

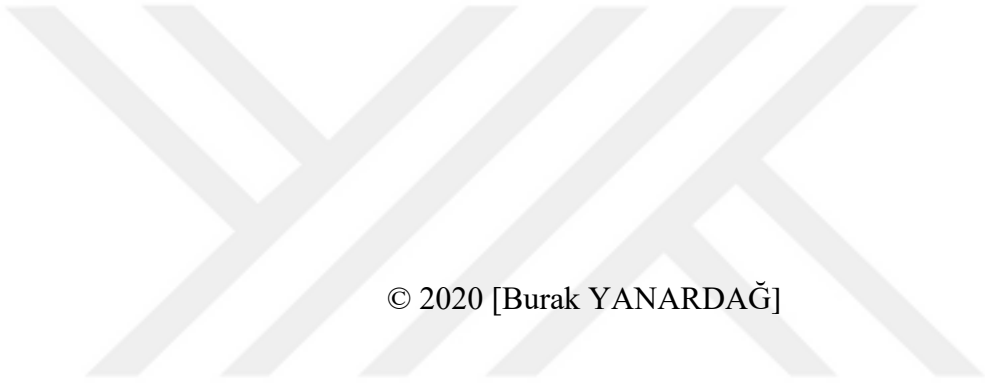
**T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOLU KÖPÜK BETON TASARIMI VE
MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ**

Burak YANARDAĞ

**Danışman
Prof. Dr. Metin DAVRAZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ISPARTA - 2020**



© 2020 [Burak YANARDAĞ]

TAAHHÜTNAME

Bu tezin akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Burak YANARDAĞ



İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ	2
3. ÇİMENTO BAĞLAYICILI HAFİF BETON.....	11
3.1. Çeşitleri, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri	11
3.2. Kullanım Alanları, Avantajları ve Dezavantajları	12
3.3. Köpük Beton.....	13
3.3.1. Bileşenleri	13
3.3.2. Kıvam ve reoloji.....	14
3.3.3. Fiziksel özellikleri.....	14
3.3.4. Birim hacim ağırlık	14
3.3.5. Gözeneklilik ve kılcal su emme	14
3.3.6. Mekanik özellikleri	15
3.3.6.1. Basınç dayanımı	15
3.3.6.2. Yarmada çekme ve eğilme dayanımları	15
3.3.7. Fonksiyonel özellikleri.....	15
3.3.7.1. Akustik yalıtım direnci.....	16
3.3.7.2. Isıl iletkenlik	16
3.3.7.3. Yüksek sıcaklık direnci	16
4. KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOSU	17
4.1. Oluşumu ve Üretim Süreci	18
4.2. Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri	19
4.3. Faz Bileşimi	20
4.4. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	21
4.5. Priz Süresi	22
4.6. Hidratasyon Isısı	23
4.7. Sülfat Direnci.....	24
4.8. Asit ve Alkali Direnci	24
4.9. Yüksek Sıcaklık Direnci	24

4.10. Hidratasyon Mekanizması	25
4.11. Dönüşüm Reaksiyonları.....	27
4.12. Avantajları ve Dezavantajları	30
4.13. Kullanım Alanları	31
4.14. Türkiye’deki Üretimi ve Pazarı	32
5. MATERYAL VE YÖNTEM	33
5.1. Materyal	33
5.1.1. Çimento	33
5.1.2. Su	34
5.1.3. Köpük.....	35
5.1.4. Kıvam artırıcı	35
5.1.5. Priz hızlandırıcı	36
5.1.6. Genleştirme ajanı ve katalizör.....	36
5.1.7. Hafif agrega.....	37
5.2. Yöntem.....	38
5.2.1. Beton üretim yöntemleri	38
5.2.2. Karışım tasarımları.....	42
5.2.2.1. Yöntem I	42
5.2.2.2. Yöntem II	43
5.2.2.3. Yöntem III.....	44
5.2.3. Taze beton özellikleri	45
5.2.3.1. Priz süresi	45
5.2.3.2. Taze birim hacim ağırlık	47
5.2.3.3. Genleşme oranı.....	47
5.2.4. Sertleşmiş betonun özellikleri	48
5.2.4.1. Kuru birim hacim ağırlık.....	48
5.2.4.2. Eğilme ve basınç dayanımları	50
5.2.4.3. Isıl iletkenlik katsayısı	52
5.2.4.4. Boşluk yapısı ve özellikleri.....	53
5.2.4.5. Kılcal su emme.....	53
5.2.4.6. Yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybı	54
6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	55
6.1. Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi	55
6.1.1. Priz süresi	55
6.1.2. Taze birim hacim ağırlık	56
6.1.3. Genleşme oranı.....	60
6.2. Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi	63

6.2.1. Kuru birim hacim ağırlık.....	63
6.2.2. Eğilme ve basınç dayanımları	76
6.2.3. Isıl iletkenlik katsayısı.....	94
6.2.4. Boşluk yapısı ve özellikleri.....	96
6.2.5. Kılcal su emme.....	99
6.2.6. Yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybı	101
7. SONUÇ VE ÖNERİLER	108
KAYNAKLAR	114
ÖZGEÇMİŞ	121



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOLU KÖPÜK BETON TASARIMI VE MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

Burak YANARDAĞ

Süleyman Demirel Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Metin DAVRAZ

Bu çalışmada, kalsiyum alüminat çimentosu (KAÇ) içeren köpük beton tasarımı yapılarak mühendislik özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra, genleştirme yöntemi kullanılarak alternatif hafif beton üretimi de araştırılmıştır. Tez kapsamında, KAÇ, lityum karbonat (LK), karboksimetil selüloz (CMC), hidrojen peroksit (HP), potasyum iyodür (KI), genişmiş perlit (PLT) ve köpük (K) kullanılarak numunelerde 500 kg/m^3 ve altında 45 günlük kuru birim hacim ağırlık ile 250 kPa ve üzerinde 45 günlük basınç dayanımı değerlerine birinci öncelik olarak ulaşılması hedeflenmiştir. Farklı bileşen oranlarına sahip kompozisyonlarda hazırlanan hazır beton numuneleri kalıplandıktan sonra fiziko-mekanik ve ısı iletkenlik testler için 28 ve 45 gün boyunca ilgili standartlarda öngörülen koşullarda kürlenmiştir. 28 ve 45 gün boyunca kürlenmiş numunelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin zamana bağlı olarak önemli bir ölçüde değişmediği gözlemlenmiştir. Numuneler tez süresince $141\text{-}546 \text{ kg/m}^3$ aralığında kuru birim hacim ağırlık ve $61\text{-}1538 \text{ kPa}$ aralığında basınç dayanımı değerlerine ulaşmıştır. Hedeflenen değerlere göre en iyi sonuçları veren hazır beton numunelerinin genleştirme yöntemiyle üretildiği görülmüştür. KAÇ ile üretilen en iyi sonuçları veren hazır beton numunelerinin performansı, referans olması için Portland çimentosu (PÇ) ile üretilen köpük beton numuneleri ile kıyaslanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kalsiyum alüminat çimentosu, hafif beton, genleştirme yöntemi, fiziksel özellikler, mekanik özellikler, ısı iletkenlik.

2020, 121 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DESIGN OF FOAM CONCRETE BASED CALCIUM ALUMINATE CEMENT AND DETERMINATION OF ENGINEERING PROPERTIES

Burak YANARDAĞ

**Suleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Metin DAVRAZ

In this study, the engineering properties of foam concrete containing calcium aluminate cement (CAC) were determined and also producing the alternative lightweight concrete by using the expansion method was investigated. Within the scope of thesis, by using CAC, lithium carbonate (LC), carboxymethyl cellulose (CMC), hydrogen peroxide (HP), potassium iodide (KI), expanded perlite (EP) and foam (F), the 45-day values of dry unit weight per volume of 500 kg/m³ and below and compressive strength of 250 kPa and above were targeted as the first priority to reach in the samples. The lightweight concrete samples prepared in the compositions with different component ratios were cured for 28 and 45 days under the conditions stipulated in the relevant standards for physico-mechanical and thermal conductivity tests after being molded. It was observed that the physical and mechanical properties of samples cured during 28 and 45 days did not change significantly depending on the time. During the thesis, the samples reached the values of dry unit weight per volume in the range of 141-546 kg/m³ and compressive strength in the range of 61-1538 kPa. It was observed that the lightweight concrete samples giving the best results according to the targeted values were produced by the expansion method. The performance of lightweight concrete samples using CAC and giving the most appropriate results were compared with the foam concrete samples produced using reference Portland cement (PC).

Keywords: Calcium aluminate cement, lightweight concrete, expansion method, physical properties, mechanical properties, thermal conductivity.

2020, 121 pages

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni ynlendiren, karşılaştığım zorlukları engin bilgi ve tecrbesi ile aşmamda bana yardımcı olan ok değerli danışmanım Prof. Dr. Metin DAVRAZ'a Őukranlarımı sunarım.

Süleyman Demirel Üniversitesi Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi'nin laboratuvar imkanlarından yararlanma olanağı sağlayan Merkez Müdürü Prof. Dr. Őemsettin KILINÇARSLAN'a saygılarımı sunarım.

Tez çalışmamın her aşamasında benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen annem Hülya Güneş YANARDAĞ'a, babam Ahmet Bülent YANARDAĞ'a ve kardeşim Baran YANARDAĞ'a minnettarım.

Araştırmanın yürütülmesi ve başarıyla sonlandırılması hususunda üstün yardımlarından dolayı Doç. Dr. Murat KORU'ya, Dr. Öğr. Üyesi Ali Ekrem AKDAĞ'a, Dr. Öğr. Üyesi Yunus Emre DELİKANLI'ya ve Öğr. Gör. Nuri IŐILDAR'a teŐekkürü borç bilirim.

“118 M 091” No'lu “Bina ve Sanayi Uygulamaları için Alternatif Isı Yalıtım Malzemelerinin Geliştirilmesi” isimli proje ile burs imknı sunan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Burak YANARDAĞ
ISPARTA, 2020

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1. Dik fırında KAÇ üretimi (Pöllmann, 2012).....	18
Şekil 4.2. KAÇ ve PÇ bileşim aralığı (Scrivener, 2003a).....	19
Şekil 4.3. PÇ (CEM I 42.5 R) ve KAÇ (ISIDAÇ 40) basınç dayanımı gelişimleri (Yaman, 2015).....	22
Şekil 4.4. PÇ ve KAÇ'nin hidrasyon ürünlerinin birikimi (Scrivener, 2003a).....	23
Şekil 4.5. KAÇ harcının hidrasyon süreci (Garsel, 1996).....	26
Şekil 4.6. C ₃ AH ₆ 'nın morfolojisi (Scrivener, 2003a).....	28
Şekil 4.7. s/ç ~ 0.40 ve çimento miktarı 400 kg/m ³ olan KAÇ betonunun dayanım gelişimi (Kurdowski, 2014).....	29
Şekil 4.8. 27 yıllık KAÇ betonunun geri saçılımlı elektron görüntüsü (Taylor, 1997).....	30
Şekil 5.1. Jeneratörde K üretimi.....	35
Şekil 5.2. Vicat testi ile priz süreleri tayini.....	39
Şekil 5.3. Yöntem I ve II'ye göre üretilen numunelerin döküm işlem aşamaları.....	40
Şekil 5.4. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin döküm işlem aşamaları.....	40
Şekil 5.5. Dereceli silindir ile genleşme oranı tayini.....	41
Şekil 5.6. Kalıplardan çıkarılan numunelerin iklim kabinde kürlenmesi.....	41
Şekil 5.7. Vicat testi uygulanmış 3 numune.....	46
Şekil 5.8. Genleşme oranı tayini.....	47
Şekil 5.9. Hava dolaşımli etüvde kurutulmuş numuneler.....	49
Şekil 5.10. Boyut ölçümlerinde kullanılan 0.01 mm hassasiyetli elektronik kumpas.....	50
Şekil 5.11. Eğilme dayanımı deneyi.....	51
Şekil 5.12. Basınç dayanımı deneyi.....	52
Şekil 5.13. LaserComp Fox 50 ısı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı.....	52
Şekil 5.14. Kılcal su emme deneyi için kullanılan metal tepsi.....	54
Şekil 5.15. Kül fırını.....	55
Şekil 6.1. Sabit HP oranında CMC oranı- ρ_m ilişkisi.....	57
Şekil 6.2. Sabit CMC oranında HP oranı- ρ_m ilişkisi.....	58
Şekil 6.3. PLT oranı- ρ_m ilişkisi.....	59
Şekil 6.4. K dozajı- ρ_m ilişkisi.....	60
Şekil 6.5. Sabit HP oranında CMC oranı-genleşme oranı ilişkisi.....	61
Şekil 6.6. Sabit CMC oranında HP oranı-genleşme oranı ilişkisi.....	62
Şekil 6.7. PLT oranı-genleşme oranı ilişkisi.....	63
Şekil 6.8. Sabit HP oranında CMC oranı- $D_{kuru-28}$ ilişkisi.....	65
Şekil 6.9. Sabit CMC oranında HP oranı- $D_{kuru-28}$ ilişkisi.....	66
Şekil 6.10. Sabit HP oranında CMC oranı- $D_{kuru-45}$ ilişkisi.....	68
Şekil 6.11. Sabit CMC oranında HP oranı- $D_{kuru-45}$ ilişkisi.....	69
Şekil 6.12. Kür süresine göre CMC oranı- D_{kuru} ilişkisi.....	70
Şekil 6.13. Kür süresine göre HP oranı- D_{kuru} ilişkisi.....	70
Şekil 6.14. PLT oranı- $D_{kuru-28}$ ilişkisi.....	71
Şekil 6.15. PLT oranı- $D_{kuru-45}$ ilişkisi.....	73
Şekil 6.16. Kür süresine göre PLT oranı- D_{kuru} ilişkisi.....	73
Şekil 6.17. k/ç oranı- $D_{kuru-28}$ ilişkisi.....	75
Şekil 6.18. k/ç oranı- $D_{kuru-45}$ ilişkisi.....	76
Şekil 6.19. Kür süresine göre k/ç oranı- D_{kuru} ilişkisi.....	76
Şekil 6.20. f_{cf-28} - $D_{kuru-28}$ -CMC oranı ilişkisi.....	79

Şekil 6.21. $f_{c-28}-D_{kuru-28}-CMC$ oranı ilişkisi.....	79
Şekil 6.22. $f_{cf-28}-D_{kuru-28}-HP$ oranı ilişkisi.....	80
Şekil 6.23. $f_{c-28}-D_{kuru-28}-HP$ oranı ilişkisi	81
Şekil 6.24. $f_{cf-45}-D_{kuru-45}-CMC$ oranı ilişkisi.....	84
Şekil 6.25. $f_{c-45}-D_{kuru-45}-CMC$ oranı ilişkisi.....	84
Şekil 6.26. $f_{cf-45}-D_{kuru-45}-HP$ oranı ilişkisi.....	85
Şekil 6.27. $f_{c-45}-D_{kuru-45}-HP$ oranı ilişkisi	85
Şekil 6.28. $f_{cf-28}-D_{kuru-28}-PLT$ oranı ilişkisi.....	87
Şekil 6.29. $f_{c-28}-D_{kuru-28}-PLT$ oranı ilişkisi	87
Şekil 6.30. $f_{cf-45}-D_{kuru-45}-PLT$ oranı ilişkisi.....	89
Şekil 6.31. $f_{c-45}-D_{kuru-45}-PLT$ oranı ilişkisi	89
Şekil 6.32. $f_{cf-28}-D_{kuru-28}-k/\ç$ oranı ilişkisi.....	91
Şekil 6.33. $f_{c-28}-D_{kuru-28}-k/\ç$ oranı ilişkisi.....	91
Şekil 6.34. $f_{cf-45}-D_{kuru-45}-k/\ç$ oranı ilişkisi.....	93
Şekil 6.35. $f_{c-45}-D_{kuru-45}-k/\ç$ oranı ilişkisi.....	93
Şekil 6.36. Optimum hafif beton numunelerinde $D_{kuru-45}-f_{c-45}-f_{cf-45}$ ilişkisi.....	94
Şekil 6.37. Optimum özelliklerdeki hafif beton numunelerinde $D_{kuru-45}-\lambda_{10}$ ilişkisi..	96
Şekil 6.38. HP1 numunesine ait SEM görüntüsü (x 64)	96
Şekil 6.39. HP7 numunesine ait SEM görüntüsü (x 105)	97
Şekil 6.40. PLT4 numunesine ait SEM görüntüsü (x 85)	98
Şekil 6.41. K3 numunesine ait SEM görüntüsü (x 90)	98
Şekil 6.42. Kılcal su emme deneyi.....	100
Şekil 6.43. Kül fırınında ısıtma işlemi	101
Şekil 6.44. 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin farklı sıcaklık seviyelerinde kütle kaybı	103
Şekil 6.45. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin eğilme dayanımı değişimleri.....	105
Şekil 6.46. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin basınç dayanımı değişimleri	107

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 4.1. KAÇ'nin kimyasal bileşimi (Kırca, 2006)	20
Çizelge 4.2. KAÇ tiplerinin bileşim aralıkları (Scrivener ve Capmas, 1998)	20
Çizelge 4.3. PÇ ile KAÇ ana fazlarının karşılaştırılması (Barborak, 2010)	20
Çizelge 4.4. KAÇ ana fazları (Guirado ve Galí, 2006)	21
Çizelge 4.5. ISIDAÇ 40 esaslı karoların ısı dayanımlarının PÇ esaslı karolar ile karşılaştırılması (ÇİMSA A. Ş., 2019)	25
Çizelge 4.6. C-S-H'lerin yoğunluk ve bağıl nem değerleri	28
Çizelge 5.1. KAÇ özellikleri (ÇİMSA A. Ş., 2020a)	34
Çizelge 5.2. PÇ özellikleri (GÖLTAŞ ÇİMENTO A. Ş., 2018)	34
Çizelge 5.3. SDÜ Batı Kampüsü şebeke suyu değerleri (Şavik vd., 2012)	34
Çizelge 5.4. Köpük ajanı özellikleri (KNOPP Group, 2020)	35
Çizelge 5.5. CMC özellikleri (Anonim, 2020a)	36
Çizelge 5.6. LK özellikleri (Anonim, 2020b)	36
Çizelge 5.7. HP özellikleri (Anonim, 2020c)	37
Çizelge 5.8. KI özellikleri (Anonim, 2020d)	37
Çizelge 5.9. PLT özellikleri (Anonim, 2020e)	37
Çizelge 5.10. Yöntem I'e göre hazırlanan karışım tasarımları	43
Çizelge 5.11. Yöntem II'e göre hazırlanan karışım tasarımları	44
Çizelge 5.12. Yöntem III'e göre hazırlanan karışım tasarımları	45
Çizelge 5.13. PK1 karışım tasarımı	53
Çizelge 6.1. Vicat deneyi bulguları	56
Çizelge 6.2. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin ρ_m değerleri	56
Çizelge 6.3. Yöntem II'ye göre üretilen numunelerin ρ_m değerleri	58
Çizelge 6.4. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin taze birim hacim ağırlık değerleri	59
Çizelge 6.5. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin e değerleri	60
Çizelge 6.6. Yöntem II'ye göre üretilen numunelerin e değerleri	62
Çizelge 6.7. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-28}$ değerleri	64
Çizelge 6.8. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-45}$ değerleri	67
Çizelge 6.9. Yöntem II'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-28}$ değerleri	71
Çizelge 6.10. Yöntem II'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-45}$ değerleri	72
Çizelge 6.11. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-28}$ değerleri	74
Çizelge 6.12. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-45}$ değerleri	75
Çizelge 6.13. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin f_{cf-28} ve f_{c-28} değerleri	77
Çizelge 6.14. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin f_{cf-45} ve f_{c-45} değerleri	82
Çizelge 6.15. Yöntem II'e göre üretilen numunelerin f_{cf-28} ve f_{c-28} değerleri	86
Çizelge 6.16. Yöntem II'e göre üretilen numunelerin f_{cf-45} ve f_{c-45} değerleri	88
Çizelge 6.17. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin f_{cf-28} ve f_{c-28} değerleri	90
Çizelge 6.18. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin f_{cf-45} ve f_{c-45} değerleri	92
Çizelge 6.19. Optimum değerleri sağlayan hafif beton numuneleri	94
Çizelge 6.20. Optimum değerleri sağlayan hafif beton numunelerinin λ_{10} değerleri	95
Çizelge 6.21. 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin c değerleri	100
Çizelge 6.22. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin kütle değişimleri	102
Çizelge 6.23. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin eğilme dayanımı değişimleri	104

Çizelge 6.24. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin basınç dayanımı değişimleri	106
--	-----



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A_c	En kesit alanı
AH_3	Alüminyum hidrat
$Al(OH)_3$	Alüminyum hidroksit
$Al(OH)_4^-$	Alüminyum hidroksit iyonu
Al_2O_3	Alüminyum oksit
atm	atmosfer basıncı
b	En kesit genişliği
c	Kılcal su emme katsayısı
$C_{12}A_7$	Dodekalsiyum heptaalüminat (mayenit)
C_2AH_8	Dikalsiyum alümina oktahidrat
C_2AS	Dikalsiyum alümina silikat (gehlenit)
C_2S	Dikalsiyum silikat
C_3A	Trikalsiyum alüminat
C_3AH_6	Trikalsiyum alümina hekzahidrat
C_3S	Trikalsiyum silikat
C_4AF	Tetrakalsiyum alümina ferrit (ferrit)
CA	Monokalsiyum alüminat
Ca^{+2}	Kalsiyum iyonu
CAC	Calcium aluminate cement (kalsiyum alüminat çimentosu)
CAH_{10}	Kalsiyum alümina dekahidrat
CaO	Kalsiyum oksit
C-H	Kalsiyum hidrat
cm^2/g	santimetrekare/gram
cm^3	santimetreküp
CMC	Carboxymethyl cellulose (karboksimetil selüloz)
cP	santipoises
C-S-H	Kalsiyum silikat hidrat
d	En kesit yüksekliği
dak	dakika
D_{kuru}	Kuru birim hacim ağırlık
$D_{kuru-28}$	28 günlük kuru birim hacim ağırlık
$D_{kuru-45}$	45 günlük kuru birim hacim ağırlık
dm^3	desimetreküp
e	Genleşme oranı
EC	Elektriksel iletkenlik
Eh	Redoks potansiyeli
EP	Expanded perlite (genleşmiş perlit)
F	Foam (köpük)
f_c	Basınç dayanımı
F_c	Basınç yükü
F_{c1-28}	28 günlük birinci parça basınç yükü
F_{c1-45}	45 günlük birinci parça basınç yükü
f_{c-20}	20 °C'deki basınç dayanımı
F_{c2-28}	28 günlük ikinci parça basınç yükü
F_{c2-45}	45 günlük ikinci parça basınç yükü
f_{c-28}	28 günlük basınç dayanımı
F_{c-28}	28 günlük basınç yükü
f_{c-45}	45 günlük basınç dayanımı

F_{c-45}	45 günlük basınç yükü
f_{cf}	Eğilme dayanımı
F_{cf}	Eğilme yükü
f_{cf-20}	20 °C'deki eğilme dayanımı
f_{cf-28}	28 günlük eğilme dayanımı
F_{cf-28}	28 günlük eğilme yükü
f_{cf-28}/f_{c-28}	28 günlük eğilme dayanımı/basınç dayanımı
f_{cf-45}	45 günlük eğilme dayanımı
F_{cf-45}	45 günlük eğilme yükü
f_{cf-45}/f_{c-45}	45 günlük eğilme dayanımı/basınç dayanımı
Fe_2O_3	Demir (III) oksit
g	gram
g/cm^3	gram/santimetreküp
g/l	gram/litre
g/mol	gram/mol
Gt	gigaton
H	Hidrojen
h	Yükseklik
HP	Hidrojen peroksit
HP1	Yöntem I'e göre hazırlanan CMC oranı % 0.01 olan seri
HP2	Yöntem I'e göre hazırlanan CMC oranı % 0.02 olan seri
HP3	Yöntem I'e göre hazırlanan CMC oranı % 0.03 olan seri
HP4	Yöntem I'e göre hazırlanan CMC oranı % 0.04 olan seri
HP5	Yöntem I'e göre hazırlanan CMC oranı % 0.05 olan seri
HP6	Yöntem I'e göre hazırlanan HP oranı % 1 olan seri
HP7	Yöntem I'e göre hazırlanan HP oranı % 2 olan seri
HP8	Yöntem I'e göre hazırlanan HP oranı % 3 olan seri
HP9	Yöntem I'e göre hazırlanan HP oranı % 4 olan seri
HP10	Yöntem I'e göre hazırlanan HP oranı % 5 olan seri
K	Köpük
k/ç	Köpük/çimento
K1	Yöntem III'e göre hazırlanan K dozajı 70 kg/m ³ olan seri
K2	Yöntem III'e göre hazırlanan K dozajı 60 kg/m ³ olan seri
K3	Yöntem III'e göre hazırlanan K dozajı 50 kg/m ³ olan seri
KAÇ	Kalsiyum alüminat çimentosu
kg	kilogram
kg/dm^3	kilogram/desimetreküp
$kg/m^2dk^{0.5}$	kilogram/metrekaire.kök dakika
kg/m^3	kilogram/metreteküp
KI	Potasyum iyodür
kPa	kilopascal
L	Boy
l	litre
LC	Lithium carbonate (lityum karbonat)
L_d	Mesnet silindirleri arasındaki açıklık
LK	Lityum karbonat
M_1	10 dakikalık kütle
M_2	90 dakikalık kütle
m^2/kg	metrekare/kilogram
m^3	metreküp

M_{CMC}	CMC kütlesi
mg/l	miligram/litre
MgO	Magnezyum oksit
$MgSO_4$	Magnezyum sülfat
M_{HP}	HP kütlesi
M_i	İlk kütle
$M_{ilaveSu}$	İlave su kütlesi
$M_{KAÇ}$	KAÇ kütlesi
M_{KI}	KI kütlesi
M_{kuru}	Kuru kütle
$M_{kuru-28}$	28 günlük kuru kütle
$M_{kuru-45}$	45 günlük kuru kütle
ml	mililitre
M_{LK}	LK kütlesi
mm	milimetre
mm^2	milimetrekare
MPa	megapascal
MPas	megapascal.saniye
$M_{PÇ}$	PÇ kütlesi
M_{PLT}	PLT kütlesi
M_s	Son kütle
Mt	megaton
mV	milivolt
N	newton
N/s	newton/saniye
Na_2SO_4	Sodyum sülfat
O_2	Oksijen gazı
°C	santigrad derece
°K	derece kelvin
Ort.	Ortalama
PC	Portland cement (Portland çimentosu)
PÇ	Portland çimentosu
pH	Power of hydrogen (hidrojen gücü)
PK1	Yöntem III'e göre hazırlanan PÇ'li K dozajı 70 kg/m^3 olan seri
PLT	Genleşmiş perlit
PLT1	Yöntem II'ye göre hazırlanan PLT oranı % 5 olan karışım
PLT2	Yöntem II'ye göre hazırlanan PLT oranı % 10 olan karışım
PLT3	Yöntem II'ye göre hazırlanan PLT oranı % 15 olan karışım
PLT4	Yöntem II'ye göre hazırlanan PLT oranı % 20 olan karışım
R	Korelasyon katsayısı
s/ç	Su/çimento
SEM	Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskobu)
SiO_2	Silisyum dioksit
SO_3	Kükürt trioksit
T	Sıcaklık
t	ton
t/sa	ton/saat
t/yıl	ton/yıl
TDS	Toplam çözünmüş katı maddeler
V_{ilk}	İlk hacim

V_{son}	Son hacim
w	En
W/mK	watt/metre.kelvin
Δf_c	Basınç dayanımı farkı
$\Delta f_c/f_{c-20}$	Basınç dayanımı kaybı
Δf_{cf}	Eğilme dayanımı farkı
$\Delta f_{cf}/f_{cf-20}$	Eğilme dayanımı kaybı
ΔM	Kütle farkı
$\Delta M/M_i$	Kütle kaybı
ΔT	Sıcaklık farkı
μm	mikrometre
$\mu S/cm$	milisiemens/santimetre
λ	Isıl iletkenlik katsayısı
λ_{10}	10 °K sıcaklık farkındaki kuru ısıl iletkenlik katsayısı
ρ_m	Taze birim hacim ağırlık
ρ_{m-ger}	Gerçek taze birim hacim ağırlık
ρ_{m-teo}	Teorik taze birim hacim ağırlık
ϕ	Çap

1. GİRİŞ

PÇ, günümüzde en yaygın kullanım alanına sahip çimentodur. Ancak buna rağmen bazı durumlarda ihtiyaçları karşılayamamaktadır. Son zamanlarda PÇ'ye alternatif olarak çeşitli çimento türleri kullanılmaya başlanmıştır. Bunlardan biri de KAÇ'dir. Bu çimento; yüksek erken dayanım gerektiren yol uygulamaları, yüksek aşınma direnci gerektiren endüstriyel zemin uygulamaları, yüksek sıcaklık direnci gerektiren refrakter uygulamaları, kimyasal ve biyolojik etmenlere karşı yüksek dayanım ve yüksek asit dayanımı gerektiren kanalizasyon uygulamaları vb. gibi durumlarda üstün performans göstermektedir.

Köpük ajanları ve diğer genişletme maddeleri kullanılarak KAÇ'den köpük beton elde edilememektedir. Hâlbuki KAÇ, PÇ'nin yaklaşık 8 aylık basınç dayanımını 1-2 günde sağlayabilmektedir. Ayrıca PÇ içeren kompozitlerden çok daha yüksek sıcaklıklarda dayanımını koruyabilmektedir, asidik ortamlardan etkilenmemektedir ve darbeye, aşınmaya karşı yüksek direnç gösterebilmektedir.

Dünyada ve ülkemizde ticari bir ürün olarak piyasada yer alan KAÇ'den üretilmiş mamul halde "ısı yalıtım malzemesi" yoktur. Ulusal ve uluslararası literatürde KAÇ kullanılarak üretilmiş köpük betona ya da hafif betona yönelik bir bilimsel araştırma çalışması oldukça azdır. Tez çıktısı olarak elde edilen ürünün, proje-inşaat aşamasında ve yalıtımsız mevcut binaların dış cephe mantolamalarında uygulanabilir olması amaçlanmıştır. Tez kapsamında belirlenen hedeflerin sağlanması durumunda ülkemiz inşaat sektörüne;

- ✓Tamamıyla yerli teknoloji ve büyük oranda yerli hammaddelere dayalı,
- ✓Yüksek ısı yalıtım performansına ve yeterli mekanik özelliklere sahip,
- ✓Aynı zamanda yangına karşı yüksek direnç ve hafiflik gibi diğer fonksiyonel özellikleri de bünyesinde barındıran,
- ✓Kolay uygulanabilir, erişilebilir, sürdürülebilir ve ekonomik dış cephe mantolama malzemesi kazandırılması hedeflenmiştir.

Bu tez kapsamında “kuru birim hacim ağırlık $\leq 500 \text{ kg/m}^3$, basınç dayanımı $\geq 250 \text{ kPa}$ ve ısı iletkenlik katsayısı $\leq 0,065 \text{ W/mK}$ ” değerlerini sağlayan hafif beton numunelerinin üretilmesi amaçlanmıştır. KAÇ bağlayıcılı hafif beton numuneleri:

- ✓ Yalnızca genleştirme ajanı kullanımı,
- ✓ Genleştirme ajanı + genleştirilmiş perlit kullanımı,
- ✓ Köpük ilavesi olmak üzere 3 farklı yöntemle üretilmiştir.

Hedeflenen kuru birim hacim ağırlık ve yeterli mekanik özelliklere ulaşabilmek için bileşenlerin kütlece oranları, karışıma dâhil edilme sıraları, su/çimento (s/ç) oranı ve priz başlama süreleri detaylı olarak araştırılmıştır. KAÇ ile birlikte harca kıvam kazandırmak için karışıma çimentoğun kütlece belirli oranlarında CMC dâhil edilmiştir. Ayrıca çimentoğun priz süresini kısaltmak için KAÇ ile uyumlu priz hızlandırıcı olan LK kullanılmıştır. Farklı kompozisyonlarda hazırlanan karışımlar kalıplanmış ve yeterli dayanıma ulaşınca kadar oda sıcaklığında (20 °C) kalıplarda bekletilmiştir. Sonrasında kalıptan alınan numuneler ilgili deneylerden önce iklim kabininde $20 \pm 3 \text{ °C}$ 'de ve % 90 bağıl nemde kürlenmiştir. Üretim süreci tamamlanan numunelerin üzerinde fiziksel, mekanik ve ısı iletkenlik testleri uygulanmıştır.

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Narayanan ve Ramamurthy (2000), tarafından gazbetonun yapısı ve özelliklerine yönelik yapılan çalışmada; gözenek oluşumunun ve kütleme şeklinin betonun iç yapısı ve özellikleri üzerinde etkili olduğu, kimyasal özelliklerin kütleme şekliyle değiştiği, yoğunluğun beton özelliklerini etkilediği, otoklav kullanımında kuruma rötresinin daha düşük olduğu ve otoklav kullanılmadığı durumdakinin % 20-25 oranlarına kadar değiştiği ve havalandırılmış betonun olumlu fonksiyonel özelliklere sahip olduğu belirtilmiştir.

Visagie (2000), tarafından yapılan çalışmada; PÇ, derecelendirilmemiş kül, hidrolize edilmiş protein ve polipropilen lif kullanılarak üretilen ve hedeflenen yoğunlukları $700 \text{ ile } 1500 \text{ kg/m}^3$ arasında değişen köpük beton karışımlarının fiziksel ve yapısal özelliklerine mikro yapının etkisi incelenmiştir. Köpük beton yoğunluğunun eklenen K oranıyla doğrudan ilişkili olduğu ve 28 günlük kuru yoğunluk ve basınç dayanımı

arasında üstel fonksiyona dayalı bir ilişki olduğu belirtilmiştir. Aynı ilişkinin ortalama gözeneklilik ve basınç dayanımı için de söz konusudur. Ancak kül/çimento oranı artışının dayanımı azalttığı belirtilmiştir. 500 ile 1000 kg/m³ arasındaki kuru yoğunluklar için kuru yoğunluk artışının boşluk boyut dağılımını etkilediği ve ortalama boşluk büyüklük artışının basınç dayanımını azalttığı vurgulanmıştır.

Demirboğa vd. (2001), tarafından yapılan çalışmada; perlit ve pomza agrega karışımlarının kullanıldığı hafif betonlarda bağlayıcı miktarının 200 kg/m³ olarak sabit tutulması ve çimentonun kütlece % 10, 20 ve 30'u oranlarında silis dumanı ve C sınıfı uçucu külün ilave edildiği şartlarda basınç dayanımı değişimi incelenmiştir. Pomza yerine kütlece % 20, 40 ve 60 oranlarında perlit kullanımının 28 günlük basınç dayanımını artırdığı bildirilmiştir. Pomza yerine kullanılan tüm uçucu kül oranları için basınç dayanımının azaldığı vurgulanmıştır.

Arı vd. (2004), tarafından yapılan çalışmada; kil yerine boksit ve kireçtaşı karışımının sinterlenmesi veya eritilmesiyle üretilen özel bir KAÇ'nin refrakter olarak kullanımı incelenmiştir. KAÇ ve şamot toprağı ile oda sıcaklığında üretilen harçlarla hazırlanan küp numunelerin mekanik davranışları 100-1200 °C arasında 100 °C'lik artışlardaki sıcaklıklarda yapılan deneyler ile tespit edilmiştir. Numunelerin maruz kaldığı her sıcaklık aralığındaki hacim, basınç dayanımı ve Böhme aleti ile aşınma kaybı değerleri belirlenmiştir. Belirlenen değerlerin sıcaklık ile değişimleri belirlenmiştir ve laboratuvarında bekletilen referans numuneleri ile kıyaslanmıştır. Bu sonuçlara bakılarak KAÇ kullanımı ile üretilen betonların ısı dayanımları ve tek başına katkısız halde refrakter olarak kullanımları araştırılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda KAÇ ile üretilen numunelerde pişirilmeye bağlı olarak boyda kısalma olduğu görülmüştür. Bu durum neticesinde diğer refrakterlerde görülen genleşme sorununun burada ortaya çıkmadığını kanıtlamıştır. Yüksek sıcaklıklarda kristal haldeki suyun uzaklaşması sonucu numunelerin boşluklu bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu nedenle sıcaklık artışıyla birlikte aşınma miktarları artmaktadır. Bu deney sonuçlarına göre refrakter olarak kullanılacak KAÇ için 900 °C kritik sıcaklık olduğu bildirilmiştir.

Dominik (2004), tarafından yapılan çalışmada; köpüklerin jeneratörde üretimlerini etkileyen faktörler, fiziksel özellikleri ile taze ve sertleşmiş köpük betonun bazı

özelliklerini incelenmiştir. Köpük kararlılık değişkenleri olarak kullanılan yoğunluk ve drenaj değerlerinin yüksek hava basıncı altında düştüğü ve kararlı halde olmayan köpük karışımlarında düzensiz ve farklı boyutlardaki boşluklar sebebiyle yoğunluk ve dayanımı kontrol etmenin zorlaştığı belirtilmiştir. Daha kararlı halde köpük kullanımının basınç dayanımını artırdığı ve % 1 oranında rijit 12 mm polivinil alkol elyaf kullanımının dayanımı artırılabilmesine de değinilmiştir. Ayrıca boşluk boyut dağılım oranının köpük beton harcının büzülme sorununun çözümüne katkı yaptığına değinilmiştir.

Nambiar (2009), tarafından yapılan çalışmada; köpük betonda büzülmeyle ilişkin çalışmaların az sayıda olması sebebiyle yoğunluk, nem içeriği, köpük hacmi, agrega/çimento oranı, uçucu kül/kum ikame oranı ve kuruma büzülmesi gibi temel özellikler üzerine odaklanılmıştır. Agrega/çimento oranı artarken büzülmenin azaldığı belirtilmiştir ve daha yüksek agrega/çimento oranı için daha düşük büzülme değeri elde edildiği bildirilmiştir. Köpük beton karışımında kumla ikame edilmiş daha yüksek uçucu kül oranının daha fazla büzülmeyle yol açtığı görülmüştür ve bunun sebepleri arasında ince taneli uçucu külün daha düşük büzülme direnci kapasitesi, daha büyük hacimde su/katı oranı ihtiyacı, ikamenin daha büyük hacimde büzülebilir harç oluşturması gösterilmiştir.

Ramamurthy vd. (2009), tarafından yapılan çalışmada; köpüğün beton karışımına ilişkin kararlılık ve diğer özelliklerinin pek araştırılmadığı, yoğunluk ve dayanım için istenen değerlere ulaşmada standart bir karışım hazırlama yöntemi bulunmadığı belirtilmiştir. köpük hacmindeki artışın karışımın kararlılığını etkilemesi sebebiyle karışım su/katı oranının gereksinimleri karşılayacak şekilde seçilmesi gerektiğini bildirmiştir. Dairesel ve uygun aralıklarla bulunan hava boşluğu gözeneklerinin bu düzenli dağılım özelliği sebebiyle köpük betonun iyi mekanik özelliklere sahip olmasını sağladığı belirtilmiştir. Belirli bir yoğunluğun sağlanması için hazırlanan karışımda uçucu kül ilave edilen köpük betonun basınç dayanımının eşdeğer kum esaslı karışımlara göre dayanımının daha yüksek olduğu bildirilmiştir.

Yusof (2009), tarafından yapılan çalışmada; harçta süper akışkanlaştırıcı kullanılmasının etkinliği ve köpük betonun dayanımı üzerine etkisi araştırılmıştır ve süper akışkanlaştırıcı ilavesinin işlenebilirliğine katkı sağladığına ve s/ç oranının çok

önemli ölçüde azalmasının köpük betonun son derece yüksek dayanıma sahip olmasına sebep olacağı belirtilmiştir.

Gökçe (2010), tarafından yürütülmüş olan yüksek lisans tez çalışmasında; perlit agregasının hafif beton üretiminde kullanılabilirliği incelenmiştir. Kırılmış ve elenmiş olarak kullanılan 5 farklı boyuttaki ham perlit agregası ile 16 farklı numune hazırlanmıştır. Ham perlit agregasına 3 farklı genişletilmiş perlit agregası ilave edilerek 8 genişletilmiş perlit agregalı numune hazırlanmıştır. Ham perlit agregası ile üretilen % 0, 5, 10 ve 15 oranlarında silis dumanı ikameli ve genişletilmiş perlit agregalı karışımlara süper akışkanlaştırıcı eklenmesi ile 5 farklı yüksek dayanımlı numune hazırlanmıştır. Taze haldeki betonların çökme değerleri tespit edilmiştir. Toplamda 117 tane 100x100x100 mm küp numune dökülmüştür. Sertleşmiş beton numunelerin birim hacim ağırlık, su emme ve basınç dayanımları hesaplanmıştır. Küp numunelerin basınç dayanımları 10-86.4 MPa arasında değişmektedir. Betonların birim hacim ağırlıkları 1.779 ile 2.047 kg/dm³ arasında ve su emme oranları % 2.6-13.2 arasında değişmektedir. Numunelerin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerinde farklı agrega karışımı ve genişletilmiş perlit agregası kullanımının katkı sağladığı vurgulanmıştır. Kür süresi ve silis dumanı ikamesindeki artışın numunelerin basınç dayanımlarını artırdığı belirtilmiştir.

Oliveira vd. (2010), tarafından yapılan çalışmada; katkı maddelerinin mineral trioksit agregası ile karşılaştırıldığında kalsiyum alüminat bazlı yeni bir endodontik çimentonun çeşitli fiziksel ve kimyasal özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Gri renkli mineral trioksit agregası ve KAÇ üzerinde bir polimerik dağıtıcı, akışkanlaştırıcı olarak kalsiyum klorür ve saydamlaştırıcı olarak çinko oksit gibi çeşitli katkı maddeleri içeren ve içermeyen manipülasyon testleri, sıcaklık ölçümleri, hidrojen gücü (pH), iyonik iletkenlik, basınç dayanımı, görünür porozite ve gözenek boyutu dağılımı testleri gerçekleştirilmiştir. Katkı maddesi içermeyen KAÇ yaklaşık 60 dakikalık bir priz süresine sahip olduğu ve LK ile birleştirildiğinde 10 dakikaya kadar azaldığı bildirilmiştir. Malzeme ayrıca kalsiyum iyonlarını serbest bırakıp ortamı alkaline etmiştir. Ayrıca, katkı maddelerinin (dağıtıcı, akışkanlaştırıcı ve saydamlaştırıcı) eklenmesi, 57 MPa'lık bir viskoziteye, geliştirilmiş taşıma özelliklerine, 81 MPa'lık bir mekanik mukavemete, % 4'lük bir poroziteye ve küçük çaplı gözeneklere (0.25 µm) sahip olmasını

sağlamıştır. Mineral trioksit agregası, 400 dakikaya kadar, 34 MPa'lık bir mekanik mukavemet ve 2.5 µm çapında gözenekler ile birlikte % 28'lik porozitede sıcaklık artışı olmadığı (bu, priz almayı ifade eder) görülmüştür. Yeni çimento daha hızlı priz alan, daha iyi akışkanlığa, daha iyi taşıma özelliklerine, daha yüksek mekanik mukavemete ve gri renkli mineral trioksit agregaya göre kıyaslandığında daha az poroziteye sahip olduğu görülmüştür.

Orcay (2010), tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında; geliştirilmiş polistren ile üretilmiş yalıtım betonlarının mekanik özellikleri ve ısı iletkenlikleri incelenmiştir. Birim hacim ağırlıkları 400-1800 kg/m³ arasında olan 5 farklı geliştirilmiş polistrenli hafif beton üretilmesi amaçlanmıştır. Üretilen betonların birim hacim ağırlıklarının uygun şekilde değiştirilebilmesi için bileşimdeki kum yerine geliştirilmiş polistren ikame edilerek diğer tüm değişkenler sabit tutulmuştur. Bu sayede geliştirilmiş polistrenin betonun basınç dayanımındaki, ısı iletkenliğindeki ve kılcallığındaki etkileri araştırılmıştır. Hafif betonların hepsinin birim hacim ağırlıklarının artmasıyla birlikte basınç dayanımları da artmaktadır. Geliştirilmiş polistrenli hafif betonların tamamından elde edilen bulgular hafif betonun ısı iletkenliğinin birim hacim ağırlığının artmasına bağlı olarak doğrusal bir şekilde artırdığını göstermektedir. Kılcallık deneyinin sonucunda ise geliştirilmiş polistrenli hafif betonların kılcallık katsayısının geliştirilmiş polistren miktarının artmasıyla birlikte önemli ölçüde azaldığı tespit edilmiştir.

Kramar ve Bindiganavile (2011), tarafından yapılan bir çalışmada; geliştirilmiş perlit içeren hafif betonların mekanik özelliklerinin karışım yoğunluğundan etkilendiği ve özellikle basınç dayanımı ile elastisite modülünün küp numunenin bağıl yoğunluğu ile değiştiği vurgulanmıştır.

Öztürk (2012), tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında; beton karışımında hafif agregası kullanılarak betonun birim hacim ağırlığı azaltılmıştır, fiziksel ve mekanik özellikleri incelenip ısı yalıtım özelliği kazandırılması amaçlanmıştır. Bu nedenle farklı oranlarda hafif agregalar ve geliştirilmiş polistren kullanılarak üretilen hafif beton numuneleri 150x150x150 mm boyutlarındaki küp kalıplara yerleştirilmiştir. 1 gün sonra kalıplardan çıkarılan numuneler 23 °C kürde 7 ile 28 gün bekletilmiştir. 7 ve 28 gün sonlarında kür havuzundan çıkarılan numunelere

basınç, su emme gibi birtakım deneyler uygulanarak hafif agregalar ile üretilen ısı yalıtım amaçlı hafif betonun özellikleri incelenmiştir ve normal betonun özellikleri ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak hafif agregaya ile üretilen hafif beton, enerji verimliliği açısından büyük bir gelişim göstermiştir.

Çetin vd. (2015), tarafından yapılan çalışmada; 300, 400 ve 500 kg/m³ bağlayıcı içeren köpük beton numunelerinin hızlı ve yüksek erken dayanım kazanımı incelenmiştir. PÇ ile birlikte kullanıldığında hem yüksek dayanım hem de çok kısa priz süresi elde edilen KAÇ'nin köpük beton blokları şeklinde kullanımı değerlendirilmiştir. Yapılan deneylerde farklı Portland çimentosu/kalsiyum alüminat çimentosu dayanım değerleri ve kuru haldeki numunelerin ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. KAÇ içeren karışımların dayanımlarında ise PÇ ile önemli bir fark görülmemiştir. Numunelerin katılaşıma süreçleri takip edilmiştir. Kullanılan ISIDAÇ 40 (KAÇ) katkılı numunelerin kalıptan daha çabuk söküldüğü ve süre farkının 1 güne kadar ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Sabit s/ç oranının ve köpük yoğunluğunun sağlandığı ortamlarda K miktarının artışı basınç dayanımını, köpük yoğunluğunu ve ısı iletkenlik katsayısını düşürdüğü görülmüştür.

Davraz ve Kılınçarslan (2015), tarafından yapılan çalışmada; PÇ, kalker tozu, polipropilen elyaf ve süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılarak 300 kg/m³ çimento dozajı ve sabit 0.30 su/katı oranında hazırlanan harçlara 80 g/l yoğunlukta köpük ilave edilerek köpük beton numuneleri üretilmiştir. 300 ile 1400 kg/m³ aralığındaki 12 farklı kuru yoğunlukta üretilen numunelerin 28 günlük basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara ışığında köpük betonun kuru yoğunluğuna göre basınç dayanımını, yarmada çekme dayanımını ve ısı iletkenlik katsayılarının değişimlerini tahmin etmeye yönelik yaklaşımlar önerilmiştir.

Engin (2018), tarafından yapılmış olan yüksek lisans tez çalışmasında; geliştirilmiş perlit agregası ve katkı maddeleri kullanılarak ısı yalıtım özelliği kazandırılmış ultra hafif betonlar üretilmesi amaçlanmıştır. Üretilen ultra hafif betonlar 28 günlük kürden sonra etüv kurusu halinde mekanik ve fiziksel deneyler uygulanmıştır. Mekanik ve fiziksel deneyler olarak basınç dayanımı, 4 noktada eğilme dayanımı, donma-çözünme dayanımı, su emme yüzdesi, kuru birim hacim ağırlık tayini, ultra

ses geçirgenlik hız testi ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri belirlenerek bunların aralarındaki ilişkiler araştırılmıştır. Kuru birim hacim ağırlığı 150 kg/m³'e kadar dūřürülen ultra hafif beton numunelerinin ısı iletkenlik katsayısı 0.039 W/mK olurken basınç dayanımı 0.13 MPa ve su emme yüzdesi % 242.3 olarak belirlenmiştir. Farklı tane boyutlarına sahip genleştirilmiş perlit agregası kullanılarak tane boyutunun ultra hafif betonun özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir ve genleştirilmiş perlit agrega çapı arttıkça beton numunelerin birim hacim ağırlığı, ultra ses geçiş hızı, ısı iletkenlik katsayısı ve basınç dayanımı azalırken boşluk dağılım homojenliği, su emme yüzdesi ve donma-çözünme dayanımında artışa neden olduğu görölmüştür. Üretilen ultra hafif beton numunelerinin donma-çözünme deneyleri sonrasındaki basınç dayanımları ve kütlelerinde meydana gelen değişim incelenmiştir. Basınç dayanımlarında % 5-47 arasında, kütlede % 1-3.5 arasında dūřüř olduğu tespit edilmiştir. Deneylerde kullanılan katkı maddelerinin ultra hafif beton numuneleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir ve hava sürükleyici malzemesinin 1 m³'te 4.5 kg kullanılmasının en uygun oran olduğu ve kullanılan lif miktarının ise hacimce % 0.01'den fazla kullanılmasının ultra hafif betonlarda sertleşme sürecinde çökmeye neden olduğu gözlemlenmiştir.

Erkmen (2018), tarafından yapılmış olan yüksek lisans tez çalışmasında; mineral katkılar eklenerek mekanik olarak kararlı bağlayıcı kombinasyonlar oluşturulması hedeflenmiştir. Mineral katkıların farklı sıcaklıklarda kürlenmiş KAÇ içeren imento harçlarının hidrasyonuna ve dayanım gelişimine etkileri kalorimetri, X-Işını Kırınımı yöntemi ve dayanım deneyleri ile tespit edilmiştir. Hidrasyon reaksiyonlarının yüksek sıcaklıklarda daha hızlı gerçekleştiği görölmüştür. Çimento karışımında uygun miktarda öğütölmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanılmasının farklı kür sıcaklıklarında dayanım kayıplarını önleme açısından faydalı olduğu sonucuna varılmıştır. Ancak buna benzer açık bir etki uçucu kül içeren bağlayıcılarda görölmemiştir.

şengöl (2018), tarafından yapılmış olan yüksek lisans tez çalışmasında; KAÇ'nin kısa sürede yüksek dayanım kazanmasına karşılık neme ve sıcaklığa bağlı olarak yarı kararlı kalsiyum alüminat hidratlarının bozunması sebebiyle önemli oranda yaşadığı dayanım kaybını azaltmak veya tamamen durdurmak adına stratlingit oluşumunu sağlamak için ölkemizde çokça bulunan bir silis kaynağı kullanılması amaçlanmıştır.

Silis kaynağı olarak perlit seçilmiştir. Perlitli numuneler, KAÇ ile farklı oranlarda ve 2 farklı su/bağlayıcı malzeme oranıyla hazırlanmıştır. Numuneleri farklı sıcaklık ve nemde kürlenmiştir. Dayanım gelişimine olan etkilerini ve erken yaşlarda hidrasyon fazları araştırmak için bu karışımlara az miktarlarda sodyum sülfat ve kalsiyum hidroksit eklenmiştir. Bozunmaya bağlı olarak saf çimento numunelerde dayanım kaybı görülmüştür. Bu durum kuru numunelerde 20 ile 30 günden sonra, ıslak numunelerde ise sadece 2 ile 3 günden sonra ortaya çıkmaktadır. Kuru numunelerde az ve yavaş (< % 10-20), ıslak numunelerde çok ve hızlı bir şekilde kayıplar oluşmaktadır (~ % 80'e kadar). Çimento yerine ikame edilen perlitin oranı arttıkça dayanım azalmaktadır. Buna ek olarak erken dayanım, perlitli karışımlarda daha fazladır. Stratlingit oluşumu, perlit içeren birçok karışımda X-Işını Kırınımı ile doğrulanmıştır. % 50'den fazla perlit içeren karışımlara % 1-2 oranında sodyum sülfat eklenerek dayanım kaybı tamamen önlenmiştir. Kalsiyum hidroksit ilavesi bozunmaya karşı çözüm olmamıştır; fakat priz süresini önemli derecede azaltmıştır. Perlit ilavesi de priz süresini kısaltmaktadır. Bunun yanı sıra sodyum sülfat priz süresini uzatmıştır. Hidrasyon ısı, perlit oranı arttıkça düşmektedir. Perlit veya kimyasal bileşenlerin ilavesi faydalı olmasına karşın karışımların hiçbiri 600 veya 1100 °C'ye maruz kaldıktan sonra dayanımlarının ya da kütlelerini koruyamadığı gözlemlenmiştir.

Alpaslan (2019), tarafından yapılmış olan yüksek lisans tez çalışmasında; farklı polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkıların KAÇ'nin kıvam ve kıvam koruma yeteneği üzerine etkileri araştırılmıştır. İlk olarak, katkılı ve katkısız çimento harçlarının kıvam testleri yapılmıştır. Reometrede çalışmaya uygun kıvamdaki çimento harçlarına uygulanan akma protokolü, zamana bağlı olarak su ile çimento karıştıktan hemen sonra ve ardından 30, 60 ve 90 dakika sonunda tekrarlanmıştır. Deneysel sonuçlarına göre katkısız halde reometrede işlenemeyecek kadar kuru kıvamda olan s/ç oranlarında polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı kullanımı ile işlenebilir bir kıvam elde edildiği ve bu kıvamın uzun süre korunduğu gözlemlenmiştir.

Aydın (2019), tarafından yapılmış olan yüksek lisans tez çalışmasında; KAÇ'nin kimyasal ve mineralojik özellikleri ile erken priz alma süresi, eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişkiler araştırılmıştır. Ayrıca PÇ'nin basınç dayanımı,

kimyasal ve mineralojik özellikleri de araştırılmıştır. % 40 alümina içeren KAÇ numunelerinin kimyasal içerikleri X-Işını Flüoresans tekniği ile mineralojik içeriği Rietveld Kantitatif Faz Analizi tekniği ile belirlenmiştir. KAÇ'nin kimyasal ve mineralojik özellikleri ile erken priz alma süresi, eğilme ve basınç dayanımı arasındaki ilişkiler Lineer Regresyon tekniği ile belirlenmiştir. Faz analiz sonuçlarına göre % 40 alümina içeren KAÇ numuneleri % 43.8 ± 2.0 monokalsiyum alüminat, % 15.6 ± 2.6 ferrit, % 2.6 ± 0.6 manyetit, % 2.5 ± 1.2 gehlenit, % 1.4 ± 0.4 mayenit ve % 0.5 ± 0.3 spinel minerallerinden oluştuğu görülmektedir. Ayrıca KAÇ numunelerinde % 12-32 oranlarında amorf faz bulunmaktadır. 97 ayrı KAÇ numunesi üzerinde yapılan deney sonuçlarına göre manyetit miktarı arttıkça basınç dayanımı azalmaktadır. Gehlenit miktarı arttıkça eğilme dayanımı azalmaktadır. Ayrıca manyetit miktarı arttıkça erken priz alma süresi de azalmaktadır. Blaine test sonuçlarına göre PÇ'nin ortalama yüzey alanı $3368 \text{ cm}^2/\text{g}$, KAÇ'nin Blaine değerinin ortalama $3205 \text{ cm}^2/\text{g}$ olduğu belirlenmiştir. Blaine test sonuçları ile elek analizi sonuçları birbirini destekleyerek PÇ, KAÇ'ye göre daha ince boyutlu tanelerden oluştuğu gözlemlenmiştir.

Bakırhan (2019), tarafından yapılmış olan yüksek lisans tez çalışmasında; kompozit hafif beton tasarımı ve özellikleri araştırılmıştır. Bağlayıcı olarak CEM-I 42.5 N tipi PÇ, agrega olarak Bitlis Pomzası ve perlit kullanılmıştır. Ek olarak uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu ile viskozite artırıcı ve hava sürükleyici kimyasal katkıları beton özelliklerini iyileştirmek için kullanılmıştır. Hazırlanan kompozit hafif beton harçları $100 \times 100 \times 100$ mm küp kalıplara yerleştirilmiştir. 1 gün sonra kalıplardan çıkarılan numuneler 3, 7, 28 ve 90 gün boyunca 23 ± 2 ° C su içinde kürlenmiştir ve çeşitli deneyler uygulanarak mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre perlitli hafif betonların, pomzalı hafif betonlara göre ısı yalıtımlarının daha yüksek, dayanımlarının ise daha düşük olduğu belirlenmiştir. Mineral katkılardan uçucu külün dayanıma katkı sağladığı anlaşılırken silis dumanının ise ısı yalıtım özelliklerini iyileştirdiği gözlemlenmiştir.

Kaynak özetleri taramasında sadece KAÇ kullanılarak tez kapsamında üretilmesi hedeflenen köpük beton, hafif beton ve ultra hafif beton üretimine yönelik çalışmaların çok kısıtlı sayıda olduğu görülmüştür.

3. ÇİMENTO BAĞLAYICILI HAFİF BETON

3.1. Çeşitleri, Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Hafif beton, içerisinde normal betona göre özgül ağırlığı daha düşük hafif agregalar bulunan ve yoğunluğu normal beton yoğunluğundan ($2200-2600 \text{ kg/m}^3$ veya $2300-2400 \text{ kg/m}^3$) daha az olan beton türüdür. Yoğunluk kullanılan hafif agreganın cinsine, miktarına ve diğer bileşenlere bağlı olarak değiştiğinden hafif beton yoğunluğuna ilişkin değerlerin konu ile ilgili kaynaklarda farklılıklar gösterdiği görülmektedir. Bu durumun diğer bir sebebinin de hafif betonun çeşidinden kaynaklanmaktadır. Sonuç olarak bazı kaynaklarda söz konusu yoğunluk değerlerinin tüm hafif betonlar için $300-1850 \text{ kg/m}^3$ aralığında (Neville, 1995) veya sadece en yüksek dayanıma sahip yapısal hafif betonlar için $1120-1940 \text{ kg/m}^3$ (Anonymous, 2018a) ve $1400-1800 \text{ kg/m}^3$ (Anonymous, 2018b) aralıklarında değiştiği belirtilirken bazı kaynaklarda ise 1840 kg/m^3 değerini aşmaması ve 800 kg/m^3 değerinin altında olamayacağı (Anonymous, 2018c) vurgulanmaktadır. Çekme dayanımı, basınç dayanımı ve sertlikleri normal betona göre daha azdır (Anonymous, 2018d).

Hafif beton çeşitleri arasında yapısal hafif betonlar, doğal olarak en yüksek yoğunluklu sınıfı meydana getirmektedir. Yapısal amaçlar için kullanılan ve minimum 17 MPa basınç dayanımına sahip olan bu betonlar, düşük yük taşıma kapasitesine sahip olan zeminler ve taşıyıcı sistemlerde kullanılmaktadır. Düşük yoğunluğa ($300-800 \text{ kg/m}^3$) ve dayanıma sahip hafif beton sınıfı temel olarak ısı yalıtım amacıyla kullanılmaktadır. Bu iki sınıf arasında yer alan orta yoğunluklu hafif beton ise 7-17 MPa arasında basınç dayanımına ve orta seviye ısı yalıtım özelliklerine sahiptir (Neville, 1995). Anonymous (2018a), tarafından belirtilen sınır değerler, hafif betonlar için 0.69-6.89, 6.89-17.24 ve > 17.24 MPa şeklindedir.

Hafif beton sınıflandırılmaları tamamen düşük yoğunluklu agrega kullanımı esaslı olmasının yanı sıra doğrudan gözenekliliğin artırılması esasına dayalı köpük beton veya otoklavlanmış gazbeton (Anonymous, 2018d) gibi farklı malzeme veya uygulamalarına da bağlıdır. Son yıllarda farklı özelliklere sahip betonlar (düşük

yoğunluklu ve kendiliğinden yerleşen) bir araya getirilmeye çalışılmaktadır (Vakhshouri ve Nejadi, 2016).

Hafif betonlarda kullanılan düşük yoğunluklu agregalar, doğal veya yapay tiptedirler. Doğal agregalar, hafif agrega çeşitleri arasında yaygın olarak kullanılmasa da pomza ve tüf gibi volkanik kökenli olanlar ile birlikte diyatomit kullanılmaktadır. Yapay şekilde üretilen ve termal yolla genişletilmiş kil, şeyl ve kayrak diğer hafif agrega çeşitlerindedir. Sanayi yan ürünü uçucu kül ve cüruflar da hafif agrega çeşitleridir (Neville, 1995).

3.2. Kullanım Alanları, Avantajları ve Dezavantajları

Hafif beton çeşitlerinin bazı şap ve koyulaştırıcılar ile zemin, çatı, duvar ve diğer yapı elemanları için yaygın olarak kullanılmaktadır. Yapı çeliğinin yangın ve aşınmaya karşı korunması veya mimari amaçlara yönelik bir kaplama malzemesi olarak hafif beton kullanılmaktadır. Yine duvarların ve çatıların genel yalıtımı amacı ile de kullanılmaktadır (Anonymous, 2018b). Diğer kullanım alanları arasında yakıt depoları, kanalizasyon boru hatları ve menfezler gibi boşlukların doldurulması bulunmaktadır (Anonymous, 2018d).

Hafif beton kullanımının avantajları arasında ilk sırada birim hacim ağırlığın önemli ölçüde azaltılması ve takviyede tasarruf sağlamasıdır. Geliştirilmiş ısı iletkenlik ve yangın direnci özelliklerine sahiptir. Nispeten basit inşaat, prefabrik ünitelerin taşınması ve hızlı bir şekilde montajı, kullanılan kalıp miktarının azaltılması ve desteklenmesi konularında avantaj sağlamaktadır. Çoğunluğunun, ağır ve yüksek performanslı geleneksel betonlara göre daha iyi zımbalama ve kesme özelliklerine sahip olması ve ekonomik olması yanında daha az iş gücüne ihtiyaç duyulması diğer avantajlarıdır (Anonymous, 2018d; Ismail vd., 2004).

Karışımlarda su miktarının oldukça önemli olduğu bazı karışımlarda agregaların çimento harcından ayrılarak yüzebileceği ve karıştırma süresinin uygun karışmayı sağlamak için geleneksel betona göre daha uzun sürmesi gibi dezavantajları da bulunmaktadır (Ismail vd., 2004).

3.3. Köpük Beton

Enerji ve kaynak verimliliğine duyulan ihtiyaç, yapı malzemelerinin ve üretim teknolojilerinin sürekli olarak geliştirilmesini teşvik etmektedir. Bu nedenle gerek üretim, gerekse kullanım aşamaları için daha az kaynak ile daha yüksek enerji verimine sahip ısı yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi ve üretilmesi, özellikle soğuk iklim koşulları için son derece önemlidir.

Köpük beton, köpük ajanı ilavesi ile oluşturulan homojen ve gözenekli yapıya sahip dolgu harcı olarak bilinen hafif bir materyaldir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Jalal vd. (2017), tarafından yapılan çalışmada; köpük beton için sadece ince kum, çimento, su ve köpük içeren, büyük çoğunluğu hafif malzemelerden oluşan ve büyük agrega içermemesi sebebiyle homojen olduğu değerlendirilmiştir. Bu nedenle köpük beton, yukarıda verilen bu özelliklere de sahip olmasının yanı sıra, uygun bir köpük ajanı kullanımı ve hava boşluklarının harç içinde homojen bir dağılım gösterecek şekilde tutulduğu, yüksek akışkanlık, düşük yoğunluk, minimum agrega tüketimi, kontrollü düşük dayanım ve çok iyi ısı yalıtım özelliklerini barındıran bir hafif beton cinsi olarak tanımlanmaktadır. Uygun dozajlarda kullanılan köpük ajanları farklı yoğunluklarda (400-1600 kg/m³) köpük beton üretimine olanak sağlamaktadır. Köpük beton patenti ilk kez 1923 yılında alınmış olmasına karşın kararlı köpük beton karışımı üretiminin kullanılan köpük ajanı özellikleri ve miktarına, köpük üretim yöntemine, hava boşluğu dağılımının homojenliğine, uygulanan karışım yöntemlerine ve diğer bir çok etkene bağlı olması sabit bir oranda standart karışım hazırlama yöntemi bulunmamaktadır. (Ramamurthy vd., 2009).

3.3.1. Bileşenleri

Köpük betonun temel bileşenleri ve değişkenlik gösteren yardımcı bileşenlerine bakıldığında çimento, kum, su, köpük ajanıyla üretilen köpük ile agregaların oluşturduğu ve ek malzemeler olarak ise uçucu kül, akışkanlaştırıcı ile organik ve inorganik liflerden oluştuğu belirtilmiştir (Amran vd., 2015).

3.3.2. Kıvam ve reoloji

Köpük beton taze harç karışımının akış özellikleri, işlenebilirliği ve kendiliğinden yerleşebilme yeteneğini belirleyen kıvam ve reoloji özellikleri üzerinde etkili en önemli faktörler bileşenlerin birbirleriyle uyumluluğu ve su içeriğidir. Bileşenler arasındaki adhezyon kuvveti, köpük ajanı cinsi, hacmi, gözeneklilik, kullanılan agrega cinsinin tane boyutu, şekil ve yüzey alanı ile karışımın su/katı oranı kıvamı büyük ölçüde değiştirmektedir (Ramamurthy vd., 2009).

3.3.3. Fiziksel özellikleri

Köpük betonun fiziksel özellikleri bakımından yoğunluk, gözeneklilik ve kılcal su emme önem arz etmektedir.

3.3.4. Birim hacim ağırlık

Köpük betonun taze birim hacim ağırlığı ile kuru birim hacim ağırlığı farkının 100-120 kg/m³ miktarlarını aşmaması önerilirken (Amran vd., 2015) kuru birim hacim ağırlığı için teorik ve gerçek birim hacim ağırlıkları farkı ± 50 kg/m³ olması gerektiği belirtilmiştir (Bing vd., 2012). Köpük beton birim hacim ağırlığının azalması sertliğinin ve dayanımının azalmasına sebebiyet vermektedir (Mydin vd., 2012).

3.3.5. Gözeneklilik ve kılcal su emme

Köpük betonun temel fiziksel, mekanik ve fonksiyonel özellikleri üzerinde belirleyici bir role sahip olan gözenek yapısı ile ilgili olarak toplam gözenek miktarı, gözenek büyüklüğü, gözeneklerin dağılımı ve birbirleriyle olan bağları onun yük veya diğer etkenler karşısındaki davranış şeklini belirleyen en önemli faktörlerdir. Gözenekler geleneksel olarak jel gözenekleri, kılcal gözenekler ve makro gözenekler olarak sınıflandırılmaktadır. Kılcal gözenekler, betona su emme durumu yarattığından kürlenme süresinden sonra alınacak sonucu da değiştirebilmektedir (Nambiar ve Ramamurthy, 2007). Bir köpük betonun gözenek yapısı, karışımı oluşturan bileşenlerin cinsleri, özellikleri ve oranlarının etkisi altında şekillense bile burada esas belirleyici olan köpük ajanının sahip olduğu gözenek yapısı olduğu da gözden kaçırılmamalıdır.

3.3.6. Mekanik özellikleri

Basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları köpük betonların en sık incelenen mekanik özelliklerindedir.

3.3.6.1. Basınç dayanımı

Köpük beton basınç dayanımını etkileyen başlıca faktörler arasında köpük ajanı cinsi ve oranı, çimento, kum ve diğer bileşenlerin oranı, s/ç oranı, yoğunluk ve kürleme yöntemi bulunmaktadır. Ancak Bing vd. (2012), tarafından yapılan çalışmada köpük beton dayanımının yoğunluktaki artışla birlikte üstel bir şekilde arttığı ve yine köpük hacmindeki azalmayla birlikte arttığı belirtilmiştir. Köpük hacminin % 50 oranında olması durumunda basınç dayanımında büyük bir azalma olduğu belirtilmiştir ve % 30 oranındaki köpük hacmi, basınç dayanımında değişime neden olmayan uygun oran olarak belirlenmiştir (Karthikeyan vd., 2015). Su miktarının, karışımın tutarlılığı ve kararlılığı üzerinde belirleyici bir role sahip olduğu ve genellikle tasarım karışımlarında kullanılan kumun tane boyutunun ve diğer malzemeler ile elyafın betonun dayanımını üzerinde etkili olduğu bilinmektedir.

3.3.6.2. Yarmada çekme ve eğilme dayanımları

Köpük betonun çekme/basınç dayanımı oranı normal betona göre daha yüksektir. Karışım suyu miktarının beton yoğunluğunu değiştirmesi çekme ve eğilme dayanımının da farklılaşmasına neden olmaktadır. Köpük hacmi artışının yarmada çekme dayanımını azalttığı ve % 10 oranındaki köpük hacminde yüksek olan söz konusu dayanımın % 30 ve 50 oranlarındaki köpük hacimlerinde büyük bir azalma olduğu belirtilmiştir (Karthikeyan vd., 2015).

3.3.7. Fonksiyonel özellikleri

Köpük betonun fonksiyonel özellikleri arasında akustik yalıtım direnci, ısı iletkenlik ve yüksek sıcaklık direnci özellikleri ön plana çıkmaktadır.

3.3.7.1. Akustik yalıtım direnci

Köpük betonda kullanılan köpük hacmine bağlı olarak gözeneklilik ve gözenek boyut dağılımının normal betona göre farklılaşması nedeniyle köpük betonun ses yutma ve yansıtma özelliklerinin de gelişmesine sebep olmuştur.

3.3.7.2. Isıl iletkenlik

Köpük beton ısı iletkenlik değerleri karışım bileşenlerinin cinsi, miktarı ve harç/köpük oranı gibi faktörlere bağlıdır. Konuyla ilgili bir çalışmada, karışımda bazı atık ek bileşenlere de yer verilerek jeopolimer köpük betonun (1300 kg/m^3), ısı iletkenlik katsayısının (0.47 W/mK) geleneksel duvar malzemeleri olan briket ve tuğladan sırasıyla % 22 ve 48 oranlarında daha düşük olduğu ve en yüksek yoğunluğa sahip olan köpük betonun (1700 kg/m^3) ise sahip olduğu basınç dayanımı (30 MPa) ve ısı iletkenlik katsayısı (0.58 W/mK) ile kıyaslandığında I. sınıf yapısal beton olarak sınıflandırıldığı bildirilmiştir (Liu vd., 2014). Zhang vd. (2015), tarafından yapılan çalışmada; jeopolimer köpük betonların aynı yoğunlukta ve/veya aynı dayanıma sahip normal PÇ içeren köpük betondan daha iyi ısı yalıtım özellikleri gösterdiği belirtilmiştir. Panesar (2013), tarafından yapılan çalışmada; sentetik ve protein esaslı köpük ajanlarının hava kabarcıklarına etkileri ve ısı iletkenliğin karışımların hava içeriği ile bağlantılı olan yoğunluk artışı ile birlikte azaldığı vurgulanmıştır.

3.3.7.3. Yüksek sıcaklık direnci

Köpük betonun karışım bileşenlerine ve oranlarına göre normal betona kıyasla daha iyi yüksek sıcaklık direnci sağladığı bilinmektedir. Vilches vd. (2012), tarafından yapılan bir çalışmada; ultra hafif köpük beton yoğunluğunun artması ile yüksek sıcaklık direncinin artması, 400 kg/m^3 yoğunluk için 150 kg/m^3 yoğunluğa göre 3 kat daha fazla olması ve yeterli yüksek sıcaklık direnci için 250 kg/m^3 'ten daha yüksek bir yoğunlukta tasarımların yapılması gerektiği şeklinde ifade etmektedir.

4. KALSİYUM ALÜMİNAT ÇİMENTOSU

KAÇ, ana bileşenler olarak monokalsiyum alüminat (CA) içeriği ile karakterize edilen birçok inorganik bağlayıcıyı içerir. KAÇ'nin kimyasal bileşimi geniş bir aralıkta değişkenlik gösterir. Alümina içeriği % 40-80 arasında bulunmaktadır. PÇ'den farklı olarak trikalsiyum silikat (C₃S) içermemektedir. Fakat sınırlı miktarda dikalsiyum silikat (C₂S) içerebilmektedir. Ayrıca KAÇ, alüminalı çimento veya yüksek alüminalı çimento olarak da isimlendirilmektedir. Ciment Fondu ve SECAR ticari isimleri de yaygın olarak kullanılmaktadır (Odler, 2000).

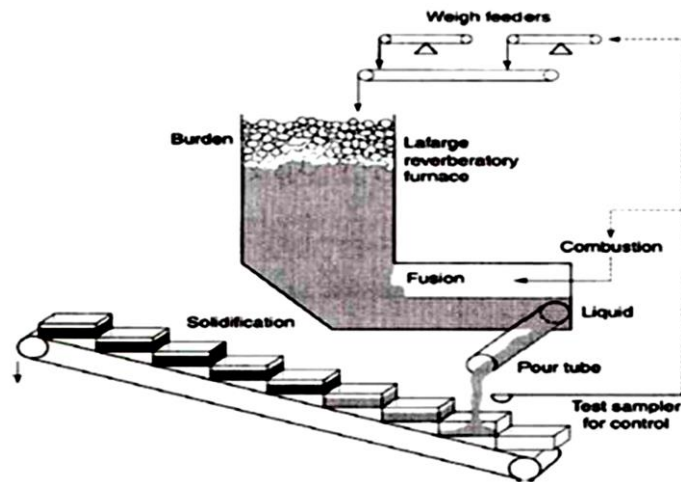
KAÇ, kireçtaşı ve düşük silika boksitlerden üretilmektedir. Geliştirilmelerinin temel nedeni PÇ'ye kıyasla sülfat direnci daha yüksek olacak şekilde yeni çimento ihtiyacının artmasından kaynaklanmaktadır (Scheinherrová ve Trník, 2017). KAÇ'nin endüstriyel gelişimine ilk olarak Bied'in Fransa, Le Teil'deki J. & A. Pavin de Lafarge firmasının laboratuvarlarındaki çalışmaları ile başlanmıştır. Bu çalışmaların ortaya çıkmasının başlıca nedeni Fransa'daki yüksek miktarlarda sülfat, özellikle alçıtaşı ve anhidrit içeren yerlerde harç ve betonların çabucak bozulması ve dağılması ile ortaya çıkan sorunlardan kaynaklanmaktadır. 1840'lı yıllarda Vicat, silika-alümina ve kireç-magnezyum içeriğinin sülfat direnci yarattığını öne sürmüştür. Bu öngörüyle Bied, yüksek alümina içeren çimentoların gelişimine yoğunlaşmıştır. 1908'de bu çalışma, boksit veya düşük silika içerikli diğer alümina ile demir içeren malzemelerin kireçtaşı ile beraber birleştiği bir üretim sürecinin patentlenmesi ile neticelenmiştir. Üretilen çimento sadece istenen sülfat direnci özelliklerine sahip olmakla beraber aynı zamanda PÇ'den çok daha hızlı sertleşmektedir. Çimento, ilk olarak hızlı sertleşme özelliğinden faydalanılarak I. Dünya Savaşı sırasında ve sülfat direncinden dolayı Paris, Lyon ve Marsilya demiryollarında, yoğun bir anhidrit kütesinden geçen bir tünelin yeniden yapımında kullanılmıştır (Scrivener ve Capmas, 1998).

KAÇ, en yaygın özel çimento çeşidi olmasına karşın dünya çapında yıllık üretimi PÇ'nin % 0.1 oranından daha düşüktür (Scrivener, 2003b). Bu kadar az kullanılmasının en büyük nedenlerinden birisi, geçirdiği dönüşüm reaksiyonlarının yarattığı dengesizliktir. Hidratasyon sürecinde ortaya çıkan dönüşüm reaksiyonları sonucunda gözeneklilik artmaktadır ve dayanım düşmektedir. Dönüşüm

reaksiyonlarının hatalı değerlendirilmesi ve etkisinin öngörülememesi zamanında birtakım sorunlara neden olmuştur (Bizzozero, 2014). Fakat Mangabhai (1990), tarafından yapılan çalışmada KAÇ'nun yapı malzemesi olarak kullanılması için hiçbir engel bulunmadığı belirtilmiştir.

4.1. Oluşumu ve Üretim Süreci

KAÇ, yıllık üretimi yılda yaklaşık 4 Gt olan PÇ'ye kıyasla yılda yaklaşık 2 Mt gibi çok az bir miktarda üretilmektedir. Yüksek alümina miktarı (> % 40) ve niş pazarlarındaki uygulama nedeniyle PÇ'den maliyeti çok daha yüksektir (6-8 kat). Maliyeti diğer çimento türlerine kıyasla oldukça yüksek olan KAÇ'yi PÇ yerine kullanmak pek de ekonomik bulunmamaktadır. Bunun yerine temel bağlayıcı faz veya karışık bağlayıcı fazının bir bileşeni olarak değerlendirilmektedir. PÇ'ye göre en önemli özelliği çok daha erken dayanım kazanmasıdır. KAÇ, PÇ'ye kıyasla daha yüksek olan maliyeti nedeniyle refrakter betonları, ağır koşullar için betonları, hızlı tamir betonları ve kuru harç karışımları gibi uygulama alanlarında kullanılması daha uygun bulunmaktadır. Dünya genelinde KAÇ pazarının büyük bir bölümü kimya uygulamaları yapılması adına kullanılan kuru harçlar için kullanılmaktadır. Bu ürünler hızlı tamir harçlarında, fayans yapıştırıcılarda ve kendiliğinden yerleşen bileşenlerle döşeme uygulamalarında kullanılmaktadır. Boksit ve kalkerin belirli oranlarda karıştırılarak yaklaşık 1600 °C sıcaklıktaki dik fırına beslenmesi ve elde edilen klinkerin öğütülmesi ile üretilmektedir. KAÇ'nin üretim yöntemi Şekil 4.1'de şema halinde gösterilmiştir (Pöllmann, 2012).

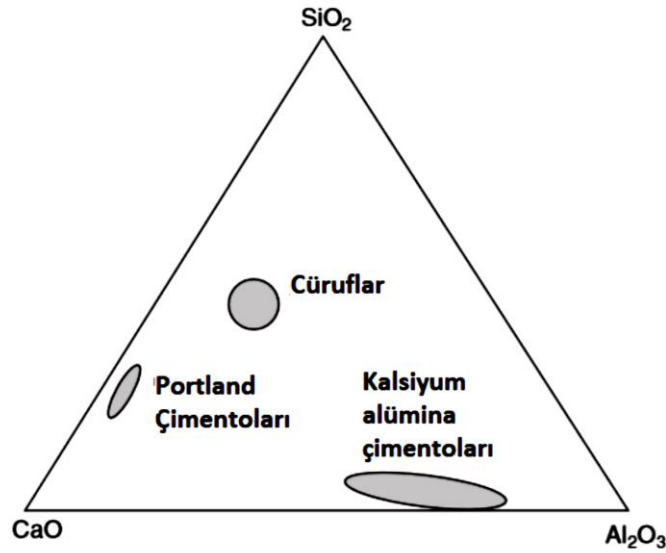


Şekil 4.1. Dik fırında KAÇ üretimi (Pöllmann, 2012)

Üretilen KAÇ'nin özgül ağırlığı demir miktarı sebebi ile yüksek olup 3200-3250 kg/m³ aralığındadır ve PÇ'ye kıyasla özgül ağırlığı daha yüksektir. Piyasadaki standart KAÇ yüzey alanı 250-400 m²/kg aralığındadır (Gosselin, 2009).

4.2. Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

KAÇ üretiminde ana hammadde kireçtaşı ve boksit mineralleridir (Scrivener ve Capmas, 1998). PÇ gibi KAÇ da kalsiyum (CaO), silisyum (SiO₂), alüminyum (Al₂O₃) ve demir oksitlerini (Fe₂O₃) içermektedir. Bu çimentoların bileşimleri de Şekil 4.2'de görüldüğü üzere oldukça farklı bir biçimdedir ve CaO-SiO₂-Al₂O₃ sistemi içerisinde, PÇ ve yüksek fırın cürufunun bileşim bölgeleri ile beraber yaklaşık olarak KAÇ bileşim bölgesi görülmektedir (Scrivener, 2003a).



Şekil 4.2. KAÇ ve PÇ bileşim aralığı (Scrivener, 2003a)

PÇ'den farklı olarak KAÇ'nin en yüksek miktardaki ana bileşeni Al₂O₃'tür. Sonra sırasıyla CaO, Fe₂O₃, SiO₂, magnezyum oksit (MgO) ve kükürt trioksit (SO₃) şeklindedir. PÇ'de ise ana bileşenler sırasıyla CaO, SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO ve SO₃'tür. Çizelge 4.1'de KAÇ'nin oksit yüzdeleri gösterilmiştir. Çizelge 4.2'de ise farklı KAÇ sınıflarının oksit yüzdeleri gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. KAÇ'nin kimyasal bileşimi (Kırca, 2006)

Oksit	%
Al ₂ O ₃	38-82
CaO	18-40
Fe ₂ O ₃	0.3-18
SiO ₂	0.5-6
SO ₃	0.2-0.4

Çizelge 4.2. KAÇ tiplerinin bileşim aralıkları (Scrivener ve Capmas, 1998)

Sınıf	Renk	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	SiO ₂ (%)	MgO (%)
Standart Düşük Alümina	Gri	36-42	36-42	3-8	~ 1
Düşük Alümina + Demir	Gri, Beyaz	48-60	36-42	3-8	~ 0.1
Orta Alümina	Beyaz	65-75	25-35	< 0.5	~ 0.1
Yüksek Alümina	Beyaz	≥ 80	< 20	< 0.2	~ 0.1

Tez kapsamında kullanılan ISIDAÇ 40 çimentosu (KAÇ) Çizelge 4.2'ye göre standart düşük alümina sınıfına girmektedir.

4.3. Faz Bileşimi

PÇ'deki ana fazlardan (C₃S, C₂S, C₃A (trikalsiyum alüminat) ve C₄AF (tetrakalsiyum alümina ferrit)) farklı olarak KAÇ'deki ana fazlar CA, dikalsiyum alümina silikat (C₂AS), dodekakalsiyum heptaalüminat (C₁₂A₇) ve C₄AF şeklindedir (Barborak, 2010; Guirado ve Galí, 2006). PÇ'nin ana fazlarının KAÇ ile karşılaştırılması Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. PÇ ile KAÇ ana fazlarının karşılaştırılması (Barborak, 2010)

Faz	PÇ (%)	KAÇ (%)
C ₃ S	50-70	0
C ₂ S	15-30	< 10
C ₃ A	5-10	0
C ₄ AF	5-15	10-40
CA	0	40-50

Faz çeşitlerinin karmaşık ve kararsız yapıları nedeniyle KAÇ'nin olası faz bileşimini hesaplamak için PÇ'de kullanılan Bogue hesaplamasına karşılık gelen bir yöntem bulunmamaktadır (Scrivener ve Capmas, 1998). X-Işını Kırınımı ve Taramalı

Elektron Mikroskopu (SEM), KAÇ'de bulunan ana fazları belirlemek için kullanılan temel yöntemlerdendir (Bensted, 2012).

Guirado ve Galí, (2006), tarafından yapılan çalışmada; 20 farklı KAÇ numunesinin faz analizini yapılmıştır. Bulunan faz yüzdeleri Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. KAÇ ana fazları (Guirado ve Galí, 2006)

Faz	%
CA	40-70
C ₄ AF	10-30
C ₂ AS	0-20
C ₁₂ A ₇	0-10

KAÇ'de ana hidrolik faz olarak CA, % 40'tan daha fazla bulunmaktadır (Scrivener ve Capmas, 1998). CA, su ile hızlı bir şekilde tepkimeye girerek KAÇ'de dayanım gelişimini sağlamaktadır (Swift, 2013). Bu faz, hidrasyona uğramış KAÇ'nin erken dayanımından sorumludur (Klaus vd., 2015). C₂AS, C₂S'ye benzer şekilde davranmaktadır, hidrasyonu yavaşlatmaktadır ve ileri yaş dayanımına katkı sağlamaktadır (Robson, 1962). C₁₂A₇ ise yaygın olarak bulunan bir bileşendir; ancak çoğu durumda KAÇ içerisinde sadece çok küçük miktarlarda bulunur ve küp şeklindedir (Odler, 2000). Hızlı bir şekilde çimentoya priz aldırmasına karşın dayanımına hiçbir şekilde etki etmemektedir. Bu sebeple küçük miktarda bulunduğu KAÇ'de çok aranan bir bileşen olarak kabul görmemektedir (Robson, 1962). C₄AF, priz süresi ve dayanım kazanma üzerinde hatırı sayılır bir etkiye sahip değildir (Idrees vd., 2019).

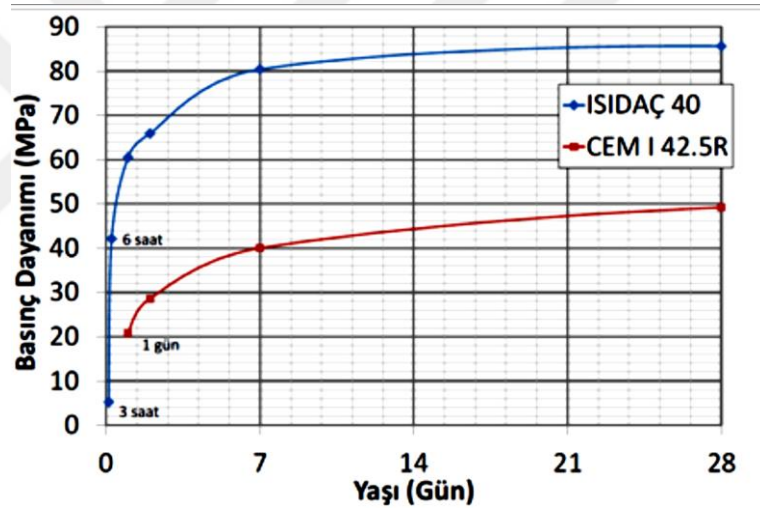
4.4. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Standart KAÇ sınıfları için özgül ağırlıkları 3200-3250 kg/m³ olmakla beraber demir içeriğiyle doğru orantılıdır. Özgül yüzey alanları ise 250-400 m²/kg arasındadır (Scrivener ve Capmas, 1998). Özgül ağırlıkları normal PÇ'ye oranla yüksektir.

Bensted (2002), tarafından yapılan değerlendirmeye göre; iki tip KAÇ bulunmaktadır. Bunların birincisi, koyu gri veya siyah renkte olan ve geniş bir sıcaklık aralığında kullanıma uygun, ikincisi ise beyaz renkte olan ve öncelikle

yüksek sıcaklıklarda refrakter amaçlı ve bazen de dekoratif amaçlı kullanılabilen KAÇ'dir. Ng (2012), tarafından yapılan değerlendirmeye göre; bu iki tür, temel çimento davranışları bakımında genel anlamda birbirine benzemektedir. Beyaz KAÇ (> % 70 alümina), daha fazla alümina içeriğine sahiptir ve koyu gri/siyah KAÇ daha fazla demir içermektedir. Beyaz kalsiyum KAÇ, düşük demir içeriğine sahip kalsine edilmiş alümina ile sönmemiş kireç veya yüksek saflıkta kireçtaşı ile sinterlenerek elde edilmektedir. Ticari olarak üretilen beyaz KAÇ yüksek miktarlarda CA ve $C_{12}A_7$ içermektedir.

KAÇ'de bir günde ulaşılan basınç dayanımı, PÇ'nin 28 günlük basınç dayanımından yüksektir (Bensted, 2002). Şekil 4.3'te standart PÇ'nin (CEM I 42.5 R) ve KAÇ'nin (ISIDAÇ 40) basınç dayanımı gelişiminin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 4.3. PÇ (CEM I 42.5 R) ve KAÇ (ISIDAÇ 40) basınç dayanımı gelişimleri (Yaman, 2015)

4.5. Priz Süresi

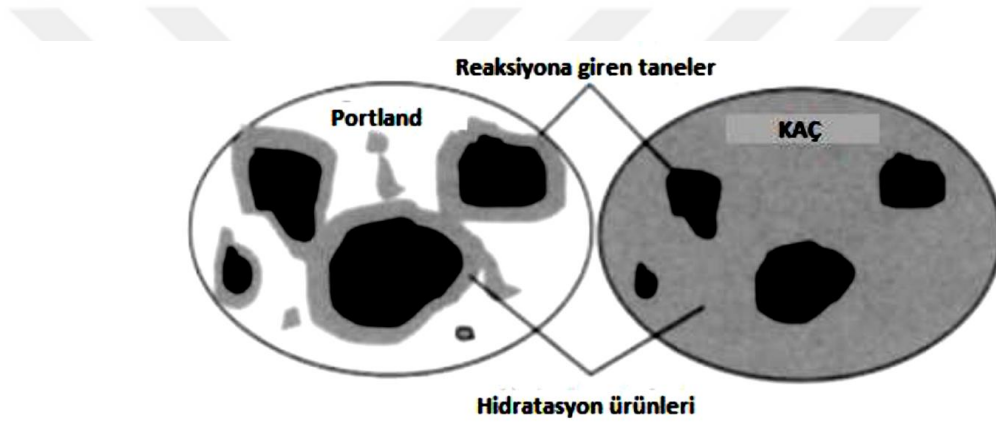
KAÇ'nin hızlı priz almasından $C_{12}A_7$ ve C_3A fazları, ortalama priz almasından CA fazı ve yavaş priz almasından ise C_4AF fazı sorumlu olmaktadır.

Priz süresi genellikle 0-20 °C arasında kısalmaktadır. Ancak 20-30 °C'deki priz başlangıcı 0-20 °C'dekine oranla 8 kat daha hızlı gerçekleşmektedir. 30 °C'nin üstünde de priz çok hızlı şekilde gelişmektedir (Taylor, 1997).

KAÇ priz süreleri PÇ'ye benzer olmakla beraber yaklaşık 3-5 saat aralığındadır. Örneğin, Fondu türüne ait KAÇ için İngiliz standardı Vicat yöntemiyle, priz başlangıcının 2 saatten az ve priz sonunun 8 saatten fazla olmaması gerekmektedir (Scrivener, 2003b).

4.6. Hidratasyon Isısı

Hidratasyonun başlangıç aşamasının sonunda hızlı tepkimeler oluşmaktadır. PÇ'de ana hidratasyon ürünü, hidrate olmuş çimento tanelerinin etrafında toplanmaktadır. Bu nedenle reaksiyon hızı kademeli olarak yavaşlamaktadır. Ancak KAÇ'de hidratasyon ürünleri taneler arası tüm boşluklarda toplanmaktadır (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. PÇ ve KAÇ'nin hidratasyon ürünlerinin birikimi (Scrivener, 2003a)

Hızlı reaksiyonların bir başka sonucu olarak hidratasyon ısısının nispeten kısa bir sürede artmasıdır. Bu kendi kendine ısınmanın yarattığı etkiler KAÇ betonu üzerindeki dayanım gelişimi için oldukça önem arz etmektedir. Bu sıcaklık artışlarına karşın KAÇ betonları termal çatlamaya duyarlı değildir. Bunun nedeni ise sünmenin dönüşüm reaksiyonu ile azalması ve termal yolla gerilmelerin gevşetilmesi olabilmektedir. Hızlı sıcaklık artışının önemli bir sonucu olarak da yüzeyin kurumasını ve dehidratasyonunu engellemek için betonu ıslak tutulması gerekmektedir. Bu nedenle kalıplanan numuneleri mümkün olduğunca erken sürede çıkarmak (yaklaşık 6 saat) ve yüzeylerinin sulanması önerilmektedir. Bu kendiliğinden ısınmanın bir avantajı ise betonun hidratasyon başlamadan önce donmasının önlenmesi koşuluyla çok soğuk havalarda (özellikle sıfırın altındaki sıcaklıklarda) beton dökülebilmektedir (Scrivener, 2003a).

4.7. Sülfat Direnci

KAÇ, PÇ'den daha iyi sülfat direncine sahiptir (Mangabhai, 1990). KAÇ betonları 80 yıldan fazla bir süredir sülfatlı sulara maruz kalan yerlerde kullanılmaktadır. Bu süreçte bu malzemenin hem yapılardaki hem de uzun süreli saha uygulamalarındaki performansı ile ilgili olumlu sonuçlar alınmıştır. PÇ'nin aksine sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltilerinin KAÇ betonları için magnezyum sülfat (MgSO_4) çözeltilerinden daha tehlikeli olabilmektedir (Scrivener ve Capmas, 1998).

4.8. Asit ve Alkali Direnci

KAÇ betonları asit geçirmez değildir; ancak belirli asitlerin ve endüstriyel atıkların aşındırıcı etkilerine karşı dayanıklıdır. Asit türüne, sıcaklığa, maruz kalma süresine, yıkanma sıklığına ve diğer faktörlere bağlı olarak korozyona karşı 3.5 ila 4.0 pH değerlerine kadar direnç gösterirler. Bu durumda betonların; şarap imalathaneleri, tabakhaneler, şeker rafinerileri, bira fabrikaları, fırınlar, mandıralar, balıkçılık ve gıda işleme tesisleri gibi koroziv ortamlarda kullanılması faydalı olacaktır. Bu betonlar ayrıca alkali hidroksitler hariç olmak üzere 12 pH değerine kadar alkalilere dayanıklıdır (Fishwick, 1982)

4.9. Yüksek Sıcaklık Direnci

KAÇ harcının termal genişmesi PÇ'ye göre daha düşüktür. Kullanılan agrega türüne bağlı olarak yangın dayanımı yüksek KAÇ betonları üretilebilmektedir (Scrivener ve Capmas, 1998). Çizelge 4.5'te ISIDAÇ 40 tipi KAÇ'nin sıcaklık ile değişen basınç dayanımlarının PÇ ile karşılaştırılması verilmiştir.

Çizelge 4.5. ISIDAÇ 40 esaslı karoların ısı dayanımlarının PÇ esaslı karolar ile karşılaştırılması (ÇİMSA A. Ş., 2019)

Karışım	ISIDAÇ 40 + Klinker Agrega	ISIDAÇ 40 + Şamot Agrega	ISIDAÇ 40 + Boksit Agrega	PÇ + Kalker Agrega
400 °C'deki Basınç Dayanımı (MPa)	37.2	29.7	39.2	35.5
500 °C'deki Basınç Dayanımı (MPa)	43.8	41.3	46.9	24.8
800 °C'deki Basınç Dayanımı (MPa)	59.5	45.3	56.7	0
1100 °C'deki Basınç Dayanımı (MPa)	32.4	25.1	30.2	0

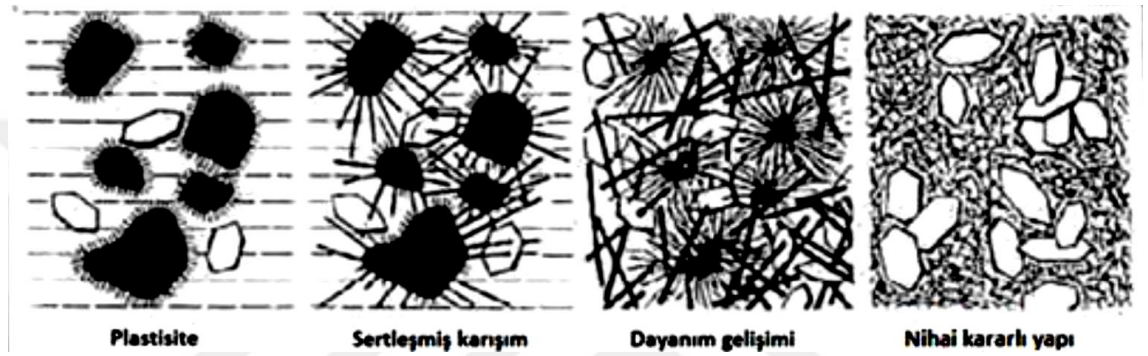
4.10. Hidratasyon Mekanizması

KAÇ'nin hidratasyon süreci PÇ'den farklıdır. Genel olarak PÇ hidratasyonunun % 60-80'i 28 günde gerçekleşmektedir. 28 günden sonra hidratasyon yavaşlayarak devam etmektedir. Bununla birlikte KAÇ'deki hidratasyonun büyük bir bölümü sadece ilk 24 saat içinde gerçekleşmektedir (Kan vd., 2017). PÇ, kalsiyum ve silisyum oksitleri ile C₂S ve C₃S fazlarını oluşturup su ile tepkimeye girdiğinde kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum hidrat (C-H) oluşumlarını sağlamaktadır. KAÇ, kalsiyum ve alüminyum oksitleri ile CA oluşturup su ile tepkimeye girdiğinde hidratasyon ürünlerini (6CAH₁₀ ve 3C₂AH₈) oluşturmaktadır (Sucu ve Delibaş, 2015).

Suyun içindeki anhidrit fazlar iyon vermek için çözünmektedir. KAÇ'nin ana fazı CA, suda kalsiyum (Ca⁺²) ve alüminyum hidroksit (Al(OH)₄⁻) iyonlarının oluşumuna neden olmaktadır. C-S-H kristalleri ve alüminyum hidroksit (Al(OH)₃) çekirdeklenip çökelmektedir. Bu hidrat kristalleri, bir jel tabakası oluşturarak reaksiyona girmemiş klinker yüzeyine yakın çökelmeye başlamaktadır. Bu tabaka geçirgen bir yapıdadır. Bu sebeple altta kalan klinker tanelerinin daha fazla çözülebilmesi ve hidratasyonu için yeterli su olduğu sürece işlem kolayca gerçekleştirilebilmektedir. İlk aşamalarda hidratasyon kristalleri reaksiyona girmemiş taneleri kaplayan bir jel tabakası oluşturmaktadır. Tepkimeler sonucu kristal oluşumuna bağlı olarak çimento taneleri arasında bazı bağlar meydana gelip karışımın sertleşmesi ile sonuçlanmaktadır. Hidratasyon daha da ilerlerken karışım katılarak sertleşir (Garsel, 1996).

Reaksiyon hızı sadece tepkimeye girenlerden biri (çimento veya su) tükendiğinde veya hidratların çökmesini sağlayan boş alan olmadığı zaman yavaşlamaktadır. Bu olay çimento harcında prize sebebiyet vermektedir (Bizzozero, 2014).

KAÇ'nin düşük sıcaklıklardaki ($< 27\text{ }^{\circ}\text{C}$) hidratasyon ürünleri kalsiyum alümina dekahidrat (CAH_{10}), dikalsiyum alümina oktahidrat (C_2AH_8) ve alüminyum hidrat (AH_3) şeklindedir (Kırca, 2006). Şekil 4.5'te KAÇ'nin hidratasyon süreci şematize edilmiştir.



Şekil 4.5. KAÇ harcının hidratasyon süreci (Garsel, 1996)

Şematize edilen hidratasyon sürecinde;

- ✓ Çimento taneciklerinin yüzeylerinde ilk kristaller oluşur. Karışım hala bu noktada akışkanlık göstermektedir; fakat başlangıçtaki akış özelliklerini kaybetmiştir.
- ✓ Sürekli çözünme-çökme olaylarının artışıyla birlikte kristaller hacimce daha da büyüyerek birbirlerine bağlanırlar. Tane hareketi kısıtlanmaktadır, karışım katılaşıp priz alır.
- ✓ Hidratasyon işlemi devam ederken oluşan kristallerin sayısı artar ve kristaller hacimce büyür. Birbiriyle iç içe geçerek yapıya dayanım kazandırır.
- ✓ Su tamamen kullanıldığında ve kararlı kristal fazları geliştiğinde nihai kararlı yapıya ulaşılır (Garsel, 1996).

4.11. Dönüşüm Reaksiyonları

Hidratasyon reaksiyonları boyunca yarı kararlı CAH_{10} , C_2AH_8 ve kararlı trikalsiyum alümina heksahidrat (C_3AH_6) C-S-H'leri oluşmaktadır. Altıgen şeklindeki yarı kararlı hidratlar, kararlı küp şeklindeki hidratlara dönüşmektedir. Kararlı küp şeklindeki hidrat CAH_{10} , C_2AH_8 'den yoğunluğu daha yüksektir. Bu durum gözenekliliğin artmasına neden olmaktadır. Artan gözenekliliğin dayanım ve dayanıklılık üzerine etkilerine karışım tasarımı yapılırken dikkat edilmelidir. CA'nın $15\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altındaki hidratasyonu yarı kararlı CAH_{10} 'un oluşumuna sebebiyet vermektedir. Scrivener ve Capmas (1998), sıcaklığa (T) bağlı dönüşüm reaksiyonlarının aşağıda gösterildiği gibi olduğunu belirtmişlerdir.

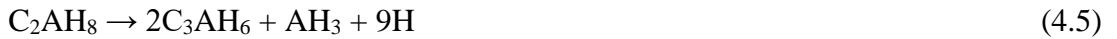
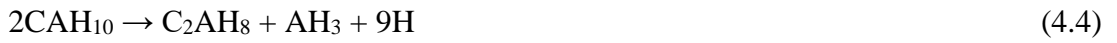
$T < 15\text{ }^\circ\text{C}$ için;



$15\text{ }^\circ\text{C} < T < 30\text{ }^\circ\text{C}$ için;



$30\text{ }^\circ\text{C} < T$ için;

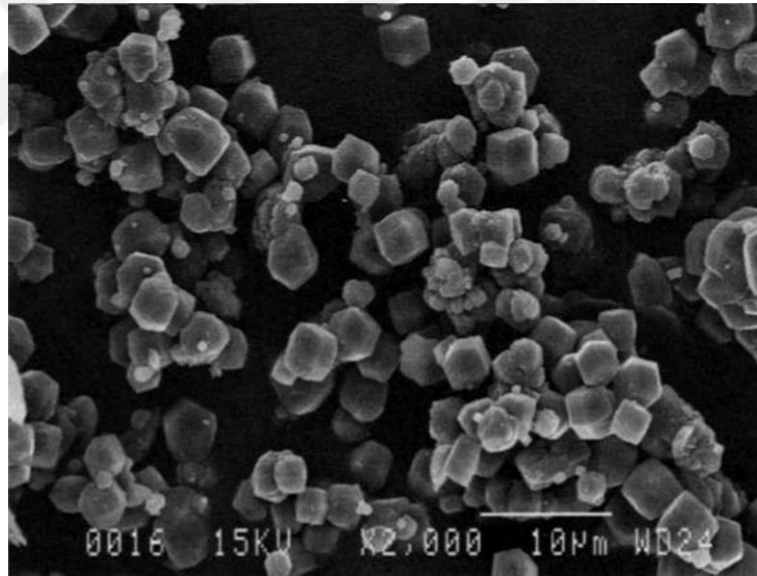


Bu reaksiyonlarda "H", hidrojeni temsil etmektedir.

Çizelge 4.6. C-S-H'lerin yoğunluk ve bağıl nem değerleri

Faz	Yoğunluk (kg/m ³)	Bağıl Nem (%)
CAH ₁₀	1720	53
C ₂ AH ₈	1750	40
C ₃ AH ₆	2520	28
AH ₃	2400	35

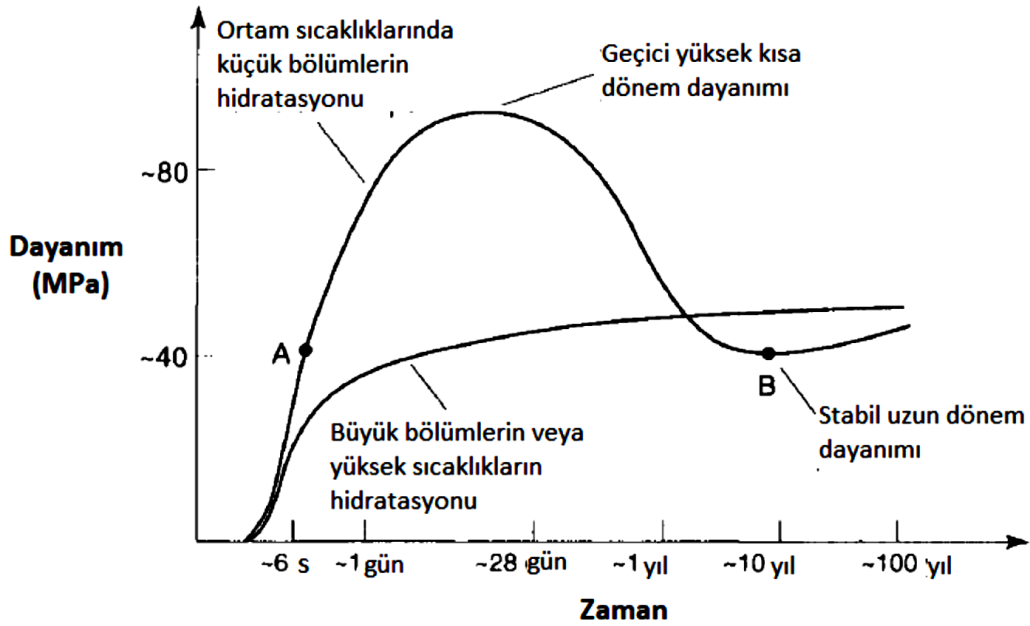
Çizelge 4.6'ya bakıldığında hidratlar arasında en yüksek yoğunluğa sahip olan C₃AH₆ gözükmemektedir. Tüm sıcaklıklar için en kararlı olanlar kübik ve zayıf kristal yapıları olan C₃AH₆ ve AH₃'tür (Scheinherrová ve Trník, 2017). Şekil 4.6'da C₃AH₆'nın morfolojisi gösterilmektedir. Bu şekildeki kristaller, yüksek s/ç oranına sahiptir olduklarından çok büyüktürler. Dönüşüm reaksiyonları esnasında normal harçlarda oluşan hidratlar genellikle bir mikron boyutundan daha küçük olmaktadır (Scrivener, 2003a).



Şekil 4.6. C₃AH₆'nın morfolojisi (Scrivener, 2003a)

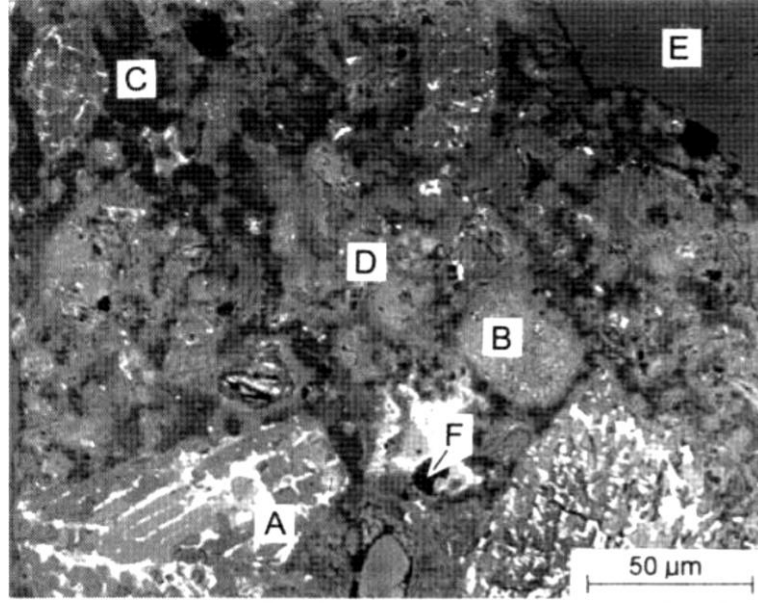
KAÇ'nin nihai dayanımı, kararlı hidratların (C₃AH₆ ve AH₃) oluşumu ile gelişmektedir. Hidratasyon, ortam sıcaklığında küçük aşamalar halinde gerçekleştiğinden bu kararlı hidratların oluşumu yarı kararlı hidratların (CAH₁₀ ve C₂AH₈) oluşumundan gelmektedir. Yarı kararlı hidratlar yüksek su içeriğine ve düşük yoğunluklara sahip olduklarından haliyle su ile dolu olan alanı hızla kaplayarak erken dayanım sağlamaktadırlar. Bu erken dayanımların, kararlı

hidratların esas oluşumundan önce geçici bir durum olarak görülmesi gerekir. Düşük yoğunluklu yarı kararlı hidratların, daha yüksek bir yoğunluğa sahip kararlı hidratlara dönüşümü esnasında gözenekliliğin artmasıyla dayanım azalmaktadır. Aynı zamanda su oluşmaktadır. İlk etapta s/ç oranı düşük tutulursa, ilk oluşan yarı kararlı hidratlardan sonra hidrate olmamış çimento kalmaktadır. Bu hidrate olmamış çimento, dönüşüm reaksiyonu sırasında açığa çıkan su ile reaksiyona girerek dayanımda bir artışa neden olur (Scrivener ve Capmas, 1998). Şekil 4.7’de KAÇ betonunun zamana bağlı dayanım gelişim grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.7. s/ç ~ 0.40 ve çimento miktarı 400 kg/m³ olan KAÇ betonunun dayanım gelişimi (Kurdowski, 2014)

Dönüşüm reaksiyonları zamana bağlı olmakla beraber tam dönüşüm, özellikle 20 °C'nin altındaki sıcaklıklarda, birkaç yıl sürebilmektedir. Ek olarak kürlenme sıcaklığının artışı dönüşüm hızını artırır ve kararsız CAH₁₀ ve C₂AH₈, C₃AH₆'ya hızlıca dönüşmektedirler (Kırca, 2006). Şekil 4.8’de 27 yıllık ve s/ç oranı 0.32 olan KAÇ betonunun geri saçılımlı elektron görüntüsü bulunmaktadır ve Dış yüzeyin 10 mm altındaki derinlikte A, büyük ölçüde tepkimeye girmemiş çimento tanesini (esas olarak CA (orta koyu) ve ferrit (açık) içeren); B, neredeyse tamamen tepkimeye girmiş çimento tanesini; C, AH₃'ü; D, tanımlanmamış ürünleri (muhtemelen esas olarak mikrometre seviyesinde veya seviyesinin altında karışık C₃AH₆ ve AH₃'ten oluşmaktadır); E, agregayı; F, gözenekleri göstermektedir (Taylor, 1997).



Şekil 4.8. 27 yıllık KAÇ betonunun geri saçılımlı elektron görüntüsü (Taylor, 1997)

4.12. Avantajları ve Dezavantajları

İnşaat mühendislerinin temel sorunu olarak görülen dönüşüm reaksiyonlarının neden olduğu dayanım kaybına, gözeneklilik ve geçirgenlik artışı eşlik etmektedir. Dönüşüm reaksiyonlarının hızı çok çeşitli faktörlere bağlıdır: Sıcaklık (sıcaklığın yükselmesiyle daha hızlı dönüşüm), bağıl nem (bağıl nemin doyumluğun altına düşmesiyle daha yavaş dönüşüm), s/ç oranı (s/ç oranı artmasıyla yüksek dönüşüm hızı), agrega, çimentonun mineralojik bileşimi (düşük alkali içeriğinde daha yavaş dönüşüm). Bu dönüşüm reaksiyonları, yüksek sıcaklıklarda kürlenme ($> 50\text{ }^{\circ}\text{C}$) ile hızlandırılabilir. Dönüşüm reaksiyonlarının etkileri, hidrat grubunu değiştiren cüruf veya kireçtaşı gibi bağlayıcı malzemelerin eklenmesiyle de azaltılabilmektedir (Bensted, 2002).

KAÇ, yıllık kullanım miktarı PÇ'nin yaklaşık % 0.1'i kadardır. Oldukça pahalı olduğundan (PÇ'ye kıyasla 4-5 kat), PÇ'nin yerine kullanmak ekonomik değildir. Bunun yerine, temel bağlayıcı faz olarak veya karma bir bağlayıcı fazın bir bileşeni olarak betona veya harca bazı özellikler kazandırmak için kullanılır (Scrivener, 2003b).

KAÇ'nin kullanımıyla elde edilebilecek özelliklerden bazıları şunlardır:

- ✓ Hızlı sertleşme,
- ✓ Yüksek sıcaklıklara ve sıcaklık değişimlerine karşı direnç,
- ✓ Kimyasal saldırılara, özellikle asitlere karşı direnç,
- ✓ Darbelere ve aşınmaya karşı direnç (Scrivener, 2003b).

Günümüzde KAÇ kullanımını son derece çeşitlilik göstermektedir. En yaygın kullanımını refrakter beton üretimindedir. KAÇ ayrıca, diğer mineral bağlayıcılarla (örneğin; PÇ, kalsiyum sülfat, kireç) ve katkılarla birlikte onarım, zemin tesviyesi, fayans yapıştırma gibi uygulamalar için bir dizi özel harç üretmek adına yaygın olarak kullanılır (Scrivener, 2003b).

Geleneksel betonun içinde, genellikle aşırı sıcağa, zararlı kimyasallara, mekanik aşınmaya ya da darbelere karşı korunmak için ve endüstriyel alanlarda kullanılır (Scrivener, 2003b).

4.13. Kullanım Alanları

Beton uygulamaları:

- ✓ Hızlı priz, yüksek erken dayanım gerektiren uygulamalarda ve soğuk havada yapılan uygulamalarda (yollar, havaalanları, tamir harçları vb.) kullanıma uygundur (Yaman, 2015). Yüksek reaksiyon hızı ve hidrasyon ısı sebebiyle KAÇ aynı zamanda düşük sıcaklıklarda (-10 °C'ye kadar) kullanım için soğuk hava depolarındaki onarımlar veya soğuk iklimlerde kış inşaatları için de uygundur (Ng, 2012).
- ✓ Yüksek aşınma direnci gerektiren uygulamalarda (endüstriyel zeminler, yollar vb.) kullanıma uygundur (Yaman, 2015).
- ✓ Yüksek kimyasal, biyolojik faktörlere direnç ve asit direnci gerektiren uygulamalarda (beton borular, kanalizasyon elemanları, endüstriyel zeminler, sülfat içeren zeminler vb.) kullanıma uygundur (Yaman, 2015). Ek olarak döşeme ürünleri (döküm ev döşemeleri gibi), kimyasal dirençli harçlar ve betonlar, genişleyen harçlar, zemin şapları, lağım uygulamaları, koruyucu kaplamalar, fayans yapıştırıcılar, harç ve inşaat kimyasal ürünleri, nispeten yüksek dayanımlar elde edebilen ve hızlı sertleşen karışımlar üretmek için

sıklıkla PÇ ile birlikte bazen sönmüş kireç veya alçı taşı ilavesiyle kullanıma uygundur (Ng, 2012).

- ✓ Yüksek darbe direnci gerektiren uygulamalarda (balistik amaçlı yapılar vb.) kullanıma uygundur (Yaman, 2015).

Refrakter uygulamaları:

- ✓ Refrakter tuğla üretiminde kullanıma uygundur (Yaman, 2015). KAÇ'nin ana uygulama alanı, monolitik refrakterlerde bağlayıcı olarak kullanımıdır. Uygun refrakter agregalar ile beraber kullanıldığı zaman KAÇ, çelik ve diğer yüksek sıcaklıklarda işlem yapılan endüstrilerde refrakter olarak kullanılması büyük fayda sağlar. Genellikle, boksitten üretilmiş KAÇ, 1350 °C sıcaklığa kadar dayanabilir. Demir içeriği düşük; ancak alümina içeriği yüksek olan beyaz KAÇ, 2000 °C'ye kadar dayanabilmektedir. Bu refrakterler termal şoka karşı iyi bir dirence sahiptir (Ng, 2012).

Yapı kimyasalları uygulamaları:

- ✓ Çimento esaslı toz malzemeler üretiminde,
- ✓ Üçlü bağlayıcı sistemlerde (KAÇ + PÇ + alçı),
- ✓ Dolgu malzemeleriyle birlikte (kalsit vb.),
- ✓ Kimyasal katkılarla birlikte (sitrik asit, akışkanlaştırıcılar) kullanıma uygundur (Yaman, 2015).

4.14. Türkiye'deki Üretimi ve Pazarı

KAÇ, Türkiye'de uzun süredir ÇİMSA A. Ş. tarafından, TS EN 14647 standartlarına göre üretilmektedir. Türkiye'nin ilk ve öncü KAÇ olarak bilinen ISIDAÇ 40, ÇİMSA A. Ş.'nin Mersin'deki fabrikasında 2002'den beri yurtiçi ve yurtdışı pazarı için üretime geçilmiştir (ÇİMSA A. Ş., 2020a). Kalsiyum Alüminat Çimentosu Üretim Tesisi, kısaca CAC Tesisi olarak faaliyet gösteren bu üretim hattı 2002 yılında 15000 t/yıl kapasiteli bir fırın ile devreye girmiştir. 2007 yılında 15000 t/yıl kapasiteli ikinci bir fırın, 9 t/sa'lik bir çimento değirmeni ve paketleme ünitesi ile üretimine büyüyerek devam etmiştir. 2009 yılında yapılan paketleme ünitesi ile

ürünler 25 kg torbalı, paletli ve 1,5 ile 1,0 t'luk big-bag tipi ambalajlarla müşterilere sunulmaya başlanmıştır. 2013 yılında 15000 t/yıl kapasiteli üçüncü bir fırın daha sisteme dâhil edilerek toplam kapasite 45000 t/yıl'a çıkarılmıştır. 2014 yılında pazarda büyüme stratejisi gereği üründe segmentasyona gidilerek, Kalsiyum Alimünat Klinker Agregası olan CACSAND adında yeni bir ürün piyasaya sürülmüştür (ÇİMSA A. Ş., 2020b). KAÇ, yapı kimyasalları ve refrakter uygulamaları için özel olarak üretilmektedir. Bu ürünün en önemli özellikleri; ayarlanabilir priz süresi, yüksek erken dayanım kazanımı ve uygun agrega kullanımında 1300 °C'ye kadarki yüksek sıcaklıklara karşı direnç sağlayabilmesidir. Sülfat ve asite karşı gösterdiği yüksek dirençle, kanalizasyon borularının iç tasarımında tercihen kullanılmaktadır. ÇİMSA A. Ş. tarafından üretilmiş olan KAÇ kullanımında dikkat edilmesi gerek hususlar şunlardır:

- ✓ Beton karışımı hazırlanırken s/ç oranı mümkün olduğunca düşük tutulmalıdır (maksimum s/ç oranı 0,40 olmalıdır).
- ✓ Kullanılacak kum ve agrega granülometrisi (tane boyut dağılımı) uygun olmalıdır.
- ✓ ISIDAÇ 40 ile yapılan numuneler uygun kür koşullarında kürlenmeli, sıcak kütleme işlemi kesinlikle yapılmamalıdır.
- ✓ 1000 °C ve üzeri sıcaklıklar için yüksek ısıl dayanıklılığa sahip refrakter agregalar veya şamot kullanılmalıdır. (ÇİMSA A. Ş., 2020a)

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, ortalama 20 °C sıcaklık ve % 40-50 bağıl nem koşullarına sahip Süleyman Demirel Üniversitesi Doğal ve Endüstriyel Yapı Malzemeleri Uygulama ve Araştırma Merkezi (SDÜ DEYMAM)'nde yürütülmüştür.

5.1. Materyal

5.1.1. Çimento

Beton üretimlerinde bağlayıcı olarak ÇİMSA A. Ş. üretimi KAÇ (ISIDAÇ 40) ve GÖLTAŞ ÇİMENTO A. Ş. üretimi PÇ (CEM I 42.5 R) kullanılmıştır. Söz konusu çimentoların bileşimleri Çizelge 5.1 ve 5.2'de verilmiştir

Çizelge 5.1. KAÇ özellikleri (ÇİMSA A. Ş., 2020a)

Kimyasal Özellikleri (%)		Fiziksel Özellikleri	
SiO ₂	3.60	Hacim Sabitliği (mm)	1.0
Al ₂ O ₃	39.80	0,045 mm Elekte Kalıntı (%)	23.0
Fe ₂ O ₃	17.05	0,090 mm Elekte Kalıntı (%)	6.5
CaO	36.20	Özgül Yüzey Alanı (cm ² /g)	3000
MgO	0.65	Priz Başlangıcı (dak)	280
		Priz Sonu (dak)	295
		Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.25
Mekanik Özellikleri (MPa)			
6 Saatlik Basınç Dayanımı			47.0
24 Saatlik Basınç Dayanımı			70.0

Çizelge 5.2. PÇ özellikleri (GÖLTAŞ ÇİMENTO A. Ş., 2018)

Kimyasal Özellikleri (%)		Fiziksel Özellikleri	
SiO ₂	20.52	Hacimsel Genleşme (mm)	≤ 1
Al ₂ O ₃	4.00	İncelik (90 µm, %)	0.10
Fe ₂ O ₃	3.45	İncelik (200 µm, %)	1.10
CaO	64.28	Özgül Yüzey Alanı (cm ² /g)	3340
MgO	1.63	Priz Başlangıcı (dak)	185
		Priz Sonu (dak)	240
		Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3.12
Mekanik Özellikleri (MPa)			
7 Günlük Eğilme Dayanımı	5.8	7 Günlük Basınç Dayanımı	39.3
28 Günlük Eğilme Dayanımı	7.2	28 Günlük Basınç Dayanımı	51.0

5.1.2. Su

Numunelerin üretimi için gereken tüm işlemlerde değerleri Çizelge 5.3'te verilen Süleyman Demirel Üniversitesi (SDÜ) Batı Kampüsü şebeke musluk suyu kullanılmıştır.

Çizelge 5.3. SDÜ Batı Kampüsü şebeke suyu değerleri (Şavik vd., 2012)

Konum	T (°C)	pH	Eh (mV)	EC (µS/cm)	O ₂ (mg/l)	TDS (mg/l)
Batı Kampüsü	19.8	7.29	281	662	5.5	332
Eh: Redoks potansiyeli EC: Elektriksel iletkenlik O ₂ : Oksijen gazı TDS: Toplam çözünmüş katı maddeler						

5.1.3. Köpük

K üretiminde ajan olarak sentetik yapılı bir köpük ajanı (KNOPP Group, CONTOPP® Foambuilder SFS3) kullanılmıştır (Çizelge 5.4).

Çizelge 5.4. Köpük ajanı özellikleri (KNOPP Group, 2020)

Hammadde Kaynağı	Sentetik Yüzeyaktif Maddeler
Renk	Mavi
Madde Hâli	Sıvı
Özgül Ağırlık (20 °C)	$1.00 \pm 0.02 \text{ g/cm}^3$
İşlem Sıcaklığı	$\geq 5 \text{ °C}$
Safılık	% 29-31
Servis Ömrü	12 Ay

Üretici firma tavsiyesi doğrultusunda 50 l suya 1 l sentetik köpük ajanı ilavesiyle birlikte hazırlanan karışım, içerdeki hava basıncı 4 atm olacak şekilde ayarlanıp köpük jeneratörüne beslendikten sonra K üretilmiştir (Şekil 5.1).



Şekil 5.1. Jeneratörde K üretimi

5.1.4. Kıvam artırıcı

Kıvam artırıcı olarak CMC kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 5.5'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. CMC özellikleri (Anonim, 2020a)

Ürün Tanımı	
Ürün Adı	Karboksimetil Selüloz Sodyum Tuzu
Kimyasal Adı	Sodyum Karboksimetil Eter Selüloz
Kimyasal Formülü	$C_6H_9OCH_2COONa$
Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	
Fiziksel Durumu	Beyaz veya Hafif Sarımsı, Hemen Hemen Kokusuz Higroskopik Granül, Toz veya Lifli Yapı
Özgül Ağırlık	1.6 g/cm ³
Çözünürlük	Çözünmekte ve Su ile Kolloidal Çözelti Oluşturmaktadır, Etanolde Çözünmemektedir.
pH	6.0-8.5 (% 1 Sulu Çözelti)

5.1.5. Priz hızlandırıcı

Harç üretiminde priz hızlandırıcı olarak LK kullanılmıştır. Malzeme özellikleri Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. LK özellikleri (Anonim, 2020b)

Moleküler Formülü	Li_2O_3
Molar Kütle	73.89 g/mol
Görünüm	Kokusuz Beyaz Toz
Özgül Ağırlık	2.11 g/cm ³
Erime Noktası	723 °C
Kaynama Noktası	1310 °C
Suda Çözünürlük	1.54 g / 100 ml (0 °C) 1.43 g / 100 ml (10 °C) 1.29 g / 100 ml (25 °C) 1.08 g / 100 ml (40 °C) 0.69 g / 100 ml (100 °C)
Çözünürlük	Aseton, Amonyak ve Alkolde Çözünmez
Kırılma İndeksi	1.428
Viskozite	4.64 cP (777 °C) 3.36 cP (817 °C)

5.1.6. Genleştirme ajanı ve katalizör

Harç karışımlarında genleştirme ajanı ve katalizör olarak % 30 seyreltik HP ve KI kullanılmıştır. Malzemelere ait özellikleri Çizelge 5.7 ve 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.7. HP özellikleri (Anonim, 2020c)

Molekül Formülü	H ₂ O ₂
Görünüm	Berrak
Özgül Ağırlık (20 °C)	1.10-1.11 g/cm ³
Erime Noktası	-26 °C
Kaynama Noktası	107 °C
Safılık	% 29-31
Çözünürlük	Aseton, Amonyak ve Alkolde Çözünür
Asidite	≤ % 0.05
Aktif Oksijen	% 13-15
Stabilite	≥ % 97

Çizelge 5.8. KI özellikleri (Anonim, 2020d)

Molekül Formülü	KI
Molar Kütlesi	166 g/mol
Görünüm	Beyaz Kristal Katı
Özgül Ağırlık	3.123 g/cm ³
Erime Noktası	681 °C
Kaynama Noktası	1330 °C
Suda Çözünürlük	128 g / 100 ml (0 °C) 140 g / 100 ml (20 °C) 176 g / 100 ml (60 °C) 206 g / 100 ml (100 °C)
Çözünürlük	2 g / 100 ml (Etanol) Aseton (1.31 g / 100 ml) Eter ve Amonyakta Az Derecede Çözünür

5.1.7. Hafif agrega

Beton harç bileşenlerinde hafif agrega olarak İzmir'den BERGAMA MADENCİLİK İNŞAAT MAKİNE PERLİT SAN. TİC. A. Ş.'nin PLT ürününün özellikleri Çizelge 5.9'da verilmiştir.

Çizelge 5.9. PLT özellikleri (Anonim, 2020e)

Kimyasal Özellikleri (%)		Fiziksel Özellikleri	
SiO₂	71.0-75.0	Renk	Gri, Beyaz, Siyah ve Tonları
Al₂O₃	12.5-18.0	Erime Noktası (°C)	1315-1390
CaO	0.5-0.2	pH	6.6-8.0
Fe₂O₃	0.1-1.5	Özgül Ağırlık (g/cm³)	2.2-2.4
MgO	0.03-0.5	Serbest Nem (%)	≤ 0.5

5.2. Yöntem

5.2.1. Beton üretim yöntemleri

Araştırmada numunelerin kuru birim hacim ağırlık $\leq 500 \text{ kg/m}^3$ ve basınç dayanımı $\geq 250 \text{ kPa}$ olması birinci öncelik olarak hedeflenmiştir. Karışımlar hazırlanmadan önce KAÇ'nin LK ve CMC ilavesinin priz süreleri üzerine etkisini gözlemleyebilmek için priz süresi tayini deneyi (Vicac testi) yapılmıştır (Şekil 5.2). Ardından test sonuçları ışığında karışım tasarımları oluşturulmuştur. Karışım tasarımlarında 3 farklı yöntem kullanılmıştır:

❖ Yöntem I; genişletme ajanı ve katalizör kullanımı ile hafif beton üretimi:

- ✓ Çimento: KAÇ,
- ✓ Su: SDÜ Batı Kampüsü şebeke suyu,
- ✓ Kıvam artırıcı: CMC,
- ✓ Priz hızlandırıcı: LK,
- ✓ Genleştirme ajanı: HP,
- ✓ Katalizör: KI.

❖ Yöntem II; genişletme ajanı ve katalizör kullanıma hafif agrega ilavesi ile hafif beton üretimi:

- ✓ Çimento: KAÇ,
- ✓ Su: SDÜ Batı Kampüsü şebeke suyu,
- ✓ Kıvam artırıcı: CMC,
- ✓ Priz hızlandırıcı: LK,
- ✓ Genleştirme ajanı: HP,
- ✓ Katalizör: KI,
- ✓ Hafif agrega: PLT.

❖ Yöntem III; köpük ajanı kullanımı ile köpük beton üretimi:

- ✓ Çimento: KAÇ,

- ✓ Su: SDÜ Batı Kampüsü şebeke suyu,
- ✓ Priz hızlandırıcı: LK,
- ✓ Köpük ajanı: Sentetik esaslı köpük ajanı.



Şekil 5.2. Vicat testi ile priz süreleri tayini

Karışıma giren her bir bileşen 0.001 g hassasiyetli elektronik terazi ile tartılmıştır. Yöntem I ve II'ye göre oluşturulan karışımlar $\phi 70 \times 83$ mm boyutlarındaki silindirik kaplarda, Yöntem III ile oluşturulan karışımlar $\phi 120 \times 148$ mm boyutlarındaki silindirik beherde hazırlanmıştır. Sonrasında $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki prizma kalıplara dökülmüştür. Ek olarak, ısıl iletkenlik katsayısı tayininde kullanılacak numune üretmek için Yöntem I ve II'ye göre oluşturulan karışımların bileşenleri 0.72 ($180 \text{ cm}^3/250 \text{ cm}^3$) katsayısı, Yöntem III ile oluşturulan karışımların bileşenleri 0.18 ($180 \text{ cm}^3/1 \text{ dm}^3$) katsayısı ile çarpılmıştır. Böylelikle, karışımlardaki bileşen yüzdelikleri sabit tutulmuş olup $\phi 70 \times 83$ mm (hacim 180 cm^3) boyutlarındaki silindirik kalıplara dökülmek üzere yeni numuneler hazırlanmıştır. Döküm işlem aşamaları Şekil 5.3 ve 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3. Yöntem I ve II'ye göre üretilen numunelerin döküm işlem aşamaları



Şekil 5.4. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin döküm işlem aşamaları

Yöntem I ve II'ye göre oluşturulan karışımların genleşme oranlarını tayin edebilmek adına ilk ve son hacim değerlerini belirlemek üzere karışımların hacim değerleri dereceli silindirde ölçülmüştür (Şekil 5.5).



Şekil 5.5. Dereceli silindir ile genişleme oranı tayini

Döküm işlemlerinden 1 gün sonra kalıplar polietilen örtüler içerisine alınıp 20 ± 3 °C'de 3 gün süreyle numuneler kalıplarda bekletilmiştir. Daha sonra kalıplardan çıkarılan numuneler, 28. ve 45. güne kadar iklim kabininde 20 ± 3 °C ve % 90 bağıl nem koşullarında kürlenmiştir (Şekil 5.6).



Şekil 5.6. Kalıplardan çıkarılan numunelerin iklim kabininde kürlenmesi

Karışım tasarımlarında belirlenen bu yöntemlerin; köpük beton üretiminin yanı sıra neticesinde ortaya çıkacak olan bir hafif beton ürününe alternatif olması açısından genişletme yöntemi de eklenerek oluşturulması amaçlanmıştır. Tezin çıkış noktası köpük beton tasarımı olması sebebiyle köpük beton üretiminde KAÇ'nin performansını kıyaslayabilmek (özellikle kılcal su emme ve yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybı) için referans olarak Yöntem III ile yapılan tasarımlardan biri esas

alınıp PÇ kullanılarak yeni üretimler yapılmıştır. Bunların yanı sıra dökülen numuneler içerisinde bağlı olduğu değişkenin serisine ait optimum değerleri sağlayan numuneler belirlenip ısı iletkenlik katsayıları bulunmuştur (taze birim hacim ağırlık, genleşme oranı, kuru birim hacim ağırlık, eğilme ve basınç dayanımlarının belirlenmesinden sonra) ve boşluk yapıları hakkında bilgi edinebilmek için SEM görüntüleri çektilmiştir. Çalışmanın devamında ise optimum değerleri sağlayan seriler içerisinde en iyi karışım tespit edilip geriye kalan deneyler (kılcal su emme ve yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybı) o karışım ile yürütülmüştür.

5.2.2. Karışım tasarımları

5.2.2.1. Yöntem I

Bu yöntemde karışımlarda hedeflenen hacim 250 cm^3 olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Belirli oranlarda genleştirme ajanlarının ve buna ek olarak kıvam artırıcının etkilerini görebilmek ve optimum değerleri yakalayabilmek için 10 farklı karışım yapılmıştır (Çizelge 5.10). Karışım hesaplarında KI (HP kütlesinin % 10'u) ve LK (KAÇ kütlesinin % 0.1'i) oranları sabit tutulmuştur.

Çizelge 5.10. Yöntem I'e göre hazırlanan karışım tasarımları

CMC Oranı (%): 0.01-0.02-0.03-0.04-0.05										
Bileşenler	HP1	%	HP2	%	HP3	%	HP4	%	HP5	%
	Miktar (g)									
KAÇ	65		65		65		65		65	
HP	1.95	3	1.95	3	1.95	3	1.95	3	1.95	3
LK	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1
Su	32.5		32.5		32.5		32.5		32.5	
KI	0.195	10	0.195	10	0.195	10	0.195	10	0.195	10
CMC	0.007	0.01	0.013	0.02	0.020	0.03	0.026	0.04	0.033	0.05
"s/ç	0.50		0.50		0.50		0.50		0.50	
HP Oranı (%): 1-2-3-4-5										
Bileşenler	HP6	%	HP7	%	HP8	%	HP8	%	HP10	%
	Miktar (g)									
KAÇ	65		65		65		65		65	
HP	0.65	1	1.30	2	1.95	3	2.60	4	3.25	5
LK	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1	0.065	0.1
Su	32.5		32.5		32.5		32.5		32.5	
KI	0.065	10	0.130	10	0.195	10	0.260	10	0.325	10
CMC	0.007	0.01	0.007	0.01	0.007	0.01	0.007	0.01	0.007	0.01
s/ç	0.50		0.50		0.50		0.50		0.50	
% HP	$M_{HP} * 100/M_{KAÇ}$									
% LK	$M_{LK} * 100/M_{KAÇ}$									
% KI	$M_{KI} * 100/M_{HP}$									
% CMC	$M_{CMC} * 100/M_{KAÇ}$									
M_{HP} : HP kütlesi $M_{KAÇ}$: KAÇ kütlesi M_{LK} : LK kütlesi M_{KI} : KI kütlesi M_{CMC} : CMC kütlesi										

Tüm deneyler için tasarlanan CMC ve HP serileri için s/ç oranı, CMC ve LK ilavesinden kaynaklı kıvam sorunu yaşanmaması için 0.50'de sabit tutulmuştur. CMC serisi içinse HP oranı KAÇ kütlesinin % 3'ü oranında sabit tutulmuştur.

5.2.2.2. Yöntem II

Bu yöntemde karışımlarda hedeflenen hacim 250 cm³ olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Belirli oranlarda genleştirme ajanlarına hafif agrega olarak PLT ilavesinin etkilerini görebilmek ve optimum değerleri yakalayabilmek için 4 farklı

karışım tasarımı yapılmıştır (Çizelge 5.11). Tasarımlarda PLT ikamesinin hacimsel anlamda bir artış yaratacağı öngörülüp hedeflenen hacim değerini sağlayabilmesi açısından HP oranı KAÇ kütlesinin % 2 oranında sabit tutulmuştur. Ek olarak, karışım hesaplarında KI (HP kütlesinin % 10'u), LK (KAÇ kütlesinin % 0.1'i), CMC (KAÇ kütlesinin % 0.01'i) ve ilave su (PLT kütlesinin % 250'si) oranları sabit tutulmuştur.

Çizelge 5.11. Yöntem II'e göre hazırlanan karışım tasarımları

PLT Oranı (%): 5-10-15-20								
Bileşenler	PLT1	%	PLT2	%	PLT3	%	PLT4	%
	Miktar (g)							
KAÇ	73.32		68.64		63.96		59.28	
PLT	3.90	5	7.80	10	11.70	15	15.60	20
HP	1.47	2	1.37	2	1.28	2	1.19	2
LK	0.073	0.1	0.069	0.1	0.064	0.1	0.059	0.1
Su	36.66		34.32		31.98		29.64	
KI	0.15	10	0.14	10	0.13	10	0.12	10
CMC	0.007	0.01	0.007	0.01	0.006	0.01	0.006	0.01
İlave Su	9.75	250	19.50	250	29.25	250	39.00	250
s/ç	0.50		0.50		0.50		0.50	
% PLT	$M_{PLT} * 100/M_{KAÇ}$							
% HP	$M_{HP} * 100/M_{KAÇ}$							
% LK	$M_{LK} * 100/M_{KAÇ}$							
% KI	$M_{KI} * 100/M_{HP}$							
% CMC	$M_{CMC} * 100/M_{KAÇ}$							
% İlave Su	$M_{İlaveSu} * 100/M_{PLT}$							
İlave Su: Karışım suyu haricinde, genleşmiş perlitin kütlece su emme değeri gözetilerek karışıma eklenen su miktarı M_{PLT} : PLT kütlesi $M_{İlaveSu}$: İlave su kütlesi								

Tüm deneyler için tasarlanan PLT serilerinin s/ç oranı, CMC ve LK ilavesinden kaynaklı kıvam sorunu yaşanmaması için 0.50'de sabit tutulmuştur.

5.2.2.3. Yöntem III

Bu yöntemde karışımlarda hedeflenen hacim 1 dm^3 olacak şekilde tasarım yapılmıştır. Farklı K dozajlarının etkilerini görebilmek ve optimum değerleri

yakalayabilmek için 3 farklı karışım tasarımı yapılmıştır (Çizelge 5.12). Karışım hesaplarında LK (KAÇ kütlesinin % 0.1'i) oranları sabit tutulmuştur.

Çizelge 5.12. Yöntem III'e göre hazırlanan karışım tasarımları

K Dozajı (kg/m³): 70-60-50 [k/ç: 0.54-0.31-0.19]						
Bileşenler	K1	%	K2	%	K3	%
	Miktar (g)					
KAÇ	130		195		260	
K	70		60		50	
LK	0.130	0.1	0.195	0.1	0.260	0.1
Su	52		76		100	
İlave Su	308		284		260	
s/ç	0.40		0.40		0.40	
k/ç	0.54		0.31		0.19	
% LK	$M_{LK} * 100 / M_{KAÇ}$					
İlave Su: Karışım suyu haricinde, köpüğün kıvama etkisi gözetilerek karışıma eklenen su miktarı k/ç: Köpük/çimento						

Tüm deneyler için tasarlanan K serilerinin s/ç oranı, K ve LK ilavesinden kaynaklı kıvam sorunu yaşanmaması için 0.40'ta sabit tutulmuştur. K miktarına bağlı olarak hacimleri sabit tutabilmek ve işlenebilirlik için yeterli kıvamı sağlamak amacıyla, karışımlara ilave su olarak belirtilen su miktarları eklenmiştir. Burada tüm karışımlarda kıvam suyu + ilave su miktarları sabit (360 g) tutulmuştur.

5.2.3. Taze beton özellikleri

Taze beton numuneleri üzerinde yapılacak deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında optimum üretim yöntemleri belirlenmiştir.

5.2.3.1. Priz süresi

Priz başlangıç ve sonu sürelerinin belirlenmesi için TS EN 196-3 standardında tarif edilen deney yöntemi kullanılmıştır.

s/ç oranı 0.50 olacak şekilde 0.001 g hassasiyetli bir terazide tartılan 325 g KAÇ bir kaba alınmıştır. 162.5 g su, KAÇ kütlesinin % 0.1'i kadar LK ve KAÇ kütlesinin %

0.01'i kadar CMC ilave edilerek (kütlice sabit LK ve minimum CMC oranları) bu karışımlardan üçer adet hazırlanıp karıştırılmıştır. Hamurların karıştırılmasına tüm bileşenler eklenir eklenmez 3 dakika devam edilmiştir. Sonraki süreçte en çok 1 dakika içerisinde hamurlar Vicat kalıplarına standarda uygun olarak yerleştirilmiştir.

Vicat kalıpları içine yerleştirilen hamurların yüzeyleri düzeltilmiştir. Vicat iğnesi ucu, Vicat kalıbının tam ortasında hamur üst yüzeyine dokunacak kadar indirilip serbest bırakılmıştır. Kendi ağırlığı ile hamurun içine batan iğnenin batma miktarı Vicat cihazı üzerinden okunarak değerler kaydedilmiştir.

Priz sürelerinin tayini için her 5 dakikada işlem tekrarlanmıştır. Hamurun içine batırılan iğne seramik levhaya 3-5 mm uzaklıkta kaldığı an priz başlamış olarak kabul edilir. Çimentonun suyla karıştırıldığı andan prizin başladığı ana kadar geçen zaman priz başlangıç süresini verir.

Priz sonu süresinin tayini için prizin başlamasından sonra da iğne her 5 dakikada bir batırılmaya devam edilmiştir. İğnenin, hamura en çok 1 mm girebildiği an ise priz sona ermiş olarak kabul edilir.

Bu 3 numune için yapılan bu deneyde elde edilen değerler ışığında ortalama priz başlangıç ve priz sonu süreleri tayin edilmiştir (Şekil 5.7).



Şekil 5.7. Vicat testi uygulanmış 3 numune

5.2.3.2. Taze birim hacim ağırlık

Araştırmada Yöntem III'e göre üretilen köpük beton harçlarının taze birim hacim ağırlığının (ρ_m) tayini TS EN 1015-6 standardına uygun bir şekilde belirlenmiştir. Ölçümler 0.001 g hassasiyetli terazi ile yapılmıştır.

Deney sonucu ortaya çıkan değerler taze köpük betonun boşluklu birim hacim ağırlığı olarak kaydedilmiştir.

Genleştirme ajanlarıyla (Yöntem I ve II ile) üretilen taze beton harçları dereceli silindir kabın içerisinde genleşme işlemleri sona erip ulaştıkları hacimlerin kaydedilmesiyle eş zamanlı tartıldıktan sonra birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir.

5.2.3.3. Genleşme oranı

Numunelerin hacimsel genleşme oranlarının tayini Yöntem I ve II'deki karışımlar için belirlenmiştir. Genleşmeden önceki ilk hacimlerin belirlenmesi için genleştirme ajanları olmaksızın diğer bileşenler karıştırılmıştır. Sonrasında dereceli silindire dökülüp hacim değeri belirlenmiştir. İşlem 3 kez tekrarlanıp belirlenen değerlerin aritmetik ortalamaları alınmış ve ilk hacim olarak kaydedilmiştir. Bu işlem belirtilen yöntemlerdeki her karışım için uygulanmıştır (Şekil 5.8).



Şekil 5.8. Genleşme oranı tayini

Genleştirme ajanlarının ilavesi sonucu taze halde genişleyen beton harçları döküm işleminden 30 dakika sonrasında genişleme işleminin sona ermesiyle son hacimleri kaydedilmiştir. Numunelerin son hacimlerini ilk hacimlerine oranlayarak hacimsel genişleme oranları aşağıdaki eşitlik ile elde edilmiştir.

$$e = V_{\text{son}}/V_{\text{ilk}} \quad (5.1)$$

Burada;

e: Genleşme oranı,

V_{son} : Son hacim, cm^3 ,

V_{ilk} : İlk hacim, cm^3 .

5.2.4. Sertleşmiş betonun özellikleri

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde yapılacak deneyler sonucunda elde edilen veriler ışığında optimum üretim yöntemleri belirlenmiştir.

5.2.4.1. Kuru birim hacim ağırlık

Harç numunelerinin 28 ve 45 günlük kuru birim hacim ağırlıklarını belirlemek için TS EN 1015-10 standardına uygun olarak numuneler sabit kütleye ulaşmaya kadar hava dolaşımı etüvde 70 ± 3 °C'de kurutulmuştur (Şekil 5.9). Ardışık iki saat süreyle yapılan tartım işlemlerinde kütlece % 0.2 oranından daha az fark oluştuğunda numunelerin kuru duruma ulaştığı kabul edilmiştir. Sonrasında 0.001 g hassasiyetli elektronik terazi ile her bir numunenin kütlesi ölçülmüş ve kaydedilmiştir.



Şekil 5.9. Hava dolaşımı etüvde kurutulan numuneler

Her bir numunenin eni (w), boyu (L) ve yüksekliği (h) 0.01 mm hassasiyetli elektronik kumpasla boyutları ölçülmüştür (Şekil 5.10). Numunelerin kuru birim hacim ağırlıkları aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$D_{\text{kuru}} = \frac{M_{\text{kuru}}}{V_{\text{son}}} \quad (5.2)$$

Burada;

D_{kuru} : Kuru birim hacim ağırlık, kg/m^3 ,

M_{kuru} : Kuru kütle, g,

V_{son} : Son hacim, cm^3 .



Şekil 5.10. Boyut ölçümlerinde kullanılan 0.01 mm hassasiyetli elektronik kumpas

3'lü prizma grupları için hesaplanan değerlerin aritmetik ortalaması, o karışım serisine ait kuru birim hacim ağırlık değeri olarak kaydedilmiştir.

5.2.4.2. Eğilme ve basınç dayanımları

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde eğilme (3 noktadan yükleme) ve basınç dayanımları deneyleri TS EN 1015-11 standardına uygun olarak yürütülmüştür. Boyutları belirlenmiş prizma numune grupları kullanılarak 28 ve 45 günlük dayanım deneyleri yapılmıştır. İlk olarak, prizma numunelere eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Her karışım serisinin eğilme dayanımı, 3'lü numune grubuna ait aritmetik ortalamasıdır. Eğilme yükü numunelerin üst yüzeyinin orta noktasından uygulanmış ve yüklemeye numune kırılıncaya kadar devam edilmiştir. Yükleme hızı 30 N/s olarak belirlenmiştir.

Numunelerin eğilmede dayanımları aşağıda verilen eşitlik kullanılarak hesaplanmıştır (Şekil 5.11).

$$f_{cf} = 1.5 \times \frac{F_{cf} \times L_d}{b \times d^2} \quad (5.3)$$

Burada;

f_{cf} : Eğilme dayanımı, MPa,

F_{cf} : Eğilme yükü, N,

L_d : Mesnet silindirleri arasındaki açıklık, mm,

b: En kesit genişliği, mm,

d: En kesit yüksekliği, mm.



Şekil 5.11. Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı deneyi sonrası numunelerden elde edilen ikili parçalar üzerinde basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır (Şekil 5.12). Yükleme hızı TS EN 1015-11 Standardına uygun olarak 250 N/s olarak belirlenmiştir. Numunelerin 28 ve 45 günlük basınç dayanımları aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

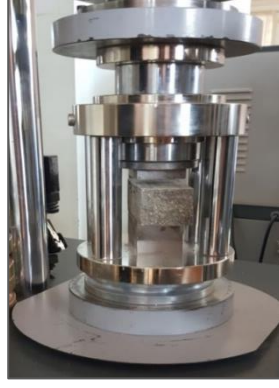
$$f_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (5.4)$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, MPa,

F_c : Basınç yükü, N,

A_c : En kesit alanı, mm².



Şekil 5.12. Basınç dayanımı deneyi

5.2.4.3. Isıl iletkenlik katsayısı

Beton üretim yöntemlerinden karışım tasarımları içerisinde üretildiği koşullara göre optimum değerlerin elde edildiği karışımların $\phi 70 \times 83$ mm boyutlarındaki silindirik kalıplardan çıkan 45 günlük numunelerinden $\phi 60 \times 20$ mm boyutlarında silindirik kesitler alınmıştır. Bu kesitler üzerinde TS EN 12667 standardına uygun olarak ısı iletkenlik katsayısı ölçümleri Isı Akısı Ölçümü yöntemine göre ölçüm yapan LaserComp Fox 50 ısı iletkenlik test cihazı ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 5.13). Isıl iletkenlik ölçümleri öncesinde numuneler hava dolaşımli etüvde $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 'de değişmez kütleye ulaşana kadar kurutulmuştur. Test cihazının sıcak ve soğuk plakaları arasında sıcaklık farkı (ΔT), $10 \text{ }^\circ\text{K}$ olarak ayarlanmıştır.



Şekil 5.13. LaserComp Fox 50 ısı iletkenlik katsayısı ölçüm cihazı

5.2.4.4. Boşluk yapısı ve özellikleri

Beton üretim yöntemlerinden karışım tasarımları içerisinde üretildiği koşullara göre optimum değerlerin elde edildiği numuneler seçilip boşluk yapıları ve özellikleri konusunda bilgi edinebilmek için Süleyman Demirel Üniversitesi Yenilikçi Teknolojiler Uygulama ve Araştırma Merkezi (SDÜ YETEM)'nde SEM ile farklı büyütme oranlarında görüntüleri incelenmiştir.

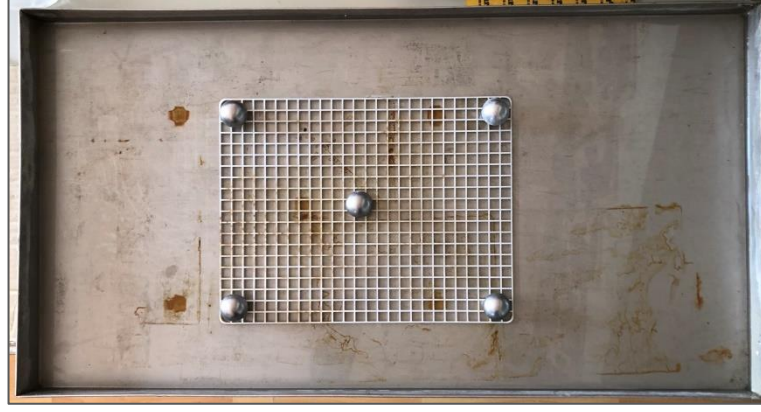
5.2.4.5. Kılcal su emme

Üretim yöntemleri içerisinde hedeflenen fiziksel ve mekanik değerleri sağlayan numuneler belirlenmiştir. 28 günlük kür süresini tamamlamış olan ve KAÇ içeren hafif beton prizma numuneleri ile Çizelge 5.13'te karışım tasarımı verilen PÇ'li köpük beton (PK1) prizma numuneleri 3'lü prizma numune gruplarından birer adedi (toplamda 4 adet) üzerinde TS EN 1015-18 standardına uygun olarak kılcal su emme deneyleri yürütülmüştür. Su terazisi ile dengelenip içerisine plastik ızgara yerleştirilmiş ve yaklaşık 5 mm kalınlıkta su bulunduran metal tepsi deney için hazırlanmıştır (Şekil 5.14). Prizma numuneler bu ızgaralar üzerine tepsiye dik olacak bir şekilde yerleştirilmiştir.

Çizelge 5.13. PK1 karışım tasarımı

Bileşenler	PK1	%
	Miktar (g)	
PÇ	130	
K	70	
LK	0.130	0.1
Su	52	
İlave Su	308	
s/ç	0.40	
k/ç	0.54	
%LK	$M_{LK} * 100/M_{PÇ}$	

M_{PÇ}: PÇ kütlesi



Şekil 5.14. Kılcal su emme deneyi için kullanılan metal tepsi

Su ile temas halindeki numunelerin kütleleri 10. ve 90. dakikaların sonunda ölçülmüştür. Numunelerin kılcal su emme katsayıları aşağıda verilen eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır.

$$c = \frac{(M_2 - M_1)}{\sqrt{90}} \quad (5.5)$$

Burada;

c: Kılcal su emme katsayısı, $\text{kg/m}^2\text{dak}^{0,5}$,

M_1 : 10 dakikalık kütle, g,

M_2 : 90 dakikalık kütle, g.

4 numuneye ait kılcal su emme katsayılarının aritmetik ortalaması, ilgili optimum özellikleri sağlayan numune grubunun kılcal su emme katsayısı olarak kaydedilmiştir.

5.2.4.6. Yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybı

Optimum özelliklere sahip 28 günlük kür süresini tamamlamış olan ve KAÇ içeren hafif beton prizma numuneleri ile PÇ içeren köpük beton (PK1) prizma numuneleri oda sıcaklığında (20 °C) ve ayrıca kül fırını içerisinde farklı sıcaklıklarda (250, 500 ve 750 °C) 30 dakika bekletilmiştir. Sonrasında eğilme ve basınç dayanımları deneyleri TS EN 1015-11 standardına uygun olarak yürütülmüştür (Şekil 5.15).



Şekil 5.15. Kül fırını

6. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

6.1. Taze Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi

6.1.1. Priz süresi

KAÇ içeren harçların HP ile geliştirilmesi ya da K ilavesiyle hacim kazandırılması sonucunda özellikle CMC kullanımına bağlı priz süreleri uzadığında, bir süre sonra çökme ya da hacim kayıpları oluşmaktadır. Priz hızlandırıcı katkının (LK) gereğinden yüksek miktarda kullanımı ise genişmeyi bastırabilmekte ve ayrıca işlenebilirlik (karıştırma ve kalıba yerleştirme) zorlaşabilmektedir. Bu nedenle optimum LK ve CMC oranlarına yönelik karışımlar hazırlanmış ve genişme ya da hacim kaybı etkileri gözlemlenerek optimum LK ve CMC oranları belirlenmiştir. Yöntem I ve II'ye göre üretilen harçlarda sabit oranlarda priz hızlandırıcı olarak LK ve kıvam artırıcı olarak CMC'nin etkisini gözlemlemek amacıyla Vicat deneyi yapılmıştır. 0.50 s/ç oranında çimento kütlelerinin % 0.1 oranında LK ve % 0.01 oranında CMC kullanılan KAÇ harçlarında priz başlama ve priz sonu süreleri sırasıyla ortalama 30 ve 45 dak olarak belirlenmiştir. Priz süresi tayini bulguları Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6.1. Vicat deneyi bulguları

Süre (dak)	1.Ölçüm (mm)	2.Ölçüm (mm)	3.Ölçüm (mm)
5	0	0	0
10	0	0	0
15	0	0	0
20	0	0	0
25	0	0	1
30	5	8	11
35	25	27	31
40	31	35	34
45	40	40	40

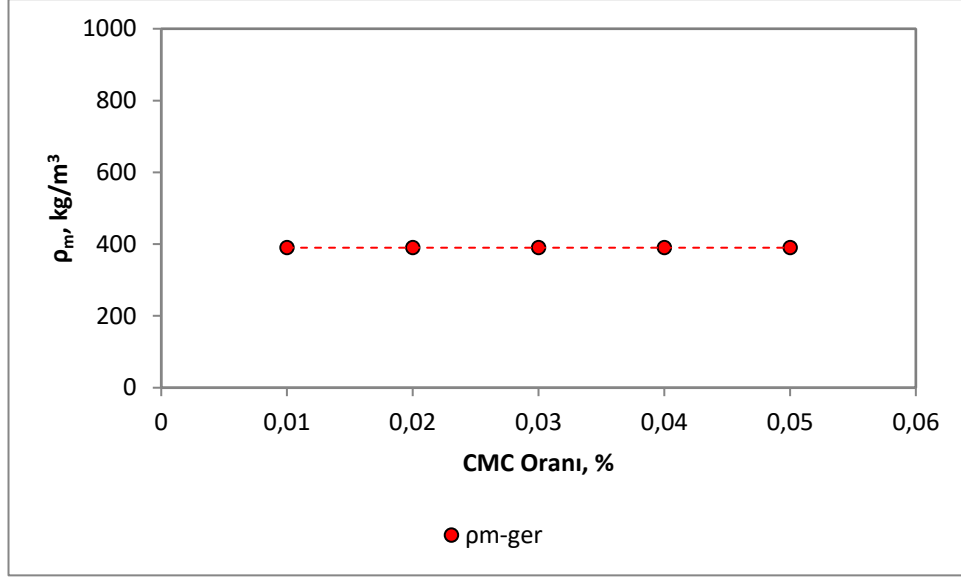
6.1.2. Taze birim hacim ağırlık

Yöntem I'e göre üretilen numunelerin taze birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 6.2. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin ρ_m değerleri

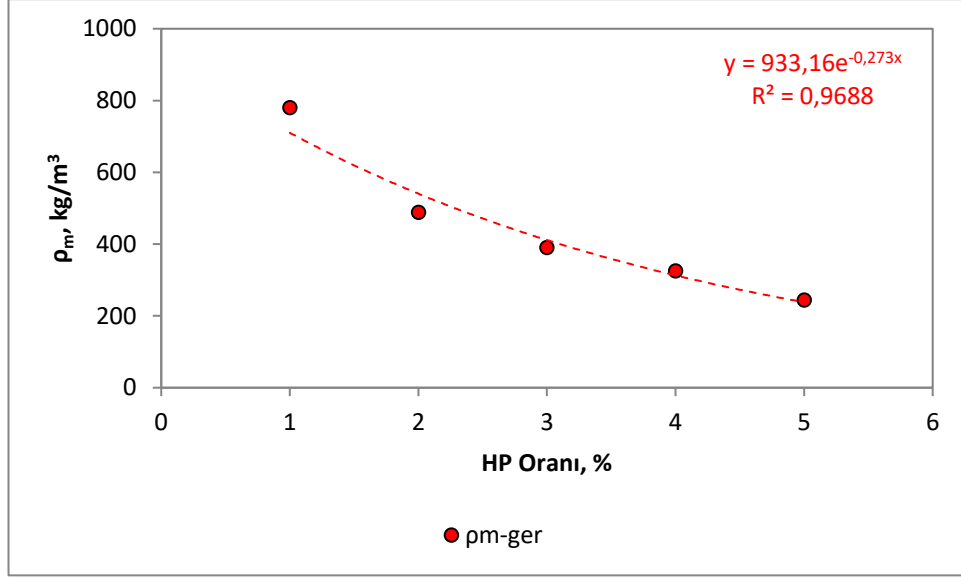
CMC Oranı (%): 0.01-0.02-0.03-0.04-0.05					
	HP1	HP2	HP3	HP4	HP5
V_{son} (cm ³)	250	250	250	250	250
ρ_{m-teo} (kg/m ³)	390	390	390	390	390
ρ_{m-ger} (kg/m ³)	390	390	390	390	390
HP Oranı (%): 1-2-3-4-5					
	HP6	HP7	HP8	HP9	HP10
V_{son} (cm ³)	125	200	250	300	400
ρ_{m-teo} (kg/m ³)	650	488	390	325	279
ρ_{m-ger} (kg/m ³)	780	488	390	325	244
ρ_{m-teo} : Teorik taze birim hacim ağırlık					
ρ_{m-ger} : Gerçek taze birim hacim ağırlık					

Farklı CMC oranlarında hazırlanan karışımların teorik ve gerçek taze birim hacim ağırlık değerlerinin (390 kg/m³) eşit olduğu görülmektedir. Artan CMC oranı taze birim hacim ağırlık değerlerini etkilememiştir (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Sabit HP oranında CMC oranı- ρ_m ilişkisi

İkinci durumda farklı HP oranlarına göre hazırlanan karışımların teorik ve gerçek taze birim hacim ağırlık değerleri karşılaştırılmıştır. % 3 HP oranının 250 cm³ hacim meydana getireceği ve her % 1'lik oran değişiminin 50 cm³'lük hacim değişimine neden olacağı öngörüsüne bağlı olarak ortaya çıkan değerlerin birbirine yakın olduğu ve HP7, HP8 ve HP9 numunelerinde ise teorik ve gerçek taze birim hacim ağırlık değerlerinin aynı olduğu görülmektedir (sırasıyla 488, 390 ve 325 kg/m³). HP6 numunesi maksimum değer olan 780 kg/m³, HP10 numunesi ise minimum değer olan 244 kg/m³ sonucunu vermektedir. Gerçek taze birim hacim ağırlık değerleri bu aralıkta HP oranının artmasıyla ters orantılı bir şekilde azalarak değişmektedir (Şekil 6.2). Her % 1 HP oranındaki artış ortalama olarak 70 cm³'lük genişlemeye sebep olmuştur. HP oranının artışına bağlı olarak numunelerin hacimsel anlamda genişmeleri sonucu taze birim hacim ağırlık değerleri düşmektedir.



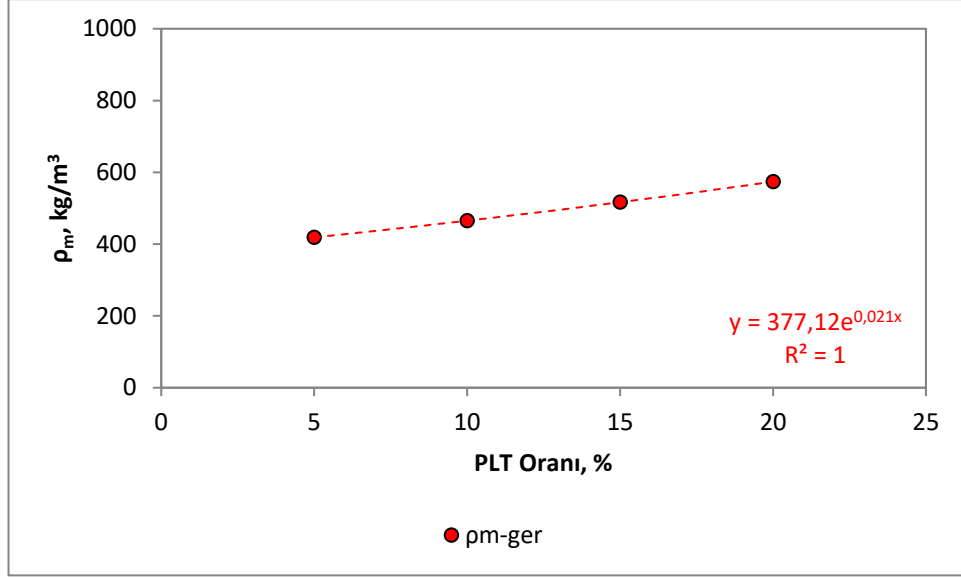
Şekil 6.2. Sabit CMC oranında HP oranı- ρ_m ilişkisi

Yöntem II'ye göre üretilen numunelerin taze birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Çizelge 6.3. Yöntem II'ye göre üretilen numunelerin ρ_m değerleri

PLT Oranı (%): 5-10-15-20				
	PLT1	PLT2	PLT3	PLT4
V_{son} (cm ³)	295	280	265	250
ρ_{m-teo} (kg/m ³)	495	492	489	487
ρ_{m-ger} (kg/m ³)	419	465	517	574

PLT miktarının artışına bağlı olarak numunelerin hacimlerinin 15 cm³ kadar artması dolayısıyla hem teorik hem de gerçek taze birim hacim ağırlık değerlerinin ters orantılı olarak azalması öngörülmüştür. Elde edilen bulgulara göre PLT oranının artmasıyla teorik taze birim hacim ağırlık değerleri azalırken gerçek taze birim hacim ağırlık değerleri ise artma eğilimi göstermiştir. Bu durumda PLT, genleştirme ajanını (HP) gözeneklerine absorbe etmiş ve beklenenin aksine hacim kaybına neden olmuştur. PLT1 numunesi minimum değer olan 419 kg/m³, PLT4 numunesi ise maksimum değer olan 574 kg/m³ sonucunu vermiştir. Gerçek taze birim hacim ağırlık değerleri bu aralıkta PLT oranının artmasıyla doğru orantılı bir şekilde artarak değişmiştir (Şekil 6.3).



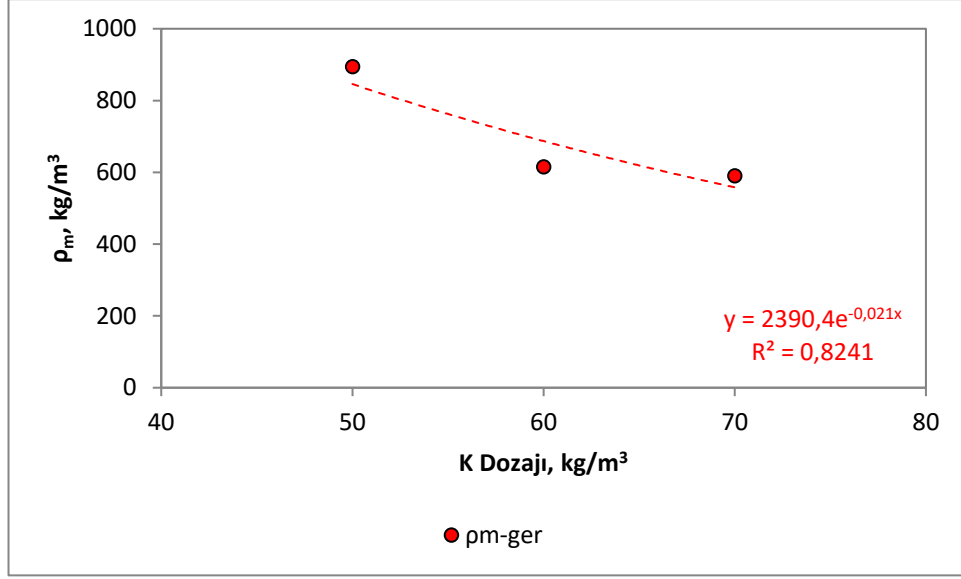
Şekil 6.3. PLT oranı- ρ_m ilişkisi

Yöntem III'e göre üretilen numunelerin taze birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6.4. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin taze birim hacim ağırlık değerleri

K Dozajı (kg/m³): 70-60-50 [k/ç: 0.54-0.31-0.19]			
	K1	K2	K3
V_{son} (cm ³)	950	1000	750
ρ_{m-teo} (kg/m ³)	560	620	680
ρ_{m-ger} (kg/m ³)	590	620	907

Köpük ajanı kullanılarak üretilen köpük beton numunelerinin teorik ve gerçek taze birim hacim ağırlık değerleri incelendiğinde K1 ve K2 numunelerinde örtüşürken K3 numunesinde gerçek taze birim hacim ağırlık değerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. K3 numunesinin gerçek taze birim hacim ağırlık değerinde gözlemlenen bu artış, artan çimento dozajına bağlı olarak hidrasyon ısısının yükselmesiyle K veriminin olumsuz etkilenmesi ve önemli oranda hacim kaybı meydana gelmesiyle açıklanabilmektedir. K1 numunesi minimum değer olan 590 kg/m³, K3 numunesi ise maksimum değer olan 907 kg/m³ sonucunu vermiştir. Gerçek taze birim hacim ağırlık değerleri bu aralıkta K dozajının azalmasıyla ters orantılı bir şekilde artarak değişmiştir (Şekil 6.4).



Şekil 6.4. K dozajı- ρ_m ilişkisi

6.1.3. Genleşme oranı

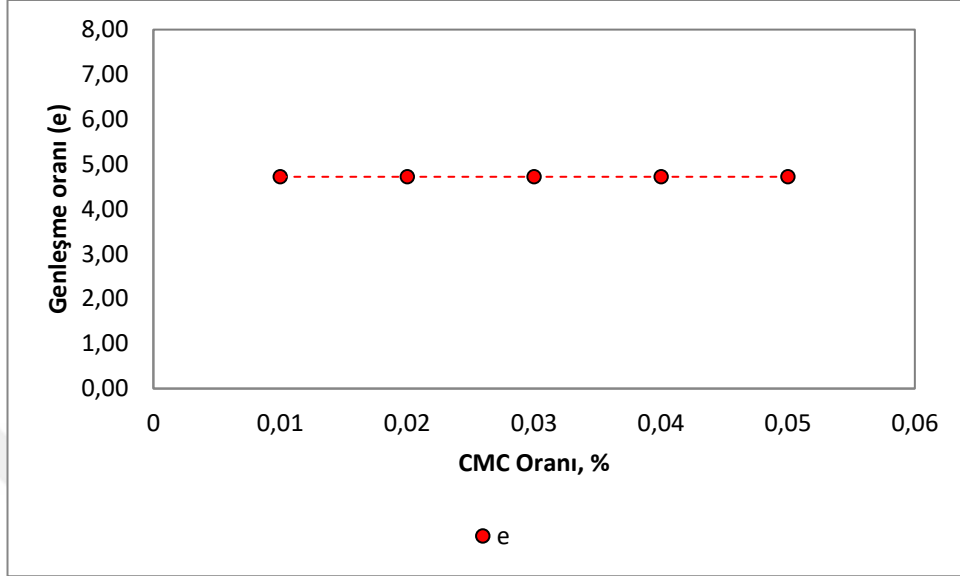
Yöntem I'e göre üretilen numunelerin genleşme oranı değerleri Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 6.5. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin e değerleri

CMC Oranı (%): 0.01-0.02-0.03-0.04-0.05					
	HP1	HP2	HP3	HP4	HP5
V _{ilk} (cm ³)	53	53	53	53	53
V _{son} (cm ³)	250	250	250	250	250
e	4.72	4.72	4.72	4.72	4.72
HP Oranı (%): 1-2-3-4-5					
	HP6	HP7	HP8	HP9	HP10
V _{ilk} (cm ³)	53	53	53	53	53
V _{son} (cm ³)	125	200	250	300	400
e	2.36	3.77	4.72	5.66	7.55

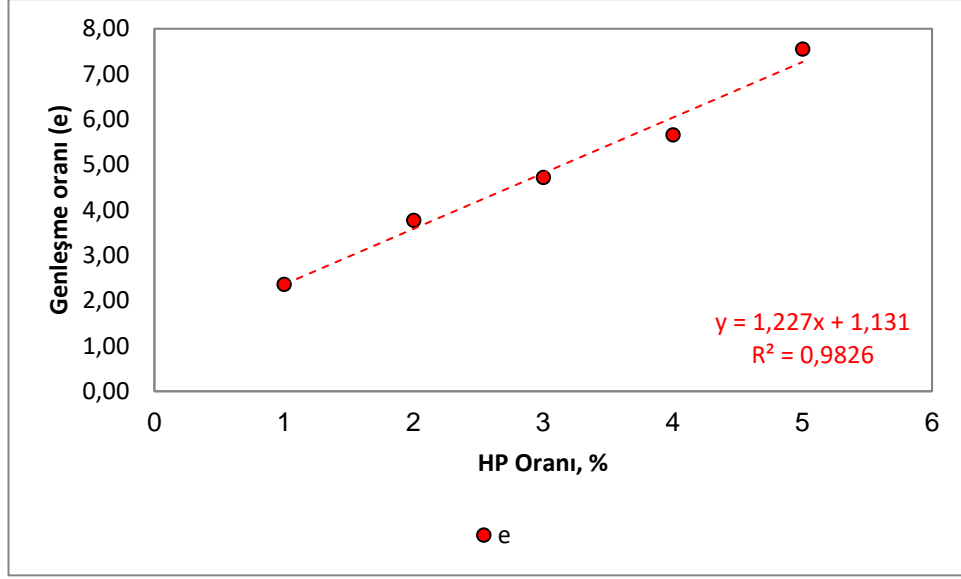
CMC oranlarının genleşmeye etkisi incelendiğinde, % 0.01-0.05 arasındaki CMC oranı değişimlerinin önemli bir etkisinin olmadığı ve tüm numunelerde (HP1, HP2, HP3, HP4 ve HP5) genleşme oranının sabit (4.72) kaldığı belirlenmiştir. CMC karışıma kıvam vermekle ve genleşmeye katkı sunmakla beraber, orandaki küçük artışlar anlamlı hacimsel bir artışa neden olmamaktadır. Bununla birlikte yüksek oranda CMC kullanımının KAÇ hidrasyonunu olumsuz yönde etkilemesi

ve hatta durdurması nedeniyle daha yüksek oranların genişmeye etkisi incelenememiş, çalışma kapsamında en yüksek CMC oranı % 0.05 olarak sınırlandırılmıştır (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. Sabit HP oranında CMC oranı-genleşme oranı ilişkisi

Yöntem I kapsamında CMC oranlarından başka, diğer bileşen oranları sabit tutularak HP oranlarındaki artışın genişmeye etkisi de araştırılmıştır. Yapılan analizlerde HP oranı ve genleşme oranı arasında lineer bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 numunelerinde sırasıyla kütlece % 1, 2, 3, 4 ve 5 HP kullanılmış olup genleşme oranı değerleri sırasıyla 2.36, 3.77, 4.72, 5.66 ve 7.55 olarak hesaplanmıştır. Buradan çimento kütlelerinin % 5 oranında HP kullanımının hacmi 7.5 kat kadar artırdığı sonucuna varılmıştır (Şekil 6.6).



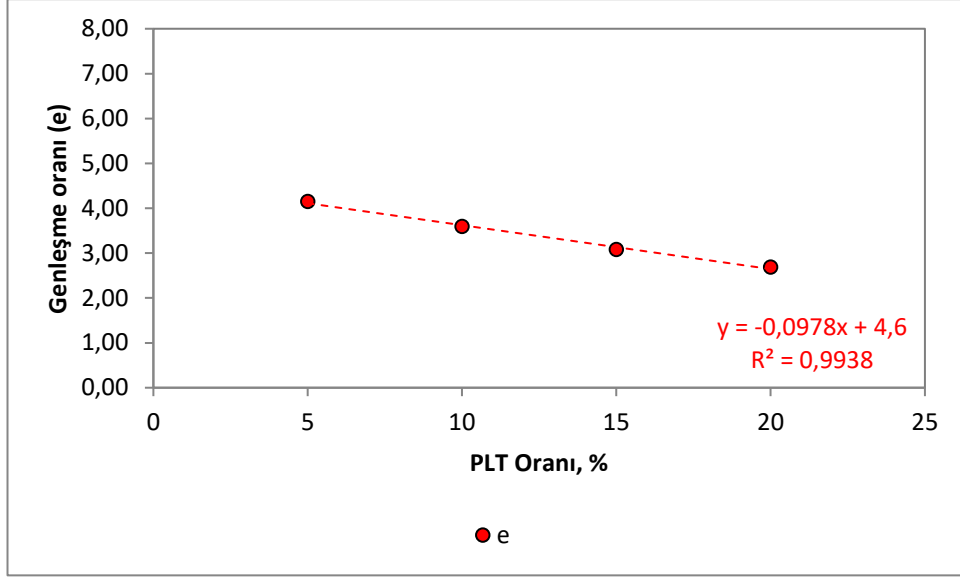
Şekil 6.6. Sabit CMC oranında HP oranı-genleşme oranı ilişkisi

Yöntem II'ye göre üretilen numunelerin genleşme oranı değerleri Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6.6. Yöntem II'ye göre üretilen numunelerin e değerleri

PLT Oranı (%): 5 -10-15-20				
	PLT1	PLT2	PLT3	PLT4
V_{ilk} (cm ³)	71	78	86	93
V_{son} (cm ³)	295	280	265	250
e	4.15	3.59	3.08	2.69

Burada Yöntem II kapsamında HP oranı sabit tutularak (% 2) farklı oranlarda PLT, çimentoya ikame edilerek kullanılmıştır. PLT1, PLT2, PLT3 ve PLT4'te oranlar sırasıyla çimento kütlelerinin % 5, 10, 15 ve 20'si oranında iken karışımlardan aynı oranda çimento eksiltiştir. Karışımların genleşme öncesi ilk hacimlerinde (V_{ilk}) lineer bir artış söz konusu iken nihai hacimlerinde (V_{son}) ise lineer bir azalma meydana gelmiştir. Bu duruma bağlı olarak PLT1, PLT2, PLT3 ve PLT4 numunelerinin genleşme oranı değerlerinde lineer bir azalma olmuştur (sırasıyla 4.15, 3.59, 3.08 ve 2.69). Bu sonuçlar, sadece genleşme ve buna bağlı taze birim hacim ağırlık açısından değerlendirildiğinde HP ile birlikte PLT kullanımının olumsuz bir etki yarattığını ortaya koymuştur (Şekil 6.7).



Şekil 6.7. PLT oranı-genleşme oranı ilişkisi

6.2. Sertleşmiş Beton Özelliklerinin Değerlendirilmesi

6.2.1. Kuru birim hacim ağırlık

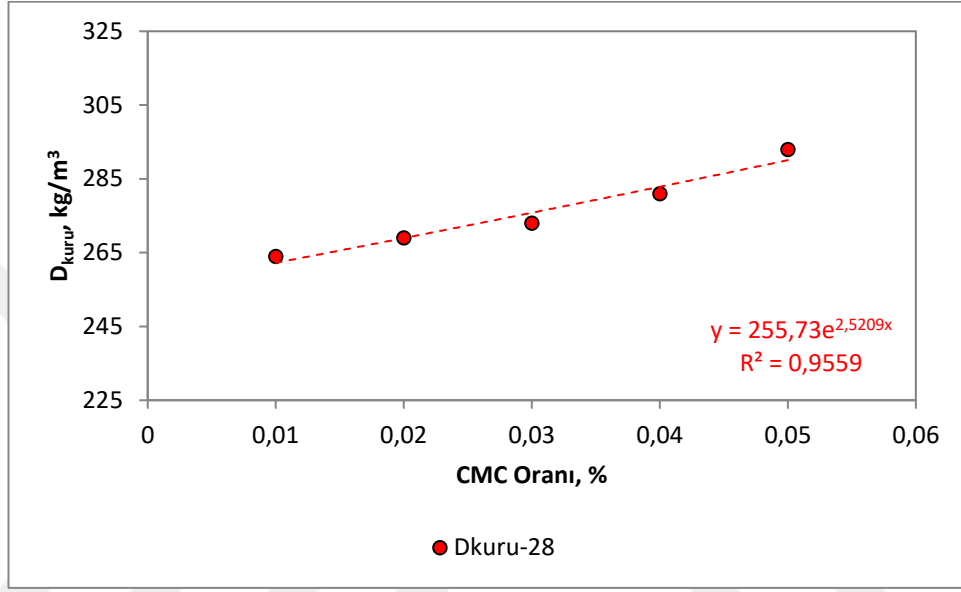
28 ve 45 günlük kür sürelerini tamamlayan hafif beton numuneleri TS EN 1015-10 standardına uygun olarak 70 ± 3 °C’de değişmez kütleye kadar hava dolaşımli etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numunelerin boyutları 0.01 mm hassasiyetli elektronik kumpasla ölçülüp 0.001 g hassasiyetli elektronik terazide kütleleri tartılmıştır. Daha sonra numunelerin hacimleri ve gerçek kuru birim hacim ağırlık hesaplanmıştır.

Yöntem I’e göre üretilen ve 28 günlük kür süresini tamamlayan numunelerin gerçek kuru birim hacim ağırlık ($D_{kuru-28}$) değerleri Çizelge 6.7’de verilmiştir.

Çizelge 6.7. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-28}$ değerleri

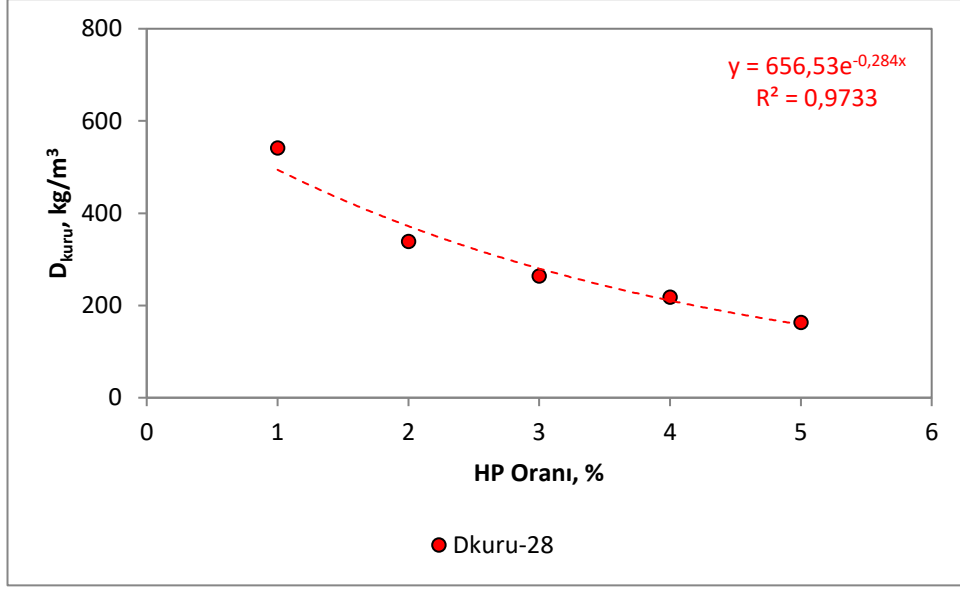
CMC Oranı (%): 0.01-0.02-0.03-0.04-0.05								
Teorik $D_{kuru-28}$ (kg/m^3) = 260								
Seri No	Numune No	w (mm)	L (mm)	h (mm)	V_{son} (cm^3)	$M_{kuru-28}$ (g)	$D_{kuru-28}$ (kg/m^3)	Ort. $D_{kuru-28}$ (kg/m^3)
HP1	1	39.44	159.92	39.92	251.79	66.185	263	264
	2	39.45	159.87	39.94	251.90	66.907	266	
	3	39.41	159.91	39.85	251.14	66.044	263	
HP2	1	39.46	159.11	39.95	250.83	67.667	270	269
	2	39.46	159.20	39.98	251.16	67.581	269	
	3	39.31	159.31	39.99	250.44	67.496	270	
HP3	1	39.06	159.25	39.95	248.50	68.709	276	273
	2	39.45	159.41	39.96	251.30	68.115	271	
	3	39.42	159.25	39.92	250.60	68.096	272	
HP4	1	39.48	159.94	39.92	252.07	70.951	281	281
	2	39.42	159.95	39.98	252.08	70.352	279	
	3	39.20	159.96	39.90	250.19	70.419	281	
HP5	1	39.45	159.27	39.91	250.76	73.201	292	293
	2	39.18	159.09	39.98	249.20	73.225	294	
	3	39.44	159.18	39.97	250.93	73.282	292	
HP Oranı (%): 1-2-3-4-5								
Teorik $D_{kuru-28}$ (kg/m^3) = 260								
HP6	1	20.06	159.51	39.97	127.89	69.046	540	541
	2	20.03	159.65	39.95	127.75	69.063	541	
	3	20.02	159.63	39.80	127.19	69.013	543	
HP7	1	31.45	159.68	39.94	200.58	68.013	339	339
	2	31.46	159.88	39.90	200.69	68.079	339	
	3	31.45	159.83	39.96	200.87	68.050	339	
HP8	1	39.44	159.92	39.92	251.79	66.185	263	264
	2	39.45	159.87	39.94	251.90	66.907	266	
	3	39.41	159.91	39.85	251.14	66.044	263	
HP9	1	39.48	158.97	39.96	250.79	54.597	218	218
	2	39.33	159.10	39.91	249.73	54.630	219	
	3	39.25	159.01	39.97	249.46	54.018	217	
HP10	1	39.21	159.97	39.93	250.46	40.451	162	163
	2	39.09	159.66	39.92	249.15	40.893	164	
	3	39.26	159.78	39.95	250.60	40.640	162	
$M_{kuru-28}$: 28 günlük kuru kütle $D_{kuru-28}$: 28 günlük kuru birim hacim ağırlık Ort.: Ortalama								

Sabit HP oranında (% 3) farklı CMC oranlarına göre hazırlanan numunelerin 28 günlük birim hacim ağırlık bulguları analiz edildiğinde CMC oranı artışına bağlı olarak gerçek kuru birim hacim ağırlık değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. HP1, HP2, HP3, HP4 ve HP5 için CMC oranları ve 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla % 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 ve 264, 269, 273, 281, 293 kg/m³'tür (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Sabit HP oranında CMC oranı-D_{kuru-28} ilişkisi

Sabit CMC oranında (% 0.01) farklı HP oranlarının kuru birim hacim ağırlık değerlerine etkisi de HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 hafif beton numuneleri üzerinde analiz edilmiştir. Analiz bulguları değerlendirildiğinde, karışıma dâhil edilen HP miktarı arttıkça numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerlerinin üstel olarak azaldığı görülmektedir. HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 numunelerinde HP oranı ve 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla % 1, 2, 3, 4, 5 ve 541, 339, 264, 218, 163 kg/m³'tür (Şekil 6.9).



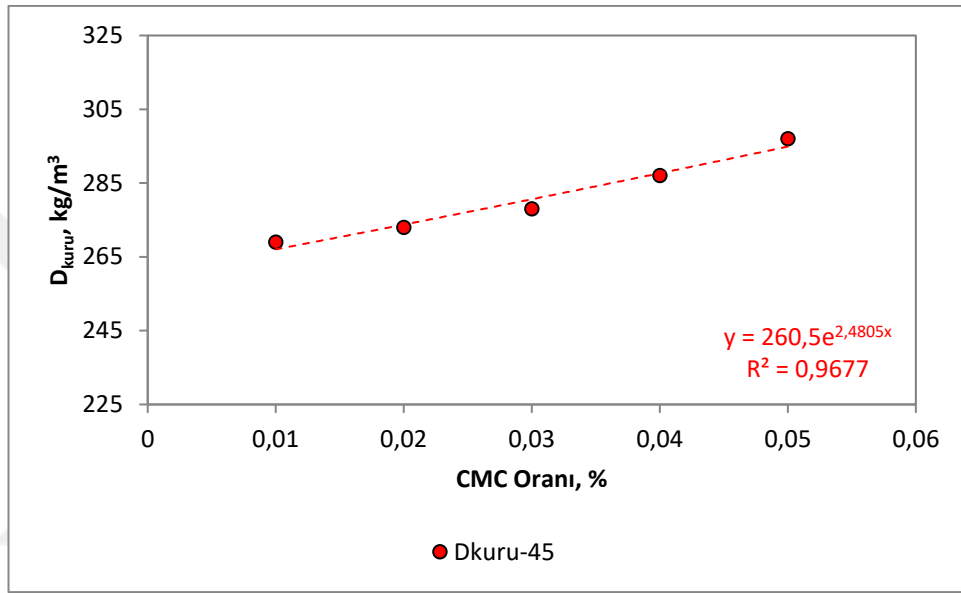
Şekil 6.9. Sabit CMC oranında HP oranı-D_{kuru-28} ilişkisi

Yöntem I'e göre üretilen ve 45 günlük kür süresini tamamlayan numunelerin gerçek kuru birim hacim ağırlık (D_{kuru-45}) değerleri Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 6.8. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-45}$ değerleri

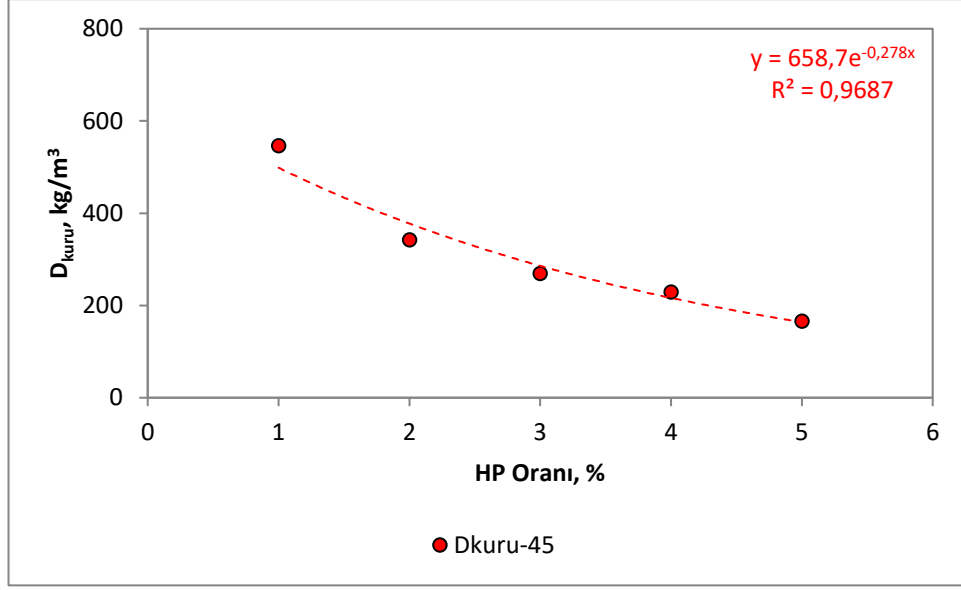
CMC Oranı (%): 0,01-0,02-0,03-0,04-0,05								
Teorik $D_{kuru-45}$ (kg/m^3) = 260								
Seri No	Numune No	w (mm)	L (mm)	h (mm)	V_{son} (cm^3)	$M_{kuru-45}$ (g)	$D_{kuru-45}$ (kg/m^3)	Ort. $D_{kuru-45}$ (kg/m^3)
HP1	1	39.04	159.33	39.13	243.40	66.620	274	269
	2	39.15	159.56	39.98	249.75	66.860	268	
	3	39.08	159.90	39.95	249.64	66.660	267	
HP2	1	39.31	159.99	39.94	251.19	68.500	273	273
	2	39.38	159.98	39.91	251.43	68.930	274	
	3	39.27	159.96	39.91	250.70	68.300	272	
HP3	1	39.31	159.21	39.97	250.15	69.200	277	278
	2	39.45	159.46	39.91	251.06	69.590	277	
	3	39.13	159.84	39.91	249.62	69.610	279	
HP4	1	39.09	159.92	39.98	249.93	71.310	285	287
	2	39.35	159.06	39.99	250.30	71.760	287	
	3	39.04	159.14	39.90	247.89	71.580	289	
HP5	1	39.05	159.99	39.98	249.78	74.940	300	297
	2	39.46	159.40	39.92	251.09	74.080	295	
	3	39.41	159.36	39.95	250.90	74.020	295	
HP Oranı (%): 1-2-3-4-5								
Teorik $D_{kuru-45}$ (kg/m^3) = 260								
HP6	1	20.04	159.93	39.82	127.62	69.560	545	546
	2	20.08	159.98	39.97	128.40	69.730	543	
	3	20.03	159.99	39.75	127.38	69.970	549	
HP7	1	31.20	159.91	39.94	199.27	68.170	342	342
	2	31.44	159.96	39.94	200.86	68.570	341	
	3	31.10	159.98	39.91	198.57	68.240	344	
HP8	1	39.04	159.33	39.13	243.40	66.620	274	269
	2	39.15	159.56	39.98	249.75	66.860	268	
	3	39.08	159.90	39.95	249.64	66.660	267	
HP9	1	39.50	159.27	39.97	251.46	57.180	227	229
	2	39.26	159.07	39.86	248.93	57.640	232	
	3	39.42	159.13	39.89	250.23	57.380	229	
HP10	1	39.22	159.31	39.93	249.49	41.880	168	166
	2	39.44	159.18	39.86	250.24	41.010	164	
	3	39.24	159.98	39.97	250.92	41.970	167	
$M_{kuru-45}$: 45 günlük kuru kütle								
$D_{kuru-45}$: 45 günlük kuru birim hacim ağırlık								

Sabit HP oranında (% 3) farklı CMC oranlarına göre hazırlanan numunelerin 45 günlük kuru birim hacim ağırlık bulguları analiz edilmiştir. CMC oranı artışına bağlı olarak numune kuru birim hacim ağırlık değerlerinin de arttığı belirlenmiştir. HP1, HP2, HP3, HP4 ve HP5 için CMC oranları ve 45 günlük birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla % 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 ve 269, 273, 278, 287, 297 kg/m³ şeklindedir. Bulgular, 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri ile oldukça yakındır (Şekil 6.10).



Şekil 6.10. Sabit HP oranında CMC oranı-D_{kuru-45} ilişkisi

Sabit CMC oranında (% 0.01) farklı HP oranlarının 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerine etkisi de HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 hafif beton numuneleri üzerinde analiz edilmiştir. Analiz bulguları değerlendirildiğinde karışıma dâhil edilen HP miktarı arttıkça numunelerin 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerinin üstel olarak azaldığı görülmektedir. HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 numunelerinde HP oranı ve 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla % 1, 2, 3, 4, 5 ve 546, 342, 269, 229, 166 kg/m³ şeklindedir. Bulgular, 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri ile oldukça yakındır (Şekil 6.11).

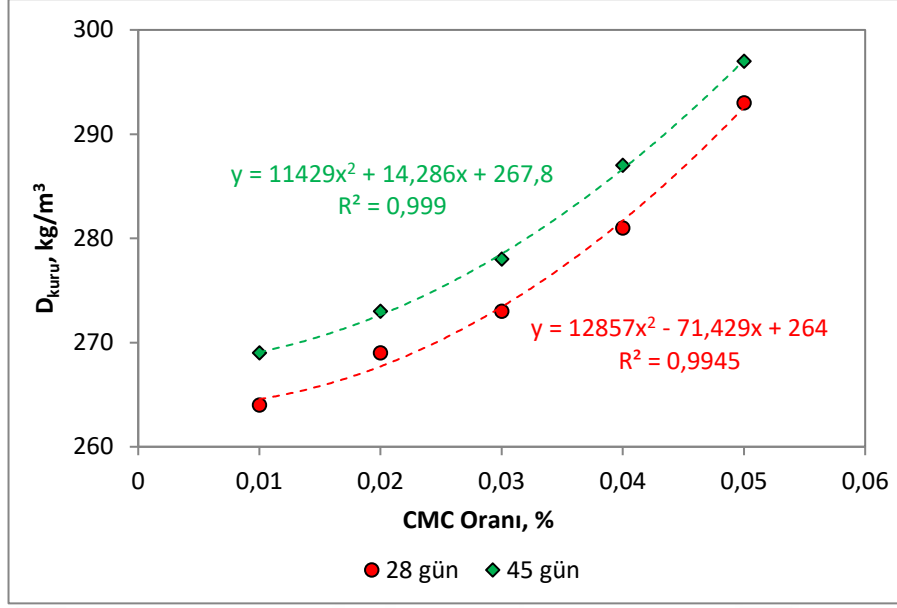


Şekil 6.11. Sabit CMC oranında HP oranı-D_{kuru-45} ilişkisi

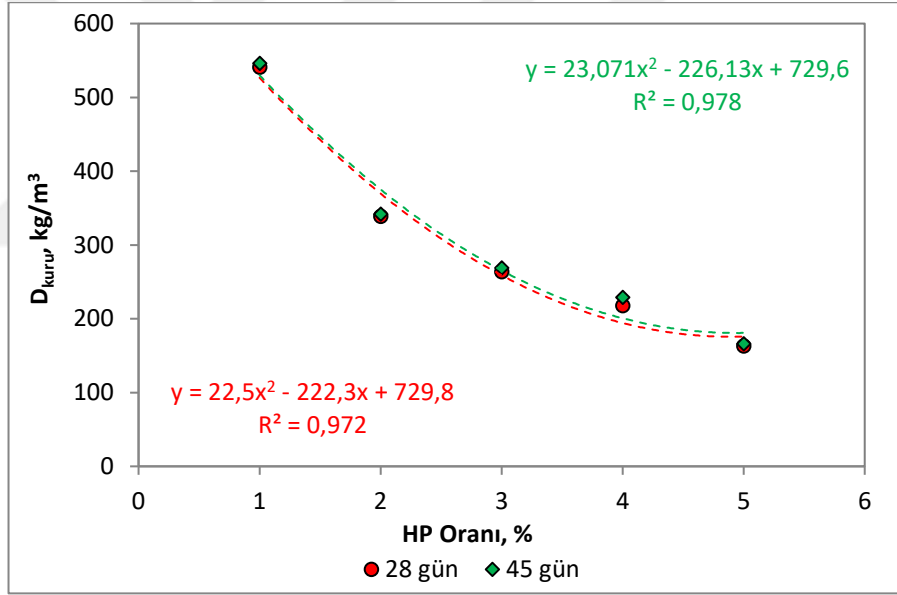
CMC oranının % 0.01'den % 0.05'e artması, 28 ve 45 günlük numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerlerinde % 10 civarında bir artışa neden olmuştur. Bu durum, CMC oranındaki artışa bağlı olarak karışım kıvamı ve kohezyonundaki artışa ve dolayısıyla HP, KI ile reaksiyonu sonucu açığa çıkardığı O₂'nin çimento hamurunu kabartma etkisini kısmen baskılamasına dayandırılmıştır.

HP oranındaki artış ise 28. ve 45. günde numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerlerinin düşmesini sağlamıştır. Karışım bileşiminde her % 1 oranındaki artış ortalama % 25 oranında kuru birim hacim ağırlık değerlerinde azalmaya neden olmakla birlikte bu azalma lineer bir eğilimden daha çok üstel bir azalış biçimindedir.

28 ve 45 gün kür sürelerinde eşdeğer numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri karşılaştırıldığında 45. günde ortalama % 2 oranında bir artış söz konusudur (Şekil 6.12 ve 6.13). Bu artış, 28. günden sonra da iklim kabininde % 90 bağıl nem ortamında numunelerin kürlenmesine devam edilmesi sonucunda çimento ile daha fazla suyun hidrasyon reaksiyonuna katılmasına, hafif betonun olgunluk derecesinin giderek artmasına ve ayrıca hacimsel büzülmenin (özellikle otojen rötre) de gelişmesine bağlı olarak kuru birim hacim ağırlık artışına katkıda bulunmasıyla ilişkilendirilmiştir.



Şekil 6.12. Kür süresine göre CMC oranı- D_{kuru} ilişkisi



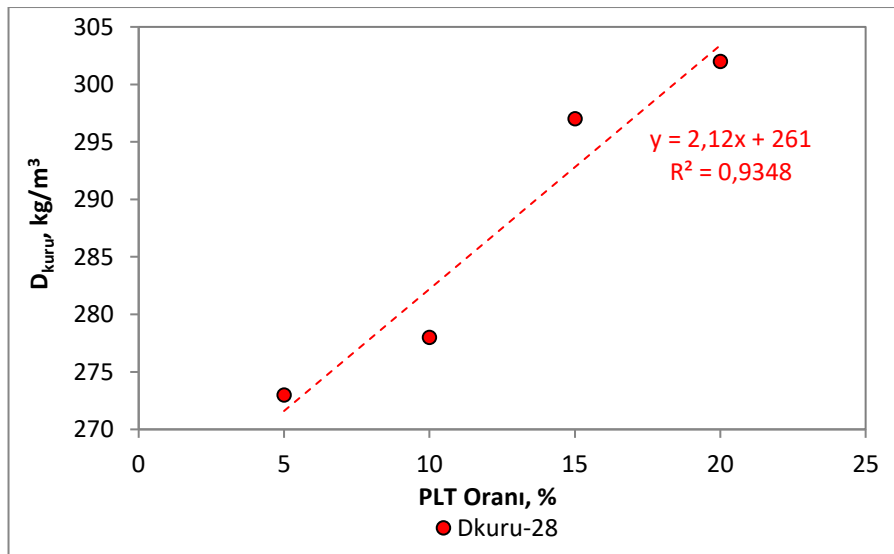
Şekil 6.13. Kür süresine göre HP oranı- D_{kuru} ilişkisi

Yöntem II'e göre üretilen numunelerin 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9. Yöntem II'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-28}$ değerleri

PLT Oranı (%): 5-10-15-20								
Teorik $D_{kuru-28}$ (kg/m^3) = 312								
Seri No	Numune No	w (mm)	L (mm)	h (mm)	V_{son} (cm^3)	$M_{kuru-28}$ (g)	$D_{kuru-28}$ (kg/m^3)	Ort. $D_{kuru-28}$ (kg/m^3)
PLT1	1	39.26	159.52	39.91	249.95	68.190	273	273
	2	39.30	159.86	39.90	250.67	68.040	271	
	3	39.35	159.37	39.80	249.59	68.275	274	
PLT2	1	39.13	159.97	39.97	250.20	69.272	277	278
	2	39.12	159.99	39.95	250.04	69.891	280	
	3	39.11	159.43	39.99	249.35	69.246	278	
PLT3	1	39.43	159.95	39.98	252.15	74.814	297	297
	2	39.26	159.44	39.91	249.82	74.055	296	
	3	39.26	159.96	39.93	250.76	74.741	298	
PLT4	1	39.17	159.83	39.91	249.86	75.410	302	302
	2	39.41	159.65	39.97	251.48	75.812	301	
	3	39.19	159.84	39.97	250.38	75.820	303	

Sabit HP oranında (% 2) farklı PLT oranlarına göre hazırlanan hafif beton numunelerinin 28 günlük kuru birim hacim ağırlık bulguları analiz edilmiştir. PLT oranı artışına bağlı olarak numune kuru birim hacim ağırlık değerlerinin bir miktar arttığı belirlenmiştir. PLT1, PLT2, PLT3 ve PLT4 için PLT oranları ve 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla % 5, 10, 15, 20 ve 273, 278, 297, 302 kg/m^3 şeklindedir (Şekil 6.14).



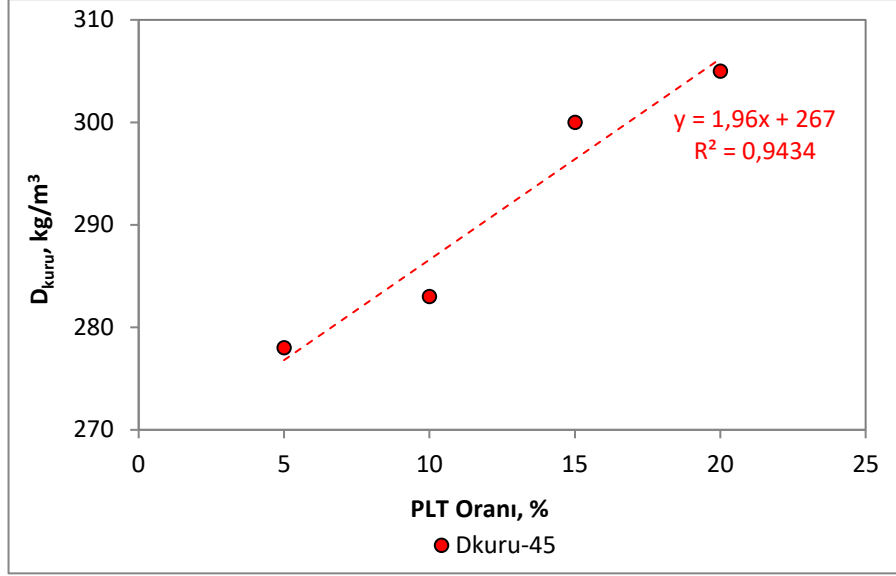
Şekil 6.14. PLT oranı- $D_{kuru-28}$ ilişkisi

Yöntem II'e göre üretilen numunelerin 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.10. Yöntem II'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-45}$ değerleri

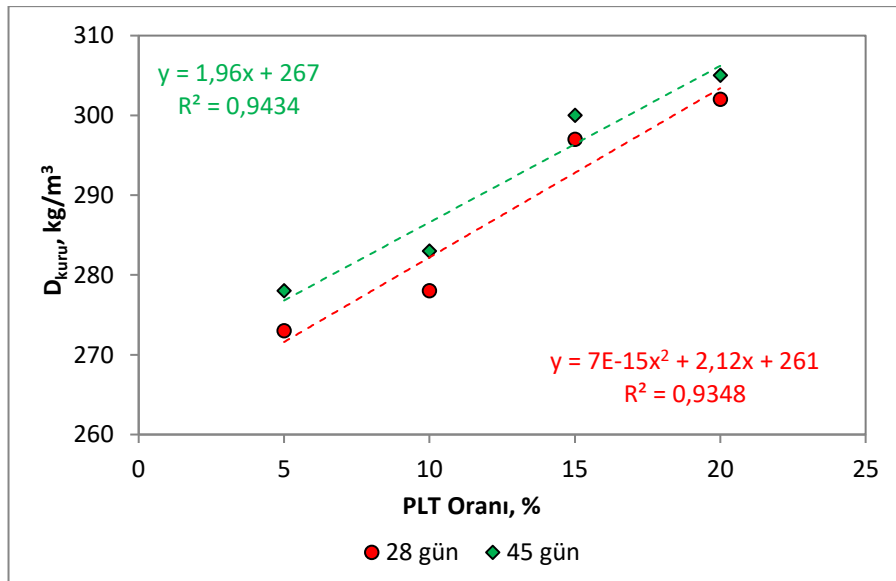
PLT Oranı (%): 5-10-15-20								
Teorik $D_{kuru-45}$ (kg/m^3) = 312								
Seri No	Numune No	w (mm)	L (mm)	h (mm)	V_{son} (cm^3)	$M_{kuru-45}$ (g)	$D_{kuru-45}$ (kg/m^3)	Ort. $D_{kuru-45}$ (kg/m^3)
PLT1	1	39.14	159.51	39.94	249.35	69.140	277	278
	2	39.09	159.51	39.93	248.97	69.110	278	
	3	39.19	159.59	39.97	249.99	69.490	278	
PLT2	1	39.08	159.54	39.95	249.08	70.950	285	283
	2	39.24	159.60	39.94	250.13	70.710	283	
	3	39.27	159.58	39.99	250.61	70.620	282	
PLT3	1	39.03	159.96	39.96	249.48	74.990	301	300
	2	39.16	159.34	39.95	249.28	74.700	300	
	3	39.06	159.51	39.95	248.91	74.560	300	
PLT4	1	39.46	159.65	39.95	251.68	76.420	304	305
	2	39.47	159.62	39.96	251.76	76.000	302	
	3	39.01	159.77	39.98	249.18	76.970	309	

Sabit HP oranında (% 2) farklı PLT oranlarına göre hazırlanan hafif beton numunelerinin 45 günlük kuru birim hacim ağırlık bulguları analiz edilmiştir. PLT oranı artışına bağlı olarak numune kuru birim hacim ağırlık değerlerinin bir miktar arttığı belirlenmiştir. PLT1, PLT2, PLT3 ve PLT4 için PLT oranları ve 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla % 5, 10, 15, 20 ve 278, 283, 300, 305 kg/m^3 şeklindedir (Şekil 6.15).



Şekil 6.15. PLT oranı-D_{kuru-45} ilişkisi

28 günlük numuneler ile karşılaştırıldığında 45 günlük numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri % 1-2 oranında artış göstermiştir (Şekil 6.16). PLT (+2 mm), çimentoya ikame edilerek kullanılmıştır. Bu gruptaki numunelerin tamamında karışıma dâhil olan tüm katı bileşenlerin toplam miktarı eşit olduğu halde PLT miktarı arttıkça numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri de % 10'a varan oranda artış göstermiştir. Bu durum, azalan çimento miktarına bağlı olarak matris hacminin azalması ve dolayısıyla genişleyen matris hacmindeki azalmanın da genişleme oranını bir miktar (% 10 civarında) azaltmasıyla ilişkilendirilmiştir.



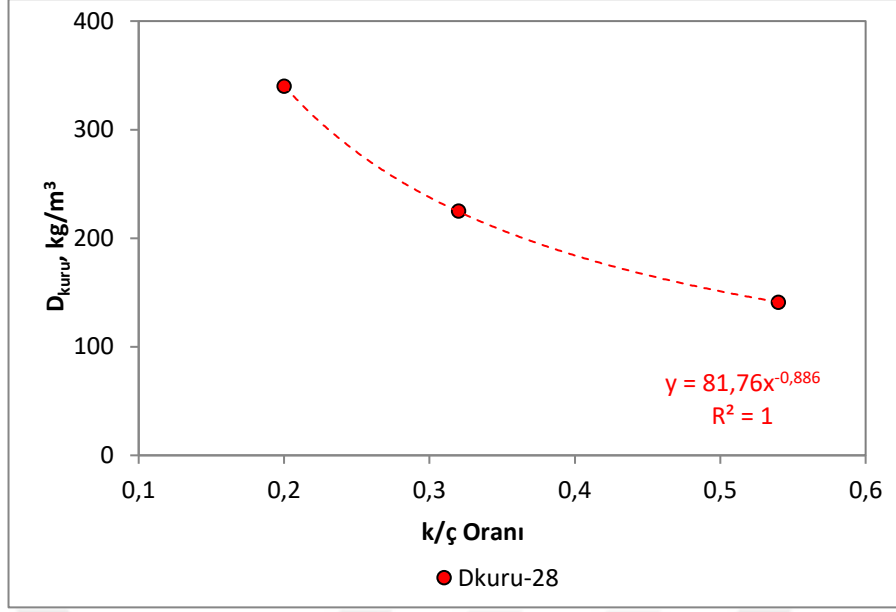
Şekil 6.16. Kür süresine göre PLT oranı-D_{kuru} ilişkisi

Yöntem III'e göre üretilen numunelerin 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 6.11'de verilmiştir.

Çizelge 6.11. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin $D_{kuru-28}$ değerleri

K Dozajı (kg/m³): 70-60-50 [k/ç: 0.54-0.31-0.19]								
Teorik $D_{kuru-28}$ (kg/m³) = K1: 130-K2: 195-K3: 260								
Seri No	Numune No	w (mm)	L (mm)	h (mm)	V_{son} (cm³)	M_{kuru-28} (g)	D_{kuru-28} (kg/m³)	Ort. D_{kuru-28} (kg/m³)
K1	1	39.12	159.20	39.39	245.32	33.910	138	141
	2	39.50	159.05	39.42	247.66	35.540	144	
	3	39.83	159.11	39.96	253.24	35.930	142	
K2	1	39.55	159.04	39.84	250.59	56.430	225	225
	2	39.97	159.09	39.93	253.91	56.530	223	
	3	39.06	159.24	39.90	248.17	56.210	226	
K3	1	39.94	159.56	39.94	254.53	86.580	340	340
	2	39.26	159.21	39.82	248.90	86.260	347	
	3	39.96	159.24	39.75	252.94	83.920	332	

Fiziksel ve mekanik özelliklerini karşılaştırabilmek için Yöntem III kapsamında, Yöntem I ve II'ye göre üretilen hafif beton numuneleriyle benzer kuru birim hacim ağırlık değerlerine sahip numuneler üretilmeye çalışılmıştır. Bu amaçla köpük beton numunelerinde K dozajlarına göre farklı k/ç oranlarında 3 grup hafif beton numuneleri dökülmüştür (k/ç oranları sırasıyla K1: 0.54, K2: 0.31, K3: 0.19). Hafif beton numunelerinin 28 günlük kuru birim hacim ağırlık bulguları analiz edildiğinde k/ç oranındaki azalmaya bağlı olarak K1, K2 ve K3 hafif beton numunelerinin 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 141, 225 ve 340 kg/m³ şeklindedir. (Şekil 6.17).



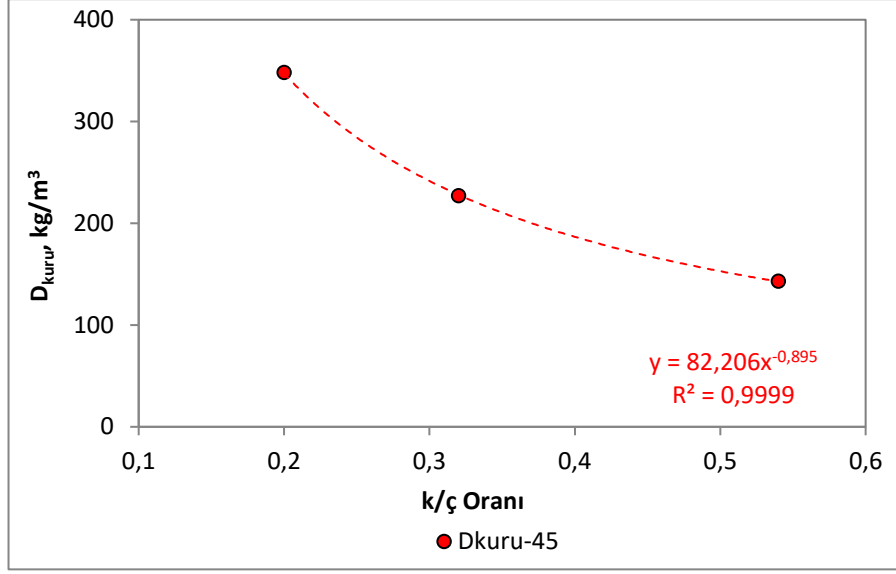
Şekil 6.17. k/ç oranı-D_{kuru-28} ilişkisi

Yöntem III'e göre üretilen numunelerin 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 6.12. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin D_{kuru-45} değerleri

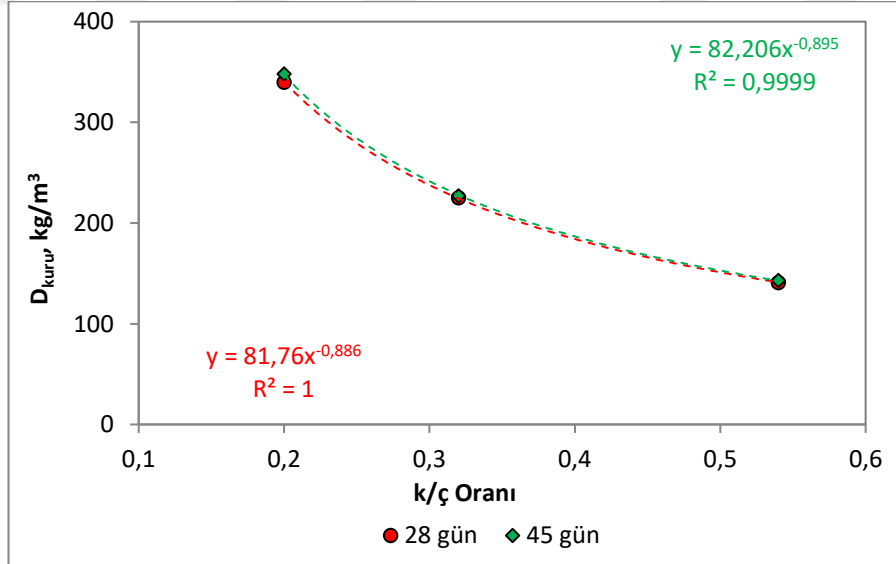
K Dozajı (kg/m³): 70-60-50 [k/ç: 0.54-0.31-0.19]								
Teorik D _{kuru-45} (kg/m³) = K1: 130-K2: 195-K3: 260								
Seri No	Numune No	w (mm)	L (mm)	h (mm)	V _{son} (cm³)	M _{kuru-45} (g)	D _{kuru-45} (kg/m³)	Ort. D _{kuru-45} (kg/m³)
K1	1	39.41	159.17	39.77	249.47	36.230	145	143
	2	39.32	159.89	39.63	249.15	34.580	139	
	3	39.69	159.74	39.63	251.26	36.310	145	
K2	1	39.34	159.15	39.92	249.94	57.920	232	227
	2	39.70	159.04	39.97	252.37	55.670	221	
	3	39.28	159.01	39.96	249.59	56.870	228	
K3	1	39.76	159.43	39.91	252.99	87.570	346	348
	2	39.29	159.60	39.97	250.64	89.500	357	
	3	39.74	159.60	39.99	253.64	86.810	342	

Hafif beton numunelerinin 45 günlük kuru birim hacim ağırlık bulguları analiz edildiğinde k/ç oranındaki azalmaya bağlı olarak K1, K2 ve K3 hafif beton numunelerinin 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 143, 227 ve 348 kg/m³ şeklindedir (Şekil 6.18).



Şekil 6.18. k/ç oranı-D_{kuru-45} ilişkisi

28 günlük numuneler ile karşılaştırıldığında 45 günlük numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri % 1.5-2 oranında artış göstermiştir. Bu durum, küremeye bağlı olarak hidrasyonun ilerlemesi ve hacimsel büzölmeye bağlı yoğunluk artışına bağlanmıştır (Şekil 6.19).



Şekil 6.19. Kür süresine göre k/ç oranı-D_{kuru} ilişkisi

6.2.2. Eğilme ve basınç dayanımları

Yöntem I'e göre üretilen ve 28 günlük kür süresini tamamlayan numunelerin eğilme (f_{cf-28}) ve basınç (f_{c-28}) dayanımları Çizelge 6.13'te verilmiştir.

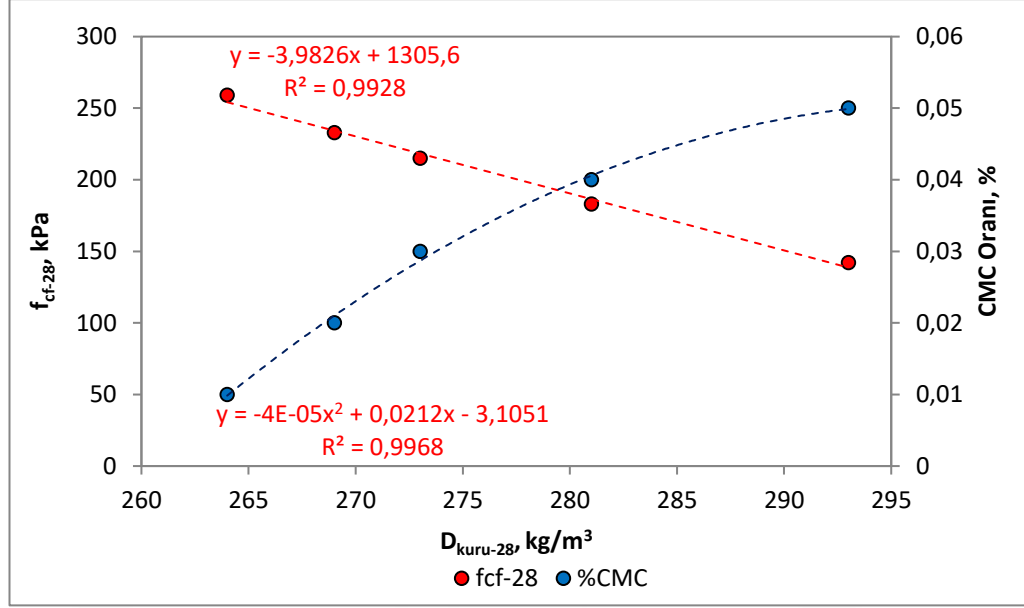
Çizelge 6.13. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin f_{cf-28} ve f_{c-28} değerleri

CMC Oranı (%): 0.01-0.02-0.03-0.04-0.05									
Seri No	Numune No	F_{cf-28} (N)	f_{cf-28} (kPa)	Ort. f_{cf-28} (kPa)	F_{c1-28} (N)	F_{c2-28} (N)	F_{c-28} (N)	f_{c-28} (kPa)	Ort. f_{c-28} (kPa)
HP1	1	109	260	259	375	381	378	240	243
	2	111	265		404	393	399	253	
	3	105	252		404	340	372	236	
HP2	1	99	236	233	322	305	314	199	201
	2	94	224		293	287	290	184	
	3	101	241		375	322	349	222	
HP3	1	93	224	215	278	287	283	181	175
	2	87	207		264	275	270	171	
	3	90	215		264	282	273	173	
HP4	1	81	193	183	264	252	258	163	157
	2	72	171		234	234	234	148	
	3	77	185		252	246	249	159	
HP5	1	53	127	142	129	152	141	89	100
	2	66	158		181	152	167	106	
	3	60	143		152	181	167	106	
HP Oranı (%): 1-2-3-4-5									
HP6	1	203	951	781	1315	1341	1328	1655	1530
	2	145	681		1214	1254	1234	1540	
	3	150	711		1101	1130	1116	1393	
HP7	1	120	359	368	547	555	551	438	454
	2	127	380		629	601	615	489	
	3	122	364		563	530	547	435	
HP8	1	109	260	259	375	381	378	240	243
	2	111	312		404	393	399	253	
	3	105	252		404	340	372	236	
HP9	1	75	178	179	275	228	252	159	136
	2	75	180		170	199	185	117	
	3	75	179		193	217	205	131	
HP10	1	43	103	103	111	152	132	84	96
	2	43	104		140	204	172	110	
	3	43	103		140	152	146	93	
F_{cf-28} : 28 günlük eğilme yükü f_{cf-28} : 28 günlük eğilme dayanımı F_{c1-28} : 28 günlük birinci parça basınç yükü F_{c2-28} : 28 günlük ikinci parça basınç yükü F_{c-28} : 28 günlük basınç yükü f_{c-28} : 28 günlük basınç dayanımı									

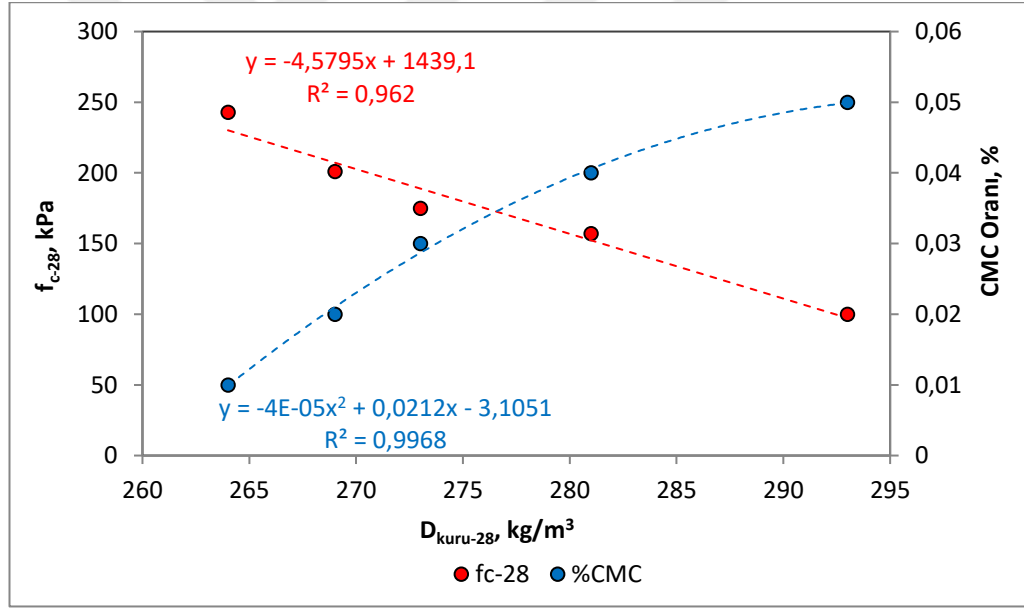
Kuru birim hacim ağırlık ve dayanım değerleri arasında bir ilişki bulunmaktadır. Normal şartlarda çimento dozajı ve s/ç oranı değişmediğinde kuru birim hacim ağırlık ile eğilme ve basınç dayanım değerleri arasında doğru orantılı bir artış olması beklenir. Ancak Yöntem I'e göre üretilen hafif beton numunelerinde CMC oranı artışı sonucu 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerinin artmasıyla birlikte 28 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri azalmıştır. Bu analiz, KAÇ içeren hafif betonlarda CMC'nin eğilme ve basınç dayanım değerlerini olumsuz yönde etkilediğini açık biçimde göstermiştir.

% 0.01 CMC içeren HP1'in 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 264 kg/m^3 ve eğilme dayanımı değeri 259 kPa iken % 0.05 CMC içeren HP5'te 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 293 kg/m^3 'e yükselmesine karşılık eğilme dayanım değeri 142 kPa'a kadar azalmıştır. Bir başka deyişle % 0.01 oranındaki CMC artışı eğilmede yaklaşık % 10 oranında dayanım kaybına neden olmuştur (Şekil 6.20). Benzer durum, 28 günlük basınç dayanımı değerleri içinde için de söz konusudur. % 0.01 CMC içeren HP1'in 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 264 kg/m^3 ve basınç dayanım değeri 243 kPa iken % 0.05 CMC içeren HP5'te 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 293 kg/m^3 'e yükselmesine karşılık basınç dayanım değeri 100 kPa'a gerilemiştir. CMC oranındaki her % 0.01 oranındaki artış, 28 günlük basınç dayanımı değerlerinde % 15-20 aralığında azalmaya neden olmuştur (Şekil 6.21).

Dikkat çekici bir diğer nokta da eşdeğer kuru birim hacim ağırlık değerleri için eğilme dayanım değerlerinin, basınç dayanım değerlerinden daha yüksek olmasıdır. Ayrıca CMC oranları % 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 ve 0.05 için 28 günlük eğilme dayanımı/basınç dayanımı (f_{cf-28}/f_{c-28}) oranları sırasıyla 1.07, 1.17, 1.23, 1.17 ve 1.42 şeklindedir.



Şekil 6.20. f_{cf-28} - $D_{kuru-28}$ -CMC oranı ilişkisi



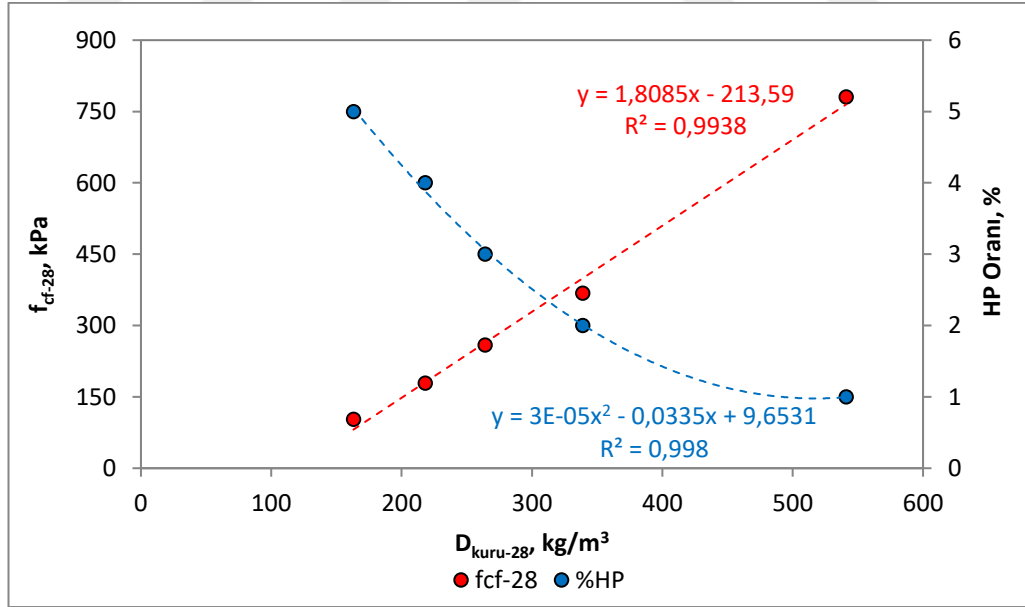
Şekil 6.21. f_{c-28} - $D_{kuru-28}$ -CMC oranı ilişkisi

Yöntem I'e göre üretilen hafif beton numunelerinde HP oranı artışı sonucu 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerinin azalmasıyla birlikte eğilme ve basınç dayanım değerleri de önemli oranda azalmıştır. Dayanımlardaki bu azalma, KAÇ hidratasyonunda düşük yoğunluklu yarı kararlı hidratların daha yüksek bir yoğunluğa sahip kararlı hidratlara dönüşümü esnasında porozite (gözeneklilik) artışına bağlı dayanım azalması olgusuna dayandırılmıştır. 28 günlük eğilme dayanımı değerleri

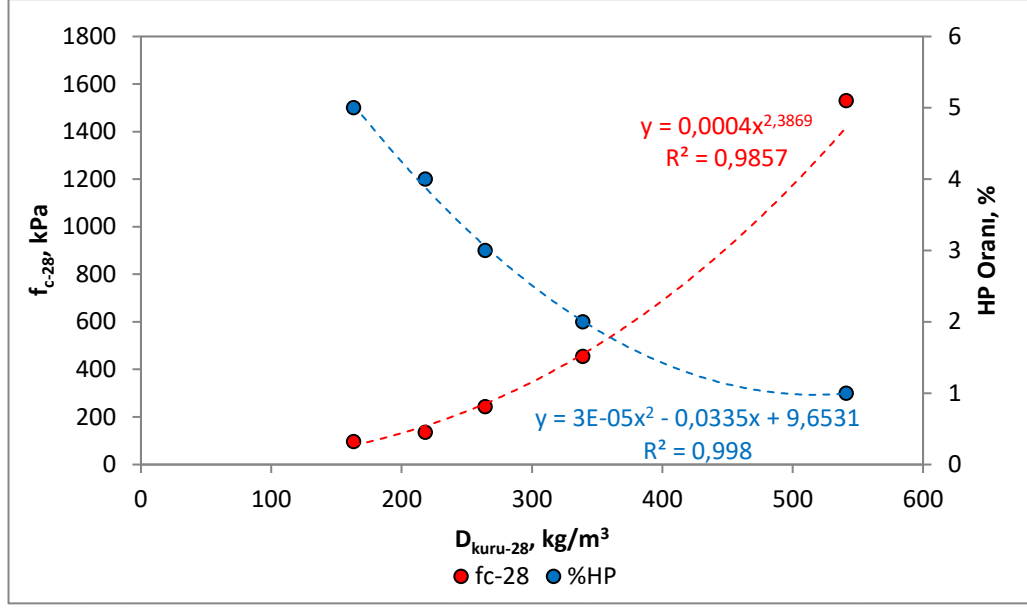
için kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki her 100 kg/m³'lük azalma yaklaşık 180 kPa'lık dayanım kaybına neden olmuştur (Şekil 6.22).

28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki azalma hafif beton numunelerinin basınç dayanım değerlerini de eğilme dayanım değerlerinden daha yüksek oranda etkilemiştir. 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri için her 100 kg/m³'lük hafifleme basınç dayanım değerlerinde ortalama 380 kPa'lık azalışa neden olmuştur. Dayanım kaybına neden olan mekanizma eğilme dayanımı kaybında açıklanan gerekçe ile aynıdır (Şekil 6.23).

Ayrıca HP oranları % 1, 2, 3, 4 ve % 5 için f_{cf-28}/f_{c-28} oranları sırasıyla 0.51, 0.81, 1.07, 1.32 ve 1.07'dir. Bu oranlar nispeten yüksek kuru birim hacim ağırlık değerlerinde eğilme dayanım değerleri, basınç dayanım değerlerinin yaklaşık yarı seviyesinde iken 250 kg/m³ ve altındaki kuru birim hacim ağırlık değerlerinde eğilme dayanım değerleri, basınç dayanım değerlerine eşitlenmekle birlikte 1.3 katına kadar artabilmektedir.



Şekil 6.22. f_{cf-28} - $D_{kuru-28}$ -HP oranı ilişkisi



Şekil 6.23. f_{c-28} - $D_{kuru-28}$ -HP oranı ilişkisi

Yöntem I'e göre üretilen ve 45 günlük kür süresini tamamlayan numunelerin eğilme (f_{cf-45}) ve basınç (f_{c-45}) dayanımları Çizelge 6.14'te verilmiştir.

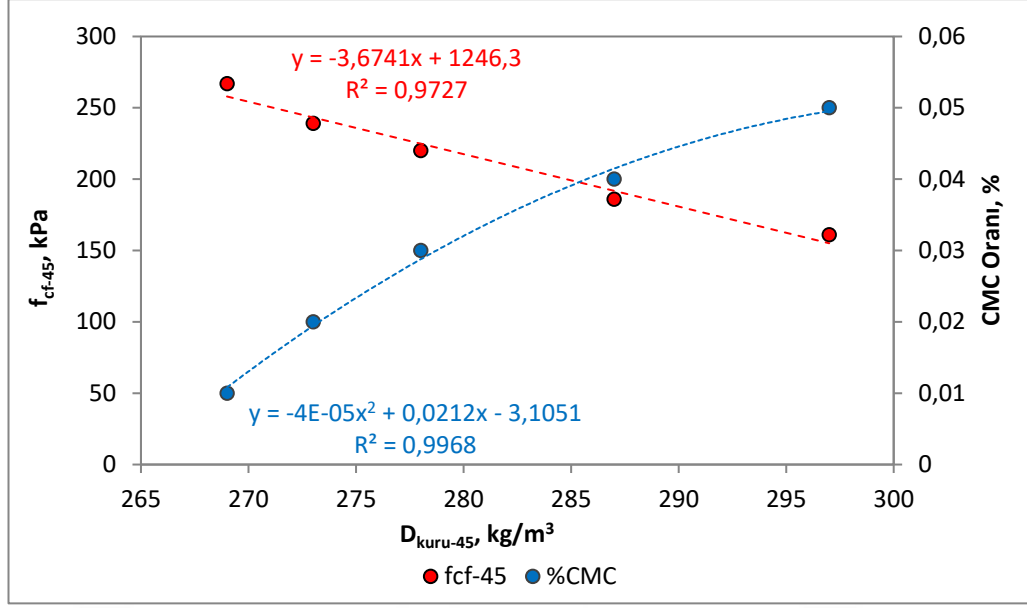
Çizelge 6.14. Yöntem I'e göre üretilen numunelerin f_{cf-45} ve f_{c-45} değerleri

CMC Oranı (%): 0.01-0.02-0.03-0.04-0.05									
Seri No	Numune No	F_{cf-45} (N)	f_{cf-45} (kPa)	Ort. f_{cf-45} (kPa)	F_{c1-45} (N)	F_{c2-45} (N)	F_{c-45} (N)	f_{c-45} (kPa)	Ort. f_{c-45} (kPa)
HP1	1	111	279	267	409	386	398	255	245
	2	111	266		380	394	387	247	
	3	107	257		386	345	366	234	
HP2	1	104	249	239	342	340	341	217	209
	2	96	230		322	305	314	199	
	3	99	237		340	322	331	211	
HP3	1	87	208	220	269	287	278	177	185
	2	98	234		282	322	302	191	
	3	91	219		281	304	293	187	
HP4	1	73	175	186	257	234	246	157	168
	2	80	191		263	287	275	175	
	3	79	191		258	281	270	173	
HP5	1	72	173	161	152	196	174	111	111
	2	64	153		152	181	167	105	
	3	66	157		181	187	184	117	
HP Oranı (%): 1-2-3-4-5									
HP6	1	169	799	788	1168	1160	1164	1452	1538
	2	167	781		1217	1233	1225	1525	
	3	165	783		1302	1324	1313	1639	
HP7	1	127	383	375	569	571	570	457	464
	2	125	374		575	555	565	449	
	3	122	369		619	592	606	487	
HP8	1	111	279	267	409	386	398	255	245
	2	111	266		380	394	387	247	
	3	107	257		386	345	366	234	
HP9	1	78	185	190	200	220	210	133	142
	2	79	190		237	209	223	142	
	3	81	194		235	237	236	150	
HP10	1	45	108	108	152	199	176	112	109
	2	45	108		176	152	164	104	
	3	45	108		152	199	176	112	
F_{cf-45} : 45 günlük eğilme yükü f_{cf-45} : 45 günlük eğilme dayanımı F_{c1-45} : 45 günlük birinci parça basınç yükü F_{c2-45} : 45 günlük ikinci parça basınç yükü F_{c-45} : 45 günlük basınç yükü f_{c-45} : 45 günlük basınç dayanımı									

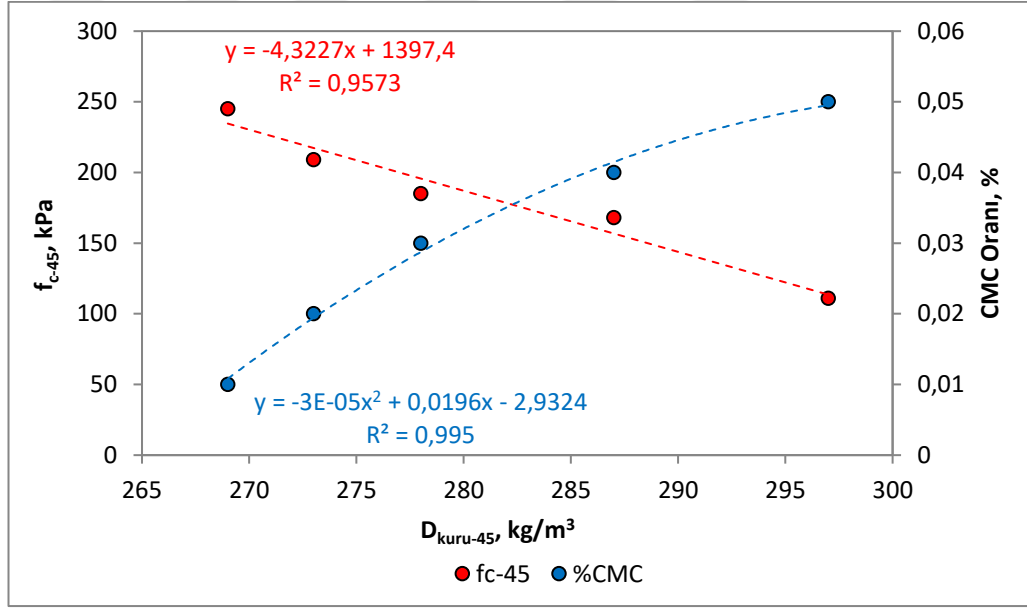
Yöntem I'e göre üretilen 45 günlük hafif beton numunelerinde, 28 günlük numunelerde olduğu gibi CMC oranı artışı sonucu eğilme ve basınç dayanım değerleri azalmıştır. % 0.01 CMC içeren HP1'in 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 269 kg/m^3 ve eğilme dayanım değeri 267 kPa iken % 0.05 CMC içeren HP5'te 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 297 kg/m^3 'e yükselmesine karşılık eğilme dayanım değeri 161 kPa'a kadar azalmıştır. 28 günlük numunelere göre eğilme dayanım kaybında bir miktar iyileşme gözlemlense de % 0.01 oranındaki CMC artışı eğilmede yaklaşık % 10 oranında dayanım kaybına neden olmuştur (Şekil 6.24).

45 günlük hafif beton numunelerinin basınç dayanım değerleri analiz edilmiştir. % 0.01 CMC içeren HP1'in 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 269 kg/m^3 ve basınç dayanım değeri 245 kPa iken % 0.05 CMC içeren HP5'te 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 297 kg/m^3 'e yükselmesine karşılık basınç dayanım değeri 111 kPa'a gerilemiştir. Eğilme dayanımında gözlemlendiği gibi kür süresi arttıkça basınç dayanım kaybında bir miktar iyileşme gözlemlenmiştir. CMC oranındaki her % 0.01 oranındaki artış 45 günlük basınç dayanımı değerlerinde % 10-12 aralığında azalmaya neden olmuştur (Şekil 6.25).

Eşdeğer kuru birim hacim ağırlık değerleri için eğilme dayanım değerlerinin, basınç dayanım değerlerinden daha yüksek olması durumu 45 günlük numunelerde de devam etmiştir. CMC oranları % 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 ve 0.05 için 45 günlük eğilme dayanımı/basınç dayanımı (f_{cf-45}/f_{c-45}) oranları sırasıyla 1.09, 1.14, 1.19, 1.11 ve 1.45 şeklindedir.



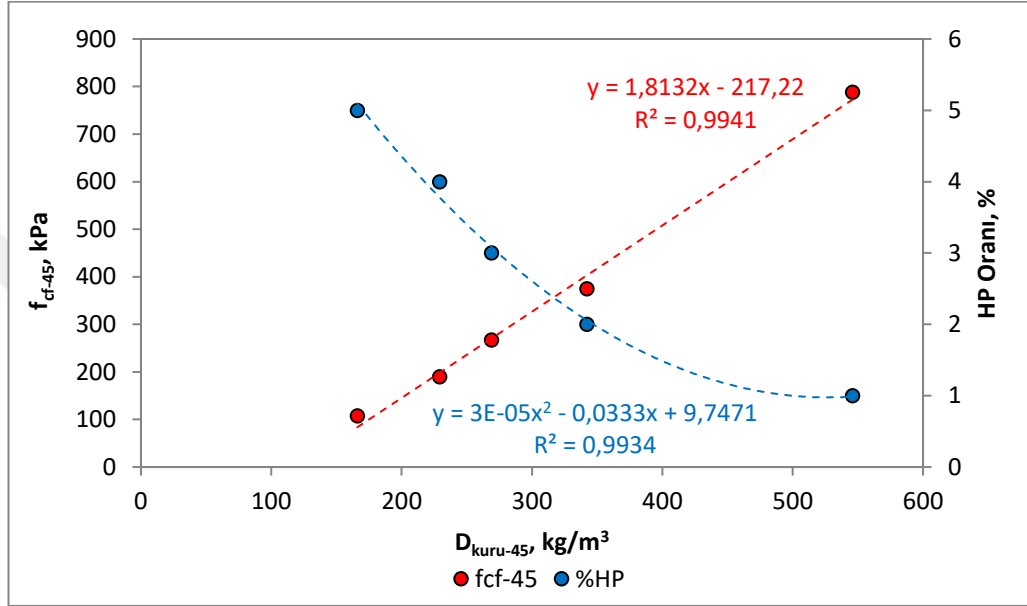
Şekil 6.24. f_{cf-45} - $D_{kuru-45}$ -CMC oranı ilişkisi



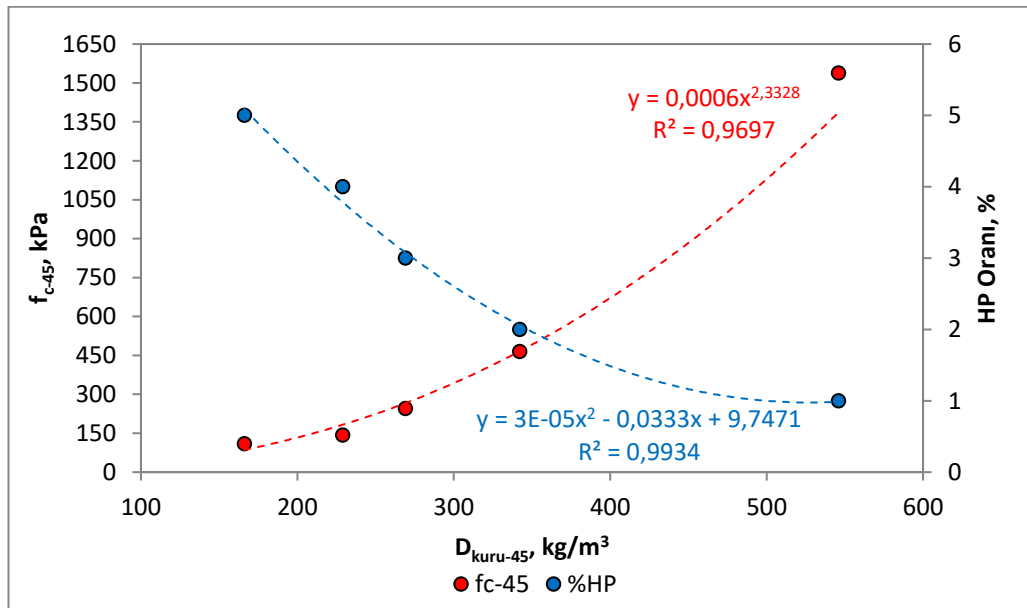
Şekil 6.25. f_{c-45} - $D_{kuru-45}$ -CMC oranı ilişkisi

Yöntem I'e göre üretilen 45 günlük hafif beton numunelerinde, 28 günlük numunelerle benzer şekilde HP oranı artışı sonucu eğilme ve basınç dayanım değerleri de önemli oranda azalmıştır. 45 günlük eğilme dayanımı değerleri için kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki her 100 kg/m³'lük azalma yaklaşık 180 kPa'lık ve 45 günlük basınç dayanımı değerleri için kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki her 100 kg/m³'lük azalma yaklaşık 375 kPa'lık dayanım kayıplarına neden olmuştur (Şekil 6.26 ve 6.27).

Ayrıca HP oranları % 1, 2, 3, 4 ve 5 için 28 günlük numunelerinkine benzer şekilde f_{cf-45}/f_{c-45} oranları sırasıyla 0.51, 0.81, 1.07, 1.32 ve 1.07 şeklindedir. Bu oranlar nispeten yüksek kuru birim hacim ağırlık değerlerinde eğilme dayanım değerleri, basınç dayanım değerlerinin yaklaşık yarı seviyesinde iken 250 kg/m^3 ve altındaki kuru birim hacim ağırlık değerlerinde eğilme dayanım değerleri, basınç dayanım değerlerine eşitlenmekle birlikte 1.3 katına kadar artabilmektedir.



Şekil 6.26. f_{cf-45} - $D_{kuru-45}$ -HP oranı ilişkisi



Şekil 6.27. f_{c-45} - $D_{kuru-45}$ -HP oranı ilişkisi

Yöntem II'e göre üretilen numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 6.15'te verilmiştir.

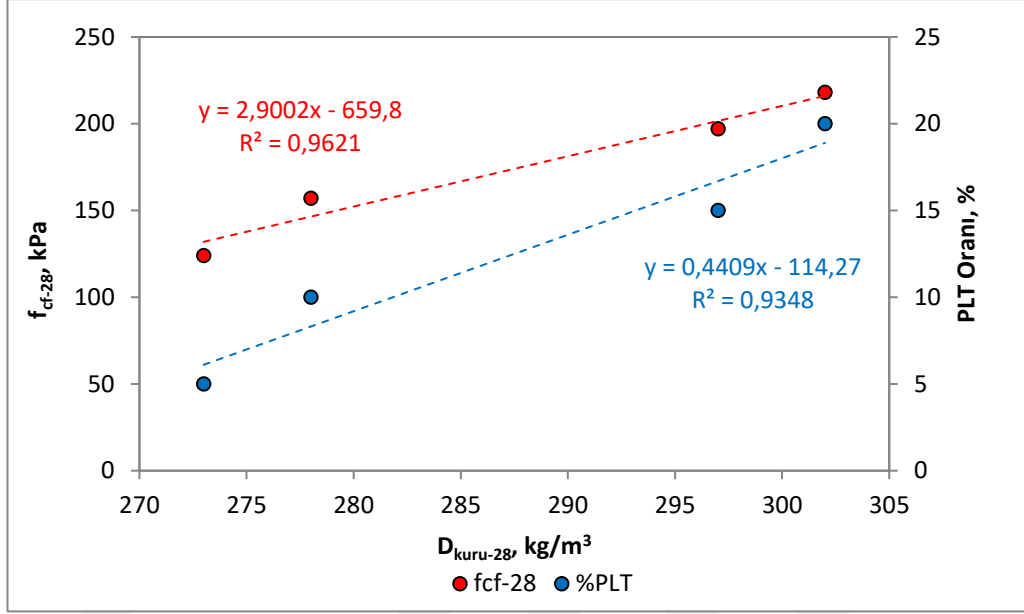
Çizelge 6.15. Yöntem II'e göre üretilen numunelerin f_{cf-28} ve f_{c-28} değerleri

PLT Oranı (%): 5-10-15-20									
Seri No	Numune No	F_{cf-28} (N)	f_{cf-28} (kPa)	Ort. f_{cf-28} (kPa)	F_{c1-28} (N)	F_{c2-28} (N)	F_{c-28} (N)	f_{c-28} (kPa)	Ort. f_{c-28} (kPa)
PLT1	1	51	122	124	240	275	258	164	161
	2	48	115		228	240	234	149	
	3	56	135		258	281	270	171	
PLT2	1	70	168	157	340	352	346	221	212
	2	64	154		340	328	334	213	
	3	62	149		299	328	314	200	
PLT3	1	80	190	197	404	416	410	260	271
	2	81	194		428	416	422	269	
	3	86	206		428	463	446	284	
PLT4	1	89	214	218	533	580	557	355	352
	2	88	210		533	543	538	341	
	3	96	230		543	580	562	358	

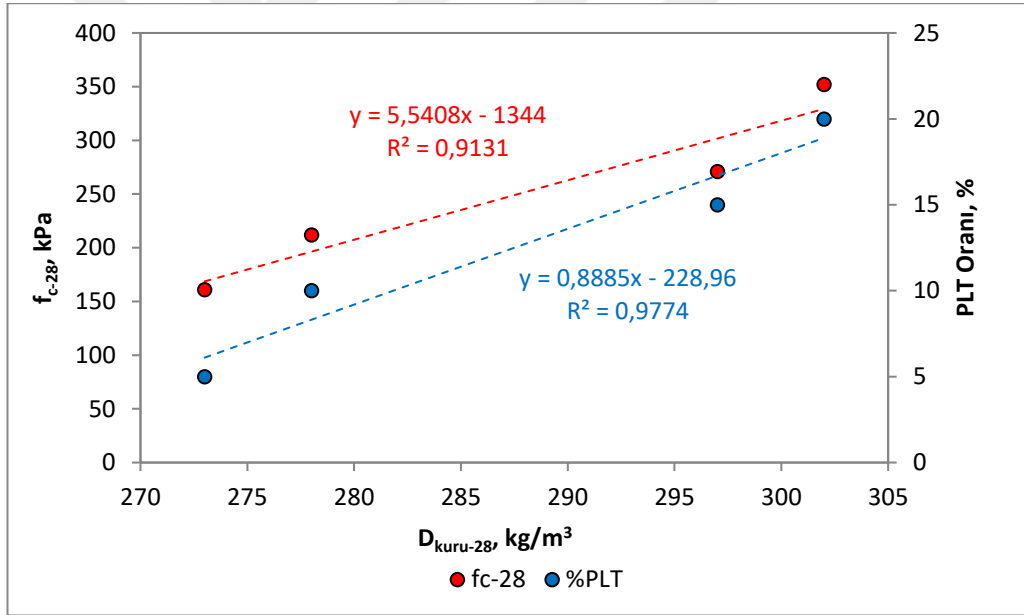
Yöntem II'ye göre üretilen hafif beton numunelerinde PLT1 (PLT oranı % 5)'in 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 273 kg/m^3 iken PLT4 (PLT oranı % 20)'te 302 kg/m^3 olmuştur. Buna karşılık 28 günlük eğilme dayanımı değeri PLT1'de 124 kPa iken PLT4'te 218 kPa değerine ulaşmıştır. Bir başka deyişle % 15 oranında daha fazla PLT kullanımı 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerini % 10 artırırken eğilme dayanım değerlerini % 75 oranında iyileştirmiştir (Şekil 6.28).

28 günlük eğilme dayanımı değerlerine göre basınç dayanımı değerlerindeki iyileşme daha fazladır. 28 günlük basınç dayanım değeri PLT1'de 161 kPa iken PLT4'te 352 kPa değerine ulaşmıştır. Bir başka deyişle % 15 oranında daha fazla PLT kullanımı 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerini % 10 artırırken basınç dayanım değerlerini % 118 oranında iyileştirmiştir (Şekil 6.29).

PLT1, PLT2, PLT3 ve PLT4 numunelerinin f_{cf-28}/f_{c-28} oranları sırasıyla 0.77, 0.74, 0.73 ve 0.62 şeklindedir.



Şekil 6.28. f_{cf-28} - $D_{kuru-28}$ -PLT oranı ilişkisi



Şekil 6.29. f_{c-28} - $D_{kuru-28}$ -PLT oranı ilişkisi

Yöntem II'e göre üretilen numunelerin 45 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 6.16'da verilmiştir.

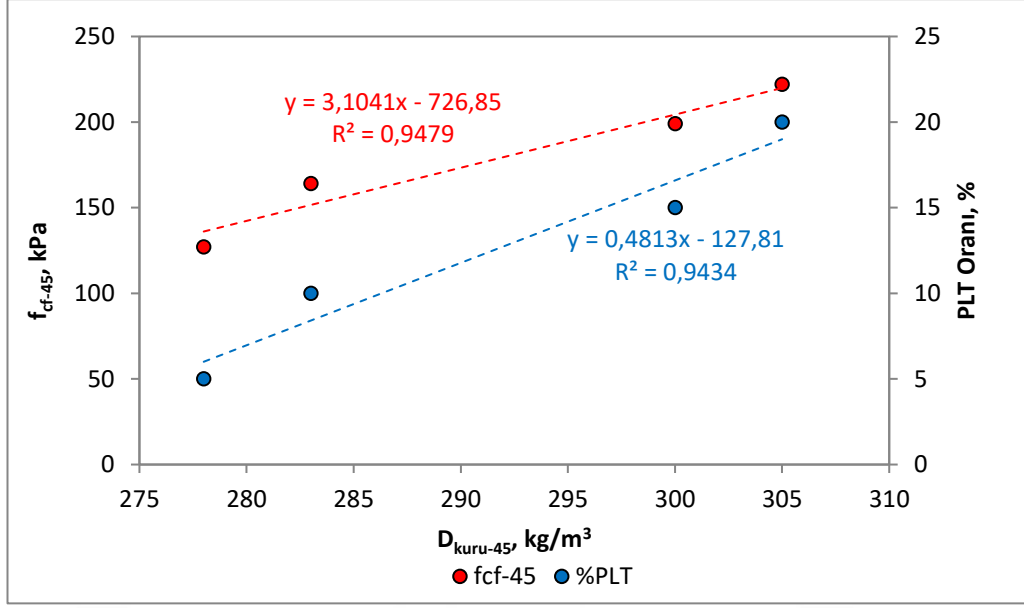
Çizelge 6.16. Yöntem II'e göre üretilen numunelerin f_{cf-45} ve f_{c-45} değerleri

PLT Oranı (%): 5-10-15-20									
Seri No	Numune No	F_{cf-45} (N)	f_{cf-45} (kPa)	Ort. f_{cf-45} (kPa)	F_{c1-45} (N)	F_{c2-45} (N)	F_{c-45} (N)	f_{c-45} (kPa)	Ort. f_{c-45} (kPa)
PLT1	1	57	137	127	287	267	277	177	167
	2	49	118		261	222	242	154	
	3	53	127		284	252	268	171	
PLT2	1	65	156	164	325	325	325	208	214
	2	70	168		343	330	337	214	
	3	70	167		348	346	347	221	
PLT3	1	81	195	199	405	440	423	271	274
	2	75	180		411	406	409	261	
	3	92	221		446	463	455	291	
PLT4	1	93	222	222	542	583	563	356	358
	2	98	233		593	572	583	369	
	3	88	212		534	550	542	347	

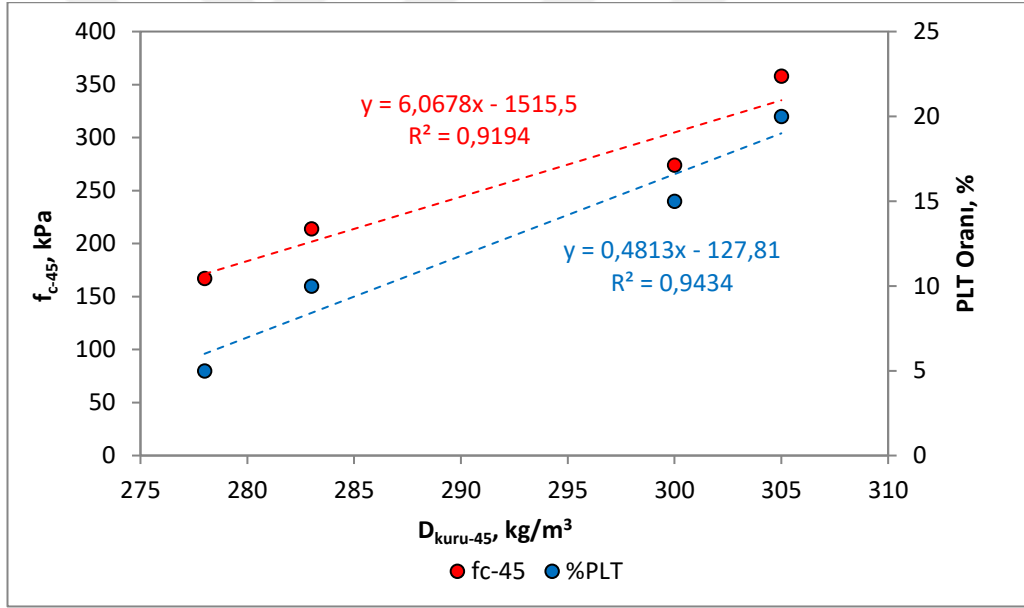
Yöntem II'ye göre üretilen hafif beton numunelerinde PLT1 (PLT oranı % 5)'in 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 278 kg/m^3 iken PLT (PLT oranı % 20)'te 305 kg/m^3 olmuştur. Buna karşılık 45 günlük eğilme dayanımı değeri PLT1'de 127 kPa iken PLT4'te 222 kPa değerine ulaşmıştır. Bir başka deyişle % 15 oranında daha fazla PLT kullanımı 28 günlük numunelerdekine benzer şekilde 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerini % 10 artırırken eğilme dayanımı değerlerini % 75 oranında iyileştirmiştir (Şekil 6.30).

45 günlük eğilme dayanımı değerlerine göre basınç dayanımı değerlerindeki iyileşme de daha fazladır. 45 günlük basınç dayanımı değeri PLT1'de 167 kPa iken PLT4'te 358 kPa değerine ulaşmıştır. Bir başka deyişle % 15 oranında daha fazla PLT kullanımı 28 günlük numunelerdekine benzer şekilde 45 günlük birim hacim ağırlık değerlerini % 10 artırırken basınç dayanımı değerlerini % 115 oranında iyileştirmiştir (Şekil 6.31).

PLT1, PLT2, PLT3 ve PLT4 numunelerinin f_{cf-45}/f_{c-45} oranları sırasıyla 0.76, 0.77, 0.73 ve 0.62 şeklindedir.



Şekil 6.30. f_{cf-45} - $D_{kuru-45}$ -PLT oranı ilişkisi



Şekil 6.31. f_{c-45} - $D_{kuru-45}$ -PLT oranı ilişkisi

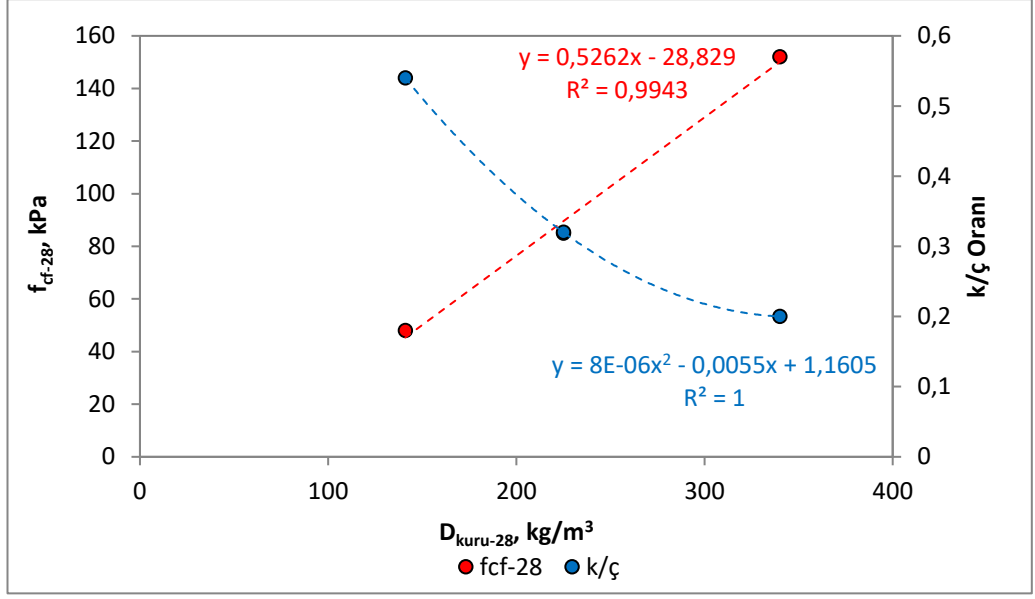
Yöntem III'e göre üretilen numunelerin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 6.17'de verilmiştir.

Çizelge 6.17. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin f_{cf-28} ve f_{c-28} değerleri

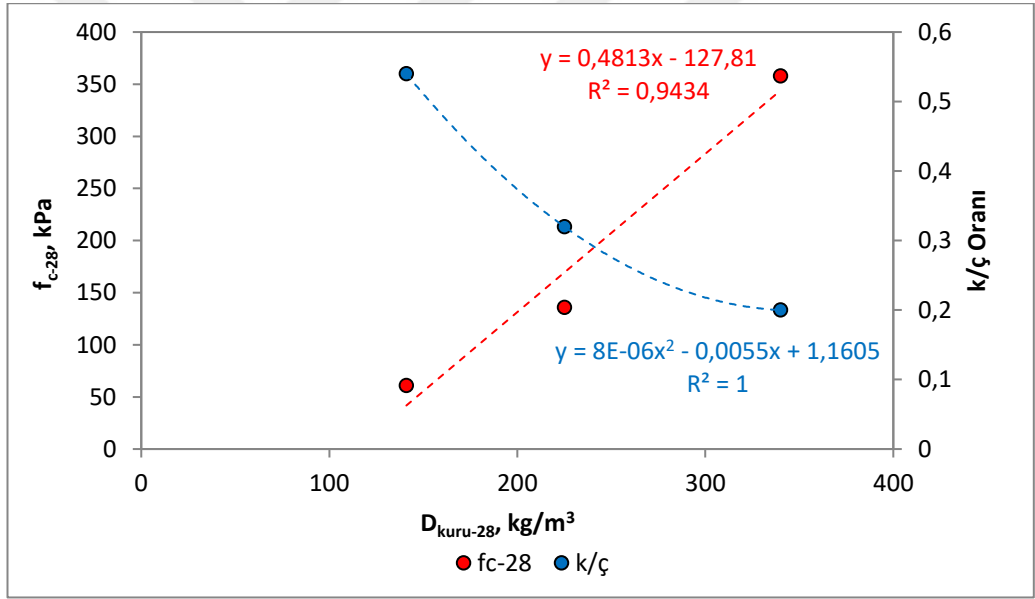
K Dozajı (kg/m³): 70-60-50 [k/ç: 0.54-0.31-0.19]									
Seri No	Numune No	F_{cf-28} (N)	f_{cf-28} (kPa)	Ort. f_{cf-28} (kPa)	F_{c1-28} (N)	F_{c2-28} (N)	F_{c-28} (N)	f_{c-28} (kPa)	Ort. f_{c-28} (kPa)
K1	1	16	40	48	93	93	93	59	61
	2	23	56		99	99	99	63	
	3	20	47		99	93	96	60	
K2	1	38	91	85	228	246	237	150	136
	2	30	71		217	217	217	136	
	3	39	94		181	199	190	122	
K3	1	64	151	152	557	557	557	349	358
	2	71	171		575	551	563	359	
	3	56	133		604	569	587	367	

Yöntem III'e göre üretilen hafif numunelerinde k/ç oranı ve 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri arasındaki korelasyon katsayısı (R) oldukça yüksektir (1'e eşittir). K1 ve K3 numuneleri karşılaştırıldığında, k/ç oranının azalmasına bağlı olarak 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri % 141 oranında artarken eğilme dayanım değerleri de % 217 oranında artmıştır. Aynı ilişki açısından 28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde bu artış % 587 oranındadır. Başka bir deyişle 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki artışa bağlı olarak eğilme dayanım değerleri yaklaşık 2 kat, basınç dayanım değerleri ise 6 kat artmıştır (Şekil 6.32 ve 6.33).

K1, K2 ve K3 numunelerinin f_{cf-28}/f_{c-28} oranları sırasıyla 0.79, 0.63 ve 0.42 şeklindedir.



Şekil 6.32. f_{cf-28} - $D_{kuru-28}$ - $k/\ç$ oranı ilişkisi



Şekil 6.33. f_{c-28} - $D_{kuru-28}$ - $k/\ç$ oranı ilişkisi

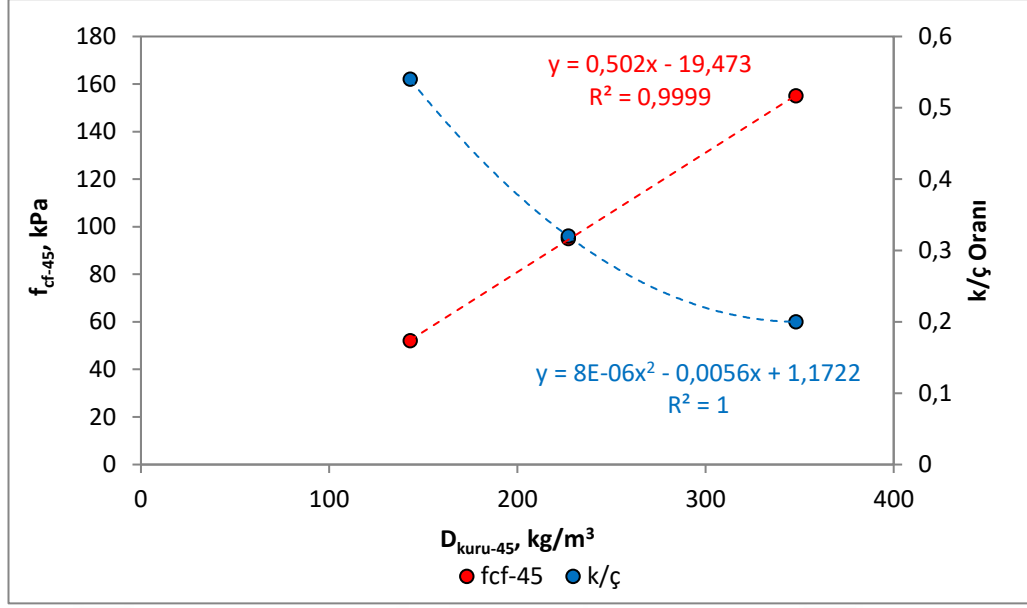
Yöntem III'e göre üretilen numunelerin 45 günlük eğilme ve basınç dayanımı değerleri Çizelge 6.18'de verilmiştir.

Çizelge 6.18. Yöntem III'e göre üretilen numunelerin f_{cf-45} ve f_{c-45} değerleri

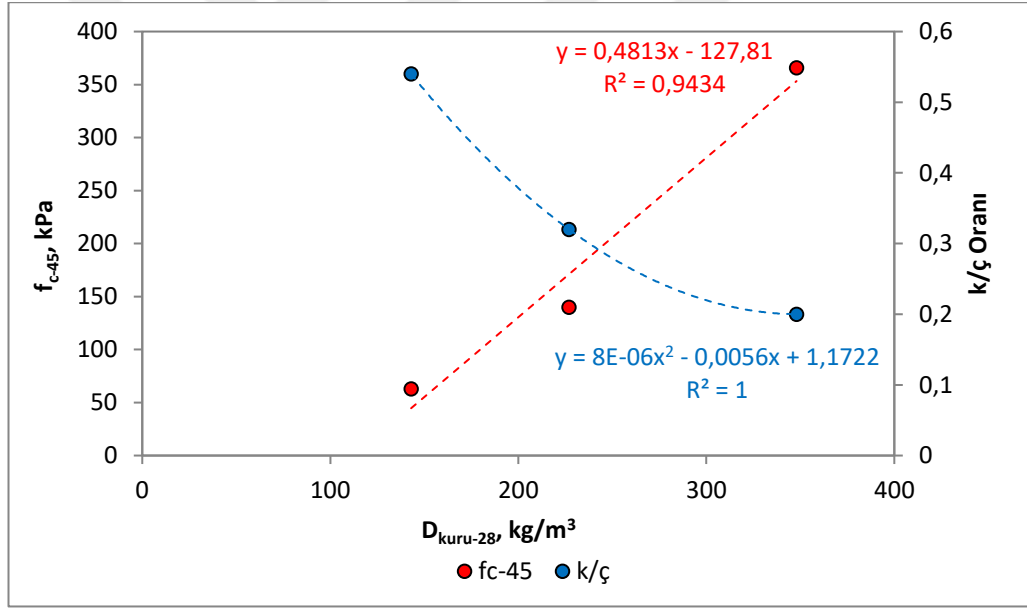
K Dozajı (kg/m³): 70-60-50 [k/ç: 0.54-0.31-0.19]									
Seri No	Numune No	F_{cf-45} (N)	f_{cf-45} (kPa)	Ort. f_{cf-45} (kPa)	F_{c1-45} (N)	F_{c2-45} (N)	F_{c-45} (N)	f_{c-45} (kPa)	Ort. f_{c-45} (kPa)
K1	1	23	55	52	105	95	100	63	63
	2	20	49		95	101	98	62	
	3	23	55		97	103	100	63	
K2	1	40	96	95	217	234	226	143	140
	2	40	95		211	217	214	135	
	3	40	96		234	211	223	142	
K3	1	66	156	155	572	563	568	357	366
	2	66	158		593	645	619	394	
	3	64	151		575	528	552	347	

Yöntem III'e göre üretilen 45 günlük numuneler değerlendirildiğinde k/ç oranının azalmasına bağlı olarak kuru birim hacim ağırlık değerleri % 143 oranında artarken eğilme dayanım değerleri de % 198 oranında artmıştır. Aynı ilişki açısından basınç dayanım değerleri değerlendirildiğinde bu artış % 481 oranındadır. Başka bir deyişle 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki artışa bağlı olarak eğilme dayanımı değerleri yaklaşık 2 kat, basınç dayanımı değerleri ise 5 kat artmıştır (Şekil 6.34 ve 6.35). Bununla birlikte 28 ve 45 günlük eğilme ve basınç dayanım değerleri karşılaştırıldığında değerlerdeki artış çok düşük düzeydedir.

45 günlük K1, K2 ve K3 numunelerinin f_{cf-45}/f_{c-45} oranları sırasıyla 0.83, 0.68 ve 0.42 şeklindedir. Bu oranlar özellikle düşük kuru birim hacim ağırlık değerlerinde eğilme ve basınç dayanım değerlerinin birbirlerine yaklaştığını, daha yüksek kuru birim hacim ağırlık değerlerinde ise oranın basınç dayanım değerleri lehine arttığını ortaya koymuştur.



Şekil 6.34. f_{cf-45} - $D_{kuru-45}$ - $k/\ç$ oranı ilişkisi



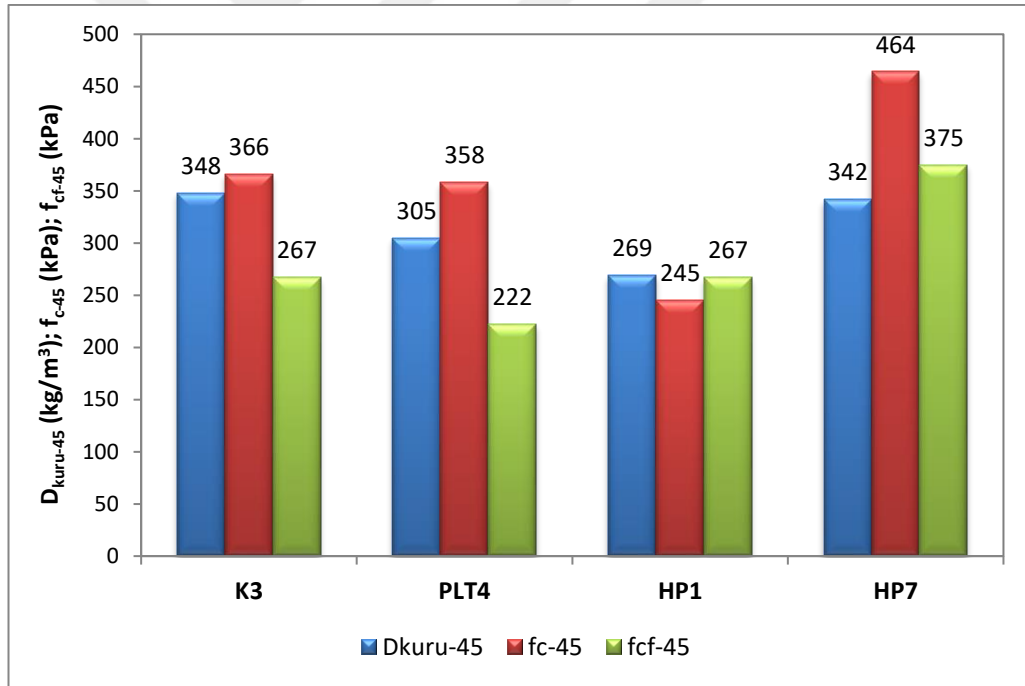
Şekil 6.35. f_{c-45} - $D_{kuru-45}$ - $k/\ç$ oranı ilişkisi

Deney sonuçlarından elde edilen bulgular ışığında Yöntem I, II ve III'e göre üretilen hafif beton numuneleri içerisinde optimum fiziko-mekanik özellikleri sağlayan numuneler belirlenmiştir. Buna göre Yöntem I'den HP1 ve HP7, Yöntem II'den PLT4 ve Yöntem III'ten ise K3 numunesi belirlenen dayanım kriterlerine uygunluk göstermiştir (Çizelge 6.19).

HP1, HP7 ve PLT4 numunelerinde 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri ile basınç dayanımı değerleri arasında doğrusal bir ilişki vardır (sırasıyla 269 kg/m³-245 kPa, 342 kg/m³-464 kPa ve 305 kg/m³-358 kPa). Ancak K3'te basınç dayanımı, yüksek kuru birim hacim ağırlığına rağmen beklenen seviyede artış göstermemiştir (348 kg/m³-366 kPa). Bu durumun köpük ajanının KAÇ hidratasyonuna olumsuz bir etki yapmasından kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Çizelge 6.19. Optimum değerleri sağlayan hafif beton numuneleri

Yöntem	Numune No	D _{kuru-45} (kg/m ³)	f _{c-45} (kPa)	f _{cf-45} (kPa)
I	HP1	269	245	267
	HP7	342	464	375
II	PLT4	305	358	222
III	K3	348	366	155



Şekil 6.36. Optimum hafif beton numunelerinde D_{kuru-45}-f_{c-45}-f_{cf-45} ilişkisi

6.2.3. Isıl iletkenlik katsayısı

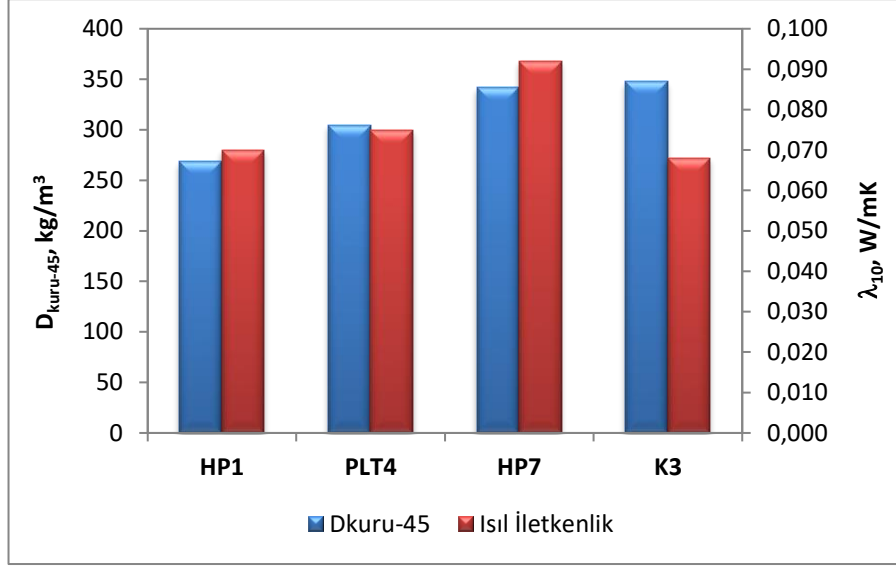
Hafif beton üretim yöntemlerinden optimum 45 günlük kuru birim hacim ağırlık ve basınç dayanımı değerlerini sağlayan numunelerin (HP1, HP7, PLT4 ve K3) TS EN 12667 standardına uygun olarak Isı Akış Metodu'na göre ısıl iletkenlik

katsayıları (λ) ölçülmüştür. Ölçümler, SDÜ DEYMAM’da LaserComp Fox 50 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerde sıcak ve soğuk plakalar arasındaki ΔT , 10 °K olarak seçilip ısı iletkenlik katsayısı (λ_{10}) bulguları Çizelge 6.20’de verilmiştir.

Çizelge 6.20. Optimum değerleri sağlayan hafif beton numunelerinin λ_{10} değerleri

Numune No	$D_{kuru-45}$ (kg/m ³)	λ_{10} (W/mK)
HP1	269	0.070
HP7	342	0.092
PLT4	305	0.075
K3	348	0.068

Ulusal standartlarda (TS ve TS EN) ısı yalıtım malzemeleri için ısı iletkenlik katsayısı sınır değerleri mevcut değildir. Bununla birlikte uluslararası genel kabule göre $\lambda \leq 0.065$ W/mK olan malzemeler ısı yalıtım malzemesi, $\lambda > 0.065$ W/mK olan malzemeler yapı malzemesi olarak tanımlanmaktadır (TS 825). Sınır değerleri gözetildiğinde HP1, HP7, PLT4 ve K3 numuneleri yapı malzemesi sınıfına girmektedir. Ancak K3 ve HP1 numunelerinin ısı iletkenliği (sırasıyla 0.068 ve 0.070 W/mK) ısı yalıtım malzemesi üst sınırına oldukça yakındır. Hâlbuki 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri, K3’e çok yakın olan HP7’nin ısı iletkenliği çok daha yüksektir (0.092 W/mK). HP1, HP7 ve PLT4 numunelerinde genleştirme ajanı olarak HP kullanılmış olup bu numuneler için ısı iletkenlik katsayısı değerleri 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri ile ilişkiliyken, K3’te bu ilişki bozulmuştur (Şekil 6.37). Bu fenomen özellikle numunelerin SEM görüntülerinin analiz edildiği 6.2.4 bölümünde tartışılmıştır. Bu noktada Davraz vd. (2015), tarafından 300-350 kg/m³ kuru birim hacim ağırlık değerlerine sahip, PÇ kullanılarak üretilen köpük beton numunelerinin ısı iletkenlik değerleri 0.090-0.012 W/mK aralığında olduğu bildirilmiştir. Bu bilgi, bulgularla birlikte değerlendirildiğinde numunelerin ısı iletkenliklerine, kullanılan çimento tipinden daha çok gözenek boyutu ve dağılımının etkili olduğu anlaşılmaktadır.

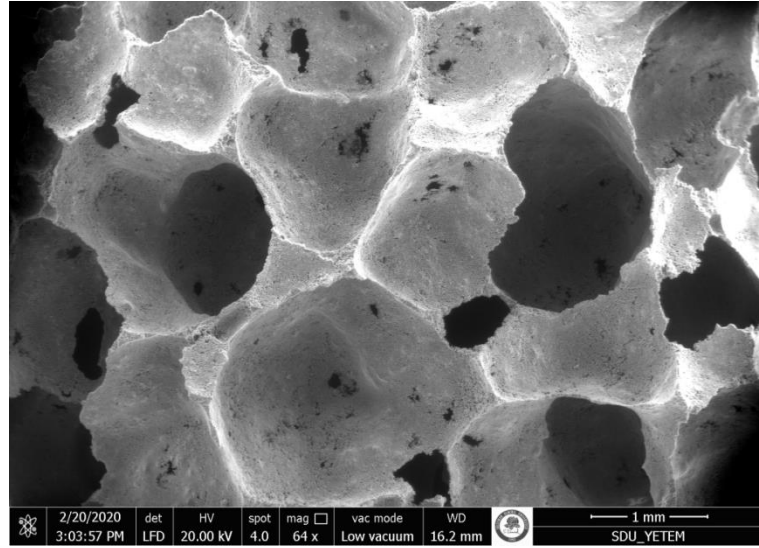


Şekil 6.37. Optimum özelliklerdeki hafif beton numunelerinde $D_{kuru-45}$ - λ_{10} ilişkisi

6.2.4. Boşluk yapısı ve özellikleri

Farklı üretim yöntemlerine göre elde edilen hafif beton numunelerinin (HP1, HP7, PLT4 ve K3) boşluk yapısı ve özellikleri hakkında bilgi edinebilmek için SDÜ YETEM’de SEM görüntüleri alınmıştır.

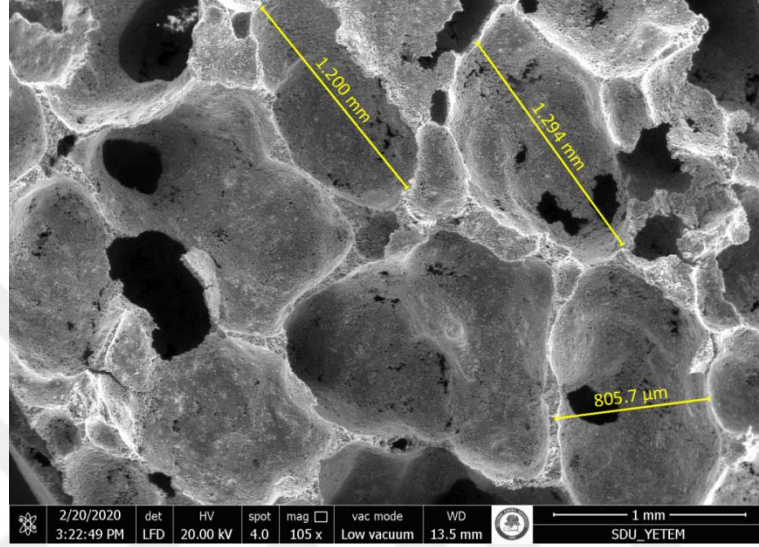
HP1 numunesine ait SEM görüntüsü Şekil 6.38’de verilmiştir.



Şekil 6.38. HP1 numunesine ait SEM görüntüsü (x 64)

HP1 numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde gözenek dağılımının homojen ve yaklaşık olarak küresel formda hücrelerden oluştuğu görülmektedir. Bununla birlikte boşluk boyutları 1 mm'den büyük ve gözeneklerin bir kısmı birbirleriyle bağlantılıdır.

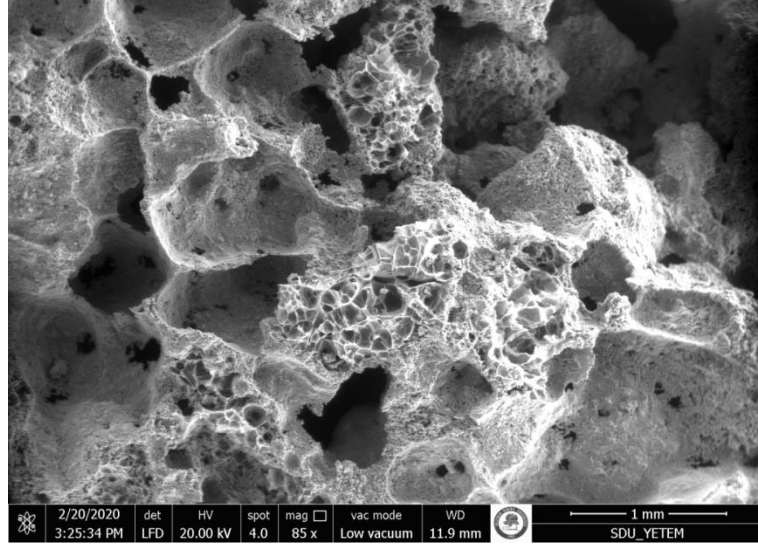
HP7 numunesine ait SEM görüntüsü Şekil 6.39'da verilmiştir.



Şekil 6.39. HP7 numunesine ait SEM görüntüsü (x 105)

HP7 numunesinde de boşluk boyutları ağırlıklı olarak 1 mm'den büyüktür. Bununla birlikte HP1'e göre yarı küresel hücre yapısı bozulmuş olup gözenekler arası bağlantıyı oluşturan kanalların daha yaygın olduğu görülmektedir.

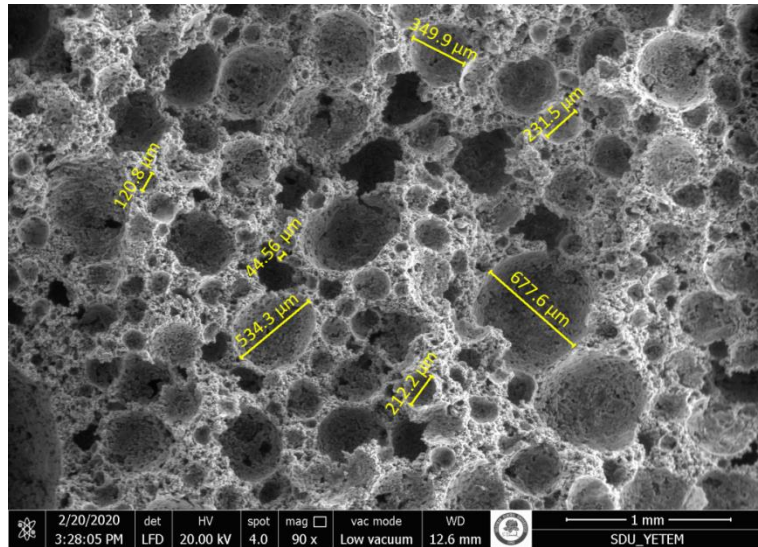
PLT4 numunesine ait SEM görüntüsü Şekil 6.40'da verilmiştir.



Şekil 6.40. PLT4 numunesine ait SEM görüntüsü (x 85)

PLT4 numunesinde genel olarak yarı küresel gözenek formu bozulmuştur. Bu durumun, karışıma dâhil olan PLT agregasından kaynaklandığı görüntüden anlaşılmaktadır. Ayrıca PLT agregaları görüntüde net bir biçimde ayırt edilebilmektedir. PLT agregaları haricinde hacmi dolduran hücrelerin neredeyse tamamı birbiriyle bağlantılıdır.

K3 numunesine ait SEM görüntüsü Şekil 6.41’de verilmiştir.



Şekil 6.41. K3 numunesine ait SEM görüntüsü (x 90)

K3 numunesinde hücresel boşlukların farklı büyüklükte küresel formda olduğu görülmektedir. Boşluk boyutlarının önemli bir bölümü 500 µm'den daha küçüktür. Hatta boyutları 100 µm'den daha küçük hücreler, yapı içerisinde önemli oranlarda mevcuttur. Hücrelerin büyük bölümü bağlantısız boşluk yapısındadır.

Tüm SEM görüntüleri incelendiğinde hafif beton numuneleri içerisinde en küçük gözenek boyutunu ve en homojen hücre dağılımını K3 numunesinin sergilediği belirlenmiştir. Ayrıca bu numunede bağlantılı boşluklar, diğer numunelere göre daha azdır.

Isıl yalıtım malzemelerinde ısı iletkenlik katsayısı, kuru birim hacim ağırlık ile yakından ilişkilidir. Bununla birlikte gözenek boyutlarının ısı iletkenliğe etkisi de göz ardı edilmemelidir. Kuru birim hacim ağırlık değerine olan etki daha çok katılarda görülen ısı iletimi ile ilişkilendirilebilirken, gözenek boyutu (belirli boyutun altındaki gözenek yapılarında) gazlarda görülen ısı iletimi (konveksiyonla iletim) ile ilişkilendirilebilir. Bu durum, K3 numunesinin ısı iletkenlik katsayısı değerinin nerdeyse aynı 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerine sahip olan HP7 numunesinden yaklaşık % 30 oranında düşük olma nedenini açıklamaktadır.

6.2.5. Kılcal su emme

Tez kapsamında “ $D_{kuru} \leq 250 \text{ kg/m}^3$, $f_c \geq 500 \text{ kPa}$, $\lambda \leq 0.065 \text{ W/mK}$ ” değerlerine sahip ürünlerin geliştirilmesi de amaçlanmıştır. Üretilen numunelerin içerisinde bu özelliklerin tamamını sağlayan bir numune elde edilememiştir. Yöntem I kapsamındaki numunelerin 45 günlük kuru birim hacim ağırlık ile basınç dayanımı değerleri arasındaki güçlü korelasyonun varlığı da gözetilerek KAÇ içeren hafif beton numuneleri arasında kılcal su emme ve yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybı deneylerinin HP7 numuneleri ve referans olarak PÇ ile üretilen PK1 numuneleri üzerinde yürütülmesi öngörülmüştür.

Kılcal su emme deneyleri 4'er adet prizma numunesi üzerinde TS EN 1015-18 standardına uygun olarak yürütülmüştür (Şekil 6.42). HP7 ve PK1 numunelerine ait bulgular Çizelge 6.21.'da verilmiştir.



Şekil 6.42. Kılcal su emme deneyi

Çizelge 6.21. 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin c değerleri

Seri No	Numune No	M _{kuru} (g)	M ₁ (g)	M ₂ (g)	c (kg/m ² dak ^{0.5})
HP7	1	69.05	93.09	94.64	0.163
	2	68.39	93.35	94.94	0.168
	3	66.76	90.95	92.54	0.168
	4	68.84	93.14	94.70	0.164
	Ort.				0.166
PK1	1	99.41	107.16	121.50	1.511
	2	97.22	105.19	118.37	1.389
	3	94.33	100.84	115.63	1.559
	4	97.09	105.34	118.80	1.418
	Ort.				1.469

HP7 numuneleri KAÇ ile Yöntem I'e uygun olarak, PK1 numuneleri ise PÇ ile Yöntem III'e göre üretilmiş olup 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri 350-400 kg/m³ aralığındadır. HP7 numunelerinin ortalama kılcal su emme değerleri 0.2 kg/m²dak^{0.5}'dan küçük, PK1 numunelerinin ortalama kılcal su emme değerleri ise büyüktür. TS EN 1015-18 standardına göre HP7 numuneleri W₂ kılcal su emme sınıfına girmekte, PK1 numuneleri ise TS EN 1015-18'de belirtilen sınır değerlerini aşmaktadır. Bu bulgular, çimento tipinin kılcal su emme değerini belirgin bir şekilde etkilediği sonucunu ortaya koymuştur.

6.2.6. Yüksek sıcaklıklarda dayanım kaybı

Yöntem I'e göre KAÇ ile üretilen HP7 ve Yöntem III'e göre PÇ ile üretilen PK1 hafif beton örneklerinden 4 farklı sıcaklık seviyesi için 3'er adet prizma numuneleri üretilmiştir. HP7 numunelerinin ortalama 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 334 kg/m^3 , PK1 numunelerinin ise 483 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Numuneler 20, 250, 500 ve $750 \text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıklarda 30 dakika süreyle kül fırınında bekletilip oda sıcaklığına inene kadar soğutulmuştur (Şekil 6.43). Sonrasında numunelerin kütle kaybı ve TS EN 1015-11 standardına uygun olarak eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Bulgular Çizelge 6.22, 6.23 ve 6.24'te verilmiştir.

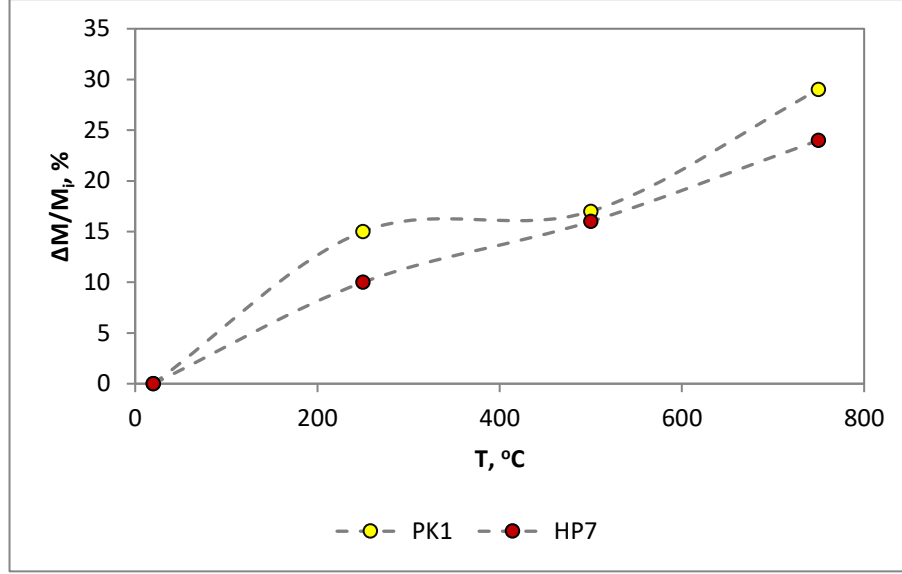


Şekil 6.43. Kül fırınında ısıtma işlemi

Çizelge 6.22. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin kütle değişimleri

Seri No	Numune No	T (°C)	M _i (g)	M _s (g)	ΔM (g)	ΔM/M _i (%)	Ort. ΔM/M _i (%)
HP7	1	20	65.840	65.840	0.000	0	0
	2		69.050	69.050	0.000	0	
	3		68.550	68.550	0.000	0	
HP7	1	250	66.140	60.530	5.610	8	10
	2		68.390	60.300	8.090	12	
	3		66.230	60.240	5.990	9	
HP7	1	500	67.170	56.420	10.750	16	16
	2		66.760	56.200	10.560	16	
	3		64.140	53.460	10.680	17	
HP7	1	750	67.000	50.010	16.990	25	24
	2		68.840	52.640	16.200	24	
	3		66.030	50.570	15.460	23	
PK1	1	20	99.390	99.390	0.000	0	0
	2		97.130	97.130	0.000	0	
	3		94.410	94.410	0.000	0	
PK1	1	250	96.020	81.750	14.270	15	15
	2		96.230	81.720	14.510	15	
	3		96.580	81.340	15.240	16	
PK1	1	500	97.210	80.350	16.860	17	17
	2		98.040	80.780	17.260	18	
	3		97.710	80.900	16.810	17	
PK1	1	750	98.940	69.360	29.580	30	29
	2		97.660	67.300	30.360	31	
	3		93.290	69.470	23.820	26	
M _i : İlk kütle M _s : Son kütle ΔM: Kütle farkı ΔM/M _i : Kütle kaybı							

HP7 ve PK1 numunelerinin kütlelerinin farklı sıcaklıklardaki değişimleri Şekil 6.44'te incelenmiştir.



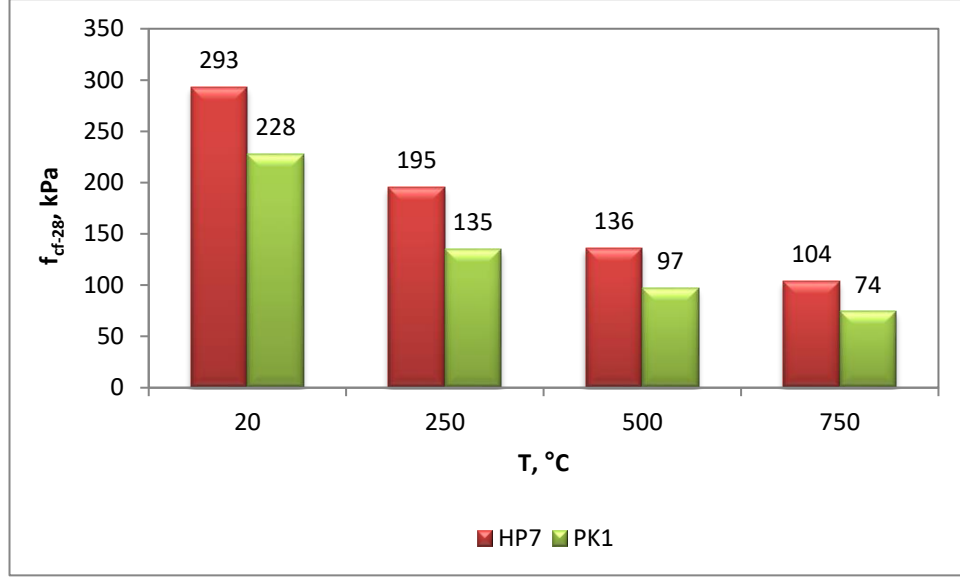
Şekil 6.44. 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin farklı sıcaklık seviyelerinde kütle kaybı

HP7 ve PK1 numunelerinin farklı sıcaklık seviyelerinde kütle kayıpları incelendiğinde sıcaklık artışıyla orantılı olarak sırasıyla % 0-24 ve 0-29 aralıklarında değiştiği belirlenmiştir. 250 °C'de HP7 numunelerindeki ortalama kütle kaybının PK1 numunelerinden daha az olması hidratasyon ürünlerinin farklı olmasına bağlanabilir. 250 °C'de PÇ ile üretilen PK1 numunelerinde gelişen dehidratasyonun KAÇ ile üretilen HP7 numunelerinden daha fazla olduğu sonucuna varılabilir. 500 °C'de her iki serinin de ortalama kütle kayıpları yaklaşık olarak aynıdır. Bu sıcaklık seviyesinde PÇ içeren PK1 numunelerindeki ortalama kütle kaybı kalsiyum hidratların ayrışmasına ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$), KAÇ içeren numunelerde ise yarı kararlı hidratasyon ürünlerinin (CAH_{10} ve C_2AH_8) dehidratasyonuna dayandırılmıştır. 750 °C'de HP7 numunelerine göre, PK1 numunelerindeki ortalama kütle kaybı yaklaşık % 5 daha yüksektir. Bu durumda özellikle 600 °C'den büyük sıcaklıklarda C-S-H bağlarının parçalanmasıyla ilişkilendirilebilir.

Çizelge 6.23. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin eğilme dayanımı değişimleri

Seri No	Numune No	T (°C)	F _{cf-28} (N)	f _{cf-28} (kPa)	Ort. f _{cf-28} (kPa)	Δf _{cf} (kPa)	Δf _{cf} /f _{cf-20} (%)
HP7	1	20	101	302	293	0	0
	2		93	278			
	3		99	298			
HP7	1	250	64	191	195	98	33
	2		66	199			
	3		65	195			
HP7	1	500	43	129	136	157	54
	2		47	142			
	3		46	137			
HP7	1	750	34	101	104	189	65
	2		35	105			
	3		35	105			
PK1	1	20	98	230	228	0	0
	2		98	231			
	3		95	225			
PK1	1	250	58	137	135	93	41
	2		61	144			
	3		51	123			
PK1	1	500	41	98	97	131	57
	2		40	95			
	3		42	99			
PK1	1	750	30	71	74	154	68
	2		31	73			
	3		33	78			
Δf _{cf} : Eğilme dayanımı farkı f _{cf-20} : 20 °C'deki eğilme dayanımı Δf _{cf} /f _{cf-20} : Eğilme dayanımı kaybı							

Farklı seviyelerdeki sıcaklıklarda bekletilen HP7 ve PK1 numunelerinin eğilme dayanımı değişimleri Şekil 6.45'te verilmiştir.



Şekil 6.45. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin eğilme dayanımı değişimleri

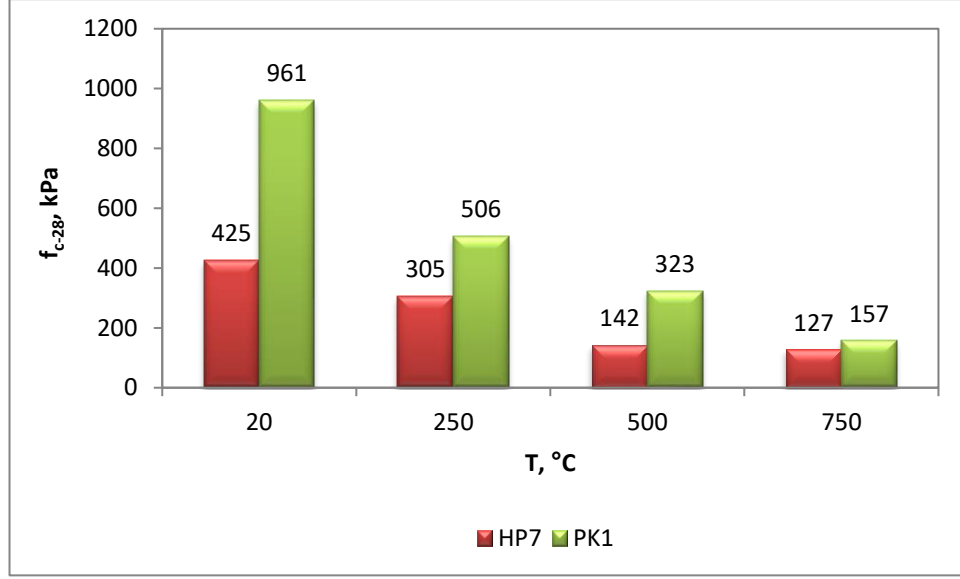
Yüksek sıcaklık deneyleri için üretilen HP7 ve PK1 numunelerinin ortalama 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 334 ve 483 kg/m³'tür. Bir başka deyişle PK1 numuneleri, HP7 numunelerine göre % 45 oranda daha ağırdır. Ancak HP7 numunelerinin PK1 numunelerine göre 20, 250, 500 ve 750 °C sıcaklıklardaki eğilme dayanımı değerleri sırasıyla % 28, 44, 40 ve 40 oranlarında daha yüksektir.

Çizelge 6.24. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin basınç dayanımı değişimleri

Seri No	Numune No	T (°C)	F _{c1-28} (N)	F _{c2-28} (N)	F _{c-28} (N)	f _{c-28} (kPa)	Ort. f _{c-28} (kPa)	Δf _c (kPa)	Δf _c /f _{c-20} (%)
HP7	1	20	434	487	461	366	425	0	0
	2		564	564	564	448			
	3		533	627	580	461			
HP7	1	250	252	331	292	232	305	120	28
	2		557	422	490	389			
	3		346	393	370	294			
HP7	1	500	181	152	167	133	142	283	66
	2		158	152	155	124			
	3		269	158	214	170			
HP7	1	750	111	123	117	93	127	298	70
	2		123	193	158	126			
	3		217	187	202	161			
PK1	1	20	1830	1343	1587	993	961	0	0
	2		1701	1220	1461	913			
	3		1556	1567	1562	977			
PK1	1	250	686	850	768	480	506	455	52
	2		874	733	804	503			
	3		856	845	851	537			
PK1	1	500	545	575	560	351	323	658	75
	2		557	457	507	317			
	3		404	563	484	303			
PK1	1	750	146	196	171	107	157	804	92
	2		305	287	296	186			
	3		275	293	284	178			

Δf_c: Basınç dayanımı farkı
f_{c-20}: 20 °C'deki basınç dayanımı
Δf_c/f_{c-20}: Basınç dayanımı kaybı

Farklı seviyelerdeki sıcaklıklarda beklenen HP7 ve PK1 numunelerinin basınç dayanımı değişimleri Şekil 6.46'da verilmiştir.



Şekil 6.46. Farklı sıcaklık seviyelerinde 28 günlük HP7 ve PK1 numunelerinin basınç dayanımı değişimleri

20 °C sıcaklıkta PK1 numunelerinin ortalama 28 günlük basınç dayanımı değeri, HP7 numunelerinkinden % 127 oranında daha yüksektir. Bu farklılık, her iki serinin ortalama 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerinin farklı olmasından kaynaklanmıştır (PK1 ve HP7 için ortalama 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 483 ve 334 kg/m³). Bununla birlikte 750 °C’de bu fark % 24 oranına düşmüştür. Bir başka deyişle 750 °C’de PK1 numunelerinin dayanım kaybı, HP7 numunelerinden çok daha yüksektir.

250, 500 ve 750 °C sıcaklıklarda PK1 numuneleri basınç dayanımı kaybı sırasıyla % 47, 66 ve 84 oranlarında iken HP7 numunelerinde bu oranlar % 28, 67 ve 70 olarak gerçekleşmiştir. 250 °C’de HP7 numunelerinin basınç dayanımı kayıpları PK1 numunelerinden daha az, 500 °C’de neredeyse eşit ve 750 °C’de yine HP7 numunelerinin kayıp oranları daha düşüktür. Farklı sıcaklık seviyelerindeki dayanım kaybı oranlarının nedenlerinin, kütle kaybı için de açıklanan mekanizmalara dayandığı tahmin edilmektedir.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

PÇ içeren kompozitlerde dayanım, dayanıklılık, işlenebilirlik ve diğer özellikleri geliştirmek amacıyla başarıyla kullanılabilen pek çok katkı maddesi, KAÇ kullanılan kompozitlerde kullanılamamaktadır. Bunun en önemli nedeni her iki çimento klinker bileşenleri ve dolayısıyla hidrasyon ürünlerinin farklı olmasıdır. PÇ içeren karışımlarda başarı ile kullanılabilen protein, enzim ya da sentetik bazlı köpük ajanları, hava sürükleyici polimerler ve reaktif alümina tozu gibi gaz yapıcı maddeler (genleştirme ajanları) KAÇ içeren karışımlarda başarısız olmaktadır. Bunun sonucu olarak ya genişleme kalıcı olmamakta, pek çok kez çimento hidrasyonu durmakta ya da sertleşme ve dayanım kazanma olayı gerçekleşmemektedir.

Çalışmada KAÇ bağlayıcılı hafif beton numuneleri 3 farklı yöntemle üretilmiştir. Yöntem I'de genleştirme ajanı olarak HP kullanılmıştır. Yöntem II'de HP oranı azaltılarak karışıma hafif agrega (PLT) ilave edilmiştir. Yöntem III'te ise hafif beton karışıma K ilave edilerek elde edilmiştir. Her üç yöntemde de harca kıvam kazandırmak amacıyla farklı oranlarda kıvam artırıcı katkı (CMC); genleştirme ajanı, K ve kıvam artırıcı katkının priz süresine olan olumsuz etkilerini bastırmak amacıyla da KAÇ çimentosuyla uyumlu priz hızlandırıcı katkı (LK) kullanılmıştır.

KAÇ içeren harçlarda işlenebilirlik, genişleme ve/veya hacim kaybı etkileri gözlenerek en uygun LK oranı % 0.1 ve CMC oranı % 0.01 olarak belirlenmiştir. Bu oranlarda hazırlanan harçların priz başlama ve priz sonu süreleri 30 ve 45 dak olarak belirlenmiştir.

Yöntem I'e göre üretilen HP1, HP2, HP3, HP4 ve HP5 numunelerinde CMC hariç tüm bileşenlerin miktarları sabit tutulmuş ve CMC oranlarının (% 0.01, 0.02, 0.03, 0.04 ve 0.05) taze birim hacim ağırlığa etkisi incelenmiştir. Bulgular değerlendirildiğinde farklı oranlarda CMC içeren numunelerin taze birim hacim ağırlıklarının 390 kg/m^3 civarında olduğu, tek başına CMC oranının taze birim hacim ağırlığa ve dolayısıyla genişleme oranına bir etkisinin olmadığı belirlenmiştir. Bu bağlamda priz süresine olumsuz etkisi de dikkate olarak optimum CMC oranı % 0.1 olarak belirlenmiştir.

Yine Yöntem I'e göre üretilen HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 numunelerinde HP hariç tüm bileşenlerin miktarları sabit tutulmuş ve HP oranlarının (çimento kütlelerinin % 1, 2, 3, 4 ve 5) taze birim hacim ağırlığına etkisi incelenmiştir. Bulgular değerlendirildiğinde HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 numunelerinde taze birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 780, 488, 390, 325 ve 244 kg/m³'tür. Bir başka deyişle her % 1 HP oranındaki artış ortalama olarak 70 cm³'lük genişlemeye sebep olmuştur.

Yöntem II'de HP oranı (% 2) sabit tutularak PLT1, PLT2, PLT3 ve PLT4 numunelerinde karışıma PLT (sırasıyla % 5, 10, 15 ve 20) ilave edilmiş ve ilave edilen miktar kadar çimento eksiltmiştir. PLT oranındaki artışa bağlı olarak taze birim hacim ağırlık değerleri de lineer olarak artmıştır (sırasıyla 495, 521, 548 ve 574 kg/m³). Sonuç olarak KAÇ içeren numunelerde PLT oranındaki artışın (belirli bir sınır değerinin altında) taze birim hacim ağırlık değerlerini azaltmada etkin olmadığı belirlenmiştir.

Yöntem III'te taze birim hacim ağırlık, K ilavesi ile azaltılmaya çalışılmıştır. K1, K2 ve K3 numunelerinde s/ç oranı ve diğer bileşen oranları sabit tutulurken sırasıyla 70, 60 ve 50 kg/m³ K ve 130, 195 ve 260 kg/ m³ çimento kullanılmıştır. K1 ve K2 numunelerinde teorik ve gerçek taze birim hacim ağırlıkları eşitken, K3 numunesinde gerçek taze birim hacim ağırlık (907 kg/m³), teorik taze birim hacim ağırlık değerinden (680 kg/m³) çok daha yüksektir. Artan çimento dozajı köpük kararlılığı bozmuş ve hacim kaybını artırmıştır.

Yöntem I'e göre üretilen HP1, HP2, HP3, HP4 ve HP5 numunelerinde artan CMC oranı genişleme oranını etkilememiştir (tüm numunelerde $e = 4.72$). Ancak aynı yöntemle üretilen HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 numunelerinde HP oranındaki artışa bağlı olarak genişleme oranı da sırasıyla 2.36, 3.77, 4.72, 5.66 ve 7.55 olarak lineer olarak değişmiştir. Çimento kütlelerinin % 5 oranında HP kullanımı hacmi 7.5 kat kadar artırmıştır. HP oranı ve genişleme oranı arasındaki ilişki (Şekil 6.6) güçlü bir korelasyona sahip olması, tasarımda HP oranına bağlı hacim artışının hesaplanabilmesinin mümkün olduğunu ortaya koymuştur ($R^2 = 0.98$).

Yöntem II'de sabit HP oranında ve çimento ile yer değiştirme yöntemine (ikame) göre ilave edilen % 5, 10, 15 ve 20 PLT oranlarında genleşme oranları sırasıyla 4.15, 3.59, 3.08 ve 2.69 olarak gerçekleşmiştir. PLT oranı-genleşme oranı (Şekil 6.7) arasında ters orantı söz konusudur ($R^2 = 0.99$). Bu sonuç karışımında artan PLT miktarının HP'nin genleşme etkisini bastırdığını açık bir biçimde ortaya koymuştur.

Sertleşmiş beton numunelerinde CMC oranındaki artış kuru birim hacim ağırlık değerlerinde artışa neden olmuştur. Numunelerin 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla % 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05 CMC oranları için 264, 269, 273, 281 ve 293 kg/m^3 olarak gerçekleşmiştir. HP1, HP2, HP3, HP4 ve HP5 numunelerinin taze birim hacim ağırlık değerleri değişmezken, kuru birim hacim ağırlık değerleri CMC oranıyla doğru orantılı olarak gerçekleşen bu artışın priz süresindeki artan gecikmeye bağlı gelişen hacim kaybıyla ilişkili olduğu tahmin edilmektedir. Bu ilişki 45 günlük numunelerde de benzerdir. Bu bulgular optimum CMC oranının % 0.01 olarak seçilmesini desteklemektedir.

HP6, HP7, HP8, HP9 ve HP10 numunelerinde % 1, 2, 3, 4 ve 5 HP oranları için 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 541, 339, 264, 218, 163 kg/m^3 'tür. Yöntem I kapsamında üretilen HP6 numunesi haricindeki numunelerde $D_{\text{kuru}} \leq 500 \text{ kg/m}^3$ hedefi sağlanmıştır. 45 günlük numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri 28 günlük numunelere oldukça yakındır. Bulgular KAÇ içeren hafif beton numunelerinde $D_{\text{kuru}} \leq 500 \text{ kg/m}^3$ hedefi için HP oranının en az % 2 olarak seçilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Yöntem I ve II'ye göre üretilen numunelerin özelliklerini karşılaştırabilmek için Yöntem III'e göre üretilen K1, K2 ve K3 numunelerinin 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 141, 225 ve 340 kg/m^3 'tür. 45 günlük numunelerde kuru birim hacim ağırlık değerleri 143, 227 ve 348 kg/m^3 olarak gerçekleşmiştir.

Yöntem I'e göre üretilen hafif beton numunelerinde HP oranı artışı sonucu 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerinin azalmasıyla birlikte eğilme ve basınç dayanım değerleri de önemli oranda azalmıştır. Dayanımlardaki bu azalma, KAÇ hidratasyonunda düşük yoğunluklu yarı kararlı hidratların daha yüksek bir yoğunluğa sahip kararlı hidratlara dönüşümü esnasında porozite (gözeneklilik) artışına bağlı

dayanım azalması olgusuna dayandırılmıştır. 28 günlük eğilme dayanımı değerleri için kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki her 100 kg/m³'lük azalma yaklaşık 180 kPa'lık dayanım kaybına neden olmuştur. 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki azalma hafif beton numunelerinin basınç dayanım değerlerini de eğilme dayanım değerlerinden daha yüksek oranda etkilemiştir. 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri için her 100 kg/m³'lük hafifleme basınç dayanım değerlerinde ortalama 380 kPa'lık azalışa neden olmuştur. Dayanım kaybına neden olan mekanizma eğilme dayanımı kaybında açıklanan gerekçe ile aynıdır. Ayrıca HP oranları % 1, 2, 3, 4 ve 5 için f_{cf-28}/f_{c-28} oranları sırasıyla 0.51, 0.81, 1.07, 1.32 ve 1.07'dir.

Yöntem II'ye göre üretilen hafif beton numunelerinde PLT1 (PLT oranı % 5), 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri 273 kg/m³ iken PLT4 (PLT oranı % 20)'te 302 kg/m³ olmuştur. Buna karşılık 28 günlük eğilme dayanımı değeri PLT1'de 124 kPa iken, PLT4'te 218 kPa değerine ulaşmıştır. Bir başka deyişle % 15 oranında daha fazla PLT kullanımı 28 günlük birim hacim ağırlık değerlerini % 10 artırırken eğilme dayanım değerlerini % 75 oranında iyileştirmiştir. 28 günlük eğilme dayanım değerlerine göre basınç dayanımı değerlerindeki iyileşme daha fazladır. 28 günlük basınç dayanım değeri PLT1'de 161 kPa iken, PLT4'te 352 kPa değerine ulaşmıştır. Bir başka deyişle % 15 oranında daha fazla PLT kullanımı 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerini % 10 artırırken basınç dayanım değerlerini % 118 oranında iyileştirmiştir.

Yöntem III'e göre üretilen hafif numunelerinden K1 ve K3 numuneleri karşılaştırıldığında, k/ç oranının azalmasına bağlı olarak 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri % 141 oranında artarken eğilme dayanım değerleri de % 217 oranında artmıştır. Aynı ilişki açısından 28 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde bu artış % 587 oranındadır. Başka bir deyişle 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerlerindeki artışa bağlı olarak eğilme dayanım değerleri yaklaşık 2 kat, basınç dayanım değerleri ise 6 kat artmıştır.

Deney sonuçlarından elde edilen bulgular ışığında Yöntem I, II ve III'e göre üretilen hafif beton numuneleri içerisinde optimum fiziko-mekanik özellikleri sağlayan numuneler belirlenmiştir. Buna göre Yöntem I'den HP1 ve HP7, Yöntem II'den

PLT4 ve Yöntem III'ten ise K3 numunesi belirlenen kriterlere uygunluk göstermiştir. HP1, HP7 ve PLT4 numunelerinde 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri ile basınç dayanımı değerleri arasında doğrusal bir ilişki vardır (sırasıyla 269 kg/m³-245 kPa, 342 kg/m³-464 kPa, 305 kg/m³-358 kPa). Ancak K3'te basınç dayanımı, yüksek kuru birim hacim ağırlığına rağmen beklenen seviyede artış göstermemiştir (348 kg/m³-366 kPa). Bu durumun köpük ajanının KAÇ hidrasyonu ile oluşan yarı kararlı hidratların kararlı hidratlara dönüşümünü olumsuz etkilemesinden kaynaklandığı tahmin edilmektedir.

Isıl iletkenlik değerleri HP1, HP7, PLT4 ve K3 numuneleri ısı iletkenlik değerleri Lasercomp Fox 50 cihazıyla Isı Akış Metodu'na göre ölçülmüştür. Numunelerde “ $\lambda \leq 0.065$ W/mK” hedefi sağlanamamış olmakla birlikte K3 ve HP1 numunelerinin ısı iletkenliği (sırasıyla 0.068 ve 0.070 W/mK) ısı yalıtım malzemesi üst sınırına oldukça yakındır. 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değeri, K3'e çok yakın olan HP7'nin ısı iletkenliği çok daha yüksektir (0.092 W/mK). HP1, HP7 ve PLT4 numunelerinde genişletme ajanı olarak HP kullanılmış olup bu numuneler için ısı iletkenlik katsayısı değerleri 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri ile ilişkililikten, K3'te bu ilişki bozulmuştur. Numunelerin SEM görüntülerinin analiz edildiği, numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin yalnızca kuru birim hacim ağırlık değerleri ile değil, aynı zamanda gözenek boyutlarıyla da ilişkili olduğunu ortaya koymuştur. HP1 ve HP7 numunesinde de boşluk boyutları ağırlıklı olarak 1 mm'den büyüktür. PLT4 numunesinde boşlukların yarı küresel gözenek formu bozulmuştur. K3 numunesinde hücrel boşluklar küresel formda ve 500 µm'den daha küçüktür. Hücrelerin büyük bölümü bağlantısız boşluk yapısındadır. Bu durum, K3 numunesinin ısı iletkenlik katsayısı değerinin neredeyse aynı 45 günlük kuru birim hacim ağırlık değerine sahip olan HP7 numunesinden yaklaşık % 30 oranında düşük olma nedenini açıklamaktadır.

HP7 numunelerinin ortalama kılcal su emme değerleri 0.2 kg/m² dak^{0.5}'den küçük, PK1 numunelerinin ortalama kılcal su emme değerleri ise büyüktür. TS EN 1015-18 standardına göre HP7 numuneleri W₂ kılcal su emme sınıfına girmekte, PK1 numuneleri TS EN 1015-18'de belirtilen sınır değerlerini oldukça aşmaktadır. Bu bulgular, çimento tipinin kılcal su emme değerini belirgin bir şekilde etkilediği sonucunu ortaya koymuştur.

Yüksek sıcaklık deneyleri için üretilen HP7 ve PK1 numunelerinin ortalama 28 günlük kuru birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla 334 ve 483 kg/m³'tür. Bir başka deyişle PK1 numuneleri, HP7 numunelerine göre % 45 oranda daha ağırdır. Ancak HP7 numunelerinin PK1 numunelerine göre 20, 250, 500 ve 750 °C sıcaklıklardaki eğilme dayanımı değerleri sırasıyla % 28, 44, 40 ve 40 oranlarında daha yüksektir. 20 °C sıcaklıkta PK1 numunelerinin ortalama 28 günlük basınç dayanımı değeri, HP7 numunelerinkinden % 127 oranında daha yüksek iken, 750 °C'de bu fark % 24 oranına düşmüştür. Bir başka deyişle 750 °C'de PK1 numunelerinin dayanım kaybı, HP7 numunelerinden çok daha yüksektir. 250, 500 ve 750 °C sıcaklıklarda PK1 numuneleri basınç dayanımı kaybı sırasıyla % 47, 66 ve 84 oranlarında iken, HP7 numunelerinde bu oranlar % 28, 67 ve 70 olarak gerçekleşmiştir. 250 °C'de HP7 numunelerinin basınç dayanımı kayıpları PK1 numunelerinden daha az, 500 °C'de neredeyse eşit ve 750 °C'de yine HP7 numunelerinin kayıp oranları daha düşüktür. Bu durum KAÇ'nin PÇ'ye göre yüksek sıcaklığa daha dayanıklı olduğunun da bir göstergesidir.

Sonuç olarak bu tez kapsamında KAÇ ile üç farklı yöntemle " $\lambda \leq 0,065 \text{ W/mK}$ " hedefi tam olarak sağlanamamıştır. Bununla birlikte " $D_{\text{kuru}} \leq 500 \text{ kg/m}^3$ ve $f_c \geq 250 \text{ kPa}$ " hafif beton numunelerin üretimi gerçekleştirilmiştir. KAÇ içeren hafif beton numunelerinde HP ve K kullanımı karşılaştırıldığında, HP kullanımında daha hafif ve daha yüksek dayanımda hafif beton yapılabilen iken, gözenek boyutları daha büyük ve dolayısıyla ısı iletkenlik değerleri daha yüksektir. Buna karşılık K kullanımında kuru birim hacim ağırlık değerleri artmakta; ancak gözenek boyutu daha küçük ve homojen dağılıma sahip olması nedeniyle ısı iletkenlik azalmaktadır. Bu durum KAÇ içeren ısı yalıtım malzemeleri üretimi araştırmalarında K kullanımının göz ardı edilmemesi gerektiğini ortaya koymuştur.

KAÇ içeren hafif beton üzerine yürütülecek akademik ve Ar-Ge çalışmalarında köpük ajanlarının KAÇ hidrasyonunda yarı kararlı hidratların kararlı hidratlara reaksiyonlarına etki mekanizmalarının açıklanması ve bastırılmasına yönelik çalışmaların yürütülmesi önemlidir. Ayrıca köpük-genleştirme ajanı kullanılan hibrit yöntemlerin denenmesi de daha üstün teknolojik özelliklere sahip KAÇ içeren hafif betonların geliştirilmesinde yarar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Amran, M. Y. H., 2015. Properties and Applications of Foamed Concrete; a Review. Construction and Building Materials, 101 (1), 990-1005.
- Anonim, 2020a. Sodyum Karboksümetil Selüloz. Erişim Tarihi: 15.01.2020. <http://www.hammaddeleransiklopedisi.com/makale-detay.php?seo=cmc-ve-kullanimi-hammaddeler-ansiklopedisi>.
- Anonim, 2020b. Lityum Karbonat. Erişim Tarihi: 15.01.2020. <https://www.molarkimya.com/urun/lityum-karbonat-1-kg>.
- Anonim, 2020c. Hidrojen Peroksit. Erişim Tarihi: 15.01.2020. <https://www.labor.com.tr/urun/hidrojen-peroksit-30-0-perhidrol-pur-gr-5-lt>.
- Anonim, 2020d. Potasyum İyodür. Erişim Tarihi: 15.01.2020. https://tr.wikipedia.org/wiki/Potasyum_ıyod%C3%BCr.
- Anonim, 2020e. Genleşmiş Perlit. Erişim Tarihi: 15.01.2020. <http://www.pertas.com/genlesmis-perlit.html>.
- Anonymous, 2018a. ACI Concrete Terminology (ACI 213R). Erişim Tarihi: 15.01.2018. <https://www.concrete.org/topicsinconcrete/topicdetail/L%C4%B0GHTWE%C4%B0GHT>.
- Anonymous, 2018b. Concrete. Erişim Tarihi: 15.01.2018. <https://theconstructor.org/concrete>.
- Anonymous, 2018c. Lightweight Concrete. Erişim Tarihi: 15.01.2018. <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=12>.
- Anonymous, 2018d. Lightweight Concrete. Erişim Tarihi: 15/01/2018. <https://www.concretecentre.com/Specification/Special-Concrete/lightweight-concrete.aspx>.
- Arı, K., Haktanır, T., Altun, F., Karahan, O., 2004, Kalsiyum Alüminatlı Çimentonun Refrakter Olarak Kullanılması. Beton 2004 Kongresi, 10-12 Haziran, 266-277, İstanbul.
- Aydın, M., 2019. Kalsiyum Alüminat Çimentosu ile Portland Çimentosunun Karşılaştırılması. Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, Adana.
- Bakırhan, M., 2019. Pomza ve Perlit Kullanılarak Üretilen Kompozit Hafif Beton Tasarımı ve Özelliklerinin İncelenmesi. Bitlis Eren Üniversitesi, Fen Bilimleri Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, 58s, Bitlis.
- Barborak, R., 2010. Calcium Aluminate Cement Concrete (Class CAC Concrete). Texas Department of Transportation (TxDOT), Technical Advisory, SS-4491.

- Bensted, J., 2002. Calcium Aluminate Cements. In Bensted, J., Barnes, P. (Eds.), Structure and Performance of Cement (2nd Edition) (114-138), Taylor & Francis, 584p, Oxfordshire.
- Bing, C., Zhen, W., Ning, L., 2012. Experimental Research on Properties of High-Strength Foamed Concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 24 (1), 113-118.
- Bizzozero, J., 2014. Hydration and Dimensional Stability of Calcium Aluminate Cement Based Systems. Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne (EPFL), Ph.D. Thesis, 189p, Lausanne.
- Çetin, C., Delibaş, T., Kırca, Ö., Yaman, İ., Ö., 2015. Köpük Beton İmalatlarında Kalsiyum Aluminat Çimentosu Kullanımı, 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan, Antalya, 163-170.
- ÇİMSA A. Ş., 2020a. ISIDAÇ 40 Calcium Aluminate Cement Building Chemicals Applications. Erişim Tarihi: 15.01.2020. <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/4FE58AA58E3A4B7B85FA9E4EE011A8/5D52AAA7A978476984B32DCB0B058D42.pdf>.
- ÇİMSA A. Ş., 2020b. 01 Ocak-30 Haziran 2017 Yönetim Kurulu Ara Dönem Faaliyet Raporu. Erişim Tarihi: 15.01.2020. <https://www.cimsa.com.tr/ca/docs/71DDECEE521E470BA4ADA95A091840/6FA3C495E1304720A95A980EDDE3121D.pdf>
- Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., Kuru, M. Kuru, 2015. Farklı Yoğunluktaki Köpük Betonların Dayanım ve Isıl İletkenlik Özellikleri, 9. Ulusal Beton Kongresi, 16-18 Nisan, Antalya, 93-102.
- Davraz, M., Kılınçarslan, Ş., 2015. Investigation of Relation of Between Compressive Strength and Ultrasonic Pulse Velocity in the Foam Concrete with Different Density. International Conference on Civil and Environmental Engineering (ICOCEE)-Cappadocia 2015, May 20-23, Nevşehir, 994-998.
- Demirboğa, R., Örüng, İ., Gül, R., 2001. Effects of Expanded Perlite Aggregate and Mineral Admixtures on the Compressive Strength of Low-Density Concretes. Cement and Concrete Research, 31(11), 1627-1632.
- Dominik, M., 2004. Foamed Cementitious Materials. Swiss Federal Institute of Technology in Zurich (ETHZ), Institute of Building Materials, Term Work, 105p, Zurich.
- Engin, C., 2018. Farklı Tane Boyutlu Genleştirilmiş Perlit Agregası ile Üretilen Ultra Hafif Betonların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 65s, Van.

- Erkmen, K. C., 2018. Hydration Behavior and Strength Development of Mineral Admixture Incorporated Calcium Aluminate Cements. Middle East Technical University (METU), Graduate School of Natural and Applied Sciences, Master of Science (MSc) Thesis, 73p, Ankara.
- Fishwick J. H., 1982. Calcium Aluminate Cement Concrete. *Concrete Construction*, 27(6), 437-441.
- Garsel, D. V., 1996. High Alumina Cements and Chemical Binders. Training Seminar on Refractories Technology-an Introduction and Update, March 8, South Africa, 1-15.
- Gosselin, C., 2009. Microstructural Development of Calcium Aluminate Cement Based Systems with and without Supplementary Cementitious Materials. École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Ph.D. Thesis, 220p, Lausanne.
- Gökçe, H. S., 2010. Hafif Beton Üretiminde Ham ve Genleştirilmiş Perlitin Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 43s, Ankara.
- GÖLTAŞ ÇİMENTO A. Ş., 2018. Aylık Çimento Analiz Sonuçları (Ocak 2018). TS EN 197-1-CEM I 42.5 R, 1s.
- Guirado, F. G., Galí, S., 2006. Quantitative Rietveld Analysis of CAC Clinker Phases Using Synchrotron Radiation. *Cement and Concrete Research*, 36 (11), 2021-2032.
- Idrees, M., Sonyal, M. S., Ekincioglu, Ö., 2019. Calorimetric Investigation of Supplementary Cementitious Material Incorporated Calcium Aluminate Mortars. 10. International Concrete Congress, May 2-4, Bursa, 373-382.
- Ismail, H. K. M., Fathi, M. S., Manaf, N., 2004. Study of Lightweight Concrete Behaviour. University of Technology Malaysia (UTM), Faculty of Civil Engineering, Project Report, 30p, Kuala Lumpur.
- Jalal M. D., Tanveer, A., Jagdeesh, K., Ahmed, F., 2017. Foam Concrete. *International Journal of Civil Engineering Research*, 8 (1), 1-14.
- Kan, Y., Pei, K., Cheng, M., 2017. A Study of Fracture Properties of High Alumina Shielding Concrete (HASC). 24th Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, August 20-25, Busan, Division I: 10p.
- Karthikeyan, B., Selvaraj, R., Saravanan, S., 2015. Mechanical Properties of Foam Concrete. *International Journal of Earth Sciences and Engineering*, 8 (2), 115-119.
- Kırca, Ö. (2006). Temperature Effect on Calcium Aluminate Cement Based Composite Binders. Middle East Technical University (METU), Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ph.D. Thesis, 209p, Ankara.

- Klaus, S., Buhr, A., Schmidtmeier, D., Kuiper, S., 2015. Hydration of Calcium Aluminate Cement Phases CA and CA₂ in Refractory Applications. UNITECR 2015-14th Biennale Worldwide Congress: The Unified International Technical Conference on Refractories, Proceeding 333: 4p, Vienna.
- KNOPP Group, 2020. CONTOPP® Foambuilder SFS3. Erişim Tarihi: 15.01.2020. http://www.knopp-chemie.com/main/getfile.php?download_id=349&language=english.
- Kramar, D., Bindiganavile, V., 2011. Mechanical Properties and Size Effects in Lightweight Mortars Containing Expanded Perlite Aggregate. *Materials and Structures*, 44(4), 735-748.
- Kurdowski, W., 2014. *Cement and Concrete Chemistry*. Springer, 700p, Heidelberg.
- Liu, M. Y. J., Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Mo, K. H., 2014. Evaluation of Thermal Conductivity, Mechanical and Transport Properties of Lightweight Aggregate Foamed Geopolymer Concrete. *Energy and Buildings*, 72, 238-245.
- Yusof, N. B. M., 2009. Production of Foamed Concrete with a Method of Mixing. University of Malaysia Sarawak (UNIMAS), Faculty of Engineering, B.Sc. Thesis, 68p, Sawarak.
- Mangabhai, R. J. (Ed.) (1990). *Calcium Aluminate Cements*. Chapman and Hall, 396p, New York.
- Mydin, M. A. O., Wang, Y. C., 2012. Mechanical Properties of Foamed Concrete Exposed to High Temperatures. *Construction and Building Materials*, 26 (1), 638-654.
- Nambiar, E. K., Ramamurthy, K., 2007. Air-void Characterisation of Foam Concrete. *Cement and Concrete Research*, 37 (2), 221-230.
- Nambiar, E.K., Ramamurthy, K., Asce, M., 2009. Shrinkage Behavior of Foam Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 21 (11), 631-636.
- Narayanan, N., Ramamurthy, K., 2000. Structure and Properties of Aerated Concrete: a Review. *Cement and Concrete Composites*, 22 (5), 321-329.
- Neville, A. M. (1995). *Properties of Concrete* (4th Edition). Longman Group, 844p, London.
- Ng, G. B. S. (2012). Interactions of Polycarboxylate Based Superplasticizers with Montmorillonite Clay in Portland Cement and with Calcium Aluminate Cement. Technical University of Munich (TUM), Faculty of Chemistry, Ph.D. Thesis, 52p, Munich.

- Panesar, D. K. (2013). Cellular Concrete Properties and the Effect of Synthetic and Protein Foaming Agents. *Construction and Building Materials*, 44, 575-584.
- Ramamurthy, K., Nambiar, E. K., Ranjani, G. I. S., 2009. A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31 (6), 388-396.
- Robson, T. D., 1962. *High Alumina Cement and Concretes (Concrete Library)*. Contractors Record Ltd., 264p, London.
- Scheinherrová, L., Trník, A., 2017. Hydration of Calcium Aluminate Cement Determined by Thermal Analysis. *International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2016)*, September 19-25, Rhodes, AIP Conference Proceedings 1866 (1): 040034.
- Scrivener, K. L. (2003a). New Developments in CAC Based Concretes. 28th Conference on Our World in Concrete & Structures, August 28-29, Singapore, 49-59.
- Scrivener, K. L. (2003b). Calcium Aluminate Cements. In Newman, J., Choo, B. S. (Eds.), *Advanced Concrete Technology Constituent (2/1-2/30)*, Elsevier Ltd, Oxford.
- Scrivener, K. L., Capmas, A. (1998). Calcium Aluminate Cements. In Hewlett, P. C. (Ed.), *Lea's Chemistry of Cement and Concrete (4th Edition) (713-775)*, Elsevier Ltd, Oxford.
- Sucu, M., Delibaş, T., 2015. Kalsiyum Alüminat Çimentosu Bazlı Tamir Betonları. *Hazır Beton Dergisi*, 131, 88-94.
- Şavik, E., Demer, S., Memiş, Ü., Doğuç, D. K., Çalışkan, T. A., Sezer, M. T., Gültekin, F., Özgür, N., 2012. Isparta ve Çevarında Tüketilen Suların İçerik ve Sağlık Açısından Değerlendirilmesi. *SDÜ Tıp Fakültesi Dergisi*, 19 (3), 92-102.
- Şengül, K., 2018. Influence of Perlite Addition on the Strength Development and Thermal Stability of Calcium Aluminate Cement Mortars. Middle East Technical University (METU), Graduate School of Natural and Applied Sciences, M.Sc. Thesis, 122p, Ankara.
- Swift, P. D. (2013). The Development of Calcium Aluminate Phosphate Cement for Radioactive Waste Encapsulation. University of Sheffield, Faculty of Engineering, Ph.D. Thesis, 256p, Sheffield.
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement Chemistry (2nd Edition)*. Thomas Telford Services Ltd, 549p, London.
- TS 825, 2013. *Binalarda Isı Yalıtım Kuralları*. TSE, Ankara.

- TS EN 196-3, 2017. Çimento Deney Yöntemleri-Bölüm 3: Priz Süreleri ve Genleşme Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1015-6, 2000. Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 6: Taze Harcın Boşluklu Birim Hacim Kütlesinin Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1015-10, 2001. Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütlesinin Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1015-11, 2000. Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 1015-18, 2004. Kâgir Harcı-Deney Yöntemleri-Bölüm 18: Sertleşmiş Harcın Kapiler Etkiden Kaynaklanan Su Emme Katsayısının Tayini. TSE, Ankara.
- TS EN 12667, 2003. Yapı Malzemeleri ve Mamullerinin Isıl Performansı-Mahfazalı Sıcak Plaka ve Isı Akış Sayacı Metotlarıyla Isıl Direncin Tayini-Yüksek ve Orta Isıl Dirençli Mamuller. TSE, Ankara.
- Odler, I., 2000. Special Inorganic Cements. Taylor & Francis, 416p, Oxfordshire.
- Oliveira, I. R., Pandolfelli, V. C., Jacobovitz, M., 2010, Chemical, Physical and Mechanical Properties of a Novel Calcium Aluminate Endodontic Cement. International Endodontic Journal, 43 (12), 1069-1076.
- Orcay, E. A., 2010. Hafif Betonların Mekanik Özellikleri ve Isı İletkenlik Katsayıları. İstanbul Teknik Üniversitesi (İTÜ), Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 67s, İstanbul.
- Öztürk, M., 2012. Pomza ve Perlit İçerikli Hafif Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 47s, Tekirdağ.
- Pöllmann, H., 2012. Calcium Aluminate Cements-Raw Materials, Differences, Hydration and Properties. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 74 (1), 1-82.
- Vakhshouri, B., Nejadi, S., 2016. Mix Design of Light-Weight Self-Compacting Concrete, Case Studies in Construction Materials, 4, 1-14.
- Vilches, J., Ramezani, M., Neitzert, T., 2012. Experimental Investigation of the Fire Resistance of Ultra Lightweight Foam Concrete. International Journal of Advanced Engineering Applications, 1 (4), 15-22.
- Visagie, M., 2000. The Effect of Microstructure on the Properties of Foamed Concrete. University of Pretoria, Faculty of Engineering, M.Sc. Thesis, 151p, Pretoria.

Yaman, İ. Ö., 2015. Farklı Bağlayıcıların Kalsiyum Alüminat Çimentosu Esaslı Harçlar Üzerindeki Etkileri. 1. Yapı Kimyasalları Semineri, 10 Eylül, 2. Sunum: 61s, İstanbul.

Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., Wang, H., 2015. Mechanical, Thermal Insulation, Thermal Resistance and Acoustic Absorption Properties of Geopolymer Foam Concrete. Cement and Concrete Composites, 62, 97-105.



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Burak YANARDAĞ
Doğum Yeri ve Yılı : Konak, 1995
Medeni Hali : Bekâr
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : burakyanardag95@gmail.com



Eğitim Durumu

Lise : Metin Nuran Çakallıklı Anadolu Lisesi
Fen Bilimleri (Almanca), 2012
Lisans : Ege Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği, 2016

Mesleki Deneyim

AĞA YAPI DENETİM LTD. ŞTİ., Antalya 02.2017-08.2017
GÖLTAŞ HAZIR BETON A.Ş., Isparta 11.2017-06.2018