB3	0.159	1.61	655	227.10

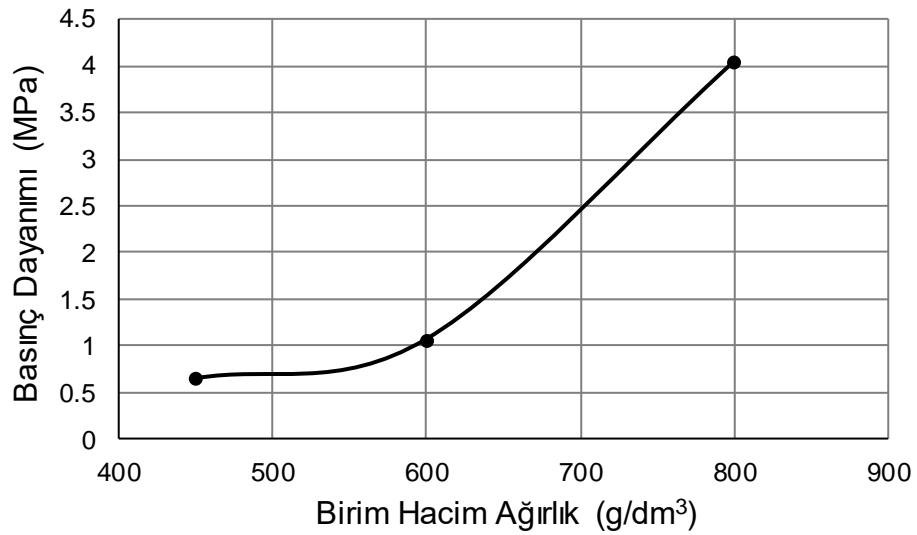
4.6 Sonuçların Yorumlanması

Deneysel çalışmada numunelerin basınç dayanımları 14.56 MPa ile 0.34 MPa arasında değişmiştir. Basınç dayanımı en yüksek numune %75 çimento-%25 uçucu kül içeriğine, 0.50 su/bağlayıcı oranına ve 1200g/dm³ birim hacim ağırlığa sahiptir. Basınç dayanımı en düşük olan numune ise %50 çimento-%50 traverten atığı, 0.40 su/bağlayıcı oranı ve 450 g/dm³ birim hacim ağırlığa sahip numunelerdir. Basınç dayanımındaki farklılığın ana nedeni birim hacim ağırlıklar arasındaki büyük farktır. Köpük beton, taşıyıcı sistemde kullanılan bir beton türü olmadığı için dayanımının çok düşük olduğu numunelerin geniş bir bant halinde dağıldığı gözlemlenmiştir. Numunelerin yalıtım kapasitesini artırmak için köpük hacimleri artırılarak

numunelerin yoğunlukları azaltılmıştır. Artan köpük hacmi nedeniyle betondaki boşluk oranı da artmıştır. Bu nedenle genel olarak basınç dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bazı karışım oranlarındaki numunelerin basınç dayanımı-birim hacim ağırlık grafikleri ortalamalar cinsinden Şekil 4.1 ve 4.2'te gösterilmiştir.



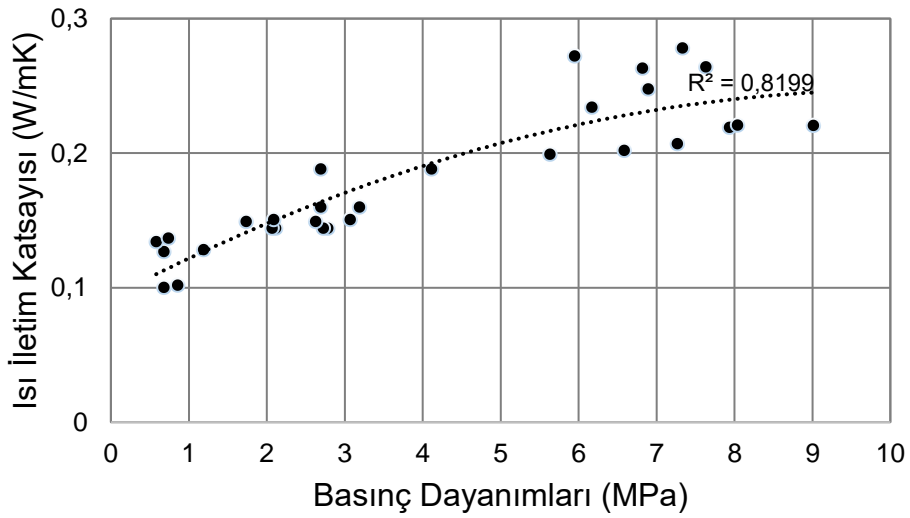
Şekil 4.1: %75 Çimento %25 UK içeren su/bağ=0.35 olan numunelerde Basınç Dayanımı-BHA grafiği



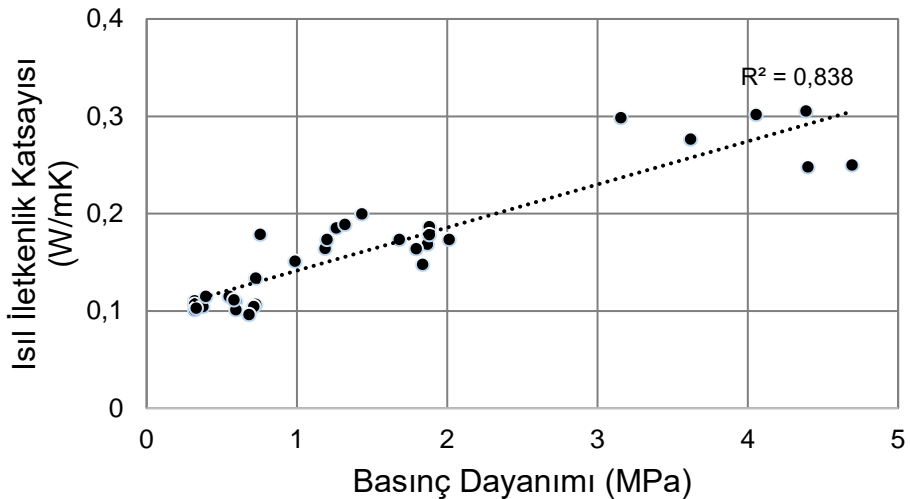
Şekil 4.2: %75 Çimento %25 TA içeren su/bağ=0.40 olan numunelerde Basınç Dayanımı-BHA grafiği

Isı iletkenliklerinin azaltılması, köpük betonun yalıtım özelliklerinin iyileştirilmesi açısından oldukça önemlidir. Artan köpük hacmi nedeniyle betondaki boşluk oranı da artmıştır. Bu boşluklar ısı köprülerini engellemiş ve ısı

iletkenliklerinde azalmaya neden olmuştur. Ancak artan boşluk oranı nedeniyle beton daha kırılğan hale gelmiştir. Şekil 4.3'te çimento-uçucu kül içeren ve 0.35 su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde, Şekil 4.4'te ise çimento-traverten atığı içeren ve 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde basınç dayanımı-ısıl iletim katsayısı grafiği verilmiştir. Isı iletkenliklerini dolaylı olarak azaltmak için basınç dayanımlarında bazı tavizler verildiği gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmada, basınç dayanımı 1 MPa'nın altında olan köpük betonların, numunelerin şekli bozulduğu için yapılar da blok eleman olarak kullanılamayacağı sonucuna varılmıştır.



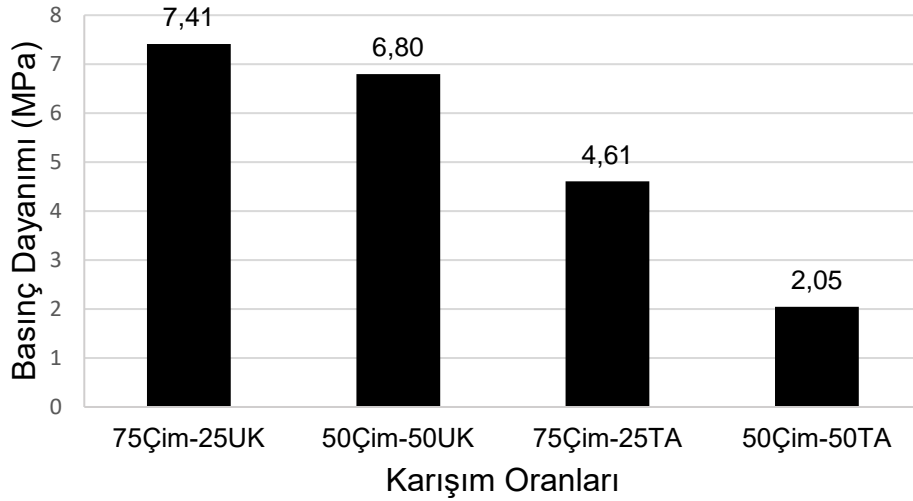
Şekil 4.3: Çimento-Uçucu kül içeren ve 0.35 su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde basınç dayanımı-ısıl iletim katsayısı grafiği



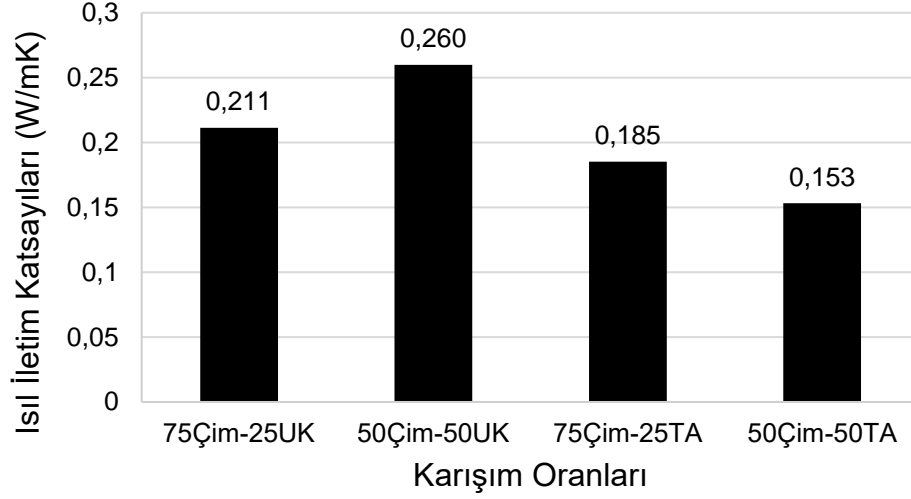
Şekil 4.4: Çimento-Traverten atığı içeren ve 0.40 su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde basınç dayanımı-ısıl iletim katsayısı grafiği

Köpük karışımının çimento şerbetine karıştırılmasında uçucu külün önemli bir rol oynadığı gözlemlenmiştir. Köpük betonda en önemli sorunlardan biri kuruma büzülmesidir. Uçucu kül, hidrasyon ısısını düşürebilir, kuruma büzülmesini en aza indirebilir ve daha kararlı numunelerin üretilmesini sağlar. Literatürdeki bazı çalışmalara bakıldığında uçucu kül kullanımının köpük betonda basınç dayanımını %25'e kadar artırabildiği görülmektedir (Bing ve dig. 2011). Şekil 4.5'te, aynı karışım oranlarına sahip uçucu küllü ve traverten atıklı numunelerin basınç dayanımları karşılaştırılmıştır. Görüldüğü üzere uçucu kül içeren numunelerin, aynı oranlarda traverten atığı içeren numunelere göre yaklaşık %53 daha yüksek basınç dayanımına sahip olduğu görülmüştür.

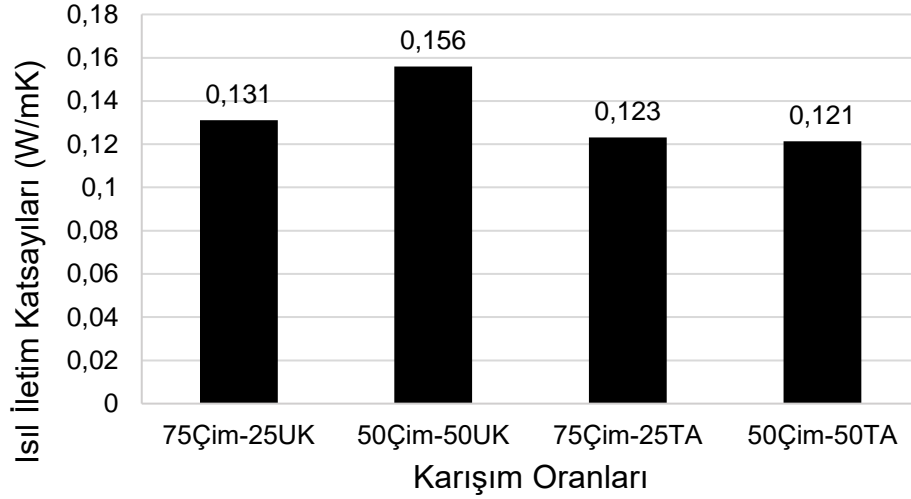
Traverten kendi içinde boşlukları olan bir malzemedir. Bu nedenle traverten atığı içeren köpük betonda kapalı hava boşluk oranı daha yüksektir. Yüksek hava boşluk oranı nedeniyle Şekil 4.6 ve 4.7'de aynı karışım oranlarına sahip uçucu küllü ve traverten atıklı numunelerin ısı iletkenlik katsayıları karşılaştırılmıştır. $600\text{g}/\text{dm}^3$ birim hacim ağırlığa sahip numunelerde traverten atıklı numuneler %14; $800\text{g}/\text{dm}^3$ birim hacim ağırlığa sahip numunelerde ise traverten atıklı numuneler %28 yalıtım konusunda daha avantajlı çıkmıştır.



Şekil 4.5: Birim hacim ağırlıkları $800\text{g}/\text{dm}^3$ ve su/bağlayıcı oranları 0.35 olan ikili kompozitlerin basınç dayanımları kıyaslaması



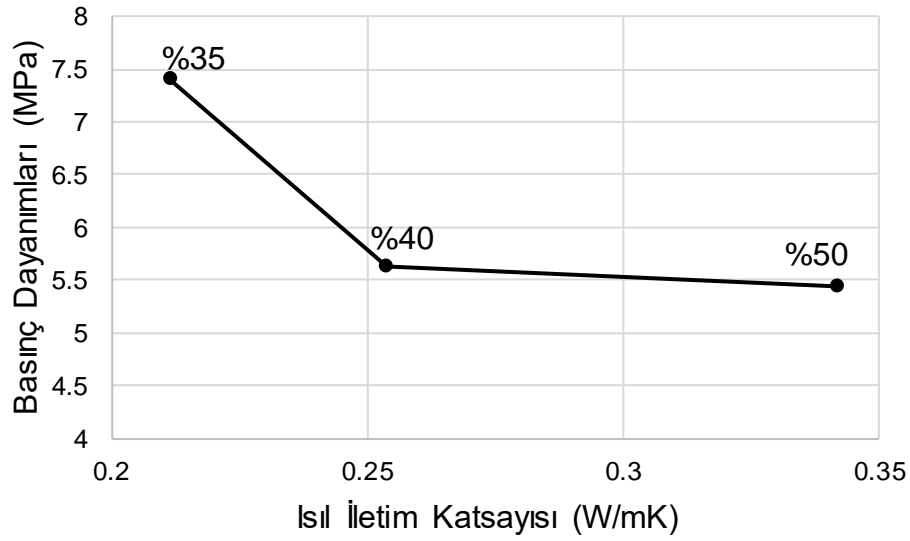
Şekil 4.6: Birim hacim ağırlıkları 800g/dm^3 ve su/bağlayıcı oranları 0.35 olan ikili kompozitlerin ısı iletim katsayıları kıyaslaması



Şekil 4.7: Birim hacim ağırlıkları 600g/dm^3 ve su/bağlayıcı oranları 0.35 olan ikili kompozitlerin ısı iletim katsayıları kıyaslaması

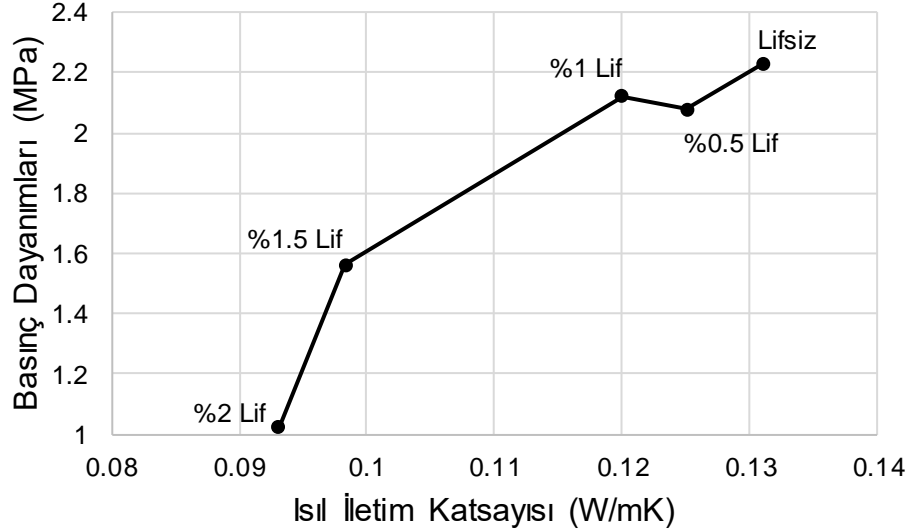
Su/bağlayıcı oranının azaltılmasının geleneksel betonun basınç dayanımını artıran bir parametre olduğu bilinmektedir. N. Beningfield vd., (2005) yaptıkları çalışmada köpük betonda düşük su oranının kullanılmasının kırılma numunelere neden olduğunu belirtmişlerdir. Öte yandan yüksek su/bağlayıcı oranı köpük betonda çökelme riskini artırır. İçeriğindeki organik köpük nedeniyle büzölmeye çok müsait olan köpük beton numunelerde yüksek su/bağlayıcı oranı kullanılması bu riski daha da artırmaktadır. Deneysel çalışmada, numuneler farklı su/bağlayıcı oranları ile üretilip sonuçlar karşılaştırıldığında, su/bağlayıcı oranı azaldıkça basınç dayanımının beklendiği gibi arttığı ancak aynı zamanda ısı iletkenlik katsayılarının azaldığı görölmüştür. Üretilen numunelerin çoğunun basınç dayanımları ile ısı iletkenlik

katsayıları doğru orantılı olarak değiştiği gözlemlenmiştir. Ancak düşük su/bağlayıcı oranında köpük stabilitesinin artması nedeniyle ısı iletkenlik katsayılarının da azaldığı gözlenmiştir ve her iki parametreye de olumlu etki ettiği görülmüştür. Şekil 4.8'de 0.35, 0.40 ve 0.50 su/bağlayıcı oranlarında aynı karışım oranlarında üretilen numunelerin basınç dayanımları ile ısı iletim katsayıları ortalamalar cinsinden karşılaştırılmıştır. Grafik açıkça göstermektedir ki belli optimum değerlere kadar su/bağlayıcı oranı düştükçe basınç dayanımları artmakta ve ısı iletim katsayıları düşmektedir.



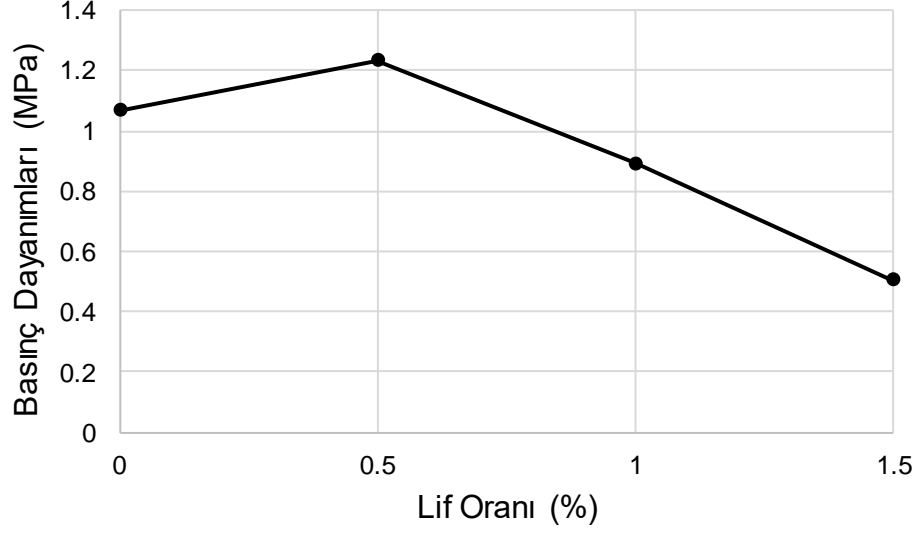
Şekil 4.8: %75Çimento-%25UK içeren ve birim hacim ağırlığı 800g/dm³ olan numunelerin farklı su/bağlayıcı oranlarında basınç dayanımı-ısı iletim katsayısı karşılaştırması

Köpük betonda lif kullanımı mikro çatlakları önlemesi ve enerji emme kapasitesini artırması açısından önemlidir. Ayrıca yapılan çalışmalarda lif kullanımının eğilme dayanımına olumlu etki yaptığı da gözlenmiştir. Şekil 4.9'da ikili kompozit lifli köpük betonların lif oranına göre ısı iletim katsayısı-basınç dayanımı grafiği verilmiştir. Deneysel çalışmada, ikili kompozit lifli numunelerde cam elyaf lif kullanılan numunelerin lif oranı arttıkça basınç dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, karışımda kullanılan lif oranlarının imento hamuruna fazla gelmesi ve bu nedenle köpük betonda dağılmalara neden olduğu düşünölmektedir. Cam elyaf lif kullanılan numunelerde lif oranı arttıkça ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin düştüğü gözlenmiştir. İkili kompozitlerde lif oranı arttıkça yalıtım özelliklerinin olumlu yönde etkilendiği görülmüştür. Fakat dayanım özelliklerindeki düşüşün tolere edilebilecek düzeylerin üzerinde olduğu düşünölmektedir.

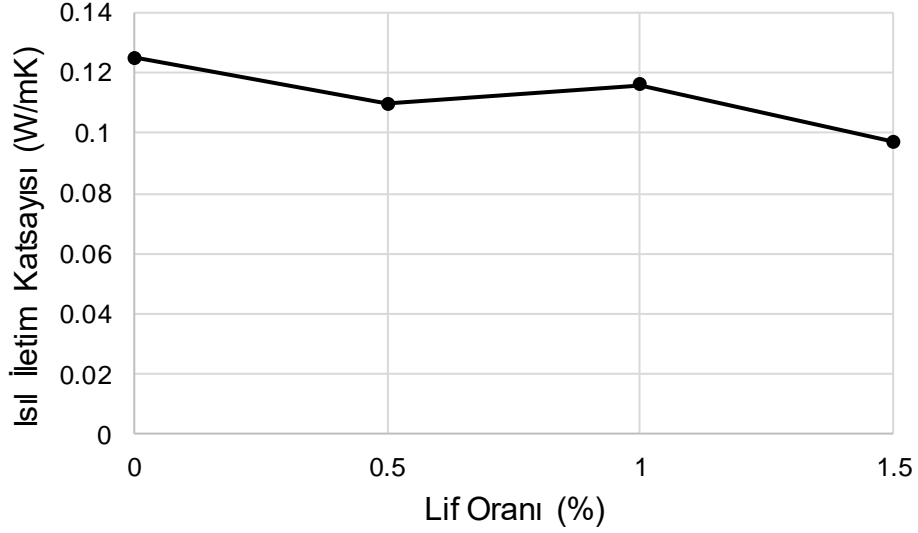


Şekil 4.9: İkili kompozit lifli köpük betonların lif oranına göre ısı iletim katsayısı-basınç dayanımı grafiği

İkili kompozit lifli numunelerin üretiminde kullanılan lif oranlarının karışıma fazla geldiği ve numunelerde düzensizliğe neden olduğu görülmüştür. Bu sebeple üçlü kompozit lifli köpük beton üretimlerinde bağlayıcı kütlelerinin %2'si oranında cam elyaf lif içeren numuneler üretilmemiştir. Bağlayıcı kütlelerinin %0.5'i, %1'i ve %1.5'i oranlarında cam elyaf lif içeren numuneler üretilmiştir. %40 çimento, %30 uçucu kül ve %30 traverten atığı içeren, birim hacim ağırlığı 600 g/dm^3 olan ve 0.35 su/bağlayıcı oranına sahip numunelere belirlenen oranlarda cam elyaf lif takviyesi yapılmıştır. Şekil 4.10'da üçlü kompozit lifli köpük betonların lif oranına göre basınç dayanımları grafiği, Şekil 4.11'de ise üçlü kompozit lifli köpük betonların lif oranına göre ısı iletim katsayısı grafiği ortalama değerler üzerinden verilmiştir. Yapılan deneylerde %1 cam elyaf oranı ve üzerinde mekanik özelliklerin yine çok düştüğü fakat yalıtım özelliklerinin olumlu yönde etkilendiği görülmüştür. Fakat ikili kompozit lifli köpük betonların aksine %0.5 lif takviyeli numunelerde mekanik özelliklerin de yalıtım özelliklerinin de olumlu yönde etkilendiği görülmüştür. %0.5 cam elyaf lif katkılı numunelerin basınç dayanımları şahit numuneye göre yaklaşık %15 daha yüksek, ısı iletim katsayıları ise yaklaşık %12 daha düşük çıkmıştır. Bunda, uçucu kül ve traverten atıklarının köpük betonda birlikte verimli çalışmasının ve oluşan puzolanik aktivitenin etkisi olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.10: Üçlü kompozit lifli köpük betonların lif oranına göre basınç dayanımları grafiği

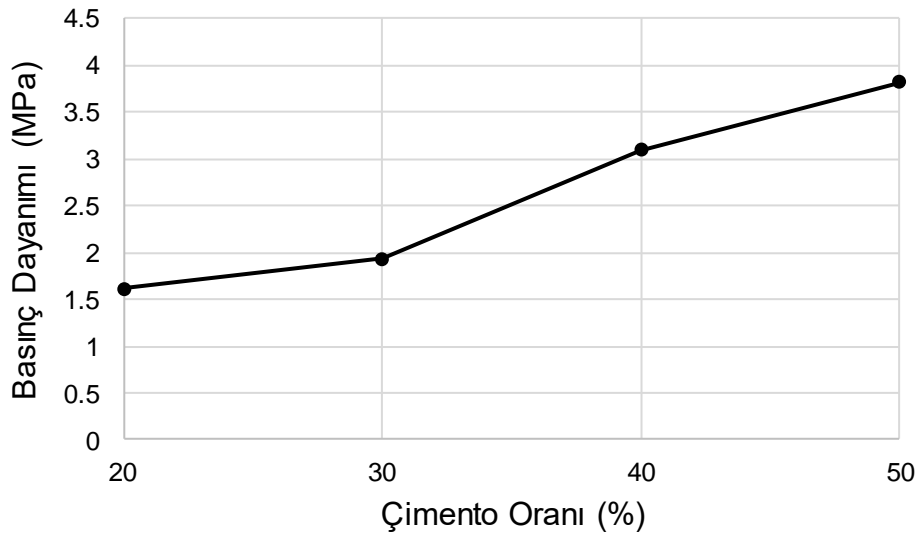


Şekil 4.11: Üçlü kompozit lifli köpük betonların lif oranına göre ısı iletim katsayısı grafiği

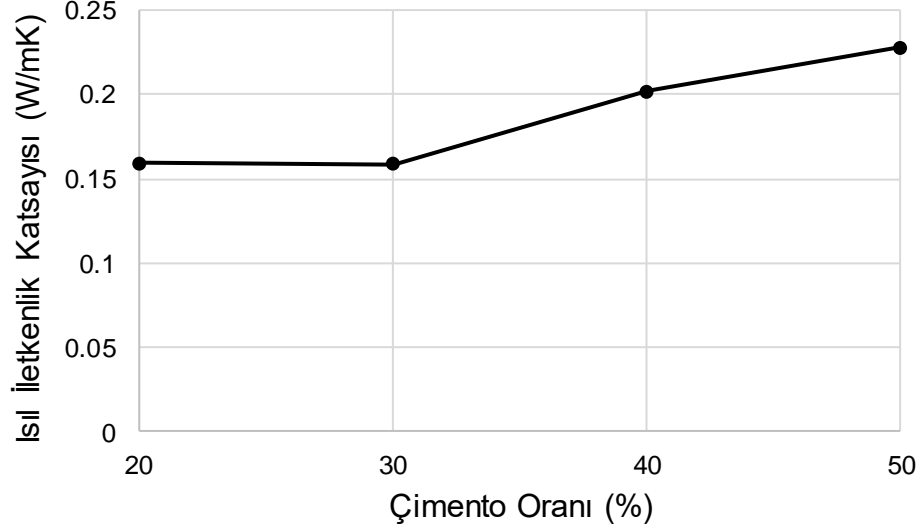
Üçlü kompozitlerin üretiminde çimento oranı en fazla %50 olarak belirlenmiştir. Sonraki üretimlerde %20'ye kadar düşürülmüştür. Yapılan deneysel çalışmada bağlayıcı olarak çimento, uçucu kül ve traverten atığı kullanılmıştır. Kimyasal katkıların da kullanılmadığını düşünürsek üretilen numunelerdeki en pahalı malzeme kalemi çimentoya aittir. Çimento oranını düşürerek aslında ortaya konulacak olan ürünün maliyetini düşürmek planlanmıştır. Üçlü kompozit numunelerde çimento oranı düştükçe numunelerin basınç dayanımlarının da beklenildiği üzere düştüğü Şekil 4.12'de görülmektedir. Üçlü kompozit numuneler içerisinde en yüksek basınç dayanımına sahip numune 4.42MPa basınç dayanımına, %50Çimento-%40UK-%10TA karışım oranına ve 800g/dm^3 birim hacim ağırlığa sahip olan numunedir. En

düşük basınç dayanımına sahip numune ise 0.54 MPa basınç dayanımına, %20Çimento-%40UK-%40TA karışım oranına ve 600g/dm^3 birim hacim ağırlığa sahiptir. Bu sonuçlar da bize çimento içeriğinin basınç dayanımlarına direkt etki ettiğini göstermektedir. Fakat Şekil 4.13'te görüldüğü üzere çimento oranı düştükçe numunelerin yalıtım özelliklerinin olumlu etkilendiği ve ısı iletim katsayılarının da düştüğü görülmüştür. Grafiklerdeki kıyaslamalar, uçucu kül ve traverten atığının birbirleriyle aynı oranda sistemde kullanıldığı numuneler üzerinden ortalama veriler kullanılarak yapılmışlardır.

Şekil 4.12'de üçlü kompozit 800 g/dm^3 birim hacim ağırlıktaki numuneler için çimento oranına göre basınç dayanımı değişimi grafiği ortalamalar cinsinden gösterilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde beklendiği gibi çimento oranı artışı ile birlikte beton basınç dayanımı artış göstermektedir. Çimento oranının %50 alındığı numuneler için ortalama basınç dayanımı yaklaşık 3.81 MPa bulunmuştur. %20 çimento oranına sahip numuneler için bu değer yaklaşık 1.61 MPa'dır. Şekil 4.13'te üçlü kompozit 800g/dm^3 birim hacim ağırlıktaki numuneler için çimento oranına göre ısı iletkenlik katsayısı değişimi grafiği ortalamalar cinsinden gösterilmiştir. Çimento oranı düştükçe malzemelerin yalıtım özelliklerinin olumlu yönde değiştiği görülmektedir. %50 çimento içeriğine sahip numunelerde ortalama ısı iletkenlik katsayısı 0.228W/mK iken, %20 çimento içeriğine sahip numunede bu değer 0.159W/mK 'dir.

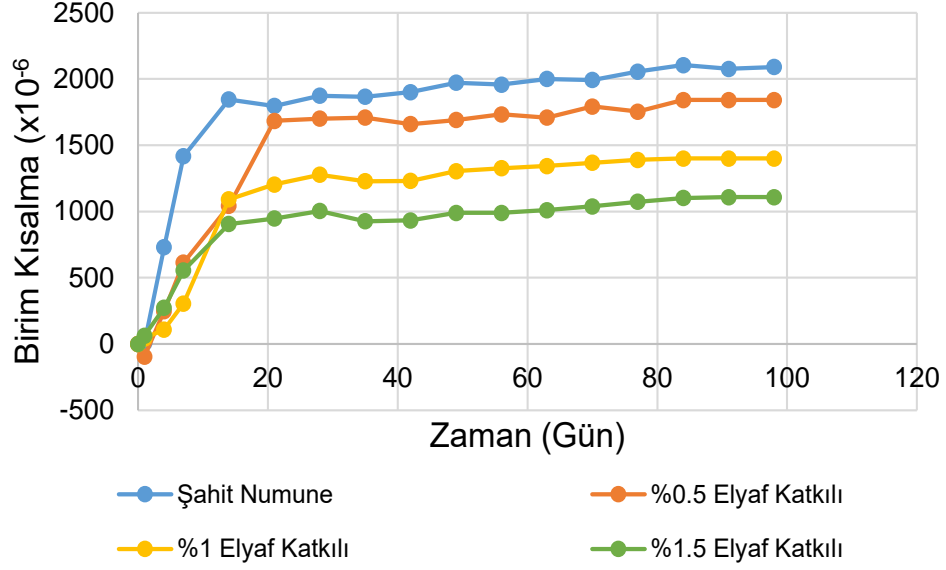


Şekil 4.12: Üçlü kompozit 800 g/dm^3 birim hacim ağırlıktaki numuneler için çimento oranına göre basınç dayanımı değişimi



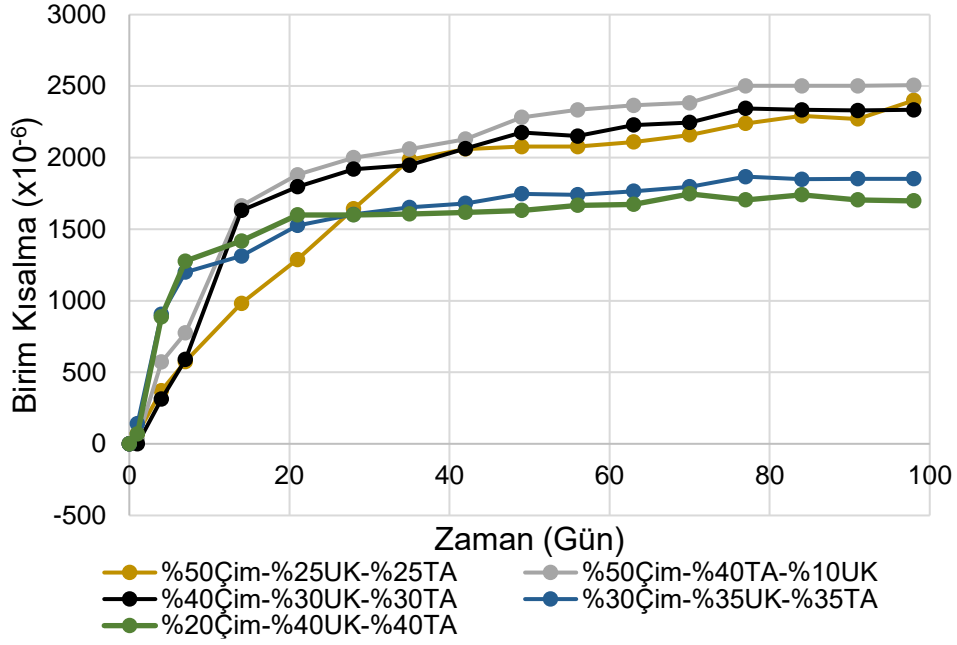
Şekil 4.13: Üçlü kompozit 800 g/dm^3 birim hacim ağırlıktaki numuneler için çimento oranına göre ısı iletkenlik katsayısı değişimi

Köpük betonlar, normal betonlara kıyasla on kat daha fazla kuruma büzülmesi davranışı sergilerler. Şekil 4.14'te üçlü kompozit lifli üretilen numunelerde lif oranlarına göre birim kısaltmalar verilmiştir. Liflerin suyu tutma ve buharlaşmayı geciktirme özellikleri nedeniyle köpük betonda kuruma büzülmesini azalttığı Şekil 4.14'te net bir şekilde görülmektedir. Erken yaşlarda rötre riskinin yüksek olduğu dönemlerde en yüksek büzülmenin lif katkısı olmayan şahit numunede olduğu görülmüştür. 98. gün ölçümlerine bakıldığı zaman %1.5 cam elyaf lif katkılı numunelerin, şahit numuneye göre %47 daha az büzüldüğü görülmüştür. Bu oran %1 cam elyaf lif katkılı numunelerde %33, %0.5 cam elyaf lif katkılı numunelerde %12 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlar lif kullanımının, köpük betonlardaki kuruma büzülmesi probleminin önlenmesi konusunda ne kadar önemli olduğunu göstermektedir.



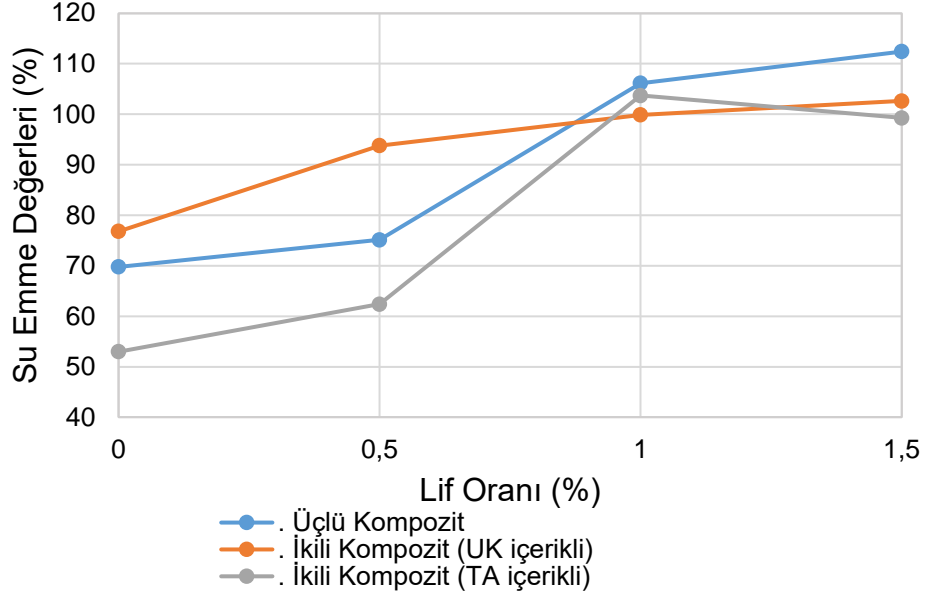
Şekil 4.14: %40Çim-%30UK-%30TA içeren Su/Bağlayıcı=0.35 ve birim hacim ağırlığı=600g/dm³ olan numunelerde elyaf lif kullanımının kuruma büzülmesine etkisi

Şekil 4.15'te üçlü kompozit 800 g/dm³ üretilen numuneler üzerinde 98 gün boyunca kuruma büzülmesi ölçümleri yapılarak birim kısılmalar yönünden birbirleri ile karşılaştırılmışlardır. Kuruma büzülmesinin önemli nedenlerinden birisi de betonun kendi nemini hızlı kaybetmesidir. Dolayısı ile hidrasyon ısısının yüksek olduğu ve hidrasyonun hızlı gerçekleştiği çimento oranı yüksek olan numunelerde kuruma büzülmesinin daha fazla olduğu görülmektedir. Hidrasyonun yavaş gerçekleşmesine sebep olmak ve hidrasyon ısısını düşürmek çoğu puzolanların görevleri arasındadır. Uçucu kül literatürde yapay puzolan olarak uzun süredir yer almaktadır. Yapılan çalışmada traverten atıklarının da puzolanik aktivite gösterdiği ve uçucu kül ile uyumlu çalıştığı gözlenmiştir. Bu sebeplerle çimento oranının düşük, dolayısı ile yapay puzolan oranının daha yüksek olduğu numunelerde kuruma büzülmesinin daha düşük olduğu görülmüştür. Üçlü kompozit numunelerde en yüksek 98 günlük birim kısılma miktarı %50 çimento-%40 traverten atığı-%10 uçucu kül içeren numunelerde 2505x10⁻⁶ ile gözlenmiştir. Bu numunelerde hem çimento oranının çok yüksek oluşu, hem de traverten atıklarına göre daha iyi puzolanik aktivite özelliği gösteren uçucu külün çok düşük oranda kullanılması sebebiyle kuruma büzülmesi değerleri daha yüksek çıkmıştır. En düşük birim kısılma ise %20 çimento-%40 uçucu kül-%40 traverten atığı içeren numunelerde 1698x10⁻⁶ ile gözlenmiştir. Buna da hem çimento oranının düşürülmesi hem de yapay puzolan oranının çok yüksek oluşu neden olmuştur.



Şekil 4.15: BHA=800g/dm³ üçlü kompozit numunelerin kuruma büzülmesi ölçümleri

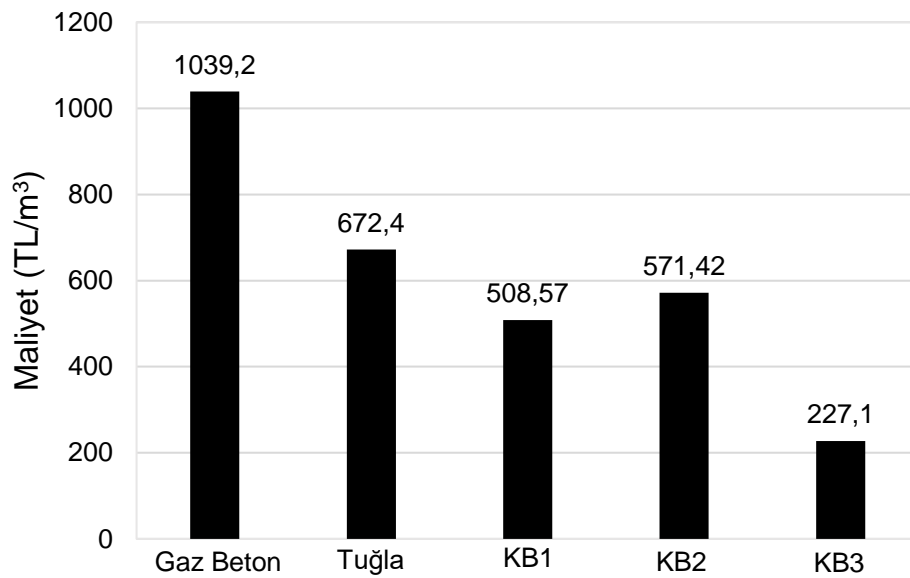
Köpük betonlar, geleneksel betonlara göre daha fazla su emme kapasitelerine sahiptirler. Bunun sebebi de içeriklerinde bulunan boşluklardır. Şekil 4.16’da deneysel çalışma kapsamında üretilen ikili kompozit cam elyaf lifli numunelere uygulanan su emme testleri sonuçları ortalamalar cinsinden karşılaştırılmışlardır. Su emme testleri sonuçları göstermişlerdir ki kullanılan lif oranları arttıkça köpük betonların su emme kapasiteleri de artmaktadır. Buna da kullanılan liflerin, köpük beton içeriğindeki kapalı boşlukların etrafını sararak absorbe edilebilecek su miktarını artırmasının sebep olduğu yorumu yapılmıştır. Kuruma büzülmesini azaltmasının yanında, su emme kapasitelerini artırması da köpük betonlarda lif kullanımının avantajları arasında yapılan testler sonucunda bulunmuştur.



Şekil 4.16: BHA=600g/dm³ üçlü ve ikili kompozit numunelerin farklı lif oranlarındaki su emme değerleri

Şekil 4.16’da deneysel çalışma kapsamında üretilen 3 farklı köpük beton; G2/0.40 gaz betonu ve tuğla ile maliyetler açısından karşılaştırılmıştır. Yapılan maliyet analizleri sonucunda tuğla ve gaz betonun yanında, köpük betonlar çok daha az maliyetli çıkmışlardır. Enerji harcamalarının bu denli arttığı bir dönemde yalıtım maliyetlerini düşürebilmek çok önemlidir. Hesaplı ve üstün yalıtım özellikli bir malzeme ile dış ve iç duvar uygulamasını yapabilmek, yapım maliyetlerini düşüreceği gibi enerji harcamalarını da azaltacaktır. Yapılan maliyet analizleri sonucunda en düşük maliyetli köpük beton karışımı (KB3), gaz beton ile kıyaslandığında köpük betonun %78.14 daha düşük maliyetli, tuğlayla kıyaslandığında ise %66.22 daha düşük maliyetli olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır. Bunun karşılığında KB3, gaz betona göre %29.26 daha düşük termal yalıtım gösterirken tuğlanın 2 katı termal konfor sağlayabilmekte, fakat her ikisinden de %19.5 daha düşük basınç mukavemeti göstermektedir. KB3, tuğlayla hemen hemen aynı ağırlıkta olsa da, gaz betona göre yapıya ekstra %63.75 ağırlık getirecektir. KB1’i ele alacak olursak gaz betona göre %51.06 daha düşük maliyetli, tuğlaya göre ise %24.36 daha düşük maliyetli olduğu görülmektedir. Teknik özelliklere bakacak olursak KB1, gaz betondan %12.84 daha düşük ısı iletim katsayısına sahipken, %38.5 daha düşük basınç mukavemeti değerine sahiptir. Tüm bunları sağlarken gaz betondan sadece %12 daha ağırdır. KB1 betonu, tuğlayla kıyaslandığında ise hafiflik, yalıtım ve maliyet anlamında fazlasıyla öne

çıkılmaktadır. KB2, kıyaslama yapılan malzemeler içerisinde basınç mukavemeti en yüksek olan malzemedir. Bu mukavemet değerini sağlarken gaz betonla aynı termal özelliklere sahip olup tuğlanın 2.6 katı daha iyi yalıtım sağlamaktadır. KB2 maliyet olarak gaz betondan %45, tuğladan %15 daha düşük maliyetlidir. Gaz betona göre binaya %22.5 ekstra yük getirirken tuğlaya göre %32.65 hafiflik sağlayacaktır. Köpük betonların bu kadar maliyet anlamında avantajlı olmalarını; traverten atıklarının herhangi bir maddi değerinin olmayışına, üretilen köpük betonlara herhangi bir ısı ya da kür işlemi uygulanmamasına ve çimento oranlarının düşürülmesine bağlamak mümkündür.



Şekil 4.17: Maliyet analizi sonuçları

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan doktora tezi kapsamında, traverten atığı ve uçucu kül bazlı köpük betonlar üretilerek numunelerin mekanik ve yalıtım özellikleri üzerine araştırmalar yapılmıştır. Çalışmanın ilk aşamasında traverten atıkları temin edilerek puzolanik aktiviteleri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Daha sonra traverten atıklarının yapay puzolan olarak kullanılabilmesine karar verilerek çalışmanın ikinci aşamasına geçilmiştir. Doktora tezinin ikinci aşamasında farklı karışım oranlarında, farklı su/bağlayıcı oranlarında ve farklı hiper akışkanlaştırıcı oranlarında numuneler üretilerek kıvam denemeleri yapılmıştır. Bu kıvam denemeleri sonuçlarına göre çalışmanın üçüncü aşamasına geçilmiştir. Doktora tezinin üçüncü aşamasında ikili kompozit üretimine geçilmiştir. Bu aşamada çimento-uçucu kül ve çimento-traverten atığı olarak bağlayıcılar ikili ayrı ayrı kullanılarak köpük betonlar üretilmiştir. Bu aşamada farklı karışım oranları kullanılmasının yanı sıra farklı su/bağlayıcı oranları kullanılmış ve farklı birim hacim ağırlıklarda numuneler üretilerek sonuçları kıyaslanmıştır. Bu sonuçlar ışığında çalışmanın dördüncü aşamasına geçilmiştir. Çalışmanın dördüncü aşamasında üçlü kompozit köpük betonlar üretilmiştir. Üçlü kompozit üretiminde çimento, uçucu kül ve traverten atıkları birlikte bağlayıcı olarak kullanılarak optimum oranlarda köpük betonlar üretilmiştir. Bu aşamada su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. Çalışmanın son aşamasında ise optimum karışım oranlarında, optimum su/bağlayıcı oranına sahip ve optimum birim hacim ağırlıktaki numunelere farklı oranlarda lif takviyesi yapılarak köpük beton üretimleri yapılmıştır. Doktora tezinin üçüncü aşamasından itibaren üretilen numuneler basınç dayanımı, ısı iletim katsayısı, su emme değerleri ve kuruma büzölmeleri üzerinden birbirleriyle karşılaştırılmışlardır. Köpük betonların üretiminde herhangi bir kimyasal işlem uygulanmamıştır. Isıl işlem olarak bir tek traverten atıkları etüvlerde kurutulmuştur. Çalışma kapsamında kullanılan çimento oranı %20'lere kadar düşürölüp bağlayıcı olarak atık malzemeler kullanılmıştır. Enerji maliyetlerinin ve çevre kirliliğinin fazlasıyla arttığı bu dönemde yapılan doktora tez çalışması, atıkların kullanılarak çevre kirliliğinin önüne geçilmesi ve enerji maliyetlerinin minimize edilmesi konularında önemli sonuçlar barındırmaktadır.

5.1 Sonuçlar

Yapılan deneyler sonucunda elde edilen analiz sonuçları maddeler halinde verilmiştir.

- Birim hacim ağırlıklar düştükçe numunelerin basınç dayanımlarının da düştüğü gözlemlenmiştir.
- Genel olarak ısı iletkenlik katsayıları düştükçe basınç dayanımlarının da düştüğü görülmüştür.
- İkilili kompozitlerde uçucu kül içeren numunelerin, aynı oranlarda traverten atığı içeren numunelere göre basınç dayanımlarının daha yüksek çıktığı görülmüştür.
- İkilili kompozitlerde traverten atığı içeren numunelerin ısı iletkenlik katsayılarının, aynı oranlarda uçucu kül içeren numunelere göre daha düşük çıktığı gözlenmiştir.
- Su/bağlayıcı oranı belli bir seviyeye kadar indirildiğinde basınç dayanımı değerlerinin arttığı, aynı zamanda ısı iletkenlik katsayılarının da düştüğü görülmüştür.
- İkilili kompozit lifli numunelerde cam elyaf lif katkısı arttığı basınç dayanımlarının düştüğü, fakat ısı iletim katsayılarının da bu oranda düştüğü gözlenmiştir.
- Üçlü kompozit numunelerde imento oranı azaldıkça basınç dayanımlarının da düştüğü görülmüştür.
- Üçlü kompozit numunelerde kullanılan puzolan oranı arttığı ısı iletim katsayılarının düştüğü gözlenmiştir.
- Üçlü kompozit lifli numunelerde; %0.5 lif katkı oranında basınç dayanımlarının şahit numuneye göre daha yüksek olduğu sonucuna varılırken, ısı iletim katsayılarının da daha düşük çıktığı görülmüştür.
- Üçlü kompozit lifli numunelerde, lif oranı arttığı kuruma büzülmesi değerlerinin neredeyse yarısına düştüğü sonucuna varılmıştır.
- Üçlü kompozit numunelerde, kullanılan puzolan oranları artıp imento oranı düştükçe, kuruma büzülmesi değerlerinin olumlu yönde etkilendiği görülmüştür.

- Maliyet analizleri sonucunda seçilen köpük beton numunelerin gaz betona göre %78.14 ile %45 arasında daha düşük maliyetli olduğu ortaya koyulmuştur.

5.2 Çalışmanın Kısıtları

Bu bölümde doktora tezi kapsamında yapılmak istenilip yapılamayan ya da beklenenin aksine sonuçlanan durumlar madde madde belirtilmiştir.

- Çalışma kapsamında ikili kompozit üretiminden itibaren tüm numunelerden kuruma büzülmesi ölçümleri alınmak istenmiştir. Fakat özellikle düşük birim hacim ağırlıklarda üretilen numunelerde kuruma büzülmesi numunelerinin dağıldığı görülmüştür. İkili kompozitlerde bu durum daha sık yaşanmıştır. Bu sebeple doktora tezinde ikili kompozitlerde kuruma büzülmesi kıyaslaması yapılamamıştır.
- Doktora tezi kapsamında son bir aşama daha yapılması planlanmıştır. Bu aşamada en iyi yalıtım özelliklerine sahip olduğu düşünülen köpük beton numunelerin üç boyutlu küçültülmüş ölçeklerdeki yapılara dış yüzeyden püskürtme beton olarak uygulanması planlanmıştır. Bu amaçla üretilen %40 çimento-%30 traverten atığı-%30 uçucu kül içeren, 600 g/dm^3 birim hacim ağırlıktaki, 0.35 su/bağlayıcı oranına sahip ve %0.5 lif katkısı içeren numuneler, sıva püskürtme tabancası ile düz bir yüzeye uygulanmaya çalışılmıştır. Bu uygulamanın sonucunda üretilen numunenin düşey yüzeyde tutunamadığı görülmüştür. Bu uygulama için daha farklı karışımlar denenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

5.3 Öneriler

Bu başlıkta, yapılan doktora tezi konusuna yakın konularda çalışmayı düşünen araştırmacılara, bulunan sonuçlar ve edinilen tecrübeler ışığında, yapılacak olan çalışmalarını kolaylaştırabileceği düşünülen öneriler madde madde verilmektedir.

- Köpük betonu üretebilmek için gereken köpük ajanı+ su karışımı, bir köpük tankında muhafaza edilmiştir. Kompresörden gelen yüksek basınç hortumunun bir ucu bu tanka bağlanmış, diğer ucu ise köpük jeneratörüne bağlanmıştır. Bu kısımda seçilen köpük tankının materyali önem arz etmektedir. İçerisine çok yüksek basınç verildiği için plastik ve polimer bazlı malzemelerin patlama ihtimali çok yüksektir. Bu sebeple yapılan deneysel çalışmalarda dökme demir köpük tankı kullanılmıştır.
- Kullanılan köpük jeneratörünün periyodik aralıklarla temizlenmesi gerekmektedir. Aksi takdirde içerisindeki köpürmeyi sağlayan teller küflenebilmekte, önceki çalışmalardan kalan köpük artıkları sonraki üretimlerde kullanılacak olan köpüğün stabilizesini bozabilmektedir.
- Köpük beton üretimindeki en önemli parametrelerden bir tanesi de su/bağlayıcı oranıdır. Bu oran çok yüksek tutulduğu zaman çökelmeler yaşanmakta ya da mekanik ve yalıtım değerleri çok olumsuz çıkmaktadır. Su/bağlayıcı oranı çok düşük olan numunelerde de çimento hamurunun aşırı rijit olması sebebiyle köpüğün, çimento hamurunun içerisine giremeyerek söndüğü görülmüştür. Yapılan tez çalışmasında optimum su/bağlayıcı oranı 0.35 olarak bulunmuştur. Fakat bu optimum değer, kullanılan malzemelere göre farklılık gösterecektir.
- Yapılan deneysel çalışmada cam elyaf lif katkısı, kuru karışım ağırlığının %0.5'i, %1'i, %1.5'i ve %2'si oranlarında kullanılmıştır. Sonuçlar bu oranlardan sadece %0.5'in olumlu sonuçlar verdiğini, daha yüksek cam elyaf lif katkısı durumlarında mekanik özelliklerin fazlasıyla düştüğünü göstermektedir. Sonraki dönemlerde cam elyaf lif katkısı %0.1 ile başlayarak en fazla katkı oranı %1 olacak şekilde tekrar üretimlerin yapılması planlanmaktadır.

6. KAYNAKLAR

Agarwal, S. K., Masood, I., Malhotra, S. K., “Compatibility of superplasticizers with different cements”, *Construction and Building materials*, 14(5), 253-259, (2000).

Akil, H., Omar, M. F., Mazuki, A. A. M., Safiee, S. Z. A. M., Ishak, Z. M., Bakar, A. A., “Kenaf fiber reinforced composites: A review”, *Materials & Design*, 32(8-9), 4107-4121, (2011).

Aldridge, D., Ansell, T., “Foamed concrete: production and equipment design, properties, applications and potential”, *Proceedings of one day seminar on foamed concrete: Properties, applications and latest technological developments*, Loughborough University, 1-7, (2001).

Amran, Y. M., Farzadnia, N., Ali, A. A., “Properties and applications of foamed concrete; a review”, *Construction and Building Materials*, 101, 990-1005. (2015).

ASTM C596-09, “Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement”, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017.

Awang, H., Ahmad, M. H., “Durability properties of foamed concrete with fiber inclusion”, *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 8(3), 273-276, (2014).

Babafemi, A. J., Šavija, B., Paul, S. C., Anggraini, V., “Engineering properties of concrete with waste recycled plastic: A review”, *Sustainability*, 10(11), 3875, (2018).

Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Gencil, O., Benli, A., Sutcu, M., “Physico-mechanical, durability and thermal properties of basalt fiber reinforced foamed concrete containing waste marble powder and slag”, *Construction and Building Materials*, 288, (2021).

Beningfield, N., Gaimster, R., Griffin, P. “Investigation into the air void characteristics of foamed concrete, in: *Global Construction: Ultimate Concrete Opportunities: Proceeding of the International Conference held at the university of Dundee, Scotland, UK*”, *Cement Combinations for the durable Concrete*, vol. 6(1), 51, (2015).

Bing, C., Zhen, W., Ning, L., “Experimental research on properties of high-strength foamed concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(1), 113-118, (2011).

Brady, K. C., Jones, M. R., & Watts, G. R., “Specification for foamed concrete”, *TRL Limited*, 78, (2001)

Chindapasirt, P., Rukzon, S., Sirivivatnanon, V., “Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash”, *Construction and Building Materials*, 22(5), 932-938,(2008).

Çobanoğlu, İ., Çelik, S. B., Osman, Ç. A. M., Hüseyin, E. T. İ. Z., Kurşun, M., “Denizli bölgesi traverten artıklarının beton agregası olarak kullanılabilirliğinin incelenmesi” *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(3), 92-99, (2014).

Davraz, M., Kiliçarslan, Ş., Kuru, M., “Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri”, *Ulusal beton kongresi, Antalya* 93, 102 (2015).

Demirboğa R. and Gül R., “The effect of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete”, *Cement and Concrete Research*, 33, 723–727, (2003).

Demirboğa R., “Thermal conductivity and compressive strength of concrete incorporation with mineral admixtures”, *Building and Environment*, 42(7), 2467–2471, (2007).

Dunton, H. R., Rez, D. H., U.S. Patent No. 4,789,244. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, (1988).

Ekinci, D., “Türkiye’de köpük beton”, *Dünya İnşaat Dergisi*, (2013).

Ekinci, Dilaver. “Türkiye’de Köpük Beton.” *Mimarlık Dergisi*, 376, (2014).

Fadila, R., Suleiman, M. Z., Noordin, N. M., “Paper Fiber Reinforced Foam Concrete Wall Paneling System”, *2nd International conference on Built Environment In Developing Countries ICBEDC*, 527-540, (2008).

Faghihmaleki, H., Nejati, F., Masoumi, H., “In vitro evaluation of additives allowed for high strength concrete (HSC) and foam concrete”, *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(3), (2017).

Falliano, D., De Domenico, D., Ricciardi, G., Gugliandolo, E., “Compressive and flexural strength of fiber-reinforced foamed concrete: Effect of fiber content, curing conditions and dry density”, *Construction and building materials*, 198, 479-493. (2019).

Fan, C. C., Huang, R., Hwang, H., Chao, S. J., “Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes”, *Construction and Building Materials*, 112, 708-715, (2016).

Gambhir, M. L., *Fundamentals of structural Mechanics and analysis*, PHI Learning Pvt. Ltd., (2011).

Gencel, O., Benli, A., Bayraktar, O. Y., Kaplan, G., Sutcu, M., Elabade, W. A. T. (2021). 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, (2021).

Giannakou A. and Jones M.R., “Potentials of foamed concrete to enhance the thermal performance of low rise dwellings”, (eds: R.K. Dhir, P.C. Hewelett, L.J. Csetenyi) *Innovations and development in concrete materials and construction*. Birleşik Krallık: Thomas Telford, 533–544, (2002).

Gowri, R. and Anand, K. B., “Experimental Study on Fresh State Characteristics of Foam Concrete with Ultrafine GGBS”, *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.(IJIRSET)*, 5, 160-167, (2016).

Güven, H., “Denizli ve çevresindeki traverten atıklarının betonda katkı malzemesi olarak kullanılması”, MS thesis, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, (2015).

Hajimohammadi, A., Ngo, T., Mendis, P., Nguyen, T., Kashani, A., Van Deventer, J. S., “Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H₂O₂: The impact of mix design” *Materials & Design*, 130, 381-391, (2017).

Helmuth, R., *Fly ash in cement and concrete*, No. SP040. 01T, (1987).

Hoge, J. H., U.S. Patent No. 4,419,135. Washington, DC: U.S, Patent and Trademark Office, (1983).

Ibrahim, W., Haziman, M., Jamaluddin, N., Irwan, J. M., Ramadhansyah, P. J., Suraya Hani, A., 2014, “Compressive and flexural strength of foamed concrete containing polyolefin fibers”, *Advanced Materials Research*, 911, 489-493, (2014)

Jalal, M. D., Tanveer, A., Jagdeesh, K., & Ahmed, F., "Foam concrete", *International Journal of Civil Engineering Research*, 8(1), 1-14, (2017).

Jones M.R. and McCarthy A., "Heat of hydration in foamed concrete: effect of mix constituents and plastic density", *Cement and Concrete Research*, 36 (6), 1032– 1041, (2006).

Jones, M. R., McCarthy, M. J., McCarthy, A., "Moving fly ash utilization in concrete forward: A UK perspective", *Proceedings of the 2003 international ash utilisation symposium, centre for applied energy research, University of Kentucky*, 20-2, (2003).

Jones, M.R., McCarthy, A. 2005. "Behaviour and Assessment of Foamed Concrete For Construction Application", *Use of Foamed Concrete in Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland*, 61-88, (2015).

Kallunkal, G., & John, E., "Optimization of foam concrete masonry blocks" *Int J Eng Res Gen Sci*, 4(5), 85-106, (2016).

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

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

Kearsley, E. P., "The effect of high volumes of ungraded fly ash on the properties of foamed concrete", *PhD Thesis, University of Leeds, Leeds*, (1999).

Kuzielová, E.; Pach, L.; Palou, M. "Effect of activated foaming agent on the foam concrete properties", *Construction and Building Materials*, 125, 998-1004, (2016).

Limbachiya, M., Meddah, M. S., Ouchagour, Y., "Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete", *Construction and Building Materials*, 27.1, 439-449, (2012).

Ma, C. and Chen, B., "Properties of foamed concrete containing water repellents", *Construction and Building Materials*, 123, 106-114, (2016).

Masood, I., Agarwal, S. K., "Use of super plasticizers in cement concrete: Present status and future prospects in India", (2012).

Mellin, P., "Development of structural grade foamed concrete", PhD Thesis, University of Dundee, Dundee, (1999).

Mindess, S. (Ed.), 2014. Sayfa 231. "Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete", (Ed: S. Mindess): Cambridge, 231, (2014).

Mustapure, N., "A study on cellular lightweight concrete blocks", International Journal of Research in Engineering and Technology, 5, (2016).

Mydin, M. A. O., "Effective thermal conductivity of foamcrete of different densities", Concr. Res. Lett, 2.1, 181-189, (2011).

Nambiar, E. K., Ramamurthy, K., "Influence of filler type on the properties of foam concrete", Cement and concrete composites, 28(5), 475-480, (2006).

Nandi, S., Chatterjee, A., Samanta, P., Hansda, T., "Cellular concrete and its facets of application in civil engineering", Int. J. Eng. Res, 5(1), 37-43. (2016).

Nyame, B. K., "Permeability of normal and lightweight mortars", Magazine of Concrete Research, 37(130), 44-48, (1985).

Pacheco-Torgal, F. and Jalali, S., "Reusing ceramic wastes in concrete", Construction and building materials, 24.5, 832-838, (2010).

Pacheco-Torgal, F., Shasavandi, A., Jalali, S., "Tyre rubber wastes based concrete: a review", WASTES: Solutions, treatments and opportunities, (2011).

Panesar, D. K., "Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents", Construction and Building Materials, 44, 575-584, (2013).

Raj, A., Sathyan, D., & Mini, K. M., "Physical and functional characteristics of foam concrete: A review", Construction and Building Materials, 221, 787-799, (2019).

Ramamurthy, K., Nambiar, E. K., Ranjani, G. I. S., "A classification of studies on properties of foam concrete", Cement and concrete composites, 31(6), 388-396, (2009).

Regan, P. E., Arasteh, A. R., "Lightweight aggregate foamed concrete", Structural Engineer, 68, 167-73, (1990).

Richard, T., Dobogai, J., Gerhardt, T., & Young, W., "Cellular concrete-A potential load-bearing insulation for cryogenic applications?", IEEE Transactions on Magnetics, 11(2), 500-503. (1975).

Ruiwen, K., "Properties of high-strength foam concrete", MSc Thesis, National University of Singapore, Singapore, (2004).

Serin, G., Çankiran, O., Başığit, C., Taş, H. H., & Fenkli, M., "Normal, Hafif ve Yarı Hafif Beton Blokların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Karşılaştırılması", Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 3(1), 15-22, (2007).

Sharma, R. and Bansal, P. P., "Use of different forms of waste plastic in concrete—a review", Journal of Cleaner Production, 112, 473-482, (2016).

Tekin, Ilker., "Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes", Construction and Building Materials, 127, 607-617, (2016).

TS 639: "Fly ashes-used in cement production", Turkish Standards Institute, Ankara, Turkey; 1998.

TS 825: "Binalarda ısı yalıtım kuralları", TSE, Ankara, 2008.

TS 4045, "Yapı Malzemelerinde Kapiler So Emme Tayini", Türk standartları Enstitüsü, Ankara, 5 s, 1984.

TS EN 1745: "Kagir ve Kagir Mamulleri-Tasarım Isıl Değerleri Tayini Metotları", TSE, Ankara, 2004.

TS EN 196-1: "Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım Tayini", TSE, 2002.

Van Deijk, S., "Foam concrete", Concrete, 25(5), 49-53,(1991).

Weigler, H. and Karl, S., "Structural lightweight aggregate concrete with reduced density—lightweight aggregate foamed concrete", International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 2.2, 101-104, (1980).

Weigler, H., Karl, S., "Structural lightweight aggregate concrete with reduced density—lightweight aggregate foamed concrete", International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 2(2), 101-104, (1980).

Yap, S. P., Bu, C. H., Alengaram, U. J., Mo, K. H., Jumaat, M. Z., “Flexural toughness characteristics of steel–polypropylene hybrid fibre-reinforced oil palm shell concrete”, *Materials & Design*, 57, 652-659, (2014).

Zhao, X., Lim, S. K., Tan, C. S., Li, B., Ling, T. C., Huang, R., & Wang, Q., “Properties of foamed mortar prepared with granulated blast-furnace slag”, *Materials*, 8(2), 462-473. (2015).

Zimbili, O., Salim, W., Ndambuki, M., "A review on the usage of ceramic wastes in concrete production", *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, 8.1, 91-95, (2014).

Zollo, R. F. and Hays, C. D., “Engineering material properties of a fiber reinforced cellular concrete”, *ACI Materials Journal*, 95(5), 631-635, (1998).

EKLER

7. EKLER

EK A Ortalama Sonuçlar

Bu bölümde tezin içerisinde bir kısmı verilen sonuçların tamamı ortalamalar cinsinden verilmiştir. Karışım oranlarına göre ortalama basınç dayanımları, su emme değerleri ve ısıl iletkenlik katsayıları verilmiştir.

Tablo A.1: %50Çim %50UK su/bağ=0.50 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 UK Su/Bağlayıcı=0.50 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	4.2
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.406
Su Emme Yüzdesi (%)	24

TabloA.2: %50Çim %50UK su/bağ=0.50 BHA=1200g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 UK Su/Bağlayıcı=0.50 BHA=1200 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	12.9
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.46768
Su Emme Yüzdesi (%)	11

TabloA.3: %50Çim %50UK su/bağ=0.40 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 UK Su/Bağlayıcı=0.40 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	8.2
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.293
Su Emme Yüzdesi (%)	18

TabloA.4: %50Çim %50UK su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 UK Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	6.8
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.260
Su Emme Yüzdesi (%)	26

TabloA.5: %50Çim %50UK su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 UK Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	3.1
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.156
Su Emme Yüzdesi (%)	55

TabloA.6: %75Çim %25UK su/bağ=0.50 BHA=1200g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 UK Su/Bağlayıcı=0.50 BHA=1200 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	14.6
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.556
Su Emme Yüzdesi (%)	14

TabloA.7: %75Çim %25UK su/bağ=0.50 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 UK Su/Bağlayıcı=0.50 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	5.4
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.342
Su Emme Yüzdesi (%)	31

TabloA.8: %75Çim %25UK su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 UK Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	7.4
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.211
Su Emme Yüzdesi (%)	38

TabloA.9: %75Çim %25UK su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 UK Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	2.2
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.131
Su Emme Yüzdesi (%)	77

TabloA.10: %75Çim %25UK su/bağ=0.35 BHA=450g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 UK Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=450 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	0.8
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.121
Su Emme Yüzdesi (%)	88

TabloA.11: %75Çim %25UK su/bağ=0.40 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 UK Su/Bağlayıcı=0.40 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	2.4
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.153
Su Emme Yüzdesi (%)	72

TabloA.12: %75Çim %25UK su/bağ=0.40 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 UK Su/Bağlayıcı=0.40 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	5.0
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.254
Su Emme Yüzdesi (%)	31

TabloA.13: %75Çim %25TA su/bağ=0.40 BHA=450g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 TA Su/Bağlayıcı=0.40 BHA=450 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	0.7
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.104
Su Emme Yüzdesi (%)	156

TabloA.14: %75Çim %25TA su/bağ=0.40 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 TA Su/Bağlayıcı=0.40 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.1
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.128
Su Emme Yüzdesi (%)	71

TabloA.15: %75Çim %25TA su/bağ=0.40 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 TA Su/Bağlayıcı=0.40 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	4.0
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.277
Su Emme Yüzdesi (%)	43

TabloA.16: %75Çim %25TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 TA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	2.3
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.123
Su Emme Yüzdesi (%)	54

TabloA.17: %75Çim %25TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%75 Çimento %25 TA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	4.6
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.1853
Su Emme Yüzdesi (%)	34

TabloA.18: %50Çim %50TA su/bağ=0.40 BHA=450g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 TA Su/Bağlayıcı=0.40 BHA=450 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	0.3
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.111
Su Emme Yüzdesi (%)	161

TabloA.19: %50Çim %50TA su/bağ=0.40 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 TA Su/Bağlayıcı=0.40 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.2
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.166
Su Emme Yüzdesi (%)	53

TabloA.20: %50Çim %50TA su/bağ=0.40 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 TA Su/Bağlayıcı=0.40 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.8
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.179
Su Emme Yüzdesi (%)	51

TabloA.21: %50Çim %50TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 TRA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.1
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.121
Su Emme Yüzdesi (%)	109

TabloA.22: %50Çim %50TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %50 TRA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	2.0
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.153
Su Emme Yüzdesi (%)	64

TabloA.23: %100Çim su/bağ=0.35 BHA=1200g/dm³ (yaklaşık) numunelerde ortalama sonuçlar

%100 Çimento Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=1200 g/dm³ (Yaklaşık)	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	11.7
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.338
Su Emme Yüzdesi (%)	25

TabloA.24: %50Çim %25UK %25TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %25 UK %25 TRA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.0
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.117
Su Emme Yüzdesi (%)	97

TabloA.25: %50Çim %25UK %25TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %25 UK %25 TA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	3.8
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.228
Su Emme Yüzdesi (%)	40

TabloA.26: %50Çim %40UK %10TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %40 UK %10 TA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	0.8
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.146
Su Emme Yüzdesi (%)	91

TabloA.27: %50Çim %40UK %10TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %40 UK %10 TA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	4.4
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.191
Su Emme Yüzdesi (%)	41

TabloA.28: %50Çim %40TA %10UK su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %40 TA %10 UK Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	0.6
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.121
Su Emme Yüzdesi (%)	111

TabloA.29: %50Çim %40TA %10UK su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%50 Çimento %40 TA %10 UK Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	3.5
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.180
Su Emme Yüzdesi (%)	41

TabloA.30: %40Çim %30UK %30TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%40 Çimento %30 UK %30 TA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.1
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.125
Su Emme Yüzdesi (%)	70

TabloA.31: %40Çim %30UK %30TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%40 Çimento %30 UK %30 TRA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	3.1
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.202
Su Emme Yüzdesi (%)	43

TabloA.32: %30Çim %35UK %35TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%30 Çimento %35 UK %35 TRA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	0.9
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.114
Su Emme Yüzdesi (%)	77

TabloA.33: %30Çim %35UK %35TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%30 Çimento %35 UK %35 TRA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.9
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.159
Su Emme Yüzdesi (%)	57

TabloA.34: %20Çim %40UK %40TA su/bağ=0.35 BHA=600g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%20 Çimento %40 UK %40 TRA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=600 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	0.5
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.112
Su Emme Yüzdesi (%)	137

TabloA.35: %20Çim %40UK %40TA su/bağ=0.35 BHA=800g/dm³ numunelerde ortalama sonuçlar

%20 Çimento %40 UK %40 TRA Su/Bağlayıcı=0.35 BHA=800 g/dm³	
Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)	1.6
Ortalama Isıl İletkenlik Katsayısı (W/mK)	0.159
Su Emme Yüzdesi (%)	55