

**MİKRONİZE KOLEMANİT KATKILI ULTRA YÜKSEK
PERFORMANSLI BETONLARIN MÜHENDİSLİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

BETÜL İŞBİLİR KULA

**DOKTORA TEZİ
DİSİPLİNLERARASI KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. SERKAN SUBAŞI**

DÜZCE, 2023

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**MİKRONİZE KOLEMANİT KATKILI ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI
BETONLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Betül İŞBİLİR KULA tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. İlker TEKİN

Karabük Üniversitesi

Prof. Dr. Metin İPEK

Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

Doç. Dr. Mehmet EMİROĞLU

Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 27/07/2023

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

27 Temmuz 2023

Betül İŞBİLİR KULA

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim ve tez çalışmalarım boyunca, bilgi ve tecrübeleriyle beni destekleyen; yönlendiren; tez danışmanlığımı her daim sabır ve anlayışla yürüten; ayrıca lisans eğitimi dönemimden bu yana yalnızca eğitim süreçlerimde değil, hayatımın diğer süreçlerinde de mentörlüğünü ve desteğini esirgemeyen kıymetli hocam Sayın Prof. Dr. Serkan SUBAŞI'na sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Tez çalışmalarım boyunca, bana kazandırdıkları bilgi, yeni bakış açıları, önerdikleri çözümler, destek ve teşviklerinden ötürü tez izleme kurulumda yer alan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Yılmaz KOÇAK ve Sayın Doç. Dr. İlker TEKİN'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Ar-Ge, yenilik konularına verdiği önem ve Üniversite Sanayi işbirliği alanında yürüttüğü çalışmalar ile gerek Üniversitemize gerekse Düzce bölgesinin sürdürülebilir kalkınmasına katkı sağlayan Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. firması, Yönetim Kurulu Üyesi Sayın Muhammed MARAŞLI, Ar-Ge Merkezi şefi Sayın Volkan ÖZDAL ve Ar-Ge Merkezi personellerine tez çalışmamın uygulama aşamalarında sağladıkları malzeme, alt yapı ve iş gücü desteği için teşekkürlerimi sunarım.

2013-2023 yılları arasında Düzce Teknopark A.Ş. Genel Müdürlüğünü yürütmüş olan Sayın Doç. Dr. Özkan ŞAHİN ve Mart 2023 döneminde Genel Müdürlük görevini devralan Sayın Prof. Dr. Resul KARA hocalarıma tez çalışma sürecimde gösterdikleri anlayış ve teşviklerinden dolayı saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

2016 yılından itibaren görev aldığım Düzce Teknopark A.Ş. tüm çalışanları ve ekip arkadaşlarıma bu süre zarfında manevi desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarım boyunca deneyimlerini her daim aktararak destek sağlayan Dr. Öğr. Üyesi Heydar DEHGHANPOUR, Öğr. Gör. Dr. Emrah YILMAZ, İnşaat Yüksek Mühendisi Muhammet SEİS'e yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim.

Her zaman ve her konuda, sabırla ve sevgiyle beni destekleyen çok kıymetli eşim Mehmet KULA'ya en içten sevgi ve teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen; bugünlere gelmemde emeği olan babam, annem, ağabeyim, ablam, anneannem, rahmetli dedeme sevgilerimi ve şükranlarımı sunarım.

TEMMUZ 2023

Betül İŞBİLİR KULA

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xi
KISALTMALAR.....	xii
SİMGELER	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	4
2.1. ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON (UYPB).....	4
2.1.1. Ultra Yüksek Performanslı Beton Kullanım Alanları.....	5
2.1.2. Ultra Yüksek Performanslı Beton Tasarımı ve Üretimi.....	6
2.1.3. Ultra Yüksek Performanslı Beton Bileşenleri	8
2.1.3.1. Çimento	8
2.1.3.2. Minerak Katkı (Silis Dumanı)	10
2.1.3.3. Minerak Katkı (Kolemanit)	12
2.1.3.4. Mineral Dolgu(Silis Kumu, Kuvars Kumu).....	13
2.1.3.5. Çelik Lif.....	14
2.1.3.6. Kimyasal Katkı (Süperakışkanlaştırıcı)	16
2.2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	18
2.2.1. Ultra Yüksek Performanslı Beton İle İlgili Önceki Çalışmalar	18
2.2.2. Kolemanit Minerali İle İlgili Önceki Çalışmalar	30
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	40
3.1. MATERYAL	41
3.1.1. Bağlayıcılar	41
3.1.2. Kolemanit.....	42
3.1.3. Agregalar	44
3.1.4. Çelik Lif.....	46
3.1.5. Süper Akışkanlaştırıcı	47
3.2. YÖNTEM.....	47
3.2.1. UYPB Karışımları Kolemanit Katkı Oranlarının Belirlenmesi	47
3.2.1.1. Standart Kıvam Tayini	47
3.2.1.2. Priz Başlama ve Sona Erme Süresinin Tayini	48

3.2.1.3. Hacim Genleşmesi Tayini	48
3.2.1.4. Çimento Harç Deney Örneklerinin Hazırlanması	49
3.2.1.5. Çimento Harçlarının Basınç Dayanımı Tayini	50
3.2.1.6. Hidratasyona Tabi Tutulan Çimento Hamuru Örneklerinin Hazırlanması	50
3.2.1.7. Molekül Yapı Analizleri	51
3.2.1.8. Mineralojik Analizler	51
3.2.1.9. Mikro Yapı Analizleri	51
3.2.1.10. Termal Analizler	52
3.2.2. UYPB Karışım Oranlarının Belirlenmesi	52
3.2.3. Taze Beton Deneyleri	57
3.2.3.1. Taze Beton Yayılma Çapı	57
3.2.3.2. Taze Beton Hava İçeriği	57
3.2.3.3. Taze Beton Yoğunluğu	58
3.2.3.4. Sıcaklık ve Büzülme İlişkisi	59
3.2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri	60
3.2.4.1. Basınç Dayanımı	60
3.2.4.2. Eğilme Dayanımı	61
3.2.4.3. Schmidt Yüzey Sertliği	62
3.2.4.4. Ultrases Geçiş Hızı	62
3.2.4.5. Darbe Dayanımı	63
3.2.4.6. Elektriksel İletkenlik	64
3.2.4.7. Karbonatlaşma Derinliği	65
3.2.4.8. Kapiler Su Emme	66
3.2.4.9. Aşınma Dayanımı	67
3.2.4.10. Donma-Çözülme Direnci	68
3.2.4.11. Sülfat Direnci	69
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	71
4.1. ÇİMENTO NUMUNELERİ ANALİZ VE DENEYLER	71
4.1.1. Su İhtiyacı, Priz Süreleri ve Genleşme Değerleri	71
4.1.2. Kolemanit İkame Oranının Basınç Dayanımına Etkisi	77
4.1.3. Hidratasyon Gelişimi	79
4.1.3.1. XRD ile Hidratasyon Gelişimi	82

4.1.3.2. FT-IR ile Hidratasyon Gelişimi	85
4.1.3.3. STA ile Hidratasyon Gelişimi	87
4.1.3.4. Mikro Yapı Analizleri	96
4.2. TAZE BETON ÖZELLİKLERİ.....	100
4.2.1. UYPB Karışımlarının Taze Beton Yayılma Çapı	100
4.2.2. UYPB Karışımlarının Taze Beton Hava İçeriği	102
4.2.3. UYPB Karışımlarının Taze Beton Yoğunluğu	104
4.2.4. UYPB Karışımlarının Sıcaklık ve Büzülme İlişkisi	105
4.3. SERTLEŞMİŞ BETON ÖZELLİKLERİ.....	110
4.3.1. UYPB Numunelerinin Yoğunlukları	110
4.3.2. UYPB Numunelerinin Basınç Dayanımı	112
4.3.3. UYPB Numunelerinin Eğilme Dayanımı	115
4.3.4. UYPB Numunelerinin Schmidt Yüzey Sertliği.....	117
4.3.5. UYPB Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızı	119
4.3.6. UYPB Numunelerinin Darbe Dayanımı.....	121
4.3.7. UYPB Numunelerinin Mikro Yapı Analizleri.....	124
4.4. UYPB NUMUNELERİNİN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ	127
4.4.1. UYPB Numunelerinin Elektriksel İletkenliği	127
4.4.2. UYPB Numunelerinin Karbonatlaşma Derinliği	129
4.4.3. UYPB Numunelerinin Kapiler Su Emme Miktarı	129
4.4.4. UYPB Numunelerinin Aşınma Dayanımı	131
4.4.5. UYPB Numunelerinin Sülfat Direnci	134
4.4.6. UYPB Numunelerinin Donma Çözülme Direnci.....	137
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	142
6. KAYNAKLAR.....	147
ÖZGEÇMİŞ.....	167

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. UYPB uygulama örnekleri.	6
Şekil 2.2. Ultra yüksek performanslı örnek karışım bileşenleri.	8
Şekil 2.3. Bor bileşiklerinin çimento hidratasyonu üzerindeki etkisinin gösterimi[135].	34
Şekil 3.1. Tez kapsamında uygulama ve analizler.	40
Şekil 3.2. Çimento ve Silis Dumanı.	41
Şekil 3.3. Çimento ve Microwhite Silis Dumanı tane boyutu dağılımları.	42
Şekil 3.4. Kolemanit.	43
Şekil 3.5. Harç ve UYPB’de kullanılan kolemanitlerin tane boyutu dağılımları.	44
Şekil 3.6. Silis ve Kuvars Kumları.	44
Şekil 3.7. Kuvars45, Kuvars100, AFS60-70 Silis Kumu’nun tane boyutu dağılımları.	46
Şekil 3.8. Çelik Lif.	46
Şekil 3.9. Süperakışkanlaştırıcı.	47
Şekil 3.10. Çimento harçlarının hazırlanması.	49
Şekil 3.11. Çimento harçları ve basınç dayanımı tayini.	50
Şekil 3.12. Belirlenen agregaların özelliklerine yönelik veri girişlerinin yapılması.	53
Şekil 3.13. Belirlenen agregaların tane boyutu veri girişlerinin yapılması.	53
Şekil 3.14. Karışımlardaki agregaların tane boyutu dağılımı.	54
Şekil 3.15. Karışımlardaki agregaların tane boyutu dağılım değerleri.	54
Şekil 3.16. Parçacık paketleme modelleri granülometri eğrileri.	55
Şekil 3.17. UYPB karıştırma işlemi.	56
Şekil 3.18. UYPB kalıplara dökülmesi.	56
Şekil 3.19. UYPB üretilen numuneler.	56
Şekil 3.20. UYPB yayılma çapı ölçümü.	57
Şekil 3.21. Aerometre (hava ölçer) ve UYPB hava içeriği tayini.	58
Şekil 3.22. UYPB yoğunluğu tayini.	58
Şekil 3.23. Büzülme kalıbı, düzeneği.	59
Şekil 3.24. UYPB basınç dayanımı tayini sonrası numuneler.	60
Şekil 3.25. UYPB eğilme dayanımı tayini.	61
Şekil 3.26. Schmidt çekici uygulaması.	62
Şekil 3.27. Ultrases geçiş hızı test cihazı ve uygulaması.	63
Şekil 3.28. Darbe dayanımı tayini ve numuneleri.	63
Şekil 3.29. Elektriksel iletkenlik ölçümü.	64
Şekil 3.30. Kapiler su emme tayini.	66
Şekil 3.31. Aşınma dayanımı tayini.	67
Şekil 3.32. Donma çözülme direnci tayini.	68
Şekil 3.33. Sülfat direnci tayini.	69
Şekil 4.1. Referans ve (19,8 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı.	72
Şekil 4.2. Referans ve (7,44 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı.	72
Şekil 4.3. Referans ve (19,8 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin priz süreleri.	73
Şekil 4.4. Referans ve (7,44 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin priz süreleri.	74

Şekil 4.5. Referans ve (19,8 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin hacim genişmesi.	75
Şekil 4.6. Referans ve (7,44 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin hacim genişmesi.	75
Şekil 4.7. Referans ve (19,8 µm)Kolemanit ikameli harçların 7, 28, 56 günlük basınç dayanımları.....	77
Şekil 4.8. Referans ve (7,44 µm) Kolemanit ikameli harçların 7, 28, 56 günlük basınç dayanımları.....	78
Şekil 4.9. R ve K25 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük XRD analizleri.....	82
Şekil 4.10. K50 ve K100 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük XRD analizleri.....	83
Şekil 4.11. R ve K25 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük FT-IR analizleri.	85
Şekil 4.12. K50 ve K100 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük FT-IR analizleri.	86
Şekil 4.13. R ve K25 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük DTA-TG analizleri.	88
Şekil 4.14. K50 ve K100 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük DTA-TG analizleri.	89
Şekil 4.15. Çimento hamurlarının hidratasyon günlerine göre 25-200°C aralığındaki ağırlık kayıpları.	90
Şekil 4.16. Çimento hamurlarının hidratasyon günlerine göre 400-500°C aralığındaki ağırlık kayıpları.	91
Şekil 4.17. Çimento hamurlarının hidratasyon günlerine göre 500-750°C aralığındaki ağırlık kayıpları.	92
Şekil 4.18. Çimento hamurlarının hidratasyon günlerine göre 105-1000°C aralığındaki ağırlık kayıpları.	93
Şekil 4.19. Çimento hamurlarının hidratasyon günlerine göre CH miktarları.....	94
Şekil 4.20. R Kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük SEM görüntüleri.	96
Şekil 4.21. K25 Kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük SEM görüntüleri.....	97
Şekil 4.22. K50 Kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük SEM görüntüleri.....	98
Şekil 4.23. K100 Kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük SEM görüntüleri.....	99
Şekil 4.24. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin taze beton yayılma çapı.....	101
Şekil 4.25. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin taze beton hava içeriği.	103
Şekil 4.26. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin taze beton yoğunluğu.	104
Şekil 4.27. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin sıcaklık, büzülme ilişkisi.....	107
Şekil 4.28. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki yoğunlukları.	110
Şekil 4.29. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki basınç dayanımları.....	112
Şekil 4.30. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki eğilme dayanımları.....	115
Şekil 4.31. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki schmidt değerleri.....	118
Şekil 4.32. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki ultrases geçiş hızları.....	120
Şekil 4.33. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin 56 günlük darbe dayanımları.	122
Şekil 4.34. R Kodlu UYPB numunesinin 90 günlük SEM görüntüleri.	124
Şekil 4.35. K25 Kodlu UYPB numunesinin 90 günlük SEM görüntüleri.....	125
Şekil 4.36. K50 Kodlu UYPB numunesinin 90 günlük SEM görüntüleri.....	125
Şekil 4.37. K100 Kodlu UYPB numunesinin 90 günlük SEM görüntüleri.....	126
Şekil 4.38. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki öz dirençleri.	128
Şekil 4.39. Karbonatlaşma deneyi öncesi ve sonrası numuneler.	129
Şekil 4.40. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin kapiler su emme miktarları.	130
Şekil 4.41. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin aşınma sonucu kütsel ve hacimsel kayıpları.	132

Şekil 4.42. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin sülfat etkisi sonrası ağırlık kayıpları.....	135
Şekil 4.43. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin sülfat etkisine maruz bırakılmadan önce ve sonraki görünüşleri.	136
Şekil 4.44. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin donma çözülme çevirimleri sonrası kütle kayıpları.	138
Şekil 4.45. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin donma çözülme çevirimleri sonrası basınç dayanımı değişimleri.	139
Şekil 4.46. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin donma çözülme çevirimleri sonrası Schmidt yüzey sertliği değişimleri.....	139
Şekil 4.47. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin donma çözülme çevirimleri sonrası ultrases geçiş hızı değişimleri.	140



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Çimentodaki ana bileşenlerin relatif özellikleri [45].	9
Çizelge 3.1. Üretilen UYPB numunelerinin kodları.	41
Çizelge 3.2. Microwhite Silis Dumanı fiziksel ve kimyasal özellikleri.	41
Çizelge 3.3. Çimento fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri.	42
Çizelge 3.4. Kolemanit fiziksel ve kimyasal özellikleri.	43
Çizelge 3.5. Silis kumu kimyasal özellikleri.	45
Çizelge 3.6. Kuvars kumu fiziksel ve kimyasal özellikleri.	45
Çizelge 3.7. Çelik lif fiziksel ve mekanik özellikleri.	46
Çizelge 3.8. Süper akışkanlaştırıcı fiziksel ve kimyasal özellikleri.	47
Çizelge 3.9. Referans ve kolemanit ikameli çimento harçlarına ait karışım oranları.	49
Çizelge 3.10. Referans ve kolemanit katkılı çimento hamurlarına ait karışım oranları.	51
Çizelge 3.11. UYPB karışım miktarları (1m ³ de kullanılan dm ³).	55
Çizelge 4.1. (19,8 µm)Kolemanit su ihtiyacı, priz başlangıç ve priz bitişi, hacim genişmesi sonuçları.	71
Çizelge 4.2. (7,44 µm)Kolemanit su ihtiyacı, priz başlangıç ve priz bitişi, hacim genişmesi sonuçları.	72
Çizelge 4.3. TS 2824 EN 1338/AC standardına göre uygunluk değerlendirme sonuçları.	133

KISALTMALAR

K100	%1,00 Kolemanit Katkısı
K25	%0,25 Kolemanit Katkısı
C ₂ S	Dikalsiyum Silikat
C ₃ A	Trikalsiyum Alüminat
C ₃ S	Trikalsiyum Silikat
C ₄ AF	Tetrakalsiyum Alüminaferrit
K50	%0,50 Kolemanit Katkısı
CH	Kalsiyum Hidroksit (Portlandit)
CS	Kalsiyum Silikat
C-S-H	Kalsiyum Silikat Hidrat
DTA	Diferansiyel Termal Analiz
FT-IR	Fourier Dönüşümlü İnfrared Spektroskopi
PÇ	Portland Çimentosu
R	Referans
S	Kükürt Trioksit, SO ₃
S/Ç	Su/Çimento Oranı
SD	Silis Dumanı
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
Si	Silis, SiO ₂
SP	Süper Akışkanlaştırıcı
TG	Termogravimetrik Analiz
UYPB	Ultra Yüksek Performanslı Beton
XRD	X-Işını Difraktometresi

SİMGELER

Ω	Ohm
$\Omega.cm$	Ohm santimetre
a_{cu}	Charpy darbe dayanımı(kJ/m^2)
d	Yoğunluk
E_c	Kırılma enerjisi
F	Kuvvet
Hz	Hertz
I	Emilim(mm)
kJ/m^2	Darbe enerjisi
Mm	Mikrometre
Mm	Mikrometre
Mpa	Mega paskal
mV	Milivolt
N/mm^2	Newton/milimetrekare
nm	Nanometre
R	Schmidt yüzey sertliği
V	Volt
δ	Basınç dayanımı
μA	Mikroamper
ρ	Elektriksel öz direnç($\Omega.cm$)
σ	Elektriksel iletkenlik

ÖZET

MİKRONİZE KOLEMANİT KATKILI ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETONLARIN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Betül İŞBİLİR KULA

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Disiplinlerarası Kompozit Malzeme Teknolojileri

Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

Temmuz 2023, 166 sayfa

Dünya bor rezervinde Türkiye'nin en büyük paya sahip olması ve bor minerallerinin kullanım alanlarının gün geçtikçe artmasına bağlı olarak Ülkemizde bor ürünlerinin ve yeni üretim teknolojilerinin geliştirilmesi, geliştirilen ürün ve yöntemlerin ticarileştirilmesi yönünde çalışmalar yapılmakta, sürdürülebilir kalkınmanın sağlanması amaçlanmaktadır. Yapılarında farklı oranlarda bor oksit içeren ve doğal bileşik özelliği gösteren bor minerallerinden kolemanit, ticari açıdan büyük bir öneme sahip olmakla birlikte, yüksek katma değerli ürünlere dönüştürülen başlıca bor mineralleri arasında yer almaktadır. Yapılan çalışmalarla çimento sektöründe de bor minerallerinin kullanımı önem kazanmaktadır. Bu çalışma ile mekanik, fiziksel ve durabilite özellikleri iyileştirilmiş kolemanit katkılı ultra yüksek performanslı beton (UYPB) üretimi amaçlanmıştır. Ultra yüksek performanslı beton karışımlarında kullanılacak olan en uygun kolemanit katkı oranının belirlenmesi için %0; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00 oranlarında kolemanit ikamesi ile çimento deneyleri ön çalışma olarak gerçekleştirilmiştir. Ön çalışma sonuçlarına göre belirlenen %0,25; 0,50; 1,00 oranlarında kolemanit katkısı ile UYPB karışımları hazırlanmıştır. UYPB numuneleri üzerinde taze ve sertleşmiş beton fazında çeşitli deneyler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca kolemanit katkılı çimento hamurları hazırlanarak XRD, FT-IR, DTA-TG ve SEM analizleri ile hidrasyon gelişimleri incelenmiştir. Hazırlanan UYPB karışımlarının taze beton özelliklerinin belirlenmesi için yayılma çapı, yoğunluk, hava içeriği, büzülme ve hidrasyon sıcaklıkları ölçülmüştür. Sertleşmiş beton fazında, 2, 7, 28, 56.günlerde yoğunluk, basınç ve eğilme dayanımı, schmidt yüzey sertliği, ultrases geçiş hızı ile 56.günde darbe dayanımı, elektriksel iletkenlik, karbonatlaşma direnci, kapiler su emme, aşınma dayanımı, sülfat direnci, donma çözülme direnci deneyleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre, kolemanit katkısı ile UYPB fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri iyileştirilmiş daha geçirimsiz bir beton elde edilebileceği; UYPB için %1 oranında kolemanit katkısının en iyi performansı sağladığı tespit edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Bor minerali, Dayanıklılık, Dayanım, Kolemanit, Ultra yüksek performanslı beton(UYPB).

ABSTRACT

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF MICRONIZED COLEMANITE ADDED ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Betül İŞBİLİR KULA

Düzce University

Graduate School, Department of Interdisciplinary Composite Material Technologies

Department

Doctoral Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan SUBAŞI

July 2023, 166 pages

Due to the fact that Turkey has the largest share in the world's boron reserves and the usage areas of boron minerals are increasing day by day, studies are carried out in our country to develop boron products and new production technologies, to commercialize the developed products and methods, and to ensure sustainable development. Colemanite, which is one of the boron minerals containing boron oxide in different proportions and showing natural compound characteristics, has a great commercial importance, but is among the main boron minerals that are converted into high value-added products. With the studies carried out, the use of boron minerals in the cement sector is gaining importance. In this study, it was aimed to produce colemanite added ultra-high performance concrete (UHPC) with improved mechanical, physical and durability properties. In order to determine the most suitable colemanite additive ratio to be used in Ultra High Performance Concrete mixtures, the cement tests were carried out as a preliminary study with 0.50, 1.00, 1.50, 2.00% colemanite substitution. UHPC mixtures were prepared with 0.25, 0.50, 1.00% colemanite additive determined according to the preliminary study results. Some experiments were carried out on the UHPC samples in the fresh and hardened concrete phase. In addition, colemanite added cement pastes were prepared and hydration developments were investigated by XRD, FT-IR, DTA-TG and SEM analyses. Flow diameter, density, air content, shrinkage and hydration temperatures were measured to determine the fresh concrete properties of the prepared UHPB mixtures. In the hardened concrete phase, on the 2nd, 7th, 28th and 56th days, density, compressive and flexural strength, schmidt hammer, ultrasonic pulse velocity and on the 56th day impact resistance, electrical resistivity, carbonation resistance, capillary water absorption, abrasion resistance, sulfate resistance, freeze-thaw resistance tests were carried out. According to the results obtained within the scope of the study, it has been determined that a more impermeable concrete with improved physical, mechanical and durability properties of UHPC can be obtained with colemanite additive and 1% colemanite additive provides the best performance for UHPC.

Keywords: Boron mineral, Durability, Strength, Colemanite, Ulltra high performance concrete(UHPC)

EXTENDED ABSTRACT

INVESTIGATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF MICRONIZED COLEMANITE ADDED ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Betül İŞBİLİR KULA

Düzce University
Graduate School, Department of Interdisciplinary Composite Material Technologies
Department

Doctoral Thesis
Supervisor: Prof. Serkan SUBAŞI

July 2023, 166 pages

1. INTRODUCTION

Ultra high performance concrete(UHPC) is currently used in cladding, roof components, repair of structures, offshore structures, industrial floors, pavements, prefabricated structures, and especially bridge elements with large spans, etc. It is a future material that has the potential to improve the sustainability of buildings and infrastructure components by enabling innovative designs. UHPC, a type of concrete with high strength and durability, also has superior properties such as low water-cement ratio, high binder content, dense matrix, and low void content. In UHPC mixtures, unlike conventional concrete, new generation superplasticizers; fine-grained aggregates; nano silica, nano calcite, nano aluminum, etc. nanomaterials such as; With a good design mix using fiber, it is possible to obtain a sustainable concrete that is improved in terms of both mechanical and durability. Research shows that designing high-performance concrete is more difficult than designing high-strength concrete. For this reason, new developments are being experienced in the mix design of high-performance concretes every day. Since UHPC has a very fragile matrix structure, steel, synthetic, natural or hybrid fibers are widely used.

About 10% of the boron minerals produced in the world are consumed directly as minerals, and the remaining part is consumed to obtain refined products; Tinkal, Colemanite, Kernit, Ulexite, Pandermite, Borasite, Szaybelite and Hydroboracite are among the commercially important boron minerals. Boron products, which are mostly used in glass, glass fiber, fertilizer and detergent production in our country, are also used as roofing materials, cellulosic insulation materials and cement additives in the construction industry. Studies have shown that the use of the boron mineral colemanite in appropriate amounts has a positive effect on the strength and durability properties of

concrete; It has been shown that it contributes to the parameters of expansion, early setting, early shrinkage, sulfate resistance, freeze-thaw resistance.

In this study, the effect of colemanite, a boron mineral, on the durability and strength of ultra-high performance concrete was investigated. Colemanite substitutes for cement samples; setting times and volume expansion determinations were performed and hydration developments were investigated with X-ray Diffraction (XRD), Differential Thermal and Thermogravimetric Analysis (DTA/TG), Fourier Transforms Infrared Spectroscopy (FT-IR), and Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses. Fresh concrete, hardened concrete and durability tests were carried out by creating Ultra High Performance concrete mixtures with the addition of reference and 0.25, 0.50, 1.00% colemanite. Within the scope of fresh concrete experiments, the relationship between fresh concrete flow diameter, fresh concrete air content, fresh concrete density, fresh concrete shrinkage and temperature were determined. Compressive strength, flexural strength, schmidt hammer, ultrasonic pulse velocity, charpy impact strength tests were carried out. Within the scope of durability tests, water sorptivity, abrasion resistance, freeze-thaw resistance, sulfate resistance, electrical resistivity, carbonation resistance were investigated.

2. MATERIAL AND METHODS

CEM I / 52.5 R Portland cement has been used as a binder in the mixtures. White Portland Cement is a product, that has been used for more than 100 years around the world, preferred for obtaining aesthetical appearances and high strength levels. Microwhite silica fume(SF) was added to the mixtures as pozzolanic material. Microwhite silica fume is a dry silica fume powder. This silica fume is often used to improve the properties and performance of high performance concrete and specialty mortar formulations. This SF, which is also reactive, is often used to improve the properties and performance of high performance concrete and special mortar formulations. Colemanite with an average grain diameter of less than 45 μm , obtained from Eti Maden Bigadiç Boron Operations Directorate, was used. Silica sand with an average grain size of 205 μm and a SiO_2 content of 98% (minimum); Quartz sand with an average grain size of 39.1 and 16.1 μm and a SiO_2 content of 96% (minimum) as filling material was used. Stainless micro steel fiber (MSF) with a length of 12.5 mm and a diameter of 0.175 mm was preferred as the fiber. Polycarboxylic ether based superplasticizer(SP) was used for fresh concrete consistency. XRD, FT-IR, DTA-TGA and SEM analyzes were performed by forming cement pastes

with the addition of reference and 0.25, 0.50, 1% colemanite. Cement standard consistency and setting times tests TS EN 196-3; compressive strength determinations of cement mortar samples were made according to ASTM C109/C109M standard.

In the production of UHPCs in the experiments, firstly, aggregate ratios were determined by using the modified Andreassan model, which is one of the particle packaging model types to ensure maximum occupancy. The SF ratio was determined as 25% by weight, according to the cement content. Colemanite was added at the ratios of 0.25, 0.50 and 1% according to the binder. The SP ratio in all mixtures was chosen as 4% of the total binder. After the dry materials were mixed, superplasticizer and water were added, and after the homogeneous mixture, steel fibers were added. The water/binder ratio was determined as 0.20 in all mixtures. Then, the mixtures were molded and kept in the curing pool until the experimental days. Fresh and hardened concrete, durability tests have been done. All concrete samples were prepared with the addition of 0.25, 0.50, 1% colemanite. Flow diameter, air content, density, shrinkage tests were performed as fresh concrete experiments. ASTM C1611/C1611M-21, TS EN 12350-7, TS EN 12350-6, ASTM C1698 used in the tests respectively. Compressive and flexural strength, schmidt hammer, ultrasonic pulse velocity (UPV), charpy impact strength tests were performed as hardened concrete experiments. French Standard / NF P 18-470, ASTM C805, ASTM C597, Charpy: ISO 179-1, Type 3, standards used in the tests respectively. Water sorptivity, abrasion resistance, freeze-thaw resistance, sulfate resistance, carbonation resistance, electrical resistivity tests were performed as hardened concrete experiments. ASTM C1585, TS 2824, TS EN 12467, TS EN 12370, TS EN 12390-12 standards used in the tests respectively.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

In all colemanite-replaced cement samples, when compared to the reference sample, the water requirement increased as the replacement ratio increased, but it was not at a very high level; volume expansion values decreased; setting times increased and this situation was related to B_2O_3 in colemanite. As a result of the examination of hydration developments with XRD, FT-IR, DTA-TG and SEM, it was determined that the addition of colemanite on the 7th and 28th days did not contribute to the pozzolanic activity, but it was supportive of the pozzolanic activity on the 90th day; that more hydration products occur in colemanite added cement pastes in advanced ages; has a lower CH content; less carbonation was observed. According to the fresh concrete test results of the mixtures

prepared with the addition of colemanite (0.25, 0.50, 1.00%), the flow diameter, air content rised and density values decreased with the increase of the colemanite addition ratio; it was determined that the lowest shrinkage value was achieved with the addition of 1% colemanite. According to the hardened concrete test results of the colemanite added UHPC specimens, it has been determined that although the unit weight (density) values decrease with the increase in the amount of colemanite, it increases the compressive strength with its hard structure and the effect of filling the pores. However, flexural strengths decreased due to the steel fiber and matrix interface. Due to the hard structure of colemanite, the results of schmitdh surface hardness, impact resistance and ultrasonic pulse velocity were higher. According to the durability test results of the colemanite added UHPC samples, it was determined that the electrical conductivity of the samples increased and the resistivity values decreased due to the increase in the colemanite addition. It was determined that a more impermeable structure was formed due to a more compact microstructure, which was confirmed by SEM images, and there was no carbonation due to the lower capillary water absorption values. When the wear results are examined, it has been determined that the average mass and volume losses occur in direct proportion and are at higher values. The least weight loss was observed in the K100 sample in all cycles exposed to sulfate and after freeze-thaw cycles.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

As a result of the experiments carried out in the fresh concrete and hardened concrete phases of UHPC mixtures prepared with the addition of 0.25, 0.50, 1.00% colemanite, concretes with improved mechanical and durability properties were obtained. In all experiments, the increase and decrease of B_2O_3 concentration in the structure of colemanite were effective. Non-pozzolanic colemanite supported the pozzolanic activity of silica fume, a more compact microstructure was formed, which was confirmed by SEM images, and an even impermeable structure; more hydration products were found to form, which was confirmed by XRD, FT-IR and DTA-TG.

With the addition of colemanite, the air content in the fresh concrete phase increased, albeit slightly, but did not adversely affect the hardened concrete properties. In order to obtain lower air content, it is recommended to research by adding air entrainer in UHPC mixtures. In addition, a single type of steel fiber was used within the scope of the study, and lower flexural strength values were obtained in colemanite added UHPCs. In future studies, it was aimed to evaluate the hybrid fiber addition on the flexural strength of

colemanite additive UHPCs, it is recommended to carry out research by adding short and long steel fibers to the mixtures. As a result of the tests carried out within the scope of the study, it was revealed that by adding 1% colemanite to the UHPC mixtures, a more impermeable concrete could be obtained with improved physical, mechanical and durability properties.



1. GİRİŞ

Dayanımı yüksek, çevresel koşullara dayanıklı, işlenebilir ve ekonomik olmasından dolayı, tüm dünyada beton en yaygın kullanıma sahip yapı malzemesidir. Beton teknoloji alanındaki çalışmalar her geçen gün yenilikler sunarak, çimento esaslı kompozitlerin geliştirilmesini sağlamakta, farklı yapısal elamanlarda kullanımını artırmaktadır. UYPB'ler kaplama, çatı bileşenleri, yapıların onarımı, açık deniz yapıları, endüstriyel zeminler, kaldırımlar, prefabrik yapılar ve özellikle geniş açıklıklı köprü elemanları vb. inşaat alanlarında kullanılmakta, yenilikçi tasarımlara olanak sağlamaktadır.

1960 ve 1970 yıllarında özellikleri geliştirilmiş beton çalışmalarına başlanmış, basınç altında ısıl kürleme ile çimento hamurunun mukavemetinin iyileştirilmesi [1], düşük su-çimento oranlarının uygulanması yönünde araştırmalar yapılmıştır [2]. Bunun yanı sıra malzeme alanındaki bilimsel gelişmeler, malzeme mikro yapısının daha iyi anlaşılmasını sağlayarak, günümüzde ultra düzeyde betonların üretilmesine yön vermiştir. 1980'lerden önce teknolojinin yetersiz olmasından dolayı, yüksek performanslı betonların üretimi sadece laboratuvar ortamlarında gerçekleştirilebilmiş, zaman ve enerji açısından dezavantajlar ortaya koymuştur [3]. 1980 yılında sıcak preslenmiş çimento ve makro-kusursuz çimento (MDF) [4] üretimi ile başlayan çalışmalar, küçük parçacıklarla yoğunlaştırılmış çimento (DSP) içeren yüksek performanslı malzemeler [5] ve bulamaçlı fiber beton (SIFC) [6] üretimi ile devam etmiştir. Ancak bu malzemeler mükemmel performansa sahip olsa da, karmaşık şekillendirme prosesleri ve yüksek maliyetlerinden dolayı, uygulamalarda tercih edilmemiştir [4]–[7]. Mikro Hatasız Çimento (MDF) üretiminde gözeneklerin doldurulması ve çimento hamurundaki kusurların giderilebilmesi amacıyla polimerler kullanılmış, malzemenin silindirlere geçirilmesi ve lamine edilmesi ile özel koşullar oluşturulmuş, 200 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Ancak yayılma çapı, gevrekliğin, maliyetin artması ve karmaşık üretim yöntemi nedeniyle uygulamalarda sınırlı kalmıştır. Daha sonra Bache tarafından yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı ve silis dumanı (SF) içeren, ısı ve basınçla kürlenmiş yoğun silika parçacık çimentosu (DSP) üretilmiştir. Üretim koşulları daha az karmaşık olan bu yöntemde parçacık paketleme yoğunluğu artırılarak çimento matrisindeki kusurlar giderilmiş, maksimum 345 MPa basınç dayanımına ulaşılmıştır. Ancak malzemedeki

gevreklik sorunu çözülememiş, bu sorun da çelik liflerin kullanımına yön vermiştir. Sünekliği artırmak amacıyla çelik liflerin karışımlarda kullanımı ile CRC (kompakt takviyeli kompozit), GRC (cam elyaf takviyeli beton) ve çimento hamuru enjekte edilmiş lif donatılı betonlar keşfedilmiştir (SIFCON). Bu beton türleri üstün mekanik özellikler sunmuş olsa da, işlenebilirlik sorunları tam olarak çözülemediği için mühendisler tarafından pek kullanışlı görülmemiştir [3]. İlerleyen yıllarda bu kapsamdaki çalışmalar devam etmiş, 1993 yılında Richard ve Cheyrezy'nin reaktif pudra beton (RPC) araştırmaları bugünkü UYPB çalışmalarının temelini oluşturmuştur.

Yüksek mukavemet ve dayanıklılığa sahip bir beton türü olan ultra yüksek performanslı beton (UYPB), düşük su-çimento oranı, yüksek bağlayıcı içeriği, yoğun matris ve düşük boşluk içeriği gibi üstün özelliklere de sahiptir. UYPB karışımlarında, geleneksel betondan farklı olarak, yeni nesil süperakışkanlaştırıcılar; ince taneli agregalar; nano silika, nano kalsit, nano alüminyum vb. gibi nanomalzemeler; lifler kullanılarak optimum tasarım ile hem mekanik hem de dayanıklılık açısından geliştirilmiş sürdürülebilir bir beton elde etmek mümkündür. Bunun yanı sıra, sürdürülebilirlik ve ekonomik fayda göz önünde bulundurularak, UYPB tasarımlarında kullanılabilecek alternatif mineral dolgu, mineral katkı, kimyasal katkıları, liflerin ve uygun karışım yöntemlerinin belirlenmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir.

Dünyada üretilen bor minerallerinin yaklaşık %10'u doğrudan mineral olarak; kalan kısmı ise rafine ürünler elde etmek için kullanılmaktadır. Tinkal, Kolemanit, Kernit, Üleksit, Pandemit, Borasit, Szaybelit ve Hidroborasit ticari önemi olan bor mineralleri arasında yer almaktadır [8], [9]. Doğada 230'dan fazla bor minerali bulunmakta olup, bor kimyasalları ve konsantre bor ürünleri olarak kullanılmaktadır. Bor mineralleri fiziksel işlemlerle zenginleştirilmekte ve konsantre bor ürünleri elde edilmektedir. Ancak konsantre bor kimyasal işlemlere tabi tutulduktan sonra rafine edilerek çeşitli bor kimyasallarına dönüştürülmektedir. Ülkemizde en çok cam, cam elyafı, gübre ve deterjan üretiminde kullanılan bor ürünleri, inşaat sektöründe de çatı kaplama malzemesi, selülozik yalıtım malzemesi ve çimento katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [9].

Yapılan araştırmalar, bor minerali olan kolemanitin uygun miktarlarda kullanımının betonun dayanım ve durabilite özelliklerini olumlu yönde etkilediğini; genleşme, erken priz, sülfat dayanımı, donma-çözülme dayanımı parametrelerine katkı sağladığını göstermiştir.

Bu çalışmada, farklı katkı oranlarda (%0,25; 0,50; 1) bor minerali kolemanit, silis ve kuvars kumu agregaları, elik lif, süper akışkanlaştırıcı kullanılarak ultra yüksek performanslı betonlar (UYPB) üretilmiştir. Taze ve sertleşmiş beton fazında testleri yapılarak, beton performansına yönelik durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca imento hamurları ile hidratasyon gelişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.



2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. ULTRA YÜKSEK PERFORMANSLI BETON (UYPB)

Geliştirilmiş mekanik ve dayanıklılık özelliklerine sahip UYPB, günümüzde inşaat endüstrisinde yaşanan problemlere çözüm oluşturabilen bir yapı malzemesi olarak yerini almış olup, son zamanlarda yapılan araştırmalarla kullanımı yaygınlaşmaktadır. Yüksek üretim maliyeti olsa da, üstün mekanik özellikleri, rijitlik, süneklik, üstün enerji yutma kapasitesi gibi önemli özellikleri ile avantajlar sağlayarak, geleneksel betonlara kıyasla daha ekonomik, estetik, uzun ömürlü yapılara imkan vermektedir. UYPB bileşenlerinin pudra tane boyutlu olması, sıcak kür işlemi ile puzolanik aktivitenin yeniden tekrarlanması ve çimento matrisli bir kompozit olması nedeniyle Reaktif Pudra Betonu (RPB) olarak da isimlendirilmektedir. Bunun yanı sıra beton sektöründe Lifle Güçlendirilmiş Ultra Yüksek Performanslı Beton; Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB); Yüksek Performanslı Beton (YPB); Yüksek Dayanımlı Beton (YDB) olarak da adlandırılmaktadır.

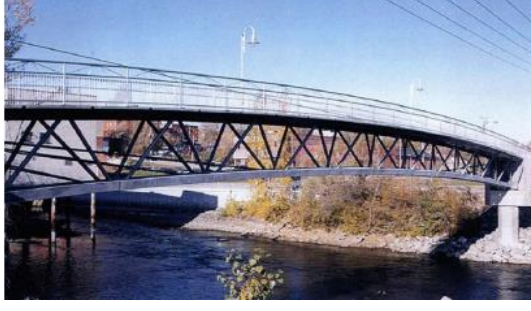
Birçok araştırmacı tarafından, UYPB mekanik ve dayanıklılık özellikleri bakımından değerlendirilerek, genel bir çerçeve belirlemiştir. Bu kapsamda basınç dayanımı 150 MPa'dan; kompozitin çekme dayanımı 10 MPa'dan; matrisin direkt çekme dayanımı 7 MPa'dan; kompozitin eğilme dayanımı 50 MPa'dan; kırılma enerjisi 40,000 J/m²'den daha yüksek betonlar olarak ifade edilmiştir [10]–[15]. UYPB kapsamında ilk çalışmalar, reaktif pudra beton olarak Richard ve Cheyrezy tarafından yapılmıştır. Richard ve Cheyrezy [10], [12], yüksek bağlayıcı içeriği, çok düşük su-çimento oranı (w/c), silis dumanı, ince kuvars tozu, süperakışkanlaştırıcı, çelik lif kullanımı ve ısıtılmış işlem yoluyla, yüksek tokluk ve yüksek mekanik özelliklere sahip (basınç dayanımı>150 MPa) reaktif pudra beton (RPB) üretmişlerdir. Cheyrezy ve Maret [16], civalı porozimetri deneyi ile reaktif pudra betonunun porozitesinin %9'u geçmediğini tespit etmiştir. De Larrard ve Sedran [17], katı süspansiyon modeli yardımıyla agrega, kum, çimento, silis dumanı, süper akışkanlaştırıcı, 0,14 su/bağlayıcı oranı kullanarak ve 90°C'de 4 günlük kürleme işlemi ile 236 MPa basınç dayanımına ulaşan UYPB elde etmiştir. Dugat vd. [18], en büyük tane boyutu 2 mm olan silis kumu kullanarak ve su/ bağlayıcı oranını minimize ederek; geleneksel betona göre 50 kat daha düşük difüzyon katsayısı ve çok düşük su emme değerine sahip; çok daha yoğun ve geçirimsiz bir RPC 200 (reaktif pudra betonu

200) üretmişlerdir. Bonneau vd. [19], 300 çevirim donma-çözünme çevrimine tabii tutulan reaktif pudra betonunun (RPB) dayanıklılığında azalmalar tespit etmiştir. Xue vd. [20], 2015 yılından itibaren UYPB'ler ile ilgili akademik ve üretim yönündeki çalışmaların yoğun bir şekilde devam ettiğini, yakın gelecekte UYPB'lerin yüksek uygulama potansiyeline sahip olduğunu belirtmiştir.

Yapılan araştırmalara göre UYPB, çok düşük su/bağlayıcı oranına sahip, yüksek dayanımlı çimento, silis dumanı, ince taneli agrega, yüksek dayanımlı çelik lif, süperakışkanlaştırıcı malzemeleri ile tasarlanmış, üstün mekanik ve durabilite özellikleri gösteren beton türü olarak tanımlandırılabilir.

2.1.1. Ultra Yüksek Performanslı Beton Kullanım Alanları

UYPB, inşaat mühendisliği alanında binalardan köprülere kadar çeşitli uygulamalarda son 30 yıldır kullanılmaktadır. Günümüzde UYPB, açıklıkları fazla olan köprüler, çok katlı yapılar, deniz yapıları, askeri binalar, sığınaklar, makine parçaları, yapısal iyileştirme işleri gibi birçok alanda kullanıma uygun hale gelmiştir [21]–[23]. En önemli uygulama alanı köprü yapıları olmuş, ABD; Kanada ve Çin'de 40'tan fazla köprü yapısı UYPB kullanılarak gerçekleştirilmiştir [24]. İlk endüstriyel uygulama olarak, 1997 ve 1998 yıllarında kirişlere dökülerek uygulama yapılmıştır. 2001 yılında, ilk UYPB karayolu köprüsü Fransa'daki Bourg-lès-Valence'de tasarlanarak inşa edilmiştir [25], [26]. UYPB'nin dünyadaki ilk mühendislik uygulaması 1997 yılında Kanada, Quebec kentinde öngermeli hibrit prefabrik sistemi ile tasarlanarak 60 m net açıklığa sahip Sherbrooke Yaya Köprüsü inşa edilmiştir [25], [27]–[29]. 2003 yılında İspanya Madrid'deki Reina Sofia Müzesi'nin kompozit yapı elemanları için UYPB'ler Ductal firması tarafından kompozit kolonları üretilerek, Fransa'dan ithal edilmiştir [27]. 2005 yılında ABD'de, toplam açıklığı 33,5 m olan tek açıklıklı ve dünyadaki ilk UYPB köprüsü olan Mars Hill Bridge 2006 yılında inşa edilmiştir[30]. MuCEM, 2013 yılında inşa edilen ve UYPB'nin cephe elemanları ve kaplama olarak farklı bağlamlarda kullanıldığı ilk bina olmuştur (Şekil 2.1) [27].



Sherbrooke Yaya ve Bisiklet Köprüsü, Quebec,
Kanada (1997) [31].



Reina Sofia Müzesi, Madrid,
İspanya (2013) [32].



Mars Hill Köprüsü, Iowa,
ABD (2006) [30].



MuCEM müzesi, Marsilya,
Fransa (2013) [33].

Şekil 2.1. UYPB uygulama örnekleri.

2.1.2. Ultra Yüksek Performanslı Beton Tasarımı ve Üretimi

UYPB karışımlarının, geleneksel betonlara göre daha fazla bileşen içermesi; optimizasyonunun hassas bir şekilde ayarlanması; düşük su/bağlayıcı oranı ve çelik lif içeriği ile işlenebilirliğin etkilenmesi nedeniyle tasarımı ve üretimi kapsamındaki çalışmalar devam etmektedir. Ayrıca işlenebilirliğin artırılması için kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkıların etkisini gösterebilmesi için karıştırma süresinin ve devrinin uygun şekilde belirlenmesi gerekmektedir [34], [35]. UYPB karışım süresinin azaltılmasına yönelik yapılan araştırmalarda, karıştırma işlemini yüksek devirde yapabilen karıştırıcıların kullanılması; tane dağılımının optimize edilmesi; kullanılan süperakışkanlaştırıcının uygun seçilmesi gerektiği belirtilmiştir [35]–[37]. UYPB karışımlarında tane dağılımı dizilimi ile ilgili birçok araştırma ve geliştirme çalışmalarının yapılmış olmasına rağmen, pratik uygulamalar ve standartlar tercih edilmektedir. Bu sebeple, Fuller eğrisi birçok araştırmacı tarafından kullanılmaktadır. Literatürde en uygun tane dizilimini elde etmek için optimum tane dağılım eğrisi, tane dizilim modeli ve ayırık elemanlar modeli olmak üzere üç ana yöntem yer almaktadır. Optimum tane dağılım eğrisi yönteminde, agrega tane boyutlarına göre ideal tane dağılım

eğrisinin belirlenmesi; tane dizilim modeli yönteminde, farklı boyutlardaki tanelerin geometrik olarak etkileşimlerinin matematiksel denklemlerinin belirlenerek, teorikte karışımın tane dizilim yoğunluğunun hesaplanması; ayırık elemanlar modeli yönteminde, tanelerin hareketlerine göre dinamik modeller oluşturularak, en yüksek tane dizilim yoğunluğu için birkaç tane karışım bileşeninin simülasyonunun yapılması ile en uygun tane dizilimi elde edilmektedir.

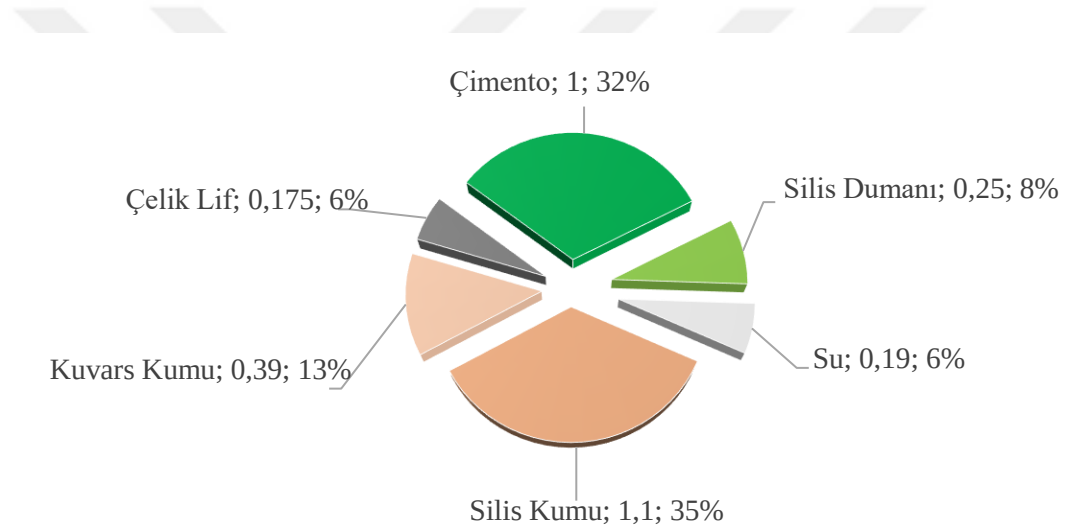
Beton tarihinde karışım tasarımlarının ilk çalışmaları uygun agrega tane dağılımlarının belirlenmesi odağında, 19. yy'da başlamıştır. Feret (1892), yaptığı çalışmada agrega tane dizilimi ve boşluk oranı arasındaki ilişkinin basınç dayanımına etkisi olduğunu öne sürmüştür [38]. Fuller ve Thompson (1907) [39] ile Andreasen ve Andersen (1930) [40], agregaların tane dizilimini yoğunlaştırmak için ideal agrega tane dağılım eğrisine yönelik bazı yöntemler önermişlerdir. Bu alanda en önemli çalışmalar Fuller ve Thompson tarafından yapılmış, günümüzde hala karışım tasarımı hesaplamalarında bu araştırmacılara ait tane dağılım eğrisi kullanılmaktadır. Furnas (1929) [41], karışımda yer alan iki farklı tane grubu ile boşluk oranını ilk kez analitik modelle tasarlanmıştır. Ancak, araştırma sadece iki farklı tane yapısı ile yapıldığı için yetersiz görülmüştür. Powers (1968) [42], farklı bileşenlerin birbirleriyle olan etkileşimlerinin sıkıştırılmış tane yapısına olan etkisini araştırmıştır. UYPB'lerde karışım tasarımlarının yanı sıra üretim yöntemleri de kompozitin mekanik ve dayanıklılık özelliklerini etkileyen önemli bir parametre arasında yer almaktadır. Bu kapsamda daha hızlı beton dayanımı sağlama, azaltılmış sünme, gecikmiş büzülme, geliştirilmiş sürdürülebilirlik ve dayanıklılık gibi etkiler için farklı kür yöntemleri kullanılmaktadır. Japon İnşaat Mühendisleri Birliği (JSCE, 2008) tarafından, ısı kürlenmesinin %100 bağıl nemde 48 saat 90°C'de sürdürülmesi; son sıcaklığa (90°C) ulaşılan kadar sıcaklıktaki artışın 15°C/sa olması; dökümden sonra ikinci gün yapılması önerilmektedir [43]. Ayrıca gecikmiş etrenjit oluşumu riskini ortadan kaldırmak için 90°C'de 48 saat boyunca süren ısıl kür işlemi beton prizini bitirdikten sonra uygulanmalıdır [44]. Isıl kür işlemine tabi tutulan UYPB'lerde aşağıdaki etkiler ortaya konmuştur [11], [12].

- Kısa sürede UYPB nihai olgunluğa ulaşmakta,
- Puzolanik reaksiyon hızlandırılarak, matris yapısı iyileştirilmekte,
- Basınç ve çekme dayanım değerleri, 28 günlük normal kür koşullarına göre yaklaşık %10 daha yüksek elde edilmekte,

- Malzemede rötre çatlakları ve sünme önemli ölçüde azalmaktadır.

2.1.3. Ultra Yüksek Performanslı Beton Bileşenleri

İstenen performans özelliklerine göre UYPB karışım tasarımları yapılarak, gerektiği durumda özel uygulamalar ile UYPB üretimi gerçekleştirilmektedir. Genel olarak çimento, silis dumanı, doğal kum, kuvars tozu, çelik lif, kimyasal katkıların kullanımı ve düşük su/bağlayıcı oranlarında üretilmektedir. Kullanılan agregaların küçük tane boyutlu olması ve yüksek oranda kimyasal katkı maddeleri tercih edilmektedir. UYPB tasarımı üzerine yapılan ilk araştırmalarda kullanılan karışım oranları [12] Şekil 2.2’de verilmiştir. UYPB bileşenleri daha ayrıntılı bir şekilde aşağıdaki bölümlerde sunulmuştur.



Şekil 2.2. Ultra yüksek performanslı örnek karışım bileşenleri.

2.1.3.1. Çimento

Portland çimentosunun klinker yapısını oluşturan ana bileşenler; dikalsiyum silikat ($2\text{CaO}.\text{SiO}_2$), trikalsiyum silikat ($3\text{CaO}.\text{SiO}_2$), trikalsiyum alüminat ($3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$) ve tetrakalsiyum alüminoferrit ($4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$) şeklindeki karmaoksitlerdir. Dikalsiyum silikat ve trikalsiyum silikat portland çimentosunun %75-80’ini oluşturmaktadır. Çimento kimyasında dikalsiyum silikat C_2S , trikalsiyum silikat C_3S , trikalsiyum alüminat C_3A ve tetrakalsiyum alüminoferrit ise C_4AF olarak kısaltmalarla ifade edilmekte, her bir ana bileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona girmektedir. Her bir bileşenin reaksiyon hızı, açığa çıkardığı ısı ve reaksiyon sonucu ortaya çıkan ürünün

çimento bağlayıcılığına katkısı farklı olmaktadır. C_2S ve C_3S 'nin su ile reaksiyonu sonucu C-S-H ve CH hidrasyon ürünleri oluşmakta, C-S-H jeli de betonun dayanımını artırmaktadır. $Ca(OH)_2:CH$, bir puzolanik reaksiyonda ana işlem olan ek kalsiyum (C-S-H) jelini üretmek üzere puzolanlardan amorf silis ile reaksiyona girerek dayanıma katkı sağlamaktadır [45]. Portland çimentosunun ana bileşenlerinin hidrasyon davranışlarına yönelik kıyas tablosu Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çimentodaki ana bileşenlerin relatif özellikleri [45].

	C_2S	C_3S	C_3A	C_4AF
Reaksiyon Hızı	yavaş	orta	hızlı	orta
Hidrasyon Isısı	az	orta	çok yüksek	orta
Erken Yaşlarda Dayanıma Katkısı	düşük	yüksek	düşük	düşük
İleri Yaşlarda Dayanıma Katkısı	yüksek	yüksek	düşük	düşük

Çimentolu kompozit karışımlarında öncelikle C_3A içeriği ve tane dağılımı başlıca kontrol etkenleri arasında yer almaktadır. Karma oksit bileşimi, çimento inceliği, tane dağılımı hidrasyon ısısını etkileyerek, erken ve nihai dayanımı belirlemektedir. C_3A 'nın yüksek oranda bulunması ve tane inceliğinin yüksek olması su ihtiyacını artırmakta, artan su ile hacim genleşmesi, rötre gibi problemler ile karşılaşmaktadır. Dolayısıyla kimyasal kompozisyonunda düşük C_3A içeriği olan çimentolar dayanım değerlerinde daha iyi sonuçlar vermektedir. UYPB' karışımlarında, özel olarak üretilen CEM-I tip 42.5R ve 52.5R dayanım sınıflı hafif alkali çimentolar kullanılmaktadır. Çimentonun inceliği de betonun özelliklerini etkilemektedir. Yüksek inceliğe sahip çimento hızlı hidrasyon eğilimindedir ve çimento karışımına düşük inceliğe sahip çimentoya göre daha erken yaşta basınç dayanımı vermektedir [45]. UYPB'yi üretmek için kullanılan çimento içeriği, çoğunlukla 700 ile 1100 kg/m³ arasında olan normal betona kıyasla çok yüksek bir miktara sahiptir. Çimento oranı genellikle %60-80 arasında değişmektedir [46]. UYPB'de kullanılan çimento miktarı geleneksel normal dayanımlı betonlara göre daha yüksektir. Son dönemlerde yapılan deneysel çalışmalarda, UYPB karışımında kullanılan çimentonun yüksek maliyeti, çevresel etkileri ve büzülme gibi olumsuz etkilerini azaltmak amacıyla cam tozu (CT), yüksek fırın cürufu (YFC) ve uçucu kül (UK) gibi katkı maddeleri eklenerek beton davranışı farklı parametreler (beton basınç dayanımı, çekme dayanımı, eğilme dayanımı, sünme, iç-yapı, işlenebilirlik) açısından incelenmiştir

[22], [47]–[49]. Sülfonata dayalı süper akışkanlaştırıcılar C_3A ile etkileşime girebilmektedir. Daha yeni poli-akrilat bazlı süperakışkanlaştırıcılar ise bu etkileşime daha az duyarlıdır [50]. UHPC üretiminde yüksek miktarda süperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanıldığı için, üretimde kullanılacak çimentonun seçiminde süperakışkanlaştırıcı ile uyumlu olmasına dikkat etmek gerekmektedir. Bunun yanı sıra çimentodaki C_3A ve alçı içeriği, betonun özellikle işlenebilirliği üzerinde önemli etkiye sahiptir. UYPB üretimi için C_3A çimentosu içeriğinin %8'den az olması gerektiği önerilmektedir [45], [51], [52]. Çimentonun kimyasal bileşim açısından, düşük trikalsiyum alüminat (C_3A) içeriğine sahip çimentolar, daha az miktardaki su gereksinimlerinden dolayı daha iyi performans göstermektedir [52]. Ayrıca, UYPB üretim tekniğinde uygulanan yüksek sıcaklıklardaki kür işleminde, gecikmiş etrenjit oluşumu (DEF) riski açısından da düşük C_3A içeriği avantajlı olmaktadır. UYPB üretiminde kullanılan çimento miktarının geleneksel betona göre yaklaşık iki katı olması, su/bağlayıcı oranının düşük olmasından dolayı, çimento parçacıklarının tamamı reaksiyona giremeyebilir. Bu durumda reaksiyona girmeyen çimento taneleri, kompozit yapıda dolgu malzemesi göreviyle, daha sıkı tane düzenine katkıda bulunmaktadır [15].

2.1.3.2. Minerak Katkı (*Silis Dumanı*)

Tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan, ancak ikame ve ilave yoluyla beton karışımlarına eklenmesi ile beton performansını iyileştiren puzolanlar, günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Puzolanın ana bileşeni olan amorf veya camsı silika (S), kalsiyum silikatların hidrasyonundan oluşan kalsiyum hidroksit (CH) ile tepkimeye girerek, kalsiyum silika hidrat (C-S-H) ürünlerini oluşturmaktadır. C-S-H, beton kapiller boşluklarını doldurarak daha yoğun bir matris oluşturmaktadır. Yapıda porozitenin azaltılması ile beton dayanım ve dayanıklılığı artırılmaktadır [50]. Küçük tane yapılarına sahip mineral katkıların kullanılması ile betonun birçok özelliği iyileştirilmektedir. Çimento ve agrega arasındaki boşlukların verimli bir şekilde doldurulması sağlanarak, matris yapıyı daha yoğun hale gelmektedir [53]. Mikro boyutta agregalar, puzolanik aktivitesi yüksek mineral katkılar, lifler, kimyasal katkılar kullanılarak ve uygun karışım tasarımları ile düşük su/bağlayıcı oranında UYPB'lerin özellikleri geliştirilebilmektedir. UYPB üretiminde puzolanların tercih edilmesinin en önemli sebebi, çimento hidrasyonu ile açığa çıkan ve reaksiyon ürünü olan serbest kireç ile puzolanın reaksiyona girerek C-S-H oluşturmaları, buna bağlı olarak porozitenin azaltılmasıdır. Ayrıca puzolanların tane yapılarının küresel olmasından dolayı birbirleri üzerinde kayma etkisi kolaylaşmakta ve

matrisin reolojik özellikleri geliştirilmektedir. UYPB üretimlerinde araştırmacılar tarafından önerilen silis dumanı içeriği farklılık göstermektedir. Richard ve Cheyreyz [12], çimento miktarının %25'i oranında; Papadakis [54], ortamdaki serbest kirecin tamamen tüketilmesi için çimentonun %18'i oranında önermiştir. Chan [55], bağlanma özellikleri açısından optimum silis dumanı içeriğinin %20 ile %30 arasında olduğunu; Chan vd. ile Yang vd. [55], [56], 200 MPa dayanıma ulaşılması için %30-35 olduğunu ifade etmiştir. Ancak performansın iyileştirilmesi için matris yoğunluğunun artırılması istendiği için bu miktar en uygun yaklaşık %25 olarak belirlenmiştir [10], [12].

Silis dumanı (SD), çimentonun ilk hidratasyonunu hızlandırmaktadır. Yüksek su/bağlayıcı oranında silis dumanının hızlandırıcı etkisi artmakta olup, düşük su/bağlayıcı oranında çimento hidratasyonu gecikmektedir. Silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanımı ile çimento hidratasyonu önemli miktarda gecikmektedir. Dolayısıyla hidratasyon ısı azalmakta ve silis dumanının ilk hidratasyon hızlandırma etkisi engellenmektedir [57]. Silis ve ferro silis üretiminin yan ürünü olan SD nano boyutta, camsı, küresel tanecikli, düzgün yüzeyli ve amorf bir yapıda ortaya çıkmaktadır. Özgül ağırlığı yaklaşık $2,20 \text{ kg/dm}^3$ 'tür [58]–[60]. Tanecik boyutu çimentonunkinden yaklaşık 100 kat daha küçük olup, ortalama partikül büyüklüğü $0,1\text{--}0,2 \text{ }\mu\text{m}$ 'dir. Yüzey alanı yaklaşık olarak $220.000\text{--}300.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ 'dır [58], [61]–[63]. Amorf ve çok ince tane boyutuna sahip silis dumanı, nano boyuttaki yapısı ve SiO_2 içermesi nedeniyle, çok iyi puzolanik özellik gösteren bir malzemedir [45], [64]. Silis dumanı taneleri, çimento ve agrega taneleri arasındaki çok küçük boşlukları bile doldurarak, granülametriyi iyileştirmekte, daha yoğun bir yapı ile dayanım ve durabileteyi artırmaktadır. Ancak yüzey alanının çok büyük olmasından dolayı yapıdaki su ihtiyacını artırarak, işlenebilirliği olumsuz etkilemektedir [45], [65], [66]. Silis dumanı, çimentolu matris yapısındaki kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek, mukavemeti daha yüksek C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) jellerini meydana getirmektedir. Bu puzolanik reaksiyon, klinker ana bileşenleri C_2S ve C_3S 'nin su ile reaksiyona girerek oluşturdukları C-S-H jellerinin boşluklarında gerçekleşmekte, matristeki C-S-H jel yoğunluğunu artırmaktadır. Puzolanik C-S-H yüzey alanı, SD ve Ca(OH)_2 'nin toplam yüzey alanından daha az olduğu için puzolanik reaksiyonlar sonrası yapıdaki porozite azalmaktadır. Yani puzolanik aktivite ile birlikte yapıdaki Ca(OH)_2 kristalleri küçülmekte, yapıdaki gözeneklilik azalmaktadır. Buna bağlı olarak matris yapı daha homojen hale gelerek, mukavemet artışına sebep olmaktadır [58], [60].

2.1.3.3. Minerak Katkı (Kolemanit)

Dünyada maden endüstrisinde bor önemli bir yere sahiptir. Dünya bor rezervlerinin (B_2O_3) %73,4'ü Türkiye'de bulunmaktadır [67]. Bor mineralleri doğal bileşikler olup, yapılarında farklı oranlarda B_2O_3 içermektedir. Bor doğada serbest halde bulunmamakta ve bor elementleri farklı minerallerin yapısında farklı miktarlarda bulunmaktadır [68]. Doğada yaklaşık 230 farklı bor minerali bulunmaktadır [69]. Bor ürünleri, uzay ve hava araçları, nükleer uygulamalar, askeri araçlar, yakıtlar, elektronik ve iletişim sektörü, tarım, cam sanayi, kimya ve deterjan sektörü, seramik ve polimerik malzemeler, nanoteknolojiler, otomotiv ve enerji sektörü, metalurji ve inşaat gibi 500'e yakın alanda kullanılmaktadır [67]. Türkiye'de en yaygın ve ticari bor mineralleri kolemanit, tinkal ve üleksittir [69]–[71]. Bor minerallerinin çıkarılması ve işlenmesi sırasında, bor mineralindeki kilin mekanik yöntemlerle ayrıştırılması kullanılan en yaygın yöntemdir. Ancak bu yöntem kil ve bor minerallerinin birbirinden ayıramadığı durumlarda bor mineralleri içeren bazı atıkların oluşmasına sebep olmaktadır [72]. Bu atıklar ekonomik ve ekolojik sorunlara yol açabilmektedir [73]. Buna bağlı olarak, ortaya çıkan atıkların değerlendirilmesi amacıyla birçok alanda çalışmalar yapılmaktadır. Bor atıklarının çimento ve beton üretiminde kullanımına yönelik çalışmalar devam etmektedir. Bor içeren atıkların geopolimerler ve karolar gibi farklı uygulamalarda kullanılabilirliğinin [74]–[77]; bor minerallerinin çimentolu karışımlarda radyasyon kalkanı özelliklerine katkısının [78] araştırıldığı literatürde görülmektedir.

Maliyet, rezerv potansiyeli ve endüstrinin talepleri bakımından, araştırmalar son yıllarda bor minerali kolemanit üzerine yoğunlaşmıştır. Kolemanit ($2CaO.3B_2O_3.5H_2O$: dikalsiyum hegzaborat pentahidrat), sertliği 4-4,5 aralığında ve özgül ağırlığı yaklaşık $2,42 \text{ g/cm}^3$ olan kalsiyum borat mineralidir. Saf kolemanitin B_2O_3 içeriği yaklaşık %51 oranında olup, görünüş olarak elmasa benzemekte ve onun kadar sert bir yapıdadır [79]. Toz/sıvı deterjanlar, dezenfektan, kozmetik ürünleri, gübre, tarım ilacı, fotoğrafçılık kimyasalları, cam, tekstil tipi cam elyafı, sır ve emaye kaplamaları, naylon, metalürjik cüruflar, yağlayıcılar, nükleer santraller, mıknatıs, süperiletken malzeme, aşırı yüksek sıcaklık seramiği, radyasyondan koruyucu malzeme, alev geciktirici malzeme, cam elyaf bazlı yalıtım malzemesi, ahşap koruma malzemesi, asfalt beton, borlu çimento, çimento betonu vb. gibi pek çok endüstriyel alanda kolemanit kullanılmaktadır [70], [80], [81].

Yapılan araştırmalarda kolemanitin çimentolu malzemelerde kullanılması ile sertleşme süresinin uzadığı ve erken yaşlarda dayanım değerlerini düşürdüğü [82]–[85], maksimum

%5 ile %7 oranlarda kullanılmasının da uygun olacağı belirtilmiştir [82], [86]. Ayrıca, çimento üretiminde %8 kolemanit minerali kullanımı ile klinker pişirme sıcaklığı azaltılmaktadır. Bor katkılı çimento, dayanım, su ve gaz geçirgenliği, hidrasyon ısısı açısından portland çimentosundan daha iyi performans göstermektedir. Hidrasyon ısısının az olması, bilhassa kütle betonlarında soğutma gereksinimini ciddi miktarda düşürmektedir. Bir diğer önemli etki ise, kolemanit katkısı ile çimento üretiminde atmosfere yayılan karbon dioksiti miktarının yaklaşık %25-30 aralığında azaltılması [71], buna bağlı olarak maliyette azalma, enerji tasarrufu sağlanarak üstün özellikte ürünler elde edilmesidir [87]. Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi kapsamında, iklim değişikliğinin azaltılması; adaptasyonu; finansmanı hakkında 2015 yılında imzalanan ve 2016 yılında yürürlüğe giren Paris Antlaşması değerlendirildiğinde, bor mineralleri ve bor atıklarının endüstri açısından önemi bir yere sahip olduğu düşünülmektedir.

2.1.3.4. Mineral Dolgu(Silis Kumu, Kuvars Kumu)

UYPB karışımlarında mineral dolgu tane boyutu ve kullanım miktarına bağlı olarak komposite ve matris yapının tokluğunun iyileştirilmesi sebebiyle, karışımlarda kullanılacak mineral dolgu miktarı ve tane boyutu önemli parametreler arasında yer almaktadır. İnce agregaların kullanılmasıyla daha homojen bir yapı için yoğun matris ve uygun tane dağılımı hedeflenmektedir.

Mikro yapıda yüksek yoğunluğun elde edilebilmesi için beton karışımlarındaki agrega tane dağılımı optimizasyonunun, en büyük doluluğu sağlayacak şekilde düzenlenmesi gerekmektedir. Dolayısıyla en fazla doluluğun sağlanması için optimizasyonda kesikli granülometri esası (bazı agrega tane çaplarının olmaması) ile matris yapı oluşturulmaktadır [88].

UYPB karışımlarında kullanılan yüksek orandaki bağlayıcı ile matris yapı yüksek dayanıma ulaşmaktadır. Matris yapıdaki agrega hamur arayüzeyinin zayıflamaması için UYPB karışımlarında yüksek dayanım özelliklerine sahip agrega kullanılmaktadır [14]. UYPB karışımlarında maksimum doluluk oranına ulaşılması, beton maliyetinin azaltılması, tane dağılımı optimizasyonunun sağlanması için dayanımı yüksek silis kumu ve kuvars kumu kullanılmaktadır. Ancak kuvars kumu maliyet açısından ekonomik olmamakla birlikte UYPB'nin daha geniş kullanımını kısıtlamaktadır. UYPB'nin hem çevresel etkisini iyileştirmek hem de maliyeti azaltmak için, geleneksel beton kumları,

kuvars kumunun ekonomik ikamesi olarak kullanılmaktadır [52]. Silisyum dioksit (SiO_2) doğada kum ve kuartz şeklinde bulunmaktadır. Silis kumu, kuvarsça zengin magmatik, metamorfik kayaçların ayrışması sonucu oluşan ve 2 mm'den küçük kuvars (SiO_2) tanecikleridir. Genel olarak beyaz renkli olup, demir oksit içeren kumların rengi pembeden kızıla veya kahverengiye kadar değişebilmektedir. Kullanma amaçlarına göre gerek fiziksel, gerekse kimyasal açıdan istenen özelliklere getirilebilmeleri için cevher hazırlama işlemlerine tabi tutulabilmektedirler. Ülkemizin çoğunlukla Trakya ve Şile bölgelerinde bulunmakta olup, madenlerin karakter yapısına ve bölgelere göre bünyelerindeki silis oranları, kimyasal yapıları ve sertlik oranları değişebilmektedir. Silis kumları nemli ve kuru olarak sanayide kullanılabilmekte, kırma işlemi ile elde edilmediği için yuvarlak yapıda bulunmaktadır. Kırılma işlemi sonrası toz haline getirilen ve yüksek dayanım özelliğine sahip olan kuvars kumu, yüksek sıcaklıklarda çimento reaksiyonu sonucu oluşan serbest kireçle reaksiyona girerek, yeni ürünler (C-S-H) oluşturmaktadır [89]. Bundan dolayı kuvars kumunun, genellikle ısıtılmış kür uygulamasıyla üretilen UYPB'lerde kullanımı uygun olmaktadır [12].

2.1.3.5. Çelik Lif

Şekil değiştirme özellikleri olan çimento esaslı matrisler, çekme etkisi altında gevrek davranış göstermektedir. Çelik lif ilavesi ile matrisin çekme özelliklerine katkı sağlanarak, beton çekme ve eğilme dayanımı, tokluğu iyileştirilmektedir. Betonda istenilen özelliklere göre kullanılan çelik lifler, boyutlarına ve şekillerine göre sınıflandırılmakta; düz, kancalı, kıvrımlı, pirinç kaplamalı vb. gibi tipleri bulunmaktadır.

Çelik lif içeren betonların, yüksek eğilme rijitliğinin yanı sıra servis yükleri altında daha az çatlak oluşturma özelliği bulunmaktadır. Çelik liflerin çekme dayanımları ve çekme şekil değiştirme kapasiteleri yüksek olduğu için matrisin daha fazla yük taşıması sağlanmaktadır. Yük etkisi altında matriste oluşan ilk çatlak sonrası, etkiyen yükler çelik lifler tarafından taşınmakta böylece gevrek olan matris elastik ve şekil değiştirebilen bir yapı oluşturmaktadır. Çelik lif içeren betonlar, geleneksel betonlara göre süneklik ve enerji yutma kapasitelerindeki artış ile farklılık göstermektedir. Geleneksel betonlarda kullanılan donatı çubuklarının eğilme dayanımdaki etkisi, çelik lif içeren betonlara kıyasla yetersiz kalmaktadır [90]. İlk yükleme etkisi ile oluşan çatlak sonrasında, etkiyen yükler matris içerisinde yer alan çelik liflerin şekil değiştirmesine; yük miktarının artması ile de çelik liflerin genellikle matristen sıyrılma eğilimine sebep olmaktadır. Maksimum yüke ulaşılması ile çelik lif içeren beton göçmekte, göçme bölgesindeki çelik lifler

matristen tamamen sıyrılmaktadır [91]. Ancak, bu davranışlar düşük su/bağlayıcı oranına sahip yüksek ve ultra yüksek dayanımlı / performanslı betonlarda farklılık göstermektedir. Bu tür betonlarda lif ile matris aderansı daha yüksek olduğu için çatlak oluşumu sonrasında liflerin matristen sıyrılmaları zorlaşmakta; çelik lifler matristen koparak ayrılmaktadır [91], [92]. Kopma eğilimi gösteren çelik liflerin yüksek çekme dayanımına sahip olması gerekliliğinden dolayı, çekme dayanımı 2000 N/mm^2 'yi aşan çelik liflerin üretimine ihtiyaç duyulmuştur [90]. Çelik lifler, çatlakların kontrol altına alınması ile betonun eğilme momenti kapasitesi, sünme, rijitlik, çekme gerilme dayanımının artırılması avantajlarını sağlamaktadır. Ayrıca betonda istenilen özelliklere göre karışımlarda kullanılacak olan lif tipi ve hacmi belirlenerek karışım tasarımları hazırlanmaktadır. Örneğin normal dayanımlı beton karışımlarında kanca uçlu lif 60 kg/m^3 olarak tasarlanırken, aynı sünekliği elde etmek için yüksek dayanımlı beton karışımlarında lif miktarı 120 kg/m^3 olarak artırılmaktadır [93].

Matris yapıdaki çatlakların kontrolü için beton karışımlarında mikro, mezo ve makro boyutta lifler kullanılmaktadır. Matris yapıda oluşan, uzunluğu numune veya yapının boyutlarına göre çok küçük olan çatlaklar mikro çatlak; uzunluğu numune veya yapının boyutlarına göre çok küçük olmayan çatlaklar makro çatlak olarak isimlendirilmektedir. Makro lifler, büyük çatlakların kontrol edilmesini; maksimum yük sonrası davranışın iyileştirilmesini; elastisite modülü, çekme ve eğilme dayanımlarında artış sağlamaktadır. Mikro lifler ise, mikro çatlakların başlangıç ve gelişim kontrolünü; matris içerisinde daha yoğun lif dağılımını; elastik bölgedeki davranışın iyileştirilmesini sağlamaktadır [91]. Mikro çelik lifler, kısa boy ve yüksek narinliklerine rağmen pirinç kaplı oldukları için, matris yapı ile adreansı kuvvetli olmaktadır. Ayrıca narinliğin artması, taze betonun işlenebilirliğini olumsuz etkileyerek, liflerin homojen dağılımını engellemekte ve matris içerisinde zayıf bölgelerin oluşmasına neden olmaktadır. Bu yüzden lif narinliğinin 100, lif içeriğinin hacimce %2 ile sınırlandırılması önerilmektedir [93]. Bunların yanı sıra matris yapıda mikro liflerin kullanımı hacim olarak makro life göre daha fazla olduğu için, numunenin veya yapının tüm kesitinde yer alan mikro liflerle çatlak ilerlemesi yavaşlatılabilmektedir. Ayrıca mikro liflerin çekme dayanımı, makro liflere göre daha yüksek olmaktadır [94].

UYPB'lerde lif kullanımı ile gevrek ve yüksek dayanımlı matrisin, basınç ve çekme gerilmesi altında sünekliği artırılmaktadır [12]. Lifler, köprüleme etkisi ile matriste oluşan gerilme ve çatlaklardaki yükün aktarılmasına destek sağlayarak, matrisin gücünü

artırmaktadır. Bunun yanı sıra lif ile matris aderansının yüksek olmasından dolayı yapıdan sıyrılma eğiliminde olmayan lifler ile beton tokluğu iyileştirilmektedir [49]. UYPB karışım tasarımlarında kullanılan lif tipi; geometrisi; miktarı, basınç ve çekme gerilmesindeki süneklik davranışını önemli ölçüde etkilemektedir [11], [62], [88], [95], [96]. Bunun yanı sıra tasarımlarda karbon, polimer ve çelik lif tipleri kullanılmakta, en yaygın tercih edilen tip çelik lif olmaktadır [97]. UYPB tasarımlarında beton tokluğunun artırılması için kullanılan çelik lifler genellikle kısa, pürüzsüz ve düz tercih edilirken; normal ve yüksek dayanımlı betonlarda kancalı lifler kullanılmaktadır. Ayrıca hacimce %2-6 oranında, 13 mm uzunluk, 0,15 mm çap, yaklaşık 2000 MPa çekme dayanımı olan düz çelik lifler UYPB üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak beton performansı ve üretim maliyeti bir arada değerlendirildiği durumda, çelik lif kullanım miktarının hacimce %2 oranında kullanılması en uygun çözüm olarak önerilmiştir [12], [62]. Yapılan araştırmalarda, hacimce %2,5 çelik lif içeren betonun eğilme dayanımının, lifsiz betona kıyasla %144 oranında arttığı görülmüş [98]; basınç dayanımının %15 oranında artış göstererek, basınç dayanımı üzerindeki etkisinin çok yüksek olmadığı tespit edilmiştir [95]. UYPB’de kullanılan çelik liflerin hacimsel oranı, geometrisi, narinliği (boy/çap) göz önünde bulundurularak yapılan uygun karışım tasarımları betonun performansını iyileştirmekte, ancak düşük su/bağlayıcı oranı ve yoğun yapıdan dolayı işlenebilirlik azalmaktadır. Bu durumda karışımlara uygun süperakışkanlaştırıcılar eklenerek işlenebilirlik artırılmaktadır. Bunun yanı sıra farklı tip ve uygun oranlarda liflerin (hibrit) beraber kullanılarak, makro ve mikro düzeylerde çatlakların sınırlandırılması amaçlanmaktadır. Hibrit lif kullanıldığı durumda, kısa lifler, yapı veya numunenin boyutlarına göre uzunluğu küçük olan mikro çatlakların oluşumunu ve yayılımını sınırlamaktadır. Uzun ve kancalı lifler ise, numune boyunca bir veya birden fazla noktada bölgeleşen makro çatlakları köprüleme özelliği ile kontrol etmektedir. Buna bağlı olarak da betonun yüksek şekil değiştirme kapasitesine ulaşabilmesi sağlanmaktadır [96], [99]–[101].

2.1.3.6. Kimyasal Katkı (Süperakışkanlaştırıcı)

Kimyasal katkıları, betonda iyileştirilmek istenen özelliklere göre farklı tipleri ile kullanılmaktadır. ASTM C 494 [102] standardına göre, su azaltıcı katkıları (Tip A); priz geciktirici katkıları (B Tipi); priz hızlandırıcı katkıları (Tip C); su azaltıcı ve priz geciktirici katkıları (D Tipi); su azaltıcı ve priz hızlandırıcı katkıları (E Tipi); su azaltıcı ve üstün plastisite sağlayıcı katkıları (Tip F); sertleşme geciktirici - beton üstün plastisite

sağlayıcı katkıları (Tip G) olarak sınıflandırılmaktadır. Priz geciktirici ve priz hızlandırıcı kimyasal katkıları, taze betonun sertleşme süresini; su azaltıcı kimyasal katkıları ise taze beton işlenebilirliğini etkilemektedir. Bunun yanı sıra su azaltıcılar, orta dereceli su azaltıcı ve yüksek aralıklı su azaltıcı (süperakışkanlaştırıcı veya HRWRA) olarak da sınıflandırılabilir [62]. Kimyasal katkıları kullanılmadan beton dayanımının iyileştirilmesi hedeflendiği durumda, çimento miktarının artırılması; daha yüksek oranda kullanılan çimento miktarı ile işlenebilirliğin sağlanması için de su miktarının artırılması gerekmektedir. Ancak beton karışımlarında daha yüksek oranlarda kullanılan çimento ve su miktarı, kimyasal reaksiyonlarla ilişkili olarak hidrasyon ısını ve büzülme miktarlarını artırmakta, beton performansını olumsuz etkilemektedir [103]. Sabit işlenebilirlik değerinde, akışkanlaştırıcıların kullanılması durumunda su miktarı azaltılmakta, dolayısıyla beton karışımının su/çimento oranı düşük olmaktadır. Ortamdaki suyun azaltılması ile hidrasyon ısı düşmekte, azalan hamur hacminin yerini dolgu malzemelerinin alması ile de büzülme azalmaktadır. Bunların yanı sıra betondaki kapiller boşluklar ve geçirimsizliğin azalması ile dayanım ve dayanıklılık iyileştirilmektedir [103], [104]. Beton karışımlarında kullanılan akışkanlaştırıcılar, çimento taneleri tarafından absorbe edilerek, tanelerin yüzeylerini kaplamaktadır. (–) yük ile yüklenen çimento tanelerinin birbirlerini itmesi ile tanelerin birbiri ile topaklanması önlenirken, bu tanelerin birbiri üzerinde kaymaları da kolaylaşmakta buna bağlı olarak da beton karışımının iç sürtünmeleri azaltılmaktadır [105]. Ancak, akışkanlaştırıcıların beton karışımlarında çok fazla miktarlarda kullanımının, prizi geciktirdiği ve erken yaş kuruma rötresini artırdığı tespit edilmiştir [106].

Ultra yüksek performanslı betonlarda yüksek dayanımın yanı sıra dayanıklılık ve işlenebilirlik diğer önemli parametreler arasında yer almaktadır. Oldukça düşük su/bağlayıcı oranı ile üretilen UYPB’lerde işlenebilirlik, karışımlara eklenen süperakışkanlaştırıcılar ile sağlanmaktadır. Ayrıca kullanılan süperakışkanlaştırıcının tipi ve içeriği beton performansı açısından kritik derecede önemlidir. Yeterli miktarda su azaltıcı etkisinden dolayı, UYPB üretiminde polikarboksilat eter esaslı üçüncü nesil süperakışkanlaştırıcılar tercih edilmektedir [103], [107]. Polikarboksilatlar, negatif fonksiyonel gruplar ve hidrofilik yan zincirleri taşıyan bir polar zincire sahiptir. Kutup zincirleri, kendilerini çimento tanesinin pozitif yüklerine bağlayarak çimento tanesini çevrelemektedir. Yan zincirler, çimento tanelerinin tamamen suyla çevrelenmesine izin verecek şekilde, çimento tanelerini birbirlerinden uzak tutmaktadır. Bunların yanı sıra,

ortamdaki negatif yüklü fonksiyonel gruplar, birbirlerini itmektedir (fenomen elektrostatik itme) [62]. Sonuç olarak, polikarboksilat eter esaslı süperakışkanlaştırıcı dağıtıcı etkiye sahiptir. Melamin bazlı süperakışkanlaştırıcı veya naftalen ile karşılaştırıldığında iki veya üç kat daha fazla etki göstermektedir. Buna bağlı olarak, taze beton fazında daha akışkan bir yapının oluşturulması ile karışımın işlenebilirliğine önemli oranda katkı sağlanmaktadır.

2.2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.2.1. Ultra Yüksek Performanslı Beton İle İlgili Önceki Çalışmalar

UYPB alanında yapılan bazı araştırmalara ait veriler aşağıda sunulmuştur.

Tuan vd. [108], UYPB betonlarda pirinç kabuğu külünün (PK) etkisini ve PK ile silis dumanının (SD) sinerjik etkisini araştırmak amacıyla, PK ve SD'nin çimento ile farklı oranlarda ikamesi ile %10-20PK, 10-20-30SD, 10PK+10SD, 20PK+10SD, 30PK+10SD, 5PK+15SD, 15PK+5SF oranlarında karışımlar hazırlayarak işlenebilirlik, 3-7-28-91 günlük basınç dayanımı testleri yapmıştır. Taze beton akma çaplarının 210-230 mm arasında olması için süperakışkanlaştırıcı miktarlarının SD ve SF ikamesine bağlı olarak değiştirildiği; %10-20 arasında çimento ile SD ikamelerinin karışımların işlenebilirliği üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğu; %20'den fazla çimentonun SD ile değiştirildiği durumda süperakışkanlaştırıcı miktarının dramatik bir şekilde yükseldiği, %30SD için %1,43 ve %40SD için %2,38 oranında arttığı belirtilmiştir. Ayrıca çimentonun PK ikamesinin %10 SD ile birleştirildiğinde %40'a çıkarılabileceği; PK değiştirme yüzdesinin %40'ın üstünde olduğunda kullanılacak olan süperakışkanlaştırıcı miktarının arttığı ve yayılma çapının maksimum 170 mm olduğu, buna bağlı olarak UYPB üretimi için SF ve RHA kombinasyonunun toplam çimento ikame yüzdesini %40'ına kadar arttırılabileceği (%30PK+%10SD) ifade edilmiştir. 3,6 ve 9 mm ortalama tane çapında PK içeren UYPB örneklerin normal kütleme ile 150 MPa'nın üzerinde olduğu, PK taneleri inceliğinin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu ve ortalama tane çapı 3,6 mm olan PK'nın UYPB dayanımının 28 ve 91.günlerde 180 ve 210 MPa olduğu, UYPB basınç dayanımı üzerinde SD ve PK sinerjik bir etki olduğu ve %10PK ve %10SD içeren üçlü çimento karışımı ile yapılan numunelerin, PK ve SD içermeyen kontrol numunesinden daha iyi basınç dayanımı gösterdiği ve buna bağlı olarak %10PK

ve %10SD kombinasyonunun maksimum sinerjik etki için optimum oran olduğu, PK'nın UYPB basınç dayanımı üzerinde SD'den daha büyük etkiye sahip olduğu belirtilmiştir.

Ahmad vd. [109], UYPB betonlarda doğal puzolanın (Suudi Arabistan'ın batı bölgesindeki Herrat bazalt platolarından elde edilen volkanik külün ezilmesiyle elde edilen-NP) etkisini incelemek amacıyla, çimento (C) ve mikrosilika (MS) için belirli oranlarda NP ikamesi ile beton karışımları (%100C+100MS, 100C+75MS+25NP, 100C+50MS+50NP, 90C+100MS+10NP, 80C+100MS+20NP, 70C+100Ms+30NP) hazırlayarak, UYPB beton örneklerinde mekanik özellikler, kuruma büzülmesi ve klor geçirgenliğini test etmişlerdir. 210 mm akma çapına sahip referans karışım ile kıyaslandığında NP'nin MS ile ikamesi sonucu akma çaplarının 184-198 mm aralığında, NP'nin çimento ile ikamesi sonucu akma çaplarının 184-201 mm aralığında olduğu, buna bağlı olarak NP'nin UYPB karışımlarının işlenebilirliğini önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir. Çimento (%30'a kadar) ve mikrosilikanın (%50'ye kadar) NP ile değiştirilmesinin, UYPB karışımlarının taze ve sertleştirilmiş özelliklerini önemli ölçüde etkilemediğini ve NP'nin uygun maliyetli ve çevre dostu üretim için kullanılma potansiyelinin olduğu, doğal puzolan içeren tüm UHPC karışımlarının 90 günlükken 150 MPa'nın üzerinde basınç dayanımı elde edildiği, puzolan ve referans UYPB karışımının mukavemetindeki farkın yaşla birlikte azalmış ve maksimum farkın 90 günde %6 civarında olduğu, doğal puzolan içeren tüm karışımların elastisite modülü, yarmada çekme dayanımı ve kırılma tokluğu UYPB gerekliliklerini karşıladığı, doğal puzolan ilavesinin sünekliliği artırdığı; tüm karışımların daha düşük kuruma büzülmesi değerleri gösterdiği, donatı korozyonuna karşı yüksek bir direnç gösteren "çok düşük" ile "ihmal edilebilir" klorür geçirgenliği gösterdiği ifade edilmiştir.

Mostafa vd. [110], mekanik öğütme ile elde ettikleri ve %1; 2; 3; 4; 5 oranlarında nano-pirinç kabuğu külü (PK), %1; 2; 3 oranlarında nano-atık cam (WG), %1; 2; 3 oranlarında nano-metakaolin (MK), %1; 2; 3 oranlarında nano-silika (NS) ilavesi, 0,18 su/bağlayıcı oranı, hacimce %1 çelik lif ilavesi, bağlayıcı kütlelerinin %2 oranında süperakışkanlaştırıcı (SP) kullanarak UYPB karışımları üretmişlerdir. UYPB basınç dayanımının nano parçacıklar eklenerek önemli ölçüde iyileştirildiği ve özellikle erken yaşlarda dayanımın arttığı; nano-silika, nano-atık cam ve nano-metakaolin içeren karışımların, kompakt olmaları nedeniyle %1 NS, %1 NWG ve %1 NMK'de maksimum dayanıma ulaştığı; nano-pirinç kabuğu külünün ilerleyen yaşlarda basınç dayanımını artırdığı ve tüm numunelerde 91.günde maksimum mukavemetin %3 NPK'da olduğu tespit edilmiştir. En

yüksek eğilme mukavemetinin %1 nano-atık cam karışımlarında ve en yüksek yarma mukavemeti %1 nano-silika karışımlarında olduğu, kullanılan dört tür nano malzemenin de betonun yarma ve eğilme dayanımını artırdığı belirtilmiştir. Kullanılan nano malzemelerin mikro yapıyı yoğunlaştırdığı, kalsiyum hidroksit içeriğini azalttığı, daha fazla C-S-H üretimini desteklediği; nano partiküllerin eklenmesi ile kapiler su emme değerinin azaldığı ve en iyi performansı %1NS ilavesinin göstererek emilen su oranını %50 azalttığı; test edilen UYPB'ler arasında en üstün özellikleri elde etmek için gereken düşük dozajın yanı sıra en düşük üretim maliyetleri nedeniyle UYPB'de kullanılmaya en uygun katkının nano atık cam olduğu ifade edilmiştir.

Yu vd. [48], çevre dostu UYPB üretimi için uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve kireç tozu (KT) kullanarak, mekanik özellikleri araştırmışlardır. UK, YFC veya KT'nin UHPC'nin erken hidratasyon kinetiği üzerindeki etkisinin ilk beş gün boyunca çok benzer olduğu, YFC li karışımların hidratasyon oranının ise ilerleyen yaşlarda arttığı, taze beton su ihtiyacının $UK (0,306) < KT (0,315) < YFC (0,359) < referans numune (0,384)$ şeklinde olduğu, 28 ve 91.günlerde en iyi dayanım değerlerinin YFC'li UYPB karışımlarında olduğu, su/bağlayıcı oranının artmasıyla (0,18'den 0,20'ye) UYPB karışımlarının dayanımlarının azaldığı ifade edilmiştir. Su/bağlayıcı oranının artırılması ile 28 ve 91.günlerde kapiler su emme değerinin arttığı ve bu durumun UYPB üretimi için yüksek miktarlarda toz ve sınırlı su kullanımının gerekliliğini ortaya koyduğunu, en düşük su emme değerinin YFC'li UYPB karışımlarında olduğu belirtilmiştir.

Li vd. [111], silis dumanı (SD), ince kum (S-%0; 10; 20; 30 iğnemsiz taneler-NL), uçucu kül (UK), keramsit (Ce-%0; 10; 20; 30), süperakışkanlaştırıcı, çelik fiber (F-%0; 1; 2; 3), genleşme ajanı (EA-%0;5) farklı oranlarda kullanarak UYPB karışımları hazırlamışlardır. UYPB karışımlarına EA veya Ce'nin ayrı ayrı eklenmesinin, %5 EA ile %30 Ce'nin aynı anda eklenmesinin %57,89'luk bir hacim azalmasına sebep olduğu ve aşınma önleyici olduğu belirtilmiştir. UYPB karışımlarında Ce ilaveli karışımlar hariç tüm karışımlarda yayılma çapı değerlerinin azaldığı; Ce içermeyen UYPB karışımları ile karşılaştırıldığında, akma çapının %10, %20 ve %30 Ce içeren numunelerde sırasıyla %3,97, %6,90 ve %11,21 arttığı ve durumun taze beton karıştırma sırasında Ce'nin su ortamdaki serbest su miktarını artırdığı ifade edilmiştir. UYPB karışımlarına çelik fiber ilavesinin mekanik özelliklerini ve aşınma direncini iyileştirdiği, işlenebilirlik ve aşınma direnci açısından hacimce %3 oranında çelik fiber ilavesinin uygun olduğu ve bu oranda en yüksek eğilme dayanımının 29,5 MPa ve en yüksek basınç dayanımının 144,5 MPa

olduğu tespit edilmiştir. S-NL ilave oranının artışına bağlı olarak basınç (NL10:%2; NL20: %6,43; NL30:%12,66) ve eğilme (NL10:%2,54; NL20: %6,05; NL30:%9,55) dayanımlarının azaldığı, S-NL'nin iğnemsî yapısından dolayı %20'ye kadar kullanımının aşınma direncini artırdığı, ancak katmanlı yapısından dolayı bu orandaki artışın işlenebilirliği azalttığı belirtilmiştir.

Faried vd. [112], farklı sıcaklık (300-500-700-900°C), farklı saatlerde (3-5-7-9 sa) yakma ve öğütme işlemi ile elde ettikleri nano pirinç kabuğu külünü (NPK), çimento-silis dumanına ilave ederek, çelik fiber (çap:0,8; l:35mm) ve sabit oranda süperakışkanlaştırıcı kullanarak UYPB üretmişlerdir. 3 saatlik sabit yakma sürelerinde 700°C ve 900°C'de %1 NPK, 300°C ve 500°C'de %5 NPK ve %3 NPK'nın basınç dayanımlarında önemli bir gelişme gözlemlendiği, 900°C-%1 NPK içeren karışımların 7 ve 28.gün basınç dayanımlarının %12 ve %12,3 arttığı, %1NPK900, %1NPK700, %3NPK500 ve %5NPK300 numunelerinin 28.günde %12,3; 10,58; 9,4; 5,6 ve 7.günde %12; 10,5; 8,5; 5,4 arttığı belirtilmiştir. 5 saatlik-700°C-%3NPK içeren karışımların yaklaşık %23,9 ile optimum 28 günlük basınç dayanımına ulaştığı ve aynı karışımların yarmada çekme ve eğilme dayanımını sırasıyla %26,6 ve %62 oranında arttığı; en iyi mekanik özellikleri %3NPK700-5sa numunelerin gösterdiği; %1NPK900-3sa, %3NPK700-5sa, %3NPK500-7sa, %5NPK300-9sa numunelerinin 28.günde %12,3; 21,9; 10,46; 8,3 ve 7.günde %12; 22,4; 10,5; 10 arttığı tespit edilmiştir. 3 saat sabit olarak yakılan NPK içeren karışımların (%1NPK900-3sa, %1NPK700-3sa, %3NPK500-3sa, %3NPK300-3sa) 28 günlük eğime dayanımlarının referansa göre %57,3; 48,06; 30,23; 23,25 artarken, NPK yakma işlemi sürelerinin artması ile (%1NPK900-3sa, %1NPK700-5sa,%3NPK500-7sa,%3NPK300-3sa) %57,3; 61,0; 40,3; 30,23 arttığı belirtilmiştir. Ultrases geçiş hızlarının 4,5 km/sn'den daha yüksek değerlerde elde edildiği; en yüksek değerlerin %1NPK900-3sa, %1NPK700-3sa, %3NPK500-3sa, %5NPK300-3sa için sırasıyla 4,97; 4,95; 4,73; 4,71; %1NPK900-3sa, %3NPK700-5sa, %3NPK500-7sa, %5NPK300-9sa için sırasıyla 4,97; 5,00; 4,8; 4,8 olduğu ifade edilmiştir. 700°C'de 3 saat ve 5 saat yakılarak elde edilen NPK içeren karışımların kılcal su emme katsayılarının sırasıyla $1,6 \times 10^{-6}$ ve $0,33 \times 10^{-6}$ olduğu, NPK elde edilmesindeki yanma sürelerinin artışı ile daha düşük su geçirimsizliği olduğu tespit edilmiştir.

Yoo vd. [113], silis dumanı, ince agrega-silis kumu (<0,5 mm), dolgu maddesi %98 SiO₂ içeren silis unu (2 µm), %2 oranında süperakışkanlaştırıcı, hacimce %2 oranında düz çelik lif (l:13 mm, çap:0,2 mm) kullanarak 0,2 su/bağlayıcı oranında UYPB karışımları

üretmişlerdir. Üretimlerde 1.grup UH-N olarak, 2.grup numuneler UH-A olarak tanımlanmış ve birinci gruba ek olarak genleşme ajanı ve büzülme azaltıcı kullanılmıştır. Ultrases geçiş hızı değerlerinin çok erken yaşlarda azaldığı ve bu durumun hidratasyondan dolayı çimento hamurundaki hava dolu boşluklardan kaynaklandığı, UYPB karışımlarında 24 saatlik ultrases geçiş hızı değerlerinin yaklaşık 3000 m/s olduğu, ilk ve son sertleşme sürelerine karşılık gelen ultrases geçiş hızı değerlerinin UH-N için 685 m/s ve 1217 m/s, UH-A için 1276 m/s ve 1804 m/s olduğu belirtilmiştir. UH-A (EA+SRA) numunelerinin, UH-N numunelerine göre daha hızlı penetrasyon direnci gelişimi gösterdiği ve bu durumun EA ilavesinden kaynaklanan etrenjit nedeniyle erken yaşta UYPB'de hızlandırılmış sertlik gelişimini oluşturmamasından kaynaklandığı; UYPB karışımların erken yaşta (<24 saat) ölçülen çekme mukavemeti değerlerinin sabit bir şekilde arttığı ifade edilmiştir.

Hamiruddin vd. [114], farklı tane çaplarında kum (63-300 μ m, 300-600 μ m, 600-1180 μ m ve standart kum), süperakışkanlaştırıcı, yüksek su indirgeyici (HRWR) kullanarak, sabit oranda 0,2 su/bağlayıcı ile UYPB karışımları üretmişlerdir. Taze beton yayılma çapının 730-745 mm aralığında; en yüksek yayılma çapının 600-1180 μ m kum ve standart kum, en düşük yayılma çapının 300-600 μ m kum, en düşük taze beton yoğunluğunun 63-300 μ m, en yüksek taze beton yoğunluğunun 600-1180 μ m kum içeren numunelerde tespit edildiği belirtilmiştir. 7 ve 28.günlerde en yüksek basınç dayanımının 86,7 ve 100 MPa ile 600-1180 μ m kum içeren karışımlarda olduğu, 600-1180 μ m kum içeren numunelerin 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarının 63-300 μ m, 300-600 μ m, standart kuma göre sırasıyla %12,07; 3,95; 9,68 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. 28 günlük ultrases geçiş hızı en yüksek değerinin 600-1180 μ m ve en düşük değerin 300-600 μ m kum içeren numunelerde olduğu ifade edilmiştir.

Fodil vd. [115] tarafından, maksimum tane çapı 15 mm olan kırma kireçtaşı agregası, incelik modülü 2,8 olan dere kumu, süperakışkanlaştırıcı kullanılarak ve su/bağlayıcı oranı 0,135 olan UYPB karışımları üretilmiş, 3-90 gün arasında 3 günlük artış ile ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Taze beton yoğunluğu ortalama 2509 kg/m³, sertleştirilmiş beton yoğunluğu ortalama 2483 kg/m³ tespit edilmiştir. Basınç dayanımlarının 55-85 MPa arasında tespit edildiği; 3 günlük basınç dayanımında 59 MPa elde edilirken, 3-28 gün aralığında %20,98; 28-91 gün aralığında %7,5 artış ve 28 gün sonra, çok daha yavaş bir gelişimin olduğu; 3.günde 60 MPa'lık beton dayanımı için ultrases geçiş hızının yaklaşık 4800 m/s ve 91.günde 85 MPa'lık beton dayanımı için

ultrases geçiş hızını 5000 m/s'ye ulaştığı belirtilmiştir. Ultrases geçiş hızlarının 3-28 gün aralığında %3,9, 2-91 gün aralığında %0,35 arttığı, ultrases geçiş hızındaki artışların basınç dayanımına göre çok daha düşük olduğu ifade edilmiştir.

Thomas vd. [116] tarafından, yoğunlaştırılmış silis dumanı, ince kuvars kum (595 m) süperakışkanlaştırıcı, su indirgeyici kullanılarak 3 grup UYPB numuneleri üretilmiştir. 1. grup numuneler su/bağlayıcı oranı 0,20; 0,16-0,24 aralığında silis dumanı ikamesi (SF1: 0,16; SF2: 0,18; SF3: 0,22; SF4:0,24), 595 m kuvars kumu; 2.grup numuneler 0,20 oranında silis dumanı ikamesi ve 0,18-0,20 aralığında su/bağlayıcı oranları (R: 0,20; W1: 0,24; W2:0,22; W3:0,18), 595 m kuvars kumu; 3.grup numuneler 0,20 oranında silis dumanı ikamesi, 0,20 su/bağlayıcı oranı, iki farklı çapta kuvars kumu ile (>595 m) ile elde edilmiştir. 28.gün basınç dayanımları 107 MPa ile en düşük W1 (s/b: 0,24, sf: 0,20); 145 ile en yüksek SF3 (s/b: 0,2; sf: 0,22) olduğu, daha yüksek tane boyutlu kuvars kumu içeren S1 ve S2 numunelerinde basınç dayanımlarının düştüğü tespit edilmiştir. 28 günlük Charpy darbe dayanımı değerlerinin 1.48 kJ/m ile en yüksek S1 (s/b: 0,20; sf: 0,20; >595 m), 1.05 kJ/m ile en düşük W2 (s/b: 0,22; sf:0,20; <595 m) numunlerinde olduğu belirtilmiştir. Darbe dayanımındaki enerji emiliminin su/bağlayıcı, silis dumanı ikame oranı ve agrega gradasyonu ile yüksek ilişkisinin olduğu, ayrıca enerji emilim değerlerinin, basınç dayanımı ile zayıf bir ilişkisi olduğu ifade edilmiştir.

Zhong vd. [117], silis dumanı, kuvars kumu, lif (I:elif Lif, RTS: Geri dönüştürülmüş lastik lif), süperakışkanlaştırıcı ile 0,18 subağlayıcı oranında UYPB karışımları üretmişlerdir. Karışımlarda imento, silis dumanı, kuvars kumu ağırlıkça 1; 0,25; 1,4 oranlarında kullanılmıştır. Karışımlara lif ilavesi, hacimce %0; 0,5; 1; 1,5; 2,0 oranlarında IS ve RTS ayrı ayrı ve hibrit olarak yapılmıştır (I2.0: %2,0 IS; I1.5R0.5: %1,5 IS ve %0,5 RTS; I1.0R1.0: %1 IS ve %1 RTS; I0.5R1.5: %0,5 IS ve %1,5 RTS; R2.0: %2 RTS). %0,5-1,5 aralığında RTS lif oranının artması ile UYPB yayılma çaplarının arttığı ve en yüksek değerin 251 mm ile I0.5R1.5 karışımlarında; IS lif oranının artması ile azaldığı ve en düşük değerin 226 mm ile I2.0 karışımlarında olduğu tespit edilmiştir. Tüm karışımlarda 168 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımlarının olduğu; en yüksek basınç dayanımının 186 MPa ile I1.5R0.5 karışımlarında, en düşük ise R2.0 karışımlarında olduğu; RTS lif oranlarının artırılması ile basınç dayanımlarının azaldığı; I1.5R0.5 ve I1.0R1.0 karışımlarının basınç dayanımlarının, I2.0'inkinden yaklaşık %2 ve %6 daha fazla olduğu belirtilmiştir. RTS lifleri içeren karışımların eğilme dayanımı değerlerinin basınç dayanımı değerleri ile tutarlı olduğu, 34,6 MPa ile en yüksek eğilme

mukavemetine sahip I1.5R0.5 karışımının I2.0 ve R2.0 karışımlarına kıyasla %7,33 ve %37,49 daha yüksek olduğu, RTS liflerinin mikro çatlakların başlamasını ve büyümesini kontrol edebilirken, IS lifleri ve uzun RTS liflerinin çatlakları daha büyük çatlaklarla köprüleme eğiliminde olduğu ifade edilmiştir. RTS lif oranları ile değişen tek eksenli çekme ve yarmada çekme mukavemetlerinin, basınç ve eğilme mukavemetleri ile benzer olduğu; lif ilavelerinden bağımsız olarak, farklı kırılma süreçleri nedeniyle tüm karışımların yarmada çekme dayanımlarının tek eksenli çekme dayanımlarından yaklaşık %59-69 daha yüksek olduğu açıklanmıştır. IS liflerinin %0,5 ve %1 oranlarında artırılması ile enerji emme kapasitesi %2,0 IS lifi içeren karışıma kıyasla %1,19-9,25 oranlarında arttığı; yüksek oranda RTS lif içeren karışımların daha az enerji emebildiği ancak deforme olmuş RTS lifi ile matris arasındaki geliştirilmiş bağın, çekme işlemi sırasında sürtünmeyi artırarak daha fazla enerji emebileceği belirtilmiştir.

Yalçinkaya vd. [118], silis dumanı, kuvars kumu (<1 mm), süperakışkanlaştırıcı (SP), pirinç kaplı çelik-mikro lif (çap: 0,16 mm; l:6 mm) kullanarak, hacimce farklı oranlarda çelik lif ilavesi (%0; 1; 2; 3) ve farklı su/bağlayıcı oranlarında(0,18; 0,22; 0,26) UYPB karışımları üretmişlerdir. Lifsiz karışımlar için yayılma çapı 260 mm olarak belirlenerek, her bir su/bağlayıcı oranında farklı SP dozajları kullanılmıştır. Bununla birlikte, dökümden altı saat sonra kalıplardan numuneler çıkarılarak buhar kürleme işlemi uygulanmıştır. Lif hacmindeki artış ile yayılma çapı değerlerinin düştüğü, su/bağlayıcı oranının azalması ile fiber matris bağ özellikleri ve eğilme performansının arttığı, özellikle %2 ve 3 oranlarındaki liflerin eğilme değerlerinde önemli etki gösterdiği, %2'den %3'e çıkarılan lif hacminin yaklaşık 10 MPa eğilme dayanımı artışına sebep olduğu, tüm su/bağlayıcı oranları için %3 lif oranında 25-35 MPa aralığında eğilme mukavemetine ulaşıldığı belirtilmiştir. Tüm karışımlarda %2 ve %3 lif hacmi için 150 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımı elde edildiği, lifsiz karışımların basınç dayanımlarının 0,26; 0,22 ve 0,18 su/bağlayıcı oranlarında 121, 140 ve 150 MPa olduğu, lif ilavesinin dayanımları artırdığı, %3 lif ilavesi ile basınç dayanımlarının 0,18; 0,22 ve 0,26 su/bağlayıcı oranlarında 190, 170 ve 152 MPa olduğu tespit edilmiştir. Lifsiz karışımlarda ağırlıkça hesaplanan aşınma kaybının 0,26; 0,22 ve 0,18 su/bağlayıcı oranlarında %2,4; 2,3; 1.84 olduğu ve lif ilavesi ile bu değerlerin azaldığı, %3 lif ilavesi ile %1,76; 1,76; 1,52 olduğu ve lifin hacim oranındaki artışı ile darbe dayanımlarının arttığı, en yüksek lif oranında (%3) 8 joule üzerinde emilme enerjisi elde edildiği belirtilmiştir.

Yu vd. [119] tarafından, nano silis (NS), iri kum (0-2 mm), ince kum (0-1 mm), kireç tozu, uzun düz çelik lif (LSF-13/0.2 mm), kısa düz çelik lif (SSF-6/0,16 mm), kanca uçlu çelik lif (HF-35/0.55), süper akışkanlaştırıcı kullanılarak UYPB karışımları üretilmiştir. Kireçtaşı tozu çimento yerine dolgu maddesi olarak; çelik lifler ise karışımlara hacimce, ayrı ayrı ve hibrit olarak ilave edilmiştir (1:Lifsiz, 2: %2 LSF, 3: %1,5 LSF + %0,5 SSF, 4: %1LSF+%1SSF, 5: %0,5LSF+%1,5SSF, 6: %2SSF, 7: %0,5LSF + %%1,5HF, 8:%2 HF). Kısa düz çelik lif hacim oranının artmasıyla 7 ve 28. günlerde emilen darbe enerjisinin doğrusal olarak azaldığı, hacim oranlarının 0'dan 1'e yükseltildiğinde darbe enerjisi emiliminin 7.günde 45,6 J'den 22,3 J ve 28.günde 69,1 J'den 28,4 j değerine düştüğü belirtilmiştir. Uzun düz çelik liflerin enerji dağıtma kapasitesinin geliştirilmesinde öneli bir rol oyandığı, hibrit çelik liflerin eklenmesi ile darbe direnci ve enerji emme kapasitesinin iyileştirildiği, tek boyutlu fiberler ve hibrit çelik fiberler için hesaplanan darbe dayanımı değerlerinin sırasıyla 2248,5 J ve 3951,8 J olduğu ifade edilmiştir.

Smarzewski vd. [120] , yoğunlaştırılmış silis dumanı, iki tür kaba agrega: granodiyorit (G1, 2/8 mm) ve granit (G2, 2/8 mm), kuvars kumu (0,1/2 mm), çelik lif (SF: 50, çap: 1 mm) ve polipropilen lif (PF, l:12 mm, çap:25 um), süperakışkanlaştırıcı kullanarak, lifleri ayrı ayrı ve hibrit olarak hacimce %0,25; 0,50; 0,75; 1,00 oranlarında karışımlara ilave ederek UYPB numuneler üretmişlerdir (Karışımlar: (C1: G1); (SC: G1+1SF); (SPC1:G1+0.75SF+0.25PF); (SPC2:G2+0.50SF+0.50PF); (SPC3:G2+0.25SF+0.75PF); (PC: G2+1PF); (C2:G2)). Yüksek miktarlarda polipropilen elyafın (PF) beton yoğunluğunu azalttığı, en yüksek basınç dayanımının lifli SC (G1+1SF) ve en düşük basınç dayanımının PC (G2+1PF) numunelerinde olduğu, Polipropilen lif (PF) takviyeli UYPB'nin basınç dayanımlarının lifsiz ve granit agregalı betonlara göre önemli ölçüde daha düşük olduğu, yüksek oranlarda çelik lifin (SF) UYPB'nin dayanımını artırdığı ifade edilmiştir. Kapiler su emme değerlerinin lifli betonlarda en yüksek PC (G2+1PF) ve en düşük SC (G1+1SF)'de olduğu, çelik lif oranının azalması ile polipropilen lif oranının artması ile kapiler su emme değerlerinin arttığı ve daha geçirimsiz UYPB'lerin olduğu belirtilmiştir. Çelik liflerin eklenmesi ile donma çözölmeye karşı direncin arttığı, %1 çelk lif içeren karışımların beton yüzeyinde çatlaklar ve çelik liflerde korozyonların gözlemlendiği, granodiyorit agrega ile %1 (SC) ve %0,75 (SPC1) oranlarında çelik lif içeren betonlarda daha fazla çatlak ve boşluk görüldüğü ve daha fazla kütle kaybının olduğu, en büyük kütle kaybının %1 çelik lif içeren betonlarda (SC) olduğu ve lifsiz granodiyorit

agregalı karışımlardan 22,3 kat daha büyük olduğu, %1 PF'li betonun (PC) PF'siz betona göre %11 daha fazla kütle kaybına uğradığı belirtilmiştir. Sodyum sülfata maruz bırakılan UYPB'lerde çelik lif içeriğine sahip numunelerde kütle kayıplarının elyaf içermeyen (C1, C2) ve polipropilen lif içeriğine sahip betonlarda (SPC2, SPC3, PC) kütle artışlarının olduğu, sadece %1 ve 0,75 yüksek çelik lif içeriğine sahip betonlarda (SC, SPC1) beton kütle kayıplarının %0,14 ve %0,05 ile hafif bir azalma gösterdiği, %1 ve %0,75 polipropilen lif içeren granit agregalı betonların (SPC3, PC) daha fazla kütle kayıplarının olduğu belirtilmiştir.

Du vd. [121], uçucu kül (FA), silis dumanı (SF), öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (GGBS), üç tür kuvars kumu (0–0,3 mm; 0,3–0,6 mm; 0,6–2,36 mm), %1; 2; 3 oranlarında bakır kaplı düz çelik lif (SF: 1:13; çap:0,2 mm), süperakışkanlaştırıcı, liflerin üzerini kaplama için silan bağlama ajanı (SCA), 0,18 su/bağlayıcı oranı kullanarak UYPB numuneleri üretmişlerdir (Karışımlar: N1: lifsiz, N2: %1SF; N3:%2SF; N4:%3SF) (SCA ile işlenmiş lifler-karışımlar: T1: lifsiz, T2: %1SF; T3:%2SF; T4:%3SF). Lif oranının hacimce artması ile yayılma çaplarının kademeli olarak azaldığı; lif ilavesinin %0'dan %2'ye çıkarıldığı durumda, yayılma çapının 300 mm'den 247,5 mm'ye düştüğü; %2'den %3'e çıkarıldığı durumda, yayılma çapının daha fazla ve 247,5 mm'den 195 mm'ye düştüğü; işlenmiş çelik liflerin akışkanlığı iyileştirdiği ve %1; 2; 3 lif oranlarında %1,7; 4,6 ve %2,6 iyileşme sağladığı açıklanmıştır. Karışımlara çelik liflerin ilavesi ile donma-çözülme testi sonrası kütle kayıplarını arttığı ve donma-çözülme direncinin azaldığı, çelik lif içeriğinin artırılması ile UYPB'lerin kütle kayıplarının daha belirgin olduğu, işlenmiş çelik liflere sahip UYPB'lerin aynı miktarda normal çelik lifli UYPB'ler için daha güçlü donma direncine sahip olduğu ifade edilmiştir. İşlem görmüş çelik lif içeren UYPB'lerin ağırlık kayıplarının, normal çelik lif içeren UYPB'lerden daha az olduğu ve çelik lif ilavesinin artması ile ağırlık kayıplarının azaldığı belirtilmiştir.

Dehghanpour vd. [122], kuru premiks NaW3 kuvars, silis kumu, mikro çelik lif (SF: 12 mm/80 µm), cam lifi (GF: 12 mm/10 µm), Polivinil lif (PVA: 12 mm/170 µm) kullanarak, su/bağlayıcı oranı 0.22 seçilerek ve toplam ağırlığın %0,7'si oranında süperakışkanlaştırıcı ilave ederek, %0,7; 1,3; 2 oranlarında lif ilavesi ile UYPB karışımları hazırlamışlardır. 18 ay kürleme işlemi sonrasında testler yapılmıştır. PVA ve GF lif takviyeli karışımlarda elyaf ilavesiyle yoğunluğun azaldığı, SF lif akviyeli karışımlarda ise arttığı ve bu durumun kendi yoğunlukları ile ilgili olduğu, PVA, GF ve SF eklenmiş UYPB'lerin yoğunluk değerlerinin 2,37–2,4; 2,33–2,35 ve 2,44–2,56

aralıklarında olduğu, %2 PVA ve %2 GF içeren UYPB'lerin yoğunluk değerlerinin referans gruba göre %1,66; 2,90 azaldığı ve SF ile güçlendirilmiş UYPB'lerin %6,22 artırdığı belirtilmiştir. PVA, GF ve SF tipine göre maksimum ve minimum basınç dayanımlarının %0,7 ve %2 lif ilavesi ile elde edildiği; PVA, GF ve SF için maksimum dayanım değerlerinin 162,15 MPa, 136,55 MPa ve 17,82 MPa, minimum dayanım değerlerinin 145,12 MPa, 106,98 MPa ve 165,01 MPa, referans grubun ise 157,44 MPa olduğu; en iyi dayanım değerlerinin SF takviyeli numunelerde görüldüğü ve %0,7; 1,3; 2,0 SF takviyeli numunelerin basınç dayanımlarının referans gruba göre %10; 5; 5 arttığı ifade edilmiştir. Üç tip lifli UYPB'de artan lif ilavesi ile UPV değerlerini düşüştüğü ve bu durumun boşluk oranları ile ilişkili olduğu; SF takviyeli karışımların UPV değerlerinin daha düşük olduğu ve bu durumun SF lif çapının daha büyük olması nedeniyle matriste kenetlenme sonucu aralarında daha fazla gözenek oluşmasından kaynaklandığı belirtilmiştir. SF takviyeli numunelerin PVA ve GF takviyeli numunelere göre daha düşük özdirence sahip olduğu, %0,7;1,3; 2,0 SF içeren numunelerin öz direnç değerlerinin %65, %83 ve %86 oranında azaldığı ve bu durumun çelik liflerin elektriksel olarak iletken olması, lif ile matris arasında boşluklardan kaynaklandığı ifade edilmiştir. Schmidt yüzey sertliği değerlerinin basınç dayanımı sonuçlarına benzer olduğu, en yüksek sertlik değerlerinin SF takviyeli numunelerde elde edildiği, tüm karışımlarda ortalama geri tepme değerlerinin 49,0 ile 53,50 R arasında olduğu açıklanmıştır.

Zhang vd. [123], silis dumanı (SF:0,1-0,3 μm), kuvars kumu (QS), büzülmeyi azaltmak için farklı aktivite seviyelerine sahip üç farklı genleşme ajanı manyezit (R-MEA:Hızlı Reaktivite; M-MEA:Orta Reaktivite; S-MEA: Yavaş Reaktivite) (%3; 6; 9), süperakışkanlaştırıcı kullanarak, 0,16; 0,18; 0,20 su/bağlayıcı oranlarında UYPB karışımları hazırlamışlardır (Karışımlar: C-018: s/b: 0,18; R3-018: %3R-MEA, s/b:0,18; R6-018: %6R-MEA, s/b:0,18; R9-018: %9R-MEA, s/b:0,18; R6-016: %6R-MEA, s/b:0,16; R6-020: %6R-MEA, s/b:0,20; M6-018: %6M-MEA, s/b:0,18; S6-018: %6S-MEA, s/b:0,18). Kontrol grubunun 168 saatte otojen büzülmesinin 713,66 μe 'ya ulaştığı, R-MEA miktarının artışına bağlı olarak UYPB'lerin otojen büzülmelerinin azaldığı, kontrol grubuna göre farklı MEA içeriklerine sahip R3-018; R6-018; R9-018 numunelerinin 168 saat sonunda otojen büzülmelerinin %11,41; 33,32; 40,28 oranlarında azalttığı belirtilmiştir. Farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip R6-016; R6-018; R-020 numunelerinin 7.günde kontrol numuneye göre otojen büzülmeyi %9,63; 33,32 ve %41,18 oranında azalttığı, su içeriğinin artması ile MEA'nın UYPB'nin büzülmesini azaltmada

daha etkili olduğu ifade edilmiştir. Farklı aktivite seviyelerine sahip MEA'nın aktivitesinin artırılması ile UYPB'nin otojen büzülmesi üzerinde azalma etkisinin olduğu, farklı aktivite seviyelerine sahip R6-018; M6-018; S6-018 numunelerinin 168.saat sonunda otojen büzülme kontrol numunesine göre %33,32; 15,42; 9,59 oranında azalttığı belirtilmiştir. 0,18 su/bağlayıcı oranında ve R-MEA içeren numunelerin indüksiyon periyodunun uzadığı ve genellikle 11 saate yakın olduğu, R-MEA oranının artırılması ile kümülatif ısı salımının azaldığı ve bu durumun MgO hidratasyonunun ekzotermine çimentonunkinden daha az olmasından kaynaklandığı, R-MEA içeren karışımların daha düşük bir w/b oranlarında çimento partiküllerinin eksik hidratasyonundan kaynaklanan UYPB macununun kümülatif ısı salma oranını azalttığı, farklı aktivitede MEA içeren numunelerde ısı salımının R-MEA>M-MEA>S-MEA şeklinde olduğu, yüksek aktiviteli MgO'nun hidratasyon sırasında macunun ısı akışına daha fazla katkıda bulunduğu açıklanmıştır. MEA katkı oranının artması ile basınç dayanımlarının kademeli olarak azaldığı, R-MEA ilavesinin %3'ten %9'a çıkarıldığında basınç dayanımının 28.günde kontrol grubuna göre 4 MPa ve 12,3 MPa azaldığı, farklı su/bağlayıcı oranlarına sahip R6-0,16; R6-0,18; R6-0,20 numunelerinin 28.gün basınç dayanımlarının kontrol grubuna göre 33 MPa; 7,3 MPa ve 26,5 MPa azaldığı, farklı tip MEA içeren R6-0,18; M6-0,18; S6-0,18 numunelerinin basınç dayanımlarının kontrol numunelere göre 28.günde 7,3 MPa; 11,5 MPa ve 4,9 MPa azaldığı, M-MEA ve S-MEA grubunun R-MEA grubundan daha yüksek basınç dayanımlarına sahip olduğu belirtilmiştir.

Li vd. [124], kireç tozu (LP), nano-silika (nS), mikro kum (MS: 0-1 µm), kum (S: 0-2 µm), UYPB'da farklı dağıtma ve geciktirme yeteneklerine sahip, PCE tipi 4 farklı süper akışkanlaştırıcı (SP1, SP2, SP3, SP4) kullanarak UYPB karışımları üretmişlerdir. Karışımlar çimentonun %4'ü nano-silika, toplam karışımın ağırlıkça %30'u kireç tozu, %25'i mikro kum, %120'si kum içerecek şekilde, su/bağlayıcı oranı 0.20 olarak hazırlanmıştır. Büzülme ölçümlerinde tüm SP tiplerinde %0,8 dozaj, sadece SP3 tipinde %0,4; 0,8; 1,2 dozajlarında kullanılmıştır. SP3 ve SP4 içeren karışımların SP1 ve SP2 içeren karışımlardan daha küçük bir otojen büzülme mutlak değerine katkıda bulunduğu, SP3 numunlerinde SP dozajının artırılması ile (%0,4; 0,8; 1,2) mutlak otojen büzülme değerinin azaldığı ifade edilmiştir. SP2; SP3; SP4'ün yüksek dozajlarda ilavesi ile yayılma çaplarının benzerlik gösterdiği, SP1 içeren karışımların daha doğrusal bir artış gösterdiği ve akış kabiliyetinin çok yavaş arttığı, SP2; SP3; SP4 içeren karışımların kritik

SP dozajlarının yaklaşık %1 ve doygunluk dozajlarının yaklaşık %2,2 olduğu, SP1 içeren karışımların kritik dozajının yaklaşık %1 ve %3'e kadar net bir doygunluk dozu göstermediği, en iyi yayılma çapı değerini SP3'ün sağladığı belirtilmiştir. PCE polimerlerinin geciktirme etkisinin hidrasyon işleminin gecikmesine yol açtığı ve UYPB'nin erken yaş mukavemetinin daha yavaş gelişmesine sebep olduğu, %2,2 dozajında ve farklı tip SP içeren SP1; SP2; SP3; SP4 numunelerinde 1 günlük basınç dayanımlarının yaklaşık 3,2 MPa; 71,1 MPa; 70,9 MPa ve 46,6 MPa olduğu, 3 günlük ve 7 günlük basınç dayanımlarının yaklaşık 80,9 MPa ve 93,3 MPa olduğu ifade edilmiştir. Farklı dozajlarda (%1,8; 2,2; 2,6; 3,0) SP3 içeren numunelerde SP dozajının artması ile 1 günlük basınç dayanımlarının 75,8 MPa'dan 1,1 MPa'ya keskin bir şekilde düştüğü, 3 günlük basınç dayanımlarının 82,0 MPa'dan 68,3 MPa'ya düştüğü, 7 günlük basınç dayanımlarının 91,8 MPa'ya yakın olduğu, SP'lerin farklı tip ve dozajlarının özellikle 1 günlük erken dayanımların gelişimine katkı sağladığı belirtilmiştir.

Wang ve Gao [125], silis dumanı (SF), iri kuvars kumu (360-600 μ m), ince kuvars kumu (180-360 μ m), bakır kaplı çelik düz lif (1:133, çap: 0,2 mm), süperakışkanlaştırıcı kullanarak UYPB karışımları hazırlamışlardır. Dört farklı su/bağlayıcı oranlarında (0,18; 0,20; 0,22; 0,24), üç farklı çelik lif hacimlerinde (%0; 1; 2; 3) ve farklı süperakışkanlaştırıcı oranları (%0,8 ile 2 aralığında), %80 iri kuvars kumu, %20 ince kuvars kumu (çimento: silis dumanı: kuvars kumu oranı 1:0,3:1) ve çimentonun %30 oranında silis dumanı ilavesi ile UYPB numuneleri üretilmiştir. Dört farklı su-bağlayıcı oranında ve süperakışkanlaştırıcı dozajı aynı tutulduğunda çelik lif içeriğinin artmasıyla akışkanlığın azaldığı, %1 çelik lif ilavesinin lifsiz karışımlarla karşılaştırıldığında akışkanlıkta kayda değer bir azalmaya yol açtığı ve 1'den %3'e çıkarılan çelik ilavesinin akışkanlıkta nispeten hafif bir azalma meydana getirdiği belirtilmiştir. UYPB karışımlarının hava içeriğinin çoğunlukla %4-6 arasında olduğu, çelik elyaf içeriğinin artmasıyla hava içeriğinin azaldığı ve %3 çelik elyafın eklenmesi ile farklı su-bağlayıcı oranlarında yaklaşık %0,9 ile %2,4 oranında hava içeriğinin azaldığı, süperakışkanlaştırıcı dozajının hava içeriği üzerindeki etkisinin, su-bağlayıcı oranı ve çelik lif ilavesiyle ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Aynı su-bağlayıcı oranına sahip UYPB'lerin daha yüksek lif içeriği ile basınç dayanımını belirgin bir şekilde arttırdığı, lif içeriğinin %0'dan %3'e yükseldiğinde 0,18; 0,20; 0,22; 0,24 su/bağlayıcı oranlı karışımlar için ortalama basınç dayanımı artışının %59,1; 53,9; 49,8; 38,9 olduğu, 0,18'lik düşük su-bağlayıcı oranı için daha fazla süperakışkanlaştırıcı ilavesinin basınç dayanımını azalttığı,

%2 ve %3 çelik lif ilavesinin eğilme mukavemetinde %24,9-58,2 ve %48,8-88,7 oranında kayda değer bir artış sağladığı açıklanmıştır.

Huang vd. [126], silis dumanı (SF: 0,1-1 μ m), pirinç kabuğu külü (RHA, 500°C'de kalsine edildi, öğütüldü: 11 μ m), ince kum (0,109-0,212 mm), iri kum (0,212-0,380 mm), süperakışkanlaştırıcı kullanarak ve su/bağlayıcı oranı 0,2, silis dumanını 1/6; 1/3; 1/2; 2/3; 5/6; 1 oranlarında RHA ile ikamesi ile UYPB karışımları üretmişlerdir. RHA'nın artan ikamesinin karışımların su ihtiyacını artırdığı buna bağlı olarak akışkanlığı azaltırken hava içeriğini yükselttiği, 2/3 RHA ikame oranında yayılma çapının %3,10 azaldığı ve hava içeriğinin %4,10 arttığı durumda 28 günlük basınç dayanımının 119,3 MPa'dan 136,6 MPa'ya yükseldiği belirtilmiştir. 2/3 RHA ikamesinde 3; 28; 120 günlük basınç dayanımının 95,6; 136,6; 137,2 MPa olduğu ve kontrol grubuna göre %9,76; 14,50; 10,02 arttığı, RHA'nın artması ile 3 günlük eğilme mukavemetinin iyileştirildiği ancak 28 ve 120. günlerde çok az değişikliklerin olduğu ifade edilmiştir.

2.2.2. Kolemanit Minerali İle İlgili Önceki Çalışmalar

Bor minerali kolemanitin inşaat malzemesi olarak kullanılabilmesi yönünde yapılan bazı araştırmalara ait veriler aşağıda sunulmuştur.

Bideci vd. [69], öğütülmüş kolemanit katkısının çimento harçlarına etkisini araştırmak amacıyla çimentonun %1; 3; 5; 7 oranlarında kolemanit ikamesi ile gerçekleştirdikleri çalışmada, %39,85 B₂O₃ içeren kolemanitin puzolanik aktivite deneyi sonucunda standartta belirtilen değeri sağladığından dolayı puzolanik aktivitesinden bahsedilebileceği ifade edilmiştir. Kolemanit ikame artışına bağlı olarak priz sürelerinin uzadığı ve standart kıvam su ihtiyacının arttığı, 2; 7; 28 günlük basınç dayanımlarının azaldığı, %1; 3; 5 oranında kolemanitin çimento ikame malzemesi olarak kullanılabileceğini açıklanmıştır.

Gezmen vd. [127], portland çimentosu ile farklı oranlarda kullanılan kolemanit mineralinin (%0; 2; 4; 6; 8; 10) ve uçucu kül içeren harçların (%0; 10; 20; 30) mekanik özellikleri ve sülfat dayanıklılığını incelemek amacıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, kolemanit oranı arttıkça priz süresinin uzadığını, Le Chatelier hacim genleşmesi değerlerinin standardın (TS EN 196-3) öngördüğü limitlerde içinde kaldığını, %10 uçucu kül ve %2-4 Kolemanit içeren numunelerin en yüksek basınç ve eğilme dayanımına sahip olduğunu ancak kolemanit miktarının artması ile basınç ve eğilme dayanımlarının düştüğünü, kolemanit miktarının artmasıyla sülfata dayanıklılığın geliştiği ifade

edilmiştir. Ayrıca düşük kolemanit oranının, bağlayıcı hamuru ile agrega arasındaki aderansı yeterince sağlayamadığından eğilme dayanımlarının olumsuz etkilendiği ifade edilmiştir.

Mutuk ve Mesci [128], bor atığı ve pirinç kabuğu külü ile yaptıkları çalışmada, bor atığı artışı ile basınç dayanımlarında düşüş ve sonuçların Türk Standartları içerisinde yer aldığını tespit ederek, %5' e kadar bor atığı kullanımının beton endüstrisi için uygun olduğunu öngörmüşlerdir.

Erdoğan [129], silis dumanı ve kolemanit atığının çimento özelliklerine etkisini incelemek amacıyla, %6 silis dumanı ve %2-12 kolemanit atığını çimento ile ikame ederek gerçekleştirdiği çalışmada, silis dumanı ve kolemanit atığı artışı ile priz sürelerinde artış meydana geldiğini ve priz başlama, bitiş sürelerinin sırasıyla %455 ve %438'e kadar arttığını ifade etmiştir. Hacim genleşmesi değerlerinin azaldığı, karışımlardaki su ihtiyacının arttığı, silis dumanı ikameli harçların basınç dayanımlarının 28.günde arttığı, karışımlardaki kolemanit atığına bağlı olarak 2; 7; 90 günlük basınç dayanımlarının tüm örneklerde kademeli olarak azaldığı, silis dumanı ve kolemanit atığı içeren numunelerin erken basınç dayanımlarının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca donma çözülme döngüleri sonrasında tüm karışımlarda basınç dayanımlarının azaldığı ve %10 ve %12 oranında kolemanit atığı içeren karışımların dayanım kayıplarının yönetmeliğe göre izin verilen sınırın üzerinde olduğu, %10 ve %12'ye kadar kolemanit atığı içeren numunelerin dayanım kayıplarının izin verilen sınırın altında kaldığı ifade edilmiştir. Erdoğan vd. [130] tarafından yapılan diğer bir çalışmada, kolemanit atığı %3,5 ve uçucu kül %16 oranında kullanılmış, kontrol örneğine göre priz başlangıç süresinin %210 oranında ve priz bitiş süresinin %257 oranında arttığı tespit edilerek, bu durumun kolemanit mineralinin B_2O_3 içeriğiyle ilişkili olduğu belirtilmiştir.

Pehlivanoglu vd. [131] tarafından yapılan çalışmada, B_2O_3 konsantrasyonu arttıkça, çimento hidratasyonunun yavaşladığı ve hatta durduğu, buna bağlı olarak priz süresinin uzadığı belirtilmiştir.

Taban vd. [132] kolemanit, zeolit, perlit ve dolomitin %10 ve 20 oranlarında çimento ile ikamesi ile gerçekleştirdiği çalışmada, çimento harç numunelerinin 7-28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarında en yüksek değerin dolomit katkılı numunelerde, en düşük değerlerin ise kolemanit katkılı numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Kolemanit katkı miktarlarının %10 ve 20 oranlarında kullanıldığında dayanım değerlerini düşürmesi ve

kolemanitin çimento hamurunun hidrasyon süresini uzatmasından dolayı çimento katkısı olarak kullanımının ortalama %5'i geçmemesinin uygun olacağı ifade edilmiştir.

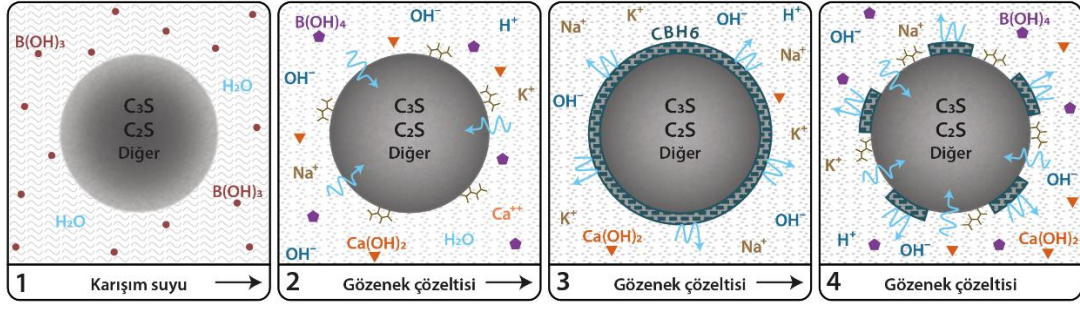
Ustabas [133] tarafından yapılan çalışmada, öğütölmüş kolemanit ve üleksit, çimento kütlelerinin %0,5; 1; 2; 3; 4; 5'i oranlarında çimento ile ikame edilerek çimento numuneleri üretilmiş, hacim genleşmesi, standart kıvam, priz süreleri, 2; 7; 28; 90 günlük basınç ve eğilme dayanımları belirlenmiştir. Kolemanit ve üleksit miktarının artmasına bağılı olarak su ihtiyacı ve priz sürelerinin arttığı, tüm günlerde basınç dayanımı değerlerinin düştüğü ve en yüksek basınç dayanımı değerinin 28 günlük %3 oranında kolemanitli numunelerde tespit edildiğı, 2 günlük eğilme dayanımlarında %0,5 oranında kolemanit ve üleksitin; 7 günlük eğilme dayanımlarında %0,5 ve %1 oranlarında üleksitin; 28 günlük eğilme dayanımlarında %3 kolemanit ve %0,5; 2; 4 oranlarında üleksitin; 90 günlük eğilme dayanımlarında %1; 2; 3; 4; 5 oranlarında kolemanit ve %0,5; 1,0; 2,0; 3; 4; 5 oranlarında üleksitin daha yüksek değerlere sahip olduğı ve en yüksek eğilme dayanımı değerinin 90 günlük %4 oranında kolemanitli numunelerde tespit edildiğı ifade edilmiştir.

Binici vd. [134], barit, kolemanit, öğütölmüş yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza içeren harçların mekanik dayanımı ve sülfat dayanıklılığını incelemek amacıyla %2,5; 5; 10 oranlarında Barit, Cüruf ve Pomza ve %0,25; 0,50; 0,75 oranlarında kolemanit ağırlıkça ikame ederek karışımlar hazırlamıştır. Eğilme ve basınç erken dayanımlarının kolemanit ikame oranı artışı ile azaldığı ancak ileri yaşlarda dayanım değerlerinin arttığı, 180 ve 360 günlük sülfat çözeltisinde bekletilen harçların kolemanit ikamesi ile kütle kayıplarının azaldığı, donma çözölme sonrasında dayanım kayıplarının azaldığı ifade edilmiştir.

Davraz [135]'in, bor bileşikleri kullanarak yaptığı çalışmada, B₂O₃ konsantrasyonunun, bor bileşigi içeren çimentolu kompozitin ürün kalitesini (yangına dayanıklılık, nötron kalkanı, antibakteriyel ortam vb.) etkileyen en önemli faktör olduğı, çalışmalarda öncelikle amaca bağılı olarak etkili B₂O₃ konsantrasyonun belirlenmesi gerektiğı ve konsantrasyonun, boron bileşiginin B₂O₃ yüzdesine bağılı olduğı ifade edilmiştir. B₂O₃/çimento içeriğinin artmasıyla priz sürelerinin arttığı, bileşigin B₂O₃ konsantrasyonunun azaldıkça çimentolu kompozitlerin sertleşme gecikmesi ve mukavemet kaybının orantılı olarak iyileştiğı ancak B₂O₃'ün çimentolu kompozitlere sağladığı bazı faydaların (yangına dayanıklılık, nötron kalkanı, antibakteriyel ortam vb. gibi) zamanla azalabileceğı belirtilmiştir.

Davraz [135], bor bileşiklerinin çimento hidrasyonu üzerinde önemli etkileri olduğunu, çimento karışımlarında $B(OH)_3$ gibi bor bileşikleri varlığının hidrasyon sürecini etkilediğini ifade etmiş ve bu durumu şu şekilde özetlemiştir.

- Tetra Hidroksibütirat ($B[OH]_4^-$) Bileşiğinin Oluşumu: Çimento hidrasyonu sırasında, kalsiyum oksit (CaO), su (H_2O) ile reaksiyona girerek kalsiyum hidroksit ($Ca[OH]_2$) üretir (Şekil 2.3-1). Bu reaksiyon sırasında gözeneklerdeki su hızla alkali (bazik) bir çözeltiye dönüşür. Alkali çözeltideki kalsiyum katyonları (Ca^{2+}) ve hidroksil anyonlarının (OH^-) konsantrasyonları artar ve $B(OH)_3$ hızla çözünür ($B(OH)_3$ 'ün varlığı, karışımdaki $B(OH)_3$ iyonlarının çözünmesine yol açar). Karışımdaki $B(OH)_3$ iyonları OH^- iyonları ile reaksiyona girerek tetra hidroksiborat ($B[OH]_4^-$) bileşiğini oluştururlar. Daha sonra Ca^+ katyonları ($B[OH]_4^-$) ile reaksiyona girer (Şekil 2.3-2) [135].
- Kalsiyum Di Borat (CBH_6) Bileşiğinin Çökeltilmesi: Tetra hidroksibütirat ($B[OH]_4^-$) bileşiği çökeltir ve çimento tanelerinin yüzeyini kısmen veya tamamen kaplar. Bu çökeltme, çimento partiküllerinin hidrasyon reaksiyonunu kısmen veya tamamen engelleyen geçirimsiz bir CBH_6 tabakası oluşturularak, hidrasyon süreci yavaşlar veya tamamen durur. Bu durum çimento hamurunun topaklaşmasına ve ani priz (yalancı priz) oluşumuna neden olur (Şekil 2.3-3) [135].
- CBH_6 'nın Çözünmesi ve Yeniden Çökmesi: Gözenek çözeltisinde kalsiyum hidroksit ($Ca[OH]_2$) ve CBH_6 bulunması nedeniyle, kalsiyum iyonlarının (Ca^{2+}) konsantrasyonu azalır. Ancak, çimento hidrasyonu sırasında alkaliler (NaO , K_2O , vb.) açığa çıktığında, gözenek çözeltisinde sodyum (Na^+) ve potasyum (K^+) katyonları oluşur ve hidroksit iyonları (OH^-) konsantrasyonunda bir artışa neden olur. Sonuç olarak, gözenek çözeltisinin pH değeri artar ve CBH_6 kısa sürede Ca^{2+} katyonları oluşturmak üzere tekrar çözünebilir. Çimento partiküllerinin yüzeyini kaplayan CBH_6 kristal tabakaları çözündükçe, hidrasyon reaksiyonu hızlanır ve yukarıda bahsedilen kimyasal döngü tekrar eder. Ortamda hidrasyonu sürdürebilecek yeterli gözenek suyu varsa, bu tersinir reaksiyonlar, çimento hidrasyonunun sonuna kadar devam eder (Şekil 2.3-4) [135].



Şekil 2.3. Bor bileşiklerinin çimento hidratasyonu üzerindeki etkisinin gösterimi[135].

- B_2O_3 Konsantrasyonunun Etkisi: Başlangıçta, gözenek çözeltisindeki çözünebilir B_2O_3 konsantrasyonu arttıkça, CaO 'nun çözünübilirliği de artar. Ancak, belirli bir süre sonra, gözenek çözeltisindeki Ca^{2+} katyonlarının ve OH^- anyonlarının konsantrasyonları CBH_6 oluşturmak üzere azalır. Sonuç olarak, CBH_6 çimento tanelerinin yüzeyini hızla kaplayarak hidratasyonun durmasına neden olur. Ayrıca, B_2O_3 konsantrasyonu artmaya devam ettikçe, CBH_6 'nın çözünübilirliği gecikir. Bu fenomen çimento taneleri arasındaki bağları zayıflatır ve sonuç olarak çimento matrisinin mukavemetini zayıflatır. Bu nedenle, daha yüksek bir B_2O_3 konsantrasyonu çimento hamurunun priz süresinin uzamasına ve mukavemetinin azalmasına yol açar [135].

Olgun vd. [86], doğal alçı yerine kolemanit atığı ve ilave kimyasal aktivatörlerin (sülfonatlı melamin formaldehit-SMF, sülfonatlı naftalin formaldehit-SNF, Na_2SO_4 ve $CaCl_2 \cdot 2H_2O$) kullanımı ile çimento numuneleri üzerinde yaptıkları çalışmada, doğal alçının ve kimyasal aktivatörlerin etkisi incelenmiştir. Kolemanit atığı ilavesinin priz sürelerinde artış meydana getirdiği ve kabul edilebilir değerlerde olduğu ifade edilmiştir. Çimento ile kolemanit atığı ikamesinin 2;7.günlerde düşük, 28.günde ise yüksek basınç dayanımı değerlerine sahip olduğu, kolemanit ve doğal alçı ikameli numunelerde 2-7-28 günlük basınç dayanımlarının arttığı, aktivatörlerin eklenmesi ile puzolanik reaksiyonun hızlandırılarak kolemanit ve doğal alçı ikameli numunelerinin erken dayanımlarının önemli ölçüde arttığı, kullanılan kimyasal aktivatörler içerisinde harç numunelerinin mukavemetini artırmada en etkili $CaCl_2$ 'nin olduğu, kimyasal aktivatörlerin sadece çimento hamurunun hidratasyon oranını değil aynı zamanda harcın mikro yapısını da değiştirdiği ifade edilmiştir.

Demir ve Keleş [136] tarafından borojips ve kolamanit konsantrasyonlu atıklar, ağırlıkça %0; 2,5; 5; 7,5; 10; 15 oranlarında klinker ile ikame edilerek çimento harçları üretilmiş, 59,54 ve 80,99 keV gama ışınları ile 2; 7; 28 günlük radyasyon geçirgenlikleri ölçülmüş ve bor içeren bu atıkların çimentoya koruyucu malzeme olarak eklenmesinin etkisi araştırılmıştır. Bor atıkları (borojips ve kolamanit konsantratör atıkları) içeren harçların radyasyon iletim faktörlerinde kayda değer değişimlerin olduğu, kütle zayıflama katsayılarının artan bor konsantrasyonu ile arttığı ve artan gama ışını enerjisi ile azaldığı, her iki bor atık türünün de radyasyon iletimini önlemede etkili olduğu, bor atıklarının çimento harçlarında radyoaktif ışınımına karşı koruyucu malzeme olarak kullanılabileceği ifade edilmiştir.

Targan vd. [85], sabit miktarlarda %4 oranında kolamanit atığı, %10 uçucu kül, %10 taban külü, %5-%30 oranlarında doğal puzolan, öğütülmüş %60-95 oranlarında portland klinkerinin ikamesi ile gerçekleştirdikleri çalışmada, %4 kolamanit atığı kullanıldığı durumda doğal puzolan oranının artırılması ile çimento priz sürelerinin uzadığı ifade edilmiştir. %15 doğal puzolan kullanımında 28 günden sonra basınç dayanımlarının arttığı, doğal puzolan ve kolamanit atığının birlikte kullanılması ile 28 gün sonrası basınç dayanımlarında artışın olduğu, yüksek puzolan içerikli kolamanit atığı katkılı beton numunelerin 28.gün ve sonrasında basınç ve eğilme dayanımlarının düşük puzolan içerikli numunelere göre daha yüksek olduğu, kolamanite bağlı olarak borun etrenjit yapının içerisine dahil olmuş olabileceği ve bu durumun da dayanım gelişmesine katkı sağladığı belirtilmiştir. Diğer bir çalışmalarında[84], kolamanit atığı ve bentonit farklı oranlarda kullanılmış, %5 bentonit ve %4 kolamanit atığı içeren betonlarda daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir. Erken yaşlarda dayanım değerlerinde düşüş gözlenirken, ilerleyen yaşlarda kademeli olarak artışın meydana geldiği ve kolamanit atığının çimentonun sertleşmesini yavaşlattığı ifade edilmiştir.

Öztürk ve Özdemir [137], iki farklı B_2O_3 (%22,48 ve %8,23) içeriğine sahip %1; 2,5; 5; 10 oranlarında kolamanit atığının ve %3,5 doğal alçının çimento ile ikamesi şeklinde ürettikleri harçlar üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada 28 günlük çekme ve basınç dayanımlarını incelemişlerdir. %1 oranında kolamanit atığı içeren harç hariç, B_2O_3 artışına bağlı olarak mekanik dayanımların azaldığı, %5 ve %10'a kadar kolamanit atığının çimento katkısı olarak kullanımının uygun olacağı önerilmiştir.

Kula ve diğ. [83], kömür taban külü, uçucu kül ve %9 oranına kadar kolemanit atığı ile çimento harçları üzerine yaptıkları çalışmada, %3'e kadar kolemanit atığı kullanımının 28 günlük mekanik özellikleri geliştirdiğini tespit etmişlerdir.

Erdoğan vd. [82], kolemanitin çimento katkı maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırdıkları çalışmada kolemanit ikame oranı (%1; 3; 5; 7) arttıkça çimento priz sürelerinin uzadığını, hacim genleşmelerinin azaldığını, basınç dayanımı değerlerinin azaldığını, %5 ikame oranında çimento katkı maddesi olarak kullanılabileceğini belirtmiştir.

Taylor [138] tarafından yapılan çalışmada, boratların çökelme mekanizmalarından kaynaklı olarak çimento hidratasyonu ve sertleşmesinde güçlü geciktiriciler olduğu, pek çok tuzun C_3S veya çimento hamurlarına eklendiğinde ek fazları çökelttiği, katyon eklenmesi durumunda katyonun hidroksitinin CH 'den daha az çözündüğü, eklenen katyonun veya bazik/kompleks bir tuzun çökeleceği ifade edilmiştir.

Csetenyi ve Glasser [139], boratların etrenjit mineraline katılması ile boratların hangi ölçüde çözünmez hale getirilebileceğini araştırmak amacıyla yaptıkları çalışmada, borat etrenjit süspanyiyonlarına, 1:1 (sülfat/borat) oranında sodyum sülfat ve 2:1 (karbonat/borat) oranında sodyum karbonat ilave ederek numuneler üretmişlerdir. Etrenjitin borat çözünürlüğünü azalttığını, geniş fizikokimyasal koşullar ile kararlı ve çok düşük çözünürlüğe sahip ürünler elde edilebileceğini, etrenjitin çimentolu sistemlerde borat tuzluğu işlevi görebileceğini ifade etmişlerdir.

Mushurov vd. [140] tarafından %5-7 oranlarında kolemanit ve %20-30 oranlarında metakaolinin çimento ile ikamesinin ve süperakışkanlaştırıcı kullanımının, yüksek performanslı katkılı çimento esaslı harcın mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması amacıyla yapılan çalışmada 2; 7; 28 günlük basınç ve eğilme mukavemetleri belirlenmiş ve referans karışım ile karşılaştırılmıştır. Referans karışımın 35,8 MPa basınç ve 8 MPa eğilme dayanımına sahip olduğu, süperakışkanlaştırıcıların harç karışımlarına ilavesi ile işlenebilirlik ve mekanik özelliklerin iyileştirildiği, kolemanitin ağırlıkça %7 ve metakaolinin %30 oranında kullanımının çok düşük mukavemet gösterdiği, en iyi mekanik özelliklerin %5 kolemanit; %20 metakaolin; %1 süper akışkanlaştırıcı kullanılan karışımlarda elde edildiği ve harç içerisindeki toplam çimento miktarının %25 oranında azaltılabilir olması ile mali ve ekolojik fayda sağlanacağı ifade edilmiştir.

Sevim vd. [141], %3; 5; 10; 15 oranlarında kolemanit atığının çimento ile ikamesi ürettikleri beton numuneler üzerinde gerçekleştirdikleri çalışma ile kolemanit atığının betonun işlenebilirliği, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımına etkisi ve beton katkısı olarak kullanılabilirliği araştırmıştır. Kolemanitin tüm ikame oranlarında taze beton işlenebilirliğini azalttığı ve su ihtiyacını arttırdığı, %15 ikame oranında tüm yaşlarda daha düşük; %10 ikame oranında 7-28.günlerde daha düşük ve 90-180.günlerde daha yüksek; %5 ikame oranında daha düşük; %3 ikame oranında 28-90 ve 180.günlerde daha yüksek basınç dayanımlarının olduğu tespit edilmiştir. %15 ikame oranında 28-90.günlerde daha düşük; %10 ikame oranında 180 gün sonunda kontrol numunesi ile hemen hemen aynı; %3 ve %5 ikame oranında 28-180.günlerde daha yüksek yarmada çekme dayanımı değeri elde edilmiştir. Schmidt çekiç test yöntemi ile yaklaşık hesaplanan basınç dayanımı değerlerinin 0.50 su/bağlayıcı, tüm ikame oranları ve 7-28-90-180.günlerde kontrol numunesine yakın; 0.60 su/bağlayıcı, tüm ikame oranları ve 7-28.günlerde kontrol numunesine yakın ve 90-180.günlerde daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. 0.50 su/bağlayıcı, %3; 5; 10 ikame oranları ve 180.günde daha yüksek; 0,60 su/bağlayıcı, tüm ikame oranları ve yaşlarda daha yüksek ultrases geçiş hızı değerleri elde edilmiştir. Sevim[142] diğer bir çalışmada, %3; 5; 10; 15 oranlarında kolemanit atığının çimento ile ikamesi şeklinde üretilen çimento harçlarında, yarmada çekme dayanımı ve kuruma büzülmesi özelliklerini incelemiştir. %3-5 oranlarında kolemanit atığı içeren beton karışımlarının referans beton karışımından 7; 28; 56; 90.günlerde daha yüksek dayanım değerleri geliştirdiğini ve kuruma büzölmelerinin %7-37 aralığında azaldığını, kolemanit atığının uygun maliyetli bir rötre azaltıcı olarak, özellikle beton kaplamalarda ve büzölmenin önemli olduğu büyük endüstriyel beton zeminlerde mineral katkı olarak kullanılabileceğini ifade etmiştir.

Kara vd. [143] tarafından yapılan çalışmada, kolemanit çimentoya ağırlıkça %0; 1; 2; 3; 4; 5 oranlarda ikame edilerek beton numuneler hazırlanmış, 28 gün standart kür sonrasında 90. güne kadar NaCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Kontrol numuneleri ve NaCl çözeltisine maruz bırakılan %1; 2; 3; 4 kolemanit ikameli numnuelerin schmidt çekici, ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı değerlerinin arttığı tespit edilmiştir. %4 kolemanit ikameli betonların referans betona göre daha yüksek dayanım sağlamasına rağmen daha fazla dayanım kaybı verdiği, en yüksek basınç dayanımı ve en az kütle kaybı değerinin %3 kolemanit ikamesi ile elde edildiği belirtilmiştir.

Kutuk Sert vd. [144] tarafından yapılan çalışmada, ham öğütölmüş kolemanit çimentoya ağırlıkça %1; 2; 3; 4; 5 oranlarında ikame edilerek beton numuneler hazırlanmış, 7; 28; 90 günlük aşınmaya karşı dayanıklılık (Bohme) ve yaklaşık basınç dayanımı (Schmidt) testleri yapılmıştır. Kolemanit ikameli taze betonların çökme miktarlarının 100 mm ile 150 mm aralığında ölçüldüğü ve kolemanitin %5'e kadar çimentoya ikame olarak kullanılmasının taze betonun işlenebilirliğine büyük bir etkisinin olmadığı ifade edilmiştir. Tüm kolemanit oranlarında 7 ve 28.günlerdeki aşınma kayıplarının referans numuneye göre daha yüksek ve %1; 2; 3 oranlarında 90.günde daha az olduğu, yaşın artması ile aşınma kaybının azaldığı, ancak %3 ikame oranının üstündeki değerlerde kolemanitin aşınma kaybına olumsuz etkisinin olduğu belirtilmiştir. Schmidt çekici ile elde edilen 7-28 günlük yaklaşık basınç dayanımı üzerinde kolemanitin etkisinin düzensiz olduğu ve 90. gün %5 kolemanit ikamesi ile dayanım değerinin referansa göre düşük olduğu tespit edilmiştir. Kolemanit minerali ikamesinin %3'e kadar kullanımının, aşınma dayanımı ve schmidt çekici (yaklaşık basınç dayanımını) değerlerini arttırmada etkili olduğu ifade edilmiştir. Kutuk-Sert [145] tarafından yapılan diğer bir çalışmada farklı tane boyutlarında (75 µm, 45 µm, 25 µm) kolemanit, %0,5; 1; 2; 3; 5 oranlarında çimentoya ilave edilerek beton karışımları hazırlanmıştır. Kolemanit mineralinin tane boyutunun azalması ile 7; 28 günlük basınç dayanımlarında azalma meydana geldiği, kolemanitin mineralinin tane boyutu küçüldükçe daha düşük oranlarda; büyüdükçe daha yüksek oranlarda kullanılmasının uygun olacağı belirtilmiştir.

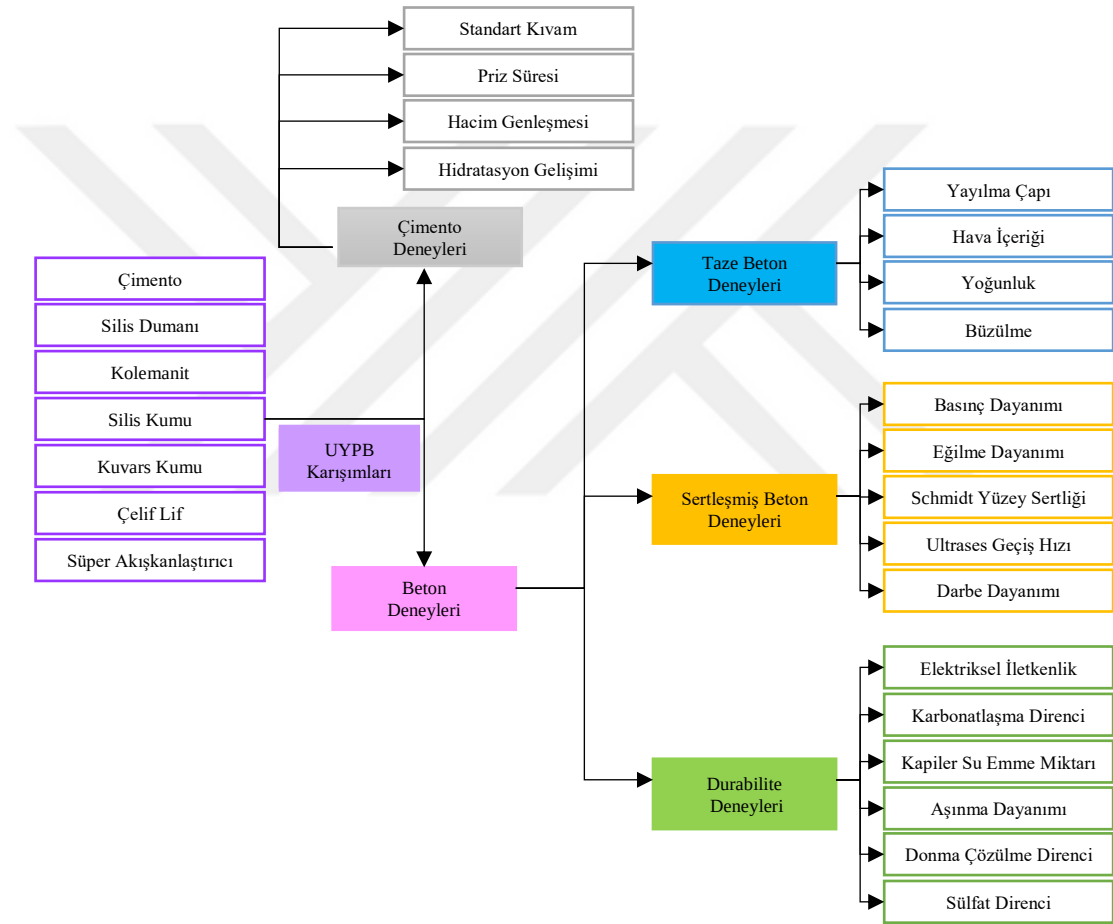
Durgun vd. [146] tarafından yapılan çalışmada, kolemanit atığı çimentoya ağırlıkça %1, 3, 5 oranlarında ikame edilerek beton numuneler hazırlanmıştır. 28 ve 90 gün kür sonrasında numuneler 1 saat süre 200, 400, 600, 800 ve 1000°C sıcaklığa maruz bırakılmış, ısı işlemi sonrasında havada ve suda olacak iki farklı soğutma işlemine tabi tutulmuş, her iki gurubun basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızları test edilmiştir. 28 ve 90 günlük kolemanit ikameli numunelerin 200 ile 1000°C aralığında ısı işlem sonrasında hem hava da hem de suda soğutma işleminden sonra basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızları değerleri incelendiğinde, en düşük kayıpların %3 kolemanit ikameli numunelerde ve en yüksek kayıpların %5 kolemanit ikameli numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Tüm seriler ve günler içinde en az etkilenen serinin %3 kolemanit ikameli betonların olduğu, tüm numunelerin 1000°C ısı işlem sonrası su soğutmasında tamamen bozulduğu ifade edilmiştir.

Binici vd. [147], barit, kolemanit, öğütölmüş yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza içeren betonların dayanım ve dayanıklılığını incelemek amacıyla %2,5; 5; 10 oranlarında Barit, Cüruf ve Pomza ve %0,25; 0,50; 0,75 oranlarında kolemanit ağırlıkça ikame ederek basınç-sülfat-aşınma dayanımı, donma çözölme direnci, permeabilite özelliklerini araştırmıştır. Kolemanit ikameli tüm numunelerde 28 ve 180.günlerde basınç dayanımlarının arttığı, 365 ve 180 gün sülfat çözeltisinde bekletilen tüm kolemanit ikameli örneklerin ağırlık kayıplarının azaldığı, %0,25 ikame oranı hariç tüm kolemanitli numunelerde su işleme derinliklerinin azaldığı, tüm kolemanitli numunelerde donma çözölme çevirimleri sonrası dayanım kayıplarının azaldığı, 90 günlük kolemanitli numunelerde ez an aşınma kaybının ve 28; 180.günlük numunelerde ultrases geçiş hızlarının yüksek olduğu belirtilmiştir.

Gencel vd. [148], %10; 20; 30; 40; 50 oranlarında kolemanitin agrega olarak kullanılmasıyla betonun fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. %10 ile %50 arasında kolemanit kullanımının betonun mekanik ve fiziksel özelliklerini olumsuz etkilediğı, kolemanit artışına bağılı olarak ultrases geçiş hızı, schmidt yüzey sertliğı, birim ağırlık değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Donma çözölme döngüleri sonrasında, artan orana bağılı olarak kolemanitli numunelerin referans örneklere göre daha az dayanım kaybı gösterdiği, betonunun işlenebilirliğı ve dayanımı açısından kolemanitin agrega olarak %30'a kadar kullanımının kabul edilebilir olduğu ifade edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda, hammadde ve numunelerin hazırlanması, gerçekleştirilen deneyler ve analizler sunulmuştur. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalar ve numunelerin kodlandırılmasına ilişkin veriler Şekil 3.1 ve Çizelge 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Tez kapsamında uygulama ve analizler.

Çizelge 3.1. Üretilen UYPB numunelerinin kodları.

Numune Kodu	Numune Bileşimi
R	%25 SD ikameli Çimento + Agreg + Su + Süper akışkanlaştırıcı + Çelik lif
K25	%25 SD ikameli Çimento + Bağlayıcıya göre %0,25 Kolemanit katkısı + Agreg + Su + Süper akışkanlaştırıcı + Çelik lif
K50	%25 SD ikameli Çimento + Bağlayıcıya göre %0,50 Kolemanit katkısı + Agreg + Su + Süper akışkanlaştırıcı + Çelik Lif
K100	%25 SD ikameli Çimento + Bağlayıcıya göre %1 Kolemanit katkısı + Agreg + Su + Süper akışkanlaştırıcı + Çelik lif

3.1. MATERYAL

3.1.1. Bağlayıcılar

Çalışmada, TS EN 197-1 [149]'e uygun olarak üretilen CEM I 52.5/R beyaz çimento; yüksek performanslı beton ve özel harç formülasyonlarının özelliklerini iyileştirmek amacıyla puzolanik malzeme olarak microwhite (mikro beyaz) silis dumanı kullanılmış olup, malzemelere ait görseller, fiziksel, mekanik, kimyasal özellikler Çizelge 3.2, Çizelge 3.3, Şekil 3.2, Şekil 3.3'de verilmiştir. Kullanılan çimento ve silis dumanının tane dağılımları, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında Lazer Tane Dağılımı yöntemi ile ölçülmüştür.



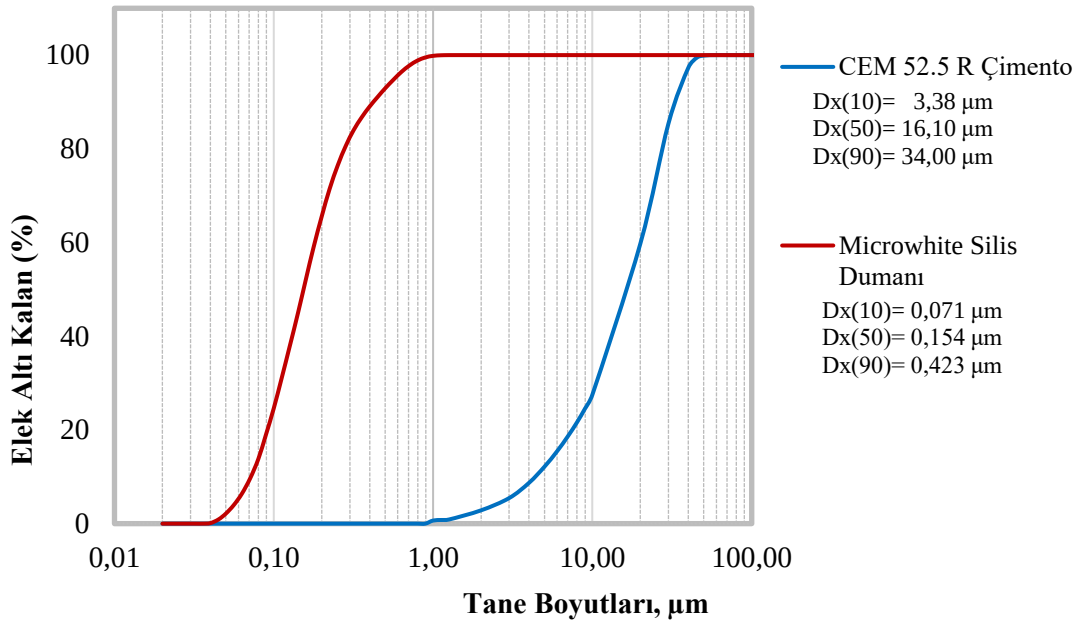
Şekil 3.2. Çimento ve Silis Dumanı.

Çizelge 3.2. Microwhite Silis Dumanı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Miktar
SiO ₂	%96
Renk Yansıması	%75
H ₂ O	%1
Kızdırma Kaybı	%3
Özgül Yüzey Alanı	15 m ² /g
Özgül Ağırlık	2,20 g/cm ³

Çizelge 3.3. Çimento fiziksel, mekanik ve kimyasal özellikleri.

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SiO ₂ (%)	21,6	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	3,06
Al ₂ O ₃ (%)	4,05	Özgöl Yüzey (cm ² /g)	4600
Fe ₂ O ₃ (%)	0,26	Priz Başlangıcı (sa/dk)	01:40
CaO (%)	65,7	Priz Sonu (sa/dk)	02:10
MgO (%)	1,30	Hacim sabitliliği (mm)	1
SO ₃ (%)	3,30	45 µm Elek bakiyesi (%)	1
Na ₂ O (%)	0,30	90 µm Elek bakiyesi (%)	0,1
K ₂ O (%)	0,35	Mekanik Özellikler	
Chloride (Cl) (%)	0,01	Basınç Dayanımı (MPa)	
S.CaO (%)	1,60	2.Gün	37
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0,18	7.Gün	50
Kızdırma Kaybı (%)	3,20	28.Gün	60



Şekil 3.3. Çimento ve Microwhite Silis Dumanı tane boyutu dağılımları.

3.1.2. Kolemanit

Çalışmada, Eti Maden Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü'nden temin edilen kolemanit kullanılmış olup, malzemeye ait görsel, fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.4, Şekil 3.4, Şekil 3.5'de verilmiştir. Çalışmada kullanılacak kolemanit miktarı ve tane boyutunun belirlenmesi amacıyla yapılan çimento harç deneylerinde, kolemanit birinci durumda öğütülmemiş; ikinci durumda öğütülerek kullanılmıştır. Öğütme işlemi halkalı değirmende 1 saat, daha sonra agat havan ile elde 1 saat olacak şekilde toplamda 2 saat

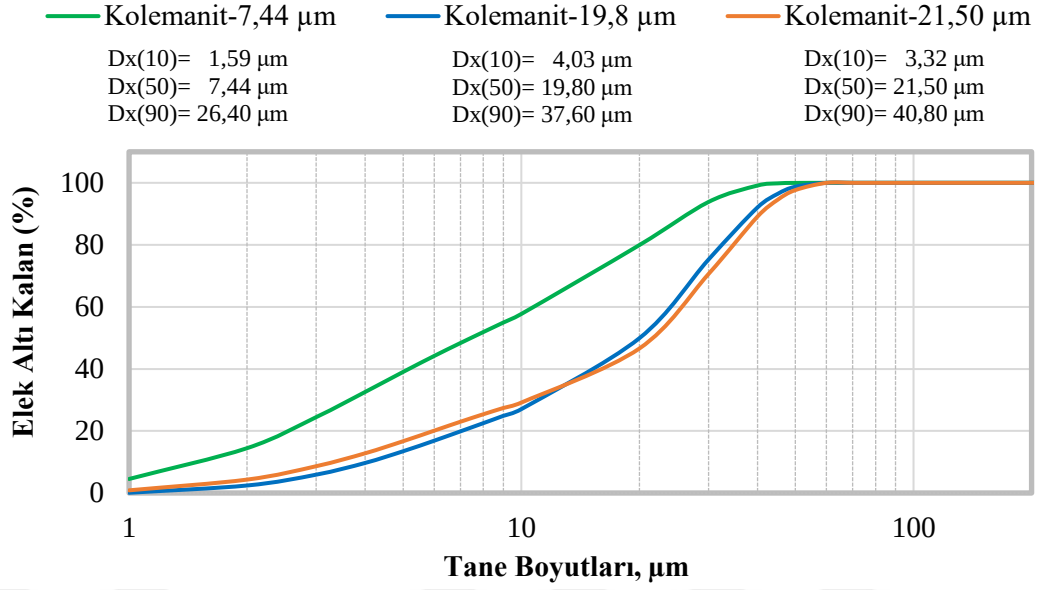
öğütülmüştür. Her iki kolemanit mineralinin tane dağılımları, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında Lazer Tane Dağılımı yöntemi ile ölçülmüştür. Kolemanit oranlarının ve tane çapı etkisinin belirlenmesi amacıyla yapılan çimento standart kıvam, hacim genişmesi ve priz süresi, çimento harçları basınç ve eğilme dayanımı tayinlerinde ortalama tane çapı 19,80 μm (öğütülmemiş) ve 7,44 μm (öğütülmüş) kolemanit kullanılmıştır. Kolemanitin öğütülmeden kullanımı karar verilerek, katkı oranının belirlenmesinin ardından ultra yüksek performanslı beton karışımlarında ortalama tane çapı 21,50 μm (öğütülmemiş) olan kolemanit kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Kolemanit.

Çizelge 3.4. Kolemanit fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
B ₂ O ₃ (%)	39,85	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,50
CaO (%)	27,24	Özgül Yüzey (cm ² /g)	3839
SiO ₂ (%)	5,60		
Fe ₂ O ₃ (%)	0,03		
Al ₂ O ₃ (%)	0,15		
MgO (%)	2,84		
Na ₂ O (%)	0,10		
Kızdırma			
Kayıbı(%)	24,06		



Şekil 3.5. Harç ve UYPB’de kullanılan kolemanitlerin tane boyutu dağılımları.

3.1.3. Agregalar

Dolgu malzemesi olarak ortalama tane çapı 212 μm olan 60-70 AFS silis kumu; 40,7 ve 16,1 μm tane boyutuna sahip kuvars kumu kullanılmış olup, malzemelere ait görsel, fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.5, Çizelge 3.6, Şekil 3.6, Şekil 3.7’de verilmiştir. Kullanılan kuvars ve silis kumlarının tane dağılımları, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında Lazer Tane Dağılımı yöntemi ile ölçülmüştür.



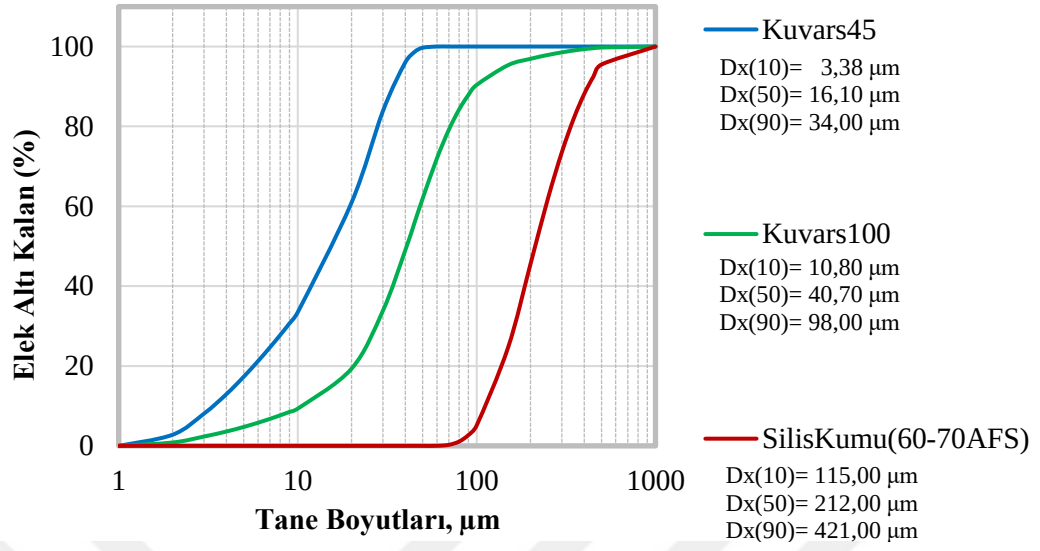
Şekil 3.6. Silis ve Kuvars Kumları.

Çizelge 3.5. Silis kumu kimyasal özellikleri.

Özellik	Miktar
SiO ₂	%98,91
Al ₂ O ₃	%0,04
Fe ₂ O ₃	%0,14
CaO	%0,13
SO ₃	%0,02
K ₂ O	%0,08
P ₂ O ₅	%0,01
TiO ₂	%0,15
Cr ₂ O ₃	%0,0214
Mn ₂ O ₃	%0,0042

Çizelge 3.6. Kuvars kumu fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Miktar
SiO ₂	%97-99
CaO	%0,14
SO ₃	%0,02
K ₂ O	%0,02
P ₂ O ₅	%0,01
TiO ₂	%0,05
Cr ₂ O ₃	%0,0076
Özgöl Ağırlık	2,85 g/cm ³
MOHS' Sertliği	7
Erime Noktası	1785°C
Sinterleşme Sıcaklığı	1500°C



Şekil 3.7. Kuvars45, Kuvars100, AFS60-70 Silis Kumu'nun tane boyutu dağılımları.

3.1.4. Çelik Lif

12,5 mm uzunluğunda ve 0,175 mm çapında paslanmaz mikro çelik fiber kullanılmış olup, çelik life ait görsel, fiziksel ve mekanik özellikler Çizelge 3.7, Şekil 3.8'de verilmiştir.



Şekil 3.8. Çelik Lif.

Çizelge 3.7. Çelik lif fiziksel ve mekanik özellikleri.

Özellik	Miktar
Lif Uzunluğu	12,5 mm
Lif Çapı	0,175 mm
Özgül Ağırlık	2,20 g/cm ³
Çekme Dayanımı	2800 MPa
Elastisite Modülü	210 GPa

3.1.5. Süper Akışkanlaştırıcı

Taze beton kıvamı için polikarboksilik eter esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmış olup, malzemeye ait görsel, fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.8, Şekil 3.9’da verilmiştir.



Şekil 3.9. Süperakışkanlaştırıcı.

Çizelge 3.8. Süper akışkanlaştırıcı fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Özellik	Miktar
Tip	Polikarboksilat
Görünüm (Renk)	Açık Kahve
Klorür İçeriği	≤ %1
pH Değeri	3-7
Özgül Ağırlık	1,06-1,1 g/cm ³

3.2. YÖNTEM

3.2.1. UYPB Karışımları Kolemanit Katkı Oranlarının Belirlenmesi

UYPB karışımlarında en uygun kolemanit katkı miktarının belirlenmesi için %0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında kolemanit ikamesi ile standart kıvam, priz başlama ve sona erme süreleri, hacim genleşmesi, 7, 28, 56.günlerde basınç dayanımı tayinleri gerçekleştirilmiştir.

3.2.1.1. Standart Kıvam Tayini

Numunelerin standart kıvam tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm3: priz süresi ve genleşme tayini” [150] standardına göre tespit edilmiştir. 20±2°C ve bağıl nem %65 olan bir laboratuvar ortamında deneyler gerçekleştirilmiştir. CEM 52,5 R çimento ile 500

g numune için belirlenen ikame oranında kolemanit ve çimento 1 g doğrulukla tartılarak ve karışım suyu başlangıç olarak toplam numune ağırlığının %25'i kadar alınarak karışımlar hazırlanmıştır. Sondanın serbest bırakılmasından sonraki 30 saniye sonunda okumalar yapılarak, çimentonun kütlesi cinsinden yüzde şeklinde, hamurun su muhtevasını da içerecek şekilde kaydedilmiştir. Her batırma işleminden sonra sonda temizlenerek, kıvam için gerekli olan su miktarının tayini için sondanın cam levhaya olan uzaklığı 6 ± 2 mm oluncaya kadar su arttırılarak ya da azaltılarak deneye devam edilmiştir. Mesafenin 6 ± 2 mm okunduğu durumdaki su miktarı, kıvam için gerekli su miktarı olarak kaydedilmiştir.

3.2.1.2. Priz Başlama ve Sona Erme Süresinin Tayini

Numunelerin priz başlama ve sona erme sürelerinin tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm 3: priz süresi ve genleşme tayini” [150] standardına göre tespit edilmiştir. $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nem %65 olan bir laboratuvar ortamında deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneye başlandığı andan itibaren iğne ile taban plakası arasında okunan mesafe 6 ± 3 mm oluncaya kadar geçen süre en yakın 5 dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir. Deneye başlandığı andan itibaren iğnenin ilk 0,5 milimetre kadar pastaya battığı ana kadar geçen süre en yakın 5 dakikaya yuvarlatılarak priz sona erme süresi olarak kaydedilmiştir.

3.2.1.3. Hacim Genleşmesi Tayini

Numunelerin hacim genleşmesi tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, TS EN 196-3 “Çimento Deney Metotları – Bölüm 3: priz süresi ve genleşme tayini” [150] standardına göre tespit edilmiştir. $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nem %65 olan bir laboratuvar ortamında deneyler gerçekleştirilmiştir. 500 gram numune için belirlenen ikame oranında kolemanit ve çimento 1 gram doğrulukla tartılarak ve kıvam deneyinde bulunan karışım suyu miktarı ile numuneler hazırlanmıştır. Üç adet Le Chatelier kalıbı ve cam levha kullanılarak, karışımlar kalıplara alınmış, $24\pm 0,5$ saat rutubet dolabına muhafaza edilmiştir. Kırılma, kaynatma ve soğutma sonrası çubuk uçları arasındaki açıklık 0,5 mm hassasiyetle ölçülmüş, üçüncü ve birinci ölçüm değerleri farkı alınarak hacim genleşmesi değerleri tespit edilmiştir.

3.2.1.4. Çimento Harç Deney Örneklerinin Hazırlanması

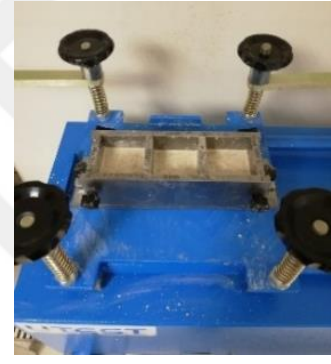
Numunelerin hazırlanması, basınç dayanımı tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, ASTM C230;C109;1437 [151]–[153] standardına göre tespit edilmiştir. $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ve bağıl nem %65 olan bir laboratuvar ortamında deneyler gerçekleştirilmiştir. Her bir grup için toplam 450 g bağlayıcı ve 1350 gram referans kum kullanılarak ASTM C230, C109, 1437 standartlarına göre su miktarı tayinleri yapılmıştır. Akma tablası deneyinde belirlenen su miktarı ile referans ve %0,25; 0,50; 1 ikame oranlarında harçlar hazırlanarak, kür havuzunda 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanım günlerine kadar bekletilmiştir (Şekil 3.10). Referans ve %0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında kolemanit ikameli çimento harç örneklerinin hazırlanmasında kullanılan malzeme miktarları Çizelge 3.9’da verilmiştir.



Karıştırma işlemi.



Akma tablası deneyi.



Sarsma işlemi.

Şekil 3.10. Çimento harçlarının hazırlanması

Çizelge 3.9. Referans ve kolemanit ikameli çimento harçlarına ait karışım oranları.

Kolemanit İkame Miktarı	Çimento Miktarı (g)	Kolemanit Miktarı (g)	Kum Miktarı (g)	Su Miktarı (ml)
% 0	450.00	0.00	1350	250
% 0.5	447.75	2.25	1350	250
% 1	445.50	4.50	1350	250
% 1.5	443.25	6.75	1350	250
% 2	441.00	9.00	1350	250

3.2.1.5. Çimento Harçlarının Basınç Dayanımı Tayini

Referans ve %0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında kolemanit ikameli çimento harçlarının 7; 28; 56 günlük basınç dayanımı tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, ASTM C109 [152] standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.11). Küp numuneler, cihazın plakaları arasına $\pm 0,5$ mm' den fazla taşmayacak şekilde merkezlenerek yerleştirilmiştir. Yük (2400 ± 200) N/s hızda olmak üzere düzgün şekilde, küp kırılana kadar artırılmış ve kırılmadaki en büyük yük (F_c) kaydedilmiştir. Basınç dayanımı R_c , aşağıdaki denklemden (3.1) hesaplanır:

$$R_c = \frac{F_c}{2500} \quad (3.1)$$

Burada;

R_c : Basınç dayanımı (N/mm^2),

F_c : Kırılmadaki en büyük yük (N),

2500: Küp numunelerin yüzey alanı (mm^2)'dır.



Şekil 3.11. Çimento harçları ve basınç dayanımı tayini.

3.2.1.6. Hidratasyona Tabi Tutulan Çimento Hamuru Örneklerinin Hazırlanması

Çalışmada kullanılan 0,25 oranında silis dumanı ikameli referans çimento hamurları ve kolemanit katkılı çimento hamurları (bağlayıcıya göre), 15'er gram ağırlığında ve 0,50 su/bağlayıcı oranında hazırlanmıştır. 7,28 ve 90 gün hidratasyon sonrasında sertleşen çimento hamurları 2 saat süre ile $60^\circ C$ 'de etüvde bekletilmiş, daha sonra agat havanda

toz haline getirilerek, mineralojik yapı ve faz gelişimlerinin belirlenmesi amacıyla DTA-TGA, FTIR, XRD analizleri yapılmış ve SEM ile mikro yapıları belirlenmiştir. Her bir numune aynı işlemlere tabi tutulmuştur. SEM analizi işlemleri için numuneler kırılmış, kırılmış yüzey üzerinden görüntü çekimi sağlanmıştır. Referans ve kolemanit katkı çimento hamurlarının karışım oranları miktarları Çizelge 3.10' da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Referans ve kolemanit katkı çimento hamurlarına ait karışım oranları.

Numune Kodu	Kolemanit Katkı Miktarı (%)	Çimento Miktarı (g)	Silis Dumanı Miktarı (g)	Kolemanit Katkı Miktarı (g)	Su Miktarı (ml)
R	0	8	2	0	5
K25	0.25	8	2	0,025	5
K50	0.50	8	2	0,050	5
K100	1.00	8	2	0,100	5

3.2.1.7. Molekül Yapı Analizleri

Silis dumanı ikameli referans çimentolar ve kolemanit katkı çimentoların hidrasyon sonrası elde edilen örneklerinin kafes ve moleküler yapılarının belirlenmesi için Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi (FT-IR) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler, Shimadzu IRPrestige 21 model cihaz ile Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi Çevre ve Kimya laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.1.8. Mineralojik Analizler

Silis dumanı ikameli referans çimentolar ve kolemanit katkı çimentoların hidrasyon sonrası elde edilen örneklerinin mineral bileşimini ve yapısını belirlenmesi için mineralojik yapı (XRD) analizi gerçekleştirilmiştir. Analizler, RIGAKU SmartLab model cihaz ile Bartın Üniversitesi Merkezi Araştırma laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.1.9. Mikro Yapı Analizleri

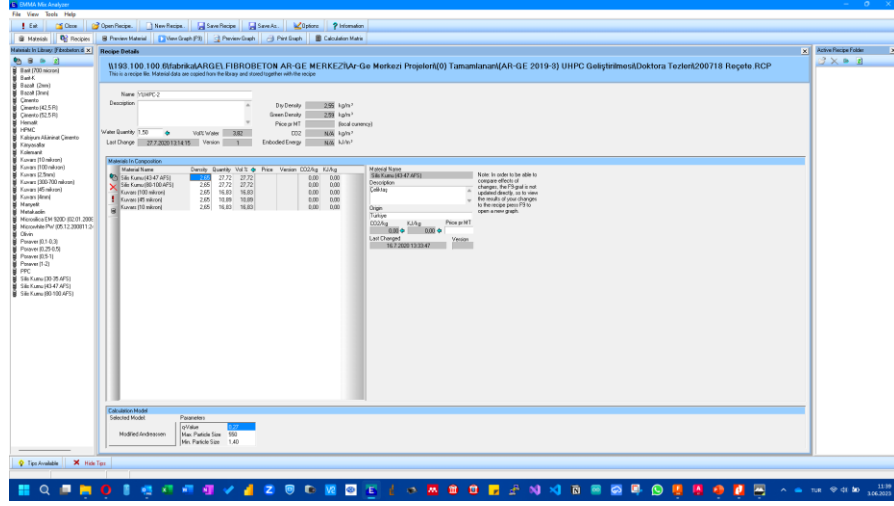
Silis dumanı ikameli referans çimentolar ve kolemanit katkı çimentoların hidrasyon sonrası elde edilen örneklerinin 7,28 ve 90. gündeki mikro yapı çalışmaları, farklı büyütme oranlarında FEI Quanta FEG 250 model cihazı kullanılarak Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi Malzeme ve Yüzey laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.1.10. Termal Analizler

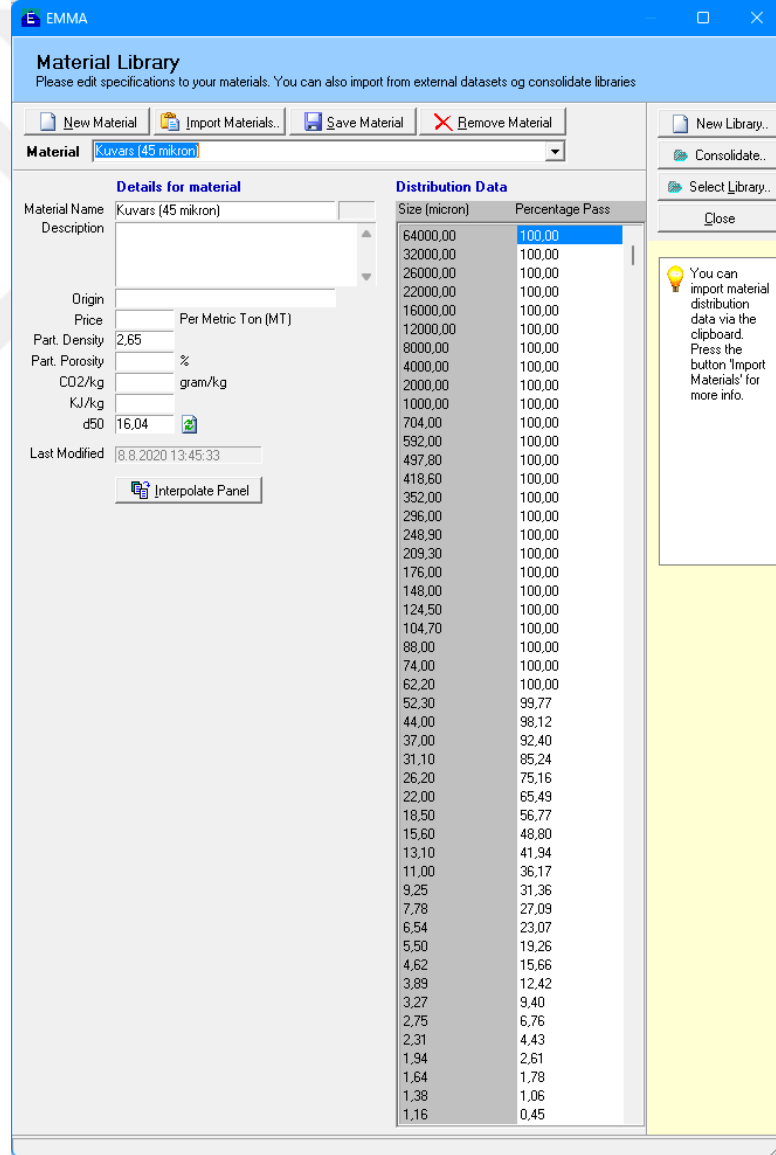
Hidratasyon sonrası elde edilen örneklerin simultane termal analizleri (diferansiyel termal “DTA” ve termal gravimetri “TG”) 20°C/dk ısıtma hızı ile 1000°C maksimum sıcaklığa çıkılarak gerçekleştirilmiştir. Analizler Shimadzu DTG 60H - DSC 60 model cihazı kullanılarak Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezi Çevre ve Kimya laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

3.2.2. UYPB Karışım Oranlarının Belirlenmesi

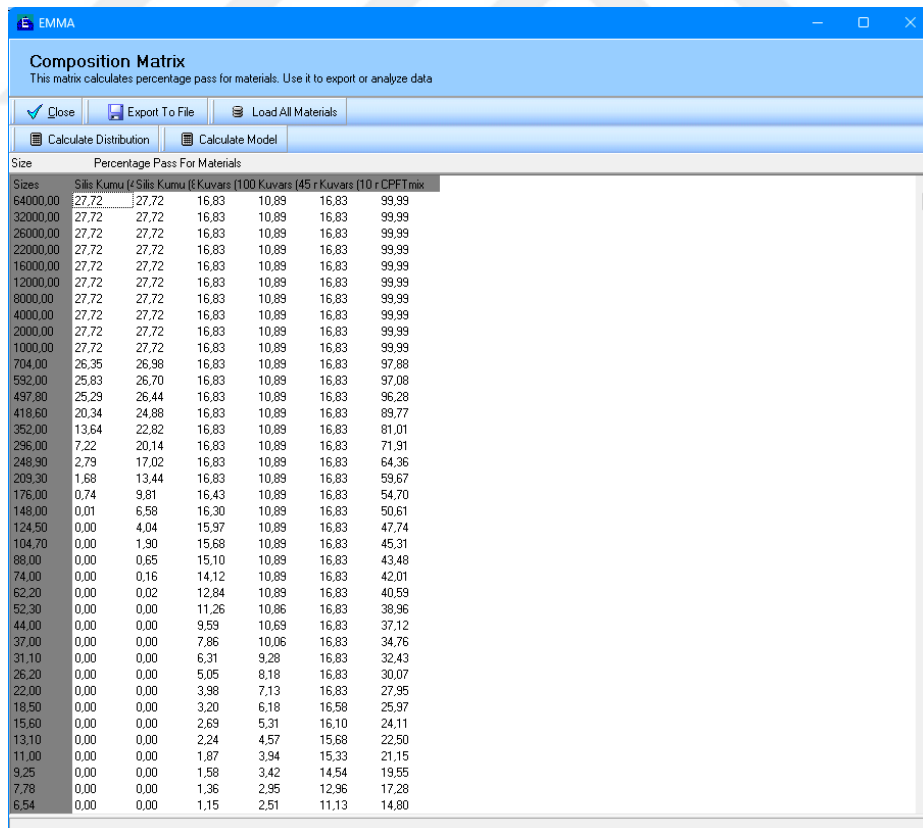
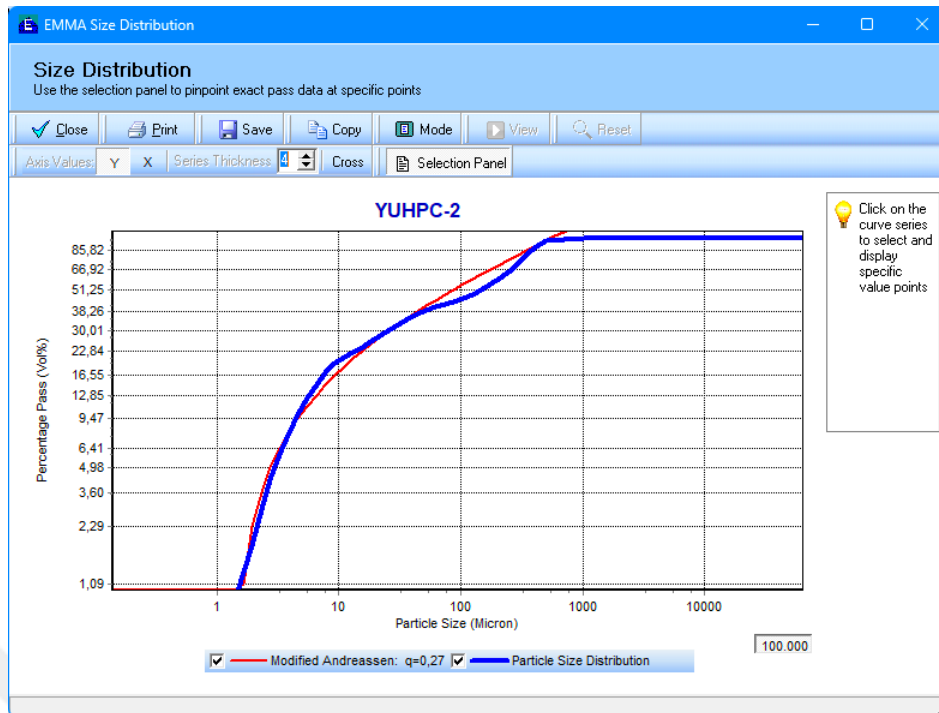
UYPB karışımları için literatürdeki agrega karışım oranları: Fuller, Andersen, Modify Andreasen incelenerek değerlendirmeler yapılmıştır. Karışım oranlarının belirlenmesinde piyasada kullanılan programlardan Emma Mix Analyze (Şekil 3.12, Şekil 3.13, Şekil 3.14, Şekil 3.15) kullanılmıştır. Örnek dökümler yapılarak çalışmada kullanılacak olan beton karışımı için Modified Andreasen parçacık paketleme modeli kullanılmış, bu doğrultuda agrega granülometrisi belirlenmiştir (Şekil 3.16). Agrega granülometrisi başta olmak üzere, çimento miktarını belirleme, silis dumanı oranını, lif miktarını, karışıma eklenmesi planlanan akışkanlaştırıcı türünü belirlemeye yönelik ayrı ayrı karışımlar hesaplanmış bu karışımların işlenebilirlikleri de göz önünde bulundurularak 60 farklı karışım ile betonlar üretilmiştir. Her bir referans karışımın akma çapı, basınç ve eğilme dayanımı değerleri değerlendirilerek kullanılacak olan referans UYPB reçetesi oluşturulmuştur. Ayrıca piyasada kullanılan 8 farklı süper akışkanlaştırıcı kullanılarak en iyi performansı sağlayan akışkanlaştırıcı belirlenmiştir. Tüm karışımlar SP oranı, toplam bağlayıcının %4'ü; SD oranı çimento miktarının %25'i; su/bağlayıcı oranı 0,20 olarak belirlenmiştir. UYPB karışımlarında en uygun kolemanit katkı oranının belirlenmesi için yapılan çimento harç deneyleri; referans UYPB karışımları; süper akışkanlaştırıcı tipleri göz önünde bulundurularak en iyi performansı gösteren karışım reçetesi ile nihai referans UYPB, %0,25;0,50;1,00 oranında kolemanit katkılı UYPB karışımları hazırlanmıştır. Karışım oranlarına yönelik veriler Çizelge 3.11’de verilmiştir.

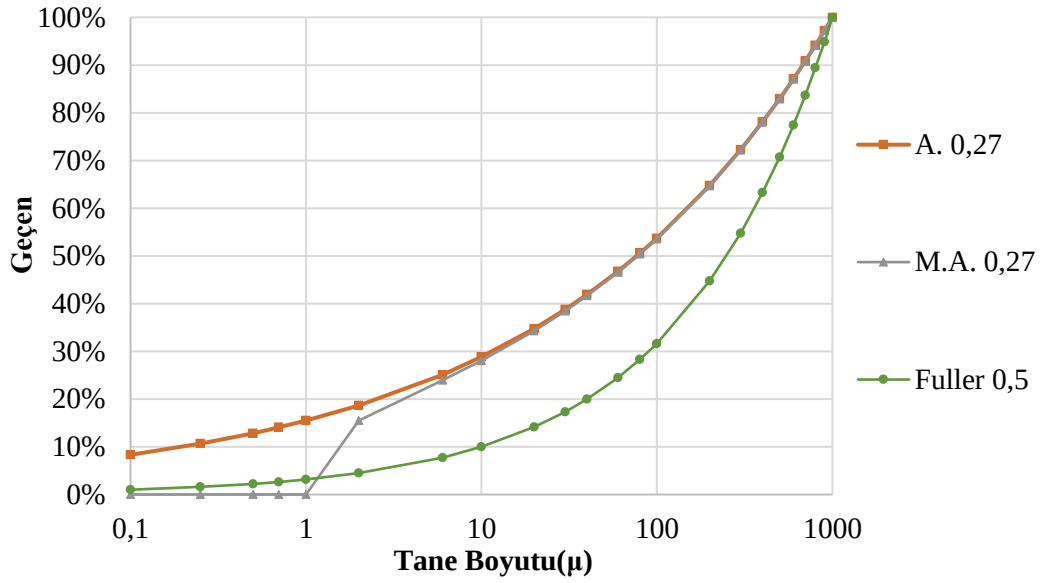


Şekil 3.12. Belirlenen agregaların özelliklerine yönelik veri girişlerinin yapılması.



Şekil 3.13. Belirlenen agregaların tane boyutu veri girişlerinin yapılması.





Şekil 3.16. Parçacık paketleme modelleri granülometri eğrileri.

Çizelge 3.11. UYPB karışım miktarları (1m³ de kullanılan dm³).

Malzemeler	R	K25	K50	K100
Silis Kumu	178,44	178,01	177,38	176,10
Kuvars Kumu (100)	73,00	72,82	72,56	72,04
Kuvars Kumu (45)	73,00	72,82	72,56	72,04
Silis Dumanı	102,27	102,27	102,27	102,27
Çimento	294,12	294,12	294,12	294,12
Kolemanit	0,00	1,16	2,32	4,65
Süper Akışkanlaştırıcı	41,28	41,28	41,28	41,28
Su	225,00	225,00	225,00	225,00
Çelik Fiber	12,50	12,50	12,50	12,50

UYPB üretiminin önemli bir parametresi olan karışım yöntemlerine yönelik de farklı zamanlamalar ile uygulama yapılarak en iyi karışım prosedürü belirlemiştir. Hira Pump marka, 56 litrelik karıştırma kapasiteli ve 70 rpm d/dk çalışma hızına sahip mikser kullanılmıştır. Bağlayıcı, kolemanit ve kum kuru olarak 3 dakika; suyun %70'i kuru karışıma ilave edilerek 2 dakika; suyun %30'u ve süper akışkanlaştırıcı ile karışıma ilave edilerek 1 dakika; daha sonra 3 dakika; çelik lif ilave edilerek 3 dakika karıştırılmış, elde edilen karışım titreşim işlemi yapılmadan kalıplara alınmıştır. Kalıplar cam plakalarla

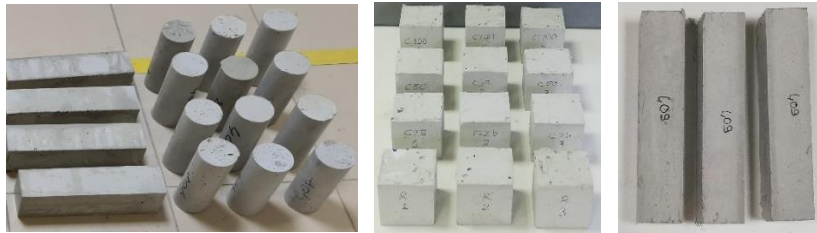
kapatılarak, 24 saat boyunca oda sıcaklığında tutulmuş, test günlerine kadar kürlenme dolabına alınmıştır (Şekil 3.17, Şekil 3.18, Şekil 3.19).



Şekil 3.17. UYPB karıştırma işlemi.



Şekil 3.18. UYPB kalıplara dökülmesi.



Şekil 3.19. UYPB üretilen numuneler.

3.2.3. Taze Beton Deneyleri

3.2.3.1. Taze Beton Yayılma Çapı

Taze beton yayılma çapı tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, ASTM C1611/C1611M-21 [154] standardına göre tespit edilmiştir. UYPB karışımlarının kendiliğinden yayılma özelliğini ölçmek amacıyla, betonun kendi ağırlığı ile yayılma çapı ölçümleri yapılmıştır. 100x100 cm boyutlarında yayılma tablası düz bir zemine yerleştirilerek üzerine üst çap 10 cm, alt çap 20 cm, yükseklik 30 cm boyutlarında kesik koni merkezlenmiş, yaklaşık 6 litre beton karışımı ile doldurularak koni dik olacak şekilde 5 saniye yukarı çekilerek betonun tablaya akması sağlanmıştır (Şekil 3.20). Yayılma tamamlandıktan sonra birbirine dik iki yöndeki çap ölçülerek ortalaması alınarak test sonuçları kaydedilmiştir.



Şekil 3.20. UYPB yayılma çapı ölçümü.

3.2.3.2. Taze Beton Hava İçeriği

Taze beton hava içeriği tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, TS EN 12350-7 [155] standardına göre tespit edilmiştir. Taze beton karışımları hava kalmayacak şekilde, hava ölçer (aerometre) kabına (Şekil 3.21) üç tabaka halinde doldurulmuş, basınç kaçağının olmamasına dikkat edilerek, kapak hava ölçer kabına kelepçelenmiştir. Ana hava vanası kapatılarak, iki su vanası açılmış, diğer vanadan su çıkıncaya kadar cihaza su doldurulmuştur. Kapak iç yüzeyinde bulunan hava kabarcıklarını çıkartmak için tokmak ile hafifçe vurulmuştur. Kapalı hava hücresine bağlı hava tahliye vanası kapatılmış; kapalı hava hücresi içerisine, basınç gösterge ibresi ve başlangıç basınç çizgisine gelinceye kadar hava pompalanmıştır. İki su vanası

kapatılarak, ana hava vanası açılmış, basınç ibresinin gösterdiği değer hava yüzdesi olarak kaydedilmiştir.



Şekil 3.21. Aerometre (hava ölçer) ve UYPB hava içeriği tayini.

3.2.3.3. Taze Beton Yoğunluğu

Taze beton yoğunluğu tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, TS EN 12350-6 [156] standardına göre gerçekleştirilmiştir. Taze beton, hacmi ve kütlesi bilinen rijit ve sızdırmaz bir kap içerisine yerleştirilerek ağırlık ölçülmüştür (Şekil 3.22). Taze beton yoğunluğu, aşağıdaki denklemden (3.2) hesaplanır:

$$D = \frac{M1-M2}{V} \quad (3.2)$$

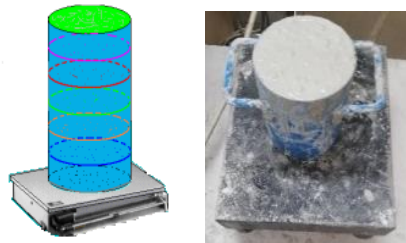
Burada;

D: Taze beton yoğunluğu (kg/m^3),

M1: Kabin Kütlesi (kg),

M2: Kap+Beton numune kütlesi (kg),

V: Kabin Hacmi (m^3)'dir.

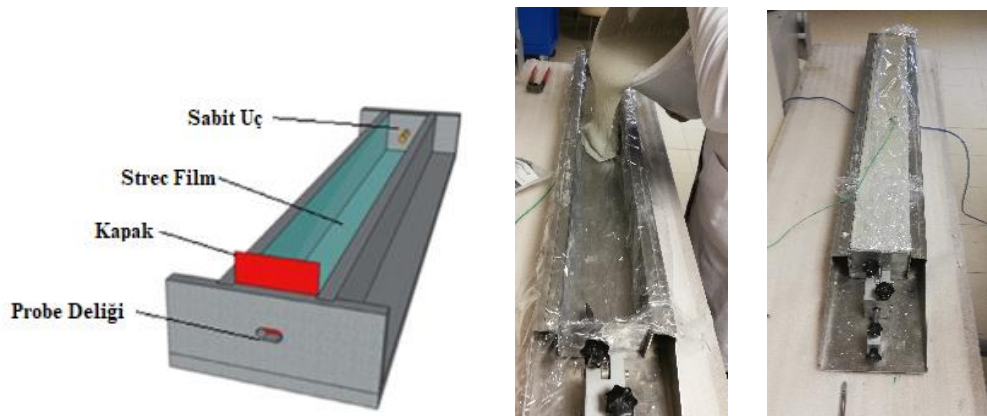


Şekil 3.22. UYPB yoğunluğu tayini.

3.2.3.4. Sıcaklık ve Büzülme İlişkisi

Betonun sertleşmesinden sonra beton hacminin zamanla azalması büzülme olarak tanımlanmaktadır. Bu azalma, betondaki nem ve fiziko-kimyasal değişikliklerden kaynaklanmaktadır. Genleşme ise, sertleşmiş betonda nem kazanımı nedeniyle hacimsel olarak artış durumunu ifade etmektedir. Büzülme uygun şekilde sabit bağıl nem ve sıcaklık koşulları altında boyutsuz bir gerinim (in./in. veya m/m) olarak ifade edilebilmekte, kuruma büzülmesi, otojen büzülme ve karbonatlaşma büzülmesini içermektedir. Kuruma rötresi betondaki nem kaybı, otojen röte çimentonun hidrasyonu, karbontlaşma rötresi çimento hidrasyonu sırasında ortamdaki CO'dan kaynaklanmaktadır [157].

Ultra yüksek performanslı taze beton numunelerinin büzülme ve sıcaklık değerlerinin tespiti, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, Schleibinger Marka ve ASTM C1698 [158] standardına göre yapılmıştır. Erken yaş büzülmesini ölçebilen 25x25x290 mm çelik bir kalıp sistemi (Şekil 3.23) kullanılmıştır. Çelik pimlerle sabitlenen ve hareketli durdurmaya sahip uçlar kullanılarak, serbest uç tarafında çelik bir levha ile sistem kapatılarak sertleşmeden önce probe ile 24 saate kadar sıcaklık, büzülme ve zaman verileri bir bilgisayar tarafından eş zamanlı olarak kaydedilmiştir. Sürtünmeyi en aza indirmek ve otojen gerinim ölçümleri sırasında ortamdaki nem kaybını önlemek için taze beton kalıba yerleştirilirken streç film ile kaplanmıştır.



Şekil 3.23. Büzülme kalıbı, düzeneği.

3.2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

3.2.4.1. Basınç Dayanımı

Basınç dayanımı tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, French Standard / NF P 18-470 [159] standardına göre tespit edilmiştir. 70 mm çap ve 140 mm yüksekliğinde silindir numuneler hazırlanarak, deney günlerine kadar kür kabini içinde bekletilmiş, 2, 7, 28, 56 günlük basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.24). Ayrıca tüm numunelerin kür dolabından çıkarıldıktan sonra ağırlıkları ve boyutları ölçülerek birim ağırlıkları hesaplanmıştır.



Şekil 3.24. UYPB basınç dayanımı tayini sonrası numuneler.

Utest marka ve 300.000 kN kapasiteli, hidrolik beton pres makinasında kırılıncaya kadar, yükleme hızı 0,4 MPa/s–0,8 MPa/s arasında sabit bir yükleme hızı seçilerek yüklenmiş olup ve taşıyabileceği maksimum yük belirlenerek beton basınç dayanımları hesaplanmıştır. Her bir grup için 3 adet numune hazırlanmış olup, basınç dayanımı aritmetik ortalamaları alınarak hesaplama yapılmıştır. Basınç dayanımı aşağıdaki formüle göre hesaplanmıştır. Basınç dayanımı, aşağıdaki denklemden (3.3) hesaplanır:

$$\delta = \frac{P}{A} \quad (3.3)$$

Burada;

δ : Basınç dayanımı (N/mm²),

P: Kırılmadaki en büyük yük (N),

A: Kesit Alan (mm²) (Silindir Numunelerde: πr^2)'dır.

3.2.4.2. Eğilme Dayanımı

Eğilme dayanımı tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, French Standard / NF P 18-470 [159] standardına göre tespit edilmiştir. 70x70x280 mm ebatlarında kiriş numuneler hazırlanmış, deney günlerine kadar kür kabininde bekletilmiş, 2, 7, 28, 56 günlük testleri yapılmıştır (Şekil 3.25).



Şekil 3.25. UYPB eğilme dayanımı tayini.

Utest marka,30.000 kN kapasiteli ve 0,04 MPa/s yükleme hızına sahip cihaz ile prizma numune kırılıncaya kadar yükleme yapılarak, maksimum yük belirlenmiştir. Her bir grup için 3 adet numune hazırlanmış olup, eğilme dayanımı aritmetik ortalamaları alınarak hesaplama yapılmıştır. Dört Noktalı Eğilme dayanımı, aşağıdaki denklemden (3.4) hesaplanır:

$$R_f = \frac{F_f x L}{b x d^2} \quad (3.4)$$

Burada;

R_f : Eğilme dayanımı (N/mm^2),

F_f : Prizmanın kırıldığı anda ortasına uygulanan kuvvet (N),

b : Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)

L : Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)'dir.

3.2.4.3. Schmidt Yüzey Sertliği

Schmidt yüzey sertliği tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, UTEST marka ve N tipi model schmidt cihazı ile ASTM C805 [160] standardına göre tespit edilmiştir. 70 mm çap ve 140 mm yüksekliğinde silindir numuneler hazırlanarak, deney günlerine kadar kür kabininde bekletilmiş, 2, 7, 28, 56 günlük schmidt yüzey sertliği deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.26). Vuruş açısının önemi bakımından test çekici, numune yüzeyine dik bir şekilde yerleştirilerek uygulanmıştır. Her bir grup için 12 test sonunda ortalama değerler elde edilmiştir.



Şekil 3.26. Schmidt çekici uygulaması.

3.2.4.4. Ultrases Geçiş Hızı

Ultrases geçiş hızı (UPV) tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, Fore Marka ve M FR-W-E 200 Emodumeter model cihaz ile ASTM C597 [161] standardına göre tespit edilmiştir. 70 mm çap ve 140 mm yüksekliğinde silindir numuneler hazırlanarak, deney günlerine kadar kür kabininde bekletilmiş, 2, 7, 28, 56 günlük ultrases deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.27). Her bir grup için 3 adet numune hazırlanmış olup, verilerin aritmetik ortalamaları alınarak hesaplama yapılmıştır.



Şekil 3.27. Ultrases geçiş hızı test cihazı ve uygulaması.

3.2.4.5. Darbe Dayanımı

Charpy darbe dayanımı tayinleri, Düzce Üniversitesi Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde, TS EN ISO 179-1 (Tip 3 numunesi) [162] standardına göre tespit edilmiştir. 25x25x125 mm ebatlarında kiriş numuneler hazırlanarak, 56 günlük darbe dayanımı deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.28).



Şekil 3.28. Darbe dayanımı tayini ve numuneleri.

Charpy darbe dayanımı testlerinin gerçekleştirilmesi için 50J'luk kuvvet ile yükleme yapılmıştır. Her bir grup için 3 adet numune hazırlanmış olup, aritmetik ortalamaları alınarak hesaplama yapılmıştır. Charpy darbe dayanımı, aşağıdaki denklemden (3.5) hesaplanır:

$$a_{cU} = \frac{E_c}{hxb} \times 10^3 \quad (3.5)$$

Burada:

a_{cU} : Charpy darbe dayanımı (kJ/m²)

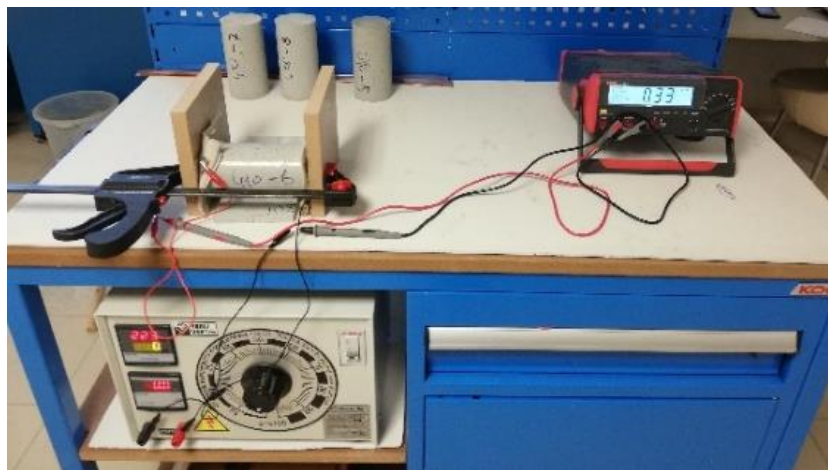
h: Kalınlık (0,025 m),

b: Genişlik (0,025 m),

E_c = Test numunesinin kırılmasıyla emilen düzeltilmiş enerji (J)'dir.

3.2.4.6. Elektriksel İletkenlik

Elektriksel öz direnç tayinleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, UNI-T Marka ve UT-803 model cihaz ile tespit edilmiştir. 70 mm çap ve 140 mm yüksekliğinde silindirik numuneler hazırlanarak, deney günlerine kadar kür kabini içinde bekletilmiş, 2, 7, 28, 56 günlük testleri yapılmıştır (Şekil 3.29).



Şekil 3.29. Elektriksel iletkenlik ölçümü.

Literatürde farklı öz direnç ölçüm yöntemleri önerilmiştir ve iki noktali tek eksenli yöntem ile ölçme yöntemi beton direncini ölçmek için en yaygın yöntemdir [163], [164]. Bu çalışmada iki nokta tek eksenli ölçüm yöntemi ile numunelere iki yüzey arasında ıslak durumda belirli bir potansiyel fark uygulanarak, uygulanan voltaj ile numunelerin iki yüzey arasında gerçekleşen elektriksel akımları ölçülmüştür. Her numunenin öz direnç değeri akım akışı sonucunda Ohm kanunundan elde edilmiştir. 40 volt ile akım ölçülmüştür. Her bir grup için 3 adet numune hazırlanmış olup, aritmetik ortalamaları alınarak hesaplama yapılmıştır. Elektriksel öz direnç, aşağıdaki denklemden (3.6) hesaplanır:

$$\rho = R \times \frac{A}{L} = \frac{V}{I} \times \frac{A}{L} \quad (3.6)$$

Burada;

ρ : Elektriksel öz direnç ($\Omega \cdot \text{cm}$),

R: Elektriksel Direnç (Ω),

V: Numunelere uygulanan voltaj (40 volt),

I: Ölçülen Akım (A),

A: Numunenin enine kesit alanı (cm^2),

L: Numenin Boyu (cm),

σ : Elektriksel iletkenlik; öz direnç ile ters orantılıdır.

3.2.4.7. Karbonatlaşma Derinliği

Karbonatlaşma derinliği tayinleri, Düzce Üniversitesi Yapı Malzemesi ve Beton Laboratuvarında, TS EN 12390-12 [165] standardına göre tespit edilmiştir. 40x40 mm ebatlarında küp numuneler hazırlanarak, 56 günlük Karbonatlaşma deneyleri yapılmıştır. Numuneler 56 gün sonunda kür kabininden alınarak, sulu baş kesme makinesi ile iki eşit parçaya bölünmüştür. Kesilen beton yüzeylere fenolftalein indikatörü püskürtülmüştür. Renklenmenin olmadığı alanlarda, karbonatlaşmanın olduğu; pembe rengi gözlenen alanlar da ise karbonatlaşmanın olmadığı yani betonun alkaline olduğu durumu göz önünde bulundurularak numunelerin renk değişimine bakılmıştır. Her bir grup için yapılan deneylerde, karbonatlaşmanın olmadığı gözlenmiştir.

3.2.4.8. Kapiler Su Emme

Kapiler su emme tayinleri, Düzce Üniversitesi Yapı Malzemesi ve Beton Laboratuvarında, ASTM C1585 [166] standardına göre tespit edilmiştir. 70x70x70 mm ebatlarında küp numuneler hazırlanarak, 56 gün kür sonrasında kapiler su emme deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.30).



Şekil 3.30. Kapiler su emme tayini.

56 gün normal su küründe bekletilen numuneler, kür ortamından çıkarıldıktan sonra 24 saat süreyle 105°C’ de etüvde bekletilerek, etüv kurusu durumuna getirilmiş, kütleleri tartılmıştır. Alttan su transferini sağlamak için zemine şilte serilerek deney düzeneği kurulmuştur. Daha sonra, numuneler suya daldırılarak, numune tabanının sadece 5 mm'si su altında kalması sağlanmıştır. 15, 30, 60, 120, 180, 240, 300, 360, 720, 1440 dakika (toplam 24 saat) zaman aralıkları sonunda numuneler tartılarak, ne kadar su absorbe ettikleri belirlenmiş, kapiler su emme değerleri hesaplanmıştır. Kapiler su emme katsayısı (S), kütle artışı ile zamanın karekökü arasındaki en uygun doğrunun eğimi olarak hesaplanmaktadır. Kapiler su emme, aşağıdaki denklemden (3.7) hesaplanır:

$$S = \frac{I}{\sqrt{t}} = \frac{\frac{m_t}{a/d}}{\sqrt{t}} \quad (3.7)$$

Burada:

S: Kapiler su emme katsayısı (mm/s^{0,5})

I: Emilim (mm)

m_t: Numunenin t (sn)süredeki ağırlık değişimi (gr)

d: Su yoğunluğu (0,001 gr/mm³)

a: Su ile temas eden numunenin yüzey alanı (mm²)'dır.

3.2.4.9. Aşınma Dayanımı

Aşınma dayanımı tayinleri, Düzce Üniversitesi Yapı Malzemesi ve Beton Laboratuvarında, TS 2824 (Bohme) [167] standardına göre tespit edilmiştir. 70x70x70 mm ebatlarında küp numuneler hazırlanarak, 56 günlük aşınma dayanımı deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.31).



Şekil 3.31. Aşınma dayanımı tayini.

Deneylerde, 30 d/dak $\pm$ 1 d/dak hızla dönme sağlayan, yaklaşık 750 mm çapında yatay olarak yerleştirilmiş döner bir aşındırma diski bulunan cihaz kullanılarak, kenar uzunlukları 70 mm olan küp numunelerde uygulama yapılmıştır. 20 gr $\pm$ 0,5 gr aşındırıcı kum sürtünme şeridi üzerine serpilerek, çelik manivela aracılığı ile 294 $\pm$ 3 N ile yüklenmiş, 22 devir sonunda otomatik olarak duran disk üzerinden aşındırıcı kum ve numune atıkları temizlenmiştir. Her numune için 22 devirden meydana gelen deney, numuneye 16 defa uygulanmış, deney numunesi iyice temizlendikten sonra numune boyutları 0.01 mm hassasiyetle olan kumpas ile ölçülmüş ve hassas terazide tartılmıştır. Her bir grup için 3 adet numune hazırlanmış olup, aritmetik ortalamaları alınarak hesaplama yapılmıştır. Toplam hacim kaybı, aşağıdaki denklemden (3.8) eşitlikten hesaplanır:

$$\Delta v = \frac{\Delta m}{d} \quad (3.8)$$

Burada:

Δv : 16 çevirim sonrası toplam hacim kaybı (mm³)

Δm : 16 çevirim sonrası toplam kütle kaybı (gr)

d: Numune yoğunluğu (gr/mm³)

TA: Aşındırma uygulanan numunenin taban alanı (70x70 mm²)'dir.

TS 2824 EN 1338/AC [167] standardı, zemin döşemesi için kullanılan, donatısız, çimento bağlayıcılı beton kaplama bloklarının malzemelerini, özelliklerini, sahip olması gerekli şartları kapsamaktadır. Bu standart kaldırım, bağlantı yolu, bisiklet yolu, otoparklar, yollar, oto yollar, endüstriyel alanlar (limanlar ve iskeleler), havaalanı kaplamaları, otobüs istasyonları, petrol dolum istasyonları gibi yaya kullanım alanları; taşıtlara açık alanlar ve çatı kaplamasında kullanılan ön dökümlü beton kaplama bloklarına ve tamamlayıcı parçalarına uygulanmaktadır. Standarda göre elde edilen hacim kaybı/tabana alan değerinin, 20.000 mm³/5000 mm² den küçük olması gerekmektedir. Hacim kaybı hesaplamaları sonrasında, numunenin taban alanı (TA: 70x70 mm²) baz alınarak TS 2824 EN 1338/AC'ye göre uygunluk değerlendirmeleri yapılmıştır.

3.2.4.10. Donma-Çözülme Direnci

Donma-çözülme çevirimleri, Fibrobeton Yapı Elemanları San. İnş. Tic. A.Ş. Ar-Ge Laboratuvarında, Elektron marka ve tam otomatik donma çözülme BTC-23 model cihaz ile TS EN 12467+A2 [168] standardına göre tespit edilmiştir. 70 mm çap ve 140 mm yüksekliğinde silindir numuneler hazırlanarak, 56 gün kür kabinde bekletilmiş, 100 çevirim sayısı ile donma çözülme işlemleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.32).



Şekil 3.32. Donma çözülme direnci tayini.

Numuneler, 1-2 saat içerisinde sıcaklığı $-20 \pm 4^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşabilen dondurucuda soğutulurak bu sıcaklıkta 1 saat süre ile tutulmuştur. Daha sonra numuneler, 1-2 saat içerisinde sıcaklığı $+20 \pm 4^{\circ}\text{C}$ 'ye ulaşabilen su banyosuna daldırılarak bu sıcaklıkta 1 saat daha tutulmuştur. 100 çevirim sonrasında ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. 56 gün kür sonrası numunelerin deney sonuçları ile donma çözülme çevirimlerine tabi tutulan numunelerin deney sonuçları karşılaştırılarak değerlendirilme yapılmıştır.

3.2.4.11. Sülfat Direnci

Sülfat direnci tayinleri, Düzce Üniversitesi Yapı Malzemesi ve Beton Laboratuvarında TS EN 12370 [169] standardına göre tespit edilmiştir. 70x70x70 mm ebatlarında küp numuneler hazırlanarak, 56 günlük kür sonrasında sülfat deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Sülfat direnci tayini.

Numuneler, etüvde $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de sabit kütleye gelinceye kadar 24 saat kurutulmuş, etüvden alınarak oda sıcaklığında soğuması beklenmiş, daha sonra 0,01 g hassasiyetinde tartı ile tartılmıştır (Mk1). Saf su ile %25 oranında sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisi hazırlanarak, 50°C ye getirilerek sabitlenmiş, numuneler çözelti içerisine alınarak 24 saat bekletilmiştir. 24 saatin sonunda numuneler çözeltiden çıkartılarak etüvde $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra numuneler etüvden alınarak, oda sıcaklığında soğuyana kadar bekletilmiş, dış yüzeyleri tel fırça ile temizlenerek 0,01 g'a göre kütleleri tartılmıştır (Mk2). Birinci dönünün tamamlanmasını ardından, numuneler ikinci döngü için tekrar sodyum sülfat çözeltisine alınmıştır. Toplam 5 döngü yapılarak tüm döngülerde aynı işlemler uygulanmıştır. Her bir grup için 3 adet numune hazırlanmış olup, aritmetik ortalamaları alınarak hesaplama yapılmıştır. Toplam kütle değişimi, aşağıdaki denklemden (3.9) hesaplanır:

$$\Delta m = \frac{M_{k1} - M_{k2}}{M_{k1}} \times 100 \quad (3.9)$$

Burada:

Δm : Deney öncesi ve sonrası kütle kaybı veya artışı (%)

M_{k1} : Kuru numunenin ilk kütlesi (g)

M_{k2} : İşlemden sonra kuru numunenin kütlesi(g)'dir.



4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Ultra Yüksek Performanslı Beton (UYPB) karışımlarında kullanılacak olan en uygun kolemanit katkı oranının belirlenmesi için %0; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00 oranlarında kolemanit ikamesi ile çimento deneyleri ön çalışma olarak gerçekleştirilmiştir. Çimento deneyleri sonuçlarına göre UYPB karışımlarında kolemanit katkı oranları %0,25; 0,50; 1,00 olarak belirlenerek, referans ve kolemanitli UYPB numuneleri hazırlanmıştır. UYPB numunelerinin taze ve sertleşmiş beton fazında testleri yapılarak, beton performansına yönelik durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca referans ve aynı kolemanit katkı oranlarında (%0,25; 0,50; 1,00) çimento hamurları hazırlanarak hidrasyon gelişimleri incelenmiştir. Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirilerek aşağıda sunulmuştur.

4.1. ÇİMENTO NUMUNELERİ ANALİZ VE DENEYLER

4.1.1. Su İhtiyacı, Priz Süreleri ve Genleşme Değerleri

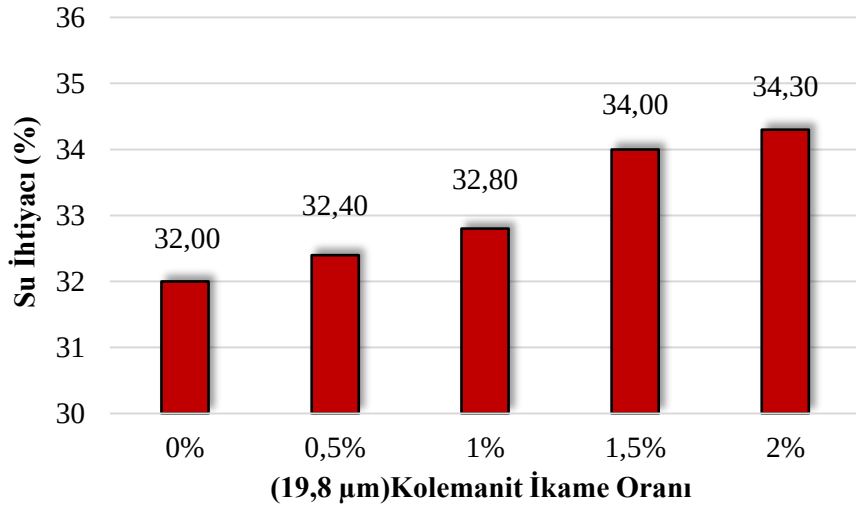
Farklı incelik ve kolemanit ikame oranlarına sahip çimento numuneleri üzerinde TS EN 196-3 [150]'e göre belirlenen su ihtiyacı, priz süreleri ve hacim genleşmesi deneylerine ait bulgular Çizelge 4.1, Çizelge 4.2, Şekil 4.1, Şekil 4.2, Şekil 4.3, Şekil 4.4, Şekil 4.5, Şekil 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.1. (19,8 µm)Kolemanit su ihtiyacı, priz başlangıç ve priz bitişi, hacim genleşmesi sonuçları.

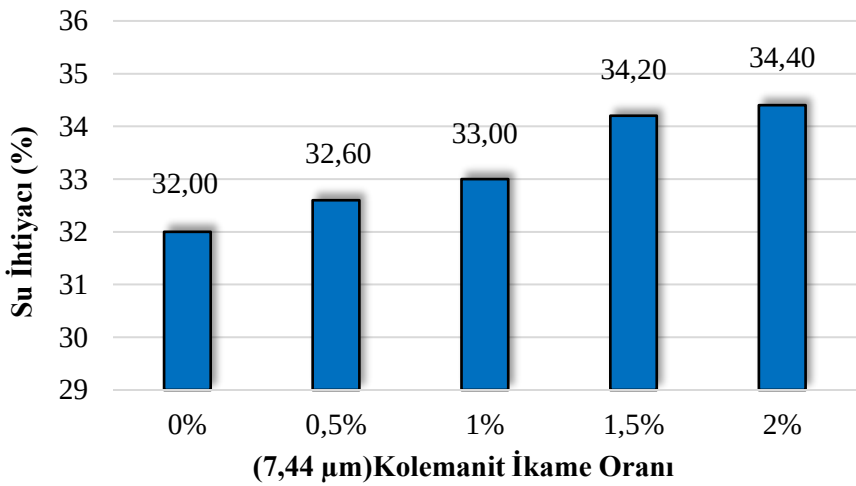
Kolemanit İlave Oranı	Priz Baş. Süresi (dakika)	Priz Bitiş Süresi (dakika)	Standart Kıvam için Gereken Su (%)	Hacim Genleşmesi Tayini (mm)
%0	100	130	32,00	1,00
%0,5	105	135	32,40	0,96
%1	115	145	32,80	0,92
%1,5	125	155	34,00	0,85
%2	135	165	34,30	0,80

Çizelge 4.2. (7,44 μm)Kolemanit su ihtiyacı, priz başlangıç ve priz bitişi, hacim genleşmesi sonuçları.

Kolemanit İlave Oranı	Priz Baş. Süresi (dakika)	Priz Bitiş Süresi (dakika)	Standart Kıvam için Gereken Su (%)	Hacim Genleşmesi Tayini (mm)
%0	100	130	32,00	1,00
%0,5	110	140	32,60	0,87
%1	130	160	33,00	0,78
%1,5	150	180	34,20	0,64
%2	170	190	34,40	0,52

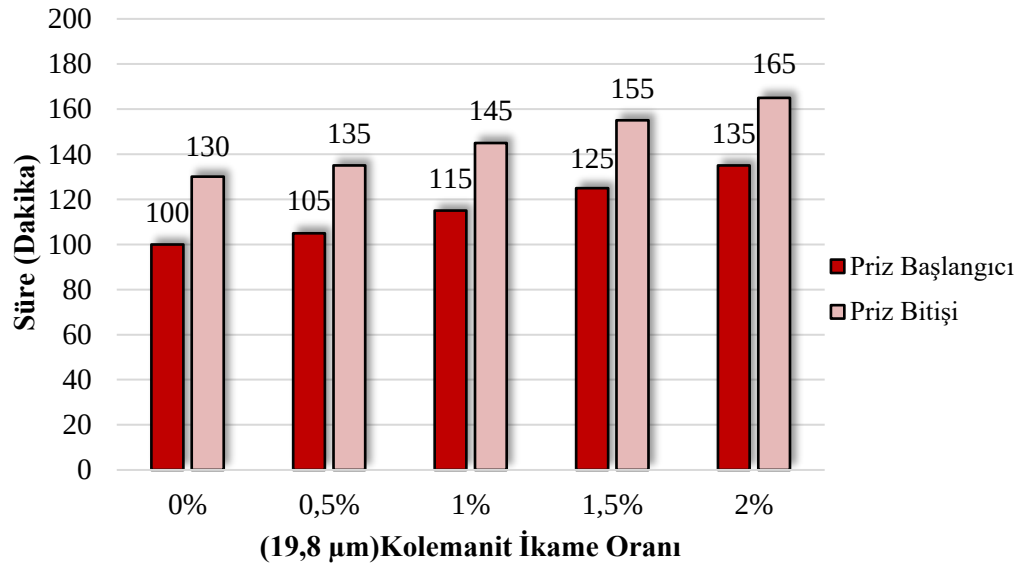


Şekil 4.1. Referans ve (19,8 μm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı.

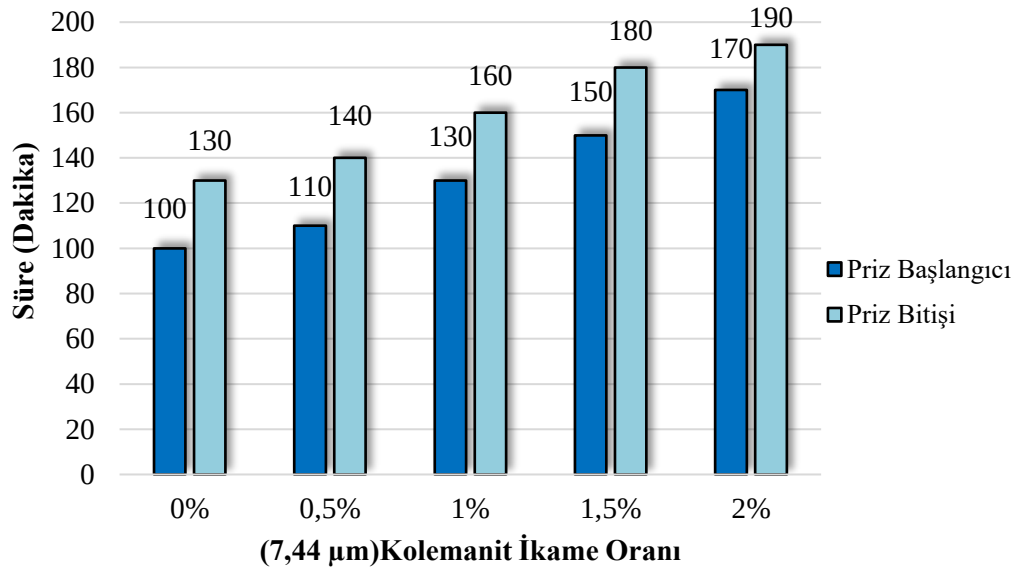


Şekil 4.2. Referans ve (7,44 μm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı.

%0 (Referans) ve 0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında (19,8 μm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı, referans numuneye göre sırasıyla %1,25; 2,5; 6,25; 7,19 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.1). %0; 0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında (7,44 μm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin su ihtiyacı, referans numuneye göre sırasıyla %1,88; 3,13; 6,88; 7,5 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.2). (19,8 ve 7,44 μm)Kolemanit ile hazırlanan tüm çimento numunelerinde, referans numuneye göre ikame oranı arttıkça su ihtiyacının arttığı ancak çok yüksek düzeyde olmadığı gözlenmiştir. Bu durumun da kolemanitin yüksek özgül yüzey alanından kaynaklandığı düşünülmektedir. Kolemanit ortalama tane çapının azalmasına bağlı olarak 7,44 μm -Kolemanit ikameli numunelerde daha fazla su ihtiyacının olduğu tespit edilmiştir. Çimentoya eklenen kolemanit oranı arttıkça işlenebilirlik, buna bağlı olarak da özdeş kıvamın elde edilebilmesi için gereken su miktarında artış olduğu görülmektedir (Şekil 4.1, Şekil 4.2).



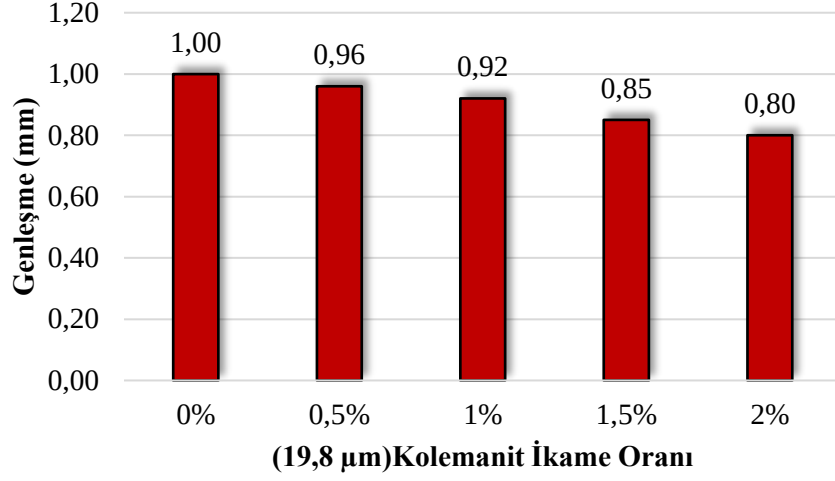
Şekil 4.3. Referans ve (19,8 μm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin priz süreleri.



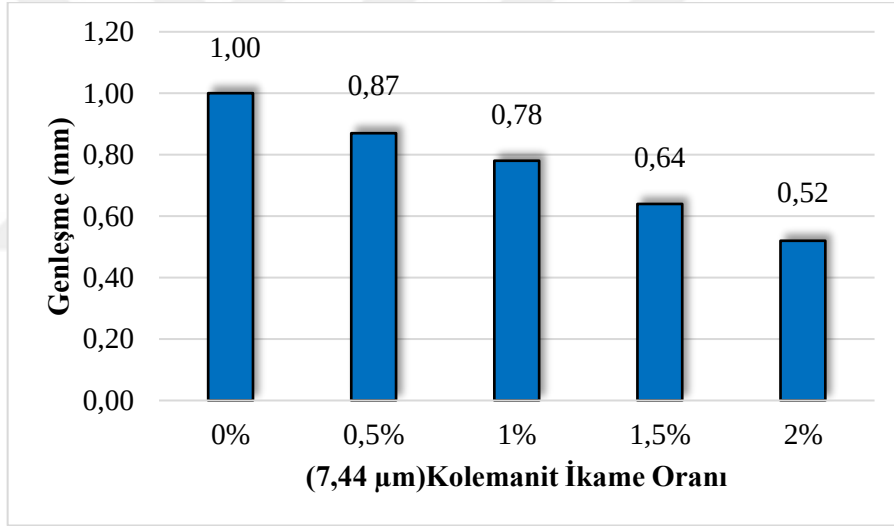
Şekil 4.4. Referans ve (7,44 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin priz süreleri.

%0; 0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında (19,8 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin priz başlangıç süreleri, referans çimentoya göre sırasıyla %5; 15; 25; 35 oranlarında, priz bitiş süreleri %3,85; 11,54; 19,23; 26,92 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.3). %0; 0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında (7,44 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin priz başlangıç süreleri, referans çimentoya göre sırasıyla %10; 30; 50; 70 oranlarında, priz bitiş süreleri %7,69; 23,08; 38,46; 46,15 oranlarında artış göstermiştir (Şekil 4.4).

Genel olarak tüm kolemanit ikameli çimento numunelerinde, referans numuneye göre priz başlama ve bitiş sürelerinin kolemanit ikame oranı arttıkça arttığı, kolemanit ortalama tane çapının azalmasına bağlı olarak 7,44 µm-Kolemanit ikameli numunelerde priz başlangıç ve bitiş sürelerinin daha fazla olduğu dolayısıyla kolemanitin priz geciktirici etkisinin olduğu görülmektedir (Şekil 4.3, Şekil 4.4).



Şekil 4.5. Referans ve (19,8 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin hacim genleşmesi.



Şekil 4.6. Referans ve (7,44 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin hacim genleşmesi.

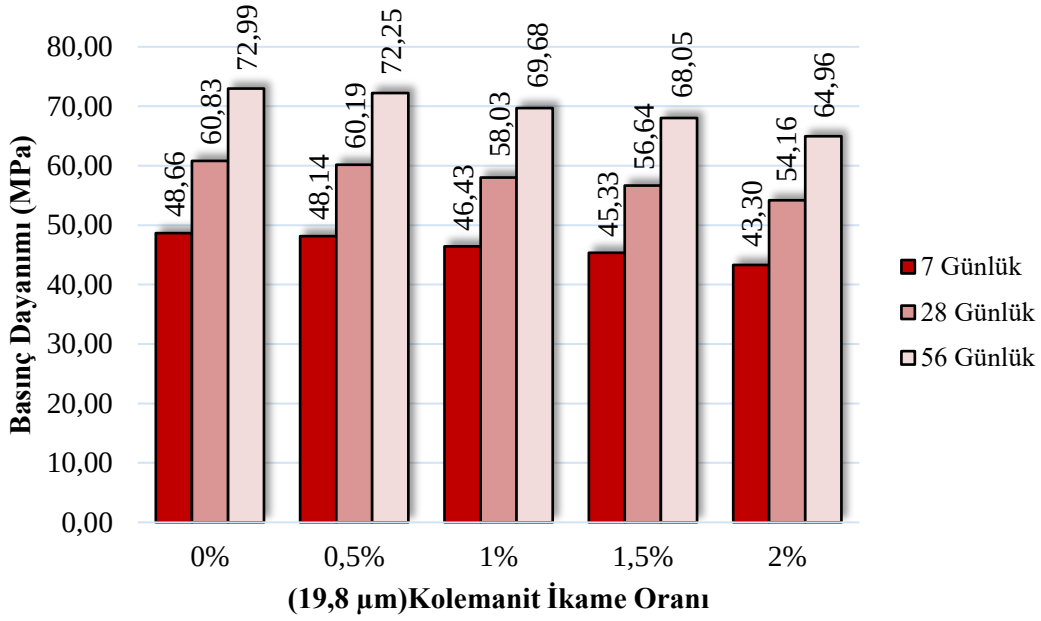
%0; 0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında (19,8 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin hacim genleşmesi değerleri, referans çimentoya göre sırasıyla %4; 8; 15; 20 oranlarında azalma göstermiştir (Şekil 4.5). %0; 0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında (7,44 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin hacim genleşmesi değerleri, referans çimentoya göre sırasıyla %13; 22; 36; 48 oranlarında azalma göstermiştir (Şekil 4.6).

Tüm kolemanit ikameli çimento numunelerinde, referans numuneye göre hacim genleşme değerlerinin kolemanit ikame oranı arttıkça azaldığı, kolemanit ortalama tane çapının azalmasına bağlı olarak 7,44 μm -Kolemanit ikameli numunelerde hacim genleşme değerlerinin daha az olduğu, bağlanmamış (serbest) $\text{Ca}(\text{OH})_2$ veya $\text{Mg}(\text{OH})_2$ hidratasyonu sebebiyle oluşabilecek genleşme değerlerinin TS EN 197-1 [149]'e göre sınır değerin altında olduğu ($\text{genleşme} \leq 10\text{mm}$) görülmektedir (Şekil 4.5, Şekil 4.6).

Elde edilen sonuçlara göre kolemanit ikame oranlarının artmasına bağlı olarak priz sürelerinin artması kolemanitin bünyesindeki B_2O_3 ile ilişkilidir ve bor bileşiklerinin çimento hidratasyonu üzerinde önemli etkileri vardır. B_2O_3 konsantrasyonunun artışı, çimento hidratasyonunu yavaşlatarak priz süresini geciktirebilir ve çimento matrisinin mukavemetini zayıflatabilir. $\text{B}(\text{OH})_3$ gibi çözünür boratların, beton veya çimentolu kompozitin sertleşmesini geciktirmektedir [135], [170]. Su ihtiyacı, priz sürleri ve genleşme tayini ile elde edilen sonuçlar, daha önce yapılan çalışmalarla benzer sonuçlar göstermiştir. Bensted [171] ve Apagyi [172], borun sistemde bulunmasının portlandit çözünürlüğünü artırdığı ve çimento tanelerinin etrafında su ile temasını engelleyen koruyucu bir tabaka oluşmasına neden olduğunu ifade etmiştir. Csetenyi ve Glasser [139] tarafından, boratın sülfatların yerini alacak şekilde etrenjit mineraline katılarak ne ölçüde çözünmez hale getirilebileceğini araştırdıkları çalışmada, etrenjitin çimentolu sistemlerde borat tuzağı işlevi görebileceği, Taylor [138] tarafından yapılan çalışmalarda boratların muhtemel bir çökeltme mekanizmasından kaynaklanan çimento hidratasyonunu geciktirici bileşik olduğu açıklanmıştır. Davraz [135] tarafından bor bileşikleri kullanılarak yapılan çalışmada B_2O_3 /çimento içeriğinin artmasıyla priz başlangıç ve bitiş sürelerinin arttığı, Erdoğan vd. [130] tarafından %3,5 kolemanit atığı ve %16 oranında uçucu kül kullanımı ile yapılan çalışmada kontrol örneğine göre priz başlangıç süresinin %210 oranında, priz tamamlanma süresinin %257 oranında arttığı, Pehlivanoğlu vd. [131] tarafından yapılan çalışmada B_2O_3 konsantrasyonu arttıkça, çimento hidratasyonunun yavaşladığı ve hatta durduğu, buna bağlı olarak priz süresinin de uzadığı belirtilmiştir. Gezmen vd. [127] tarafından %10 çimento ile ikame edilen uçucu kül kullanımı ile yapılan çalışmada kolemanit oranının artmasıyla priz sürelerinin uzadığı, %10 uçucu kül ve %10 kolemanit içeriği ile en yüksek kolemanit oranına sahip örneğin kontrol örneğine kıyasla priz başlangıç süresinin 2 saat 30 dakika ve priz tamamlanma süresinin ise 7 saat uzadığı, Le Chatelier hacim genleşmesi değerlerinin standardın (TS EN 196-3) öngördüğü limitlerde içinde kaldığı ifade edilmiştir.

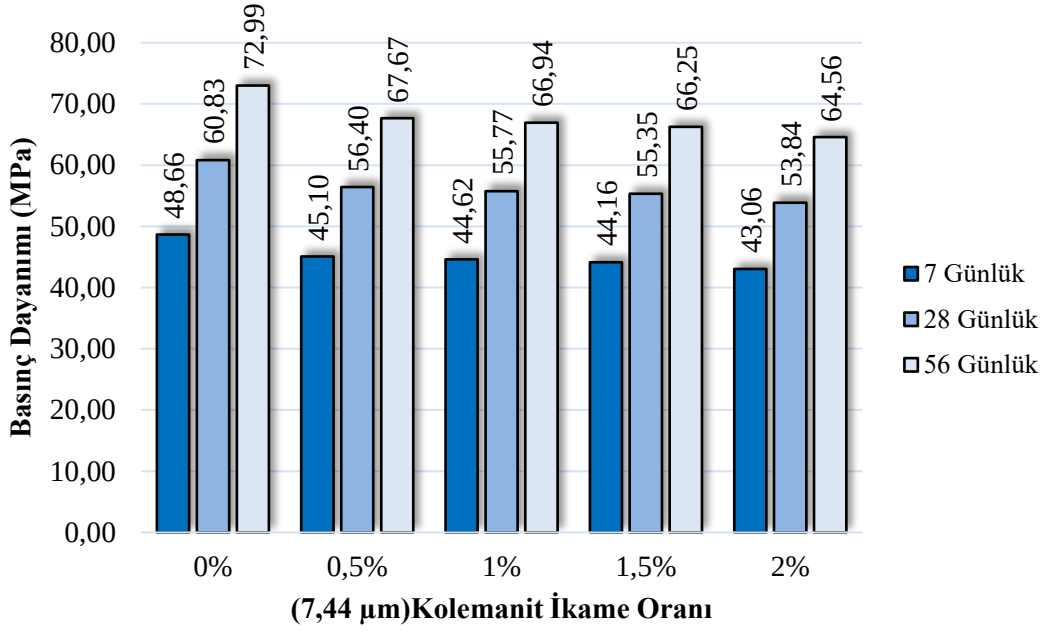
4.1.2. Kolemanit İkame Oranının Basınç Dayanımına Etkisi

Farklı incelik ve kolemanit ikame oranlarına sahip çimento harçlarının ASTM C109 [152]'a göre belirlenen 7; 28; 56 günlük basınç dayanımları Şekil 4.7, Şekil 4.8'de verilmiştir.



Şekil 4.7. Referans ve (19,8 µm)Kolemanit ikameli harçların 7, 28, 56 günlük basınç dayanımları.

%0; 0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında (19,8 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin basınç dayanımları referans çimentoya göre sırasıyla 7 günlük:%1,07; 4,58; 6,84; 11,02, 28 günlük: %1,04; 4,6; 6,88; 10,96, 56 günlük: %1,01; 4,53; 6,77; 11,00 oranlarında azalma göstermiştir. 7-28-56 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde 7 günlük: referans numunenin 48,66 MPa ile en yüksek, (19,8 µm)Kolemanit ikameli numunenin 43,30 MPa ile en düşük; 28 günlük: referans numunenin 60,83 MPa ile en yüksek, (19,8 µm)Kolemanit ikameli numunenin 54,16 MPa ile en düşük; 56 günlük: referans numunenin 72,99 MPa ile en yüksek; (19,8 µm)Kolemanit ikameli numunenin 64,96 MPa ile en düşük değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.7).



Şekil 4.8. Referans ve (7,44 µm) Kolemanit ikameli harçların 7, 28, 56 günlük basınç dayanımları.

%0; 0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında (7,44 µm)Kolemanit ikameli çimento numunelerinin basınç dayanımları referans çimentoya göre sırasıyla 7 günlük: %7,32; 8,3; 9,25; 11,52, 28 günlük: %7,27; 8,31; 9; 11,48 oranlarında azalma; 56 günlük: %7,29; 8,29; 8,23; 11,55 oranlarında azalma göstermiştir. 7, 28, 56 günlük basınç dayanımı değerleri incelendiğinde 7 günlük: referans numunenin 48,66 MPa ile en yüksek, (7,44 µm)Kolemanit ikameli numunenin 43,06 MPa ile en düşük; 28 günlük: referans numunenin 60,83 MPa ile en yüksek; (7,44 µm)Kolemanit ikameli numunenin 53,84 MPa ile en düşük; 56 günlük: referans numunenin 72,99 MPa ile en yüksek; (7,44 µm) Kolemanit ikameli numunenin 64,56 MPa ile en düşük değerlere sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.8).

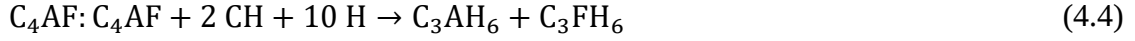
Tüm kolemanit ikameli çimento numunelerinde referans numuneye göre basınç dayanımlarının kolemanit ikame oranı arttıkça azaldığı, kolemanit ortalama tane çapının azalmasına bağlı olarak 7,44 µm-Kolemanit ikameli numunelerde basınç dayanımı değerlerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca kolemanit katkılı çimento numunelerinin TS EN 197-1 [149] standardına göre 28 günlük basınç dayanımlarının istenen minimum değerinin üstünde olduğu (≥ 52.5 MPa) görülmektedir (Şekil 4.7, Şekil 4.8).

Basınç dayanımı tayini ile elde edilen sonuçlar, daha önce yapılan çalışmalarla benzer sonuçlar göstermiştir. Gezmen vd. [127] tarafından yapılan çalışmada 7, 28, 56, 90 günlük çimento harçları basınç ve eğilme dayanımları sonuçlarına göre, %2 ve %4 oranlarında kolemanitin çimento ile ikamesinin kullanılabileceği önerilmiştir. Mutuk vd. [128], bor atığı ve pirinç kabuğu külü ile yaptıkları çalışmada, bor atığı artışı ile basınç dayanımlarında düşüş ve sonuçların Türk Standartları içerisinde yer aldığını tespit ederek, %5'e kadar bor atığı kullanımının beton endüstrisi için uygun olduğunu öngörmüşlerdir. Davraz [135]'ın çalışmasında B_2O_3 konsantrasyonunun azaldıkça, mukavemet kaybının orantılı olarak iyileştiği, ancak B_2O_3 'ün çimentolu kompozitlere sağladığı bazı faydaların (yangına dayanıklılık, nötron kalkanı, antibakteriyel ortam vb. gibi) zamanla azalabileceği ifade edilmiştir.

%0; 0,5; 1; 1,5; 2 oranlarında kullanılan kolemanit katkısının ikame miktarının artırılması ile çimento fiziksel özelliklerinde iyileşmelerin olduğu, priz sürelerinin arttığı, hacim genleşmesi değerlerinin azaldığı, basınç dayanımı değerlerinin düştüğü ancak bu düşüşlerin yaklaşık %12'nin altında olduğu ve Türk Standartları içerisinde yer aldığı, buna bağlı olarak da çimento katkı malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.

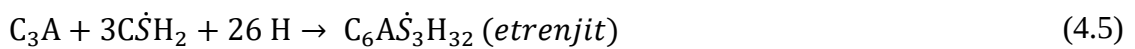
4.1.3. Hidratasyon Gelişimi

Hidratasyon, çimento ile su arasındaki bir dizi geri dönüşü olmayan kimyasal reaksiyon olup, çimento ve suyun ilk biraraya gelmesi ile başlayan, reaksiyon ürünleri oluşumunun yavaşladığı ve sabitlendiği aşamaya kadar devam eden süreci ifade etmektedir. Çimento ile suyun teması ile başlayan hidratasyon sırasında çimento parçacıkları yavaş yavaş çözülerek, ortamdaki bileşenler ile reaksiyona girmekte; bu reaksiyonlar sonucu ısı üretilmekte; reaksiyon ürünleri ortaya çıkmaktadır. Kimyasal reaksiyonlar, ortamda su ve reaksiyona girmemiş çimento parçacıkları bulunduğu sürece devam etmekte, bu durum da betonun dayanım ve dayanıklılık parametrelerinin sürekli gelişmesini sağlamaktadır. Portland çimentosunun klinker yapısını oluşturan ana bileşenlerin; dikalsiyum silikat ($C_2S: 2CaO.SiO_2$), trikalsiyum silikat ($C_3S: 3CaO.SiO_2$), trikalsiyum alüminat ($C_3A: 3CaO.Al_2O_3$) ve tetrakalsiyum alüminoferrit ($C_4AF: 4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$), su ile girdikleri tepkimeler tipik reaksiyon denklemleriyle (4.1), (4.2), (4.3), (4.4) ifade edilmektedir.



Denklemlerdeki tipik gösterimler ortamdaki su içeriğine bağlı olarak değişebilmektedir. Kalsiyum silikatlar (C_3S ve C_2S), su ile reaksiyonları sonucu C-S-H ve CH ürünlerini oluşturmaktadır. Ancak C-S-H (kalsiyum silika hidrat) miktarları aynı olsa da CH miktarları farklılık göstermektedir. Bunun yanı sıra, daha az reaktif bileşene sahip olmasından dolayı C_2S 'nin reaksiyon hızı, C_3S 'ye göre daha yavaş olmaktadır. Zayıf kristalli, kolloidal, lif şekilli yapısı ile ana hidrasyon ürünü olan C-S-H jelinin oluşmasıyla, çimento hamuru bağlayıcılık özelliğini kazanmaktadır. Hidrasyon süresince artan C-S-H miktarı, çimento hamurunun dayanımını artırmaktadır. Karışık kompozisyonlu kristalize yapısı ile diğer hidrasyon ürünü olan CH (kalsiyum hidroksit) ise suda kolayca çözünbilmekte olup, artan miktarı çimento hamurunun dayanımını azaltmaktadır [173].

CH ürünleri, ortamdaki sülfat iyonu ile kimyasal reaksiyona girerek $C\dot{S}H_2$ 'yi oluşturmaktadır. Ortamdaki $C\dot{S}H_2$ ile klinker ana bileşenlerinden C_3A reaksiyonu ile de etrenjit ürünü ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla etrenjitin bünyesindeki 32 mol su molekülünden kaynaklı olarak, çimento hamurunun içinde çok büyük genleşmeler meydana gelmektedir. Buna bağlı olarak reaksiyon hızına paralel olarak artan hidrasyon ısısından dolayı çimento üretiminde klinkere bir miktar alçıtaşı ($C\dot{S}H_2$) katılarak reaksiyon hızı azaltılmaktadır. Yüksek miktarlarda sülfatın bulunduğu ortamlarda C_3A 'nın temel reaksiyonu Denklem (4.5)'te olduğu gibi gerçekleşmektedir. C_3A hidrasyonu tamamlanmadan ortamdaki sülfatların tüketilmesi durumunda ise, Denklem (4.6)'daki gibi, etrenjit daha az sülfat içeren kalsiyum-alumino-monosülfohidrate dönüşmektedir [45], [173].



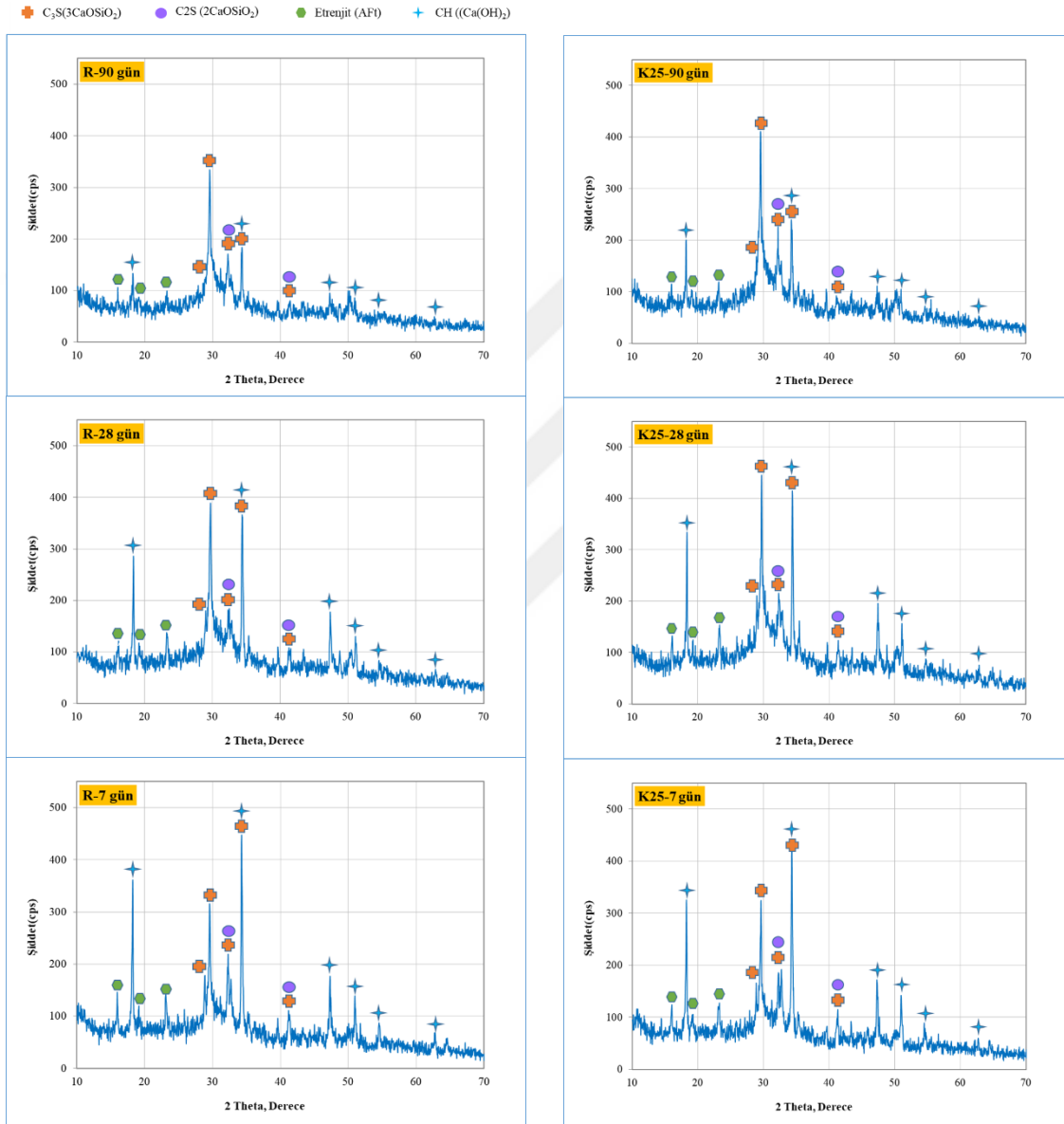
C₄AF ana bileşeninin hidratasyonu, C₃A'nın hidratasyon reaksiyonuna benzer şekilde gerçekleşmektedir. Ancak C₄AF'nin hidratasyon hızı ve hidratasyon ısısı, C₃A'ya göre daha yavaş ve daha az olmaktadır. C₃A oranı düşük ve C₄AF oranı yüksek olan çimento ile üretilen betonların, sülfat etkisine oldukça dayanıklı olduğu tespit edilmiştir. Ancak sebebi kesin olarak bilinmemektedir. Bu durum literatürde, demir iyonu içeren kalsiyum-alumino-monosülfat ürünlerinin, sülfatlı ortamlarda etrenjite dönüşmemesi şeklinde yorumlanmaktadır [45].

Tek başına bağlayıcılık özelliği olmayan, ancak ikame ve ilave yoluyla beton karışımlarına eklenmesi ile beton performansını iyileştiren puzolanlar, ekonomik ve çevrenin korunması açısından beton üretiminde günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufu gibi endüstriyel atık kökenli mineral katkılar en çok tercih edilen puzolanlar arasında yer almaktadır [51]. Puzolanların ana bileşeni olan amorf veya camsı silika (S), kalsiyum silikatların hidratasyonundan oluşan kalsiyum hidroksit (CH) ile tepkimeye girerek ortamdaki C-S-H oluşumunu artırmaktadır. Çimento hidratasyon ürünleri ile etkileşimi başlayan puzolanik reaksiyon ile beton kapiler boşlukları doldurulmakta, hidratasyon hızı ve ısısı azaltılmaktadır. Buna bağlı olarak erken ısı gelişimi ve erken dayanım azalmakta, ancak ilerleyen yaşlarda artmaktadır. Dolayısıyla puzolanlar, betondaki boşlukların azaltılması, dayanım artışı, durabilitenin iyileştirilmesini sağlamaktadır [45]. Bunun yanı sıra puzolanlar yapılarına göre ve beton karışım içeriklerine göre farklı etkiler gösterebilmektedir. Örneğin karışımlara ilave/ikame edilen silis dumanı, çimento hidratasyon ısısı ve hızında artış oluştururken; yüksek fırın cürufunun kullanıldığı durumda tersi bir durum meydana gelebilmektedir [174].

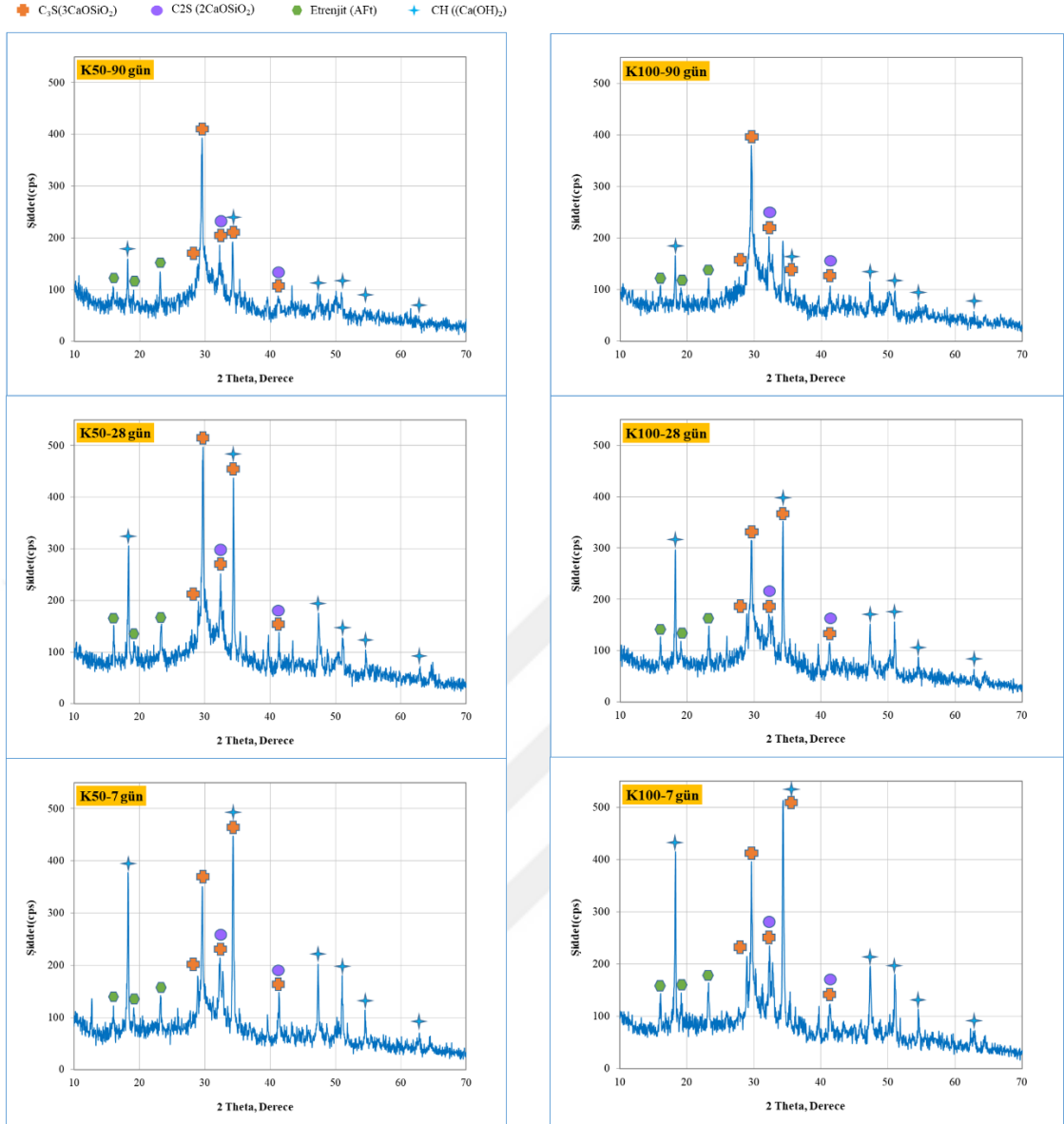
Beton karışımlarında tercihe göre kullanılan priz hızlandırıcı, priz geciktirici, süperakışkanlaştırıcılar vb. gibi kimyasal katkılar, çimentonun hidratasyon davranışını etkilemektedir. Örneğin kullanılan priz geciktirici erken yaşlarda hidratasyonu yavaşlatmakta, hidratasyon ısısını azaltmaktadır. Ancak kimyasal katkılarının etkisinin uzun vadede değerlendirilmesi ile genellikle ısı gelişimini çok fazla değiştirmedikleri bilinmektedir [175].

4.1.3.1. XRD ile Hidratasyon Gelişimi

7,28 ve 90 günlük hidratasyona tabi tutulmuş referans ve kolemanit katkılı çimento hamurlarının (R, K25, K50, K100), XRD kırınım diyagramlarının ayrıntıları Şekil 4.9, Şekil 4.10'da verilmiştir.



Şekil 4.9. R ve K25 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük XRD analizleri.



Şekil 4.10. K50 ve K100 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük XRD analizleri.

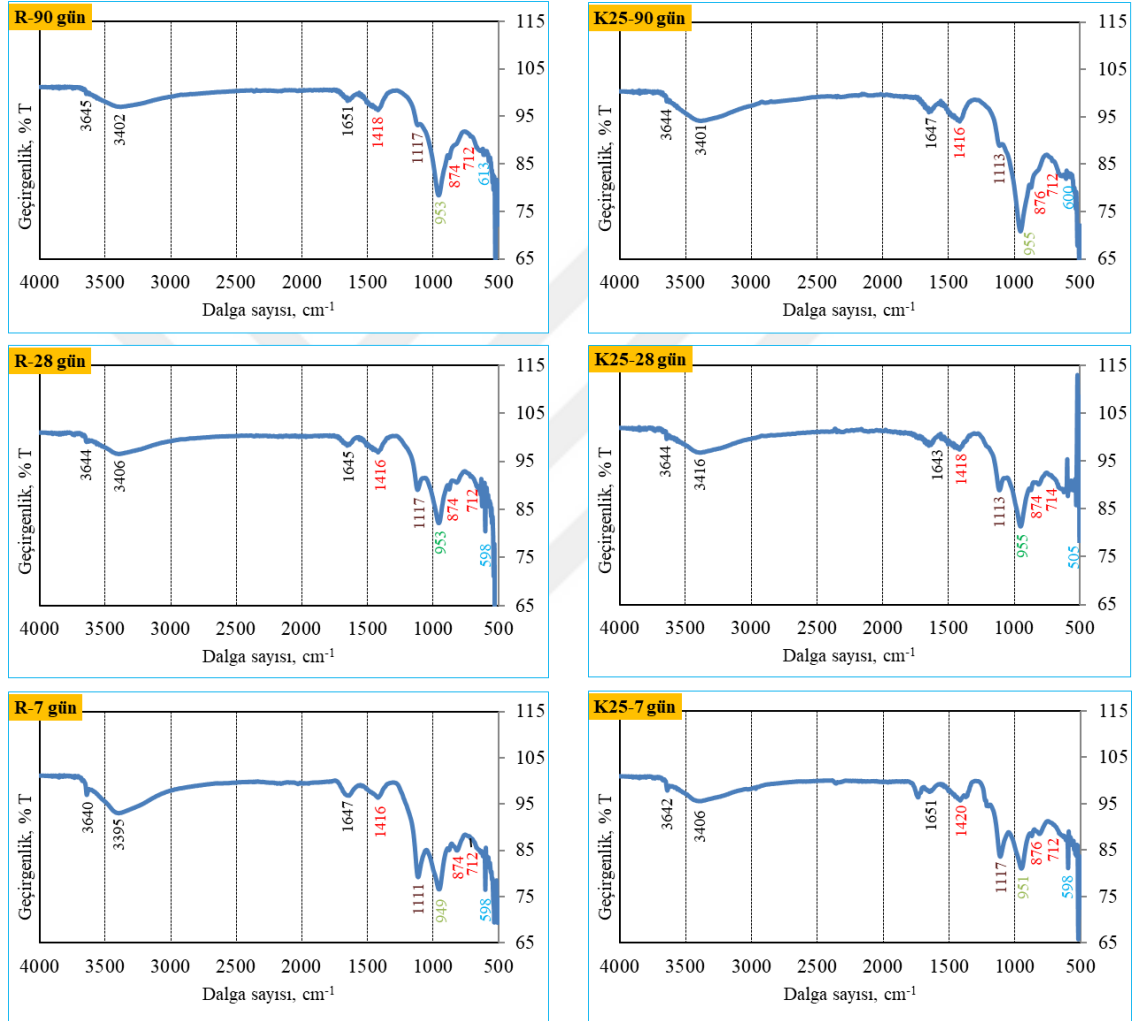
Hidrate olmuş R, K25, K50 ve K100 hamurlarının hidrasyon ürünlerindeki kristal fazlar; hidrasyon ürünleri olan portlandit (CH), kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve etrenjit (CASH-Aft) ile birlikte hidrate olmamış klinker mineralleri (C₃S ve C₂S) içermektedir. Amorf yapısı nedeniyle, C-S-H jelinin XRD spektrumlarında kırınım bağları gözlenememekte ve buna bağlı olarak amorf SiO₂ içeriği belirlenememektedir. Ancak CH (portlandit), çimento hamurlarının tüm yaşlarında ana hidrasyon ürünü olarak ortaya çıkmakta ve XRD spektrumlarında açıkça görülebilmektedir. Ana hidrasyon ürünü olan CH'in oluşumunu temsil eden ve çimento hidrasyon derecesini yansıtan CH içeriği incelendiğinde, ilerleyen yaşlarda çimento hidrasyonuna bağlı olarak, tüm

hamurlardaki CH içeriğinin kademeli olarak azaldığı görülmektedir (Şekil 4.9, Şekil 4.10).

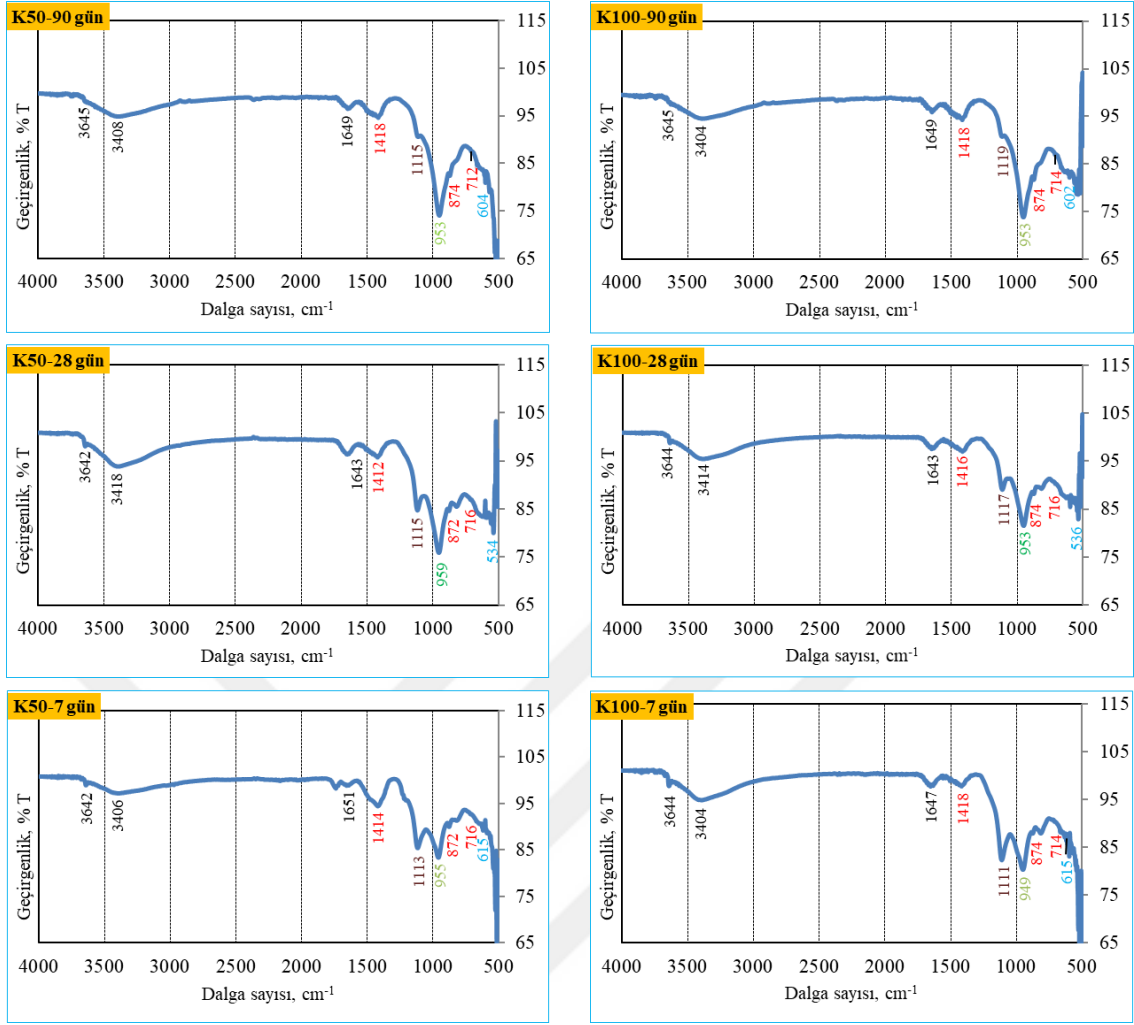
7 ve 28. günlerde, kolemanit katkılı çimento hamurlarında K100'ün CH yoğunluğunun K25 ve K50'ye göre daha yüksek olduğu, ancak 90. günde K100'ün en düşük CH yoğunluğuna sahip olduğu gözlenmektedir. Bunun yanı sıra 7 ve 28.günlerde CH yoğunluğu en düşük K25 ve en yüksek K100'de gözlenirken, 90.günde en düşük K100, en yüksek K25 olarak meydana geldiği görülmektedir. 90.günde kolemanit katkılı çimento hamurlarının R'den daha az CH yoğunluğuna sahip olması; silis dumanının pozolanik reaksiyonu sebebiyle, ilave C-S-H jeli oluşturmak için CH ile reaksiyona girmesi sonucu daha fazla CH tüketimi buna bağlı olarak da daha zayıf CH kırımını ile açıklanabilir. Tüm XRD verileri göz önünde bulundurulduğunda, ilerleyen yaşlarda daha düşük CH konsantrasyonu ile K100'ün mekanik özelliklerinde iyileştirme sağlayabileceği değerlendirilmektedir (Şekil 4.9, Şekil 4.10) [135], [176]–[184].

4.1.3.2. FT-IR ile Hidratasyon Gelişimi

7,28 ve 90 günlük hidratasyona tabi tutulmuş silis dumanı ikameli referans ve kolemanit katkılı çimento hamurlarının (R, K25, K50, K100), infrared spektrumları 4 geniş band bölgesinde (Si-Al, S, C, OH) değerlendirilerek elde edilen analiz sonuçları Şekil 4.11, Şekil 4.12’de verilmiştir.



Şekil 4.11. R ve K25 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük FT-IR analizleri.



Şekil 4.12. K50 ve K100 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük FT-IR analizleri.

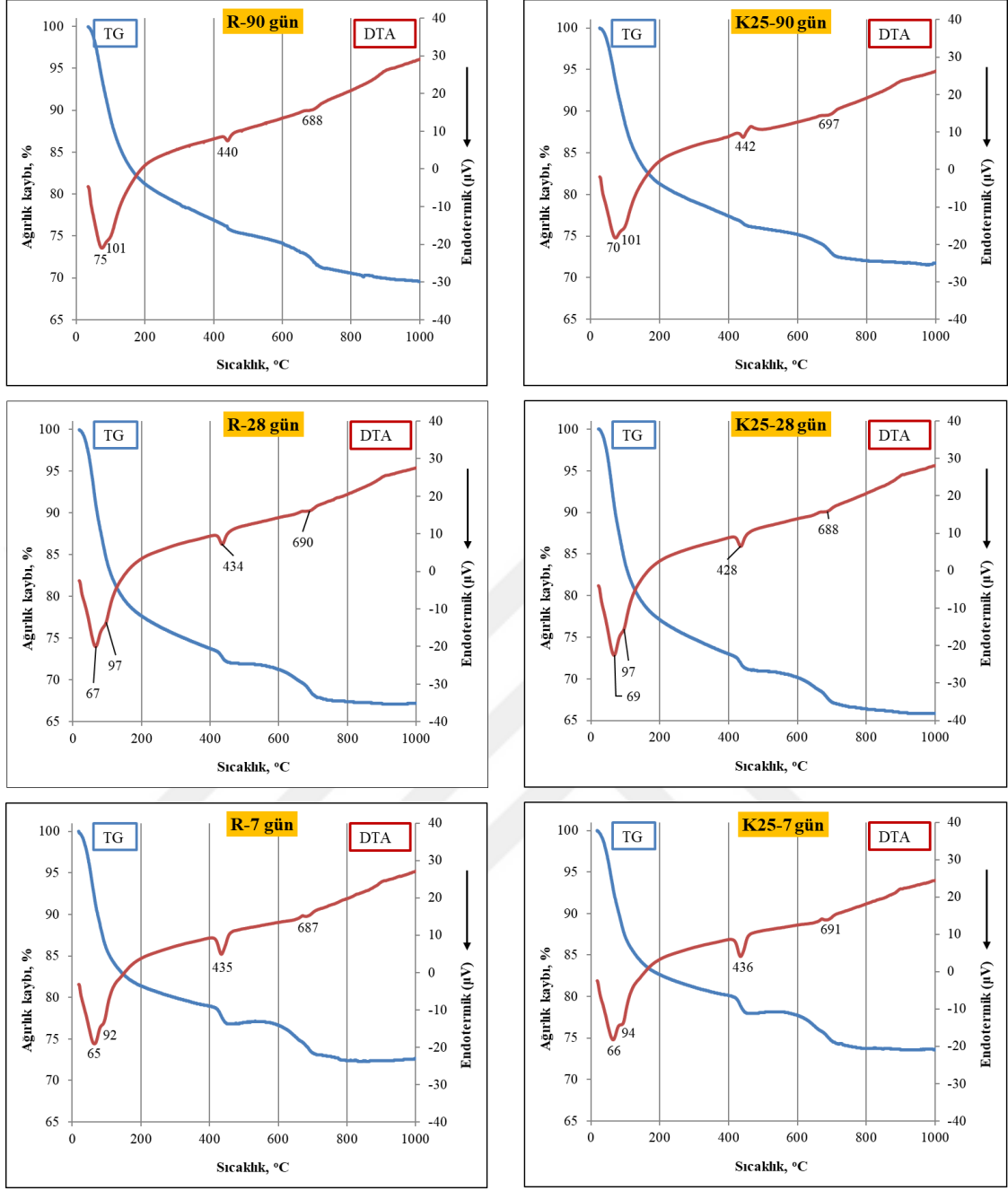
Çimento hamurlarının ana hidratasyon ürünü olan amorf C-S-H, XRD kırınım yöntemi ile görülemediği için tipik dalga sayıları ve geçirgenlik farklılaştırılarak FT-IR analizleri ile hidratasyon ürünleri ve bunların nispi miktarları belirlenmektedir. Tüm yaşlarda FT-IR grafikleri incelendiğinde C-S-H'nin kalsiyum hidroksit bağları, bağlanmış ve absorbe edilmiş suyun varlığı $\nu(3640 \text{ ve } 3645) \text{ cm}^{-1}$ bölgesinde görülmektedir. $\nu(3395-3418)$ ve $\nu(1643-1651) \text{ cm}^{-1}$ bölgelerinde bulunan geniş bir bant yapıya tutunmamış suyu (H_2O 'nun simetrik ve asimetrik gerilme titreşimleri); $\nu(1412-1420)$, $\nu(872-876)$ ve $\nu(712-716) \text{ cm}^{-1}$ bölgeleri portlanditin (CH) karbonasyonundan kaynaklı karbonat fazlarını (CO_3^{2-}); $\nu(1111-1119) \text{ cm}^{-1}$ bölgesi sülfat fazlarını göstermektedir. Hidrate olmuş kalsiyum silikatlar (C-S-H) $\nu(949-959) \text{ cm}^{-1}$ ve hidrate olmamış kalsiyum silikatlar (CS) $\nu(534-565) \text{ cm}^{-1}$ bölgelerinde görülmektedir. $\nu(2800-3700) \text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki geniş absorpsiyon bandı, hidratasyon ilerledikçe azalma eğilimi gösteren CaCO_3 'ün varlığını

temsil etmektedir. $\nu(800-1100) \text{ cm}^{-1}$ bölgesindeki ana pikin sağ ve solunda yer alan; hidrasyon süresi artışı ile azalma göstererek çimento pastasının sertleşmesini ifade eden iki küçük pik C_2S nin varlığını göstermektedir. 7, 28 ve 90. hidrasyon günleri birlikte değerlendirildiğinde, ilerleyen yaşlarda, $\nu(949-959) \text{ cm}^{-1}$ aralığındaki hidrate olmuş kalsiyum silikat (C-S-H) pik şiddetlerinin göreceli olarak arttığı ve 90.günde referansa göre kolemanit katkılı numunelerin pik şiddetlerinin daha fazla olduğu, buna bağlı olarak C-S-H oluşumunun gerçekleştiği; $\nu(3395-3418) \text{ cm}^{-1}$ aralığındaki pik şiddetlerinin nispi olarak azaldığı buna bağlı olarak da daha az CH oluşumunun gerçekleştiği ifade edilebilir. FT-IR analizleri ile elde edilen bulguların, XRD analizleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.11, Şekil 4.12) [173], [176], [179], [184]–[187].

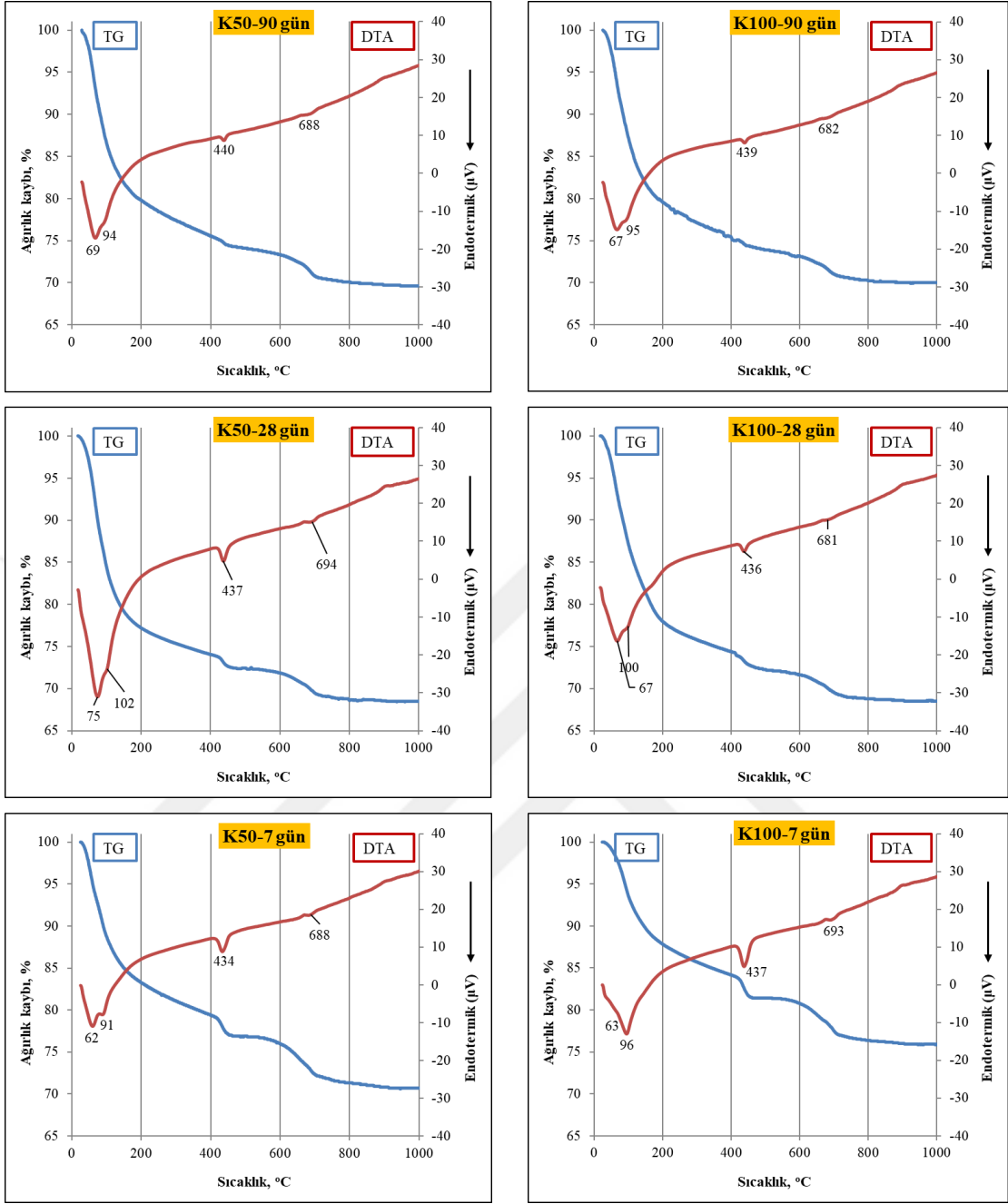
4.1.3.3. STA ile Hidratasyon Gelişimi

7,28 ve 90 günlük hidrasyona tabi tutulmuş silis dumanı ikameli referans; kolemanit katkılı çimento hamurlarının (R, K25, K50, K100), fark taramalı termal analiz (DTA) ve termal gravimetri analiz (TG) sonuçları Şekil 4.13, Şekil 4.14’de; farklı sıcaklık aralıklarındaki ağırlık kayıpları Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18’de verilmiştir.

DTA ve TG analizlerinde, DTA eğrilerinde farklı endotermik pikler görülebilmekte ve TG eğrilerinde belirgin ağırlık kayıpları gözlenebilmektedir. 25-200°C sıcaklık aralığındaki endotermik etkiler, serbest suyun buharlaşması, C-S-H ve Aft (trisülfoalüminat) fazlarının farklı aşamalarındaki dehidrasyonundan; 400-500°C sıcaklık aralığındaki endotermik etkiler, CH’in dehidrasyonundan; 500-750°C sıcaklık aralığında ise, numunelerin oluşturulması aşamasında CH’in karbonizasyonundan ve CaCO_3 ’ün ayrışmasından kaynaklanmaktadır. C-S-H jeli, CH ve diğer hidratlı ürünlerden oluşan çimento hidrasyon ürünlerinin dehidrasyonu ile oluşan kimyasal olarak bağlı su içeriği, 105-1000°C aralığındaki ağırlık kaybıyla belirlenebilmektedir [180], [181], [188].

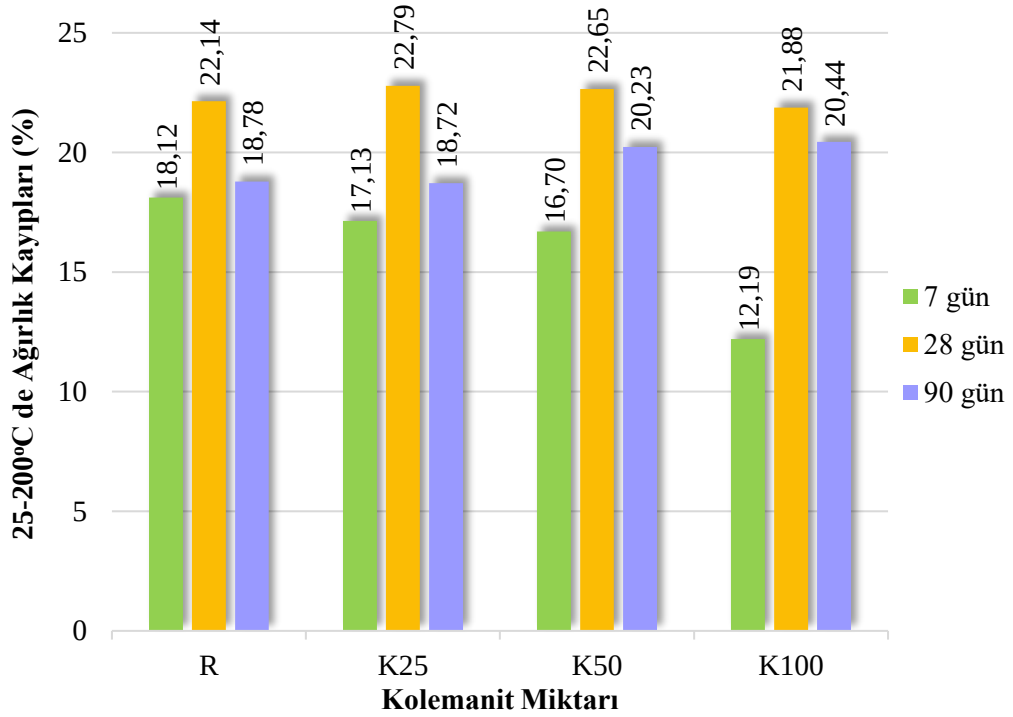


Şekil 4.13. R ve K25 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük DTA-TG analizleri.



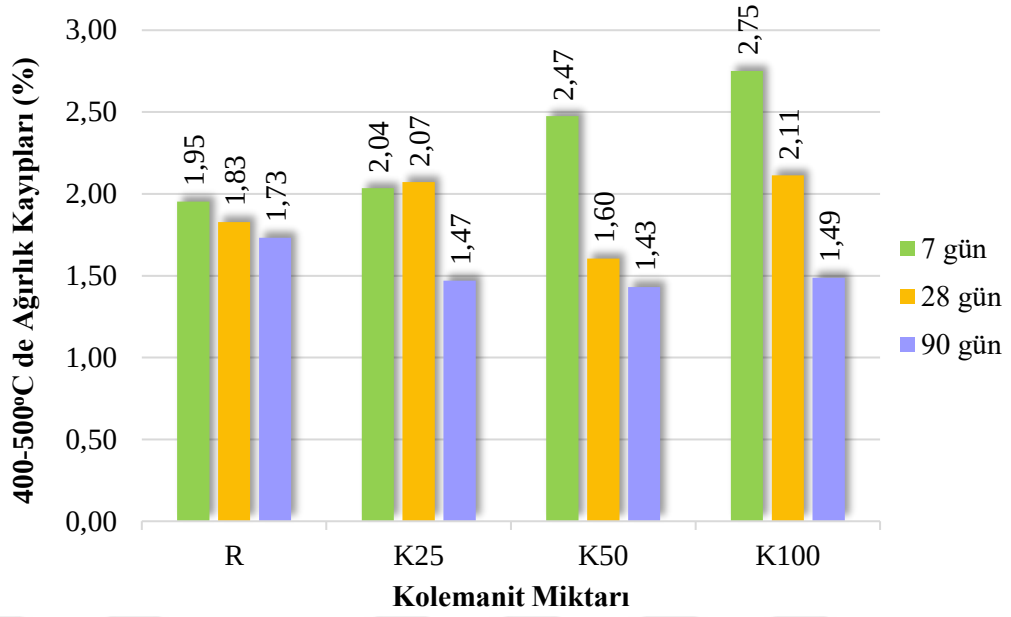
Şekil 4.14. K50 ve K100 kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük DTA-TG analizleri.

7,28 ve 90 günlük hidratasyona tabi tutulmuş çimento hamurlarının tüm DTA eğrilerinde tobermorit (C-S-H) jel, portlandit (CH) ve diğer hidratasyon ürünlerinden oluşan üç ana endotermik tepe ve TG eğrilerinde ağırlık kaybı gözlenmektedir. TG analiz sonuçlarına göre toplam kütle kaybı değerlendirildiğinde, 7.hidratasyon gününde en fazla K50, en az K100; 28.hidratasyon gününde en fazla K25, en az K100; 90.hidratasyon gününde en fazla K50, en az K100’de gözlenmiştir (Şekil 4.13, Şekil 4.14).



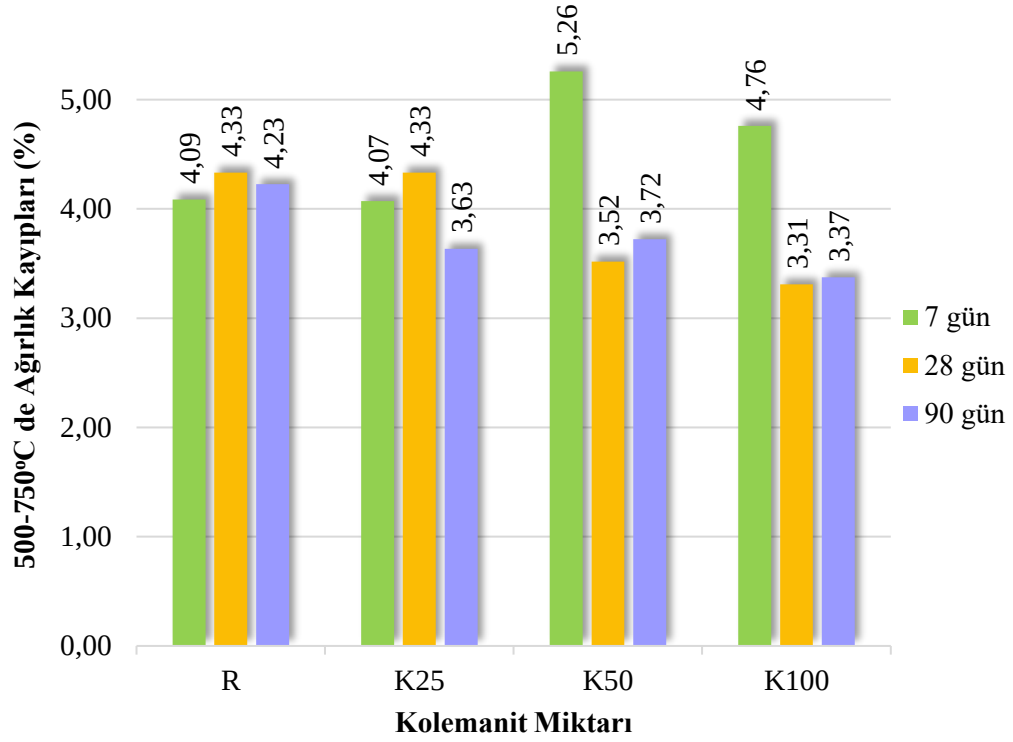
Şekil 4.15. Çimento hamurlarının hidratasyon günlerine göre 25-200°C aralığındaki ağırlık kayıpları.

25-200°C sıcaklık aralığında serbest su ile C-S-H ve Aft fazlarının farklı aşamalarındaki dehidrasyonuna bağlı sırasıyla R, K25, K50, K100 için hesaplanan ağırlık kayıpları, 7.hidratasyon gününde %8,12; 17,13; 16,70; 12,19; 28.hidratasyon gününde %22,14; 22,79; 22,65; 21,88; 90.hidratasyon gününde %18,78; 18,72; 20,23; 20,44’dür. Buna bağlı olarak, 7.hidratasyon gününde kolemanit katkılı numunelerde, referansa göre daha az ağırlık kaybı oluşurken; 28 ve 90.günlerde daha fazla ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Bu durum, çimento hamurlarının ana hidratasyon ürünü olan C-S-H miktarının artması ile kolemanit katkılı numunelerin, ilerleyen yaşlarda daha kompakt bir yapı oluşturabileceğini göstermektedir (Şekil 4.15).



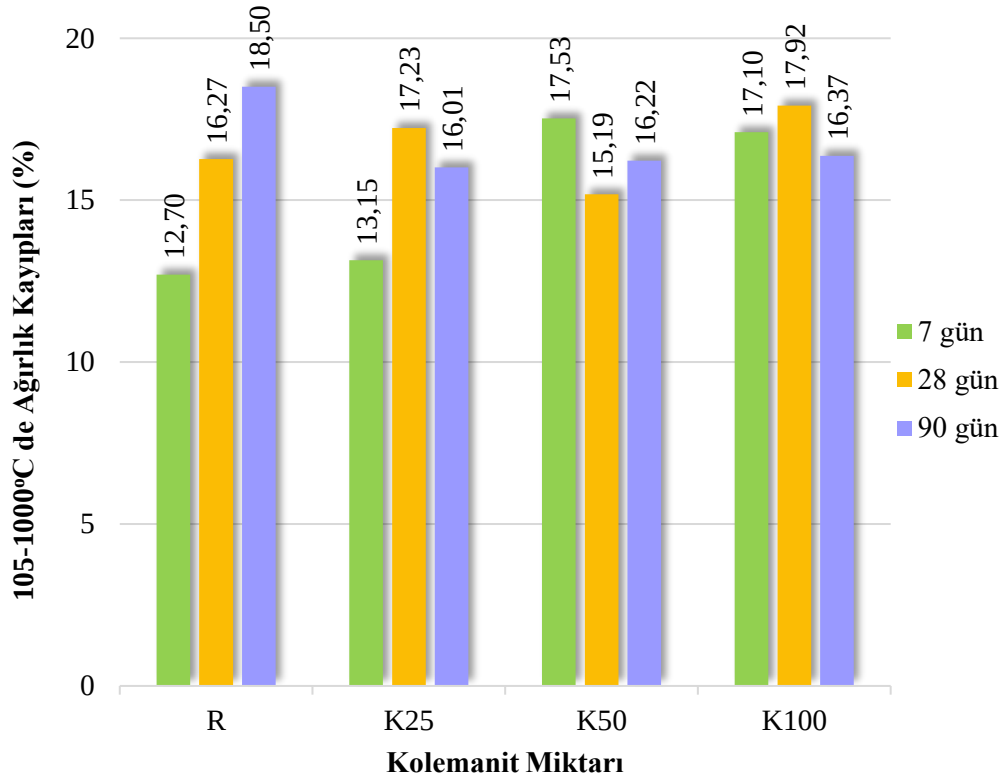
Şekil 4.16. Çimento hamurlarının hidrasyon günlerine göre 400-500°C aralığındaki ağırlık kayıpları.

400-500°C sıcaklık aralığında CH'in ayrışmasına bağlı sırasıyla R, K25, K50, K100 için hesaplanan ağırlık kayıpları: 7.hidrasyon gününde %1,95; 2,04; 2,47; 2,75; 28.hidrasyon gününde %1,83; 2,07; 1,60; 2,11; 90.hidrasyon gününde %1,73; 1,47; 1,43; 1,49'dur. Buna bağlı olarak, 7.hidrasyon gününde kolemanit katkılı numunelerde, referansa göre daha fazla ağırlık kaybı; 90.günde ise daha az ağırlık kaybı olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla bu durum, çimento hamurlarının ana hidrasyon ürünü olan CH miktarının azalması ile kolemanit katkılı numunelerde, ilerleyen yaşlarda daha kompakt bir yapının oluşabileceğini göstermektedir (Şekil 4.16).



Şekil 4.17. Çimento hamurlarının hidratasyon günlerine göre 500-750°C aralığındaki ağırlık kayıpları.

500-750°C sıcaklık aralığındaki CaCO_3 'ün dekarbonasyonu sonucu sırasıyla R, K25, K50, K100 için hesaplanan ağırlık kayıpları: 7.hidratasyon gününde %4,09; 4,07; 5,26; 4,76; 28.hidratasyon gününde %4,33; 4,33; 3,52; 3,31; 90.hidratasyon gününde %4,23; 3,63; 3,72; 3,37'dir. Buna bağlı olarak, 7.hidratasyon gününde kolemanit katkılı numunelerde, referansa göre daha fazla ağırlık kaybı; 28 ve 90.günlerde ise daha az ağırlık kaybı olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.17).



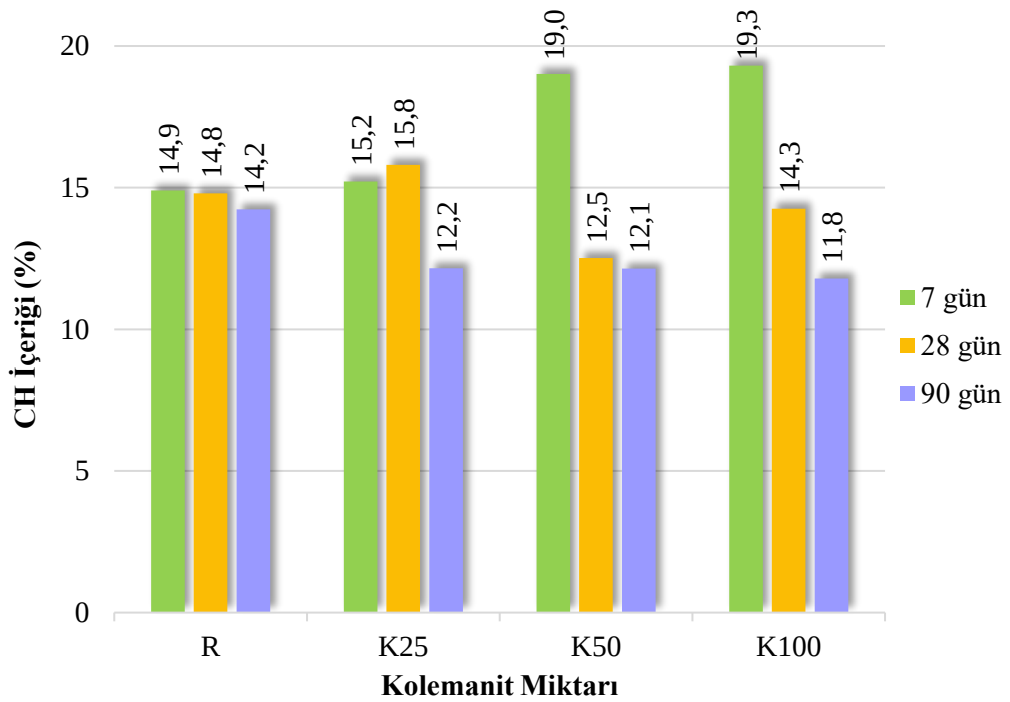
Şekil 4.18. Çimento hamurlarının hidrasyon günlerine göre 105-1000°C aralığındaki ağırlık kayıpları.

105-1000°C sıcaklık aralığında, çimento hidrasyon ürünleri olan C-S-H jel, CH ve diğer hidratlı bileşiklerin dehidrasyonu ile oluşan kimyasal olarak bağlı su içeriği ile ilişkili olarak sırasıyla R, K25, K50, K100 için hesaplanan ağırlık kayıpları: 7.hidrasyon gününde %12,70; 13,15; 17,53; 17,10; 28.hidrasyon gününde %16,27; 17,23; 15,19; 17,92; 90.hidrasyon gününde %18,50; 16,01; 16,22; 16,37'dir. Buna bağlı olarak, 7.hidrasyon gününde kolemanit katkılı numunelerde, referansa göre daha fazla kimyasal bağlı su yüzdesi; 28.günde referansa göre K50 numunesi hariç daha fazla kimyasal bağlı su yüzdesi; 90.günde referansa göre daha az kimyasal bağlı su yüzdesi tespit edilmiştir. Kimyasal olarak bağlı su yüzdelерinin daha az miktarlarda olması, kolemanit miktarındaki artışa bağlı olarak artan su ihtiyacından kaynaklanmaktadır (Şekil 4.18).

CH'nin tüm içeriği, CH dehidrasyonu ve CaCO₃ ayrışmasından kaynaklanan ağırlık kayıpları kullanılarak Denklem (4.7) ile hesaplanmıştır:

$$CH(\%) = \left(WL_{CH}(\%) \times \frac{MW_{CH}}{MW_{H_2O}} \right) + \left(WL_{CC}(\%) \times \frac{MW_{CH}}{MW_{CO_2}} \right) \quad (4.7)$$

Formülde WL_{CH}: CH'nin dehidrasyonu ve WL_{CC}: CaCO₃'ün ayrışmasından kaynaklanan ağırlık kayıplarıdır. MW_{CH}=74: CH'ın; MW_{H₂O}=18: H₂O'nun; MW_{CO₂}=44: CO₂'nin molekül ağırlıklarını ifade etmektedir [189].



Şekil 4.19. Çimento hamurlarının hidrasyon günlerine göre CH miktarları.

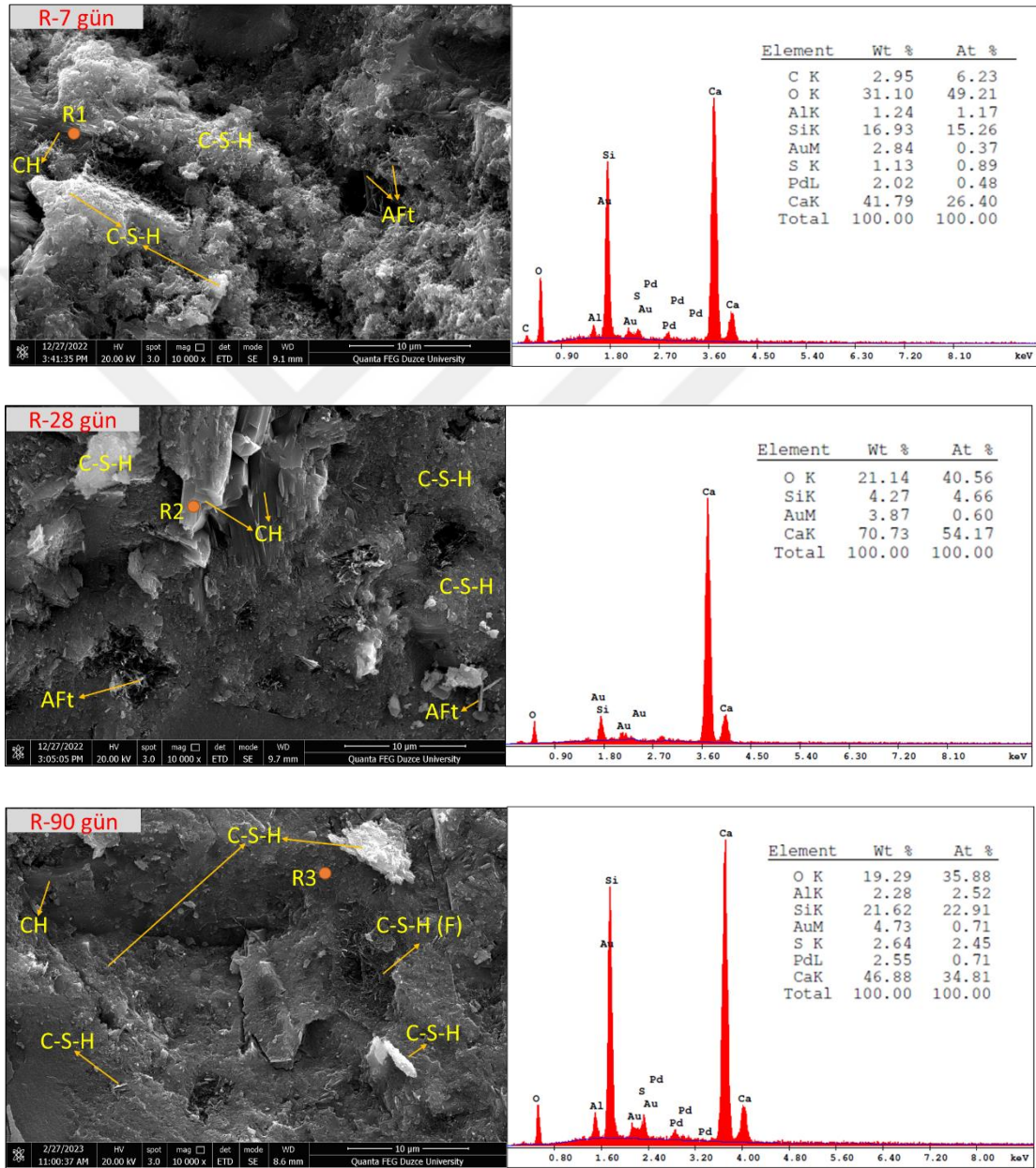
Elde edilen verilere göre R, K25, K50, K100 için denklemden hesaplanan CH içeriği sırasıyla: 7.hidrasyon gününde %14,9; 15,2; 19,0; 19,3; 28.hidrasyon gününde %14,8; 15,8; 12,5; 14,3; 90.hidrasyon gününde %14,2; 12,2; 12,1; 11,8'dir. Buna bağlı olarak, 7.hidrasyon gününde kolemanit katkılı numunelerde, referansa göre daha yüksek CH içeriği; 28 ve 90.günlerde referansa göre daha düşük CH içeriği tespit edilmiştir. Dolayısıyla, kolemanit katkılı numunelerin ilerleyen yaşlarda mekanik özelliklere katkı sağlayabileceği söylenebilir (Şekil 4.19).

Tüm veriler göz önünde bulundurularak, kolemanit katkılı numuneler, referans numunelere göre değerlendirildiğinde, kolemanit katkılı çimento hamurlarında ilerleyen yaşlarda daha fazla hidrasyon ürünlerinin meydana geldiği; daha düşük CH içeriğine sahip olduğu; karbonasyonun daha az gerçekleştiği gözlenmiştir. Bu durum, kolemanitin gözenekliliğin azaltılmasına, mekanik ve durabilite özelliklerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Termal analiz sonuçlarının, XRD ve FT-IR analizleriyle uyumlu olduğu ifade edilebilir [173], [176], [179], [181], [188]–[192].

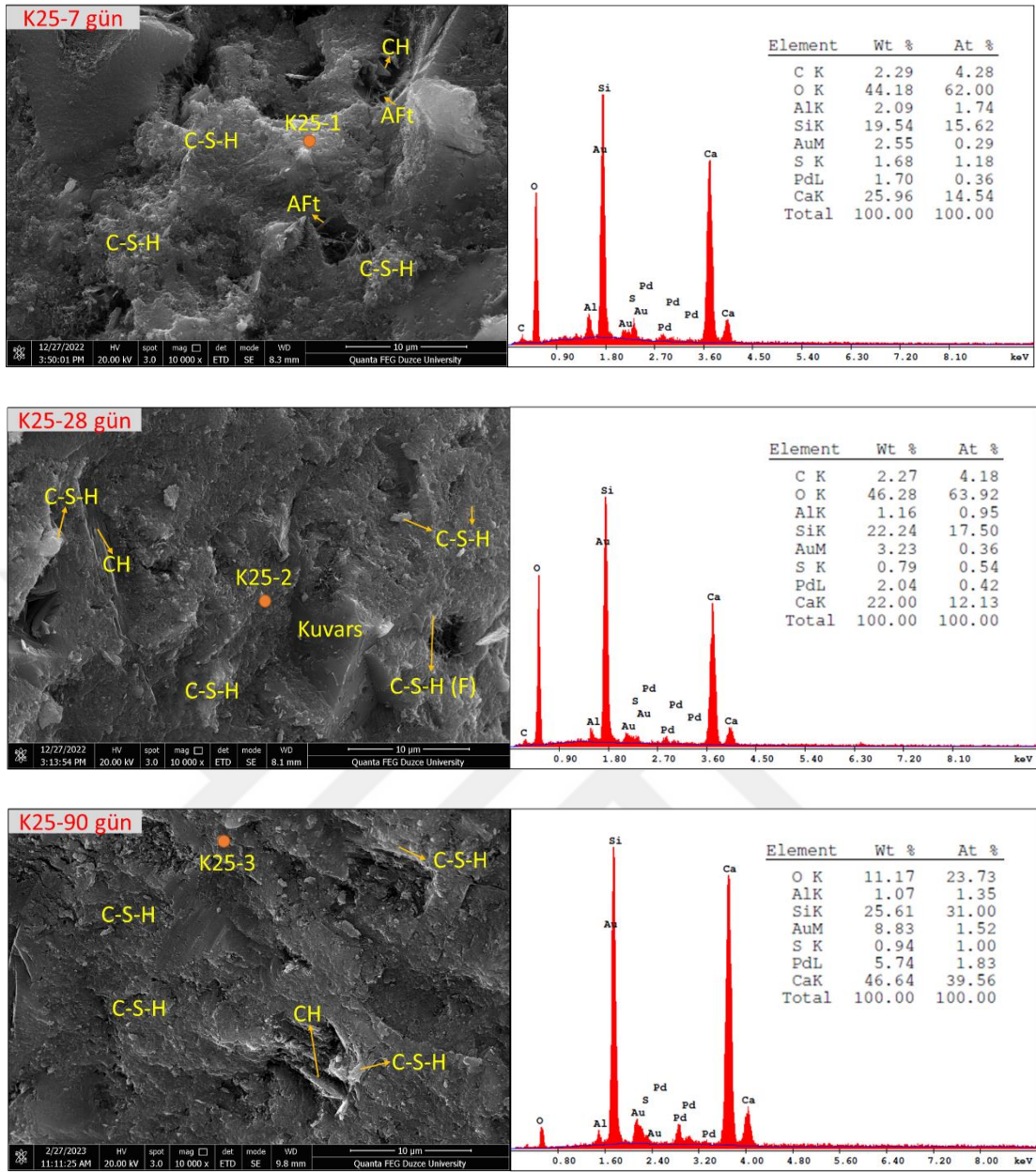


4.1.3.4. Mikro Yapı Analizleri

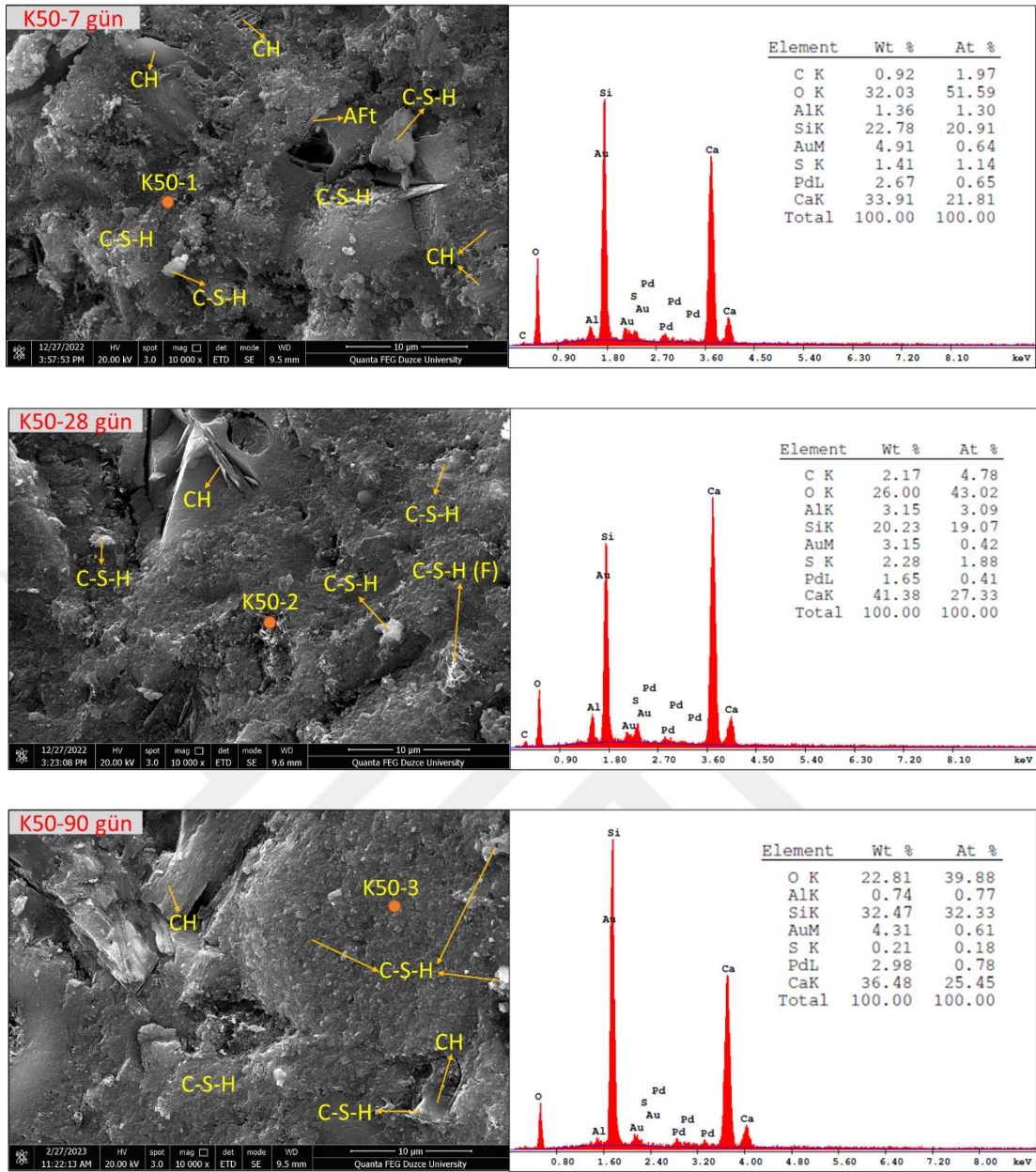
7,28 ve 90 günlük hidratasyona tabi tutulmuş referans ve kolemanit katkılı çimento hamurlarının (R, K25, K50, K100), SEM mikro yapıları Şekil 4.20, Şekil 4.21, Şekil 4.22, Şekil 4.23’de verilmiştir.



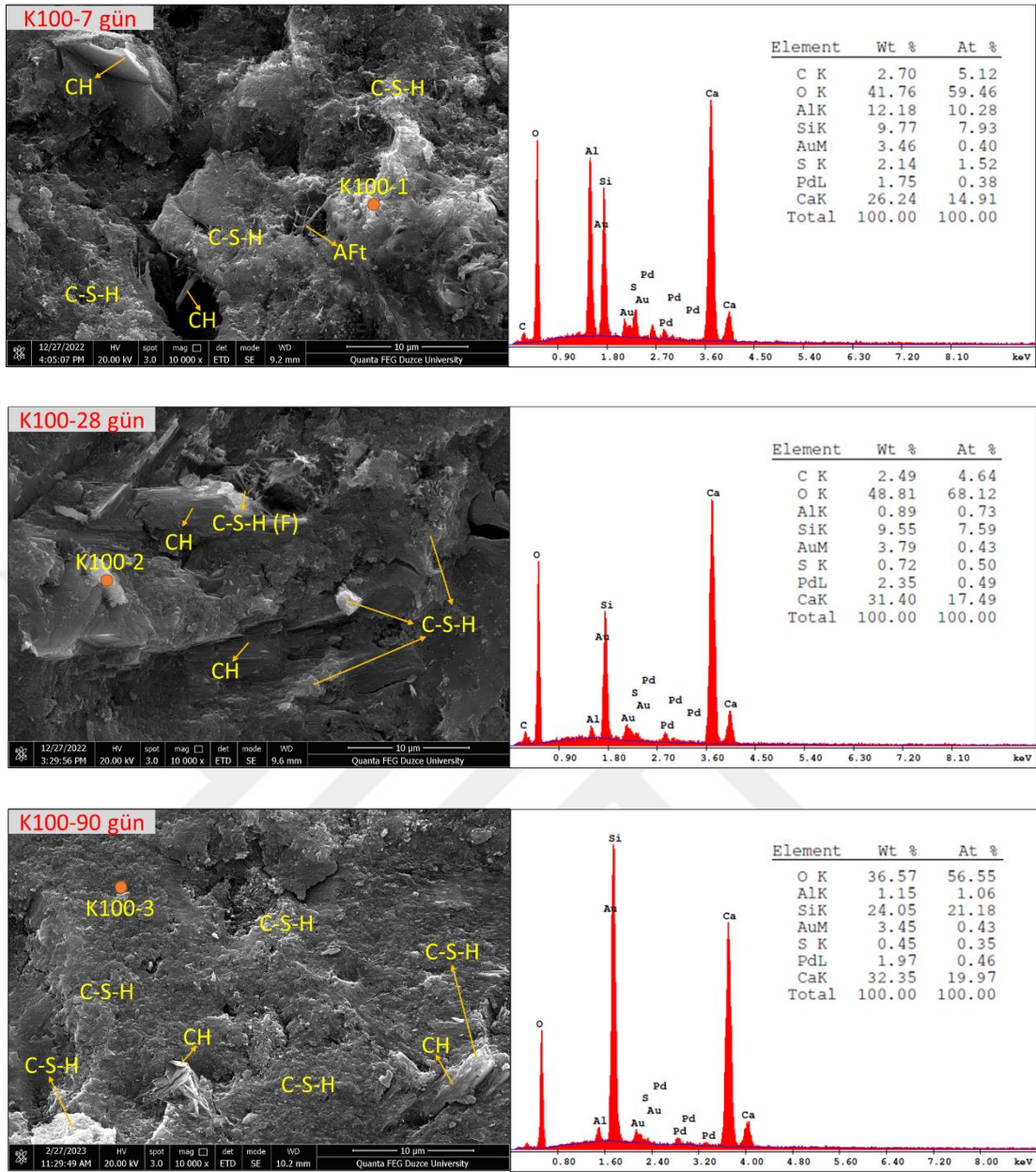
Şekil 4.20. R Kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük SEM görüntüleri.



Şekil 4.21. K25 Kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük SEM görüntüleri.



Şekil 4.22. K50 Kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük SEM görüntüleri.



Şekil 4.23. K100 Kodlu hamurların 7, 28, 90 günlük SEM görüntüleri.

Portlandit (CH) ve C-S-H miktarları harç ve betonların dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Ayrıca sertleşmiş çimento pastasının bileşenlerini tam olarak hesaplamak mümkün olmamakla birlikte, tam hidrate olmuş çimento pastasının SEM'leri yaklaşık olarak %70 C-S-H, %20 CH, %7 sülfatlar ve %3 minör bileşenlerden oluşmaktadır [193].

7 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde, kireç bakımından zengin ve puzolanlardaki C-S-H'ye göre daha gözenekli yapıya sahip C-S-H'nin yayılan liflerinin klinker ve silis dumanı taneciklerini çevrelediği; matris yüzeylerin C-S-H'nin yanı sıra iğnemsiz kristalize

CH içerdği; hidratlanan partiküller üzerinde C-S-H tabakaları oluşmasına rağmen boşlukların hidratasyon ürünleri ile tam olarak doldurulamadığı; iğne biçimli Aft (Etrenjit) kristallerinin boşluklara yerleştiği görülmüştür. 7 günlük EDS analizlerinde ana elementlerin R için Ca, Si (Şekil 4.20:R1); K25 için Ca, Si (Şekil 4.21:K25-1); K50 için Ca, Si (Şekil 4.22:K50-1); K100 için Ca, Si, Al (Şekil 4.23:K100-1) olduğu belirlenmiştir.

28 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde, istiflenmiş masif morfolojik yapı ve portlandit kristallerinin varlığı; hidrasyon ürünlerinde artış; reaksiyon ürünleri ile dolan boşluklar buna bağlı olarak 7 günlük numunelere göre stabil bir yapı görülmüştür. 28 günlük EDS analizlerinde ana elementlerin R için Ca, Si (Şekil 4.20:R2); K25 için Ca, Si (Şekil 4.21:K25-2); K50 için Ca, Si (Şekil 4.22:K50-2); K100 için Ca, Si (Şekil 4.23:K100-2) olduğu tespit edilmiştir.

90 günlük SEM görüntüleri incelendiğinde, hidrasyon ürünlerinde daha fazla artış ve C-S-H yapısında yoğunlaşma; reaksiyon ürünleri ile daha da dolan boşluklar ve daha da stabil bir yapı görülmüştür. Özellikle kolemanit katkılı hamurlarda, Aft (Etrenjit) gözlenmemiştir. 90 günlük EDS analizlerinde ana elementlerin R için Ca, Si (Şekil 4.20:R3); K25 için Ca, Si (Şekil 4.21:K25-3); K50 için Ca, Si (Şekil 4.22:K50-3); K100 için Ca, Si (Şekil 4.23:K100-3) olduğu tespit edilmiştir. Tüm veriler ışığında, kolemanit katkılı numunelerin 28 ve 90.günde referansa göre daha yoğun ve yüksek mukavemetli bir yapısının olduğu; reaksiyon ürünleri ile dolan boşlukların daha fazla olduğu ve daha az gözenekli ve stabil bir yapıya sahip olduğu görülmüştür. Bu durum, kolemanit katkısının mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca elde edilen bulguların, XRD, FT-IR, DTA-TG analizleri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir [127], [130], [176], [177], [193]–[196].

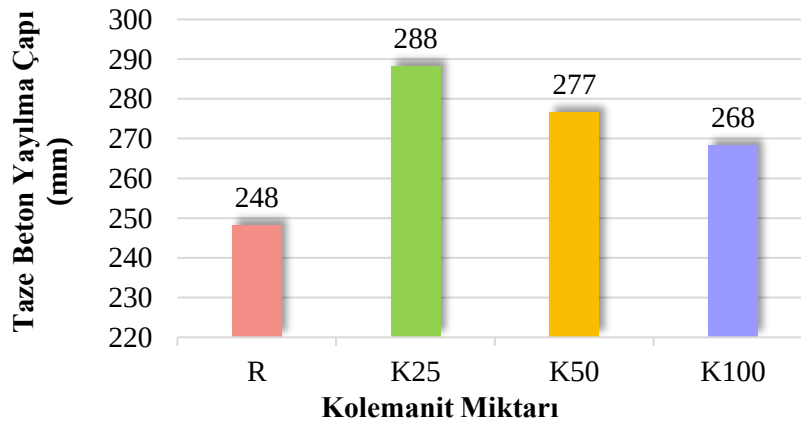
4.2. TAZE BETON ÖZELLİKLERİ

4.2.1. UYPB Karışımlarının Taze Beton Yayılma Çapı

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB karışımlarının taze beton yayılma çapı sonuçları Şekil 4.24’de gösterilmiştir.

Taze beton işlenebilirliği karışımlara eklenen silis dumanı gibi puzolanik malzemeler, lif tipi ve miktarı, su/bağlayıcı oranı, süperakışkanlaştırıcı miktarı ve tipi, mineral katkılar, kullanılan agregaların tane çapı ve tipi ile doğrudan ilişkilidir. Khan vd. [197] tarafından yapılan çalışmada tane boyutu, özgül yüzey alanı, puzolanik mineral katkıların

reaktivitesinin betonun kohezyonunu üzerinde etkisi olduğu; yüksek oranda reaktif pozolanik mineral katkıların eklenmesi ile taze beton karışımlarının işlenebilirliğinin azaldığı bildirilmiştir. Wu vd. [198] çelik lif hacimindeki artışın taze beton akışkanlığını azalttığı, bu durumun çelik lifin artan özgül yüzey alanından kaynaklandığı; lifler ile agregaların yüzeyini kaplamak için çimento hamuru talebinin arttığı; çelik liflerin harç matrisinde rastgele dağılmış ve bir iskelet görevi görerek taze UYPB karışımlarının yayılma akışlarını engellediği belirtilmiştir. Boulekbache [199] araştırmasında, farklı yayılma hızlarının lifleri etkilediğini ve liflerin akış yönüne dik olarak yeniden yönlenecek şekilde dönmelerine neden olabileceğini ifade etmiştir. Tek tip lifli taze betondaki tüm lif oryantasyonu, en büyük direnç kuvvetini oluşturma; taze betonun çökme akışını azaltma, akış yönüne dik olma eğiliminde olmaktadır. Buna bağlı olarak öteleme ve dönmeye bağlı hızların varlığında, sıvı lifler üzerine kuvvetler ve momentumlar uygulanmaktadır. Ayrıca taze betona hibrit lifler eklendiğinde, akış modu nispeten bozulabilmekte; beton dökme işleminde kalıpların duvarlarına yakın olan lifler, "duvar etkisi" olarak adlandırılan sınırlara paralel olma eğiliminde olmaktadır. Betonun işlenebilirliği üzerinde, çelik liflerin olumsuz etkisi üç durum ile açıklanmaktadır. Birinci durum, liflerin şeklinin agregalara göre çok daha uzun ve aynı hacimde yüzey alanının daha yüksek olmasından dolayı lifler ve matris arasındaki kohezyon kuvvetlerini artırmasıdır. İkinci durum sert liflerin, granüler iskeletin yapısını değiştirmesi ve lif uzunluğuna kıyasla nispeten büyük olan parçacıkları birbirinden uzaklaştırmasıdır. Üçüncü durum ise çelik lifleri çevreleyen matris ile arasındaki ankrajı iyileştirmek için genellikle deforme olmasıdır. Örneğin çengel uçlu çelik lifler ile agregalar arasındaki sürtünme, düz çelik liflere kıyasla daha yüksektir [200].



Şekil 4.24. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin taze beton yayılma çapı.

Bu çalışmada kolemanitin taze beton fazında etkilerini tespit edebilmek için, çimento ile silis dumanı ikamesi, su/bağlayıcı oranı, hacimce çelik lif miktarı, süperakışkanlaştırıcı miktarı tüm karışımlarda sabit tutulmuştur. Elde edilen sonuçlara göre kolemanit katkılı tüm numunelerin (K25, K50, K100) taze beton yayılma çapı değerleri referans karışıma göre sırasıyla %16,11; 11,44; 8,05 oranlarında artış göstermiştir. Çimento standart kıvam ve DTA analizi sonuçları ile de teyit edilen kolemanit oranının artması ile su ihtiyacı artışı oluşmuş, buna bağlı olarak kolemanit katkı oranının %0,25'den %1,00 e çıkarılması ile yayılma çapı değerleri azalmıştır. Bu düşüşler K25 numunesine göre kıyaslandığında, K50 numunesi için %4,02, K100 numunesi için %6,94 olmuştur. Beton işlenebilirliği açısından %0,25 kolemanit katkı oranının (K25) en yüksek yayılma çapı değerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kolemanitin agrega ile yer değiştirmesi ve daha ince boyuta sahip olmasından dolayı toplam karışımın özgül yüzey alanı artmış, buna bağlı olarak taze beton su ihtiyacı bir miktar artarak yayılma çapı değerleri azalmıştır. Bunun yanı sıra kolemanitin hidrasyonu geciktirme etkisinden dolayı kolemanit katkılı UYPB'lerin yayılma çapı değerleri referans numuneye göre daha yüksek tespit edilmiştir (Şekil 4.24).

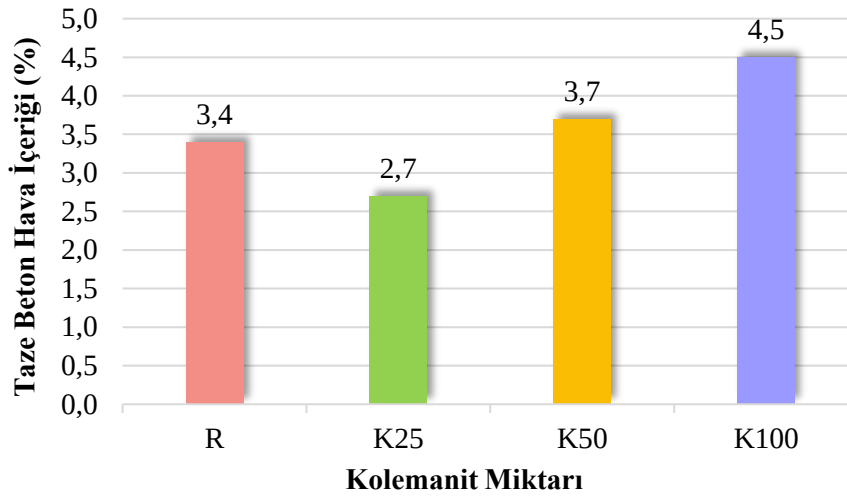
Taze beton yayılma çapı testleri ile elde edilen sonuçlar, daha önce yapılan çalışmalarla benzer sonuçlar göstermiştir. Lifli UYPB karışımlarında yayılma çapı değerlerini Zhong vd. [117], 226-251 mm arasında; Yalçınkaya vd. [118] , 260 mm olarak tespit etmişlerdir. Du vd. [121] , uçucuk kül ve yüksek fırın cürufu ilaveli çelik lifli UYPB karışımlarında 195 mm-300 mm aralığında; Huang vd. [126], pirinç kabuğu külü ikameli UYPB karışımlarında artan ikame oranı ile karışımların su ihtiyacının arttığını, buna bağlı olarak akışkanlığın azaldığını ifade etmişlerdir.

4.2.2. UYPB Karışımlarının Taze Beton Hava İçeriği

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB karışımlarının taze beton hava içeriği sonuçları Şekil 4.25'de gösterilmiştir.

Betondaki hava boşlukları miktarı, beton yoğunluğu ve beton dayanımı üzerindeki etkisi ile önem arz etmektedir. Daha düşük oranda hava boşluğuna sahip betonlar, daha yüksek mukavemet ve yoğunluk göstermektedir [201]. Yüksek orandaki hava içeriği, UYPB'nin dayanım ve dayanıklılık özellikleri üzerinde zararlı bir etkiye sahip olup, UYPB bileşenlerine bağlı olarak hava içeriği, karışımın hacmine göre %0,3 ile %6 arasında değişebilmektedir [125], [202]. İşlenebilirliği düşük olan beton karışımı yüksek viskozitesi nedeniyle daha fazla hapsolmuş hava içermektedir. Düşük işlenebilirlik,

betonun mekanik özellikleri ve dayanıklılık özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olan betonun kılcal boşlukları ve gözeneklerinde daha yüksek hava içeriğine yol açmaktadır [203]. Yüksek dozda süperakışkanlaştırıcı kullanıldığında ve çelik lif ilavesi ile taze UYPB karışımlarının hapsolmuş hava içeriğini azaltılabilmektedir [125]. Ayrıca UYPB'nin mekanik özellikleri üzerinde zararlı etkiye sahip olan yüksek miktarda hapsolmuş hava içeriği, alçaltılmış hava basıncı altında özel karıştırma teknolojisi ile azaltılabilmektedir [203].



Şekil 4.25. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin taze beton hava içeriği.

Hava içeriği, taze betonun homojenliği hakkında fikir sahibi olmak için bir test yöntemidir. UYPB numunelerde taze beton hava içeriği %3,4 ile %4,5 arasında tespit edilmiştir. Karışımlarda kolemanitin etkisini daha net anlayabilmek için hava itici katkısı kullanılmamıştır. Ayrıca UYPB bileşenlerinden dolayı hava içeriği oranlarının normal beton karışımlarından daha yüksek olduğu görülmektedir (Şekil 4.25).

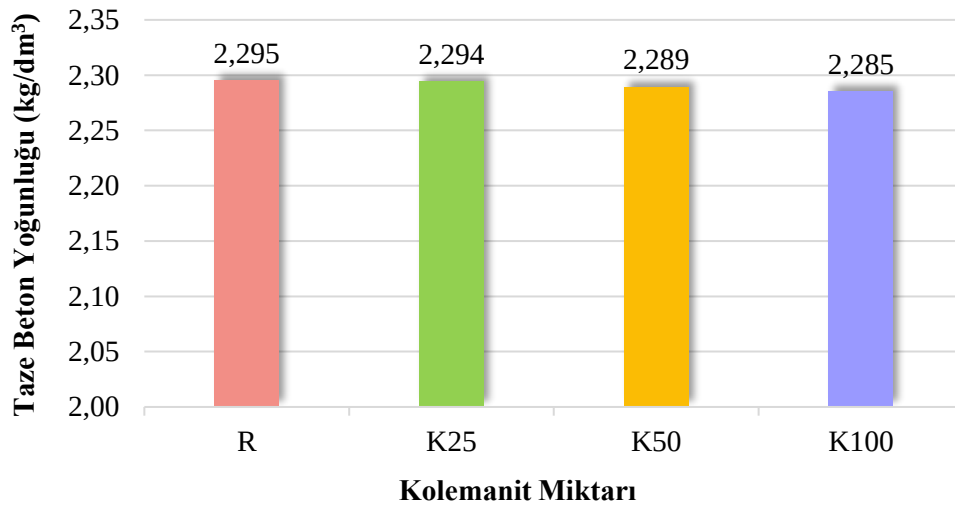
Elde edilen sonuçlar referans karışıma göre kıyaslandığında, %0,25 kolemanit katkılı numunelerin (K25) hava içeriği %20,59 oranında azalma, %0,50 ve %1 kolemanit katkılı numunelerin (K50, K100) hava içeriği ise %8,82 ve %32,35 oranında artış göstermiştir. Yayılma çapı sonuçları ile teyit edilen kolemanit oranının artması ile su ihtiyacı artışına ve taze beton kohezyonunun azalmasına bağlı olarak kolemanit oranının %0,25'den %1,00'e çıkarılması ile taze beton hava içeriği değerlerini artmıştır. Bu artışlar K25 numunesine göre kıyaslandığında, K50 numunesi için %37,04, K100 numunesi için

%66,67 olmuştur. %0,25 kolemanit katkı oranının (K25) en düşük hava içeriğine sahip olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.25).

Elde edilen taze beton hava içeriği sonuçları literatü ile uyumluluk göstermektedir. Wang ve Gao[125], farklı su/bağlayıcı oranlarında (0,18; 0,20; 0,22; 0,24), farklı çelik lif hacimlerinde (%0; 1; 2; 3) , çimentonun %30 oranında silis dumanı ilavesi ile hazırladıkları UYPB karışımlarında, hava içeriğinin çoğunlukla %4-6 arasında olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca süperakışkanlaştırıcı dozajının hava içeriği üzerindeki etkisinin, su-bağlayıcı oranı ve çelik lif ilavesiyle ilişkili olduğu ifade edilmiştir. Huang vd. [126] , 1/6;1/3;1/2;2/3;5/6;1 oranlarında pirinç kabuğu külünün, silis dumanı ile ikamesi ile hazırladıkları UYPB karışımlarında, pirinç kabuğu külünü akışkanlığı azaltırken hava içeriğini yükselttiği; 2/3 pirinç kabuğu külü ikame oranında yayılma çapının %3,10 azaldığı ve hava içeriğinin %4,10 arttığı belirtilmiştir.

4.2.3. UYPB Karışımlarının Taze Beton Yoğunluğu

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB karışımlarının taze beton yoğunluğu sonuçları Şekil 4.26’da gösterilmiştir.



Şekil 4.26. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin taze beton yoğunluğu.

Elde edilen sonuçlara göre kolemanit katkılı tüm numunelerin (K25, K50, K100) taze beton yoğunluk değerleri referans karışıma göre sırasıyla %0,04; 0,26; 0,44 oranlarında azalma göstermiştir. Kolemanit katkı oranının %0,25’den %1,00 e çıkarılması ile teyit

edilen taze beton hava içeriğinin artmasına bağlı olarak taze beton yoğunluk değerleri düşük oranlarda azalmıştır. Bu azalmalar K25 numunesine göre kıyaslandığında, K50 numunesi için %0,22, K100 numunesi için %0,39 olmuştur. %1,00 kolemanit katkı oranına sahip K100 numunesinin 2,285 kg/dm³ ile en düşük, kolemanit içermeyen R numunesinin 2,295 kg/dm³ ile en yüksek olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.26).

Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, benzer sonuçlar görülmektedir. Hamiruddin vd. [114], farklı tane çaplarında kum (63-300 µm, 300-600 µm, 600-1180 µm ve standart kum), süperakışkanlaştırıcı, yüksek su indirgeyici (HRWR) kullanarak, sabit oranda 0,2 su/bağlayıcı ile UYPB karışımları üretmişlerdir. En düşük taze beton yoğunluğunu 63-300µm, en yüksek taze beton yoğunluğunu 600-1180 µm kum içeren numunelerde tespit etmişlerdir. Fodil vd. [115] tarafından, maksimum tane çapı 15 mm olan kırma kireçtaşı agregası, incelik modülü 2,8 olan dere kumu, süperakışkanlaştırıcı kullanılarak ve su/bağlayıcı oranı 0,135 olan UYPB karışımları üretilmiş, taze beton yoğunluğu ortalama 2509 kg/m³ olarak tespit edilmiştir.

4.2.4. UYPB Karışımlarının Sıcaklık ve Büzülme İlişkisi

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB karışımlarının taze beton sıcaklık ve büzülme ilişkisi Şekil 4.27’de gösterilmiştir.

Rötre/Büzülme, yüklenmemiş ve sınırlandırılmamış betonun zamana bağlı olarak, sabit bir sıcaklıktaki deformasyon ölçüsü olarak tanımlanmaktadır. Bir diğer deyişle, beton içerisindeki suyun çeşitli nedenlerle azalması sonucu beton hacminde ve boyunda meydana gelen değişim rötre olarak ifade edilmektedir [204]. Kompozit bir malzeme olan betonun kuruma rötresi, çok uzun süre boyunca devam etmektedir. Su ile çimentonun birleşmesine takiben başlayan hidratasyon mekanizması, ortam koşulları, betonda kullanılan bileşenler rötre üzerinde önemli rol oynamaktadır. Beton bünyesindeki su kaybı rötre ile doğrudan ilişkili olup, su kaybı makro boşluklardaki suyun buharlaşması ile başlayarak, kılcal boşluklardaki suyun buharlaşması, C-S-H’lerin yüzeylerindeki su kaybı, C-S-H jelinin yapısındaki su kaybı şeklinde devam etmektedir. Su kayıpları sonucunda, beton yapısındaki tanelerin birbirine yaklaşması buna bağlı olarak da büzülme meydana gelmektedir.

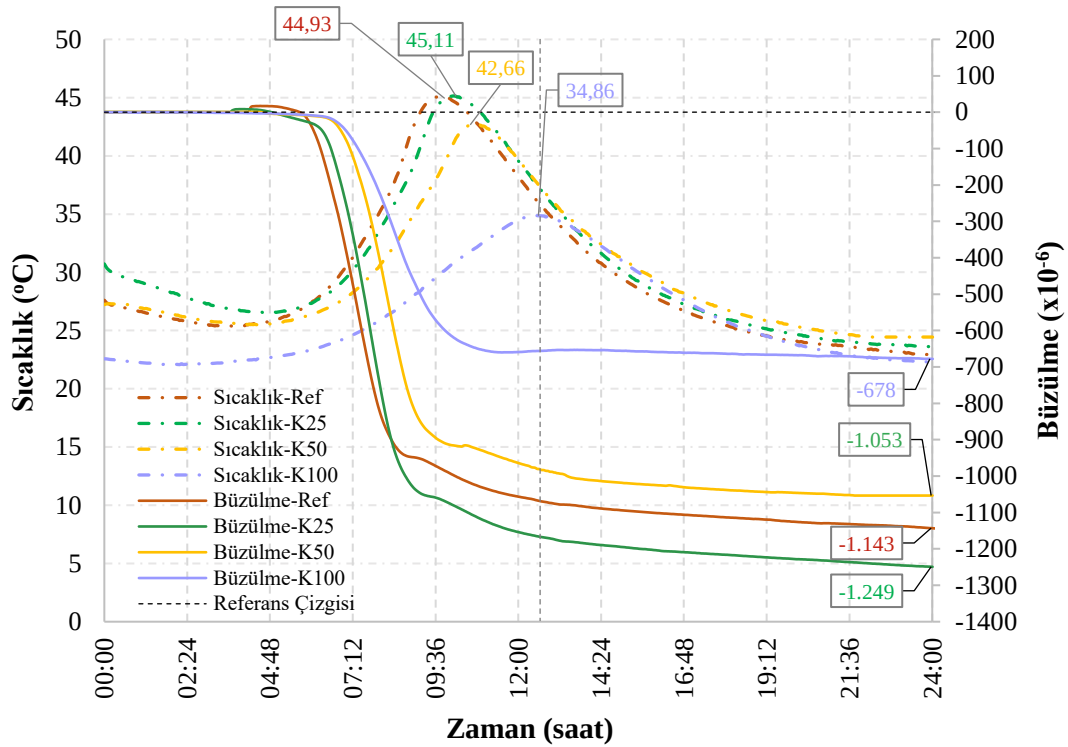
Betonun rötresi, erken ve uzun dönemler olmak üzere iki farklı aşamada gerçekleşmektedir. Erken aşama genellikle betonun priz aldığı ve sertleşmeye başladığı ilk gün yani 24 saate kadar geçen süre olarak tanımlanırken; uzun dönem 24 saat ve

sonrasındaki süre olarak tanımlanabilmektedir. Büzülme tipler, erken aşamada (<24 saat) kuruma, termal, otojen büzülme; uzun dönemde (>24 saat) kuruma, termal, otojen, karbonatlaşma rötresi olarak sınıflandırılabilir. Betonda erken yaşlardaki ısı artışının çimentonun hidratasyonundan kaynaklı olduğu; düşük su/çimento oranına sahip yüksek performanslı betonlarda çimento hidratasyonunun aynı zamanda otojen rötreye de sebep olduğu; dış ortam koşullarının da etkisiyle betondaki sıcaklık değişiminin termal rötreye sebep olduğu bilinmektedir. Betonun ısı gelişimini etkileyen dış ortam koşulları da dikkate alındığında betonda hem içsel hidratasyon reaksiyonları sebebiyle meydana gelen otojen rötreye, hem de termal rötrenin ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Bu nedenle sıcaklık değişimlerine maruz normal koşullar altındaki sertleşen bir betonda termal ve otojen rötreye eş güdümlü olarak deformasyon yaratmaktadır. Ancak dış ortamla ısı alışverişinin olmadığı koşullarda yalnızca otojen rötreye gözlenebilmektedir [205].

Otojen büzülme, bazı araştırmacılar tarafından iç kuruma ve kimyasal rötrenin toplamı olarak ifade edilirken, diğer araştırmacılara göre kimyasal rötrenin bir parçası olarak düşünülmektedir. Kuruma rötresi beton bünyesindeki suyun uzaklaştırılması; otojen rötreye ise suyun içyapıda tüketilmesi ile gerçekleşmektedir. Japonya Beton Enstitüsü [205], çimento hamuru ve betonun otojen büzülmesini, dış çevre ortamına nem aktarılmadan meydana gelen makroskobik hacim değişikliği olarak tanımlamıştır. Otojen büzülmenin çimento taneciklerinin hidratasyonuna bağlı kimyasal büzülmenin bir sonucu olduğunu; kimyasal büzülmenin bir iç hacim azalması iken, otojen büzülmenin bir dış hacim değişikliği olduğu; bu nedenle, otojen büzülmeyi bir beton levha veya başka bir benzer düzenleme üzerinde doğrusal bir değişiklik olarak ölçmenin mümkün olabileceği ifade edilmiştir. Pekmezci vd. [206], otojen rötrenin kimyasal rötreye ile kendiliğinden oluşan kurumanın sebep olduğu rötrenin bir toplamı olarak ifade etmiştir. Mihashi ve Leite [207], otojen rötreyi, çimento hidratasyon reaksiyonlarının devamı için kapiler boşluklardaki nemin çekilmesinin bir sonucu olarak ilk priz sonrası meydana gelen makroskopik hacim değişikliği olarak tanımlamıştır. Holt [205], otojen rötrenin görünür yani makroskopik bir hacim değişimi iken, kimyasal rötrenin içsel yani mikro ölçekte bir hacim değişimi olduğunu ifade etmiştir.

Otojen rötreye, su/bağlayıcı oranı 0,40'dan düşük betonlarda görülmekte, hidratasyon reaksiyonuna bağlı olarak gelişen bir süreç olduğu için önlenmesi ve azaltılması konusu önem teşkil etmektedir. UYPB'lerin düşük su/bağlayıcı oranları ve mikro veya nano boyutta malzemeler içermesinden dolayı kimyasal ve otojen büzülme etkileri yüksektir

[208]–[210]. Beton bünyesindeki su kaybı ve kurumadan kaynaklı bu büzülme, yapısal betonların uzun vadedeki dayanıklılıkları için önemli konular olmaktadır [211], [212]. Rötrenin sebep olduğu betondaki çatlakların azaltılması veya önlenmesi için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Karışımlarda su içeriğinin azaltılması, agrega sertliği ve içeriğinin artırılması, SRA (Rötre Azaltıcı) gibi kimyasal katkıların kullanılması; buharlaşmanın azaltılması ve iyileştirilmiş kür uygulamaları rötre çatlaklarını azaltmada, çatlak gelişimini kontrol etmede önemli yararlar sağlamaktadır [213].



Şekil 4.27. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin sıcaklık, büzülme ilişkisi.

Çalışmada kolemanitin etkisini daha iyi anlayabilmek adına UYPB karışımlarında rötre azaltıcı katkısı kullanılmamıştır. Yaklaşık ilk 6 saatte tüm numunelerin yavaş, 6 ila 9 saat arasında hızlı, 9 ila 24 saat arasında yavaş bir büzülme gösterdiği tespit edilmiştir. Ancak ilk 6 saatte, referans numunede 04:16 ile 05:47; K25 numunesinde 03:42 ile 04:43 saatleri aralığında genleşme meydana gelmiştir (Şekil 4.27). Çok erken aşamada gözlemlenen bu genleşme, Chatterji vd. [214] ve Seo vd. [215] tarafından yapılan çalışmalarda, çimentoda bulunan serbest kirecin hidrasyonu ile ilişkilendirilmiştir. Chatterji vd. [214] serbest kirecin hidrasyonunun, matriste gözenekler oluşturan ve toplam hacimde bir artışa

neden olan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'yi oluşturarak yaklaşık 2,5 kat hacimsel artışa neden olabildiğini belirtmiştir. Bunun yanı sıra tüm numunelere hızlanma periyodundan sonra başlayan hızlı otojen büzülmenin yaklaşık 12:00'ye kadar devam ettiği, daha sonra yavaşlamaya başladığı, yaklaşık 22:00'de çimento hidrasyon işleminin stabilizasyon dönemine girdiği gözlenmiştir (Şekil 4.27). Ghafari vd. [216] tarafından yapılan çalışmada benzer olarak 12 saate kadar tüm örneklerde hızlı otojen büzülme gelişimi gözlenmiştir. Bu hızlı büzülmenin genellikle son derece düşük su/bağlayıcı oranına sahip numunelerde meydana geldiği, düşük su/bağlayıcı oranının taze betonu kendi kendine kurumaya karşı hassalaştırdığı ve yüksek otojen büzülmeye yol açtığı belirtilmiştir. 24 saat sonunda R, K25, K50, K100 numunerinin otojen büzülmeleri sırasıyla 1143×10^{-6} ; 1249×10^{-6} ; 1053×10^{-6} ; 678×10^{-6} $\mu\epsilon$ 'ya ulaşmıştır. En yüksek büzülme K25 numunesinde gözlenmiştir ($\text{K100} < \text{K50} < \text{R} < \text{K25}$). %1 oranında kolemanit katkısı ile K100 numunesi en düşük büzülme değerinde olmuştur. Kolemanit katkısının büzülme yörüngesini değiştirmedeği; 24.saatın sonunda referansa göre K25'de %9,29 büzülme artışının olduğu, K100 ve K50'de ise %7,85 ve %40,68 büzülmenin azaldığı gözlenmiştir (Şekil 4.27). UYPB numunlerin indüksiyon periyodunun yaklaşık 6 saate yakın olduğu görülmekte; bu durumun çimento partiküllerinin yavaş çözünmesiyle ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Bu aşamada çimento parçacıklarının yüzeyleri, hidrasyon reaksiyon sürecini engelleyebilen hidratlı kalsiyum silikat jel ile kaplanmış durumdadır. İndüksiyon periyodundan sonra, yaklaşık 7.saatte hızlanma periyodu başlamaktadır. Hızlanma periyodu R, K25, K50, K100 için 9:52; 10:11, 10:36, 12:35 'inci saatlere kadar sürmektedir. Maksimum sıcaklık değerlerine bakıldığında sırasıyla 44,93; 45,11; 42,66; 34,86°C olduğu, minimum sıcaklığa K100 numunesinin sahip olduğu görülmektedir (Şekil 4.27). Hızlanma periyotlarının tamamlanmasından sonra 12:35 (12 saat, 35.dakika)'de büzülme değerleri sırasıyla -1068, -1166, -981, -656; sıcaklık değerleri ise 36, 37, 38, 35 °C olmuştur. Referansa göre büzülme değerlerine bakıldığında, K25 %9,20 artış, K50 %8,15 azalma, K100 %38,54 oranında azalma; sıcaklık değerlerine bakıldığında, K25 %3,72 artış, K50 %4,22 artış, K100 %3,19 azalma göstermiştir (Şekil 4.27). Ayrıca kolemanit içeren K25, K50 ve K100 numunelerindeki hızlanma periyodunun daha geniş olmasının kolemanitin yapısındaki B_2O_3 'ün karışım içerisindeki konsantrasyon artışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Davraz [135]'ın araştırmasında ifade edildiği gibi karışımdaki B_2O_3 konsantrasyonunun artışı ile tetra hidroksibütirat ($\text{B}[\text{OH}]_4^-$) bileşi çöker ve çimento partiküllerinin hidrasyon reaksiyonunu kısmen veya tamamen engelleyen geçirimsiz bir CBH_6 tabakası oluşturularak, hidrasyon sürecini yavaşlatır

veya süreci tamamen durdurur. Hızlanma periyodundaki çimento hidratasyon ısısının neden olduğu büzülme etkisi, otojen büzülme grafiğinde mikro büzülme olarak kendini gösteren büzülme etkilerinden daha fazla olmaktadır. Hızlanma periyodundan sonra büzülme miktarları azalmaya başlamakta, yaklaşık 22:00'de çimento hidrasyon işlemi stabilizasyon dönemine girmektedir (Şekil 4.27).

Elde edilen sonuçlar, önceki çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Zhang vd. [123], büzülmeyi azaltmak için farklı aktivite seviyelerine sahip üç farklı genleşme ajanı manyezit (R-MEA: Hızlı Reaktivite; M-MEA: Orta Reaktivite; S-MEA: Yavaş Reaktivite) (%3; 6; 9) kullanarak ürettikleri UYPB karışımlarında, tüm numunelerin yaklaşık 5–7 saat arasında yavaş bir genleşme sürecine sahip olduğu, MEA'nın dahil edilmesi ile büzülme yörüngelerinin değişmediğini ve büzülmeyi azalttığını, kontrol grubunun 168 saatte otojen büzülmesinin 713,66 $\mu\epsilon$ 'ya ulaştığı belirtilmiştir. Li vd. [124], kireç tozu ve PCE tipi 4 farklı süper akışkanlaştırıcı (SP1, SP2, SP3, SP4) kullanarak ürettikleri UYPB karışımlarında, süperakışkanlaştırıcı tipinin otojen büzülmede etkili olduğu ve dozajın artırılması ile mutlak otojen büzülme değerinin azaldığı ifade edilmiştir.

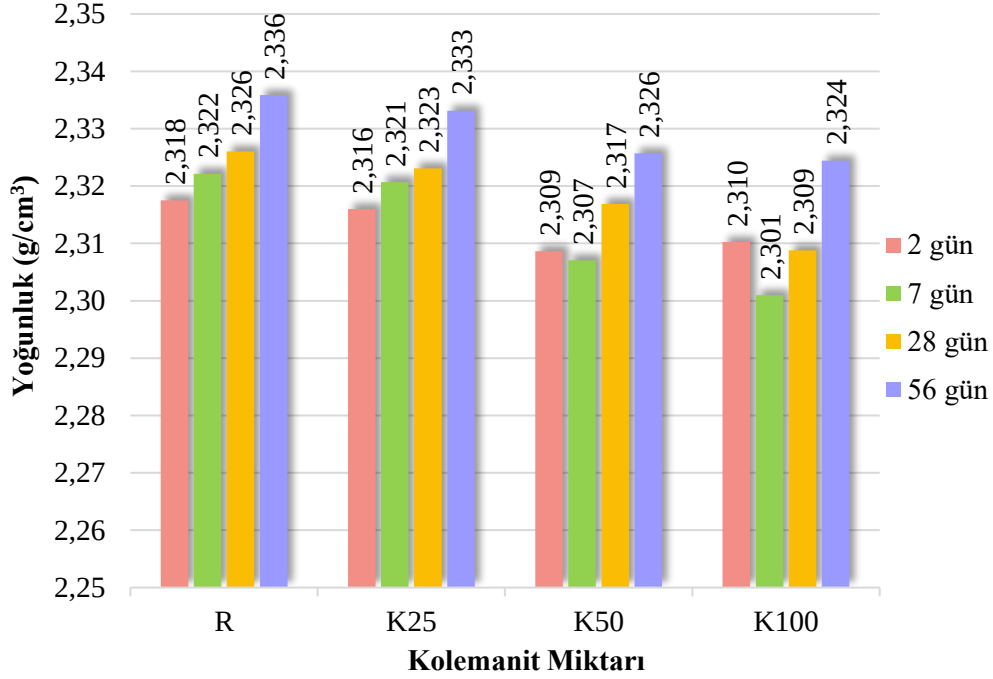
Silis dumanı gibi tane boyutu çok küçük mineral katkıların kullanımı otojen rötrei artırmaktadır. Mineral katkıların otojen rötre üzerindeki etkileri değerlendirildiğinde kullanılan katkının inceliği önemli bir etken olmaktadır. Mineral katkıların inceliği arttıkça beton içerisindeki kılcal boşluklar azalmakta ve boşluk içi gerilmeler artmaktadır. Bu da otojen rötrenin makroskopik ölçekte fiziksel değişiminin görülmesine neden olmaktadır. Bunun yanı sıra kullanılan mineral katkıların dozajının da önemli olduğu ifade edilmektedir. Silis dumanının, betonun gözenek yapısını doldurmasından dolayı otojen rötrenin artışında önemli bir etkisi olduğu tespit edilmiştir [54], [180], [217]. Çalışma kapsamında UYPB karışımlarında kullanılan micro white silis dumanının ince taneli yapısının beton gözenek yapısını doldurarak otojen büzülmede etkisinin olduğu referans UYPB karışımında açıkça görülmektedir (Şekil 4.27).

Test sonuçlarına göre kolemanit katkı miktarının artırılması ile hidratasyon sıcaklığında azalmalar meydana gelmiştir. Ayrıca kolemanitin UYPB üzerindeki büzülmeyi azaltıcı etkisi de doğrulanmıştır. Buna bağlı olarak kolemanit katkısının erken yaşlarda büzülme çatlaklarının yüksek olduğu betonlarda kullanımı ile büzülme çatlaklarının azaltılabileceği veya engellenebileceği düşünülmektedir.

4.3. SERTLEŞMİŞ BETON ÖZELLİKLERİ

4.3.1. UYPB Numunelerinin Yoğunlukları

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkı UYPB numunelerinin 2, 7, 28, 56 günlük yoğunluk değerleri Şekil 4.28’de verilmiştir.



Şekil 4.28. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki yoğunlukları.

Öcenki bölümlerde UYPB karışımlarda elde edilen daha yüksek taze beton hava içeriği ve daha düşük taze beton yoğunluk değerleri ile orantılı olarak sertleşmiş beton birim ağırlıkları daha düşük değerlerde tespit edilmiştir. Elde edilen test sonuçlarına göre kolemanit katkı UYPB numunelerin yoğunlukları tüm günlerde referans numuneye göre azalmıştır. Referansa göre kıyaslandığında kolemanit katkı UYPB numunelerin (K25, K50, K100) yoğunlukları sırasıyla 2 günlük: %0,07; 0,38; 0,31, 7 günlük: %0,06; 0,65; 0,91, 28 günlük: %0,13; 0,39; 0,74, 56 günlük: %0,12; 0,44; 0,49 oranında azalmıştır. 2, 7, 28 ve 56 günlük yoğunluk değerleri incelendiğinde, K100 numunesinin en düşük; R numunesinin en yüksek yoğunluk değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kolemanit katkı miktarlarının az oranlarda kullanılmasından dolayı sertleşmiş beton yoğunluk

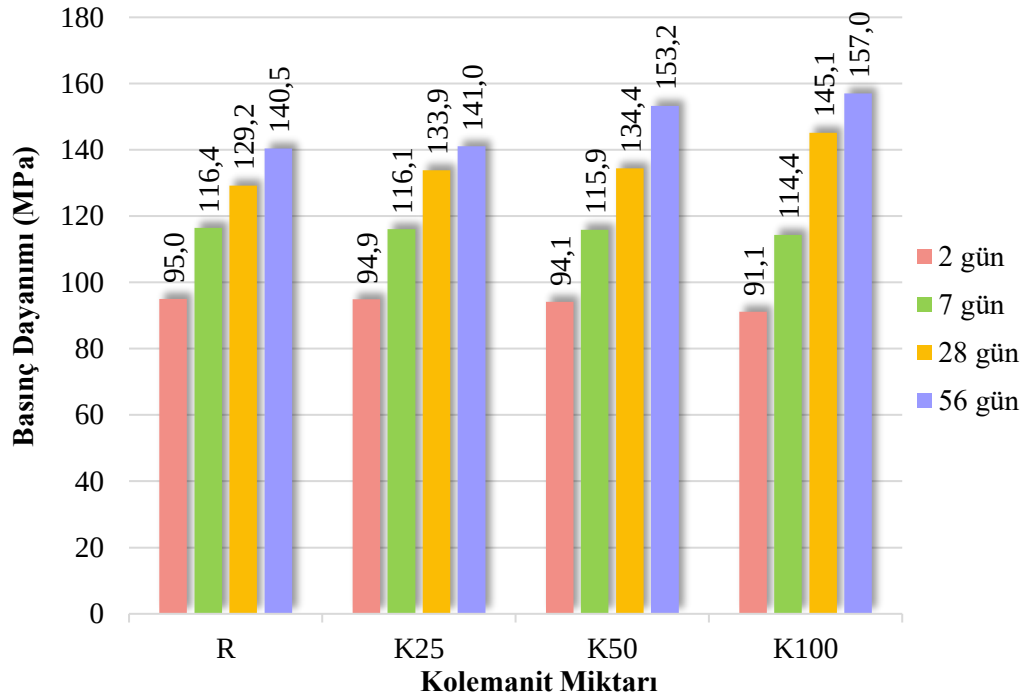
değerleri arasında önemli bir fark görülmemektedir (Şekil 4.28). Bununla birlikte çalışma kapsamında elde edilen 2,301-2,336 g/cm³ yoğunluk değerleri literatürle doğrulanmıştır.

Elde edilen sonuçlar, önceki çalışmalarla benzerlik göstermektedir. Smarzewski vd. [120], ayrı ayrı ve hibrit olarak %0,5; 0,50; 0,75; 1 oranlarında çelik lif (SF, :50, çap: 1 mm) ve polipropilen lif (PF, 1:12 mm, çap:25 µm) kullanarak hazırladıkları UYPB karışımlarında yüksek miktarlarda polipropilen elyafın (PF) beton yoğunluğunu azalttığını ifade etmişlerdir. Dehghanpour vd. [122], kuru premiks NaW3 kuvars, mikro çelik lif (SF: 12 mm/80 µm), cam lifi (GF: 12 mm/10 µm), polivinil lif (PVA: 12 mm/170 µm) kullanarak ve %0,7; 1,3; 2 oranlarında lif ilavesi ile UYPB karışımları hazırlayarak, 18 ay kürleme işlemi sonrasında testler yapmıştır. PVA ve GF lif takviyeli karışımlarda elyaf ilavesiyle yoğunluğun azaldığı, SF lif akviyeli karışımlarda ise arttığı ve bu durumun kendi yoğunlukları ile ilgili olduğu, PVA; GF; SF eklenmiş UYPB'lerin yoğunluk değerlerinin 2,37–2,4; 2,33–2,35 ve 2,44–2,56 aralıklarında olduğu, %2 PVA ve %2 GF içeren UYPB'lerin yoğunluk değerlerinin referans gruba göre %1,66; 2,90 azaldığı ve SF ile güçlendirilmiş UYPB'lerin yoğunluk değerlerini %6,22 artırdığı belirtilmiştir.

Karışımlarda özel dolgu yoğunluğuna sahip ince agrega ve liflerin tercih edilmesi, büyük agregaların kullanılmamasından dolayı UYPB'lerin yoğunluk değerleri geleneksel betonlardan daha fazla olmaktadır. Bunun yanı sıra UYPB matrisinin homojenliği ve optimum paketleme yoğunluğu için kullanılan kuvars kumunun optimum sınıflandırma gerekliliğini karşılamak UYPB üretimindeki zorluklar arasında yer almaktadır [218]. Yoğunluk değerlerinin değişiminin diğer bir nedeni ise kullanılan liflerin dağılımından kaynaklı olmaktadır. Bununla birlikte daha yüksek yoğunluğa sahip lifler, akış yönünde hizalanma ve daha iyi yönelim eğilimi göstermektedirler [219]. Gencel vd. [148], kolemanit katkılı karışımların döküm işlemi sırasında taze betonun kolemanit ile flokülasyonundan kaynaklı olarak tam sıkıştırma elde edilememesi ve artan kolemanit miktarlarına bağlı olarak kolemanitin daha az özgül ağırlığa sahip olmasından dolayı betonların birim ağırlıklarının azaldığını belirtmişlerdir.

4.3.2. UYPB Numunelerinin Basınç Dayanımı

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin 2, 7, 28, 56 günlük basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.29. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki basınç dayanımları.

Elde edilen test sonuçlarına göre kolemanit katkılı numunelerin basınç dayanımları 2 ve 7.günlerde kolemanit artışına bağlı olarak azalmış, ancak 28 ve 56.günlerde artış göstermiştir. Referansa göre kıyaslandığında kolemanit katkılı numunelerin (K25, K50, K100) basınç dayanımları 2 günlük: %0,16; 0,95; 4,11 oranında azalmış, 7 günlük: %0,30; 0,45; 1,78 oranında azalmış, 28 günlük: %3,59; 3,97; 12,30 oranında artmış, 56 günlük: %0,42; 9,10; 11,79 oranında artmıştır. 2 günlük basınç dayanımı 95,04 MPa ile en yüksek R numunesinde, 91,13 MPa ile en düşük K100 numunesinde; 7 günlük basınç dayanımı 116,43 MPa ile en yüksek R numunesinde, 114,36 MPa ile en düşük K100 numunesinde tespit edilmiştir (Şekil 4.29). 2 ve 7.günlerde kolemanit katkı miktarının artması ile basınç dayanımlarının azalması durumunun, SEM görüntüleri ile de teyit edilen kolemanitin hidratasyon ürünlerinin oluşumuna çimento ve silis dumanı kadar katkıda bulunamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bothe ve Brown [220],

çimento karışımlarındaki bazı anyon ve katyonların reaksiyona girmesini sağlayan borun, çimentonun hidratasyonuna etki ettiği, erken yaşlarda kararsız bor bileşiği oluşturduğunu ifade etmişlerdir. Davraz [135], araştırmasında borun çimento partikülleri etrafında CBH_6 tabakası oluşturduğunu belirtmiştir. Kolemanitin suda çözünmesi, karışımın artan su ihtiyacı göz önünde bulundurulduğunda, yapısındaki B_2O_3 'ün karışım içerisindeki konsantrasyonu artırması ve çimento partiküllerinin etrafında CBH_6 tabakası oluşturarak hidratasyon sürecini yavaşlatması ile daha az C-S-H ve CH ürünlerinin oluşumuna sebep olmaktadır. 28 günlük basınç dayanımı 145,14 MPa ile en yüksek K100 numunesinde, 129,25 MPa ile en düşük R numunesinde; 56 günlük basınç dayanımı 157,02 MPa ile en yüksek K100 numunesinde, 140,46 MPa ile en düşük R numunesinde tespit edilmiştir. 28 ve 56.günlerde kolemanit miktarının artması ile basınç dayanımlarının artmasının sebebinin SEM görüntüleri ile de teyit edilen kolemanitin hidratasyon ürünlerinin oluşumuna katkı sağlamış olmasıdır. Davraz [135], araştırmasında karışımlardaki çimento partiküllerinin etrafında oluşan CBH_6 tabakasının Ca^{2+} katyonları oluşturmak üzere tekrar çözünebildiğini ve karışımın pH değerini artırdığını belirtmiştir. 28 ve 56.günlerde çimento partiküllerinin yüzeyini kaplayan CBH_6 kristal tabakalarının çözüldüğü, karışımlardaki kararsız bor bileşiklerinin reaksiyonlar ile yavaşça tüketilmesi sonucu kararlı bileşiklerin oluştuğu, hidratasyon reaksiyonlarının hızlandığı buna bağlı olarak kür süresi boyunca daha fazla hidratasyon ürünü olan C-S-H üretimi ile basınç dayanımlarının arttığı düşünülmektedir.

UYPB basınç dayanımlarında önemli rolü olan ve optimum karışımın elde edilmesinde kullanılan ince malzemeler, yoğun mikro yapı sağlamaktadır [221]. UYPB'ye puzolanik mineral katkısı matrisde CH tüketimini artırarak daha fazla C-S-H jeli oluşumuna sebep olmaktadır [222], [223]. Silis dumanı, betonun mikro boşluklarını azaltmakta, daha fazla C-S-H oluşumu ve agrega-hamur ara yüzey bölgesinin güçlenmesi ile serbest basınç dayanımını artırmaktadır [60], [224]. 28 ve 56.günlerde puzolanik aktivitesinden kaynaklı olarak silis dumanının basınç dayanımında artışa sebep olduğu, puzolanik olmayan kolemanitin ise puzolanik aktiviteyeyi destekleyici etkisi olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kolemanit katkı oranının artmasına bağlı olarak erken yaşlarda basınç dayanımı değerlerinin düşük olduğu, ilerleyen yaşlarda kolemanitin C-S-H oluşumunu destekleyerek basınç dayanımını artırdığı düşünülmektedir. Bunun yanı sıra 45 mikron altı tane boyutu ile kolemanitin mikro dolgu etkisi ile dayanımlarda bir miktar artış sağlamış olacağı düşünülmektedir.

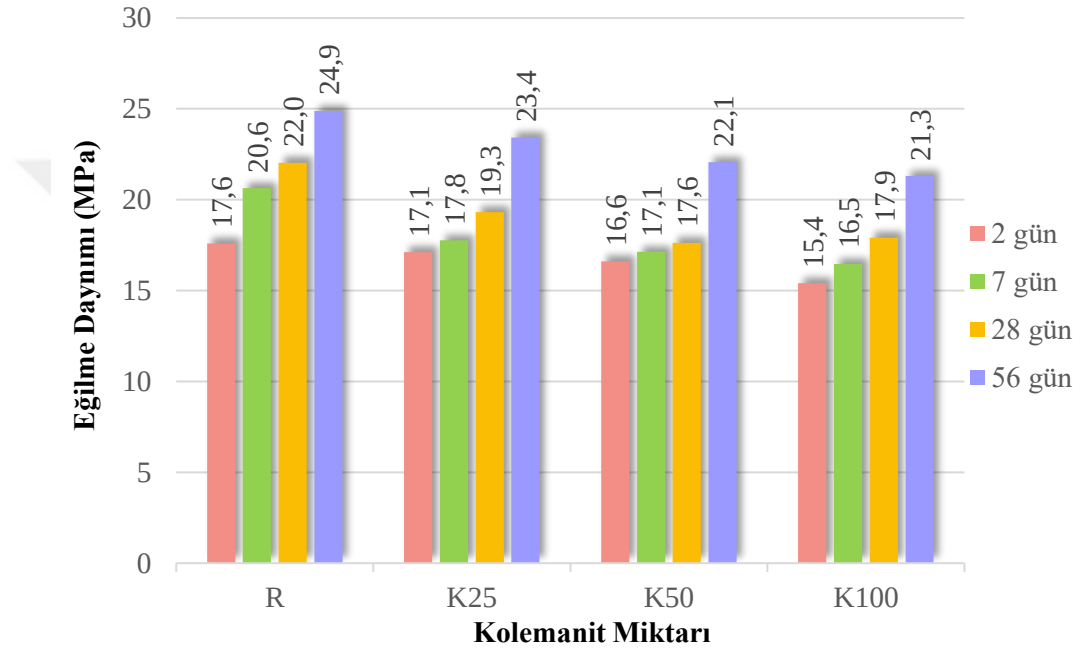
Kolemanit miktarının artışı ile birim ağırlık (yoğunluk) değerlerinde düşüş meydana gelse de, sert yapısı ve gözenekleri doldurma etkisi ile basınç dayanımlarını artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca basınç dayanımı testlerinden sonra numune yüzeylerinde küçük çatlaklar ve çelik liflerle birbirine bağlanan hasarlı parçalarla bütünsel bir yapı gözlenmiştir. Bunların yanı sıra UYPB basınç dayanımı EN 206:2013 [225] standardına göre en az 100 MPa, ASTM C1856 [226] standardına göre en az 120 MPa olarak belirtilmiştir [20]. Dolayısıyla 28 günlük UYPB basınç dayanımları R, K25, K50 ve K100 numuneleri için sırasıyla 129,2; 133,9; 134,4; 145,1 MPa ile standartlarda belirtilen değerlerin üstünde elde edilmiştir.

Kolemanitli UYPB'ler alanındaki çalışmalar sınırlı olsa da, bazı araştırmacılar tarafından kolemanitin çimentolu kompozitler üzerindeki olumlu etkileri bildirilmiştir. UYPB'lere yönelik literatür çalışmaları incelendiğinde, çalışma kapsamında elde edilen basınç dayanımı değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Tuan vd. [108], UYPB betonlarda pirinç kabuğu külünün (PK) farklı oranlarda ikamesi ile etkisini araştırdıkları çalışmada 3,6 ve 9 mm ortalama tane çapında PK içeren UYPB örneklerinin normal kürlleme ile basınç dayanımlarının 91.günde 150 MPa'nın üzerinde olduğunu, PK taneleri inceliğinin basınç dayanımı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu ve ortalama tane çapı 3,6 mm olan PK'nın UYPB dayanımının 28 ve 91.günlerde 180 ve 210 MPa olduğunu tespit etmiştir. Ahmad vd. [109] tarafından, %10-50 oranlarında doğal puzolan (Suudi Arabistan'ın batı bölgesindeki Herrat bazalt platolarından elde edilen volkanik külün ezilmesiyle elde edilen-NP) ikamesi ile hazırlanan UYPB örneklerinde 90 günlükken 150 MPa'nın üzerinde basınç dayanımı elde edildiği, puzolan ve referans UYPB karışımının mukavemetindeki farkın yaşla birlikte azaldığı ve maksimum farkın 90 günlükte %6 civarında olduğu, %30'a kadar NP ikamesinin uygun maliyetli ve çevre dostu üretim için kullanılma potansiyelinin olduğu ifade edilmiştir. Yalçınkaya vd. [118] tarafından, hacimce %1; 2; 3 oranlarında pirinç kaplı çelik-mikro lif ilavesi ile üretilen ve dökümden altı saat sonra buhar kürlleme işlemine tabi tutulan UYPB örneklerinde yapılan çalışma sonucuna göre: tüm karışımlarda %2 ve %3 lif hacmi için 150 MPa'dan daha yüksek basınç dayanımı elde edildiği, lifsiz karışımların basınç dayanımlarının 0,26; 0,22 ve 0,18 su/bağlayıcı oranlarında 121; 140 ve 150 MPa olduğu, lif ilavesinin dayanımları artırdığı belirtilmiştir. Huang vd. [126] tarafından pirinç kabuğu külünün (RHA: 500°C'de kalsine edildi, öğütüldü: 11µm) 1/6-1/3-1/2-2/3-5/6-1 oranlarında silis dumanı ile ikamesi şeklinde üretilen UYPB karışımlarında yapılan test sonuçlarına göre, 2/3 RHA

ikameli numunelerde 3, 28 ve 120 günlük basınç dayanımının 95,6; 136,6; 137,2 MPa olduğu ve kontrol grubuna göre %9,76; %14,50 ve %10,02 arttığı tespit edilmiştir.

4.3.3. UYPB Numunelerinin Eğilme Dayanımı

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin 2, 7, 28, 56 günlük eğilme dayanımı sonuçları Şekil 4.30'da verilmiştir.



Şekil 4.30. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki eğilme dayanımları.

UYPB numnelerinin eğilme dayanımları, tüm günlerde referansa göre daha düşük değerlerde tespit edilmiştir. Referansa göre kıyaslandığında kolemanit katkılı numunelerin (K25, K50, K100) eğilme dayanımları sırasıyla 2 günlük: %2,75; 5,62; 12,44 oranında, 7 günlük: %13,88; 17,00; 20,19 oranında, 28 günlük: %12,28; 19,98; 18,69 oranında, 56 günlük: %5,91; 11,31; 14,39 oranında azalmıştır. 2, 7, 28 ve 56 günlük eğilme dayanımı değerleri incelendiğinde, K100 numunesinin en düşük ve R numunesinin en yüksek eğilme dayanımı değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Kolemanit miktarlarının artması ile tüm günlerde eğilme dayanımı değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Kolemanit katkılı numuneler arasında karşılaştırma yapıldığında, en iyi eğilme dayanımı değeri K25 numunesinde gözlenmiştir. Kolemanitin, basınç

dayanımına olumlu etkisi gözlenirken, eğilme dayanımında bu etki gözlenememiştir (Şekil 4.30).

Portland çimentosunun hidrasyonu sırasında, özellikle nanopartiküllerin yüksek reaktivitesinden dolayı oluşan Ca(OH)_2 'nin hızlı tüketimi ile eğilme dayanımı artmaktadır [227]. Ayrıca çimentolu malzemelere lif eklenmesi ile matris yapıda bir ağ oluşturulması sağlanmakta, çatlak oluşumu ve ilerlemesi geciktirilmekte buna bağlı olarak da mukavemet artışı oluşmaktadır [198], [228]. Bu durum, çatlakların yayılmasını ve gelişimini baskılayan fiber-matris arayüzündeki mekanik kilitleme ve sürtünmeye atfedilmektedir. Bununla birlikte daha fazla lif ilavesi daha fazla çatlak köprüleme etkisi sağlayarak eğilme yükü taşıma kapasitesini artırmaktadır [93]. Bir önceki bölümde kolemanit katkılı numunelerde tespit edilen daha yüksek basınç dayanımı değerlerinin, agrega-bağlayıcı hamur arasındaki aderansın sağlanmasından kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ancak eğilme dayanımlarında basınç dayanımlarının tersi bir durum gözlenmiş, kolemanit miktarının artırılması ile eğilme dayanımlarında düşüş gözlenmiştir. Bu durumun, taze beton fazında daha düşük işlenebilirlik ve daha yüksek hava içeriği ile lif oryantasyonu ve lif homojenliğinin olumsuz etkilenmesi, buna bağlı olarak da lif-matris ara yüzey aderansının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Beton karışımlarındaki toplam lif miktarı, uzun-kısa veya plastik-çelik gibi hibrit kullanım durumları beton eğilme dayanımında önemli olup, bu konuda araştırmalar devam etmektedir. Uzun ve kısa liflerin birlikte kullanıldığı karışımlarda, kısa ve uzun lifler arasındaki oran ve kullanım miktarlarına bağlı olarak UYPB'nin eğilme dayanımları geliştirilmektedir. Kısa liflerin mikro çatlakları ve uzun liflerin makro çatlakları köprülemesi; uzun liflerin sınır alanlar oluşturarak kısa lifleri yönlendirmesi ve dönme alanlarını sınırlaması ile süneklik ve eğilme mukavemeti iyileştirilmektedir [200]. Çalışma kapsamında tek tip çelik lif kullanılmış olup, kolemanit katkılı UYPB'lerde daha düşük eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Sonraki çalışmalarda kolemanit katkılı UYPB'lerin eğilme dayanımları üzerindeki hibrit lif ilavesinin değerlendirilmesi amacıyla, karışımlara kısa ve uzun çelik lifler ilave edilerek araştırma yapılması önerilmektedir.

Literatürde kolemanitli UYPB'ler ile ilgili çalışmalar bulunmamaktadır. Ancak kolemanitin çimento ve betona etkisini inceleyen birçok çalışmada eğilme dayanımlarının azaldığı doğrulanmıştır. Gezmen vd. [127], portland çimentosu ile farklı oranlarda kullanılan kolemanit mineralinin (%0; 2; 4; 6; 8; 10) ve uçucu kül içeren harçların (%0;

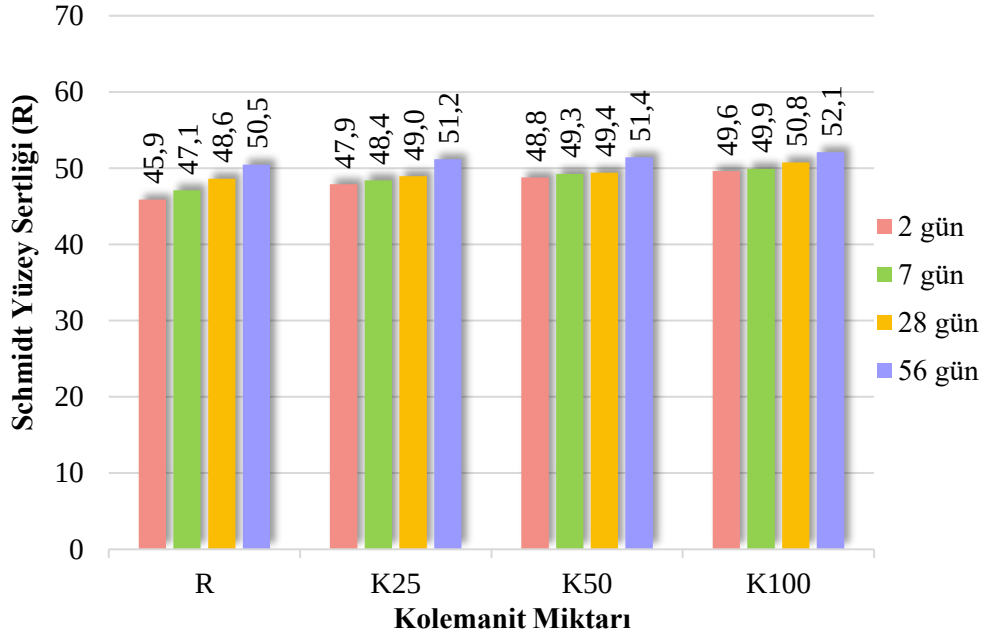
10; 20;30) mekanik özelliklerini incelemek amacıyla yaptıkları çalışmada, kolemanit miktarının artması ile basınç ve eğilme dayanımlarının azaldığını, düşük kolemanit oranında bağlayıcı hamuru ile agrega arasındaki aderansın yeterince sağlanamadığını belirtmişlerdir. Taban vd. [132], kolemanit, zeolit, perlit ve dolomitin %10 ve 20 oranlarında çimento ile ikamesi ile gerçekleştirdiği çalışmada, çimento harç numunelerinin 7-28 günlük eğilme ve basınç dayanımlarında en düşük değerlerin kolemanit katkılı numunelerde olduğunu tespit etmiştir. Binici vd. [134], barit, kolemanit, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomza içeren harçların mekanik dayanımı incelemek amacıyla %2,5; 5; 10 oranlarında barit, cüruf ve pomza ve %0,25; 0,5; 0,75 oranlarında kolemanit ağırlıkça ikame ederek gerçekleştirdikleri çalışmada, eğilme ve basınç erken dayanımlarının kolemanit ikame oranı artışı ile azaldığını ancak ileri yaşlarda dayanım değerlerinin arttığını ifade etmişlerdir. Yu vd. [48], uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve kireç tozu (KT) kullanarak ürettikleri UYPB’lerde su/bağlayıcı oranının artmasıyla (0,18'den 0,20'ye), UYPB karışımlarının dayanımlarının azaldığını belirtmiştir. Huang vd. [126], 1/6; 1/3; 1/2; 2/3; 5/6; 1 oranlarında pirinç kabuğu külü (RHA, 500°C'de kalsine edildi, öğütüldü: 11µm) ikamesi ile hazırladıkları UYPB’lerde, RHA’nın artması ile 3 günlük eğilme mukavemetinin iyileştirilirken, 28 ve 120 günlerde çok az değişikliklerin olduğu ifade edilmiştir.

4.3.4. UYPB Numunelerinin Schmidt Yüzey Sertliği

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin 2, 7, 28, 56 günlük schmidt sonuçları Şekil 4.31’de verilmiştir.

Tahratsız beton deneylerinde kullanılan Schmidt çekici, yüzey sertliğini ölçen bir test cihazı olarak kullanılmaktadır [229]. 30~50 mm kalınlığındaki dış beton katmanını temsil eden Schmidt çekici değeri, betonun yüzey sertliğine dolayısıyla karışım içerisinde yer alan malzeme ve beton yapısına bağlı olmaktadır [230]. Dayanımı düşük betonlarda mikroyapısal agrega pürüzlülüğü ve agrega-çimento arasındaki zayıf bağın neden olduğu boşluklar Schmidt değerlerinin düşmesine neden olmaktadır [231]. Bununla birlikte ince taneli minerallerin mikro ve makro gözenekleri doldurması da Schmidt yüzey sertliği değerleri ile doğrudan ilişkili olmaktadır. Ayrıca Xu ve Li [232] tarafından yapılan araştırmada, tek bir beton parçasının farklı konumlarındaki Schmidt değerlerinin birbirine yakın olduğu bulunmuştur. Pekgöz vd. [233], geniş alana sahip yeni yapılmış bir binanın elemanlarına schmidt çekici uygulanması ile elde edilen veriler ile tasarım aşamasındaki

hedeflenen verilerin karşılaştırılmasının yapılarak değerlendirilmesinin kontrol amaçlı yapılabileceği ifade edilmiştir. Dış etkenlere karşı korumada özellikle cephe kaplaması olarak tercih edilen UYPB yapı elamanlarının yüzey sertliklerinin değerlendirilmesi önem arz etmekte ve bu alanda araştırmalar devam etmektedir.



Şekil 4.31. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki schmidt değerleri.

UYPB numnelerinin schmidt değerleri incelendiğinde, tüm günlerde kolemanit katkılı numuneler referansa göre daha yüksek değerlerde tespit edilmiştir. Kolemanitin sert mineral yapısından dolayı, kolemanit katkı oranının artışı ile yüzey sertliği değerlerinde de artış görülmüştür. Referansa göre kıyaslandığında kolemanit katkılı numunelerin (K25, K50, K100) Schmidt yüzey sertliği değerleri 2 günlük: %4,43; 6,38; 8,19 oranında, 7 günlük: %2,77; 4,63; 6,01 oranında, 28 günlük: %0,69; 1,63; 4,37 oranında, 56 günlük: %1,42; 1,88; 3,17 oranında artış göstermiştir (Şekil 4.31).

Schmidt çekici yüzey sertliğinin yanı sıra yaklaşık basınç dayanımı tahmini için de sık kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır [234]. Önceki bölümde elde edilen basınç dayanımı değerleri incelendiğinde 2 ve 7.günlerde Schmidt değerleri ile ters orantılı, 28 ve 56.günlerde doğru orantılı bir durum tespit edilmiştir. Bu durumun, kolemanit katkılı

UYPB'lerin erken yaşlarda basınç dayanımlarının Schmidt çekici ile değerlendirilmesinin, gerçeği yansıtmayan veri üretimine sebep olacağı düşünülmektedir.

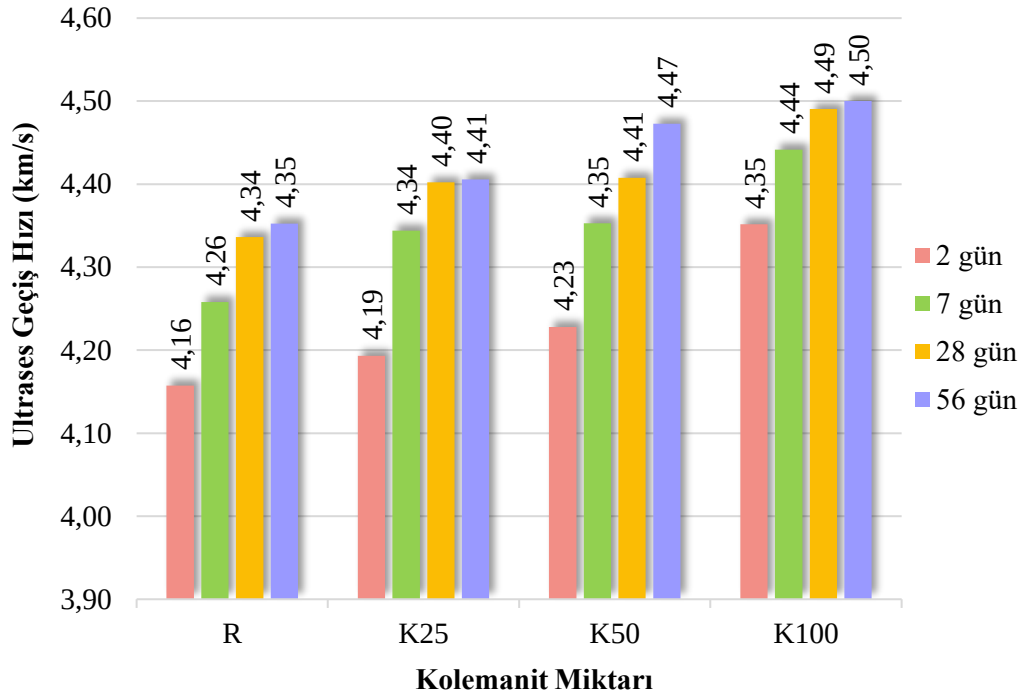
Elde edilen schmidt yüzey sertliği sonuçları literatürdeki çalışmalara benzer olarak elde edilmiştir. Dehghanpour vd. [122] kuru premiks NaW3 kuvars, silis kumu, mikro çelik lif (SF: 12 mm/80 μ m), cam lifi (GF: 12 mm/10 μ m), polivinil lif (PVA: 12 mm/170 μ m) kullanarak, %0,7; 1,3; 2 oranlarında lif ilavesi ile hazırladıkları UYPB karışımlarını 18 ay kürlenme işlemi sonrasında test etmişlerdir. Schmidt yüzey sertliği değerlerinin, basınç dayanımı sonuçlarına benzer olduğu, en yüksek sertlik değerlerinin SF takviyeli numunelerde elde dildiği, tüm karışımlarda ortalama geri tepme değerlerinin 49,00 ile 53,50 R arasında olduğu açıklanmıştır. Sevim vd. [141], %3; 5; 10; 15 oranlarında kolemanit atığının çimento ile ikamesi ürettikleri beton numuneler üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, schmidt çekiç test yöntemi ile yaklaşık hesaplanan basınç dayanımı değerlerinin 0.50 su/bağlayıcı, tüm ikame oranları ve 7, 28, 90, 180.günlerde kontrol numunesine yakın; 0.60 su/bağlayıcı, tüm ikame oranları ve 7, 28.günlerde kontrol numunesine yakın ve 90-180.günlerde daha yüksek olduğu ifade edilmiştir. Kara vd. [143] tarafından yapılan çalışmada, kolemanit çimentoya ağırlıkça %0; 1; 2; 3; 4; 5 oranlarda ikame edilerek beton numuneler hazırlanmış, 28 gün standart kür sonrasında 90. güne kadar NaCl çözeltisine maruz bırakılmıştır. Kontrol numuneleri ve NaCl çözeltisine maruz bırakılan %1; 2; 3; 4 kolemanit ikameli numnuelerin schmidt çekici değerlerinin arttığı belirtilmiştir.

4.3.5. UYPB Numunelerinin Ultrases Geçiş Hızı

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin 2, 7, 28, 56 günlük ultra ses geçiş hızı sonuçları Şekil 4.32'de verilmiştir.

Çimentolu malzemelerin içyapısındaki boşluk oranı ile dalga hızı arasında ters orantılı bir durum söz konusu iken, yoğunluk ve dalga hızı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Ses dalgalarının kaynak nokta ile alıcı arasında gideceği mesafenin, geçen süreye oranı ile penetrasyon oranı tespit edilmektedir. Dolayısıyla daha fazla boşluğa sahip matris yapı için gerekli olan süre artmakta, ultrasonik penetrasyon katsayısının düşmesine neden olmaktadır [235]. Bu durum değerlendirildiğinde, betonların fiziksel ve mekanik özelliklerini etkileyen en önemli parametreler arasında boşluk oranı yer almaktadır. Buna bağlı olarak daha geçirimsiz UYPB üretmek için tercih edilen

malzemeler, lif tipleri ve miktarları önemli konular arasında olup, bu alandaki araştırma çalışmaları devam etmektedir.



Şekil 4.32. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki ultrases geçiş hızları.

UYPB numnelerinin ultrases geçiş hızı (UGH) değerleri incelendiğinde, tüm günlerde kolemanit katkılı numuneler referansa göre daha yüksek değerlerde tespit edilmiştir. Referansa göre kıyaslandığında kolemanit katkılı numunelerin (K25, K50, K100) ultrases geçiş hızı değerleri 2 günlük: %0,87; 1,70; 4,68 oranında, 7 günlük: %2,01; 2,22; 4,31 oranında, 28 günlük: %1,52; 1,64; 3,56 oranında, 56 günlük: %1,23; 2,77; 3,40 oranında artış göstermiştir. Kolemanit miktarının artışı ile ultrases geçiş hızı değerlerinde artış görülmüş, buna bağlı olarak gözenek yapısı azaltılmış, daha geçirimsiz betonlar elde edilmiştir (Şekil 4.32).

Geleneksel test yöntemleri ile incelenen betonların mikroyapısal ve fizikokimyasal özellikleri hakkında bilgi edinilememektedir. Ultrases geçiş hızı (UGH) test yöntemi, betonun mikroyapısal değişimlerini ve dayanımını incelemek için birçok araştırmacı tarafından önerilmiştir. Birçok çalışmanın sonucuna göre UGH değerleri ile çimento hidratasyonu arasında güçlü bir ilişki olduğu doğrulanmıştır [236]. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde erken yaşlarda UGH değerlerinin daha düşük olması çimentonun

hidratasyon ürünlerinin daha az olması durumundan kaynaklanmaktadır [237]. Whitehurst, yaklaşık 2400 kg/m³ yoğunluğa sahip beton için 4500 m/s ve üzeri, 3500 - 4500, 3000 - 3500, 2000 - 3000 ve 2000 m/s ultra ses geçiş hızı değerleri için betonları sırasıyla mükemmel, iyi, şüpheli, zayıf ve çok zayıf olarak sınıflandırmıştır. Ancak Jones ve Gatfieldb ise iyi kalitedeki beton için alt sınırı 4100 ile 4700 m/s arasında olduğunu ifade etmiştir [238]. Yine literatürde [239]–[241] ultrases geçiş hızı değeri 3,660 ile 4,575 km/s arasında olan betonların dayanıklılıklarının daha iyi olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında UPV sonuçları değerlendirildiğinde tüm numunelerde ultrases geçiş hızı değeri 3,660 km/s'den daha yüksek elde edilmiştir. SEM görüntüleri ile de teyit edilen kolemanit katkı miktarının artırılmasına bağlı olarak UYPB numunelerinin mikro yapılarının iyileştirilmesi sağlanmış, 4,16-4,50 km/s UGH değerleri elde edilmiştir.

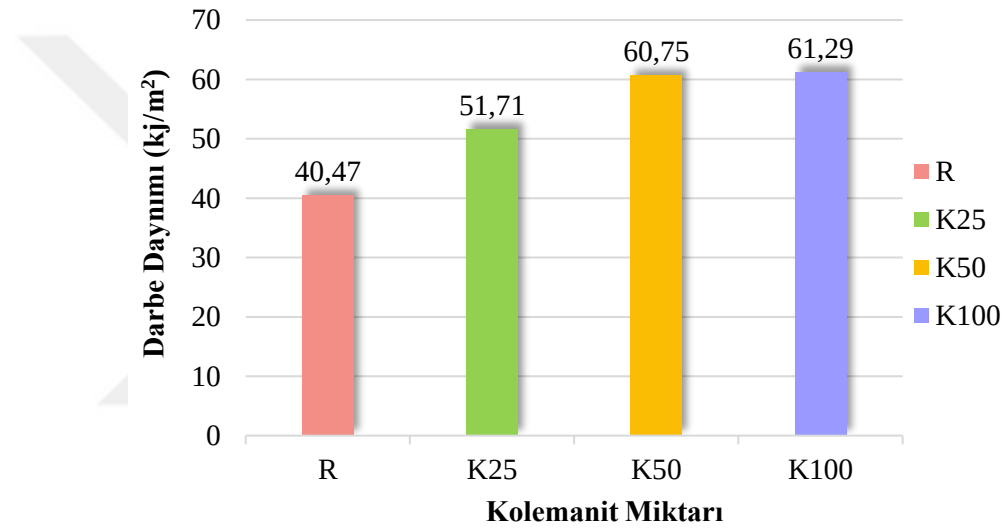
Elde edilen UGH değerleri literatür ile karşılaştırılarak [112], [114], [115], [122] doğrulanmıştır. Faried vd. [112], nano pirinç kabuğu külü ilaveli UYPB'lerde 4,8-5,00 km/s; Fodil vd. [115], kırma kireçtaşı agregası ve dere kumu ilaveli UYPB'lerde 3.günde 60 MPa'lık beton dayanımı için yaklaşık 4800 m/s ve 91.günde 85 MPa'lık beton dayanımı için 5000 m/s; Dehghanpour vd. [122], kuru premiks NaW3 kuvars ve lifli UYPB'lerde 18 ay kürlenme işlemi sonrasında 4,16-4,50 km/s olarak tespit etmiştir.

4.3.6. UYPB Numunelerinin Darbe Dayanımı

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin 56 günlük darbe dayanımı sonuçları Şekil 4.33'de verilmiştir.

Statik denge konumundan uzaklaştırılarak bırakılan bir yapı veya yapı elemanı titreşim hareketi yapmakta, bu durumda dış zorlama etkisi olmadığı durumda doğal titreşim hareketi olarak tanımlanmaktadır. Doğal titreşim hareketinin bir kez tekrarlanması için geçen süre de doğal titreşim periyodu olarak ifade edilmektedir. Yapı veya yapı elemanının doğal titreşim periyodunun üçte birinden daha kısa sürede dış etkiye maruz kalma durumu darbe olarak tanımlanmaktadır [242]. Yapı elemanı malzemesinin dayanıksız olması ve darbe etkisine maruz kalması durumunda, gerilmelerin ani olarak yükselmesi ile çatlakların oluşması ve bu çatlakların ilerlemesi sonucu yapı elemanı dayanımını yitirmektedir [243]. Anık (1999), bir elemanın darbe dayanımının, enerji yutma kapasitesi ile doğrudan ilişkili olduğunu; gerilme-birim şekil değiştirme grafiğinin altında kalan alanı ifade eden tokluğun yüksek olması için malzemenin sünek ve yüksek dayanıma sahip olması gerektiğini ifade etmiştir [244]. Sarkaç darbe deneyleri, dinamik

bir yük etkisindeki malzemenin kırılması için harcanan potansiyel enerjinin ölçülmesi ile gerçekleştirilmekte olup, ölçüm ile elde değer malzemenin darbe dayanımını vermektedir. Beton elemanların darbe dayanımlarını arttırmak için iki yaklaşım değerlendirilmektedir. Birinci yaklaşımda yüksek dayanımlı matris yapısı, düşük su/bağlayıcı oranı, yüksek miktarda ince agrega içeriği, düşük oranlarda maksimum çapta kırmataş agrega kullanımı, lif ilavesi; İkinci yaklaşımda ise beton elemanın dış kısmının kinetik enerjiyi soğurabilen malzemeler ile kaplanması ile dayanım ve tokluğun artırılması hedeflenmektedir [245], [246].



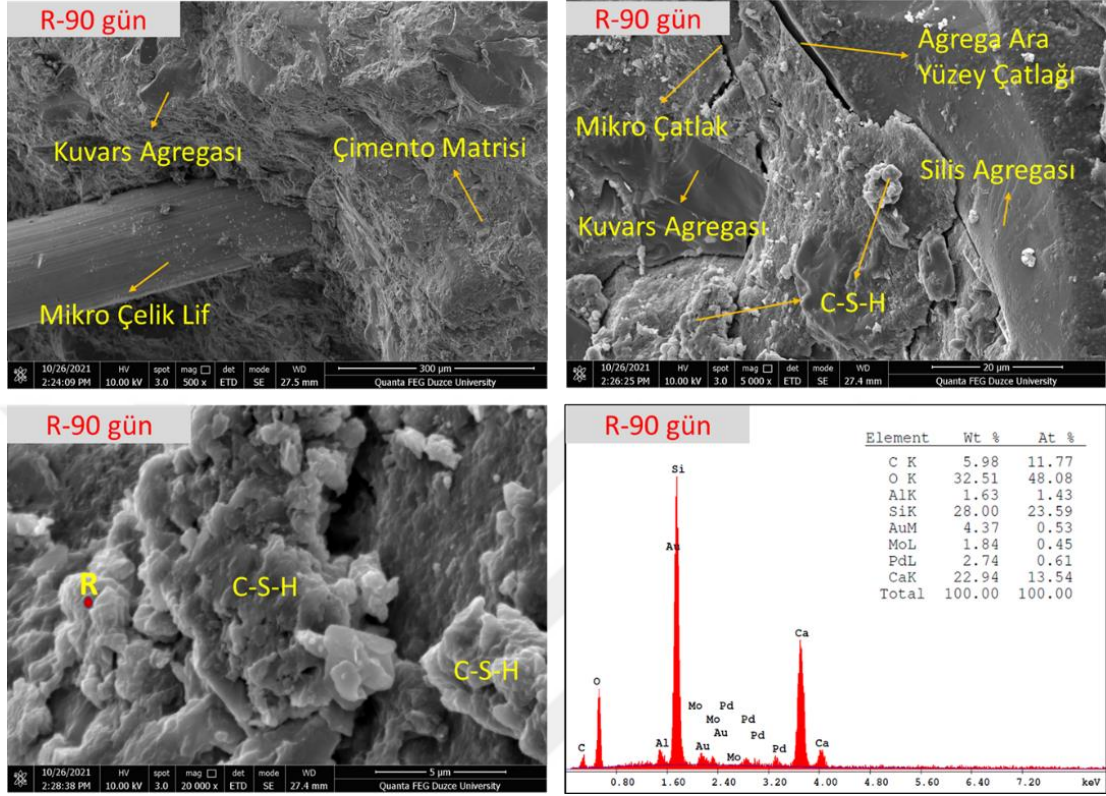
Şekil 4.33. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin 56 günlük darbe dayanımları.

UYPB numunelerinin darbe dayanımı değerleri incelendiğinde, kolemanit katkı numuneler referansa göre daha yüksek değerlerde tespit edilmiştir. Kolemanit katkı oranının artışı ile darbe dayanımı değerlerinde de artış görülmüştür. Referansa göre kıyaslandığında kolemanit katkı numunelerin (K25, K50, K100) darbe dayanımı değerleri %27,77; 50,10; 51,42 oranlarında artış göstermiştir. Beton dayanımını etkileyen tüm parametreler, betonun tokluk özelliğini dolayısıyla darbe dayanımları etkilemektedir. Elde edilen sonuçlara göre optimum karışım oranlarının belirlenmesi ile hazırlanan kolemanit katkı UYPB numunelerinin mikro yapıları iyileştirilmiş, karışımlara lif eklenmesi ile yüksek dayanımlı ve enerji yutma kapasitesi artırılmış betonlar elde edilmiştir (Şekil 4.33).

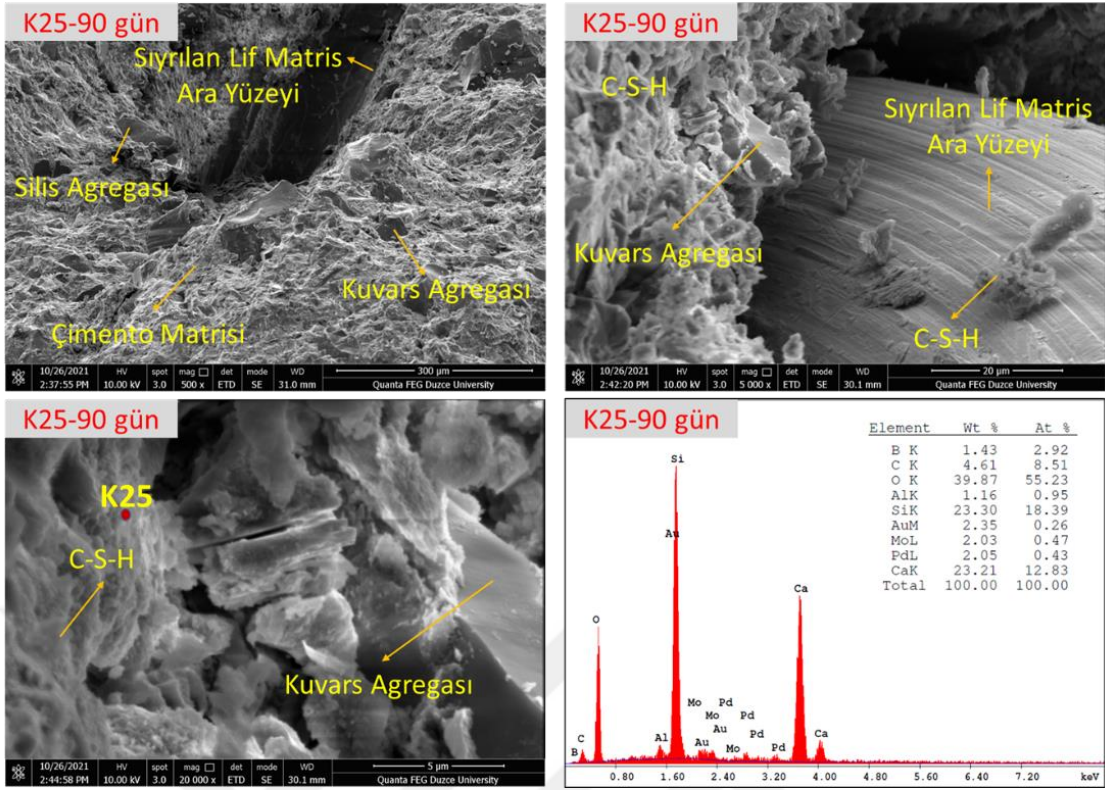
Thomas vd. [116], su indirgeyici kullanılarak ürettikleri UYPB numunelerinde, 28 günlük Charpy darbe dayanım değerlerinin 1.48 kJ/m ile en yüksek S1 (s/b: 0,20; sf: 0, 20; >595 um), 1.05 kJ/m ile en düşük W2 (s/b: 0,22; sf:020; <595 um) numunlerinde olduğunu belirtmiştir. Darbe dayanımındaki enerji emiliminin su/bağlayıcı, silis dumanı ikame oranı ve agrega gradasyonu ile yüksek ilişkisinin olduğu, ayrıca enerji emilim değerlerinin, basınç dayanımı ile zayıf bir ilişkisi olduğu ifade edilmiştir. Yalçınkaya vd. [118], farklı oranlarda (%0; 1; 2; 3) pirinç kaplı çelik-mikro lif (çap: 0,16 mm; l:6 mm) ilaveli UYPB'ler üreterek, dökümden altı saat sonra buhar kürleme işlemi uygulamışlardır. Lifin hacim oranındaki artışı ile darbe dayanımlarının arttığı, en yüksek lif oranında (%3) 8 joule üzerinde emilme enerjisi elde edildiği belirtilmiştir. Yu vd. [119], uzun düz çelik lif (LSF-13/0,2 mm), kısa düz çelik lif (SSF-6/0,16 mm), kanca uçlu çelik lif (HF-35/0,55) ayrı ayrı ve hibrit olarak kullanılarak UYPB numuneler üretmişlerdir. Kısa düz çelik lif hacim oranının artmasıyla, 7 ve 28. günlerde emilen darbe enerjisinin doğrusal olarak azaldığı, hacim oranlarının 0'dan 1'e yükseltildiğinde darbe enerjisi emiliminin 7.günde 45,6 J'den 22,3 J değerine ve 28.günde 69,1 J'den 28,4 j değerine düştüğü belirtilmiştir. Uzun düz çelik liflerin enerji dağıtma kapasitesinin geliştirilmesinde önemli bir rol oyandığı, hibrit çelik liflerin eklenmesi ile darbe direnci ve enerji emme kapasitesinin iyileştirildiği, tek boyutlu fiberler ve hibrit çelik fiberler için hesaplanan darbe dayanımı değerlerinin sırasıyla 2248,5 J ve 3951,8 J olduğu ifade edilmiştir.

4.3.7. UYPB Numunelerinin Mikro Yapı Analizleri

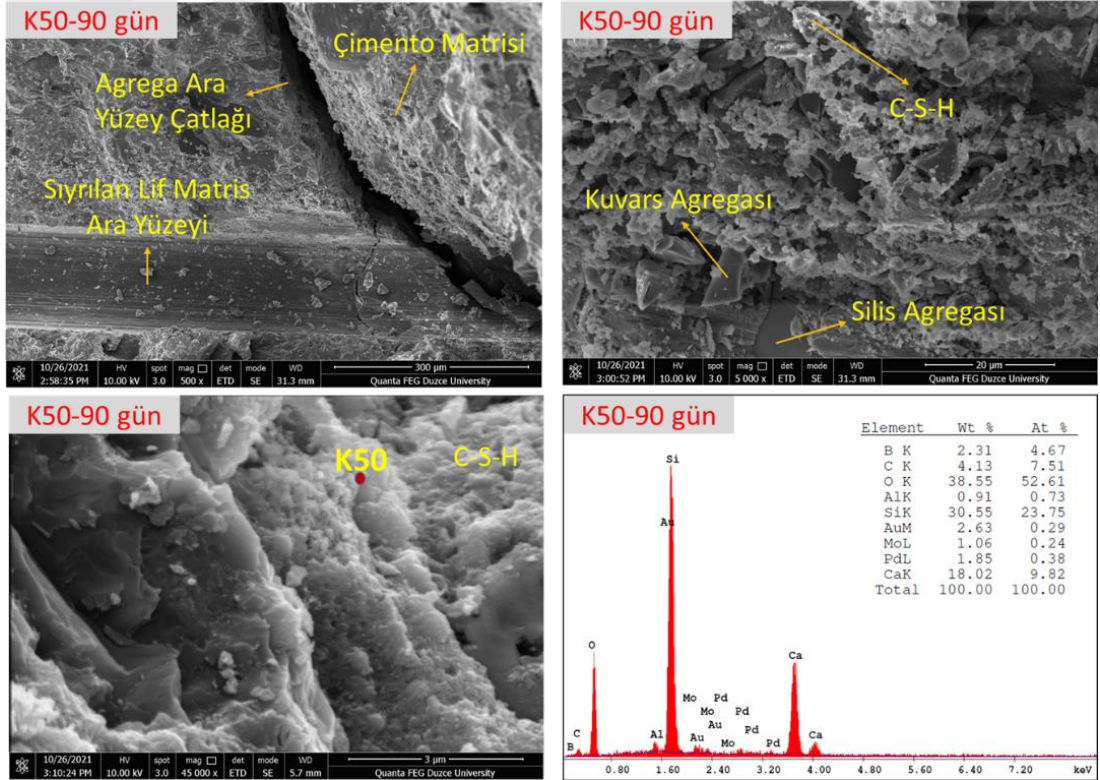
Referans ve kolemanit katkılı UYPB numunelerinin (R, K25, K50, K100), 90 günlük SEM mikro yapıları Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37’ de verilmiştir.



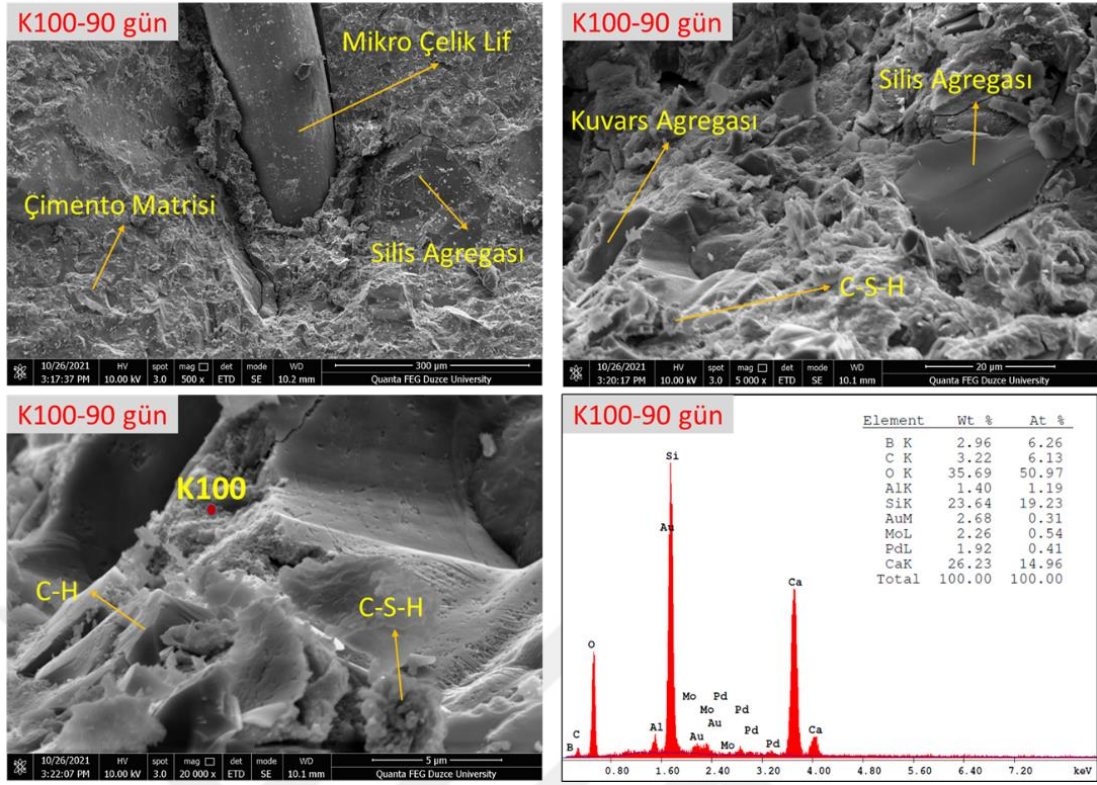
Şekil 4.34. R Kodlu UYPB numunesinin 90 günlük SEM görüntüleri.



Şekil 4.35. K25 Kodlu UYPB numunesinin 90 günlük SEM görüntüleri.



Şekil 4.36. K50 Kodlu UYPB numunesinin 90 günlük SEM görüntüleri.



Şekil 4.37. K100 Kodlu UYPB numunesinin 90 günlük SEM görüntüleri.

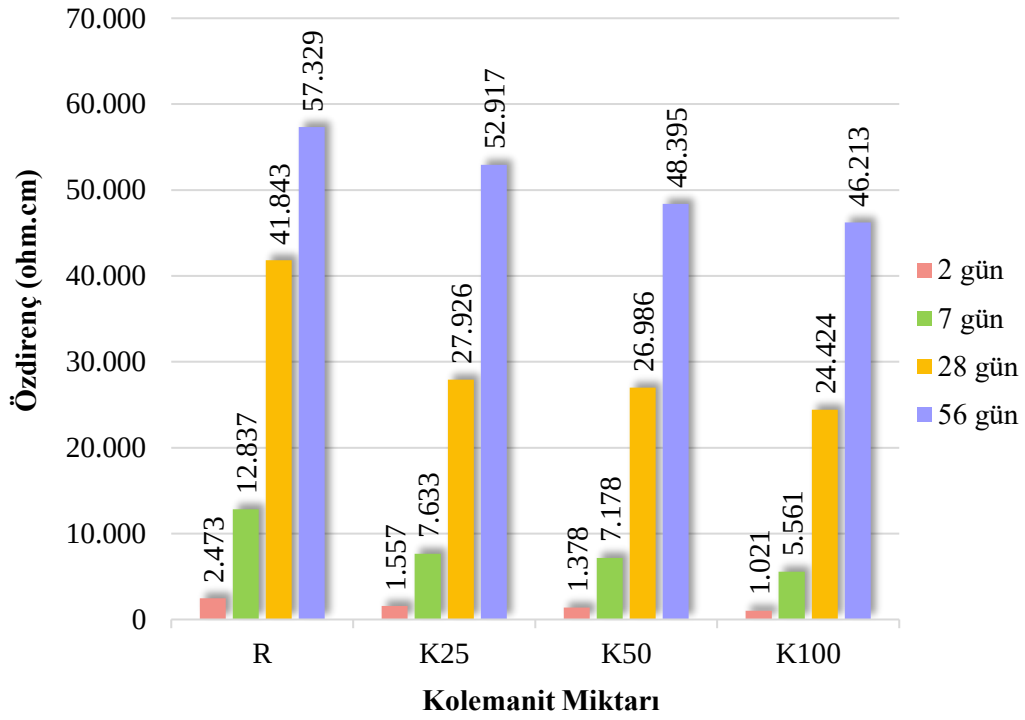
SEM görüntüleri incelendiğinde, kolemanit katkıli numunelerde hidrasyon ürünlerinde artış, C-S-H yapısında yoğunlaşma, reaksiyon ürünleri ile dolan boşluklar buna bağlı olarak daha stabil bir yapı gözlemiştir. Bunun yanı sıra 90 günlük EDS analizlerinde ana elementlerin tüm numuneler için Ca, Si olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla, kolemanit katkısının mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Ayrıca UYPB kırılma yükleri aşıldığında pürüzsüz bir yüzeye sahip olan mikro çelik liflerin matris içerisinden sıyrıldığı, mikro çelik liflerde herhangi kopmanın meydana gelmediği görülmektedir (Şekil 4.34, Şekil 4.35, Şekil 4.36, Şekil 4.37). Farklı boylarda ve geometrilerde hibrit lif kullanımı ile lif matris aderansının artırılabilceği, böylece çekme ve eğilme dayanımlarında kayda değer bir artış sağlanabileceği düşünülmektedir.

4.4. UYPB NUMUNELERİNİN DURABİLİTE ÖZELLİKLERİ

4.4.1. UYPB Numunelerinin Elektriksel İletkenliği

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin 2, 7, 28, 56 günlük ıslak koşullarda ölçülen elektriksel özdirenç sonuçları Şekil 4.38’de verilmiştir.

Heterojen kompozit yapısı ve gözeneklerinin doygunluk derecesine bağlı olarak (yani, nem içeriği) beton farklı iletken özellikler sergilemektedir. Beton ıslak durumda iken düşük elektriksel özdirenç, kuru durumda ise daha yüksek özdirenç göstermektedir. Bunun yanı sıra betonun elektriksel iletkenliği doğrudan ölçülememekte, özdirenç değerinin ölçülmesi sonrasında ilgili formüller ile hesaplanarak bulunabilmektedir [247]. Çimentolu malzemelerde dolgu malzemeleri kullanımı ile elektriksel özdirenç değerlerinde iki farklı durum meydana gelmektedir. Kullanılan dolgu malzemesinin iletken olması durumunda betonda elektrik akımının daha iyi iletilmesi ile betonun özdirenç değeri düşmektedir. Kullanılan dolgu malzemesinin yalıtkan olması ve gözeneklerin doldurulması durumunda betonda elektrik akım yolu kapatılmakta ve betonun öz direnci artmaktadır. Bunun yanı sıra dolgu malzemesi dozajının optimum miktardan fazla kullanılması durumunda beton yapısında gözenek miktarının artması ve gözeneklerde nem bulunmasıyla beton özdirencinin azalmaktadır [122], [248]. Khalaf ve Wilson [249], taze ve sertleşmiş betonun elektriksel özelliklerini inceledikleri çalışma sonuçlarına göre, çimento hamurunun betonun elektriksel direncini kontrol eden temel faktör olduğu, ince ve iri agregaların taze betonda sertleşme öncesi su hareketinde önemli rol oynadığı, çimento hamurunun yapısındaki kimyasal değişimlerin betonun elektriksel iletkenliğini etkilediği, taze çimento hamurunun elektriksel öz direncinin, taze betonunkinden daha düşük olduğu ve bunun sebebinin iri agrega ve kum içeren betona kıyasla daha iyi iletkenlik sağlayan ince çimento taneleri olduğu ifade edilmiştir. Betonun elektriksel öz direncinin yüksek seviyelerde olduğu farklı çalışmalarla [250], [251] doğrulanmıştır. Ayrıca farklı araştırmacılar tarafından yapılan çalışmalarda yarı iletken davranışı gösteren doymuş betonun öz direnci sırasıyla 100 $\Omega.m$ ve 106 $\Omega.m$ olarak belirlenmiştir [247], [252].



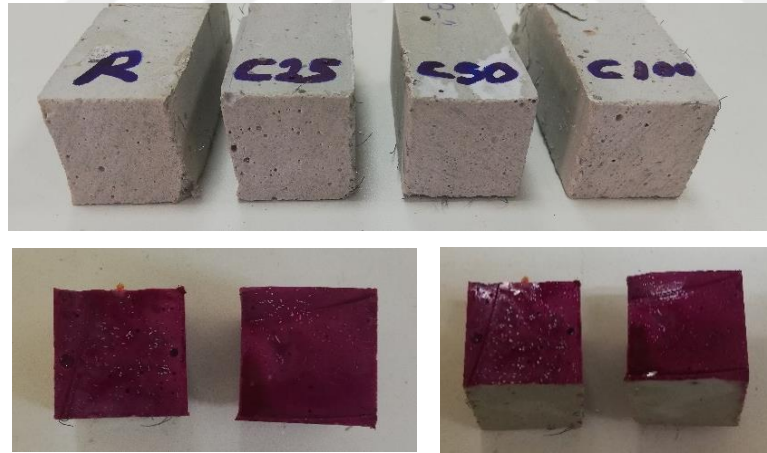
Şekil 4.38. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin farklı yaşlardaki özdirençleri.

UYPB numunelerinin elektriksel özdirenç değerleri incelendiğinde, kolemanit katkısının artışına bağlı olarak numunelerin elektriksel iletkenliklerinin arttığı, özdirenç değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Referansa göre kıyaslandığında kolemanit katkılı numunelerin (K25, K50, K100) özdirenç değerleri sırasıyla 2 günlük: %37,04; 44,30; 58,72 oranında, 7 günlük: %40,54; 44,09; 56,68 oranında, 28 günlük: %33,26; 35,51; 41,63 oranında, 56 günlük: %7,70; 15,58; 19,39 oranında azalmıştır. 2, 7, 28 ve 56 günlük özdirenç değerleri incelendiğinde, K100 numunesinin en düşük, R numunesinin ise en yüksek özdirenç değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir. Özdirenç değerleri 2 günlük: 1021-2473 Ω .cm, 7 günlük: 5561-12837 Ω .cm, 28 günlük: 24424-41843 Ω .cm, 56 günlük 46213-57329 Ω .cm aralıklarında elde edilmiştir. Dolayısıyla kolemanit katkı oranının artırılması ile UYPB numunelerinin elektiriksel iletkenliklerinin doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra ilerleyen yaşlarda beton boşluk suyunun hidratasyon sürecinde tüketilmesi ile elektiriksel iletkenliğinin azaldığı ancak kolemanit katkı oranının artması ile elektriksel iletkenliğin arttığı görülmektedir (Şekil 4.38). UYPB beton karışımlarına ilave edilen çelik liflerin elektriksel olarak iletken olması ve lif ile matris arasında oluşan boşluklardan dolayı özdirenç değerlerinin azaldığı

düşünülmektedir. Bu durum literatürdeki çalışmalarda da ifade edilmiştir. Dehghanpour vd. [122], mikro çelik lif (SF: 12 mm/80 μ m) ilaveli UYPB numunelerinin 18 ay kürleme sonrasında elektiriksel özdirençlerini incelemişlerdir. Çelik lif ilavesinin artması ile özdirenç değerlerinin düştüğünü, referans grupta 11250 Ω .cm; %0,7 çelik lif ilaveli grupta 4000 Ω .cm; %1,3 çelik lif ilaveli grupta 2000 Ω .cm; %2 çelik lif ilaveli grupta 1500 Ω .cm özdirenç değerlerinin tespit edildiğini belirtmişlerdir.

4.4.2. UYPB Numunelerinin Karbonatlaşma Derinliği

Numuneler 56 gün sonunda kür kabininden alınarak, sulu baş kesme makinesi ile iki eşit parçaya bölünmüştür. Kesilen beton yüzeylere fenolftalein indikatörü püskürtülmüştür. Renklenmenin olmadığı alanlarda, karbonatlaşmanın olduğu; pembe rengi gözlenen alanlar da ise karbonatlaşmanın olmadığı yani betonun alkaline olduğu durumu göz önünde bulundurularak numunelerin renk değişimine bakılmıştır. Her bir grup için yapılan deneylerde, karbonatlaşmanın olmadığı gözlenmiştir (Şekil 4.39). Bu durum geçirimsiz bir beton olma özelliğinden kaynaklanmaktadır. Bu sonuçlar, Tafroui ve diğerleri tarafından sunulan sonuçlarla uyumludur [253].

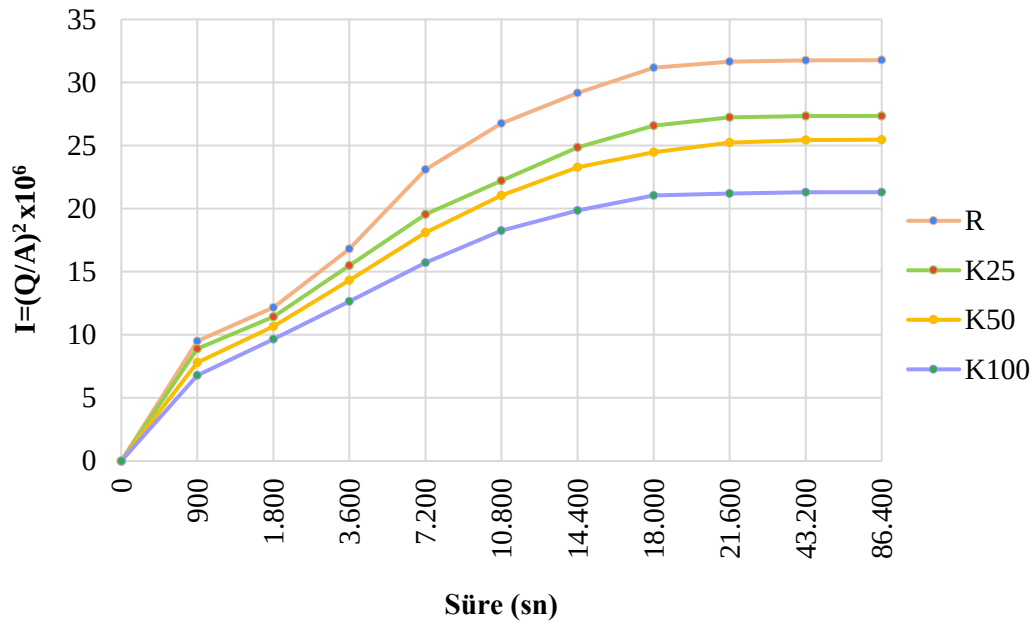


Şekil 4.39. Karbonatlaşma deneyi öncesi ve sonrası numuneler.

4.4.3. UYPB Numunelerinin Kapiler Su Emme Miktarı

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin 56 gün kür sonrasında uygulanan 24 saatlik su absorbesi ile elde edilen kapiler su emme miktarları Şekil 4.40'da verilmiştir.

Dış ortamdan nüfuz edebilecek zararlı maddelerin ve suyun beton boşluklarına taşınarak beton dayanım ve dayanıklılığını azaltmasından dolayı, beton bünyesindeki boşlukların hacmi ve cinsinin belirlenmesi gerekmektedir. Kapiler su emme değerinin tespiti, su ve diğer zararlı maddelerin betona nüfuz etme miktarının belirlenmesi ve yüzeye yakın beton kalitesinin ölçülmesini sağlayan bir yöntemdir. Buna bağlı olarak betonun kapiler su emme değerinin belirlenmesi ile betonun servis ömrü ve yapısal performansının geliştirilmesi sağlanmaktadır. Kapiler su emme, beton bünyesindeki boşlukların yanı sıra karışımlarda kullanılan malzemelerin özellikleri, tane çapları, su/bağlayıcı oranı, ortam ve kür koşulları da etkilemektedir [254]. Kapiler su emme miktarı düşük olduğunda beton bünyesine az miktarda su emilimi gerçekleşmekte ancak doygunluk düzeyine ulaşmamaktadır. Buna bağlı olarak klorür geçirgenliği, sülfat dayanımı, donma çözülme gibi durabilite parametrelerine karşı yüksek direnç sağlanmaktadır [255], [256]. UYPB'lerin yoğunluklarının yüksek olması ve neredeyse geçirimsiz yapılarından dolayı kapiler su emme miktarları düşük oranlarda gerçekleşmektedir.



Şekil 4.40. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin kapiler su emme miktarları.

Deney sonuçları incelendiğinde, en düşük su emme değerinin K100 numunesinde ve en yüksek su emme değerinin referans numunede olduğu tespit edilmiştir. R, K25, K50 ve K100 numunelerinin zamana göre kapiler su emme değerleri ($I \times 10^8$) incelendiğinde,

sırasıyla 15.dakikada 9,51; 8,90; 7,79; 6,79, 6.saatte 31,66; 27,73; 25,23; 21,19, 24.saatte 31,77; 27,35; 25,46; 21,31 olarak elde edilmiştir. 6.saatten sonra UYPB numunelerinin birim alanda emdikleri su miktarları sabitlenmeye başlamış ve doygunluk derecesine ulaşılmıştır. Kolemanit katkısının UYPB kılcal boşluklar üzerinde etkili olduğu ve boşluk yapısını iyileştirdiği tespit edilmiştir (Şekil 4.40). Ayrıca kolemanit oranının artması ile su emme miktarlarının düştüğü buna bağlı olarak da SEM görüntüleri ile teyit edilen daha kompakt bir mikro yapıdan kaynaklı olarak daha geçirimsiz bir yapının oluştuğu gözlenmiştir.

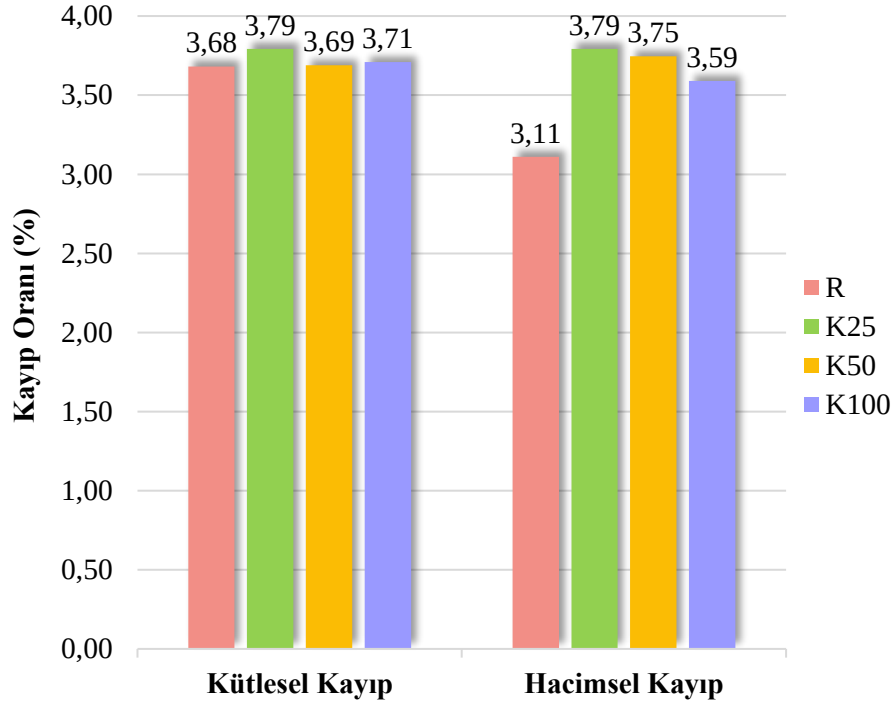
Karışım içeriklerinden dolayı daha geçirimsiz bir yapıda olan UYPB'lerin düşük kapiler su emme değerleri literatürdeki çalışmalarda da açıklanmıştır. Mostafa vd. [110], %1; 2; 3; 4; 5 oranlarında nano-pirinç kabuğu külü (PK), %1; 2; 3 oranlarında nano-atık cam (WG), %1; 2; 3 oranlarında nano-metakaolin (MK) kullanarak ürettikleri UYPB'lerde, nano malzemelerin mikro yapıyı yoğunlaştırdığı, kalsiyum hidroksit içeriğini azalttığı, daha fazla C-S-H üretimini desteklediği ve nano partiküllerin eklenmesi ile kapiler su emme değerinin %50 oranında azaldığı ifade edilmiştir. Yu vd. [48], uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve kireç tozu (KT) ile ürettikleri UYPB'lerde YFC li karışımların hidrasyon oranının ilerleyen yaşlarda arttığı, 28 ve 91.günlerde kılcal su geçirimliliğinin azaldığı belirtilmiştir. Faried vd. [112], farklı sıcaklık (300-500-700-900°C), farklı saatlerde (3-5-7-9 sa) yakma ve öğütme işlemi ile elde ettikleri nano pirinç kabuğu külü (NPK) ile hazırladıkları UYPB'lerde 700°C'de 3 saat ve 5 saat yakılarak elde edilen NPK içeren karışımların kılcal su emme katsayılarının sırasıyla $1,6 \times 10^{-6}$ ve $0,33 \times 10^{-6}$ olduğunu tespit etmiştir. NPK elde edilmesindeki yanma sürelerinin artışı ile daha düşük su geçirimliliği olduğu ifade edilmiştir.

4.4.4. UYPB Numunelerinin Aşınma Dayanımı

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin, 56 günlük kür sonrası uygulanan aşınma testleri ile elde edilen aşınma dayanımı sonuçları Şekil 4.41'de verilmiştir.

Abrasif aşınma, beton yüzeylerinin (yol betonu, basamak, döşeme vb.) kuru sürtünme yükleri altında zamanla artan kütle kaybı; beton yüzeyinin sürtünme ve çarpma etkisine karşı gösterdiği direnme etkisi de aşınma dayanımı olarak tanımlanmaktadır [257], [258]. Betonda kullanılan malzeme tipi, karışım oranı, agrega tipi, lif içeriği, mineral ve kimyasal katkıları, kütleme ve yüzey işlemleri gibi çeşitli parametreler betonun aşınma

dayanımını etkilemektedir [259], [260]. Mineral veya kimyasal katkıların kullanılması da betonun aşınma dayanımını arttırılabilmektedir [260]. Geleneksel betonlara göre yüksek mekanik performansa sahip UYPB'lerin kullanım alanları değerlendirildiğinde aşınmaya karşı dirençlerinin tespiti inşaat mühendisliği açısından önemli konular arasında yer almaktadır.



Şekil 4.41. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin aşınma sonucu kütle ve hacimsel kayıpları.

Aşınma sonuçları incelendiğinde kolemanit katkılı UYPB numunelerinin aşınma kayıpları referans karışımlara göre daha yüksek değerlerde elde edilmiştir. Referansa göre kıyaslandığında kütle kayıp değerleri sırasıyla (K25, K50, K100) %3,00; 0,23; 0,77 oranlarında artış göstermiştir. Hacimsel kayıp değerlerinde ise %21,98; 20,47; 15,45 oranlarında artış görülmüştür. Kolemanitli UYPB numunelerinde aşınmaya karşı direnç en iyi K100 numunesinde tespit edilmiştir (Şekil 4.41). Farklı araştırmacılar [261]–[263] tarafından yapılan çalışmalarda betonun basınç dayanımı arttıkça aşınmaya karşı direncinin artarak aşınma kaybının azaldığı, basınç dayanımı ile aşınma direnci arasında kuvvetli bir ilişkinin olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar

değerlendirildiğinde kolemanit oranının artırılması ile basınç dayanımlarının ve aşınmaya karşı direncin arttığı buna bağlı olarak aralarında güçlü bir ilişkinin olduğu doğrulanmıştır. Ayrıca yapılan araştırmalarda [264], schmidt çekici yönteminin aynı zamanda malzemenin aşınma özelliği ile ilgili fikir sahip olunabilmesi için kullanılabileceği ifade edilmiştir. Schmidt yüzey sertliği deneylerinde, kolemanitin yüzey sertliğini artırdığı durumu ile teyit edilen kolemanitin sert bir mineral olmasından kaynaklı olarak, kolemanit katkılı numunelerde, yüzeydeki aşınmanın referans gruptan daha fazla olduğu, dolayısıyla daha fazla kütle kayıplarının olduğu görülmüştür(Şekil 4.41).

Hacim kaybı hesaplamaları sonrasında, numunenin taban alanı (TA: 70x70 mm²) baz alınarak TS 2824 EN 1338/AC'ye göre uygunluk değerlendirmeleri de yapılmıştır. Standarda göre elde edilen hacim kaybı/tabana alan değerinin 0, 20.000 mm³/5000 mm² den küçük olması gerekmektedir. Değerlendirme sonuçlarına göre tüm UYPB numunelerinin sonuçları uygun olarak bulunmuştur (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. TS 2824 EN 1338/AC standardına göre uygunluk değerlendirme sonuçları.

TS 2824 Hacim Kaybı (Δv) (cm ³)	Kesit Taban Alan (TA) (cm ²)	TS 2824'e göre sonuç				Hacim Kaybı (Δv) (cm ³)	Kesit Taban Alan (TA) (cm ²)	TS 2824'e göre sonuç
		TS 2824 Δv / TA	Numune Kodu	Hesaplanan Δv / TA				
20	50	0,40	>	R	0,22	10,90	50,08	uygun
20	50	0,40	>	K25	0,26	12,85	48,69	uygun
20	50	0,40	>	K50	0,26	12,91	49,33	uygun
20	50	0,40	>	K100	0,25	12,50	49,79	uygun

Literatürde, kolemanit katkılı çimento harçları ve betonlar üzerine çalışmalar bulunsada da kolemanit katkılı UYPB'ler ile ilgili çalışmalar bulunmamaktadır. Aşınma dayanımı ile ilgili beton numuneler üzerine yapılan önceki araştırmalarda kolemanit ikamesinin aşınma dayanımını iyileştirdiği, beton yaşının ilerlemesi ile aşınma kaybının azaldığı, %3 ikame oranının üstündeki değerlerde kolemanitin aşınma kaybını olumsuz etkilediği ifade edilmiştir [144], [147]. UYPB'ler ile ilgili yapılan çalışmalarda çelik ve puzolanik malzeme kullanımının UYPB aşınma dayanımı üzerinde olumlu etkilerinin olduğu açıklanmıştır. Li vd. [111], ince kum (S-%0; 10; 20; 30 iğnemsiz taneler-NL), uçucu kül (UK), keramsit (%0; 10; 20; 30-Ce), çelik fiber (%0; 1; 2; 3-F) ile hazırladıkları

UYPB’lerde çelik fiber ilavesinin, mekanik özellikleri ve aşınma direncini iyileştirdiğini belirtmiştir. S-NL’nin iğnemsî yapısından dolayı %20’ye kadar kullanımının aşınma direncini artırdığı, ancak katmanlı yapısından dolayı bu orandaki artışın işlenebilirliği azalttığı ifade edilmiştir. Yalçinkaya vd. [118], pirinç kaplı çelik-mikro lif (çap: 0,16 mm; l:6 mm) kullanarak, hacimce farklı oranlarda çelik lif ilavesi (%0; 1; 2; 3) ve farklı su/bağlayıcı oranlarında (0,18; 0,22; 0,26) UYPB karışımları üretmişlerdir. Lifsiz karışımlarda ağırlıkça hesaplanan aşınma kaybının 0,26; 0,22 ve 0,18 su/bağlayıcı oranlarında %2,4; 2,3 ve %1,84 olduğu, lif ilavesi ile bu değerlerin azaldığı, %3 lif ilavesi ile %1,76; 1,76 ve %1,52 olduğu belirtilmiştir.

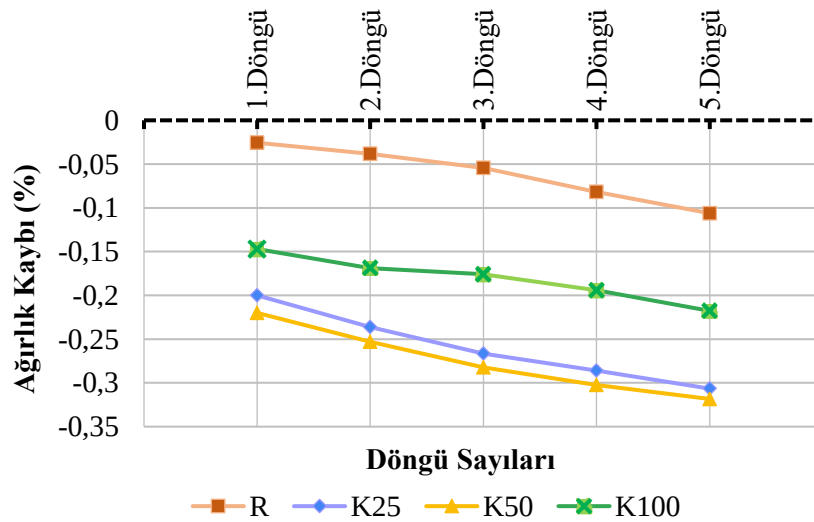
4.4.5. UYPB Numunelerinin Sülfat Direnci

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin 56 gün kür sonrasında 5 döngü sülfata maruz bırakılması sonrasında ağırlık kayıpları sonuçları Şekil 4.42’de verilmiştir.

Çimento tipi, sıcaklık, bağıl nem, pH değeri, sülfat konsantrasyonu ve tipi betonun sülfat direnci üzerinde etkili olmaktadır. Ortamdaki sülfat konsantrasyonu, betonda genişleyen ürünlerin oluşmasına ve çimentonun hidrasyon ürünlerinin ayrışmasına neden olarak beton dayanıklılığını doğrudan olumsuz etkilemektedir. Dolayısıyla betonun gözenekliliği, mikro yapısı, geçirgenliği, C_3A içeriği, OH^- konsantrasyonu üzerinde sülfat iyonlarının etkisi önem teşkil etmektedir. Betonun gözenek çözeltisinin alkaliniteyi artırırken Na_2SO_4 ve $MgSO_4$, farklı etkilere sahip olup, Na_2SO_4 alkaliniteyi artırırken $MgSO_4$ azaltmaktadır [265], [266]. Ayrıca sülfat tuzları beton yüzeyindeki gözeneklerde kristalleşerek fiziksel hasarlara neden olmaktadır [267], [268]. Sülfat iyonları, hidrasyon ürünleri olan kalsiyum hidroksit ($Ca(OH)_2$), kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) ve kalsiyum alüminat hidratlar (C_3A) ile kimyasal reaksiyona girmektedir. Betonun bünyesinde bulunan kalsiyum hidroksit (CH), deniz suyu veya yeraltı suyunun yapısında bulunan Na_2SO_4 , $MgSO_4$ ve K_2SO_4 gibi tuzlar ile reaksiyona girerek alçıtaşı ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) oluşumuna sebep olmaktadır [269]–[271]. Bunun yanı sıra sülfat iyonları, betonun gözenek çözeltisiyle reaksiyona girerek gecikmiş etrenjit adı verilen kalsiyum-sülfo-alüminat üretmektedir. Oluşan ürünler betondaki boşlukları doldurarak aşınmaya, genişlemeye ve mikro çatlakların büyümesine neden olmakta, beton performansını azaltmaktadır [272]–[274]. Toprak, yeraltı suyu, deniz suyu, çürüyen organik madde, endüstriyel atıkların bulunduğu ortamlarda uzun süreli performans sağlanabilmesi için

betonların sülfat saldırılarına dayanıklı tasarlanması gerekmektedir [275]. Betonlu sülfat saldırısından korumak için puzolanik özellikte mineral katkı maddeleri, sülfata dayanıklı çimento, kimyasal katkı kullanılması etkili bir yöntemler olarak tercih edilmektedir [276].

Birçok araştırmacı, silis dumanının çimento ile ikamesi ile üretilen betonların sülfat saldırısına karşı direncini arttırdığını belirtmiştir. Benli vd. [277], silis dumanı ikamesinin, alçı ve etrenjit için gerekli olan CH ve alüminatın azalmasına, gözenek yapısının iyileştirilmesine sebep olduğu ifade edilmiştir. İlter [60], [64], [278], Gündeşli [64], Diab vd. [278], silis dumanının sodyum sülfata karşı direncinin olduğunu ancak silis dumanının içeriği arttıkça magnezyum sülfat saldırısına karşı direncin düştüğünü, magnezyum sülfat saldırısında basınç mukavemetinde azalma olduğunu, yüksek silis dumanı karışımlarında sodyum sülfat çözeltisinde daha az doğrusal genleşme meydana gelirken magnezyum sülfat çözeltisinde daha fazla doğrusal genleşme meydana geldiğini, çimento yerine %10-15 oranlarında silis dumanı kullanımının betonda sülfatlara karşı direnci artırdığını belirtmiştir. Shannag vd. [279], doğal puzolan ve silis dumanı içeren yüksek performanslı beton numunelerini Ölü Deniz ve Kızıldeniz suları, sodyum ve magnezyum sülfat çözeltilerinde bekletmiştir. Çalışma sonucunda %15 doğal puzolan ve %15 silis dumanı içeren beton karışımlarının sülfat çözeltileri ve deniz sularında en iyi korumayı gösterdiğini, sadece portland çimentosu ile üretilen numunelerin sülfat çözeltileri ve deniz sularında yeterli performansı gösteremediğini ifade etmiştir.



Şekil 4.42. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin sülfat etkisi sonrası ağırlık kayıpları.



R kodlu numune



K25 kodlu numune



K50 kodlu numune



K100 kodlu numune

Şekil 4.43. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerin sülfat etkisine maruz bırakılmadan önce ve sonraki görünüşleri.

Tüm döngülerde en fazla ağırlık kaybı K50 numunesinde, en az ağırlık kaybı ise referans numunede tespit edilmiştir. Ayrıca kolemanit katkılı numunelerde en az ağırlık kaybının K100 numunesinde olduğu tespit edilmiştir (Şekil 4.42). Bunun yanı sıra deneyin tamamlanması sonrasında küp yüzeylerinde herhangi bir bozulma gözlenmemiştir (Şekil 4.43). UYPB'nin daha yüksek yoğunluğu, daha geçirimsiz yapısı ve kolemanit katkısı ile iyileştirilen gözenekli yapıdan kaynaklı olarak sülfata karşı direncin artırıldığı, çelik elyaf ilavesi ile de genişleme çatlakları oluşumu, yüzey çatlaması ve pullanma etkisinin azaltıldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.42).

Sülfat etkisi ile ilgili beton numuneler üzerine yapılan önceki araştırmalarda kolemanit ikamesinin sülfat direncini iyileştirdiği, kolemanit miktarının artırılması ile 180 ve 360 günlük sülfat çözeltisinde bekletilen numunelerin kolemanit ikamesi ile kütle kayıplarının azaldığı tespit edilmiştir [127], [134], [147]. UYPB'ler ile ilgili yapılan çalışmalarda çelik ve puzolanik malzeme kullanımının UYPB sülfat direnci üzerinde olumlu etkilerinin olduğu açıklanmıştır. Smarzewski vd. [120], iki tür kaba agrega: granodiyorit (G1, 2/8 mm) ve granit (G2, 2/8 mm), çelik lif (SF, : 50, çap: 1 mm) ve polipropilen lif (PF, 1:12 mm, çap: 25 um), lifleri ayrı ayrı ve hibrit olarak hacimce %0,25; 0,50; 0,75; 1,00 oranlarında karışımlara ilave ederek UYPB numuneler üretmiştir. Sodyum sülfata maruz bırakılan UYPB'lerde çelik lif içeriğine sahip numunelerde kütle kayıplarının olduğunu,

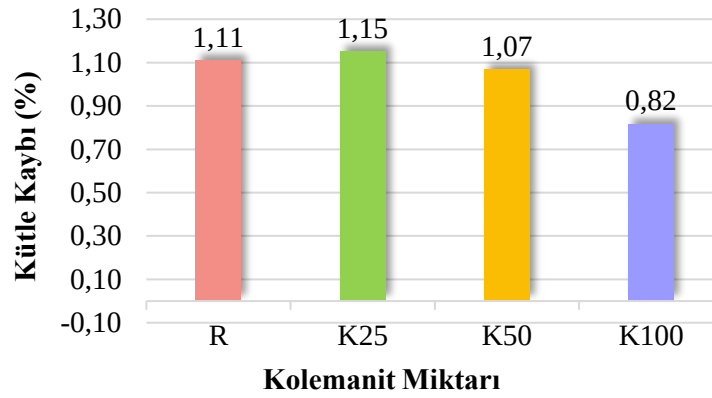
lif içermeyen (C1, C2) ve polipropilen lif içeriğine sahip betonlarda (SPC2, SPC3, PC) kütle artışlarının olduğu tespit edilmiştir. Sadece %1 ve 0,75 yüksek çelik lif içeriğine sahip betonlarda (SC, SPC1) beton kütle kayıplarının %0,14 ve %0,05 ile hafif bir azalma gösterdiği, %1 ve %0,75 polipropilen lif içeren granit agregalı betonların (SPC3, PC) daha fazla kütle kayıplarının olduğu belirtilmiştir.

4.4.6. UYPB Numunelerinin Donma Çözülme Direnci

Referans ve %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkılı UYPB numunelerinin 56 günlük kür sonrasında uygulanan 100 çevirim donma çözülme sonrası ağırlık kayıpları Şekil 4.44; basınç dayanımı değişimleri Şekil 4.45; schmidt değeri değişimleri Şekil 4.46; ultrases geçiş hızı değişimleri Şekil 4.47’de verilmiştir.

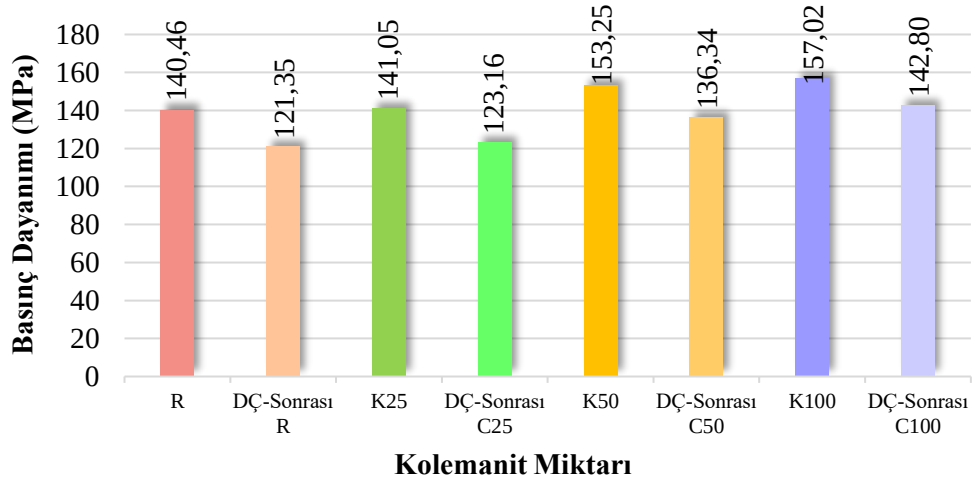
Fiziksel çevre etkilerinden olan tekrarlı donma çözülme etkisi ile betonun servis ömrü kısalmaktadır. Betonun geçirimsizliği, çimento hamuru ve agregaların dağılımı, kullanılan malzemelerin yapısı ve karışım oranları donma çözülme direnci etkisine karşı önemli parametreler arasında yer almaktadır [280]. Betonun bulunduğu çevre koşullarında bulunduğu ortam, sıcaklık ve nem değişimleri, suyun donma hızı ve çözülme şiddetini etkilemektedir. Normal hava koşulları altında (dış ortam) 0°C’de donan su, beton kapiler boşluklarındaki su ile birlikte yer alan çeşitli tuzlar nedeniyle 0°C’nin altında donmaktadır. Suyun donma sıcaklığını etkileyen en önemli faktör olan kapiler boşlukların boyutu büyük olduğu durumda su, 0°C veya biraz altındaki sıcaklıklarda donmakta; küçük boyutlarda olduğu durumda su, -15°C civarındaki sıcaklıklarda donmaktadır. Betonun jel boşluklarında bulunan su ise, jel boşluklarının çok küçük olmasından kaynaklı olarak daha düşük sıcaklıklarda (-78°C) donmaktadır. Beton bünyesindeki suların donması ile suyun hacmi yaklaşık %9 oranında artmakta, donma olayının başlaması ile hacim artışından kaynaklı olarak kapiler boşluklarda bulunan ve henüz donmamış olan su, hidrolik basınç etkisiyle dışarıya doğru aktarılmaktadır. Beton bünyesinde dışarıya doğru ilerleyen su, boşlukların etrafında bulunan çimento hamurunda gerilmeler oluşturmakta ve betonun hasar almasına sebep olmaktadır. Ortamdaki sıcaklığın artması ile boşluklardaki donmuş olan su çözülmeye başlar ve beton bünyesinde oluşan gerilmeler ortadan kalkmaktadır. Ancak donma çözülme olayının tekrarlı ve uzun süre gerçekleşmesi betonun yapısını bozmaktadır [258]. Kapiler boşluklarda yer alan henüz donmamış olan suyun donma olayının başlaması ile hidrolik gerilmelerin artışına sebep olmasının yanı sıra iki faktör daha bulunmaktadır. Birinci

faktörde, jel boşluklarındaki su ile donmuş olan su arasındaki termodinamik dengesizlikten dolayı, jel suyunun bir miktarı donmaya başlayarak, hacim genişmesine sebep olmakta, boşluklarda kalan ve henüz donmamış durumdaki suyun üstünde hidrolik basınç oluşturmaktadır [258], [280]. İkinci faktörde, kapiler boşluklardaki saf suyun dışarıya aktarılması ile ortamda tuz ve benzeri maddelerin konsantrasyonunun artması sonucu osmotik basınç artmaktadır [258].



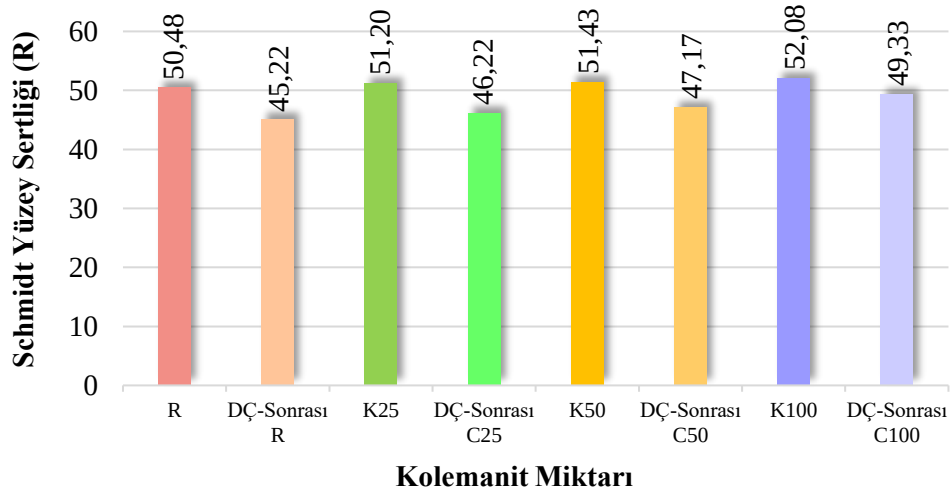
Şekil 4.44. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin donma çözülme çevirimleri sonrası kütle kayıpları.

UYPB numnelerinin donma çözülme çevirimleri sonrası ağırlık kayıpları incelendiğinde, K25 numunesi hariç, kolemanit katkılı numunelerde referansa göre daha az ağırlık kaybı tespit edilmiştir. En az ağırlık kaybı K100 numunesinde, en fazla ağırlık kaybı K25 numunesinde gözlenmiştir. Refereransa göre kıyaslandığında ağırlık kayıpları değerleri K25 numunesi için %3,63 oranında artış, K50 numunesi için %3,76, K100 numunesi için %26,31 oranında azalma göstermiştir (Şekil 4.44).



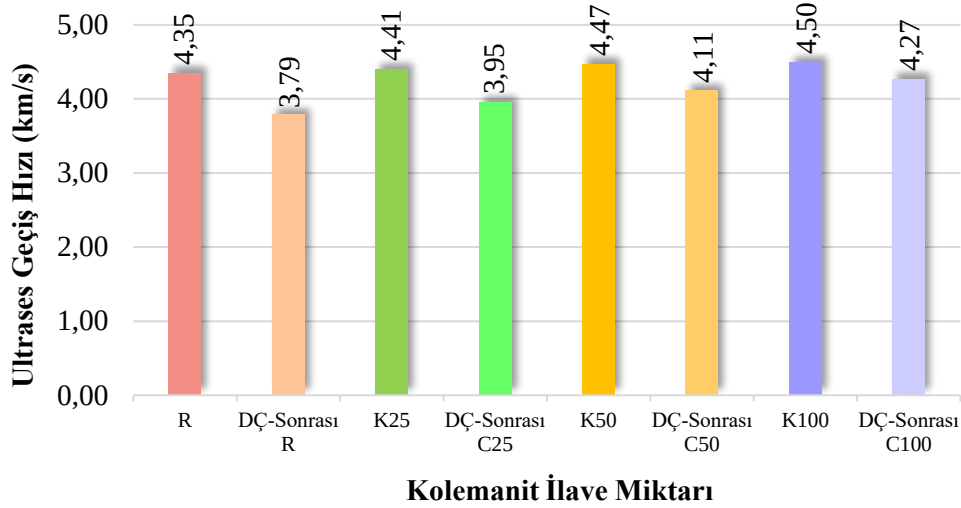
Şekil 4.45. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin donma çözülme çevirimleri sonrası basınç dayanımı değişimleri.

Donma çözülme öncesi ve sonrasındaki basınç dayanımı test sonuçları incelendiğinde, sırasıyla (R, K25, K50, K100) kolemanit katkılı numunelerde %13,61; 12,68; 11,03; 9,06 oranlarında kayıplar tespit edilmiştir (Şekil 4.45).



Şekil 4.46. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin donma çözülme çevirimleri sonrası Schmidt yüzey sertliği değişimleri.

Donma çözülme öncesi ve sonrasındaki schmidt değerleri incelendiğinde, sırasıyla (R, K25, K50, K100) kolemanit katkılı numunelerde %10,42; 9,72; 8,30; 5,28 oranlarında kayıplar tespit edilmiştir (Şekil 4.46).



Şekil 4.47. R, K25, K50, K100 kodlu numunelerinin donma çözülme çevirimleri sonrası ultrases geçiş hızı değişimleri.

Donma çözülme öncesi ve sonrasındaki ultrases geçiş hızı değerleri incelendiğinde, sırasıyla (R, K25, K50, K100) kolemanit katkılı numunelerde %12,92; 10,34; 8,07; 5,11 oranlarında kayıplar tespit edilmiştir (Şekil 4.47).

Donma çözülme sonrası ağırlık kayıpları, basınç dayanımları, schmidt değerleri, ultrases geçiş hızları değerlendirildiğinde en iyi performans %0,5 ve %1 oranlarında kolemanit katkılı numunelerde elde edilmiştir. Buna bağlı olarak, daha geçirimsiz bir yapı ile UYPB'nin donma çözülme direncini artırması açısından %0,5 ve %1 kolemanit katkısının kullanımının uygun olacağı öngörülmektedir.

Kolemanit ikamesi ile donma çözülme döngüleri sonrasında basınç dayanımlarının azaldığı ve %10 ve %12 oranında kolemanit atığı içeren karışımların dayanım kayıplarının yönetmeliğe göre izin verilen sınırın üzerinde olduğu, %0,25; 0,50 ve 0,75 ikame oranlarındaki kolemanitin donma çözülme çevirimleri sonrası dayanım kayıplarını azalttığı, kolemanitin agrega olarak kullanılması durumunda ve donma çözülme sonrasında artan miktarının daha az kayıp gösterdiği, betonunun işlenebilirliği ve dayanımı açısından kolemanitin agrega olarak %30'a kadar kullanımının kabul edilebilir olduğu önceki araştırmalarda belirtilmiştir [129], [147], [148]. UYPB'ler ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde, çelik lif ilavesi ve puzolanik katkıların kullanılmasının donma çözülme sonrası kayıpları azalttığı ifade edilmiştir. Smarzewski vd. [120], çelik liflerin eklenmesi ile donma çözülme karşı direncin arttığını, %1 çelik lif içeren karışımların beton yüzeyinde çatlaklar ve çelik liflerde korozyonların gözlemlendiğini, granodiyorit

agrega ile %1 (SC) ve %0,75 (SPC1) oranlarında elik lif içeren betonlarda daha fazla çatlak ve boşluk görüldüğü ve daha fazla ktle kaybının olduğunu, en büyük ktle kaybının %1 elik lif içeren betonlarda (SC) gözlendiğini ve lifsiz granodiyorit agregalı karışımlardan 22,3 kat daha büyük olduğunu, %1 PF'li betonun (PC) PF'siz betona göre %11 daha fazla ktle kaybına uğradığını belirtmiştir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

UYPB karışımlarında kullanılacak olan en uygun kolemanit katkı oranının belirlenmesi için %0,5; 1,0; 1,5; 2,0 oranlarında kolemanit ikamesi ile çimento deneyleri gerçekleştirilmiştir. %0,25; 0,50; 1 oranlarında kolemanit katkısı ile hazırlanan UYPB numuneler ile taze ve sertleşmiş beton deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca referans ve aynı kolemanit katkı oranlarında (%0,25; 0,50; 1,0) çimento hamurları ile hidrasyon gelişimleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar ve sonraki çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülen öneriler aşağıda sunulmuştur.

- %0,5; 1,0; 1,5; 2,0 oranlarında ve iki farklı tane çapına sahip kolemanit ikame edilerek hazırlanan çimento numunelerinde, kolemanit ikame oranının arttırılması ile çimento hamurlarında su ihtiyacının arttığı, ancak çok yüksek düzeyde olmadığı, kolemanit ortalama tane çapının azalmasına bağlı olarak daha fazla su ihtiyacının olduğu tespit edilmiştir. Priz başlangıç ve bitiş sürelerinin uzadığı, kolemanit ortalama tane çapının azalması ile bu sürelerde daha fazla artış meydana geldiği, dolayısıyla kolemanitin priz geciktirici etkisinin olduğu gözlenmiştir. Hacim genleşmesi değerlerinin azaldığı, kolemanit ortalama tane çapının azalması ile hacim genleşmesi değerlerinin daha da azaldığı görülmüştür. Bunların yanı sıra çimento harçlarının basınç dayanımı değerlerinin azaldığı, tüm değerlerin TS EN 197-1 standardına göre istenen minimum değer in üstünde olduğu buna bağlı olarak da çimento katkı malzemesi olarak kullanılabileceği tespit edilmiştir.
- Referans çimento hamurlarına göre değerlendirildiğinde, kolemanit katkılı çimento hamurlarında ilerleyen yaşlarda daha fazla hidrasyon ürünlerinin meydana geldiği, daha düşük CH içeriğine sahip olduğu, karbonasyonun daha az gerçekleştiği, 28 ve 90.günde referansa göre daha yoğun ve yüksek mukavemetli bir yapısının olduğu, reaksiyon ürünleri ile dolan boşlukların daha fazla olduğu ve daha az gözenekli ve stabil bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durum, kolemanit katkısının gözenekliliğin azaltılmasına, mekanik ve durabilite özelliklerine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

- Çimento standart kıvam ve DTA analizi sonuçları ile de teyit edilen kolemanit oranının artmasına bağlı olarak yapısındaki B_2O_3 konsantrasyonunun artışı ile taze beton su ihtiyacının arttığı, kolemanit katkı oranının %0,25'den %1,00 e çıkarılması ile yayılma çapı değerlerinin azaldığı, beton işlenebilirliği açısından %0,25 kolemanit katkı oranının (K25) en yüksek yayılma çapı değerine sahip olduğu gözlenmiştir.
- UYPB bileşenlerinden dolayı hava içeriği oranlarının normal beton karışımlarından daha yüksek ve %3,4 ile %4,5 oranları arasında olduğu, kolemanit oranının artması ile su ihtiyacı artışı ve taze beton kohezyonunun azalmasına bağlı olarak kolemanit katkı oranının %0,25'den %1,00 e çıkarılması ile taze beton hava içeriği değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.
- Kolemanit katkı oranının %0,25'den %1,00 e çıkarılması ile teyit edilen taze beton hava içeriğinin artmasına bağlı olarak taze beton yoğunluk değerleri düşük oranlarda azalmıştır. %1,00 kolemanit katkı oranına sahip K100 numunesinin taze beton yoğunluğu $2,285 \text{ kg/dm}^3$ ile en düşük, kolemanit içermeyen R numunesinin $2,295 \text{ kg/dm}^3$ ile en yüksek değerde elde edilmiştir.
- 24 saat sonunda R, K25, K50, K100 numunerinin otojen büzölmelerinin sırasıyla 1143,19; 1249,39; 1053,47; 678,1 $\mu\epsilon$ 'ya ulaştığı, en yüksek büzölmenin K25 numunesinde, en düşük büzölmenin K100 numunesinde olduğu, numunelerin indüksiyon periyodunun yaklaşık 6 saate yakın olduğu, kolemanit katkılı numunelerin hızlanma periyotlarının daha geniş olduğu, karışımlardaki micro white silis dumanının ince taneli yapısının beton gözenek yapısını doldurarak otojen büzölmede etkisinin olduğu, kolemanit miktarının artırılması ile hidrasyon sıcaklıklarında azalma ve büzölmeyi azaltıcı etkisi olduğu tespit edilmiştir.
- Kolemanit katkılı numunelerin basınç dayanımları 2 ve 7.günlerde kolemanit artışına bağlı olarak azalmış, ancak 28 ve 56.günlerde artış göstermiştir. 28 ve 56.günlerde puzolanik aktivitesinden kaynaklı olarak silis dumanının basınç dayanımında artışa sebep olduğu, puzolanik olmayan kolemanitin ise puzolanik aktiviteyeyi destekleyici etkisi olduğu tespit edilmiştir. Kolemanit katkı oranının artmasına bağlı olarak erken yaşlarda basınç dayanımı değerlerinin düşük olduğu, ilerleyen yaşlarda kolemanitin C-S-H oluşumunu destekleyerek basınç dayanımını artırdığı düşünülmektedir. Bunun yanı sıra 45 mikron altı tane boyutu ile kolemanitin mikro dolgu etkisi ile dayanımlarda bir miktar artış sağlamış olacağı düşünülmektedir.

- Sertleşmiş beton yoğunluk değerleri 2,301-2,336 g/cm³ aralıklarında elde edilmiştir. Kolemanit miktarının artışı ile birim ağırlık (yoğunluk) değerlerinde düşüş meydana gelse de, sert yapısı ve gözenekleri doldurma etkisi ile basınç dayanımlarını artırdığı tespit edilmiştir.
- Kolemanit katkı miktarlarının artması ile 2, 7, 28 ve 56.günlerde eğilme dayanımı değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Kolemanit katkılı numuneler arasında karşılaştırma yapıldığında, en iyi eğilme dayanımı değeri K25 numunesinde gözlenmiştir. Kolemanit miktarının artırılması ile elde edilen daha düşük eğilme dayanımı değerlerinin, taze beton fazında daha düşük işlenebilirlik ve daha yüksek hava içeriği ile lif oryantasyonu ve lif homejenliğinin olumsuz etkilenmesi, buna bağlı olarak da lif-matris ara yüzey aderansının azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Kolemanitin sert mineral yapısından dolayı, miktarının artışı ile schmidt yüzey sertliği değerlerinde de artış gözlenmiştir.
- Kolemanit miktarının artışı ile ultrases geçiş hızı değerlerinde artış görülmüş, buna bağlı olarak gözenek yapısı azaltılmış, daha geçirimsiz betonlar elde edilmiştir.
- Kolemanit katkı oranının artışı ile darbe dayanımı değerlerinde de artış görülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre optimum karışım oranlarının belirlenmesi ile hazırlanan kolemanit katkılı UYPB numunelerinin mikro yapıları iyileştirilmiş, karışımlara lif eklenmesi ile yüksek dayanımlı ve enerji yutma kapasitesi artırılmış betonlar elde edilmiştir.
- UYPB beton karışımlara ilave edilen çelik liflerin elektriksel olarak iletken olması ve lif ile matris arasında oluşan boşluklardan dolayı öz direnç değerleri tüm günlerde kolemanit katkısı ile azalmıştır.
- UYPB'nin geçirimsizliği azaltılmış bir beton türü olmasından dolayı 56 günlük kür sonrasında tüm numunelerde karbonatlaşmanın olmadığı tespit edilmiştir.
- Kolemanitin, UYPB kılcal boşluklar üzerinde etkili olduğu ve boşluk yapısını iyileştirdiği, kolemanit oranının artması ile su emme miktarlarının düştüğü buna bağlı olarak da SEM görüntüleri ile teyit edilen daha kompakt bir mikro yapıdan kaynaklı olarak daha geçirimsiz bir yapının oluştuğu gözlenmiştir.

- Schmidt yüzey sertliği deneylerinde, kolemanitin yüzey sertliğini artırdığı durumu ile teyit edilen kolemanitin sert bir mineral olmasından kaynaklı olarak, kolemanit katkılı numunelerde, yüzeydeki aşınmanın referans gruptan daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Dolayısıyla kolemanitli UYPB’lerde daha fazla hacim ve kütle kayıplarının olduğu, en iyi aşınma direncinin K100 numunesinde olduğu gözlenmiştir. bunun yanı sıra TS 2824 EN 1338/AC’ye göre hacim kaybı hesaplamaları ile elde edilen sonuçlar tüm UYPB numunelerinde standarda uygun olarak elde edilmiştir.
- UYPB’nin daha yüksek yoğunluğu, daha geçirimsiz yapısı ve kolemanit katkısı ile iyileştirilen gözenekli yapıdan kaynaklı olarak sülfata karşı direncin artırıldığı, çelik elyaf ilavesi ile de genleşme çatlakları oluşumu, yüzey çatlaması ve pullanma etkisinin azaltıldığı tespit edilmiştir.
- Donma çözülme sonrası ağırlık kayıpları, basınç dayanımları, schmidt değerleri, ultrases geçiş hızları değerlendirildiğinde en iyi performans %0,5 ve %1 oranlarında kolemanit katkılı numunelerde elde edilmiştir. Buna bağlı olarak, daha geçirimsiz bir yapı ile UYPB’nin donma çözülme direncini artırması açısından %0,5 ve %1 kolemanit katkısının kullanımının uygun olacağı öngörülmektedir.
- Taze beton fazında büzülmeleri azaltılmış ve hidrasyon sıcaklığı düşürülmüş; fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri iyileştirilmiş kolemanit katkılı UYPB üretilmesi amaçlanmış, bu doğrultuda yapılan çalışma ile %0,25; %0,50; %1,00 oranlarında kolemanit katkısının UYPB karışımlarında kullanılmasının uygun olacağı, en iyi performansın %1,00 oranında kolemanit ile elde edilebileceği gözlenmiştir.

Dünya bor minerali rezervinde en yüksek paya sahip olan Ülkemizin ekonomik kalkınması, enerji kaynaklarının ve doğanın korunması açısından değerlendirildiğinde kolemanitin sürdürülebilir bir yapı malzemesi olarak potansiyelinin yüksek olduğu düşünülmektedir.

Kolemanit katkısının su ihtiyacını artırması ve taze beton işlenebilirliğini azaltması, kohezyonun azalması ile hava muhtevasının artmasından dolayı farklı tür ve miktarlarda süperakışkanlaştırıcı ve hava atıcı kimyasal katkıları ile de araştırmaların yapılması önerilmektedir. Bununla birlikte kolemanit katkısı basınç dayanımlarını artırmış olup, daha yüksek dayanım değerleri hedeflendiği durumda buhar kütleme işleminin etkili olacağı düşünülmektedir. Ayrıca çalışma kapsamında tek tip çelik fiber kullanılmış,

kolemanit katkılı UYPB'lerde daha düşük eğilme dayanımı değerleri elde edilmiştir. Buna bağlı olarak lif oyantasyonu ve dağılımı değerlendirilerek, ileride yapılacak çalışmalarda hibrit lif ilavesi ile araştırma yapılması tavsiye edilmektedir.

Sağladığı avantajlar açısından her geçen gün beton sektöründe kullanımı artan UYPB'lerde bor minerallerinin kullanımına yönelik kısıtlı sayıda araştırmanın olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca Ülkemizin bor rezerv potansiyeli kapsamında kalkınma planlarında borun ticarileşmesine yönelik amaçlar belirlenmiş olup, ilgili çalışmalar devam etmektedir. Bor mineralleri ve nano boyutta bor bileşiklerinin UYPB katkısı olarak kullanımına yönelik araştırmaların artırılması ile daha yüksek performanslı beton üretimine önemli katkılar sağlanacağı düşünülmektedir.



6. KAYNAKLAR

- [1] J. Li, Z. Wu, C. Shi, Q. Yuan, ve Z. Zhang, “Durability of ultra-high performance concrete – A review”, *Constr Build Mater*, c. 255, ss. 1-13, Eyl. 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>.
- [2] M. Yudenfreund, I. Odler, ve S. Brunauer, “Hardened portland cement pastes of low porosity I. materials and experimental methods”, *Cem Concr Res*, c. 2, sy 3, ss. 313-330, 1972.
- [3] M. Mohabbi Yadollahi ve S. Varol Güneş, “Farklı kür koşullarının reaktif pudra betonların mekanik özellikleri üzerine etkisi”, *DÜMF Mühendislik Dergisi*, c. 11, sy 1, ss. 353-361, Mar. 2020, doi: 10.24012/dumf.537454.
- [4] J. D. Birchall, A. J. Howard, ve K. Kendall, “Flexural strength and porosity of cements”, *Nature*, c. 289, ss. 388-390, 1981.
- [5] H. H. Bach, “Densified cement/ultra-fine particle-based materials”, içinde *In Second International Conference on Superplasticizers in Concrete*, Ottawa, Canada, Haz. 1981, ss. 1-35.
- [6] D. R. Lankard ve J. K. Newell, “Preparation of highly reinforced steel fiber reinforced concrete composites”, içinde *American Concrete Institute, ACI Special Publication*, 1984, ss. 287-306.
- [7] D. M. Roy, G. R. Gouda, ve A. Bobrowsky, “Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques”, *Cem Concr Res*, c. 2, sy 3, ss. 349-366, 1972.
- [8] N. Yenmez, “Stratejik bir maden olarak bor minerallerinin Türkiye için önemi”, *İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü Dergisi*, c. 19, ss. 59-64, 2009.
- [9] M. Bilgiç ve M. Dayık, “Borun özellikleri ve tekstil endüstrisinde kullanımıyla sağladığı avantajlar”, *Electronic Journal of Textile Technologies*, c. 7, sy 2, ss. 27-37, 2013.
- [10] P. Richard ve M. H. Cheyrezy, “Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 mpa compressive strength”, içinde *American Concrete Institute, ACI Special Publication*, 1994, ss. 507-518.
- [11] AFGC&SETRA, “Ultra high performance fibre-reinforced concretes - interim recommendations”, France, 2022.
- [12] P. Richard ve M. Cheyrezy, “Composition of reactive powder concretes”, *Cem Concr Res*, c. 25, sy 7, ss. 1501-1511, 1995, doi: 10.1016/0008-8846(95)00144-2.
- [13] S. Zhao, J. Fan, ve W. Sun, “Utilization of iron ore tailings as fine aggregate in ultra-high performance concrete”, *Constr Build Mater*, c. 50, ss. 540-548, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.10.019.
- [14] J. Resplendino, “Introduction: What is a UHPFRC?”, içinde *Designing and Building with UHPFRC: State of the Art and Development*, J. Resplendino ve F. Toulemonde, Ed., 1.baskı.Paris, France: IFSTTAR, 2011, ss. 3-12.
- [15] M. B. Eide ve J.-M. Hisdal, “Ultra high performance fibre reinforced concrete(UHPFRC) – State of the art”, Oslo, 2012.

- [16] M. Cheyrezy, V. Maret, ve L. Frouin, "Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete)", *Cem Concr Res*, c. 25, sy 7, ss. 1491-1500, 1995, doi: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00143-Z](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00143-Z).
- [17] F. de Larrard ve T. Sedran, "Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model", *Cem Concr Res*, c. 24, sy 6, ss. 997-1009, 1994, doi: 10.1016/0008-8846(94)90022-1.
- [18] J. Dugat, N. Roux, ve G. Bernier, "Mechanical properties of reactive powder concretes", *Materials and Structures/MaMriaux et Constructions*, c. 29, ss. 233-240, 1996.
- [19] O. Bonneau, M. Lachemi, É. Dallaire, J. Dugat, ve P. C. Aïtcin, "Mechanical properties and durability of two industrial reactive powder concretes", *ACI Mater J*, c. 94, sy 4, ss. 286-290, Tem. 1997, doi: 10.14359/310.
- [20] J. Xue, B. Briseghella, F. Huang, C. Nuti, H. Tabatabai, ve B. Chen, "Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering", *Constr Build Mater*, c. 260, ss. 1-12, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119844.
- [21] A. E. Naaman, "Half a century of progress leading to ultra-high performance fiber reinforced concrete: Part 2- Tensile stress-strain response", içinde ", *2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites*, Rio de Janeiro, Brazil, Ara. 2011, ss. 27-36.
- [22] H. Yazici, M. Y. Yardimci, S. Aydin, ve A. Ş. Karabulut, "Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes", *Constr Build Mater*, c. 23, ss. 1223-1231, 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.003.
- [23] M. G. Lee, Y. C. Wang, ve C. Te Chiu, "A preliminary study of reactive powder concrete as a new repair material", *Constr Build Mater*, c. 21, ss. 182-189, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.024.
- [24] M. Zhou, W. Lu, J. Song, ve G. C. Lee, "Application of ultra-high performance concrete in bridge engineering", *Constr Build Mater*, c. 186, ss. 1256-1267, Eki. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.036.
- [25] J. Resplendino, "First recommendations for ultra high-performance concretes and examples of application", içinde *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, Eyl. 2004, ss. 79-91.
- [26] Z. Hajar, D. Lecointre, A. Simon, ve J. Petitjean, "in: Proceeding of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete", içinde *Design and construction of the world first ultra-high performance concrete road bridges*, Kassel: University of Kassel, 2004, ss. 39-48.
- [27] V. H. Perry ve P. Eng, "What really is ultra-high performance concrete? -Towards a global definition", içinde *The 2nd Int. Conference on Ultra-High Performance Concrete Material & Structures*, Fuzhou, China, Kas. 2018, ss. 1-13.
- [28] P. Y. Blais ve M. Couture, "Precast, prestressed pedestrian bridge - World's first reactive powder concrete bridge", *PCI Journal*, c. 44, sy 5, ss. 60-71, 1999, doi: 10.15554/pcij.09011999.60.71.
- [29] P. Acker ve M. Behloul, "Ductal® technology: A large spectrum of properties, a wide range of applications", içinde *in: Proceeding of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel: University of Kassel, 2004, ss. 11-

- [30] Ductal®. (2006). „Ductal®;Project – Mars Hill Bridge, Iowa, USA. [Çevirim içi]. Erişim: https://www.fhwa.dot.gov/hfl/innovations/uhpc_bridges_in_north_america.cfm
- [31] A. Denisiewicz ve M. Kuczma, “Two scale numerical homogenization of the constitutive parameters of reactive powder concrete”, *Journal for Multiscale Computational Engineering*, c. 12, sy 5, ss. 361-374, 2014, doi: 10.1615/IntJMultCompEng.2014010181.
- [32] Tour Scanner. (2019). *Reina Sofia Museum Madrid tickets price – All you need to know*. [Çevirim içi]. Erişim: <https://toursanner.com/blog/reina-sofia-museum-tickets>
- [33] S. Mitrović, D. Popović, M. Tepavčević, ve D. Zakić, “Physical-mechanical properties and durability of ultra-high performance concrete (UHPC)”, Belgrade, Serbia, Haz. 2021. doi: 10.5937/grmk2102109m.
- [34] E. Ghafari, H. Costa, ve E. Júlio, “Critical review on eco-efficient ultra high performance concrete enhanced with nano-materials”, *Constr Build Mater*, c. 101, ss. 201-208, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.066.
- [35] O. Mazanec, D. Lowke, ve P. Schiel, “Mixing of high performance concrete: Effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time”, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, c. 43, ss. 357-365, Nis. 2010, doi: 10.1617/s11527-009-9494-y.
- [36] F. Dehn, M. Orgass, ve A. König, “Influence of different mixing parameters on fresh properties of ultra high strength hybrid fibre concrete (HFC)”, içinde *Fifth International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5)*, H. W. Reinhardt ve A. E. A.E. Naaman, Ed., 2014, ss. 243-248.
- [37] D. A. Williams, A. W. Saak, ve H. M. Jennings, “Influence of mixing on the rheology of fresh cement paste”, *Cem Concr Res*, c. 29, ss. 1491-1496, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00124-6.
- [38] M. Hüsem, “Doğu Karadeniz bölgesi doğal hafif agregalarından biriyle yapılan hafif betonun geleneksel bir betonla karşılaştırmalı olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 1995.
- [39] W. B. Fuller ve S. E. Thompson, “Closure: Laws of proportioning concrete”, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, c. 59, sy 2, ss. 67-143, 1907, doi: 10.1061/taceat.0001978.
- [40] A. H. M. Andreasen ve J. Andersen, “Ueber die beziehung zwischen kornabstufung und zwischenraum in produkten aus losen körnern (mit einigen experimenten)”, *Informationen vom Royal Laboratory für Mörtel, Glas und Keramik*, c. 50, ss. 217-228, 1929, doi: <https://doi.org/10.1007/BF01422986>.
- [41] C. C. Furnas, “Flow of gases through beds of broken solids”, içinde *Bureau of Mines*, Washington: United States Government Printing Office, 1929, ss. 1-168. doi: 10.1016/s0016-0032(30)91076-9.
- [42] T. C. Powers, *Properties of Fresh Concrete Paperback*, 1.baskı. New York: John Wiley & Sons Inc, 1968.

- [43] Z. , B. P. J. Bittnar, J. , Nemecek, V. Smilauer, ve J. Zeman, *Nanotechnology in construction: Proceedings of the NICOM3*. German: Springer Science & Business Media, 2009.
- [44] A. Simon, “New AFGC Recommendations on UHPFRC: Chapter 1-Mechanical characteristics and behavior of UHPFRC”, içinde *Designing and Building with UHPFR*, F. Toutlemonde ve J. Resplendino, Ed., 2011, ss. 723-742. doi: 10.1002/9781118557839.ch48.
- [45] T. Y. Erdoğan, *Beton*, 4.Baskı. Ankara, Türkiye: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., 2013.
- [46] P. Persoon, “Characterization of the mechanical properties of Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes (UHPFRC)”, Yüksek Lisans Tezi, Girona Üniversitesi, Belçika, 2017.
- [47] H. Yazici, H. Yiğiter, A. Ş. Karabulut, ve B. Baradan, “Utilization of fly ash and ground granulated blast furnace slag as an alternative silica source in reactive powder concrete”, *Fuel*, c. 87, sy 12, ss. 2401-2407, 2008, doi: 10.1016/j.fuel.2008.03.005.
- [48] R. Yu, P. Spiesz, ve H. J. H. Brouwers, “Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses”, *Cem Concr Compos*, c. 55, ss. 383-394, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.09.024.
- [49] F. U. A. Shaikh, T. Nishiwaki, ve S. Kwon, “Effect of fly ash on tensile properties of ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites (UHP-FRCC)”, *J Sustain Cem Based Mater*, c. 7, sy 6, ss. 1-16, 2018, doi: 10.1080/21650373.2018.1514672.
- [50] L. Nilsson, “Development of UHPC concrete using mostly locally available raw materials”, Yüksek Lisans Tezi, Luleå Üniversitesi, Luleå, İsveç, 2018.
- [51] P. K. Mehta ve P. J. M. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*, 3.baskı. California: McGraw-Hill, 2006.
- [52] W. Meng, “Design and performance of cost-effective ultra-high performance concrete for prefabricated elements”, Doktora Tezi, MISSOURI UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, Missouri, ABD, 2017. doi: 10.21838/uhpc.2016.28.
- [53] O. Bonneau, C. Vernet, M. Moranville, ve P.-C. A. Ètcin, “Characterization of the granular packing and percolation threshold of reactive powder concrete”, *Cem Concr Res*, c. 30, ss. 1861-1867, 2000, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(00\)00300-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(00)00300-8).
- [54] V. G. Papadakis, “Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete”, *Cem Concr Res*, c. 29, sy 1, ss. 79-86, 1999, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00171-9.
- [55] Y. W. Chan ve S. H. Chu, “Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete”, *Cem Concr Res*, c. 34, ss. 1167-1172, 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.12.023.
- [56] Y. H. Yang, “Manufacturing reactive powder concrete using common New Zealand materials”, Yüksek Lisans Tezi, Auckland Üniversitesi, New Zealand, 2000.

- [57] B. W. Langan, K. Weng, ve M. A. Ward, “Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of portland cement”, *Cem Concr Res*, c. 32, sy 7, ss. 1045-1051, 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00742-1.
- [58] A. Yeğınobalı, *Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı*, 7.baskı. Ankara: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Ar-Ge Enstitüsü, 2002.
- [59] K. Akçaözoğlu, “Silis dumanı içeren yüksek dayanımlı harçlarda numune boy değişiminin basınç dayanımı ve birim kısalma üzerindeki etkisi”, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2007.
- [60] E. İlter, “CEM I 42.5 çimentolu yüksek dozajlı betonlarda silis dumanının etkinliği”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [61] E. B. Kurt, “Silis dumanının betonun durabilite özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2007.
- [62] J. A. A. Hernandez, “Development and laboratory testing of ultra high performance concrete”, Yüksek Lisans Tezi, Teksas Üniversitesi, Teksas, ABD, 2016.
- [63] F. E. Schmidt ve S. Stürwald, *Ultra High Performance Concrete (UHPC) (Second)*, 2.baskı. Almanya: Kassel Üniversitesi, 2008.
- [64] U. Gündeşli, “Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması”, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, Türkiye, 2008.
- [65] A. , Yeğınobalı ve K. Erdoğan, “Çimento ve betonda mineral katkıları”, *Nuh Dünyası*, ss. 40-59, 2001.
- [66] R. Duman, “Silis dumanının betonun performansın ve klor geçirimsizliğine etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2010.
- [67] Eti Mining Operations General Directorate. (2019). *Sectoral report of boron*. [Çevirim içi]. Erişim: <https://www.etimaden.gov.tr/storage/uploads/sunumlar/2019-en/84/index.html>
- [68] A. Akyıldız, “Beton üretiminde bor atıklarının puzolan materyal olarak kullanılabilirliğinin araştırılması”, Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, Türkiye, 2012.
- [69] S. Bideci ve Ö. Bideci, “Öğütülmüş kolemanit katkısının çimento harçlarına etkisi”, *Fırat Üniversitesi, Müh. Bil. Dergisi*, c. 30, sy 1, ss. 133-138, 2018.
- [70] S. Kutuk, “Öğütülmüş nano boyutlu kolemanit mineralinin elementel ve kristal yapı özellikleri”, *Erzincan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 10, sy 2, ss. 303-313, 2017.
- [71] TENMAK. (2023). *Bor mineralleri*. [Çevirim içi]. Erişim: <https://boren.tenmak.gov.tr/tr/calisma-alanlari/bor-mineralleri.html>
- [72] E. Sönmez, S. Koca, H. Özdağ, ve H. İpek, “Beneficiation of colemanite concentrates from fine wastes by using ultrasound waves”, *Miner Eng*, c. 17, sy 2, ss. 359-361, 2004, doi: 10.1016/j.mineng.2003.11.008.
- [73] Ü. Gemici, G. Tarcan, C. Helvacı, ve A. M. Somay, “High arsenic and boron

- concentrations in groundwaters related to mining activity in the Bigadiç borate deposits (Western Turkey)”, *Applied Geochemistry*, c. 23, sy 8, ss. 2462-2476, 2008, doi: 10.1016/j.apgeochem.2008.02.013.
- [74] M. Uysal, M. M. Al-mashhadani, Y. Aygörmmez, ve O. Canpolat, “Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars”, *Constr Build Mater*, c. 176, ss. 271-282, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.034.
- [75] A. Celik, K. Yilmaz, O. Canpolat, M. M. Al-mashhadani, Y. Aygörmmez, ve M. Uysal, “High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers”, *Constr Build Mater*, c. 187, ss. 1190-1203, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.062.
- [76] N. Ali, O. Canpolat, Y. Aygörmmez, ve M. M. Al-Mashhadani, “Evaluation of the 12–24 mm basalt fibers and boron waste on reinforced metakaolin-based geopolymer”, *Constr Build Mater*, c. 251, ss. 1-30, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118976.
- [77] B. Cicek, E. Karadagli, ve F. Duman, “Valorisation of boron mining wastes in the production of wall and floor tiles”, *Constr Build Mater*, c. 179, ss. 232-244, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.182.
- [78] N. Uçar, A. Çalık, M. Emre, ve I. Akkurt, “Physical-radiation shielding properties of concrete contains colemanite and ulexite”, *Indoor and Built Environment*, c. 30, sy 10, ss. 1-8, 2021, doi: 10.1177/1420326X20967974.
- [79] Eti Maden. (2023). *Kolemanit*. [Çevirim içi]. Erişim: <https://www.etimaden.gov.tr/kolemanit>
- [80] G. GündÜZ ve A. Usanmaz, “Development of new nuclear shielding materials containing vitrified colemanite and impregnated polymer”, *Journal of Nuclear Materials*, c. 140, sy 1, ss. 44-55, 1986, doi: 10.1016/0022-3115(86)90195-9.
- [81] F. Demir, G. Budak, R. Sahin, A. Karabulut, M. Oltulu, ve A. Un, “Determination of radiation attenuation coefficients of heavyweight- and normal-weight concretes containing colemanite and barite for 0.663 MeV γ -rays”, *Ann Nucl Energy*, c. 38, sy 6, ss. 1274-1278, 2011, doi: 10.1016/j.anucene.2011.02.009.
- [82] Y. Erdoğan, M. S. Zeybek, ve A. Demirbas, “Cement mixes containing colemanite from concentrator wastes”, *Cem Concr Res*, c. 28, sy 4, ss. 605-609, 1998, doi: 10.1016/S0008-8846(98)00018-0.
- [83] I. Kula, A. Olgun, Y. Erdogan, ve V. Sevinc, “Effects of colemanite waste, cool bottom ash, and fly ash on the properties of cement”, *Cem Concr Res*, c. 31, sy 3, ss. 491-494, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00486-5.
- [84] Ç. Targan, A. Olgun, Y. Erdogan, ve V. Sevinc, “Effects of supplementary cementing materials on the properties of cement and concrete”, *Cem Concr Res*, c. 32, sy 10, ss. 1551-1558, 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00831-1.
- [85] Ş. Targan, A. Olgun, Y. Erdogan, ve V. Sevinc, “Influence of natural pozzolan, colemanite ore waste, bottom ash, and fly ash on the properties of portland cement”, *Cem Concr Res*, c. 33, sy 8, ss. 1175-1182, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00025-5.
- [86] A. Olgun, T. Kavas, Y. Erdogan, ve G. Once, “Physico-chemical characteristics of

- chemically activated cement containing boron”, *Build Environ*, c. 42, sy 6, ss. 2384-2395, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.06.003.
- [87] T. Kavas, A. Olgun, ve Y. Erdogan, “Setting and hardening of borogypsum-portland cement clinker-fly ash blends. Studies on effects of molasses on properties of mortar containing borogypsum”, *Cem Concr Res*, c. 35, sy 4, ss. 711-718, 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.05.019.
- [88] M. A. Taşdemir ve F. Bayramov, “Yüksek performanslı çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışı”, *İtü Mühendislik Dergisi*, c. 1, sy 2, ss. 125-144, Ara. 2002.
- [89] Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü. (2023). *Kuvars kumu*. [Çevirim içi]. Erişim: <https://www.mta.gov.tr>
- [90] F. Köksal, “Çelik tel donatılı betonların mekanik davranışı ve optimum tasarımı”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2004.
- [91] F. Özalp, “Ultra yüksek performanslı betonların mekanik davranışı”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [92] L. , Vandewalle, A. E. , Schultz, ve S. L. McCabe, “Influence of the yield strength of steel fibres on the toughness of fibre reinforced high strength concrete”, içinde *Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry*, 1996, ss. 496-505.
- [93] R. D. Lequesne, “Behavior and design of high-performance fiber-reinforced concrete coupling beams and coupled-wall systems”, Doktora Tezi, Michigan Üniversitesi, Michigan, ABD, 2011.
- [94] A. Beglarigale, Ç. Yalçinkaya, ve H. Yazıcı, “Otoklav kürlü reaktif pudra betonu: Mikro çelik lif hacmi ve silika dumanı dozajının mekanik özelliklere etkisi”, içinde 2. *Ulusal Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu*, İzmir, Türkiye: Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, 2013, ss. 1-11.
- [95] R. N. Maten, “Ultra high performance concrete in large span shell structures”, Yüksek Lisans Tezi, Delft Teknoloji Üniversitesi, Netherlands, Hollanda, 2011.
- [96] K. Turker, U. Hasgul, T. Birol, A. Yavas, ve H. Yazici, “Hybrid fiber use on flexural behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete beams”, *Compos Struct*, c. 229, ss. 1-15, 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111400.
- [97] Z. Li, “Proportioning and properties of ultra-high performance concrete mixtures for application in shear keys of precast concrete bridges”, Doktora Tezi, Clemson Üniversitesi, ABD, 2015.
- [98] S. Abbas, M. L. Nehdi, ve M. A. Saleem, “Ultra-high performance concrete: mechanical performance, durability, sustainability and implementation challenges”, *Int J Concr Struct Mater*, c. 10, sy 3, ss. 271-295, 2016, doi: 10.1007/s40069-016-0157-4.
- [99] L. R. Betterman, C. Ouyang, ve S. P. Shah, “Fiber-matrix interaction in microfiber-reinforced mortar”, *Advanced Cement Based Materials*, c. 2, sy 2, ss. 53-61, 1995, doi: 10.1016/1065-7355(95)90025-X.
- [100] P. Rossi, “Influence of fibre geometry and matrix maturity on the mechanical performance of ultra high-performance cement-based composites”, *Cem Concr Compos*, c. 37, sy 1, ss. 246-248, 2013, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2012.08.005.

- [101] A. Yavaş, T. Birol, K. Türker, U. Hasgöl, ve H. Yazıcı, “Improvement of flexural performance of UHPFRC with hybrid steel fiber”, *Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers*, c. 31, sy 6, ss. 10380-10397, Kas. 2020, doi: 10.18400/tekderg.485565.
- [102] *Standard specification for chemical admixtures for concrete*, c. 04. American Society for Testing and Materials ASTM C494, 2020.
- [103] H. Kaya, “Yüksek fırın cürufu katkılı betonda su/çimento oranının etkinlik katsayısına ve kırılma parametrelerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [104] İ. B. Topçu, M. Canbaz, ve C. Karakurt, “Beton üretiminde kimyasal katkı kullanımı”, *Politeknik Dergisi*, c. 9, sy 1, ss. 59-63, 2006.
- [105] M. Uyan ve H. Yıldırım, “Yüksek dayanımlı beton üretiminde süperakışkanlaştırıcı beton Katkı maddelerinin etkinliği”, içinde *2.Ulusal Beton Kongresi*, 1991, ss. 262-279.
- [106] E. Holt ve M. Leivo, “Cracking risks associated with early age shrinkage”, *Cem Concr Compos*, c. 26, ss. 521-530, 2004, doi: 10.1016/S0958-9465(03)00068-4.
- [107] R. Deeb, A. Ghanbari, ve B. L. Karihaloo, “Development of self-compacting high and ultra high performance concretes with and without steel fibres”, *Cem Concr Compos*, c. 34, sy 2, ss. 185-190, 2012, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.001.
- [108] N. Van Tuan, G. Ye, K. Van Breugel, A. L. A. Fraaij, ve D. D. Bui, “The study of using rice husk ash to produce ultra high performance concrete”, *Constr Build Mater*, c. 25, sy 4, ss. 2030-2035, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.046.
- [109] S. Ahmad, K. O. Mohaisen, S. K. Adekunle, S. U. Al-Dulaijan, ve M. Maslehuddin, “Influence of admixing natural pozzolan as partial replacement of cement and microsilica in UHPC mixtures”, *Constr Build Mater*, c. 198, ss. 437-444, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.260.
- [110] S. A. Mostafa vd., “Influence of nanoparticles from waste materials on mechanical properties, durability and microstructure of UHPC”, *Materials*, c. 13, sy 20, ss. 1-22, Eki. 2020, doi: 10.3390/ma13204530.
- [111] J. Li vd., “Design and application of UHPC with high abrasion resistance”, *Constr Build Mater*, c. 309, ss. 1-11, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125141.
- [112] A. S. Faried, S. A. Mostafa, B. A. Tayeh, ve T. A. Tawfik, “The effect of using nano rice husk ash of different burning degrees on ultra-high-performance concrete properties”, *Constr Build Mater*, c. 290, ss. 1-14, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123279.
- [113] D. Y. Yoo, H. O. Shin, ve Y. S. Yoon, “Ultrasonic monitoring of setting and strength development of ultra-high-performance concrete”, *Materials*, c. 9, sy 4, ss. 1-13, 2016, doi: 10.3390/ma9040294.
- [114] N. A. Hamiruddin, R. Abd Razak, K. Muhamad, M. Z. A. Mohd Zahid, ve C. N. S. Che Ab Aziz, “The effect of different sand gradation with ultra high performance concrete (UHPC)”, *Solid State Phenomena*, c. 280, ss. 476-480, 2018, doi: 10.4028/www.scientific.net/SSP.280.476.
- [115] N. Fodil, M. Chemrouk, ve A. Ammar, “Influence of steel reinforcement on ultrasonic pulse velocity as a non-destructive evaluation of high-performance

- concrete strength”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, c. 25, sy 2, ss. 1-22, 2021, doi: 10.1080/19648189.2018.1528890.
- [116] R. J. Thomas, C. Bedke, ve A. Sorensen, “Dynamic shear energy absorption of ultra-high performance concrete”, *World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*, c. 11, sy 3, ss. 286-291, 2017.
- [117] H. Zhong, M. Chen, ve M. Zhang, “Effect of hybrid industrial and recycled steel fibres on static and dynamic mechanical properties of ultra-high performance concrete”, *Constr Build Mater*, c. 370, ss. 1-13, 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.130691.
- [118] Ç. Yalçinkaya, J. Sznajder, A. Beglarigale, O. Sancakoğlu, ve H. Yazici, “Abrasion resistance of reactive powder concrete: The influence of water-to-cement ratio and steel micro-fibers”, *Adv Mater Lett*, c. 5, sy 6, ss. 345-351, 2014, doi: 10.5185/amlett.2014.amwc.1021.
- [119] R. Yu, L. Van Beers, P. Spiesz, ve H. J. H. Brouwers, “Impact resistance of a sustainable Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC) under pendulum impact loadings”, *Constr Build Mater*, c. 107, ss. 203-215, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.157.
- [120] P. Smarzewski ve D. Barnat-Hunek, “Effect of fiber hybridization on durability related properties of ultra-high performance concrete”, *Int J Concr Struct Mater*, c. 11, sy 2, ss. 1-11, 2017, doi: 10.1007/s40069-017-0195-6.
- [121] S. Du, C. Luan, L. Yuan, P. Du, Z. Zhou, ve J. Wang, “Investigation on the effect of silane coupling agent treatment of steel fibers on the durability of UHPC”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, c. 23, sy 118, ss. 1-13, May. 2023, doi: 10.1007/s43452-023-00667-x.
- [122] H. Dehghanpour, S. Subasi, S. Guntepe, M. Emiroglu, ve M. Marasli, “Investigation of fracture mechanics, physical and dynamic properties of UHPCs containing PVA, glass and steel fibers”, *Constr Build Mater*, c. 328, sy 127079, ss. 1-16, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127079.
- [123] Z. Zhang, S. Li, P. Chen, X. Liu, ve J. Wang, “Mitigating shrinkage in ultra-high performance concrete using MgO expansion agents with different activity levels”, *Front Mater*, c. 9, ss. 1-15, 2022, doi: 10.3389/fmats.2022.1033467.
- [124] P. P. Li, Q. L. Yu, ve H. J. H. Brouwers, “Effect of PCE-type superplasticizer on early-age behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC)”, *Constr Build Mater*, c. 153, ss. 740-750, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.145.
- [125] R. Wang ve X. Gao, “Relationship between flowability, entrapped air content and strength of UHPC mixtures containing different dosage of steel fiber”, *Applied Sciences (Switzerland)*, c. 6, sy 8, ss. 1-13, 2016, doi: 10.3390/app6080216.
- [126] H. Huang, X. Gao, H. Wang, ve H. Ye, “Influence of rice husk ash on strength and permeability of ultra-high performance concrete”, *Constr Build Mater*, c. 149, ss. 621-628, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.05.155.
- [127] S. Türkel ve T. Gezmen, “Bor minerali ve uçucu kül içeren harçların mekanik özelliklerinin ve sülfata dayanıklılığının incelenmesi”, *Deu Muhendislik Fakultesi Fen ve Muhendislik*, c. 19, sy 57, ss. 757-778, Oca. 2017, doi: 10.21205/deufmd.2017195768.

- [128] T. Mutuk ve B. Mesci, “Analysis of mechanical properties of cement containing boron waste and rice husk ash using full factorial design”, *J Clean Prod*, c. 69, ss. 128-132, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.01.051.
- [129] E. Erdogmus, “Combined effect of waste colemanite and silica fume on properties of cement mortar”, *Science and Engineering of Composite Materials*, c. 21, sy 3, ss. 369-375, 2014, doi: 10.1515/secm-2013-0041.
- [130] E. Erdogmus, Y. Erdoğan, O. Gencel, S. Targan, ve U. Avciata, “Influence of colemanite admixture on portland cement durability”, *Advances in Cement Research*, c. 24, sy 3, ss. 155-164, 2012, doi: 10.1680/adcr.10.00043.
- [131] H. E. Pehlivanoglu, M. Davraz, ve Ş. Kılınçarslan, “Bor bileşiklerinin çimento priz süresine etkisi ve denetlenilebilirliği”, *SDU International Technologic Science*, c. 5, sy 3, ss. 39-48, Ara. 2013.
- [132] H. Taban, H. Süleyman Gökçe, ve H. İ. Abama, “Çimento katkı malzemesi olarak kullanılan doğal puzolanların ekolojik etkileri”, *Politeknik Dergisi*, c. 15, sy 4, ss. 185-190, 2012, doi: 10.2339/2012.15.4.
- [133] İ. Ustabas, “Kolemanit ve üleksitin çimentoda kullanılabilirliğinin araştırılması”, içinde *Hazır Beton Kongresi*, 2011, ss. 367-375.
- [134] H. Binici, A. H. Sevinç, ve M. Y. Durgun, “Pomza, barit, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı harçların dayanımı ve sülfat direnci”, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, c. 7, sy 1, ss. 39-51, 2011.
- [135] M. Davraz, “The effects of boron compounds on the properties of cementitious composites”, *Science and Engineering of Composite Materials*, c. 17, sy 1, ss. 1-17, 2010, doi: doi.org/10.1515/SECM.2010.17.1.1.
- [136] D. Demir ve G. Keleş, “Radiation transmission of concrete including boron waste for 59.54 and 80.99 keV gamma rays”, *Nucl Instrum Methods Phys Res B*, c. 245, sy 2, ss. 501-504, 2006, doi: 10.1016/j.nimb.2005.11.139.
- [137] M. Özdemir ve N. U. Öztürk, “Utilization of clay wastes containing boron as cement additives”, *Cem Concr Res*, c. 33, sy 10, ss. 1659-1661, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00138-8.
- [138] H. F. W. (Harry F. W.) Taylor, *Cement chemistry*, 2.baskı. New York, ABD: Thomas Telford Publishing, 1997.
- [139] L. J. Csetenyi ve F. P. Glasser, “Borate substituted ettringites”, içinde *Materials Research Society Symposium Proceedings Vol.294*, Birleşik Krallık: Cambridge Üniversitesi, 1993, ss. 273-278. doi: 10.1557/proc-294-273.
- [140] M. Mushurov, O. Canpolat, M. Uysal, M. M. Al-mashhadani, ve Y. Aygörmez, “Investigation of waste products of boron and metakaolin utilizes”, *Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies*, c. 3, sy 2, ss. 212-220, Nis. 2018, doi: 10.29187/jscmt.2018.22.
- [141] U. K. Sevim, M. Ozturk, M. B. Bankir, ve U. Aydin, “Utilization of colemanite waste in concrete design”, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, c. 4, sy 12, ss. 170-175, 2017, doi: 10.22161/ijaers.4.12.25.
- [142] U. K. Sevim, “Colemanite ore waste concrete with low shrinkage and high split tensile strength”, *Mater Struct*, c. 44, sy 1, ss. 187-193, 2011, doi: 10.1617/s11527-010-9618-4.

- [143] C. Kara, T. Kütük-Sert, ve S. Kütük, “Öğütülmüş kolemanit içeren betonlarda sodyum klorür etkisi”, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 8, sy 1, ss. 499-510, Eki. 2020, doi: 10.29130/dubited.553523.
- [144] T. Kütük-Sert, C. Kara, ve S. Kütük, “Öğütülmüş kolemanit minerali ikameli beton yollardaki aşınma kaybının araştırılması”, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, c. 20, ss. 287-295, May. 2020, doi: 10.35414/akufemubid.652511.
- [145] T. Kutuk-Sert, “Stability analyses of submicron-boron mineral prepared by mechanical milling process in concrete roads”, *Constr Build Mater*, c. 121, ss. 255-264, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.156.
- [146] M. Y. Durgun ve A. H. Sevinç, “High temperature resistance of concretes with GGBFS, waste glass powder, and colemanite ore wastes after different cooling conditions”, *Constr Build Mater*, c. 196, ss. 66-81, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.087.
- [147] H. Binici, A. H. Sevinç, ve Y. M. Durgun, “Barit, bazaltik pomza, kolemanit ve yüksek fırın cürufu katkılı betonların özellikleri”, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, c. 13, sy 1, ss. 1-14, 2010.
- [148] O. Gencel, W. Brostow, C. Ozel, ve M. Filiz, “An investigation on the concrete properties containing colemanite”, *International Journal of Physical Sciences*, c. 5, sy 3, ss. 216-225, Nis. 2010.
- [149] *Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*. Türk Standartları Enstitüsü TS EN 197-1, 2012.
- [150] *Çimento Deney Metotları – Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü TS EN 196-3, 2017.
- [151] *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. American Society for Testing and Materials ASTM C230/C230M , 2021.
- [152] *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)*. American Society for Testing and Materials ASTM C109/C109M , 2021.
- [153] *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. American Society for Testing and Materials ASTM C1437-20 , 2020.
- [154] *Standard Test Method for Slump Flow of Self- Consolidating Concrete*. American Society for Testing and Materials ASTM C1611/C1611M-21 , 2019.
- [155] *Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini - Basınç Yöntemi*. Türk Standartları Enstitüsü TS EN 12350-7, 2019.
- [156] *Beton - Taze Beton deneyleri - Bölüm 6: Yoğunluk*. Türk Standartları Enstitüsü TS EN 12350-6, 2019.
- [157] W. D. John ve H. K. Hilsdorf, “ACI 209R-92/Prediction of creep, shrinkage, and temperature effects in concrete structures”, ABD, 1997.
- [158] *Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar*. American Society for Testing and Materials ASTM C1698-19, 2019.
- [159] *Concrete-Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete Specifications, Performance*. French Standards NF 18-470 , 2016.

- [160] *Standard Test Method for Rebound Number of Hardened Concrete*. American Society for Testing and Materials ASTM C805/C805M-18 , 2019.
- [161] *Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete*. American Society for Testing and Materials ASTM C597-22 , 2023.
- [162] *Charpy Darbe Özelliklerinin Tayini-Bölüm 1: Ölçü Aletsiz Darbe Deneyi*. Türk Standartları Enstitüsü TS EN ISO 179-1, 2011.
- [163] A. Sassani, H. Ceylan, S. Kim, K. Gopalakrishnan, A. Arabzadeh, ve P. C. Taylor, “Influence of mix design variables on engineering properties of carbon fiber-modified electrically conductive concrete”, *Constr Build Mater*, c. 152, ss. 168-181, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.172.
- [164] A. S. El-Dieb, M. A. El-Ghareeb, M. A. H. Abdel-Rahman, ve E. S. A. Nasr, “Multifunctional electrically conductive concrete using different fillers”, *Journal of Building Engineering*, c. 15, ss. 61-69, 2018, doi: 10.1016/j.jobbe.2017.10.012.
- [165] *Beton - Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 12 : Betonun Karbonatlaşmaya Direncinin Tayini - Hızlandırılmış Karbonatlaşma Yöntemi*. Türk Standartları Enstitüsü TS EN 12390-12, 2020.
- [166] *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes*. American Society for Testing and Materials ASTM 1585-20 , 2020.
- [167] *Zemin Döşemesi için Beton Kaplama Blokları-Gerekli Şartlar ve Deney Metotları*, TS 2824 EN 1338/AC. 2009.
- [168] *Düz Levhalar - Elyaf Takviyeli Çimento Kullanılarak İmal Edilmiş-Mamul Özellikleri ve Deney Yöntemleri*. Türk Standartları Enstitüsü TS EN 12467+A2, 2018.
- [169] *Doğal Taşlar-Deney Yöntemleri- Tuz Kristallenmesine Direncin Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü TS EN 1237, 2020.
- [170] J. V. Bothe ve P. W. Brown, “Kinetics of tricalcium aluminate hydration in the presence of boric acid and calcium hydroxide”, *Journal of the American Ceramic Society*, c. 82, sy 7, ss. 1882-1888, 1999, doi: 10.1111/j.1151-2916.1999.tb02012.x.
- [171] J. Bensted, I. C. Callaghan, ve A. Lepre, “Comparative study of the efficiency of various borate compounds as set-retarders of class G oilwell cement”, *Cem Concr Res*, c. 21, sy 4, ss. 663-668, 1991, doi: 10.1016/0008-8846(91)90117-Z.
- [172] Z. Apagyi ve L. J. Csetenyi, “Phase equilibrium study in the CaO-K₂O-B₂O₃-H₂O system at 25°C”, *Cem Concr Res*, c. 31, sy 7, ss. 1087-1091, 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00529-4.
- [173] M. S. Horpan, N. Şahan, H. Paksoy, O. Sivrikaya, ve M. Günes, “Direct impregnation and characterization of Colemanite/Ulexite-Mg(OH)₂ paraffin based form-stable phase change composites”, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, c. 195, ss. 346-352, 2019, doi: 10.1016/j.solmat.2019.03.018.
- [174] A. M. Alshamsi, “Microsilica and ground granulated blast furnace slag effects on hydration temperature”, *Cem Concr Res*, c. 27, sy 12, ss. 1851-1997, 1997, doi: 10.1016/S0008-8846(97)00195-6.
- [175] RILEM Commission 42-CEA, “Properties of set concrete at early ages state-of-

- the-art-report”, 1981. doi: 10.1007/BF02476348.
- [176] Ç. Moral, “Kolemanitten kalsiyum fosfat çimentosu eldesi”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2020.
- [177] M. Bilen, “Improvement of ladle slag formed in ladle metallurgy with colemanite”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, c. 35, sy 2, ss. 943-951, 2020, doi: 10.17341/gazimmfd.426819.
- [178] A. Koenig ve F. Dehn, “Acid resistance of ultra high-performance concrete (UHPC)”, içinde *Nanotechnology in Construction*, İsviçre: Springer International Publishing, 2015, ss. 317-323. doi: 10.1007/978-3-319-17088-6_41.
- [179] İ. Pınarcı ve Y. Kocak, “Hydration mechanisms and mechanical properties of pumice substituted cementitious binder”, *Constr Build Mater*, c. 335, ss. 1-11, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127528.
- [180] B. Zhang, H. Tan, W. Shen, G. Xu, B. Ma, ve X. Ji, “Nano-silica and silica fume modified cement mortar used as Surface Protection Material to enhance the impermeability”, *Cem Concr Compos*, c. 92, ss. 1-48, 2018, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2018.05.012.
- [181] M. Bhattacharya ve K. V. Harish, “An integrated approach for studying the hydration of portland cement systems containing silica fume”, *Constr Build Mater*, c. 188, ss. 1-48, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.114.
- [182] A. Schöler, B. Lothenbach, F. Winnefeld, ve M. Zajac, “Hydration of quaternary portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder”, *Cem Concr Compos*, c. 55, ss. 374-382, 2015, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2014.10.001.
- [183] Y. Zhao, J. Gao, Z. Xu, S. Li, X. Luo, ve G. Chen, “Long-term hydration and microstructure evolution of blended cement containing ground granulated blast furnace slag and waste clay brick”, *Cem Concr Compos*, c. 118, ss. 1-10, 2021, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2021.103982.
- [184] D. Y. Lei, L. P. Guo, W. Sun, J. Liu, X. Shu, ve X. L. Guo, “A new dispersing method on silica fume and its influence on the performance of cement-based materials”, *Constr Build Mater*, c. 115, ss. 716-726, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.023.
- [185] Y. Kocak, E. Tasci, ve U. Kaya, “The effect of using natural zeolite on the properties and hydration characteristics of blended cements”, *Constr Build Mater*, c. 47, ss. 720-727, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.05.033.
- [186] H. C. Pedrosa, O. M. Reales, V. D. Reis, M. das D. Paiva, ve E. M. R. Fairbairn, “Hydration of portland cement accelerated by C-S-H seeds at different temperatures”, *Cem Concr Res*, c. 129, ss. 1-11, 2020, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.105978.
- [187] P. Feng, H. Chang, X. Liu, S. Ye, X. Shu, ve Q. Ran, “The significance of dispersion of nano-SiO₂ on early age hydration of cement pastes”, *Mater Des*, c. 186, ss. 1-11, 2020, doi: 10.1016/j.matdes.2019.108320.
- [188] S. M. Monteagudo, A. Moragues, J. C. Gálvez, M. J. Casati, ve E. Reyes, “The degree of hydration assessment of blended cement pastes by differential thermal and thermogravimetric analysis. Morphological evolution of the solid phases”, *Thermochim Acta*, c. 592, 2014, doi: 10.1016/j.tca.2014.08.008.

- [189] A. Peschard, A. Govin, P. Grosseau, B. Guilhot, ve R. Guyonnet, “Effect of polysaccharides on the hydration of cement paste at early ages”, *Cem Concr Res*, c. 34, sy 11, ss. 2153-2158, Kas. 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.04.001.
- [190] M. F. Eskibalci ve S. G. Ozkan, “An investigation of effect of microwave energy on electrostatic separation of colemanite and ulexite”, *Miner Eng*, c. 31, ss. 90-97, 2012, doi: 10.1016/j.mineng.2012.01.018.
- [191] A. Morandea, M. Thiéry, ve P. Dangla, “Investigation of the carbonation mechanism of CH and C-S-H in terms of kinetics, microstructure changes and moisture properties”, *Cem Concr Res*, c. 56, ss. 153-170, 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.11.015.
- [192] Y. Kocak, “Effects of metakaolin on the hydration development of portland–composite cement”, *Journal of Building Engineering*, c. 31, ss. 1-9, 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101419.
- [193] M. Lanzón ve P. A. García-Ruiz, “Lightweight cement mortars: Advantages and inconveniences of expanded perlite and its influence on fresh and hardened state and durability”, *Constr Build Mater*, c. 22, sy 8, ss. 1798-1806, 2008, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2007.05.006.
- [194] M. Y. Durgun, S. Özen, K. Karakuzu, V. Koby, S. H. Bayqra, ve A. Mardani-Aghabaglou, “Effect of high temperature on polypropylene fiber-reinforced mortars containing colemanite wastes”, *Constr Build Mater*, c. 316, ss. 1-14, 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125827.
- [195] O. Aksoğan, H. Binici, ve E. Ortlek, “Durability of concrete made by partial replacement of fine aggregate by colemanite and barite and cement by ashes of corn stalk, wheat straw and sunflower stalk ashes”, *Constr Build Mater*, c. 106, ss. 253-263, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.102.
- [196] A. G. Celik, T. Depci, ve A. M. Kilic, “New lightweight colemanite-added perlite brick and comparison of its physicomechanical properties with other commercial lightweight materials”, *Constr Build Mater*, c. 62, ss. 59-66, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.03.031.
- [197] S. U. Khan, M. F. Nuruddin, T. Ayub, ve N. Shafiq, “Effects of different mineral admixtures on the properties of fresh concrete”, *The Scientific World Journal*, c. 2014, ss. 1-12, 2014, doi: 10.1155/2014/986567.
- [198] Z. Wu, C. Shi, W. He, ve L. Wu, “Effects of steel fiber content and shape on mechanical properties of ultra high performance concrete”, *Constr Build Mater*, c. 103, ss. 8-14, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.11.028.
- [199] B. Boulekbache, M. Hamrat, M. Chemrouk, ve S. Amziane, “Flowability of fibre-reinforced concrete and its effect on the mechanical properties of the material”, *Constr Build Mater*, c. 24, sy 9, ss. 1664-1671, Eyl. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.02.025.
- [200] G. Hassan Mahmud, “Structural behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete slabs”, Doktora Tezi, Liverpool Üniversitesi, Birleşik Krallık, 2015.
- [201] S. A. A. M. Fennis, J. C. Waraven, ve J. A. Uijl, “The use of particle packing models to design ecological concrete”, *Heron*, c. 54.2, sy 3, ss. 185-204, 2009.
- [202] K. Wille, A. E. Naaman, ve G. J. Parra-Montesinos, “Ultra-high performance

- concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way”, *ACI Mater J*, c. 108, sy 1, 2011, doi: 10.14359/51664215.
- [203] J. Dils, V. Boel, ve G. De Schutter, “Vacuum mixing technology to improve the mechanical properties of ultra-high performance concrete”, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, c. 48, sy 11, ss. 1-17, 2015, doi: 10.1617/s11527-014-0416-2.
- [204] P. Taylor, S. Kosmatka, ve G. Voigt, “Integrated materials and construction practices for concrete pavement”, ABD, 2007.
- [205] E. E. Holt, “Early age autogenous shrinkage of concrete”, Doktora Tezi, Washington Üniversitesi, Washington, ABD, 2001.
- [206] Y. Pekmezci, “Çimento karakteristiklerinin otojen rötre büyüklüğüne etkileri”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [207] H. Mihashi ve J. P. D. B. Leite, “State-of-the-art report on control of cracking in early age concrete”, *Journal of Advanced Concrete Technology*, c. 2, sy 2, ss. 141-154, 2004, doi: 10.3151/jact.2.141.
- [208] T. Kadioğlu, “Rötre azaltıcı katkı maddeleri”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2006.
- [209] S. Yatağan, “Beton ve harçlarda agrega dane boyutunun rötre ve durabilitiye etkisi”, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2010.
- [210] W. Shen, X. Li, G. Gan, L. Cao, C. Li, ve J. Bai, “Experimental investigation on shrinkage and water desorption of the paste in high performance concrete”, *Constr Build Mater*, c. 114, ss. 618-624, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.183.
- [211] D. P. Bentz, “A review of early-age properties of cement-based materials”, *Cem Concr Res*, c. 38, sy 2, ss. 196-204, 2008, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.09.005.
- [212] Y. Li ve J. Li, “Capillary tension theory for prediction of early autogenous shrinkage of self-consolidating concrete”, *Constr Build Mater*, c. 53, ss. 511-516, 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.12.010.
- [213] I. Papayianni, F. Kesikidou, ve P. H. Alt, “The role of shrinkage reducing admixtures and supplementary cementitious materials in volume stability and strength development”, içinde *MATEC Web of Conferences*, Cluj-Napoca, Romanya: EDP Sciences, 2019, ss. 1-6. doi: 10.1051/mateconf/201928902005.
- [214] S. Chatterji ve J. W. Jeffery, “The volume expansion of hardened cement paste due to the presence of ‘dead-burnt’ CaO”, *Magazine of Concrete Research*, c. 18, sy 55, ss. 65-68, 1966, doi: 10.1680/mac.1966.18.55.65.
- [215] J. Seo, S. Park, H. N. Yoon, ve H. K. Lee, “Effect of CaO incorporation on the microstructure and autogenous shrinkage of ternary blend Portland cement-slag-silica fume”, *Constr Build Mater*, c. 249, ss. 1-9, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118691.
- [216] E. Ghafari, S. A. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, A. Portugal, ve L. Durães, “Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete”, *Constr Build Mater*, c. 127, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.123.

- [217] Z. Bayasi ve J. Zhou, “Properties of silica fume concrete and mortar”, *ACI Mater J*, c. 90, sy 4, 1993, doi: 10.14359/3892.
- [218] N. A. Soliman ve A. Tagnit-Hamou, “Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC”, *Constr Build Mater*, c. 145, ss. 243-252, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.187.
- [219] M. Gesoglu, E. Güneyisi, G. F. Muhyaddin, ve D. S. Asaad, “Strain hardening ultra-high performance fiber reinforced cementitious composites: Effect of fiber type and concentration”, *Compos B Eng*, c. 103, ss. 1-35, 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.08.004.
- [220] J. V. Bothe ve P. W. Brown, “Phase formation in the system CaO-Al₂O₃-B₂O₃-H₂O at 23±1°C”, *J Hazard Mater*, c. 63, ss. 199-210, 1998, doi: 10.1016/S0304-3894(98)00221-0.
- [221] H. Yazici, “The effect of curing conditions on compressive strength of ultra high strength concrete with high volume mineral admixtures”, *Build Environ*, c. 42, sy 5, ss. 2083-2089, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.03.013.
- [222] E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, A. Portugal, ve L. Durães, “The effect of nanosilica addition on flowability, strength and transport properties of ultra high performance concrete”, *Mater Des*, c. 59, ss. 1-9, 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.02.051.
- [223] R. Sharma, J. G. Jang, ve P. P. Bansal, “A comprehensive review on effects of mineral admixtures and fibers on engineering properties of ultra-high-performance concrete”, *Journal of Building Engineering*, c. 45, ss. 1-20, 2022, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.103314.
- [224] İ. B. Topçu ve M. Canbaz, “Silis dumanının betonda mekanik çatlak oluşumlarına etkisi”, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi*, c. 12, sy 2, ss. 18-26, 2008.
- [225] *Concrete-Specification, Performance, Production and Conformity*. BS Standarts EN 206:2013 , 2013.
- [226] *Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete*. American Society for Testing and Materials ASTM C1856/C1856M-17, 2017.
- [227] M. Amin ve K. Abu El-Hassan, “Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete”, *Constr Build Mater*, c. 80, ss. 116-124, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.075.
- [228] D. J. Kim, S. H. Park, G. S. Ryu, ve K. T. Koh, “Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers”, *Constr Build Mater*, c. 25, sy 11, ss. 4144-4155, 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.051.
- [229] W. H. Juimo Tchamdjou, T. Cherradi, M. L. Abidi, ve L. A. Pereira-de-Oliveira, “Mechanical properties of lightweight aggregates concrete made with cameroonian volcanic scoria: Destructive and non-destructive characterization”, *Journal of Building Engineering*, c. 16, ss. 1-24, 2018, doi: 10.1016/j.jobbe.2018.01.003.
- [230] H. Y. Qasrawi, “Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted”, *Cem Concr Res*, c. 30, sy 5, ss. 739-746, 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00226-X.

- [231] M. Kazemi, R. Madandoust, ve J. de Brito, “Compressive strength assessment of recycled aggregate concrete using Schmidt rebound hammer and core testing”, *Constr Build Mater*, c. 224, ss. 630-638, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.110.
- [232] T. Xu ve J. Li, “Assessing the spatial variability of the concrete by the rebound hammer test and compression test of drilled cores”, *Constr Build Mater*, c. 188, ss. 820-832, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.138.
- [233] M. Pekgöz, I. A. Ahmed, ve İ. Tekin, “In-Situ evaluation of concrete made of slag cement by using destructive and non-destructive methods”, *Journal of Cement Based Composites*, c. 3, ss. 16-22, 2020, doi: 10.36937/cebacom.2020.003.004.
- [234] M. Shariati, N. H. Ramli-Sulong, K. H. Mohammad Mehdi Arabnejad, P. Shafigh, ve H. Sinaei, “Assessing the strength of reinforced concrete structures through ultrasonic pulse velocity and schmidt rebound hammer tests”, *Scientific Research and Essays*, c. 6, sy 1, ss. 213-220, 2011, doi: <https://doi.org/10.5897/SRE10.879>.
- [235] F. Şahin, M. Uysal, O. Canpolat, Y. Aygörmez, T. Cosgun, ve H. Dehghanpour, “Effect of basalt fiber on metakaolin-based geopolymer mortars containing rilem, basalt and recycled waste concrete aggregates”, *Constr Build Mater*, c. 301, ss. 1-14, 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124113.
- [236] D. Y. Yoo, J. J. Park, S. W. Kim, ve Y. S. Yoon, “Early age setting, shrinkage and tensile characteristics of ultra high performance fiber reinforced concrete”, *Constr Build Mater*, c. 41, ss. 427-438, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.015.
- [237] J. Keating, D. J. Hannant, ve A. P. Hibbert, “Comparison of shear modulus and pulse velocity techniques to measure the build-up of structure in fresh cement pastes used in oil well cementing”, *Cem Concr Res*, c. 19, sy 4, ss. 554-566, 1989, doi: 10.1016/0008-8846(89)90007-0.
- [238] R. Demirboğa, I. Türkmen, ve M. B. Karakoç, “Relationship between ultrasonic velocity and compressive strength for high-volume mineral-admixtured concrete”, *Cem Concr Res*, c. 34, sy 12, ss. 2329-2336, Ara. 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.04.017.
- [239] S. Laureti, M. Ricci, M. N. I. B. Mohamed, L. Senni, L. A. J. Davis, ve D. A. Hutchins, “Detection of rebars in concrete using advanced ultrasonic pulse compression techniques”, *Ultrasonics*, c. 85, ss. 31-38, 2018, doi: 10.1016/j.ultras.2017.12.010.
- [240] K. Schabowicz, “Ultrasonic tomography - The latest nondestructive technique for testing concrete members - Description, test methodology, application example”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, c. 14, sy 2, ss. 295-303, Şub. 2014, doi: 10.1016/j.acme.2013.10.006.
- [241] R. J. M. Wolfs, F. P. Bos, ve T. A. M. Salet, “Correlation between destructive compression tests and non-destructive ultrasonic measurements on early age 3D printed concrete”, *Constr Build Mater*, c. 181, ss. 447-454, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.060.
- [242] B. Baradan, *İnşaat Mühendisleri İçin Malzeme Bilgisi*, 5.baskı. İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Basım Ünitesi, 2003.
- [243] Arnon. Bentur ve Sidney. Mindess, *Fibre Reinforced Cementitious Composites*, 2.baskı. Newyork, ABD: Taylor & Francis Group, 200M.S.

- [244] M. H. Alkayış ve C. Başığit, “Lif katkısının beton darbe dayanımına etkisi”, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 24, ss. 455-462, Nis. 2021, doi: 10.31590/ejosat.897865.
- [245] L. Soufeiani, S. N. Raman, M. Z. Bin Jumaat, U. J. Alengaram, G. Ghadyani, ve P. Mendis, “Influences of the volume fraction and shape of steel fibers on fiber-reinforced concrete subjected to dynamic loading – A review”, *Eng Struct*, c. 124, ss. 405-417, 2016, doi: 10.1016/j.engstruct.2016.06.029.
- [246] A. A. E. Aliabdo, A. E. M. Abd-Elmoaty, ve M. Hamdy, “Effect of internal short fibers, steel reinforcement, and surface layer on impact and penetration resistance of concrete”, *Alexandria Engineering Journal*, c. 52, sy 3, ss. 407-417, 2013, doi: 10.1016/j.aej.2013.06.002.
- [247] T. C. Madhavi ve S. Annamalai, “Electrical conductivity of concrete”, *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, c. 11, sy 9, ss. 5979-5982, 2016.
- [248] A. Karimipour, M. Ghalehnovi, ve J. de Brito, “Mechanical and durability properties of steel fibre-reinforced rubberised concrete”, *Constr Build Mater*, c. 257, ss. 1-19, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119463.
- [249] F. M. Khalaf ve J. G. Wilson, “Electrical properties of freshly mixed concrete”, *Journal of Materials in Civil Engineering*, c. 11, ss. 242-248, 1999, doi: 10.1061/(asce)0899-1561(1999)11:3(242).
- [250] H. Dehghanpour, K. Yilmaz, ve M. Ipek, “Evaluation of recycled nano carbon black and waste erosion wires in electrically conductive concretes”, *Constr Build Mater*, c. 221, ss. 109-121, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.025.
- [251] H. Dehghanpour ve K. Yilmaz, “Investigation of specimen size, geometry and temperature effects on resistivity of electrically conductive concretes”, *Constr Build Mater*, c. 250, ss. 1-10, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118864.
- [252] H. Dehghanpour, K. Yilmaz, F. Afshari, ve M. Ipek, “Electrically conductive concrete: A laboratory-based investigation and numerical analysis approach”, *Constr Build Mater*, c. 260, ss. 1-15, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119948.
- [253] A. Tafroui, G. Escadeillas, ve T. Vidal, “Durability of the ultra high performances concrete containing metakaolin”, *Constr Build Mater*, c. 112, ss. 980-987, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.169.
- [254] L. A. P. de Oliveira, J. P. de Castro Gomes, ve C. N. G. Pereira, “Study of sorptivity of self-compacting concrete with mineral additives”, *Journal of Civil Engineering and Management*, c. 12, sy 3, ss. 215-220, 2006, doi: 10.1080/13923730.2006.9636395.
- [255] J. Dils, V. Boel, ve G. De Schutter, “Influence of cement type and mixing pressure on air content, rheology and mechanical properties of UHPC”, *Constr Build Mater*, c. 41, ss. 455-463, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.050.
- [256] P. C. Aitcin, “The durability characteristics of high performance concrete: A review”, *Cem Concr Compos*, c. 25, sy 4-5 SPEC, ss. 409-420, 2003, doi: 10.1016/S0958-9465(02)00081-1.
- [257] B. Baradan vd., *Beton*, 2.baskı. İzmir, Türkiye: Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2015.

- [258] V. Nergiz, “Yüksek dayanımlı betonlarda durabilite ve işlenebilirlik”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2007.
- [259] T. Yen, T. H. Hsu, Y. W. Liu, ve S. H. Chen, “Influence of class F fly ash on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete”, *Constr Build Mater*, c. 21, ss. 458-463, 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.06.051.
- [260] S. K. Rao, P. Sravana, ve T. C. Rao, “Abrasion resistance and mechanical properties of roller compacted concrete with GGBS”, *Constr Build Mater*, c. 114, ss. 925-933, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.004.
- [261] H. Li, M. hua Zhang, ve J. ping Ou, “Abrasion resistance of concrete containing nano-particles for pavement”, *Wear*, c. 260, sy 11-12, ss. 1262-1266, 2006, doi: 10.1016/j.wear.2005.08.006.
- [262] R. Siddique, “Compressive strength, water absorption, sorptivity, abrasion resistance and permeability of self-compacting concrete containing coal bottom ash”, *Constr Build Mater*, c. 47, ss. 1444-1450, 2013, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.06.081.
- [263] Z. He, X. Chen, ve X. Cai, “Influence and mechanism of micro/nano-mineral admixtures on the abrasion resistance of concrete”, *Constr Build Mater*, c. 197, ss. 91-98, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.11.224.
- [264] O. Şimşek, *Beton ve Beton Teknolojisi*, 5.baskı. Ankara, Türkiye: Seçkin Yayıncılık, 2016.
- [265] P. Liu, Y. Chen, Z. Yu, ve Z. Lu, “Effect of sulfate solution concentration on the deterioration mechanism and physical properties of concrete”, *Constr Build Mater*, c. 227, ss. 1-10, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.08.022.
- [266] K. De Weerd, D. Orsáková, ve M. R. Geiker, “The impact of sulphate and magnesium on chloride binding in portland cement paste”, *Cem Concr Res*, c. 65, ss. 30-40, 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.07.007.
- [267] H. Haynes ve M. T. Bassuoni, “Physical salt attack on concrete”, *Concrete International*, c. 33, sy 11, ss. 38-42, 2011.
- [268] M. B. Bankir ve U. Korkut Sevim, “Performance optimization of hybrid fiber concretes against acid and sulfate attack”, *Journal of Building Engineering*, c. 32, ss. 1-19, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101443.
- [269] M. Maes ve N. De Belie, “Influence of chlorides on magnesium sulphate attack for mortars with portland cement and slag based binders”, *Constr Build Mater*, c. 155, ss. 630-642, Kas. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.201.
- [270] K. Tosun, B. Felekoğlu, B. Baradan, ve I. A. Altun, “Portland kalkerli çimento bölüm II- sülfat dayanıklılığı”, *İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, c. 20, sy 3, ss. 4737-4757, 2009.
- [271] B. Alişer vd., “Cam lif takviyeli çimento harçlarının sülfat direncine mermer tozu ilavesinin etkisi”, *Fırat Üniv. Müh. Bil. Dergisi*, c. 28, sy 2, ss. 175-183, 2016.
- [272] H. Song, J. Chen, ve J. Jiang, “An internal expansive stress model of concrete under sulfate attack”, *Acta Mechanica Solida Sinica*, c. 29, sy 6, ss. 610-619, 2016, doi: 10.1016/S0894-9166(16)30331-7.
- [273] Y. Chen, J. Gao, L. Tang, ve X. Li, “Resistance of concrete against combined attack of chloride and sulfate under drying-wetting cycles”, *Constr Build Mater*, c.

106, ss. 650-658, 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.151.

- [274] C. Meng, W. Li, L. Cai, X. Shi, ve C. Jiang, “Experimental research on durability of high-performance synthetic fibers reinforced concrete: Resistance to sulfate attack and freezing-thawing”, *Constr Build Mater*, c. 262, ss. 1-15, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120055.
- [275] P. J. M. Monteiro ve K. E. Kurtis, “Time to failure for concrete exposed to severe sulfate attack”, *Cem Concr Res*, c. 33, sy 7, ss. 987-993, 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)01097-9.
- [276] H. M. Kuyumcu, “Deniz suyu ve sülfat suların betona dayanımına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, 2006.
- [277] A. Benli, M. Karataş, ve E. Gurses, “Effect of sea water and MgSO₄ solution on the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with fly ash/silica fume”, *Constr Build Mater*, c. 146, ss. 464-474, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.108.
- [278] A. M. Diab, A. E. M. Awad, H. E. Elyamany, ve A. E. M. Abd Elmoaty, “Guidelines in compressive strength assessment of concrete modified with silica fume due to magnesium sulfate attack”, *Constr Build Mater*, c. 36, ss. 311-318, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.075.
- [279] M. J. Shannag ve H. A. Shaia, “Sulfate resistance of high-performance concrete”, *Cem Concr Compos*, c. 25, ss. 363-369, Nis. 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(02\)00049-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00049-5).
- [280] Ö. Şengül, C. Taşdemir, Ş. Koruç, ve R. Sönmez, “Agrega türünün betonun donma-çözülme dayanıklılığına etkisi”, içinde *3.Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 2003, ss. 43-50.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Betül İŞBİLİR KULA

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Kompozit Malzeme Teknolojileri	Düzce Üniversitesi	2023
Y. Lisans	Yapı Eğitimi ABD	Düzce Üniversitesi	2012
Lisans	İnşaat Mühendisliği	Düzce Üniversitesi	2020
Lisans	Yapı Öğretmenliği	Abant İzzet Baysal Üniversitesi	2007
Lise	Bilgisayar (Yazılım)	Cumhuriyet Nevvar Salih İşgören Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi	1999

TEZDEN ÇIKAN YAYIN(LAR)

Ulusal hakemli dergilerde yayınlanan yayınlar

- [1] M. Seis, B. İşbilir Kula, V. Özdal, M. Maraşlı, S. Subaşı, & H. Dehghanpour, “Investigation of different superplasticizers effect on workability and strength parameters in ultra high performance concretes,” *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, c. 10, sayı 3, ss. 519–531, 2022.

Uluslararası Sempozyumlar

- [1] B. İşbilir Kula, S. Subaşı, & M. Seis, “Mikronize kolemanitin çimento harçlarında mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi,” *Cumhuriyet 4. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, Türkiye, 2021, ss. 158–170.
- [2] B. İşbilir, S. Subaşı, H. Dehghanpour, & M. Maraşlı, “Investigation of the colemanite on the electrical resistivity of ultra high performance concrete(UHPC),” *1st International Conference on Engineering and Applied Natural Sciences*’nda sunuldu, Konya, Türkiye, 2022.

Uluslararası kitaplar veya kitaplarda bölümler

- [1] B. İşbilir Kula, S. Subaşı, H. Dehghanpour, & M. Maraşlı, “Investigation of the colemanite on the electrical resistivity of ultra high performance concrete(UHPC),” *New Trends In Engineering And Applied Natural Sciences*, İzmir, Türkiye: Duvar Yayıncılık, 2022, böl.8, ss. 93–108.

Ulusal ve Uluslararası Patentler

- [1] B. İşbilir Kula, S. Subaşı, M. Maraşlı, & M. Seis, “Yeni bir katkı bileşeni içeren bir ultra yüksek performanslı beton,” Türkiye. Patent 2023/008072, 2023, 11 Temmuz 2023.

DİĞER YAYINLAR

Ulusal hakemli dergilerde yayınlanan yayınlar

- [1] S. Subaşı, B. İşbilir, & İ. Ercan, “Uçucu kül ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi,” *Politeknik Dergisi*, c. 14, sayı 2, ss. 141–148, 2011.
- [2] S. Subaşı, H. Dehghanpour, B. İşbilir Kula, & M. Maraşlı, “Investigation of engineering properties of lightweight concrete made with the addition of sodium salt based powder additive,” *Düzce University Journal of Science and Technology*, c. 10, sayı. 5, ss. 137–145, 2022.

Uluslararası Sempozyumlar

- [1] B. İşbilir, S. Subaşı, & İ. Ercan, “Pirinç kabuğu külünün beton durabilitesine etkisi,” *International Sustainable Buildings Symposium (ISBS)*, Ankara, Türkiye, 2010, ss. 76–81.
- [2] S. Subaşı, B. İşbilir, & İ. Ercan, “Uçucu kül ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerine yüksek sıcaklığın etkisi,” *International Sustainable Buildings Symposium (ISBS)*, Ankara, Türkiye, 2010, ss. 149–154.
- [3] B. İşbilir & S. Subaşı, “Polyester matrisli kompozitlerde uçucu külün dolgu olarak kullanılabilirliği ve kompozit malzeme özelliklerine etkisi,” *1st International Symposium on Light Alloys and Composite Materials (ISLAC)*’nda sunuldu, Karabük, Türkiye, 2018.
- [4] M. Seis, S. Subaşı, B. İşbilir Kula, & M. Maraşlı, “Karbon nanotüplerin ultra yüksek performanslı betonların mekanik ve fiziksel özelliklerine etkileri,” *Cumhuriyet 4. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, Türkiye, 2021, ss. 148–157.
- [5] S. Subaşı, H. Dehghanpour, B. İşbilir Kula, & M. Maraşlı, “Investigation of engineering properties of lightweight concrete made with the addition of sodium salt based powder additive,” *4th International Engineering Research Symposium (INERS)*’nda sunuldu, Düzce, Türkiye, 2022.

Uluslararası kitaplar veya kitaplarda bölümler

- [1] B. İşbilir & S. Subaşı, *Fly Ash Filled Polyester Composites*, Republic of Mauritius: Lap Lambert Academic Publishing, 2020.
- [2] B. İşbilir, *Mechanical Properties of Rice Husk Ash Substituted Cement Samples*, Republic of Mauritius: Lap Lambert Academic Publishing, 2020.

Tezler

- [1] B. İşbilir, “Pirinç kabuğu külü ikameli çimento numunelerinin mekanik özelliklerinin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce Üniversitesi, Düzce, Türkiye, 2012.