



T.C.

BARTIN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KOLEMANİT VE KOLEMANİT ATIKLARININ KENDİLİĞİNDEN
YERLEŞEN BETONLARIN REOLOJİK VE SERTLEŞMİŞ
ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

OĞUZ ŞEKER

DANIŞMAN

DOÇ.DR. MUHAMMED YASİN DURGUN

BARTIN-2022



**T.C.
BARTIN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KOLEMANİT VE KOLEMANİT ATIKLARININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN
BETONLARIN REOLOJİK VE SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

OĞUZ ŞEKER

BARTIN-2022

BEYANNAME

Bartın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç.Dr. Muhammed Yasin DURGUN danışmanlığında hazırlamış olduğum “KOLEMANİT VE KOLEMANİT ATIKLARININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN REOLOJİK VE SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı yüksek lisans tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

02.12.2022

Oğuz ŞEKER

ÖNSÖZ

“Kolemanit ve Kolemanit Atıklarının Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik ve Sertleşmiş Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi” adlı tez çalışmasında, her aşamada bilgi, deneyim ve desteklerini paylaştan saygıdeğer danışmanım Doç.Dr. Muhammed Yasin DURGUN’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmalarımızda kullanılan kolemanit temini için Teknoloji Geliştirme Daire Başkanlığı-Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğüne, çimento temini için Sanko Bartın Çimento Sanayi ve Tic. A.Ş.’ye, uçucu kül için Zonguldak/Çatalağzı Termik Santrali’ne ve kimyasal katkı malzemesi için Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.’ye ve son olarak bu çalışmanın gerçekleşmesi için 2021-FEN-CY-002 numaralı “Kolemanit ve Kolemanit Atıklarının Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik ve Sertleşmiş Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi” proje kapsamında maddi destekleri için Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi’ne (BAP) katkılarından dolayı teşekkürü borç bilirim.

Okul ve tez süreci boyunca her anımda maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen sevgili aileme teşekkür ederim.

Oğuz ŞEKER

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KOLEMANİT VE KOLEMANİT ATIKLARININ KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONLARIN REOLOJİK VE SERTLEŞMİŞ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Oğuz ŞEKER

Bartın Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışman: Doç.Dr. Muhammed Yasin DURGUN

Bartın-2022, sayfa: 104

Çalışma kapsamında, kendiliğinden yerleşen beton (KYB) karışımlarında kolemanit ve kolemanit konsantratör atıklarının kullanımı araştırılmıştır. Bor mineralleri içeren katkıların çimento hidrasyonunu geciktirici etkisi olduğu bilinmektedir. Öncelikler referans KYB karışımı tespit edildikten sonra çimentonun ikamesi olarak %0,5, %1,0, %1,5 ve %2,0 kolemanit ve %1,0, %1,5, %2,0 ve %2,5 kolemanit konsantratör atığı kullanılmış ve bunların taze beton özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda tek nokta testleri ve reometre testleri uygulanmıştır. Ayrıca numunelerin priz süreleri ve birim ağırlıkları ölçülerek 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları belirlenmiştir. Teste tabi tutulan beton numunelerin hidrasyon gelişmeleri, XRD, TGA ve SEM ile incelenmiştir. Sonuç olarak, kolemanit kullanımının, kendiliğinden yerleşen betonun taze özelliklerini ve reolojik parametrelerini iyileştirdiği ve koruduğu, buna karşın kolemanit

konsantratör atığı kullanımının ise genellikle tam tersi bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Kullanılan B_2O_3 oranının artması ile hem kolemanit hem de kolemanit konsantratör atıklarına ait numunelerin priz sürelerini uzattığı görülmektedir. 7 ve 28 günlük basınç dayanımlarında referans betonunun dayanımı daha yüksek değer verirken 90 günlük basınç dayanımında C1,0 ve C1,5 numuneleri yüksek dayanım değerleri vermiştir. Mikro yapılar açısından kolemanit konsantratör atığı, referans ve kolemanit içeren örneklerle kıyasla daha gevşek yapıda olduğu saptanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kendiliğinden yerleşen beton, kolemanit, kolemanit konsantratör atığı, reoloji

Bilim Alan Kodu : 624.05.01

ABSTRACT

M.Sc.Thesis

INVESTIGATING THE EFFECTS OF COLEMANİTE AND COLEMANİTE ORE WASTES ON RHEOLOGICAL AND HARDENED PROPERTIES OF SELF- COMPACTİNG CONCRETES

Oğuz ŞEKER

Bartın University

Graduate School

Department of Civil Engineering

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Muhammed Yasin DURGUN

Bartın-2022, pp:104

Within the scope of the study, the use of colemanite and colemanite concentrator wastes in self compacting concrete (SCC) mixtures was investigated. It is known that additives containing boron minerals have a retarding effect on cement hydration. After determining the reference SCC mixture, 0.5%, 1.0%, 1.5% and 2.0% colemanite and 1.0%, 1.5%, 2.0% and 2.5% colemanite concentrator waste were used as cement substitutes and their effects on fresh concrete properties were investigated. In this context, single point tests and Rheometer tests were applied. In addition, the setting times and unit weights of the samples were measured and the compressive strengths at 7, 28 and 90 days were determined. The hydration developments of the exposed concrete samples were investigated by XRD, TGA and SEM investigations. As a result, it has been observed that the use of colemanite

improves and maintains the fresh properties and rheological parameters of self compacting concrete, while the use of colemanite concentrator waste generally had the opposite effect. It is seen that the setting times of the samples belonging to both colemanite and colemanite concentrator wastes increase with the increase of the B_2O_3 ratio used. While the strength of the reference concrete was higher at 7 and 28 days of compressive strength, C1.0 and C1.5 samples gave higher strength values at 90 days of compressive strength. In terms of microstructures, colemanite concentrator waste was found to be looser than the samples containing reference and colemanite.

Keywords: Self-Compacting Concrete, Colemanite, Colemanite Concentrator Waste, Rheology

Science Field Code: 624.05.01

İÇİNDEKİLER

BEYANNAME	ii
ÖNSÖZ	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
İÇİNDEKİLER.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
TABLolar DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xv
KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ	1
1.1. Beton Tanım ve Özellikleri	1
1.1.1. Betonların Sınıflandırılması.....	2
1.1.2. Betonun Dayanımı.....	2
1.1.3. Betonun Durabilitesi	3
1.1.4. Betonda Geçirimsizlik	4
1.1.5. Betonun İşlenebilirliği.....	4
1.1.6. Betonun Aşınması.....	5
1.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton Tanım ve Özellikleri	5
1.2.1. Mühendislik Açısından Kendiliğinden Yerleşen Beton	6
1.2.1.1. Basınç Dayanımı	6
1.2.1.2. Çekme Dayanımı	6
1.2.1.3. Elastisite Modülü	6
1.2.1.4. Isı Genleşme Katsayısı	7
1.2.1.5. Sünme	7
1.2.1.6. Büzülme (Rötre).....	7
1.2.1.7. Dayanıklılık	8
1.2.1.8. İşlenebilirlik	8
1.2.1.9. Ayrışma	8

1.2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları.....	9
1.2.2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Avantajları.....	9
1.2.2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Dezavantajları	10
1.2.3. Kendiliğinden Yerleşen Beton Bileşenleri ve Karışım Tasarım Prensipleri	10
1.2.3.1. Çimento	10
1.2.3.2. Dolgu Maddesi	11
1.2.3.3. Agregalar	11
1.2.3.4. Karışım Suyu	12
1.2.3.5. Kimyasal Katkılar	12
1.3. Taze Beton	13
1.3.1.1. Doldurma Yeteneği.....	13
1.3.1.2. Ayrışmaya Karşı Direnç	13
1.3.1.3. Geçiş Yeteneği.....	14
1.4. Karışım Tasarımı	14
1.5. Kendiliğinden Yerleşen Taze Betonun Sınıflandırılması	15
1.6. Reoloji	15
1.7. Uçucu Kül	17
1.8. Bor Elementi.....	19
1.8.1. Ticari Önem Taşıyan Bor Mineralleri	20
1.8.1.1. Kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).....	21
1.8.1.2. Kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$).....	21
1.8.1.3. Tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).....	21
1.8.1.4. Üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$).....	21
1.8.2. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları	22
1.8.2.1. Cam Sektörü	22
1.8.2.2. Tarım	22
1.8.2.3. Seramik-Frit.....	23
1.8.2.4. Sağlık	23
1.8.2.5. İnşaat Sektörü-Yapı Malzemesi	23
1.8.2.6. Enerji	24
1.9. Bor Atığı.....	25
1.10. Bor Bileşiğinin Çimento Hidratasyonuna Etkisi.....	26

1.11. Konunun Önemi ve Amacı.....	26
2. LİTERATÜR	27
2. Literatür Çalışmaları	27
2.1. KYB ve UK Üzerine Yapılmış Geçmiş Çalışmalar.....	27
2.2. Bor elementi ve Bor Atıkları Üzerine Yapılan Çalışmalar	31
3. MATERYAL VE METOT	34
3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri	34
3.1.1. Çimento	34
3.1.2. Agrega	35
3.1.3. Uçucu Kül	37
3.1.4. Süperakışkanlaştırıcı Katkı.....	38
3.1.5. Karışım Suyu	39
3.1.6. Kolemanit.....	39
3.1.7. Kolemanit Konsantratör Atığı.....	40
3.2. Yöntem.....	42
3.2.1. Agrega Tane Dağılımı	42
3.2.2. Beton Karışımlarının Hazırlanması	42
3.3. Taze Beton Deneyleri.....	43
3.3.1. Taze Birim Ağırlık Deneyi.....	44
3.3.2. Vicat Deneyi.....	44
3.3.3. Tek Nokta Deneyleri	46
3.3.3.1. T ₅₀₀ ve Çökme-Yayılma Deneyi.....	46
3.3.3.2. V-Hunisi Deneyi.....	48
3.3.3.3. J-Ring Deneyi.....	49
3.3.3.4. Elek Segregasyon Deneyi	50
3.3.4. Çift Nokta Reometre Deneyleri.....	51
3.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri	53
3.4.1. Sertleşmiş Birim Ağırlık Deneyi	53
3.4.2. Basınç Dayanım Deneyi ve Elastisite Modülü Deneyi	53
3.4.3. Kılcallık Deneyi	55

3.4.4. Ultrases Deneyi	55
3.4.5. SEM Görüntüleme	56
3.4.6. XRD Analizleri	58
3.4.7. TGA Analizi	59
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	60
4. Bulgular	60
4.1. Taze Beton Deney Sonuçları	60
4.1.1. Priz Süresi Tayini	61
4.1.2. Birim Ağırlık	62
4.2. Tek Nokta Reoloji Testleri	63
4.2.1. T ₅₀₀ Süresi ve Çökme-Yayılma Testi	63
4.2.2. J-Halkası Testi	66
4.2.3. V-Hunisi ve Elek Segregasyonu Testleri	68
4.3. Reometre Testleri	70
4.4. Sertleşmiş Hal Testleri	75
4.4.1. Basınç Dayanımı	75
4.4.2. Elastisite Modülü	78
4.4.3. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı	79
4.4.4. Kılcal Su Emme Testi	80
4.5. Mikroyapı İncelemeleri	82
4.5.1. X-Işını Difraktometrisi (XRD)	82
4.5.2. Termogravimetrik Analiz (TGA)	84
4.5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülemeleri	89
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	93
KAYNAKLAR	95

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
No	No
1. 1: Newton modelinin akış diyagramı.	15
1. 2: Newtonien olmayan akış diyagramı.	16
3. 1: Karışımda kullanılan çimento.	35
3. 2: Karışımda kullanılan iri agrega-kırma kum- dere kumu.	36
3. 3: Karışımda kullanılan uçucu kül.	37
3. 4: Uçucu kül tane boyut dağılımı.	38
3. 5: Karışımda kullanılan süperakışkanlaştırıcı.	39
3. 6: Karışımda kullanılan kolemanit.	40
3. 7: Kolemanit tane dağılımı.	40
3. 8: Karışımda kullanılan kolemanit konsantratör atığı.	41
3. 9: Kolemanit konsantratör atığının tane boyutu dağılımı.	41
3. 10: Taze birim ağırlık deneyi.	44
3. 11: Vicat deneyi priz başlama süresi tayini.	45
3. 12: Vicat deneyi priz sona erme süresi tayini.	45
3. 13: Çökme-yayılma tablası ve Abraham hunisi.	47
3. 14: Çökme-yayılma ve T_{500} süresi.	47
3. 15: Çökme-yayılma deneyi.	47
3. 16: V-hunisi deneyi.	48
3. 17: J-ring deneyi.	49
3. 18: Elek segregasyon deneyi.	50
3. 19: Reoloji deneyi.	51
3. 20: ICAR Rheometer okuma ekranı.	52
3. 21: Statik ve dinamik akma gerilmesi.	52
3. 22: Sertleşmiş birim ağırlık deneyi.	53
3. 23: Basınç dayanım testi.	54
3. 24: Ekstantometre ve kullanımı.	54
3. 25: Kılcallık deneyi.	55

3. 26: Ultrases deneyi.	56
3. 27: SEM cihazı.	57
3. 28: XRD cihazı.	58
3. 29: TGA cihazı.	59
4. 1: Taze ve sertleşmiş beton birim ağırlık sonuçları.	62
4. 2: T_{500} süresi ve çökme-yayılma çapı değerleri.	63
4. 3: Referans KYB serisine ait çökme-yayılma deney sonucu.	64
4. 4: CW2,5 KYB serisine ait çökme-yayılma deney sonucu.	65
4. 5: T_{500j} süreleri ve J-halkası yayılma çapları.	66
4. 6: CW2,5 KYB serisine ait J-ring deney sonucu.	67
4. 7: V-hunisi süreleri.	68
4. 8: Elek segregasyon değerleri.	69
4. 9: Kolemanit içeren beton karışımlarının reometre test sonuçları.	71
4. 10: KKA içeren beton karışımlarının reometre test sonuçları.	73
4. 11: 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları.	75
4. 12: 90 günlük örneklerin elastisite modülü değerleri.	78
4. 13: 7,28 ve 90 günlük örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri.	79
4. 14: Örneklerin 24 saatlik kılcal su emme katsayıları.	80
4. 15: Referans örneğinin 7, 28 ve 90 günlük XRD analizi.	82
4. 16: %1,5 kolemanit içeren örneklerin 7, 28 ve 90 günlük XRD analizleri.	83
4. 17: %1,5 KKA içeren örneklerin 7, 28 ve 90 günlük XRD analizleri.	83
4. 18: Örneklerin kütle kayıpları (a) 7 günlük (b) 28 günlük (c) 90 günlük.	84
4. 19: Pane ve Hansan, 2005; Deboucha, 2017’de önerilen metoda göre hesaplanan hidratasyon dereceleri.	87
4. 20: Karışımların TGA sonuçlarına göre hesaplanan portlandit miktarı.	88
4. 21: 7 gün kürlenmiş örneklerin SEM görüntüleri (a) R (b) C1,5 (c) CW1,5.	89
4. 22: 28 gün kürlenmiş örneklerin SEM görüntüleri (a) R (b) C1,5 (c) CW1,5.	90
4. 23: 90 gün kürlenmiş örneklerin SEM görüntüleri (a) R (b) C1,5 (c) CW1,5.	91
4. 24: 90 gün kürlenmiş R ve C1,5 örneğindeki etrenjit CH formasyonları.	92

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo	Sayfa
No	No
1. 1: Betonun iç ve dış etkenlerle bozulması.....	3
1. 2: KYB taze beton özelliklerinin belirlenme deneyleri (EFNARC, 2002).	14
1. 3: Ticari öneme sahip bor mineralleri (Eti maden, 2020).	19
3. 1: Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.....	34
3. 2: Çimentonun mekanik özellikleri.	35
3. 3: Agregaların fiziksel özellikleri.....	35
3. 4: Agregaların elek analiz sonuçları.	36
3. 5: Uçucu külün kimyasal bileşimi.	37
3. 6: Karışımda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkının özellikleri.	38
3. 7: Kolemanitin kimyasal bileşimi.	39
3. 8: Kolemanit konsantratör atığı kimyasal bileşimi.	41
3. 9: KYB karışımında kullanılan malzeme miktarı.....	43
3. 10: T ₅₀₀ ve çökme-yayılma sınıflandırılması.....	46
3. 11: V hunisi sınıflandırması.	48
3. 12: J-ring sınıflandırması.	49
3. 13: Elek segregasyon sınıfı.	50
4. 1: Taze ve sertleşmiş beton deneyleri.....	60
4. 2: R, kolemanit ve KKA ile üretilmiş hamurların priz süreleri.....	61
4. 3: J-halkası geçiş yeteneği (P _J -J-halkası bloklanma adımı).	66
4. 4: Pane ve Hansan, 2005; Debaucha, 2017’de önerilen metoda göre hesaplanan $W_{b\infty}$, τ ve a değerleri.....	86

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Al_2O_3	: alüminyum oksit
B	: bor
B_2O_3	: bor oksit
C	: beton (cement)
C-S-H	: kalsiyum-silika-hidrat
CaO	: kalsiyum oksit
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	: kalsiyum hidroksit
D	: dolomit
$D_{\max}$	: maksimum agrega çapı
E	: etrenjit
Fe_2O_3	: demir (III) oksit
GPa	: gigapaskal
MPa	: megapascal
T_{500}	: 500 mm yayılma süresi
T_{500j}	: 500 mm J-ring yayılma süresi
s/ç	: su/çimento oranı
s/b	: su/bağlayıcı oranı
SiO_2	: silisyum dioksit
P	: portlandit
Q	: kuvars
μ	: mikron
τ_0	: kayma eşiği
ν_{pl}	: plastik viskozite
γ	: kayma deformasyonu

KISALTMALAR

ACI	: American Concrete Institute
ASTM	: Amerika Test ve Malzeme Birliği
BAB	: Aktif Belit
C0,5	: %0,5 Oranında Kolemanit Beton Karışımı
C1,0	: %1,0 Oranında Kolemanit Beton Karışımı
C1,5	: %1,5 Oranında Kolemanit Beton Karışımı
C2,0	: %2,0 Oranında Kolemanit Beton Karışımı
CW1,0	: %1,0 Oranında Kolemanit Konsantratör Atığı Beton Karışımı
CW1,5	: %1,5 Oranında Kolemanit Konsantratör Atığı Beton Karışımı
CW2,0	: %2,0 Oranında Kolemanit Konsantratör Atığı Beton Karışımı
CW2,5	: %2,5 Oranında Kolemanit Konsantratör Atığı Beton Karışımı
KKA	: Kolemanit Konsantratör Atığı
KYB	: Kendiliğinden Yerleşen Beton
GYFC	: Granüle Yüksek Fırın Cürufu
PÇ	: Portland Çimentosu
R	: Referans Beton Karışımı
SA	: Süperakışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
SF	: Çökme-Yayılma (Slump-Flow)
SR	: Elek Ayrışma Deneyi
TGA	: Termogravimetrik Analiz
UK	: Uçucu Kül
XRD	: X-Işını Difraktometrisi (X-Ray Diffraction)
VF	: V-Hunisi (V-Funnel)
YDB	: Yüksek Dayanımlı Beton

1. GİRİŞ

1.1. Beton Tanım ve Özellikleri

İnsanoğlunun, barınma ve yaşam alanı oluşturma ihtiyacı tarihteki bütün önemli keşiflerin oluşmasında temel unsur olmuş ve gelecekte de temel unsur olmaya devam edecektir. Dönem dönem birçok yapı da farklı bağlayıcı türleri kullanılsa da 19. yüzyıla gelindiğinde bir duvarcı ustasının kil ile kalker karışımını pişirmesi ve sonra öğüterek bağlayıcı ürün olan Portland çimentosunu ortaya koyması ile betonun yapı malzemesi olarak kullanılması önem kazanmıştır. Gelişen malzeme bilimi ile beton teknolojisinde önemli gelişmelerin yaşanması, betonun vazgeçilmez bir yapı malzemesi olma özelliğinin sürmesini sağlamaktadır.

Uygun oranlarda karıştırılan malzemeler, kalıplarda istenilen biçimi alacak şekilde plastik bir malzemeye dönüştürülür. Beton karıştırılıp kalıba döküldükten sonra kısa bir süre içerisinde priz almaya ve sertleşerek mukavemet kazanmaya başlar (Ersoy, 2012).

Beton, ucuz, kolay üretilmesi ve kolay temin edilebiliyor olduğu için binalar, köprüler gibi birçok yerde yaygın kullanım göstermektedir. Bu kadar çok tüketilen ve rağbet gören bir ürünün teknoloji ile gelişmesi ve çeşitlendirilmesi de kaçınılmazdır (Topçu vd, 2006). Geleneksel betonların yapısında herhangi bir farklı özellik istenmesi ile özel betonların üretimi gerçekleştirilmiş olmaktadır. Bu tip özel beton üretimleri,

1. Özellikleri ve bileşimleri değiştirilerek,
2. Katkı maddeleri eklenerek,
3. Yapım tekniğinde değişiklik yapılarak,
4. Bu yöntemlerin bir veya birkaçının bir arada uygulanması,

şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bu amaç doğrultusunda yapılan dış müdahaleler ile istenilen özelliklerde ve içeriğindeki zayıf yönlerinin iyileştirilmesi ile hedeflenen özel beton elde edilmiş olmaktadır (Baradan, 2004).

Betonun kullanıldığı ortamlarda karşılaştığı fiziksel ve kimyasal etkiler dikkate alınarak dayanıklılığı sonucu oluşan hizmet ömrü yapı için en önemli unsuru temsil etmektedir. Betonun üretim öncesi, üretim süreci ve üretim sonrası denetimler ile bu hizmet ömründe kalite sağlanabilir. Beton malzemesinin standardı, sistemin tasarım dayanımı konusunda önem arz etmektedir (Baradan, 2004).

1.1.1. Betonların Sınıflandırılması

Betonlar bünyesinde barındırdıkları etkiler altında farklı özellikler sergilemekte ve bu da farklı sınıflandırmalarına sebep olmaktadır.

Beton birim ağırlığına göre üç ana gruba ayrılmaktadır.

1. Hafif beton (birim ağırlıkları $< 2000 \text{ kg/m}^3$)
2. Normal beton (birim ağırlıkları $2000\text{-}2600 \text{ kg/m}^3$)
3. Ağır beton (birim ağırlıkları $< 2600 \text{ kg/m}^3$) (TS EN 206-1).

Türk Standartlarına göre beton basınç dayanım sınıflandırması,

1. Düşük dayanımlı beton ($< 20 \text{ MPa}$)
2. Normal dayanımlı beton ($20 \text{ MPa} < x < 50 \text{ MPa}$)
3. Yüksek dayanımlı beton ($50 \text{ MPa} <$) (TS EN 206-1).

Üretildikleri yerlere göre beton,

1. Şantiye betonu
2. Santral betonu

1.1.2. Betonun Dayanımı

Betonun eksenel yük etkisi altında kırılmaması için gösterdiği direnme kabiliyetine betonun basınç dayanımı denmektedir. Basınç dayanımları, standart 15 ve 20 cm küp örnekleri veya standart $\varnothing 10 \times 20$ - $\varnothing 15 \times 30$ cm silindir örnekler kullanılarak saptanmakta olup beton dayanım sınıfları TS EN 206-1’de yer almaktadır.

Basınç dayanımının yüksek olması betonun dayanıklılığının yüksek olduğu, su geçirimsizliğin az olduğu gibi anlamlara gelebilmektedir. Basınç dayanımının, eğilme ve çekme dayanımları arasında yaklaşık bir korelasyon bulunmaktadır. Basınç dayanımının bilinmesi diğer dayanım türleri hakkında fikir sahip olunmasını sağlamaktadır (TS EN 206-1).

1.1.3. Betonun Durabilitesi

Betonun servis ömrü boyunca dış etkilere ve betonun bileşenlerinden kaynaklı iç etkenlerden dayanımı ve nitelikleri bozulmadan işlevini yerine getirebilmesine durabilite (dayanıklılık) denmektedir. Betonun yapısının bozulmasına yol açan etkenler fiziksel, kimyasal, biyolojik ve mekanik kökenlidir. Mekanik yollu hasarlar; darbe, aşınma, erozyon, oyulma vb.dir. Biyolojik ve kimyasal etkenler; betonun içerisine sızan ve betonun bileşenlerini etkileyen unsurlardır. Karbonatlaşma, alkali-silika reaksiyonları, sülfat etkisi, korozyon vb. örnek verilebilir. Fiziksel etkenler ise, donma-çözünme, yüksek sıcaklık farkları vb. olaylardır. Tablo 1.1’de beton kökenli iç ve dış etkenler gösterilmiştir (Baradan ve Yazıcı, 2003).

Tablo 1. 1: Betonun iç ve dış etkenlerle bozulması.

Fiziksel ve mekanik etkenler	Biyolojik ve kimyasal etkenler
Donma ve çözülme	Sülfat etkisi
Çözücü tuzlar	Gecikmiş etrenjit oluşumu
Deniz suyu etkisi	Alkali-silika etkisi
Erozyon	Korozyon
Yüzey aşınmaları, oyulma	Karbonatlaşma
Yüksek sıcaklıklar, yüksek sıcaklık farkları, yangın vb.	Asitlerin, amonyum ve magnezyum tuzlarının etkisi

Betonda meydana gelen iç ve dış etkenler sonucunda, beton daha boşluklu bir duruma gelebilmektedir. Boşluklar içerisinden sızan etkenler, beton donatılarının paslanmasına, betonun aşınmasına ve çeşitli hasarlar görmesine ve hizmet ömrünü kısılmasına sebep

olmaktadır. Bu durumlarda, doğru malzeme seçimi, doğru çevresel verilerin toplanması ve kimyasal analizlerin yapılabilmesi, işçilik kalitesi, denetim ve bakımlar son derece önem teşkil etmektedir (Baradan ve Yazıcı, 2003).

1.1.4. Betonda Geçirimsizlik

Prizini tamamlamış betonun yüzeyine temas eden sıvılar ve gazlar, sertleşmiş beton içerisine girerek, hava ve su basıncının oluşturduğu farklılıklardan dolayı betonda bazı iç ve dış etkenlere yol açmaktadır (Durgun, 2011). Sertleşmiş çimento hamurunun yapısında bulunan kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2), dışarıdan sızan suların etkisi ile çözünerek yüzeye çıkmaktadır. Yüzeye çıkan Ca(OH)_2 ve tuzlu suyun buharlaşması ile beton yüzeyinde beyaz, karbonat ve tuz lekeleri şeklinde yer almakta ve beton içyapısında boşluklar da artış göstermektedir. Ayrıca beton içerisine sızan su, oksijen ve klor betonarme yapı da yer alan donatıların korozyonuna neden olmakta ve donatı kesitlerinde küçülmeler olmaktadır. Kapiler boşlukların su ile dolu duruma gelmesi durumlarında donma-çözünmeler ile beton içyapısında çok büyük genleşmeler olmaktadır (Erdoğan, 2003).

Betonda durabilite ve geçirimsizlik birbiri ile oldukça bağlantılıdır. Geçirimsizlik için etkili olan, boşluk ve çatlaklar betonun en zayıf agregası ile çimento hamurunun temas ettiği yüzeyde belirlemektedir (Erdoğan, 1993).

1.1.5. Betonun İşlenebilirliği

İşlenebilirlik, taze beton kütesinde akma başlatacak kuvvete karşı koyan kuvvet, yerleştirme ve yüzeyinin düzeltilmesini etkileyen yapının akış özellikleri ile ilgilidir. Beton harcının ve betonun reolojik sabitleri, kayma eşiği (τ_0) ve plastik viskozite (v_{pl}) akış bilimi olan reoloji bilimiyle açıklanmaktadır (Banfill, 1991; Tattersall, 1991; Erdoğan, 2003).

1.1.6. Betonun Aşınması

Yol, hava alanları gibi döşeme kaplamalarındaki betonlarda önemli derecede aşınma etkisi bulunmaktadır. Betonun yüzey kısımlarında meydana gelen, sürtünme ve çarpma etkenleri beton yüzeyinin erozyonuna neden olduğu ve betonun göstermiş olduğu bu direnme kabiliyetine betonun aşınma dayanıklılığı denir (Nergis, 2007). Sadece döşemelerde değil, suyun hızlı etkisine, devamlı olarak tekrarlanan çarpma etkisine maruz liman, baraj gibi yapılarda da aşınma olayına sıklıkla karşılaşılmaktadır (Postacıoğlu, 1986). Betonun aşınma dayanımında agregaların özellikleri oldukça etkilidir. Agregaların aşınma dayanımları ne kadar güçlü ise betonunda aşınma dayanımı o kadar yüksektir (Shah, 1994).

1.2. Kendiliğinden Yerleşen Beton Tanım ve Özellikleri

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), kendi ağırlığı altında sık donatılı, dar ve derin kesitlere yerleşebilen, iç ve dış vibrasyon gerektirmeksizin hava boşluğunu dışarı atarak kendiliğinden sıkışabilen, bütün bu özellikleri sağlarken de segregasyon ve terleme gibi problemler göstermeyen, kohezyonunu koruyabilen, çok akıcı kıvamlı yüksek performanslı özel bir beton türüdür. KYB'yi, karışımda kullanılan katkı ile düşük s/ç oranı sayesinde hem dayanımı hem de dayanıklılığının yüksek olması yüksek performanslı beton sınıfına sokmaktadır (Özkul, 2002; Sağlam vd., 2005). İşçi ne kadar tecrübeli ve/veya eğitimli olursa olsun taze betonu geleneksel yöntemlerle ile yüzde yüz homojen sıkıştırma enerjisi verilebilmesi mümkün olmamaktadır (Okamura, 1999; Felekoğlu ve Baradan, 2004).

KYB'de iki ana özellik bulunmaktadır. Bunlar; kalıp doldurma yeteneği ve yüksek ayrılmaya karşı dirençtir. Kalıp doldurma yeteneği, süperakışkanlaştırıcılar ile sağlanırken, yüksek ayrılmaya karşı direnci, ince malzeme miktarını yüksek tutarak ve viskozite düzenleyici katkıları kullanılarak sağlanmaktadır (Özkul, 2002).

KYB betonunun kolayca şekil değiştirmesi için kayma eşiğinin küçük olması gerekmektedir. Bu özelliğini, su miktarını arttırarak sağlaması betonun kararlılığı bozulmakta, segregasyon neden olmaktadır. Bu nedenle segregasyon göstergesi olan viskozite özelliği çok küçültülmemelidir (Sağlam vd., 2004).

1.2.1. Mühendislik Açısından Kendiliğinden Yerleşen Beton

Mühendislik çalışmalarında, yapı tasarımı üzerinde belirli zamanlarda belli şartnamelerde doğrudan olamayan özelliklere değinilmesi gerekmektedir.

1.2.1.1. Basınç Dayanımı

KYB yapısındaki su-çimento oranı ile basınç dayanımı arasındaki ilişki geleneksel beton ile aynı olmaktadır. KYB’de ince tane ve katkı miktarları yüksek iken iri tane oranı düşmektedir. Bu taneler betonun mikro yapısını yoğunlaştırmaktadır (Schutter vd., 2008). KYB’nin basınç dayanımı, geleneksel betondan daha yüksek ve/veya aynıdır (Kaya, 2010).

1.2.1.2. Çekme Dayanımı

Beton gevrek bir malzeme olduğu için tasarım hesaplarında basınç dayanımı kullanılırken, betonun çekme dayanımına karşı direnci çok düşüktür. Çekme dayanımı değerleri betonun bünyesinde bulunan çatlakların oluşmasında önemli bir rol oynamaktadır (Erdoğan, 2003).

Felekoğlu ve Baradan (2004), KYB üzerinde yapılan deneysel çalışmada, KYB tasarımına uygun karışım oranları ile 5 farklı dayanım sınıfı KYB üretilmiş ve aynı dayanım sınıfında bulunan normal betonlar ile karşılaştırılmıştır. KYB’lerin dayanım sınıfı aynı normal betonlara kıyasla %3-%17 aralığında yüksek olduğu belirlenmiştir. Bu da KYB’lerin homojen yapısına bağdaştırılmış olup çekme dayanımını düşüren kusurların KYB’de oluşma olasılığının düşmekte olduğu belirtilmiştir.

1.2.1.3. Elastisite Modülü

Mühendislikte kullanılan malzemelerin çoğu belirli bir gerilme değerine kadar olan yüklemeler altında elastik özellik göstermektedir. Elastisite modülü, agrega büyüklüğüne ve özelliklerine, su/bağlayıcı (s/b) ve çimento hacmine bağlı olmaktadır (Beshr vd., 2003).

Agreganın elastisite modülü, betondan ve çimento hamurundan daha büyüktür. Betonda agrega hacminin artırılması elastisite modülünü de arttırmaktadır. KYB’lerde agrega

hacmi azaltılıp çimento hacmi arttırıldığı için geleneksel betonlara kıyasla elastisite modülleri daha düşük olmaktadır. KYB üretimin de kullanılan agrega büyüklükleri, şekilleri ve özelliklerinin elastisite modülü betonun elastisite modülü üzerinde önemli bir etkisi vardır (Beshr vd., 2003).

1.2.1.4. Isı Genleşme Katsayısı

Betonun ısı genleşme katsayısı, betonun donatı ya da donatı dışı engellendiği hallerde sıcaklıktaki birim değişimden dolayı betondaki birim deformasyon olarak tanımlanmaktadır. Betondaki ısı genleşme katsayısı, beton bileşimine, yaşına ve nem miktarına göre değişkenlik göstermektedir. Betonda düşük ısı genleşme katsayısına sahip agregaları kullanmak betonun ısı genleşme katsayısını düşürmeye neden olmaktadır (EFNARC, 2005).

1.2.1.5. Sünme

Sünme, sabit gerilme altında malzemede zamanla meydana gelen şekil değişme olarak tanımlanmaktadır (Gomez ve Landsberger, 2007). Çimento hamurunda sünme olayını agregalar sınırlandırmaktadır ve karışımda bulunan agrega hacmi ile elastisite modülü arttırıldığı takdir de sünmede azalma görülmektedir. Daha yüksek çimento hacmi nedeni ile KYB için sünme katsayısı, geleneksel betonun sünme katsayısına göre daha yüksek olabilmektedir (EFNARC, 2005).

1.2.1.6. Büzülme (Rötire)

Agreganın hacimsel artışı ve D_{max} 'ın yüksek olması çimento hamurunda oluşan büzülmeleri engellemektedir. Büzülme, kuruma büzülmesi ve kendiliğinden büzülme şeklinde kendini göstermektedir. Hidratasyon sonucu oluşan betonun hacmi, hidrate olmamış çimento ve suyun hacminden az olmaktadır. Hacimde oluşan azalma çekme gerilmelerine sebep olarak kendiliğinden büzülmeye neden olmaktadır. Betondan atmosfere doğru gerçekleşen su kaybı kuruma rötresi olarak tanımlanmaktadır. KYB'nin kuruma rötresi, geleneksel betonlara kıyasla 4-5 kat daha düşük olmaktadır (Topçu ve Uygunoğlu, 2008).

1.2.1.7. Dayanıklılık

KYB, normal betonlara kıyasla daha düşük viskoziteye ve daha yüksek akışkanlığa sahip oldukları için konuldukları kaba daha boşluksuz bir şekilde yerleşebilmektedir. Bu sayede de yüksek dayanımlı betonlar (YDB) sınıfında yer almaktadır. Yüksek dayanımlı beton olan KYB'ler, geleneksel betonlara kıyasla dayanım ve dayanıklılıkları daha yüksek olmaktadır (Uygunoğlu, 2008).

1.2.1.8. İşlenebilirlik

Taze betonun pratikteki davranışına yönelik olarak akma ve deformasyon yeteneğini tanımlanan bir özelliktir. KYB'nin işlenebilirliği, pompanın ucundan akan betonun kendi ağırlığı ile kalıbın şeklini alarak üniform kaliteyi sağlaması olarak tanımlanmaktadır (Skarendahl ve Petersson, 2000).

1.2.1.9. Ayrışma

KYB'de statik segregasyon, KYB'nin bekleme esnasında iri agregaların harç ve hamur kısmından ayrılması olarak tanımlanır. Dinamik segregasyon ise genellikle betonun taşınması, aktarılması ve kalıba yerleştirilmesi sırasında meydana gelen segregasyon olarak tanımlanmaktadır (Yahia vd., 2014).

Segregasyon direncine sahip betonun donatıları sarma kabiliyetleri son derece önem arz etmektedir (Turner vd., 2002). KYB uygulamalarında, gerçek segregasyon davranışının belirlenebilmesi dinamik segregasyon metotlarının geliştirilmesine bağlıdır (Gökçe ve Çakır, 2017).

1.2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonun Kullanım Alanları

KYB, geleneksel betonlar kadar yaygın kullanım alanlarına sahip olmasa da gelişen yapı-beton teknolojileri sayesinde birçok kullanım alanı mevcuttur.

1. Betonarme yüksek yapılar,
2. Ulaşılması zor, sık donatılı ve dar kesitli perde tipi elemanlar,
3. Tamir, bakım ve güçlendirme tipi işlemler,
4. Özel kalıp gerektiren işlemlerde,
5. Beton prefabrik sektörü,
6. Gürültünün istenmediği ve gece dökümleri (Özkul, 2002).

1.2.2.1. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Avantajları

KYB, normal betona kıyasla birçok avantajı bünyesinde bulundurmaktadır (Felekoğlu, 2004):

1. KYB taze betonunun sıkıştırmaya gerek duyulmadığı için vibratörün oluşturduğu gürültü kirliliğine rastlanmamaktadır. Zamandan ve işçilikten, dolayısı ile maddi kazanç sağlamaktadır.
2. KYB betonu sık donatılı yerlerden boşluksuz yerleşmesi KYB'nin mekanik performansını arttırmaktadır. Geleneksel betonda, sık donatılı bölgelerde gözlemlenen yığılmalar KYB'de rastlanılmamaktadır.
3. Yeni nesil kimyasal katkı maddelerinin kullanılması ile çok akışkan, düşük s/ç oranına sahip dayanım ve dayanıklılık açısından kaliteli beton üretimi gerçekleştirilmektedir.
4. KYB'lerde erken dayanım yüksek olduğu için kalıp sökme hızları da yüksektir ve dolayısı ile inşaat hızının artmasına olanak vermektedir.
5. Pompalanabilirlik açısından geleneksel betona kıyasla daha avantajlıdır.

1.2.2.2. Kendiliğinden Yerleşen Betonların Dezavantajları

KYB’lerde avantajlarının yanında bazı olumsuz etkenler de yer almaktadır:

1. KYB, geleneksel betonlara kıyasla bünyesinde daha fazla kimyasal katkı ve bağlayıcı malzeme bulundurması daha yüksek maliyetli duruma getirmektedir. Yapılan çalışmalar, KYB açısından maliyeti düşürme açısından yapılmaktadır.
2. KYB kolaylıkla içeriğine eklenen malzeme ve oran değişikliklerinden etkilenmektedir. Geleneksel betonlara kıyasla daha fazla kontrole gereksinim duyulmaktadır. Bu da üreticiye ekstra tedbirler almasına sebep olmaktadır.
3. Şantiye ortamında çok akışkan olması kalıp işçiliğinde daha fazla tedbirler alınmasına yönlendirmektedir. Ayrıca merdiven, çatı makası vb. %2’den fazla eğimli kalıp işçiliğinde KYB kullanılmamaktadır.
4. KYB’lerin en az yedi gün kür edilmesi önerilmektedir. Eksik kürlenmesi durumunda sıcak havalarda plastik büzülme çatlakları oluşmaktadır (Felekoğlu, 2004).

1.2.3. Kendiliğinden Yerleşen Beton Bileşenleri ve Karışım Tasarım Prensipleri

Normal betonlarında kullanılan bileşimler KYB üretiminde de yer almakta olup daha geniş performans özellikleri göstermektedir.

1.2.3.1. Çimento

KYB’lerin üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan çimento, doğru kullanım şartı ile geleneksel betonlar ile aynı şartı sağlamaktadır. Ancak KYB’lerde kullanılacak çimento, betonun akışkanlığını iyileştirmeli ve su ile hidrasyona girdiğinde erken priz alacak cinsten olmamalıdır (Safiuddin, 2008). Bu çimento tipleri için standart Al_2O_3 miktarı %10’u geçmeyen tipte kullanılması uygun olmaktadır (Baylavlı, 2008).

KYB’de kullanılacak çimento tipi, dayanım ve dayanıklılık kriterleri esas alınarak seçimi yapılmalıdır (Felekoğlu, 2003). KYB üzerine yapılan literatür araştırmalarında CEM I 42,5 tipi çimento kullanımı öngörümü yapılmaktadır. Genel olarak çalışmalarda çimento dozajının $350-450 \text{ kg/m}^3$ arasında seçilmesi tavsiye edilmektedir. Çimento dozajının 500

kg/m³ ve üzeri seçilmesi betonun kuruma büzülmesini artırma riski oluşturmaktadır ve bundan dolayı oluşacak çatlakların artması da söz konusu olacaktır. Çimento dozajının 350 kg/m³'ten az seçilmesi durumunda ise betonun kendiliğinden yerleşebilirliği için gerekli olan ince madde miktarı azalmış olacak ve aynı zamanda betondaki bağlayıcı miktarının azalmasıyla da betonun dayanım ve dayanıklılığı da azalmış olacaktır (EFNARC, 2002; Özkul, 2002; Sağlam vd., 2004).

1.2.3.2. Dolgu Maddesi

KYB'nin hem hidratasyon ısılarından dolayı çimento miktarını düzenlemek hem de viskoziteyi düzenleyerek işlenebilirliği düzenledikleri için dolgu malzemeleri kullanılmaktadır. Bu malzemeler, uçucu kül (UK), silis dumanı, öğütülmüş yüksek fırın cürufu gibi dolgu maddeleri olabilmektedir (EFNARC, 2002).

KYB'de kullanılacak olan dolgu malzemesinin en büyük tane çapının 0,125 mm'den düşük olması istenmektedir. Çoğu zaman çimentodan azaltılan çimento miktarı kadar bu ince taneli katkıları kullanılmaktadır. Örneğin; toplam toz miktarı 500-600 kg/m³ aralığında olan bir KYB karışımında 100-150 kg/m³ aralığında uçucu kül kullanılmalıdır (Felekoğlu vd., 2004).

1.2.3.3. Agregalar

KYB, geleneksel betonlara kıyasla ince agrega miktarları arttırılırken iri agrega miktarlarına daha düşük tutulmaktadır. 0,125 mm ile 4 mm aralığında yer alan agregalar ince agrega sınıfına girerken 4 mm üzeri olan agregalar iri agrega sınıfına girmektedir. KYB özelliği gereği akışkanlığı ve sık donatılar arası geçiş yeteneğinin iyi olması istenmektedir. Bunun için KYB'de kullanılacak maksimum agrega çapı 20 mm'nin altında seçilmesi uygun olmaktadır (Demirtaş, 2001; Sağlam vd., 2004; Uygunoğlu, 2008).

Kaliteli bir KYB elde etmenin en doğru yolu agregaların nem tayinin yapılması, su emilimi ve granülometrisi devamlı kontrol edilmesidir. Yıkanmış agrega kullanımı, yani organik maddelerden, silt ve kil gibi yabancı maddelerden arındırılmış olması tercih edilmelidir (Felekoğlu, 2003).

KYB’lerde, doğal kum ve/veya dere kumu gibi geleneksel agregalar tercih edilebilmektedir. Doğal kum, pürüzsüz ve yuvarlak hatlı, endüstriyel kum ise kırma yöntemi ile elde edildikleri için pürüzlü ve köşeli yapıya sahip olmaktadır. Kırma kum ve dere kumu gibi agregaların beraber kullanılabilimleri için uygun ve doğru gradasyona sahip olmaları gerekmektedir (Tutikian ve Molin, 2008). Doğal kum, sürtünmeyi azaltarak akışkanlığı düzenler, kırma kum ise kenetlenme ile yüksek dayanım sağladıkları için tercih edilebilmektedirler (Sarıdemir, 2006; Boddu, 2016).

1.2.3.4. Karışım Suyu

Beton karışımında kullanılacak su, TS EN 1008’de belirtilen şartlara uygun kriterde olmalıdır. İçilebilen sular, işlenmiş ancak uygun geri kazandırılmış sular, standartlara uygun yer altı suları, uygun yüzey suları betonda kullanılabilecek sular sınıfında yer almaktadır. Deniz suları ve acı göl suları kullanılacaksa donatı içeren betonlarda izin verilen toplam klorür muhtevası göz önünde bulundurulmalıdır (TS EN 1008, 2003) .

1.2.3.5. Kimyasal Katkılar

Betonun kolay yer ve şekil değiştirmesi için kayma eşiğinin düşük olması istenmektedir. Bu özelliği, su miktarını arttırarak sağlanmaya çalışılması beton karışımının kararlılığını bozmaktadır. Bu da betonun ayrışma eğilimi göstermesine neden olmaktadır. KYB’ler de normal betonlar gibi yüksek akıcılık, üstün akışkanlaştırıcı özelliğe sahip kimyasal katkı ile sağlanabilmektedir. KYB üretimin de kullanılmakta olan süperakışkanlaştırıcı katkı polikarboksilat bazlı olmaktadır. KYB üretiminde kullanılan kimyasal katkı, naftalin sülfonat formaldehit, melamin sülfonat formaldehit polikondanseleri, vinil kopolimerler ve polikarboksilik asit bazlı katkıların kullanımı mümkün olmaktadır. Polikarboksilik bazlı katkıların diğer katkıların kullanıldığı taze betonun su gereksiniminin göreceli olarak daha fazla olması, bu tip betonlar için istenilen akıcılıkta beton üretilmemesine sebep oldukları için polikarboksilik bazlı kimyasal katkı tercih edilmelidir (Sağlam vd., 2004; Sağlık vd., 2007; Uygunoğlu, 2008).

Akışkanlaştırıcı malzemeler su kesme yeteneklerine göre;

1. Normal akışkanlaştırıcılar (%10-15 su kesme),
2. Süperakışkanlaştırıcılar (%15-30 su kesme),
3. Hiperakışkanlaştırıcılar (%30 üzerinde su kesme)

olarak sınıflandırılmaktadırlar. Karışım suyu içerisine kimyasal katkı katılarak beton karışımına ilave edilir. Özellikle KYB karışımlarında kimyasal katkı ile çimentonun doğrudan temas etmesinden kaçınılmalıdır (Ramachandran ve Malhotra, 1984).

1.3. Taze Beton

KYB'nin normal betonlardan ayıran üç parametre bulunmaktadır. Bunlar, doldurma yeteneği, ayrışmaya karşı direnç ve geçiş yeteneği olmaktadır. KYB'lerin performansları ile taze beton arasında çok önemli bir ilişki bulunmaktadır (Petersson ve Skarendahl, 2000).

1.3.1.1. Doldurma Yeteneği

Doldurma yeteneği, taze betonun kendi ağırlığı altında kalıp içerisinde akma ve bütün boşlukları doldurma yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Çimento hamuru fazının iyi deforme olması gereklidir. Yüksek akışkanlıkla birlikte ayrışmaya karşı yüksek direncin sağlanması, taze betonun engel teşkil eden durumlar arasından geçerek doldurma kapasitesinin artırılması açısından önem arz etmektedir (Yüceer ve Gürdal, 2004). KYB'de doldurma yeteneği, işlenebilirlik ve reolojik özellikler ile doğrudan ilişkilidir (Uygunoğlu, 2008).

1.3.1.2. Ayrışmaya Karşı Direnç

Betonun taze halde homojen yapısını muhafaza edebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. KYB gerek durağan gerekse de akış halinde ayrışma (segregasyon) göstermemelidir. Bu ayrışma durumları, terleme, blokaj nedeni ile kaba agregaya ayrışması, hava boşluğundaki düzensiz dağılım ve çimento fazı ve agregaya bağı arasındaki ayrışmadır. Bu ayrışmaları engellemek için, uygun agregaya dağılımını belirleme, maksimum agregaya çapının belirlenmesi, düşük s/b ve viskozite artırımı ile giderilmelidir (Yüceer ve Gürdal, 2004).

1.3.1.3. Geçiş Yeteneği

Taze betonun donatı çubukları arasında geçme yeteneği ve dışarıdan herhangi bir etki olmadan donatıyı sıkıca sarabilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır. Dar kesitli ve sık donatılı uygulamalarda, maksimum agrega çapını yüksek seçmek ve uygun agrega dağılımını belirleyememek bloklaşma riskini doğurmaktadır. Bunun için, uygun s/b oranı, optimum viskozite, doğru agrega seçimi ve maksimum agrega boyutu seçimi başta gelmektedir (Yüceer ve Gürdal, 2004).

Bir betonun KYB olarak kabul edilebilmesi için bu üç temel ilkeye sahip olması istenmektedir. KYB'nin geleneksel betondan ayıran özelliklerin taze beton deneyleri Tablo 1.2'de gösterilmiştir.

Tablo 1. 2: KYB taze beton özelliklerinin belirlenme deneyleri (EFNARC, 2002).

Özellik	Deney
Doldurma yeteneği	• Çökme yayılma - T₅₀₀ süresi • V hunisi akış süresi
Ayrışmaya karşı direnç	• 5 dk gecikmeli V hunisi akış süresi • Elek ayrışma
Geçiş yeteneği	• J ring • L ve U kutusu

1.4. Karışım Tasarımı

KYB tasarım aşamasında malzeme miktar, özellikleri ve performansları önem arz etmektedir ve genellikle çimento hamuru üzerinde bir ön çalışma yapılmaktadır. Bunun sebebi, çimento hamur kısmının, normal betona kıyasla daha fazla olmasıdır (Okamura ve Ozawa, 1995; Uygunoğlu, 2008).

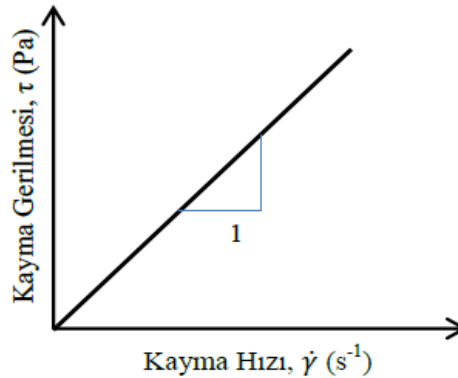
Agregalar arası oluşacak iç sürtünme oranını yüksek tutulması akıcılığı düşürmekte ve donatılar arası geçişlerde bloklaşma riski oluşturur. İri agrega oranının çok düşük seçilmesi de istenmemekte çünkü betonun su gereksinimi agregalar inceldikçe artmaktadır. Ayrıca betonun bağlayıcı miktarı artacağından rötresi de artış gösterecektir (Uygunoğlu, 2008).

1.5.Kendiliğinden Yerleşen Taze Betonun Sınıflandırılması

KYB karışımlarının taze halde iken istenilen özelliklere ve kararlılıklara sahip olması için Avrupa Hazır Beton Birliği (ERMCO) tarafından 2005 yılında geliştirilen bir sınıflandırma yöntemi mevcuttur. Bu sınıflandırma özellik ve harfler ile sembolize edilmiştir. KYB'nin sınıflandırılmasında çökme-yayılma deneyi akıcılık belirlenmesi için, çökme-yayılma deneyi viskozite için, T_{500} süresi ve V hunisi deneyi, geçebilme yeteneği için bu deneyler önerimde bulunulmuştur (Uygunoğlu, 2008).

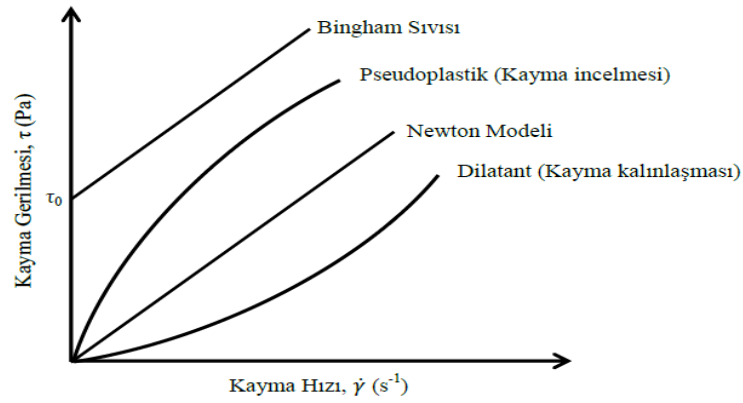
1.6. Reoloji

Reoloji bilimi, malzemenin deformasyon ve akış özellikleri arasındaki ilişkiyi inceleyen bilim dalıdır. Genellikle katıların deformasyonu ve sıvıların akış özelliklerini belirlemek amaçlı kullanılmaktadır (Tattersall ve Banfill, 1983). İster katı olsun ister sıvı olsun her malzeme gerilme altında şekil değiştirebilmektedir. Reolojinin konu kapsamında yer alan Newtonien ve Newtonien olmayan akışkanları incelemektir. Newton yasasına uyan cisimlere Newtonien cisimler denilmekte ve akış diyagramı Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Newtonien olan akışkanlara örnek, su, süt vb. verilebilir (Postacıoğlu 1981; Bartos, 1992).



Şekil 1. 1: Newton modelinin akış diyagramı.

Newtonien olmayan akışkanlar, kayma gerilmesi ile kayma hızı oranları değişiminin sıfır ya da doğrusal olmayan akışkan türüdür ve Şekil 1.2'de akış diyagramı gösterilmiştir. Newtonien olmadığı akışkanlara örnek; bal, tutkal gibi akışkanlar verilebilmektedir. Taze betonun akışı daha çok Newtonien olmayan sıvıların davranışına benzemektedir (Postacıoğlu 1981; Bartos, 1992).



Şekil 1. 2: Newtonien olmayan akış diyagramı.

Viskozite, akışkanların akma davranışlarında etkili olan ve akışkanların kayma gerilmesine karşı göstermiş olduğu direnç olarak tanımlanmaktadır. Kayma hızının artması ile viskozitenin düşmesine kayma incelmesi denilmektedir. Ters olan kayma kalınlaşması, kayma gerilmesi arttığında viskozitesi de artması durumudur. Kayma incelmesine, zamklar, kayma kalınlaşmasına, yağlı boyalar örnek verilebilir (Banfill, 1991). Taze harcın ve betonun reolojik sabitleri; kayma eşiği (τ_0) ve plastik viskozite (v_{pl}) akış bilimi olan reoloji bilimi ile açıklanabilmektedir (Bandill, 1991; Tattersall, 1991; Bartos, 1992). Kayma eşiği ise uygulanan akmanın başlaması için gerekli kayma gerilmesi olarak tanımlanmaktadır. Kayma gerilmesi, kayma eşiğinden daha büyük olduğunda madde akmaya başlar. Reolojik çalışmalar, kayma gerilmesi ile kayma hızı arasındaki bağlantıya dayanmakta ve bu değerler kayma eşiği ve plastik viskoziteyi vermektedir (Erzengin, 2015).

Katıya benzer davranış sergileyen malzemeler Bingham modeli ile analiz edilmektedir. Çimento esaslı sistemler uzun süreli ölçümler yapılmaya uygun değildir (Bandill, 2003). Bingham modeli, viskoplastik davranış temsil eden bir modeldir. Çimento hamuru, çimento harcı ve beton viskoplastik davranış gösteren akışkanlardır (Çankaya vd., 2009). KYB'nin kayma eşiği, geleneksel betonlara kıyasla daha düşüktür. Kendiliğinden yerleşebilirlik için betonun kayma gerilmesinin mümkün olduğu kadarı ile sifıra yakın olması amaçlanmaktadır. Taze harcın çökme yayılma testinde, harcın yayılmaya başladıktan sonra belli bir süre sonra durması ve bu durduğu an kayma gerilmesi ile akma gerilmesinin eşitlendiği anlamına gelmektedir. Akma gerilmesi ve eşik kayma gerilmelerinin yüksek olması taze beton harcının akabilme kabiliyetinin düşük olduğu anlamına gelmektedir (Uygunoğlu, 2008).

Bingham modeline göre, bir sıvının akışa geçebilmesi için belirli bir gerilmeyi aşması gerekmektedir. Bir kez beton akmaya başladıktan sonra kayma gerilmesi doğrusal olarak artış eğrisi çizmektedir. Bu plastik vizkozite ile ifade edilmektedir. Bu sebeple reolojik özellikleri iyi tanımlayabilmek için betonun Bingham modeli olan iki parametre, akma gerilmesi ve plastik viskoziteyi bilmek gerekmektedir (Ozawa vd., 1995; Lowke, 2010). Hareketin başlaması için akma gerilmesinin aşılması gereklidir. Eğer aşılamaz ise, süspansiyon zayıf bir katı gibi davranır (Tattersall ve Banfill, 1983).

1.7. Uçucu Kül

Elektrik enerjisi üreten termik santrallerinin taşkömürü kullanımın da %10-15, linyit kömürü kullanımının ise %20-50 oranında kül ortaya çıkmaktadır. Çok ince öğütülen kömürün yanması sonucu üç farklı tür kül oluşmaktadır. Diğer küllere nazaran daha iri taneli olan baca gazları ile atmosfere salınması mümkün olmayan ve kazan tabanında biriken küllere “taban külü” denmektedir. Siklon tipi ocaklarda yakılan kömürün suda soğutularak uzaklaştırılması sonucu elde edilen küllere “ham kül” denir. Çok ince taneli baca gazları ile taşınabilen küllere de “uçucu kül (UK)” denmektedir. Sonuç olarak termik santrallerde kullanılan yakıt tipine göre UK’ler, taş kömürü UK’si ve linyit UK’si olarak ikiye ayrılmaktadır. Bacadaki UK’lerin tutulması için elektro filtreler ve siklon toz tutucular vasıtası ile eloktrastatik veya mekanik yöntemler vasıtası ile tutulmaktadır. UK özellikleri, işletim tarzı, santral türü, kömürün cinsi, yanma biçimi gibi çeşitli etkenlere bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Kimyasal bileşen yüzdelere göre UK, ASTM C 618 ve TS EN 197-1 standartları temel alınmaktadır. (Morrison; 1970; Mehta, 1986; Alkaya, 2010).

ASTM C 618 standartlarına göre UK, F ve C sınıfı olarak ikiye ayrılmaktadır. F sınıfı UK, bitümlü kömürlerden üretilen $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzdesi %50’den fazla ve CaO yüzdesi %18’e eşik veya altında olduğu için düşük kireçli puzolanik özellikli UK olarak tanımlanmaktadır. F sınıfı UK’ler, düşük CaO içerdikleri için “düşük kireçli küller” olarak adlandırılmaktadırlar. C sınıfı UK, linyit veya yarı bitümlü kömürden üretilen, toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı %50’den fazla olan ve CaO yüzdesi %18’den fazla olan hem puzolanik özellik gösteren hem de bağlayıcılık özellikli UK olarak tanımlanmaktadır. C sınıfı UK’ler, yüksek CaO içerdikleri için “yüksek kireçli küller” olarak adlandırılmaktadırlar (ASTM C 618, 2000).

Türkiye’de çoğunlukla C sınıfı olan yüksek kireçli uçucu kül çıkarılmaktadır (Toros, 1987). C sınıfı UK’lerin yapısında %1-3 aralığında serbest kireç bulunmakta ve bu serbest kireç nedeni ile bir miktar kendi kendine bağlayıcılık özelliği bulunmaktadır (Alkaya, 2010).

TS EN 197-1 göre ise, silisli (V) ve kalkerli (W) olarak iki gruba ayrılmaktadır. Silisli UK, genellikle puzolanik özelliklere sahip, küresel taneciklerden meydana gelen esas olarak SiO_2 ve Al_2O_3 oluşan, geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren küllerdir. Bu küller, reaktif CaO oranının %10’dan az, reaktif silis miktarının %25’den fazla olması gerekmektedir. Kalkersi UK’ler ise, hidrolik ve puzolanik özellikleri olan esas olarak reaktif CaO, reaktif SiO_2 ve Al_2O_3 ’den oluşan, geri kalanı Fe_2O_3 ve diğer bileşenleri içeren, CaO oranı %10’dan fazla ve reaktif silis miktarı %25’den fazla olan UK’dır (TS EN 197-1, 2002).

Yapı teknolojisinin gelişmesi ile UK’nin inşaat sektöründe kullanımı doğal kaynakların tahribini engellemesinin yanında çevre kirliliğini de indirmiş hale gelmektedir (Reiner, 2007). UK, yağmur suyu ile reaksiyona girmesi sonucu radon gazı denilen radyoaktif madde oluşturmakta ve bu gaz açık depolama alanlarında çevreye çok büyük olumsuz etkiler bırakmaktadır (Kaplan ve Gültekin, 2010). Puzolanik katkılar beton karışımı içerisinde yüksek maliyet oluşturan çimentonun ikamesi olarak kullanabilmektedir (Massazza, 1989).

UK’nin KYB’de kullanılması aşağıda belirtilen durumları oluşturabilmektedir;

1. Hidratasyon ürünlerini arttırırken betonun porozitesini azaltmaktadır. Mikro agrega etkisi yaparak gradasyonu düzenler ve optimum sıkışmayı sağlar. Böylece KYB’nin dış etkilere karşı dayanımını arttırır.
2. Hidratasyon hızını ve ısını düşürmektedir. Sıcaklık yükselmesinden oluşan su kaybı ve çatlakların oluşumunu azaltmaktadır. Priz süresinin uzaması erken dayanımı olumsuz etkilemektedir.
3. KYB’nin viskozitesini arttırması ile ayrışmaya karşı direnç sağlamaktadır.
4. Geleneksel betonlara kıyasla aynı dayanımı elde etmek için, gerekli çimento miktarını azaltarak ekonomiklik sağlamaktadır. Ayrıca UK kullanılması atık ürünlerin değerlendirilmesi anlamına da gelmektedir (Youjun vd., 2000).

1.8. Bor Elementi

Bor, periyodik tabloda III A grubunda yer alan ve B simgesi ile gösterilen, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 g/mol olan bir elementtir. Doğada B^{10} ve B^{11} olarak iki ayrı kararlı izotoptan oluşmaktadır. Bor, metalle ametal arası yarı iletken özelliğe sahip bir element olup çok çeşitli bileşik yapma kapasitesine ve nötronları absorbe etme özelliğine sahip olmasından dolayı sanayinin vazgeçilmez hammaddelerinden bir tanesi olmaktadır (TMMOB, 2016; Eti maden, 2020).

Bor mineralleri, yapılarından farklı oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren doğal bileşiklerdir ve doğada hiçbir zaman serbest halde bulunmazlar. Bor elementlerii, sodyum, kalsiyum ve magnezyum oksitlerine bağlı ve kristal suyu içeren mineraller halinde bulunur. 230 civarında değişik jeolojik ortamlarda bor içeriğine sahip mineraller bulunmaktadır. Bu minerallerden ticari önem taşıyan, tinkal ($Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$), üleksit ($NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$) ve kolemanit ($Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$) Türkiye’de çıkarılıp zenginleştirilen ve/veya rafine edilen bor tuzlarından bazılarıdır. Tablo 1.3’de bor minerallerinin kimyasal formülü ve yaklaşık B_2O_3 oranları verilmiştir (Türkel ve Gezmen, 2017; Eti maden, 2020).

Tablo 1. 3: Ticari öneme sahip bor mineralleri (Eti maden, 2020).

Mineral	Formül	B_2O_3 içeriği (%)
Kolemanit	$Ca_2B_6O_{11} \cdot 5H_2O$	50,8
Üleksit	$NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$	43,0
Tinkal	$Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$	36,5
Kernit	$Na_2B_4O_7 \cdot 4H_2O$	51,0
Pandermit	$Ca_4B_{10}O_{19} \cdot 7H_2O$	49,8

Bor yatakları, çökeltme ortamı, volkanizma, sıcak su etkinliği, kapalı havzalar ve kurak iklimler ile yakından ilişkilidir ve küresel ölçekte kıtasal ortamlarda olmak üzere dört ana metalojenik bor bölgesi bulunmaktadır. ABD, Kaliforniya eyaletinin güneyinde yer alan Mojave Çölü, Güney Amerika’da yer alan And Kemer, Türkiye’nin yer aldığı Güney-Orta Asya Orojenik kemer ve Doğu Rusya’dır (DPT, 2001). Türkiye, Dünya bor rezervlerinin %73,4’üne sahip olup Dünya bor üretiminde ise %56 pay ile ilk sırada yer almaktadır. %28 ile Amerika ikinci sırada yer alırken, Çin, Rusya, Şili ve Arjantin gibi ülkeler bor pazarında belli paya sahip ülkelerdir (Eti maden, 2020).

Dünya ticari olarak tüketilen borun %90'ı tinkal, üleksit, kolemanit oluşturmaktadır. Türkiye bor yatakları, Eskişehir-Kırka, Kütahya-Emet, Balıkesir-Bigadiç ve Bursa-Kestelek işletmelerinde gerçekleştirilmektedir. Türkiye'deki bor rezervleri, Dünya bor ihtiyacının 400 yılını tek başına karşılayabildiği durumda iken, ABD ve Rusya ait rezervlerin ise ancak 70 yıl kadar yetebileceği tahmin edilmektedir (Acarken, 2002; Ediz vd., 2004). Bor, nihai kullanım alanı olan sektörlerde çoğunlukla bor ürünleri şeklinde tüketildiği gibi konsantre bor olarak da tüketilebilmektedir. Bor terminolojisi 3 grupta ayrılmaktadır.

1. Tabi boratlar, cevherin yıkama, kırma, eleme, sınıflandırma, öğütme gibi fiziksel işlemlerden geçirilmesi ile B_2O_3 konsantrasyonunun artırıldığı ürünlerdir. Kolemanit, tinkal, üleksit vb.
2. Rafine ürünler, ham ya da konsantre cevher hammadde olarak kullanılmak suretiyle, çözme ya da reaksiyon, filtrasyon, kurutma gibi kimyasal işlemler sonucu elde edilen ürünlerdir. Susuz boraks, borik asit vb.
3. Özel bor ürünleri, borik asit ya da B_2O_3 hammadde olarak kullanılarak üretilen ürünlerdir. Ferrobor, çinko borat vb. (TMMOB, 2016).

Bor madenciliği ülkemizde yaygın olarak açık ocak işletmeciliği şeklinde yapılmaktadır. Cevher üzerinde bulunan tabaka fiziksel özelliklerine göre delme ve patlatma ile gevşetilir ve ardından tabaka yıkama, eleme ve sınıflandırma ile konsantre cevher elde edilir. Bu yöntem ile yerküreye yakın olan bor cevherleri çıkarılmaktadır. Ülkemizdeki bor ocaklarının derinlikleri 250-300 metre civarında olmaktadır (TMMOB, 2016).

1.8.1. Ticari Önem Taşıyan Bor Mineralleri

Doğada serbest halde bulunamayan bor elementleri, 230 civarında mineral yapısında bulunmasına rağmen bunların çok azı ticari değere sahiptir (Güyağüler, 2001). Bor mineralleri yapısında bulunan kalsiyum, sodyum ve magnezyum elementlerine göre sınıflandırılmaktadırlar (Bütüner, 2011). Ticari önem taşıyan, kalsiyum kökenli kolemanit, sodyum kökenli tinkal ve kernit, sodyum-kalsiyum kökenli üleksit yer almaktadır. Bor minerallerinin ekonomik değerleri yapılarında bulunan B_2O_3 oranı ile belirlenmektedir (Aykul, 2008; Dırak, 2011).

1.8.1.1. Kolemanit ($\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11}\cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

Kolemanit, bor bileşikleri arasında en yaygın kullanımı olan bor ürünü olup kil içerisinde bulunan cevher oyuklarında iri, renksiz, saydam ve parlak kristaller halinde bulunur. Yoğunluğu $2,42 \text{ g/cm}^3$, sertliği 4.0-4.5 mohs'tur (DPT, 2001). Soğuk suda zor çözünmesine rağmen HCl asitte kolaylıkla çözülmeaktadır (Akyıldız, 2012).

Türkiye'de Balıkesir-Bigadiç, Kütahya-Emet, Bursa-Kestelek ve Eskişehir-Kırka yataklarında, dünyada ise ABD'de bulunmaktadır (Ulusoy,2012).

1.8.1.2. Kernit ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 4\text{H}_2\text{O}$)

Monoklinik kafes şeklinde olup genellikle saf, saydam, beyaz veya renksiz yapıda olup yoğunluğu $1,95 \text{ g/cm}^3$, sertliği 2 mohs'dur. Düşey bireysel iğneli küme kristaller şeklindedir. B_2O_3 oranı yaklaşık %51 oranına sahiptir (DPT, 2001).

Türkiye'de Eskişehir-Kırka, dünyada Arjantin ve ABD'de bulunmaktadır (Akyıldız,2012).

1.8.1.3. Tinkal ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7\cdot 10\text{H}_2\text{O}$)

Tinkal (Boraks), tabiatta renksiz ve saydam olmasına rağmen, içerdiği bazı maddeler sebebi ile pembe, sarımsı ve gri renklerde bulunabilir. Yoğunluğu, $1,7 \text{ g/cm}^3$ aralığında olup, sertliği 2-2,5 mohs'dur. B_2O_3 oranı yaklaşık %36,5 olmaktadır (DPT, 2001).

Türkiye'de Eskişehir-Kırka, dünyada Arjantin-Tincalayu yataklarında ve ABD'de çıkarılmaktadır (Helvacı ve Orti, 2004).

1.8.1.4. Üleksit ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9\cdot 8\text{H}_2\text{O}$)

Yekpare, karnabahar formunda olup yumuşak, sütun ve lifsi kristal birikintileri şeklinde bulunmaktadır (Akyıldız, 2012). Yoğunluğu $1,95\text{-}2 \text{ g/cm}^3$, 2,5 mohs sertliği ve ipliksi parlaklığa sahiptir. Yapısında yaklaşık %43 B_2O_3 bulunmaktadır (DPT, 2001).

Türkiye'de Balıkesir-Bigadiç, Kütahya-Emet ve Eskişehir-Kırka, dünyada ise ABD, Şili, Arjantin ve Peru da yer almaktadır (DPT, 2001).

1.8.2. Bor Ürünlerinin Kullanım Alanları

Ticari ürün halinde kullanılan bor ve türevlerinin kullanımı gün geçtikçe gelişen ve ilerleyen teknoloji ile endüstride geniş kullanım olanakları sunmaktadır. 2019 yılında Dünya bor ürünleri tüketiminin %48 cam sektörü, %15 tarım, %15 seramik-frit, %3 deterjan ve temizlik ve %19 diğer sektörler yer almıştır. Türkiye yurt içi satışlarda, temizlik, seramik ve cam sektörü yer almaktadır (Eti maden, 2020).

1.8.2.1. Cam Sektörü

Bor ürünleri cam sektöründe, %22 borosilikat cam, %15 cam yünü, %8 cam elyaf ve %3 LCD-TFT yaygın olarak kullanımı söz konusudur (Eti maden, 2020).

Borosilikat cam, bor ürünleri için en önemli pazar yerine sahip olup kullanım alanları, güneş enerji sistemleri, laboratuvar malzemeleri, LCD ekranlar için TFT camı ve özellikle canlı vücuduna yerleştirilen tıbbi cihazlar, ilaç şişeleri, protez gözler vb. gibi tıbbi uygulama alanları ile geniş kullanımı mevcuttur (Eti maden, 2020).

Cam elyaf, tekstil tipi cam elyaf ve cam yünü olarak iki ana formda üretilen ince ve lifsi yapı malzemedir. Tekstil tipi cam elyaf, plastik, kauçuk, çimento ve diğer malzemelerin dayanım ve dayanıklılığını arttırmak için kullanılır. İzolasyon tipi cam elyaf, temel olarak havayı gözeneklerinde hapsedip ısı kaybını önleyerek bina izolasyonlarında kullanılmaktadır. Tekstil tipi cam elyafta %7,5 oranı civarında B_2O_3 sahip E-cam, %5 B_2O_3 oranına sahip C-cam ve %22,5 B_2O_3 oranına sahip D-cam bulunurken izolasyon tipi cam elyafta ise %5-12 aralığında B_2O_3 oranına sahip olmaktadır (Eti maden, 2020).

1.8.2.2. Tarım

Türkiye’de tarım topraklarının bor içeriğini belirlemeye yönelik olarak BOREN desteği ile “Türkiye Bor Haritası” hazırlanmıştır. Hazırlanan harita doğrultusunda Türkiye topraklarının %46,2 çok az ve yetersiz, %31,1 yeterli, %19,4 fazla ve %3,3’ü ise çok fazla seviyede bor içerdiği saptanmıştır (Boren, 2020).

Bor elementi, suyun ve besinlerin büyümesinde, gelişmesinde, ürün verme ve çekirdek oluşturma gibi temel fonksiyonlarda çok önemli görev üstlenmek olup hücredeki şeker

geçişini, kök uzamasını, fotosentez ve hücre duvarının oluşması gibi fonksiyonları düzenlemektedir (Saçlı, 2015).

Bor noksanlığı, daha çok kumlu ve organik maddesi düşük olan asitli topraklarda görülmektedir. Bor eksikliği öncelikle büyüme noktalarına zarar verdiği için bitkinin büyümesi yavaşlamaktadır. Çiçekler, soğuktan zarar görmüş gibi aniden solar ve siyah bir renk alır. Ancak don olayında meydana gelen durumdan farklı olarak hemen dallardan dökülmeyip bir süre ağaçta asılı kalmaktadırlar (Boren, 2020).

1.8.2.3. Seramik-Frit

Borlar seramik sektöründe temel olarak, seramik sırlama ve porselen emaylarında ve az miktarda seramik karo kompozisyonlarında kullanılmaktadır. Borlarında dâhil olduğu pek çok bileşen suda çözünme özelliğine sahip olup kil gövdesinin yüzeyine ıslak olarak uygulandığında emilmektedir. Bu sorunun çözümü için, sır bileşenleri suda çözünmeyen frit elde etmek amacıyla silisle birleştirilmektedir. Elde edilen frit öğütülerek pişirme öncesi yüzeye uygulanmaktadır. Bu amaçlarla en çok kullanılan bor türevleri, kolemanit, üleksit, pentahidrat, boraks dehidrat, borik asit ve susuz borakst olmaktadır. Bu ürünlerin kendilerine has avantaj ve dezavantajları olabilmektedir (Eti maden, 2020).

1.8.2.4. Sağlık

Bor, insanlarda beyin gelişiminden kemik gelişimine, menopozdan alerjiye kadar birçok işlevden dolayı günlük olarak alınması gereken elementlerden bir tanesi olup günlük bor ihtiyacını sulardan ve yiyeceklerden karşılamaktadır. İnsanlar tarafından günlük 1,2 mg/gün bor minerali alınmalıdır. Genel olarak sularda kabul edilen bor seviyesi 0,1 ile 0,3 mg/lt'dir (WHO, 1998). Borların insanlara ve hayvanlara kanserojen etkisi yoktur ve bu sebeple kemoterapi sonrası radyoaktif maddelerin etkisini azalttığı için borun kullanımı söz konusudur (DPT, 2001).

1.8.2.5. İnşaat Sektörü-Yapı Malzemesi

Yapı malzemelerinde borun kullanımı, enerji tasarrufu, mukavemet artışı, bakteri ve mantar oluşumlarını engelleme, aleve karşı dayanıklılık gibi birçok avantajı barındırdığı

için imento, tuğla, bims, yalıtım malzemeleri olarak gibi birçok alanda kullanımına olanak vermektedir (Boren, 2020).

Çimento retiminde %8 oranında kolemanit kullanılarak tuketilen bor, klinker pişirme sıcaklığını düşürmekte ve çimentonun özelliğini iyileştirmektedir. Borlu imento, mukavemet, su ve gaz geçirgenliği, hidrasyon ısısı gibi parametreler açısından Portland çimentosuna göre daha iyi özellikler sergilemektedir. Hidrasyon ısısının düşük olması özellikle kütle betonlarında soğutma ihtiyaını önemli oranda azaltmaktadır (Eti maden, 2020). Ayrıca imento üretiminin de bor kullanımı, atmosfere salınan CO₂'yi %25-30 oranında düşürmektedir. Bor bileşiklerinin betona ilave edildiğinde nötronları absorbe ettiği ve düşük enerjili gama ışınımı yaydığını ve bu şekilde etkin bir radyasyon koruması sağladığı belirlenmiştir. Ancak bor ilavesinin beton priz süresini geciktirdiği ve dayanımı az da olsa olumsuz etkilediği belirtilmiştir (Volkman ve Bussolini, 1992).

1.8.2.6. Enerji

Elektrik enerjisinin yeterli depolanamaması, çevresel etmenler gibi durumlar dikkate alındığında alternatif enerji arayışını beraberinde getirmiştir. Alternatif enerji arayışında yer altı zenginliği yüksek olan bor elementi başrol oynamaktadır. Bor, imento, izolasyon ve seramik sektörünün yanında hidrojen depolama, yakıt pilleri, güneş panelleri ve pilleri, lityum iyon pilleri vb. alanlarda kullanılmakta olup enerji tasarrufu, enerji taşımadaki üstün yeteneği ve depolamadaki katkıları sayesinde enerji için vazgeçilmez kaynak olmuştur (Boren, 2020).

Borik asit, boraks gibi bor bileşenleri, çimentonun hidrasyon süresini uzatmaktadır ve bu nedenle lignin, şeker ve bazı fosfat bileşikleri gibi bor bileşenleri güçlü bir priz geciktirici olarak betonda kullanılmaktadır. Borakslar özellikle petrol kuyularının imentolaştırılmasında hem klasik bir geciktirici hem de yüksek sıcaklıkta viskoziteye yardımcı bir katkı olarak yıllardır kullanım göstermektedir (Bell ve Conevey, 1998). Bunun yanında, nükleer enerji santrallerinin radyasyon atıkları yüksek konsantrasyonlu bor çözeltileri ile karıştırılarak yeraltında depolamak üzere imento ile sertleştirilmektedir. Ancak bu sertleştirme işlemi esnasında önemli dayanım problemleri gelişim göstermektedir (Pehlivanoğlu vd., 2013).

1.9. Bor Atığı

Cevher zenginleştirme tesislerinden çıkan atıklar genellikle ince taneli veya pülp şeklinde olmakta ve çevre bilinci gelişmeden önce bu atıklar maden alanlarının yakınındaki sahalarda, atık barajlarında depolanmakta veya deniz, göl ve nehir yataklarına boşaltılmaktaydı. Günümüzde ise zenginleştirme yöntemi ile atıktan daha çok yararlanmak veya en uygun bertaraf etme yoluna gidilmektedir. Bor atıkları inşaat sektöründe özellikle yapı malzemesi üretiminde kullanılması, çimento, beton, harç vb. imalatlarda değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Böylece atıkların değerlendirilmesi ile birlikte ucuz ve kaliteli yapı malzemesi üretilmiş olmaktadır (Ediz vd., 2004; Batar vd., 2009).

Bor atıklarının sektörde değerlendirilmesi;

1. Çevre kirliliğini azaltılması,
2. Atık depolama-stok problemlerinin çözülmesi ve maliyetinin düşürülmesi,
3. Atıkların geri kazanımı ile ek ekonomik kazanç sağlama,
4. Atık gölet problemlerinin indirgenmesi ve yapım için ödenen yatırım giderlerinin düşürülmesi,
5. Atıkların yer üstü ve yer altı sularını kirlemesini önlenmesi sağlanacaktır.

Bor atığı su içerisinde gereğinden fazla bulunması durumunda ve bu su da tarımsal sulamada kullanılması durumunda bitkilere zararlı etkileri olmaktadır (Yılmaz vd., 2005). Bor atıklarının değerlendirilme yöntemleri üç ana gruba ayrılmaktadır.

1. Atıklardan borun tekrar kazandırılması; bor atıkları mekanik dağıtma yöntemi, elektrostatik ayırma yöntemi, ısı ile dağıtma (Dekrepitasyon), flotasyon ile zenginleştirme esasında atık içerisinde kalan bu bor minerallerini geri kazandırılmış olmaktadır (Doğan vd. 1997).
2. Atıkların çevreye zarar vermeden depolaması; bor atıklarının kullanılacak endüstri dalları göz önüne alınarak işletme bünyesinde atık barajında depolanmaktadır (DPT, 2001).
3. Atıkların, seramik ve inşaat gibi sektörlerde kullanılması; özellikle bor minerallerinin genellikle kil mineralleri ağırlıklı bulunması, bu bor atıkların inşaat ve seramik endüstrisinde değerlendirilmesine imkan vermektedir (Bentli, 2002).

1.10. Bor Bileşiğinin Çimento Hidratasyonuna Etkisi

Hidratasyon reaksiyonu esnasında, kalsiyum oksit (CaO), su (H_2O) ile kalsiyum hidroksit (Ca(OH)_2) oluşturmak için tepkimeye girer ve gözenek suyu hızla alkali bir çözeltiye dönüşür. Alkali çözeltiye dönüşen gözenek suyunda Ca^{+2} katyonları ve OH^- anyonlarının konsantrasyonu artarken B(OH)_3 hızla çözülür. B(OH)_3 ile OH^- reaksiyona girerek B(OH)_4^- bileşiği oluşmaktadır. Ca^{+2} katyonları B(OH)_4^- ile tepkime gösterir ve $\text{Ca[B(OH)}_4\text{]}_2$ oluşur (Pehlivanoğlu vd., 2013). Oluşan kalsiyum di borat (CBH_6) bileşiği çimento partikül yüzeyinin tamamı yada bir bölümü üzerine çöker ve yüzeyin bir kısmı geçirimsiz CBH_6 tabakası ile kaplanır. Partiküller de topaklaşma oluşur ve yalancı priz meydana gelir. Sonuç olarak CBH_6 bileşiği çimento partiküllerinin yüzeyini hızlı bir şekilde kaplar ve hidratasyon durur. Artan B_2O_3 konsantrasyonuna bağlı olarak CBH_6 bileşiğinin çözünürlüğü de gecikir. Bu fenomen bağlayıcı taneler arasında bağ oluşumunu zayıflar ve hidratasyon reaksiyonu sonrası sertleşme süresi B_2O_3 konsantrasyonuna bağlı olarak uzarken çimento matrisinin dayanımı azalır (Davraz, 2010).

1.11. Konunun Önemi ve Amacı

Beton teknolojisindeki en önemli kriterlerden birisi betonun işlenebilirliğidir. KYB'ler ile işlenebilirlik probleminin aşılabilmesi, en önemli teknolojik gelişmelerden biri sayılabilmektedir.

KYB gibi çimentolu sistemlerde kıvamın daha uzun korunmasını sağlamak günümüzde çeşitli kimyasallarla sağlanabilmektedir. Arzu edilen bu özelliklerin kolemanit ve kolemanit konsantratör atıkları (KKA) ile sağlanabilmesi halinde bu kimyasalların kullanımı azalmış olacaktır. Belirtilen kimyasal katkıların yerine milli kaynakların ve atık malzemelerin kullanılabilecek olması ekonomik açıdan önem arz etmektedir.

Yapılan bu çalışmada, daha uzun işlenebilirliği sağlama ve aynı zamanda daha gelişmiş reolojik özelliklere sahip bir KYB tasarımı ortaya konulması hedeflenmektedir. Betonun kıvam kaybının nedenlerinden biri çimento ile suyun buluşmasından itibaren başlayan hidratasyon ve buna müteakip betonun sertleşmeye başlamasıdır. Bor minerallerinin priz geciktirici özelliği kullanılarak daha yüksek akış performansı gösteren ve akıcılık özelliğini daha uzun süre koruyan KYB üretilmesi bu çalışmadan beklenen en temel hedef olmuştur.

2. LİTERATÜR

Literatür başlığı altında KYB, UK, bor ve bor atıkları üzerine yapılmış daha önce yapılmış çalışmalar verilecektir.

2. Literatür Çalışmaları

2.1. KYB ve UK Üzerine Yapılmış Geçmiş Çalışmalar

Jiang ve Malhotra (2000), çimento ikamesi olarak %55 UK kullanımı söz konusu iken beton karışımlarında süperakışkanlaştırıcı kullanılmamıştır. Su/çimento oranı 0,34-0,39 aralığında seçilmiş ve çimento 400 kg/m³'da sabit tutulmuştur. Çalışma sonunda, beton basınç dayanımları, 7 günlük 18,0-42,2 MPa, 28 günlük basınç dayanımı 30,7-55,8 MPa ve 90. günlük dayanımı ise 43,9-65,2 Mpa olarak saptanmıştır.

Felekoğlu ve Baradan (2004), KYB'lerin mekanik özellikleri üzerine yapmış oldukları çalışmada, KYB karışım hesabında çimento dozajını sabit tutup akışkanlaştırıcı katkı miktarını arttırıp karışım suyu azaltıldıkça, yayılma değeri belirli sınırlar arasında tutulurken viskozite hızla artış göstermiştir. Sabit oranda tutulan çimento dozaj ve agrega gradasyonunda, su/toz oranı artışıyla aynı katkı dozajının azaltılması, taze betonun donatılar arası geçiş yeteneğini arttırmıştır. Viskozite arttırıcı toz malzeme olarak kireç tozu kullanılmıştır. Yapılan çalışmada normal beton ile KYB arasında elastisite modüllülerinin arasında önemli bir farkın oluşmadığı bildirilmiştir.

Felekoğlu ve Türkel (2004), yüksek dozda akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının taze ve sertleşmiş betonun bazı özellikleri üzerine çalışma yapmışlardır. Yapılan bu deneysel çalışmada, normal, süper ve hiperakışkanlaştırıcı sınıfına giren farklı kimyasal kökenlere sahip akışkanlaştırıcı katkıların üretici firmalar tarafından tavsiye edilen dozajlarda veya daha fazla miktarda kullanılması halinde betonun taze ve sertleşmiş haldeki özelliklerine etkilerini ortaya konmuştur. Deneysel çalışmada kullanılan bütün akışkanlaştırıcılar 28 günlük en yüksek basınç dayanımının elde edildiği optimum katkı dozajını belirlemişlerdir.

Sağlam vd. (2004), KYB ve katkı-çimento uyumu adlı çalışmada, hazır beton sektörü için 9 adet KYB, prefabrik sektörü için 6 adet KYB karışımı hazırlanmış ve yayılma değerleri saptanmıştır. Deneme betonların 1 günlük dayanımlarının hem çimento hem de katkı cinsinden etkilendiği, ayrıca bazı çimento ve katkıların birlikte kullanılmaları durumunda büyük miktarda hava sürüklendiği ve bunun sonucu olarak da dayanımı etkilediği belirtilmiştir. Taze beton özellikleri ve dayanımları açısından bakıldığında, çimento-katkı etkileşiminin önemli olduğu, bu nedenle uygulamaya geçmeden önce çimento-katkı uyum deneylerinin yapılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Şahmaran vd. (2004), yeni nesil yüksek akışkanlaştırıcı katkı maddesi ile yüksek miktarda UK (%70 UK) içeren KYB üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada sadece bir termik santralden temin edilen UK kullanılarak yapılmıştır. Yapılan çökme yayılma deney sonucuna göre yayılma çapı 730-800 mm ve T_{500} süresi 2-4 saniye aralığında çıkmıştır. V-hunisi akış süreleri, KYB standartlarına nazaran yüksek çıkmıştır. 28 günlük basınç dayanımı 30-46 MPa aralığında çıkmıştır.

Felekoğlu vd. (2005), KYB ve geleneksel beton karışımları ile silindir numuneler hazırlanmıştır. Karışımların kesitlerinde görüntülü işleme teknikleri kullanılarak boşluk analizleri yapılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen sonuçlar, KYB'nin boşluk yapısının geometrik olarak küresel ve bağlantısız, normal betonlarının boşluk yapısı ise KYB'ye kıyasla şekilsiz ve küresellikten uzak olduğu gösterilmiştir. Küresel hava boşlukları dayanım ve dayanıklılık açısından avantaj getirmektedir. Bu farklılığın nedeni olarak, KYB'de kullanılan akışkanlaştırıcı katkının taze beton reolojisinde meydana getirdiği değişikliklerin olduğu düşünülmektedir.

Topçu vd. (2007), KYB'de mineral katkıların taze beton özelliklerine etkisinin araştırılması adlı çalışmada, UK, kireçtaşı tozu, tuğla tozu ve mermer tozunun KYB'de ince malzeme olarak kullanılması ve bunun katkı gereksinimleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. KYB'de akışkanlığı sağlamak için UK ve silis dumanı gibi puzolanik malzemelerin yanı sıra taş unu gibi ince malzemelerde kullanıldığı belirtilmiştir. Yapılan deneyler yüksek oranda su azaltıcı ve akışkanlaştırıcı katkı maddeleri kullanılarak KYB harçları üzerinde gerçekleştirilmiştir. Rölatif çökme ve yayılma ile s/ç oranı arasındaki ilişkiden gerekli olan katkı miktarları çimento ağırlığının yüzdesi şeklinde belirlenmeye çalışılmıştır. Deney sonuçlarının, seçilen mineral katkılarının gereksinimine dikkat edilmesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Mohammed (2011), farklı kür koşulları altında KYB'nin, UK ve silis dumanının basınç dayanımına etkisi adlı çalışmada, ilk olarak UK yüzdeleri, ikincisi silis dumanı yüzdeleri ve son olarak UK-silis dumanının karışımı olarak üç farklı karış oluşturulmuştur. Beton basınç dayanım değerleri saptanmıştır. UK, %30'dan daha yüksek oranlarda kullanıldığında basınç dayanımında düşüşlerin olduğu gözlemlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri %15 silis dumanı oranında elde edilmiştir. Yapılan deney durumları için en yüksek basınç dayanımı 7 ve 28 günlük numunelerden elde edilen ve en düşük basınç dayanımına havada kürlenmiş numunelerden ulaşıldığı belirtilmiştir.

Uysal vd. (2012), mineral katkılarının KYB özelliklerine etkisi adlı çalışmada, UK, granüle yüksek fırın cürufu, mermer tozu, kalker tozu ve bazalt tozu kullanılmıştır. Deney için kullanılan katkılar arasından, UK ve GYFC varlığı KYB'de çalışabilirliğini önemli derecede arttırdığı sonucuna ulaşmışlardır. Çimentonun %20 GYFC ile ikame etmek, 28 günlük basınç dayanımının 78 MPa'dan fazla dayanım sağlandığını, bunun yanında en dirençli klorür iyon geçirgenliğine %60 GYFC kombinasyonunda ulaşıldığı bildirilmiştir.

Durgun (2017), nano silika kullanımının KYB'nin reolojik, mekanik ve içyapısal özellikleri üzerine etkileri adlı çalışmada, dört kademede UK (120 kg/m^3 , 80 kg/m^3 , 40 kg/m^3 ve 0) ve üç farklı ortalama tane boyutunda nano silika (35 nm, 17 nm ve 5nm) kullanmıştır. Bu çalışmada öncelikle tek noktalı reoloji deneyleri ve çift noktalı reoloji deneyleri uygulamıştır. Mekanik özelliklerin tespiti için reolojik testlerde başarılı olan karışımları kullanarak 28 günlük ve 120 günlük basınç dayanımı ve basınç altında elastisite modülünü tespit etmiştir. Çalışmanın son aşamasında MIP, XRD, TGA ve SEM görüntü ve verilerini almıştır. Elde ettiği başarılı ölçümlerin statik akma gerilmesi değeri 150-200 Pa, dinamik akma gerilmesi 30-40 Pa ve plastik viskozite değeri 20-30 Pa.s aralığında bulmuştur. Bu aralıkların altında kalan değerlerin segregasyon eğiliminde olduğu, üstünde olan değerlerde ise kıvamda kalınlaşma olduğu ve KYB özelliklerini kaybettiği sonucuna varmıştır.

Huang vd. (2018), süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici reçine içeren KYB'nin reolojik özellikleri adlı KYB çalışmasında, KYB davranışını tanımlamak için Bingham modelini uygulamışlardır. Deneysel çalışma sonunda, KYB'nin hem akma gerilmesi hem de plastik viskozitesinin önemli ölçüde azaldığını göstermiştir. Hava sürükleyici katkı maddelerinin eklenmesi akma gerilmesinin artmasına ve plastik viskozitenin azalmasına neden olmuştur.

Saha (2018), karışımda kullanılan F sınıfı UK betondaki bağlayıcıyla yer değiştirmesi uygulamasının değerlendirilmesi incelenmiştir. Yapılan beton karışımları, ıslak kürleme için kirece doymuş su içerisine ve hava kürleme için ortam sıcaklığına bırakılmışlardır. UK bağlayıcı bir madde olarak dâhil edilmesinin, betonun gözeneklerini azalttığı saptanmıştır. UK içeren betonun daha düşük su emme ve klorür geçirgenliği sergilediği belirtilmiştir. F sınıfı olan bir UK ilavesi ile, 28 günlük kürlemenin ardından betonun basınç dayanımı, UK içeriğinin artması ile azaldığı ifade edilmiştir. %30-%40 UK içeren betonun basınç dayanımları, kademeli olarak 180 güne kadar arttığını göstermiştir. UK içerikli betonun hidratasyon ısını düşürdüğü ve böylece betonun kuruma büzülmesinin, referans betona kıyasla oldukça düşük olduğu saptanmıştır.

Güneyisi vd. (2019), nano silika ve UK içeren cam elyaf takviyeli KYB karışımlarında taze ve reolojik özelliklerine odaklanmışlardır. 0,35 sabit s/b oranında toplam 550 kg'lık bir bağlayıcı içeriğine sahip puzolan ikameli çimento içeren cam elyaf takviyeli KYB karışımlarından 15 adet hazırlanmıştır. İlave edilen F sınıfı UK, toplam bağlayıcının ağırlıkça %25'ini oluşturmaktadır. KYB'nin reolojik davranışını ölçmek için ICAR reometresi kullanılmıştır. Nanosilika içeriğinin %0'dan %4'e yükselmesi ve cam elyaf hacminin de %0'dan %1,5'e yükselmesi çökme yayılmasında ve V-hunisi akışında bir artışa neden olduğu görülmüştür. Bu çalışmada Bingham modelleri kayma kalınlaşması davranışını incelemek için kullanıldığı ve tüm KYB karışımlarında cam elyaf kullanımının azalması ile kayma kalınlaşmasının kuvvetlendiği belirtilmiştir.

Şeker (2020), granüle yüksek fırın cürufunun KYB özelliklerine etkisi adlı çalışmada, doğal agregaların kullanımı yerine GYFC kullanımı ile alternatif kaynaklara yönelilmesinin gerektiğini belirtmiştir. Deneyde, 400 kg/m³ çimento, 100 kg/m³ UK ve s/ç oranı 0,45'te sabit tutulup, GYFC'yi ince agreganın ikamesi olacak şekilde %0,25, 50 ve 75 oranlarında kullanmıştır. Üretilen numune örneklerin kirece doymuş kür ortamında 7, 28 ve 90 günlük sertleşmiş beton deneylerine tabii tutmuştur. Elde edilen sonuçlar, %25 ve %50 oranlarında kullanılan GYFC'nin beton taze hal özelliklerini iyileştirdiği yalnız basınç dayanımının GYFC oranının artması ile azaldığını göstermiştir. Bunun nedenini GYFC ilavesinin artması ile betonda daha fazla boşluk oluşması olarak bildirilmiştir.

2.2. Bor elementi ve Bor Atıkları Üzerine Yapılan Çalışmalar

Chatterjee (1996), mevcut durum ve gelecek teknolojik seçenekler adlı yapmış olduğu çalışmada, bor katkısının betonarme yapılarda çıkan CO₂ salınımının %10 düşürdüğünü vurgulamaktadır.

Kula (2000), bor atıklarının çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılması adlı deneysel çalışmasında, kolemanit konsantratör atığı, tinkal konsantratör atığı, UK ve taban külünü belirli oranlarda çimento klinkerine karıştırmıştır. Sonraki çalışmada, kolemanit konsantratör atığı taban külü, kolemanit konsantratör atığı UK, tinkal konsantratör atığı-UK, tinkal konsantratör atığı-taban külü varyasyonlarını katkı maddesi olarak kullanmıştır. Deney sonucunda, kolemanit konsantratör atığı kullanım yüzdesi arttıkça dayanımının azaldığı ve tinkal konsantratör atığının çimentoda %1, 3 ve 5 oranlarına kadar kullanımının mümkün olabileceği sonucuna varmıştır.

Targan vd. (2002), çimento üretim aşamasında enerji sağlamak ve atık madde olarak çevreye verdikleri zararı giderebilmek için, kula cürufu KKA ve bentonit KKA olan bir varyasyonu katkı maddesi olarak kullanmışlardır. Üretilen numunelere fiziksel, kimyasal ve mekanik deneyler uygulamışlardır. Yapmış oldukları deneylerin sonucunda, çimento karışımlarının sonuçlarını Türk Standartları ile karşılaştırmışlar ve standartlara uygun aralıklarda olduğu tespit edilmiştir. Basınç dayanımları olarak 60 günlük ve 90 günlük incelendiğinde %5 Bentonit ile birlikte KKA kullanarak hazırlanan harçların basınç dayanım değerleri Türk Standartları değerlerinden yüksek olduğu sonucuna varmıştır.

Keleş vd. (2005), borojips ve konsantratör atığını klinkere ikamesi olarak çimento elde etmişlerdir. Üretilen çimento numunelerine, priz süresi, basınç ve çekme dayanımı ve radyasyon geçirgenliği deneylerine tabi tutmuşlardır. Deneylerin sonucunda elde edilen değerleri Portland çimentosu ile mukayese etmişlerdir. Çalışma sonunda, %5 atık ikamesine kadar dayanım değerlerinin Portland çimentosuna göre yüksek olduğuna ve %5 oranından sonra ise dayanım değerlerinin düştüğü bildirilmiştir. Ayrıca atık miktarının artması priz süresinin arttığını ortaya koymaktadır.

Erdoğmuş (2006), kolemanit konsantratör atığı ve yüksek fırın cürufunun birlikte çimentonun ikamesi olarak üretilmesi ile enerji giderlerinin azaltılmasına ve çimentonun mekanik özelliklerine katkısını araştırmıştır. Yapılan deneyler sonucu, kullanılan katkıların çimento hacmini genişlettiğini, priz ve basınç dayanımları üzerinde olumsuz etki yaptığını tespit edilmiştir.

Aydın (2009), kolemanit atığının endüstriye kazandırılması amacı ile öğütülmüş kolemanit atığı katkılı beton numuneleri üretmiştir. Çalışmada, beton içerisine kolemanit atığını %0, 3, 5, 10 ve 15 oranlarında çimento ile ikame etmiştir. Deney sonucunda, 180 günlük numunelerin basınç dayanımlarının referans betona kıyasla daha yüksek çıktığı sonucuna varmıştır.

Akyıldız (2012), bor atığı ve zeolit gibi zengin yer altı kaynaklarının betonda mineral katkı olarak değerlendirmesi ve betonun dayanım ve dayanıklılık etkilerini araştırmıştır. Ürettiği beton numunelerini taze deneylerine tabi tuttukten sonra kirece doymun suda 7, 28 ve 56 gün kürde bekletilen numuneleri sertleşmiş beton deneylerine tabi tutmuştur. Normal betonda %3 oranında katkının 7 günlük basınç dayanımı 13,69 MPa ve 56 günlük basınç dayanım değeri 25,73 MPa olarak bulmuştur. Yapmış olduğı basınç ve yarma dayanımı betonun dayanım özellikleri uzun vadede iyileştirdiğı görüşüne varmıştır. Ayrıca %3 katkılı betonların su emme yüzdesinin referans nuunesine yakın değerler aldığıını vurgulamıştır.

Pehlivanoğlu vd. (2013), bor minerallerinin priz süresine etkisi ve denetlenebilirliğı adlı çalışmada, Portland çimentosu yerine, aktif belit (BAB) ve kalsiyum alüminatlı çimentolar kullanarak ve ayrıca çimento ağırlığının %0,15-1,00'i oranında borik asit katılarak harç karışımları hazırlamışlardır. Deney sonuçlarında, harçlardaki boroksit konsantrasyonu arttıkça priz başlangıç ve sürelerinin uzadığı görülmüştür. Borik asidin priz geciktirici etkisini bastırabilmek için stabilizör olarak üç farklı kimyasal katkı (kalsiyum klorür, sodyum alüminat ve sodyum hidroksit) maddesi kullanılmıştır. Kontrol Portland çimentosu örneklerine en yakın işlenebilirlik özelliklerini sodyum alüminat stabilizörü içeren karışımlar göstermiştir.

Demiral ve Nasıroğlu (2017), bor minerallerinin ve atıklarının çimentoda kullanılması yönünde çalışma yapmıştır. Yapılan bu çalışma kapsamında, özellikle kolemanit, borik asit, tinkal, gibi bor minerallerinin ve atıklarının çimentonun priz süresine, betonun basınç dayanımına ve yalıtım endüstrisine etkilerini vurgulamıştır. Bor atıkları için en uygun değerlendirmenin, atıkların tekrar kazandırılması ve geriye kalan malzemelerin uygun sektörde kullanılabilir hale getirilebilmeleri çıkarımında bulunmuştur.

Türkel ve Gezmen (2017), bor mineralleri ve UK içeren harçların mekanik özellikleri ve sülfata dayanıklılıklarının incelenmesi adlı çalışmalarında, Portland çimentosu ile %0, 2, 4, 6, 8 ve 10 oranlarında kolemanit ve %0, 10, 20, ve 30 oranlarında UK kullanarak üretilen numune örneklerin 7, 28, 56 ve 90. günlerdeki basınç dayanımları ve eğilme dayanımları incelenmiştir. Çalışma sonunda, çimentoya kütlece %2 ve %4 oranında kolemanit ikamesinin uygun olduğu ve kolemanit miktarının artması ile sülfata dayanıklılığın geliştiği belirtilmiştir. Ayrıca çimento ikamesi olarak kullanılan UK oranı %10'da sabit tutulup kolemanit miktarının arttırılması ile priz başlangıç ve bitiş sürelerinin uzamakta olduğu tespit edilmiştir.

Bideci A. ve Bideci Ö.S (2018), öğütülmüş olan kolemanit katkısının çimento harcına etkisi adlı deneysel çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada, farklı oranlarda (%0, 1, 4 5 ve 7) öğütülmüş olarak kolemanit katkılı çimento harçlarını bazı taze ve sertleşmiş deneylere tabi tutup referans betonu ile karşılaştırmışlardır. Deney sonunda, kolemanit ikamesi oranının artması ile priz başlangıç ve bitiş sürelerinin uzadığı TS EN 197-1 standardında istenilen mekanik özellikleri sağladığı belirtilmiştir. Kolemanit katkı oranının artması ile numunelerin basınç dayanımlarında azalmalar olduğu ve %1, %3 ve %5 oranlarında öğütülmüş kolemanitin çimento ikamesi halinde kullanılacağını belirtilmiştir.

Durgun vd. (2022), kolemanit atıklarının harç karışımlarında kullanılabilirliği, basınç dayanımı ve aynı zamanda bu kolemanit atığını harç ve hamurların reolojik özellikleri üzerinde çalışma yapmışlardır. Harç ve çimento hamuru karışımlarına çimentonun ikamesi olacak şekilde %1, 3, 5 ve 7 oranlarında numuneler üretmişlerdir. Numuneleri 1, 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanım değerleri belirlendi. Mikro yapıları açısından SEM ve XRD analizleri ile de incelemeler yaptılar. Yaptıkları çalışma sonucunda kolemanit atığı kullanmanın taze hal özelliklerini olumsuz etkilediği ve dayanım yönünden de sadece %5 ve %7 oranları ile üretilen numunelerde artış olduğu gözlemlenmiştir. B₂O₃ kullanım oranının artması ile priz süresinde uzadığı çalışmada belirtilmiştir.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Kullanılan Malzemeler ve Özellikleri

Yapılan çalışmada numunelerin hazırlanması için çimento, agrega, UK, süperakışkanlaştırıcı, karışım suyu, kolemanit ve kolemanit konsantratör atığı kullanılmıştır.

3.1.1. Çimento

Deneysel çalışmalarda kullanılan çimento, Bartın Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. fabrikasından alınmıştır. TS EN 197-1'e uygun olan CEM I 42,5 R çimento kullanılmıştır.

Deneysel çalışmada kullanılan çimento torbalarının hepsi aynı gün içerisinde temin edilmiş olup doğru çimento istifleme ve saklama şartları uygulanmıştır. Üretici firmadan alınan föy doğrultusunda kullanılan çimento özellikleri Tablo 3.1 ve Tablo 3.2'de verilmiş olup karışımda kullanılan çimento Şekil 3.1'de gösterilmektedir.

Tablo 3. 1: Çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri.

Kimyasal bileşenler		Fiziksel özellikler	
SiO ₂	21,09	Özgül ağırlık (g/cm ³)	3,12
Al ₂ O ₃	5,41	Özgül yüzey (cm ² /g)	3947
Fe ₂ O ₃	3,77	0,090 mm elek kalıntısı (%)	0,1
CaO	60,45	0,045 mm elek kalıntısı (%)	3,0
MgO	2,64	Su/çimento oranı (%)	29,40
SO ₃	3,45	Priz başlama süresi (dk)	280
Na ₂ O + K ₂ O	1,28	Priz sona erme süresi (dk)	340

Tablo 3. 2: Çimentonun mekanik özellikleri

Gün	Basınç dayanımı (MPa)
2	31,5
7	44,9
28	54,2



Şekil 3. 1: Karışımda kullanılan çimento.

3.1.2. Agregalar

EFNARC (2005), kullanılan maksimum agregalar çapını 20 mm altında seçilmesini uygun gördüğü için karışımlarda iri agregalar çapı (D_{max}) 11,2 mm olarak seçilmiştir. İnce agregalar olarak ise 0-4 mm kırma kum ve 0-4 mm dere kumu kullanılmıştır. Karışım betonunda %40 oranında iri agregalar ve eşit oranlarda %60 ince agregalar kullanılmıştır. Agregalara ait iri ve ince agregalar özellikleri ve elek analizi sonuçları Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’de verilmiştir. Kullanılan iri ve ince agregalar Şekil 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 3: Agregaların fiziksel özellikleri.

Fiziksel özellik	Agrega sınıfı	Deney sonucu
Tane yoğunluğu (g/cm^3)	0-4 mm Dere kumu	2,69
	0-4 mm Kırma kum	2,60
	4-11,2 mm İri agregalar	2,59
Su emme oranı (%)	0-4 mm Dere kumu	3,74
	0-4 mm Kırma kum	5,91
	4-11,2 mm İri agregalar	0,92

Tablo 3. 4: Agrega elek analiz sonuçları.

Elek No	İri agregası		Dere kumu		Kırma kum		Karışım
	Kalan	Geçen	Kalan	Geçen	Kalan	Geçen	Geçen
16	0	100	0	100	0	100	100
11,2	3,97	96,03	0	100	0	100	98,412
8	36,93	63,07	0	100	0	100	85,228
5,6	78,73	21,27	0	100	0	100	68,508
4	84,57	15,43	0	100	0,91	99,09	65,899
2	100	0	1,31	98,69	38,14	61,86	48,165
1	100	0	13,33	86,67	56,63	43,37	39,012
0,5	100	0	45,71	54,29	76,12	23,88	23,451
0,25	100	0	66,97	33,03	82,74	17,26	15,087
0,125	100	0	92,3	7,7	91,51	8,49	4,857
0,075	100	0	97,37	2,63	97,02	2,98	1,683
Pan		0	100	0	100	0	0



Şekil 3. 2: Karışımında kullanılan iri agregası-kırma kum- dere kumu.

3.1.3. Uçucu Kül

Bu çalışmada kullanılan UK, Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali'nden temin edilmiş olup UK'e yoğunluğu $2,23 \text{ g/cm}^3$ iken UK'ya ait özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

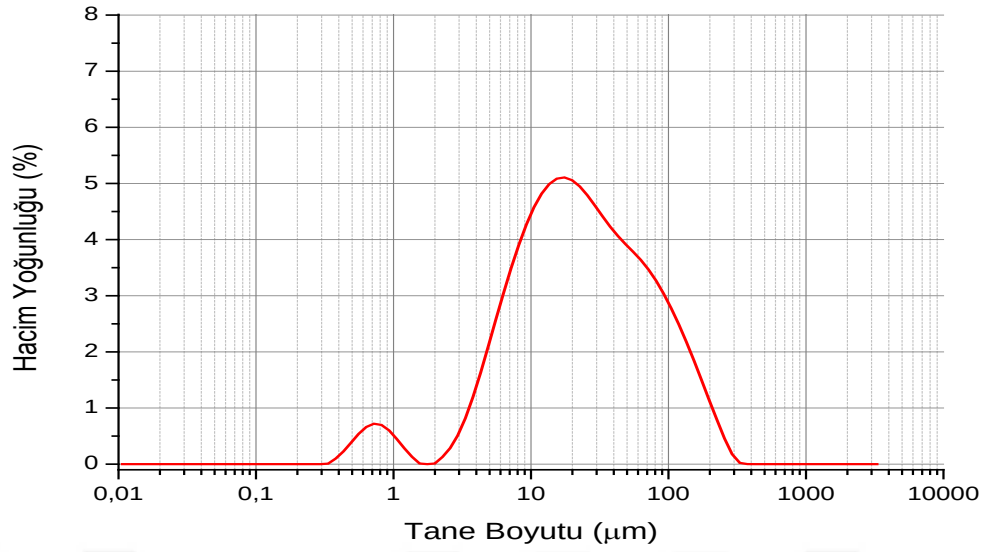
Tablo 3. 5: Uçucu külün kimyasal bileşimi.

Kimyasal bileşen	Miktar (%)
SiO_2	58,70
Al_2O_3	24,37
Fe_2O_3	5,65
CaO	1,96
MgO	1,87
Na_2O	3,38
K_2O	3,7
SO_3	0,43
Cl^-	0,05

Beton karışımında kullanılan UK'lar, $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ yüzde olarak %50'den fazla olduğu ve CaO yüzdesi %18'in altında bulunduğu için düşük kireçli UK (F sınıfı) olarak belirlenmiştir. Karışımında kullanılan UK Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Uçucu külün tane boyut dağılımı ise Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3. 3: Karışımında kullanılan uçucu kül.



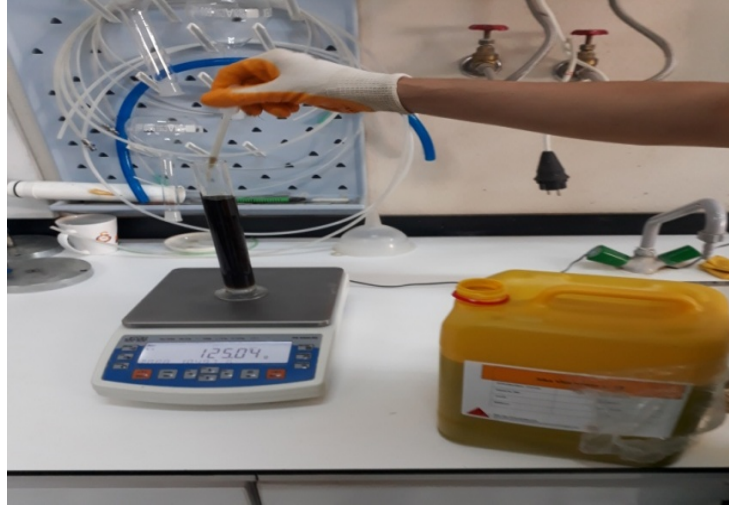
Şekil 3. 4: Uçucu kül tane boyut dağılımı.

3.1.4. Süperakışkanlaştırıcı Katkı

Karışımda, Sika Yapı Kimyasalları A.Ş.'den temin edilen Sika-Visco Crete SF-18, KYB'de çok yüksek oranda su azaltıcı özellik gösteren ve uzun işlenebilirlik süresi sağlayan polikarboksilat esaslı polimer süperakışkanlaştırıcı kullanılmıştır. KYB'lerde bağlayıcı ağırlığının %1,0-%2,0 oranında kullanımı tavsiye edilmiştir. Çalışmada kullanılan katkı miktarı deneme üretimleri sonucu belirlenmiş olup bu değer %1,25 olarak tespit edilmiştir. Firma föyünde belirtildiği üzere katkı maddesi doğrudan kuru çimentoya eklenmemiş olup karışım suyu ile beton karışımına eklenmiştir. Karışımda kullanılan süperakışkanlaştırıcıya ait özellikler Tablo 3.6'da verilmektedir. Karışımda kullanılan süperakışkanlaştırıcı Şekil 3.5'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 6: Karışımda kullanılan süperakışkanlaştırıcı katkı özellikleri.

Malzeme yapısı	Analiz değeri	Standart değeri
Görünümü	Kahverengi	-
Özgül ağırlık	1,096	1,070-1,110
Alkali içeriği (%)	0,55	<3,0
pH değeri	4,48	3,0-7,0



Şekil 3. 5: Karışımda kullanılan süperakışkanlaştırıcı.

3.1.5. Karışım Suyu

KYB karışımlarında TS EN 1008 için uygun karışım suyu kullanılmış olup içilebilir Bartın şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Karışım suyunun sabit sıcaklıkta olmasına dikkat edilmiş ve karışım hesabı doğrultusunda kullanılmıştır.

3.1.6. Kolemanit

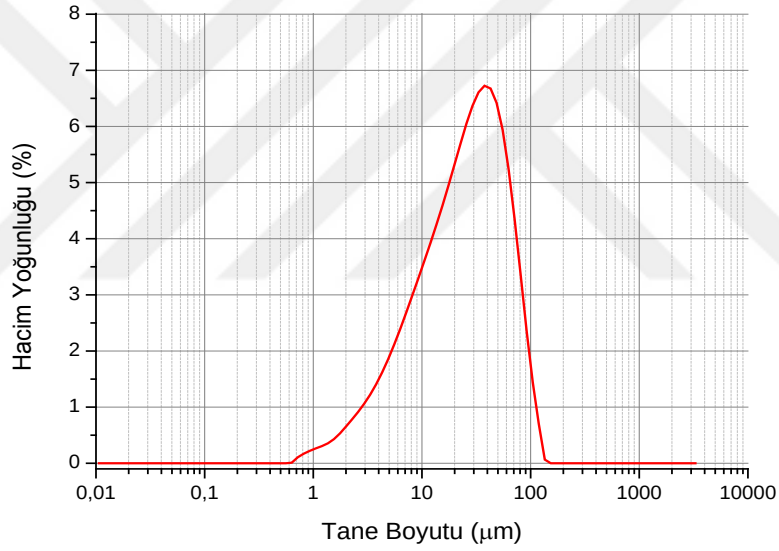
Karışımda kullanılan kolemanit Balıkesir-Bigadiç Eti Maden Bor İşletme Ltd.Şti.'den temin edilmiştir. Tane yoğunluğu $2,48 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenen kolemanitin kimyasal özellikleri Tablo 3.7'de belirtilmiş olup Şekil 3.6'da gösterilmiştir. Kolemanitin tane dağılımı Şekil 3.7'de verilmiştir.

Tablo 3. 7: Kolemanitin kimyasal bileşimi.

Kimyasal bileşen	Miktar (%)
B_2O_3	40,26
Na_2O	0,21
MgO	2,74
Al_2O_3	0,16
SiO_2	5,20
SO_3	0,18
CaO	27,16
Fe_2O_3	0,045
SrO	0,8



Şekil 3. 6: Karışımında kullanılan kolemanit.



Şekil 3. 7: Kolemanit tane dağılımı.

3.1.7. Kolemanit Konsantratör Atığı

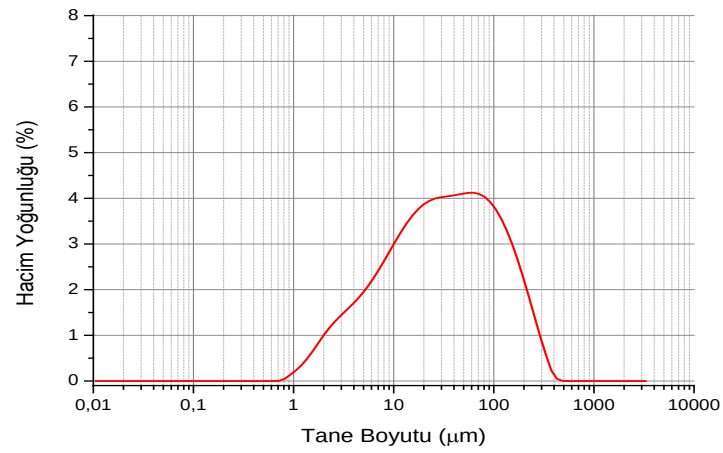
Karışımında kullanılan kolemanit konsantratör atığı Kütahya-Emet Eti Maden İşletme Ltd.Şti.'den temin edilmiştir. Tane yoğunluğu $2,49 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenen kolemanit konsantratör atığının kimyasal özellikleri Tablo 3.8'de belirtilmiş olup Şekil 3.8'de gösterilmiştir. Kolemanit konsantratör atığı iri boyutta taneler şeklinde temin edilmiş ve laboratuvarında bilyalı değirmen kullanılarak öğütülmüştür. Öğütülen malzemenin tane boyutu Şekil 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3. 8: Kolemanit konsantratör atığı kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşen	Miktar (%)
B ₂ O ₃	14,15
MgO	2,69
Al ₂ O ₃	4,80
SiO ₂	21,88
SO ₃	0,78
CaO	8,89
Fe ₂ O ₃	6,73
K ₂ O	4,23
SrO	2,41
Cl ⁻	0,04



Şekil 3. 8: Karışımında kullanılan kolemanit konsantratör atığı.



Şekil 3. 9: Kolemanit konsantratör atığının tane boyutu dağılımı.

3.2. Yöntem

Yapılan KYB çalışmaları üç aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşama, üretim, ikinci aşama taze beton özelliklerinin test edilmesi ve üçüncü aşama sertleşmiş beton özelliklerinin test edilmesidir.

Öncelikli olarak yapılan literatür araştırmaları ve ardından yapılan deneysel ve laboratuvar çalışmaları sonucu uygun referans KYB karışımı belirlenmiştir. Referans KYB karışımının elde edilmesinin ardından UK oranı sabit tutularak çimentonun ikamesi olarak %0,5-%1,0-%1,5 ve %2,0 oranında kolemanit kullanılarak KYB karışımları elde edilmiştir. Daha sonra, UK yine sabit kalacak şekilde %1,0-%1,5-%2,0 ve %2,5 oranında kolemanit konsantratör atığı çimentonun ikamesi olarak kullanılarak KYB karışımı elde edilmiştir. Daha sonra sırasıyla taze beton ve sertleşmiş beton deneyleri uygulanmıştır.

3.2.1. Agregada Tane Dağılımı

Kullanılan iri agregada sınıfı 4-11,2 mm ($D_{max}=11,2$ mm), dere kumu 0-4 mm ve kırma kum 0-4 mm olacak şekilde karışım oluşturulmuştur. KYB karışımında kullanılan agregada miktarı, yapılan denemeler sonucunda iri agregada oranı %40, dere kumu oranı %30 ve kırma kum oranı %30 olarak seçilmiştir.

3.2.2. Beton Karışımlarının Hazırlanması

Yapılan ön çalışmada kullanılan her bir malzemenin optimum derecede kullanılmasına dikkat edilir ve bu doğrultuda yapılan çalışma TS 802'ye uygun olarak yapılmıştır.

Yapılan karışım hesapları sonucu, karışımlarda kullanılan UK miktarları 120 kg/m^3 , su miktarı 156 kg/m^3 ve süperakışkanlaştırıcı miktarı $6,5 \text{ kg/m}^3$ sabit olup karışıma ait diğer bileşen ve miktarları Tablo 3.9'da verilmiştir.

Tablo 3. 9: KYB karışımında kullanılan malzeme miktarı.

Beton karışımı	Çimento (kg/m ³)	Kolemanit (kg/m ³)	KKA (kg/m ³)	Kırma kum (kg/m ³)	Dere kumu (kg/m ³)	İri agrega (kg/m ³)	S/Ç
R	400,00	-	-	503,90	521,34	669,28	0,39
C0,5	398,00	2,00	-	503,77	521,20	669,10	0,39
C1,0	396,00	4,00	-	503,64	521,07	668,95	0,39
C1,5	394,00	6,00	-	503,51	520,93	668,76	0,40
C2,0	392,00	8,00	-	503,39	520,81	668,59	0,40
CW1,0	396,00	-	4,00	503,65	521,08	668,95	0,39
CW1,5	394,00	-	6,00	503,52	520,95	668,76	0,40
CW2,0	392,00	-	8,00	503,39	520,81	668,60	0,40
CW2,5	390,00	-	10,00	503,27	520,69	668,44	0,40

Taze KYB karışımının üretimi için pan tipi beton mikseri kullanılarak homojen karışım elde edilmiştir. Kullanılan pan mikser 50 dm³ kapasiteye sahip ve toplamda 3 adet karıştırma paleti bulunmaktadır. Bunlardan bir tanesi kendi etrafında döner biçimde, bir tanesi haznenin kenarlarını sıyırmak ve sabit olan palet ise kenardan sıyrılan malzemeyi orta kısımda homojen karışımı elde edilmesi için karıştırma pozisyonundadır.

Her karışım öncesinde betonyerin temizliğinin yapılmasının ardından iri agrega ve ince agrega daha sonra UK ve çimento konularak kuru halde 1 dakika karıştırılmıştır. Kolemanit ve KKA olan karışımlarda ise çimentonun ikamesi olacak şekilde bulundukları oran kadar ilavesi olmuştur. Daha sonra ilave edilecek karışım suyunun üçte biri karıştırıcıya aktarılıp 1 dakika karıştırılarak malzemelerin nemli hale gelmesi sağlanmıştır. Son olarak karışım suyuna ilave etmiş olan süperakışkanlaştırıcının bulunduğu kalan miktar su, karışıma ilave edilmiş ve toplam karışım süresi 20 dakika sürmüştür. Aynı işlem bütün KYB karışımları için uygulanmıştır.

3.3. Taze Beton Deneyleri

Taze beton karışımlarına öncelikle birim ağırlık testleri uygulanmıştır. Aynı zamanda taze hamur örnekleri üzerinden Vicat aleti ile priz süresi tayini gerçekleştirilmiştir. KYB'nin

kıvamını inceleyecek taze beton deneyleri ise tek nokta deneyleri ve çift nokta deneyleri olarak iki aşamada incelenmiştir.

3.3.1. Taze Birim Ağırlık Deneyi

Taze betonun birim ağırlığı, hacmi belli olan ağırlık kabından yararlanılmıştır. Öncelikle kabın darası alınır daha sonra taze beton bu kabın içerisine konur ve tartılır. Tartıldıktan sonra darası düşürülerek betonun ağırlığı bulunmuş olur. Bulunan ağırlığı kabın hacmine bölünmesi ile birim ağırlık hesaplanmış olmaktadır.

Birim ağırlık deneyi, farklı malzemeler ile yapılmış beton için yaklaşık hava içeriğini vermektedir. Şekil 3.10'da yapılan birim ağırlık deneyi gösterilmiştir.



Şekil 3. 10: Taze birim ağırlık deneyi.

3.3.2. Vicat Deneyi

TS EN 196-3 kapsamında vicat aleti taşıyıcı bir çerçeve ve hareketli bir çubuktan oluşmakta olup kıvam tayininin yapıldığı uç 10 mm çapında bir sondadır. Sonda ucuna priz başlama süresi tayinleri için 1 mm çapında 50 mm uzunluğunda ince uç ve priz tayininin sonu için priz sonlama iğnesi olmak üzere iki adet iğne bulunmaktadır. Duruma göre bu iğneler sökülüp tekrar sonda ucuna takılabilmektedir.

Öncelikli olarak vicat aleti üzerindeki okuma aparatı çimento hamuru ile doldurulan halkanın altına konan cam levha kalınlığına göre ayarlanır. Kıvam tayini için sonda ucu takılır ve çimento hamuru üst seviyesine getirilir ve serbest düşüşe bırakılır. Normal kıvamlı hamurlarda sonda cam levhaya 5-7 mm kalıncaya kadar inmektedir. Doğru kıvam tayini belirlendikten sonra priz başlama ve priz sona erme tayini için sonda ucuna iğne ucu takılır. 10 dakika aralıklarla ölçüm yapılır ve iğne ucu cam levhaya 3-5 mm kaldığında priz başlamış olur. Bu okumadan sonra priz sonlama ucu takılır ve iğne çimento hamuruna 1 mm veya batma olmadığı takdir de priz sona ermiş olur. Priz başlama ve priz sonu görselleri Şekil 3.11 ve Şekil 3.12’de gösterilmektedir.



Şekil 3. 11: Vicat deneyi priz başlama süresi tayini.



Şekil 3. 12: Vicat deneyi priz sona erme süresi tayini.

3.3.3. Tek Nokta Deneyleri

Sadece tek bir reolojik parametrenin ölçümünü sağlayan bu test yöntemine “tek noktalı reoloji testi” denilmektedir. Tek nokta deneylerinde uygulanan testler tek bir koşul altında gerçekleştirilen testlerdir. Taze betonun v hunisinden yer çekimi etkisi ile akışı gibi tek koşul bulunmaktadır. Ancak tek nokta deneyleri ne kadar detaylandırılırsa detaylandırılсын bilinmeyen bir kayma hızı altında görünürler. Yani viskozite ve akma gerilmesi hakkında sadece genel bir bilgi verebilirler. Tek bir noktadan sayısız Bingham eğrisi çizilebileceği için en az iki parametrenin ölçümünün yapılması gerekmektedir. Yine de tek nokta deneyleri taze betonun reolojisini tam olarak açıklayamasa da kıvamı ve türü hakkında fikir verebilmektedir.

3.3.3.1. T₅₀₀ ve Çökme-Yayılma Deneyi

TS EN 12350-8 standartları çerçevesinde geleneksel betonda kullanılan çökme (slump) yöntemi şeklinde uygulanmaktadır. Geleneksel betondan farklı olarak terazisi alınmış 1000x1000 mm’lik düz tablanın üzerine Abraham’s hunisi sıkıştırma yapmadan taze beton ile doldurulur. Tabla üzerinde bulunan ilk çember üzerine oturtulan huni sarsmadan dik olarak yukarıya doğru kaldırılır. Bu esnada taze beton yerçekimi etkisi ve kendi ağırlığı ile yayılmaya başlar. Beton 500 mm boyutundaki ikinci çembere temas ettiği ana kadar geçen süre “T₅₀₀ süresi” olarak değerlendirilir. Yayılma işleminin sona ermesi ile yayılan betonun birbirine dik iki noktadan ölçümü yapılır ve bu iki ölçümün ortalaması alınarak “yayılma çapı” bulunur. EFNARC T₅₀₀ süresi ve çökme-yayılma KYB sınıflandırması Tablo 3.10’da verilmiştir. Kullanılan ve yapılan deney örnekleri Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15’de gösterilmiştir.

Tablo 3. 10: T₅₀₀ ve çökme-yayılma sınıflandırılması.

Deney adı	Sınıf	Değer Aralığı
Çökme-yayılma (mm)	SF1	550-650
	SF2	660-750
	SF3	760-850
T ₅₀₀ (s)	VS1	<2
	VS2	>2



Şekil 3. 13: Çökme-yayılma tablası ve Abraham hunisi.



Şekil 3. 14: Çökme-yayılma ve T_{500} süresi.



Şekil 3. 15: Çökme yayılma deneyi.

3.3.3.2. V-Hunisi Deneyi

Şekil 3.16’da gösterilen V şeklinde olan TS EN 12350-9 standartları çerçevesinde V-hunisi vasıtası ile bu deney yöntemi gerçekleştirilmektedir. Taze betonun V hunisine yerleştirilmesinde herhangi bir sıkıştırma söz konusu değildir. Doldurma işlemi bittikten sonra üst yüzey mala ile düzeltilir.

V hunisine taze betonun aktarılmasından sonra, huninin alt ucunda bulunan kapağın açılması ile beraber hazır konumda bulundurulmuş kronometre işletilmeye başlar. V hunisine üstten bakıldığında açılan alt uça ilk görülen ışık ile beraber kronometre durdurulur. Böylece alt kapağın açılması ve ilk ışığın görülmesi arasında geçen süre ölçülmüş olur. Tablo 3.11’de EFNARC tarafından V hunisi akış süresi sınıflandırması belirtilmiştir.

Tablo 3. 11: V hunisi sınıflandırması.

Deney	Sınıf	Değer aralığı
Vhunisi (s)	VF1	<8
	VF2	9-25



Şekil 3. 16: V-hunisi deneyi.

3.3.3.3. J-Ring Deneyi

J-ring deneyi ile KYB'nin taze beton özelliklerinden geçiş yeterliliği, T_{500j} ve yayılma değerlerini belirlemek için yapılan bir çökme deneyidir. Yani J-ring deneyi vasıtası ile KYB'nin donatı çubukları veya diğer engeller arasında ayrışma veya tıkanma olmaksızın akışının değerlendirilmesi için yapılmaktadır.

TS EN 12350-12 standartları kapsamında, 1000x1000 mm boyutlarında düz tabla üzerine yerleştirilen Abrahams konisi etrafına 16 adet 16 mm çapına ($\varnothing 16$) ve 120 mm yüksekliğe sahip çelik çubuklu aparat yerleştirilir. Abrahams hunisi dikey şekilde sarsılmadan kaldırılır ve tabla üzerinde bulunan 500 mm çapındaki ikinci çembere taze betonun dokunma süresi kronometre ile okunur (T_{500j}) ve daha sonra taze betonun yayılmasını tamamlaması beklenir. Yayılmanın bitmesinin ardından çökme-yayılma deneyinde olduğu gibi birbirine dik iki uzunluktan ölçüm yapılır ve ortalaması alınır. Ayrıca J-ring halkası üzerinden dört iç ve dört dışarıdan olmak üzere yükseklik ve en son olarak orta kısımdan (Δh_0) yükseklik ölçümü yapılır ve Eşitlik 3.1'de yerine yazılır. J-ring sınıflandırması Tablo 3.12'de belirtilmiş olup Şekil 3.17'de J-ring deneyi gösterilmiştir.

$$P_j = \frac{\Delta h_{x1} + \Delta h_{x2} + \Delta h_{y1} + \Delta h_{y2}}{4} - \Delta h_0 \quad (3.1)$$

Tablo 3. 12: J-ring sınıflandırması.

Deney	Sınıf	J-halkası
J-ring	PJ1	<10 ve 12 çubuklu donatı
	PJ2	<10 ve 16 çubuklu donatı



Şekil 3. 17: J-ring deneyi.

3.3.3.4. Elek Segregasyon Deneyi

Taze kendiliğinden yerleşen betonun ayrışma direnci hakkında değerlendirme yapabilmek amacıyla uygulanan bir deney yöntemidir. TS EN 12350-11 standart kapsamında darası alınmış bir boş kap üzerine 5 mm göz açıklıklı elek konur. 15 dakika bekletilmiş olan taze beton 5 mm'lik elek üzerine 500 mm yükseklikten yaklaşık 5 kg gelecek şekilde aktarılır. Kaba ve eleğe herhangi bir titreşim vermeksizin 120 saniye bekletilir. Daha sonra elek ve üzerinde kalan beton kaldırılarak darası alınmış kabın değeri teraziden okunur. Elekten geçen yüzdenin değeri saptanır.

EFNARC elek segregasyon sınıfı Tablo 3.13'te belirtilmiş olup elek segregasyon deneyi Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

Tablo 3. 13: Elek segregasyon sınıfı.

Deney	Sınıf	Segregasyon (%)
Elek Segregasyon	SR1	<20
	SR2	<15



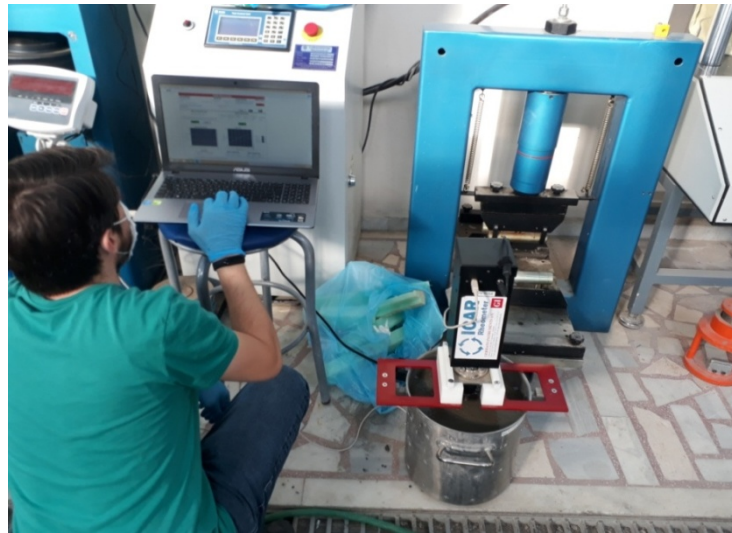
Şekil 3. 18: Elek segregasyon deneyi.

3.3.4. Çift Nokta Reometre Deneyleri

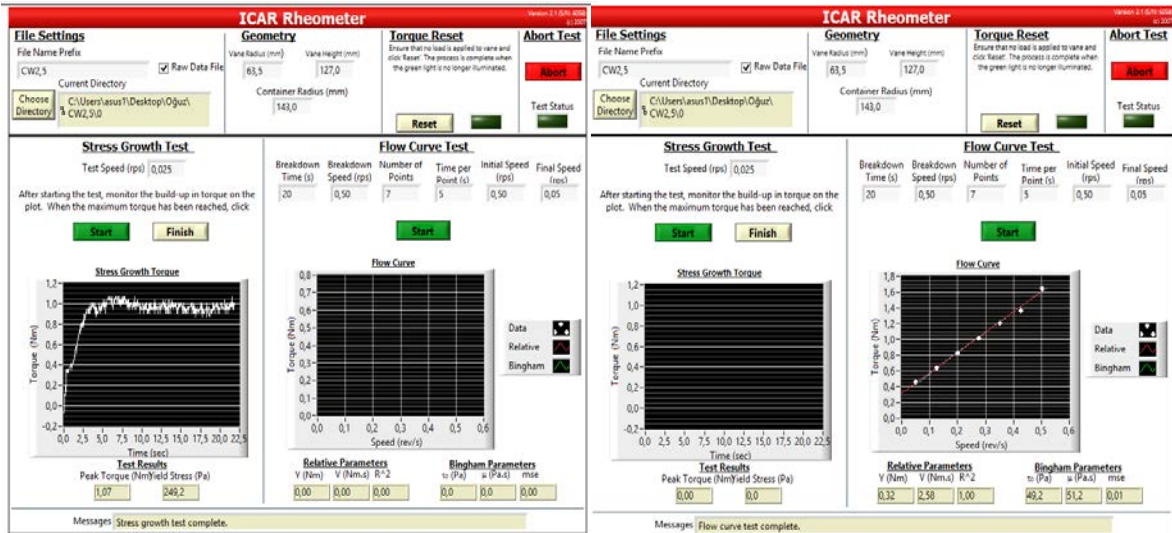
Taze betonun reolojik özelliklerini sayısal olarak ifade etmek için Bingham modeline uygun olarak iki parametre, eşik kayma gerilmesi ve plastik viskozite değerleri ile beraber ölçülmesi ve değerlendirilmesi gerekmektedir.

Reometre deney sisteminde taze beton için ölçekli bir konteyner, elektrikli motor ve tork sayacı, motoru takmak için çerçeve, test sırasında okunan tork değerleri, akış eğrisi parametrelerinin hesabı için bir adet bilgisayar. Taze beton konteynırı, test sıralarında betonun kapta iç yüzeyi boyunca kaymaması için kap ve iç yüzeyi boyunca dikey şekilde çıkıntılar bulunmaktadır.

Yapılan taze beton deneyinde kanatlı reometre olan RHM-300 ICAR Rheometer cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz vasıtası ile tork kaydedilir, test sonuçları hesaplanır ve veriler depolanır. Testin tamamı tek bir ekrandan kontrol edilebilmektedir. Cihaza ait görsel Şekil 3.19’da verilmiştir. Okunan ICAR Rheometer ekranı Şekil 3.20’de verilmiştir.

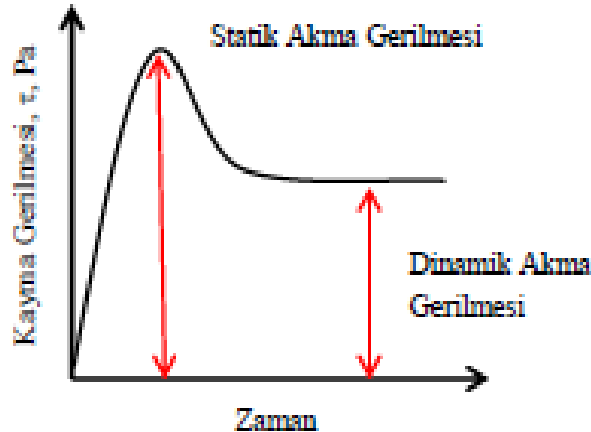


Şekil 3. 19: Reoloji deneyi.



Şekil 3. 20: ICAR Rheometer okuma ekranı.

ICAR Rheometer vasıtası ile iki tip test yapılabilmektedir. İlk tip test, 0,025 dev/s sabit bir hızla döndürüldüğü bir gerilme büyüklüğünü okumaktadır. İlk tork artışı zamanın fonksiyonu olarak ölçülür. Ölçülen maksimum tork değerini, statik akma gerilmesi değerine çevirmektedir. İkinci tip test ise, cihaz 20 saniye boyunca dönmekte ve bu esnada betonun dinlenmesi esnasında oluşan oluşumu bozmaktadır. Daha sonra cihaz 7 basamak halinde tork hızını düşürerek okumalar yaparak düşmektedir. Cihaz burada okuduğu değerleri dinamik akma gerilmesi ve plastik viskozite değeri olarak vermektedir. Yapılan reometre okumaları 0'-15'-30'-45'-60'-75' ve 90' da yapılmış ve başlangıç beton sıcaklığı ölçülerek kaydedilmiştir. Statik ve dinamik akma gerilmesi Şekil 3.21'de gösterilmiştir. Kanadın dönüş hızına göre tork grafiği Bingham parametresinin hesaplandığı akış eğrisini tanımlamaktadır.



Şekil 3. 21: Statik ve dinamik akma gerilmesi.

3.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Her karışım Ø10x20 cm silindir numune boyutlarında üretilmiş olup 7, 28 ve 90 gün kirece doymun kür havuzuna bırakıldıktan sonra setleşmiş beton deneylerine tabi tutulmuştur.

3.4.1. Sertleşmiş Birim Ağırlık Deneyi

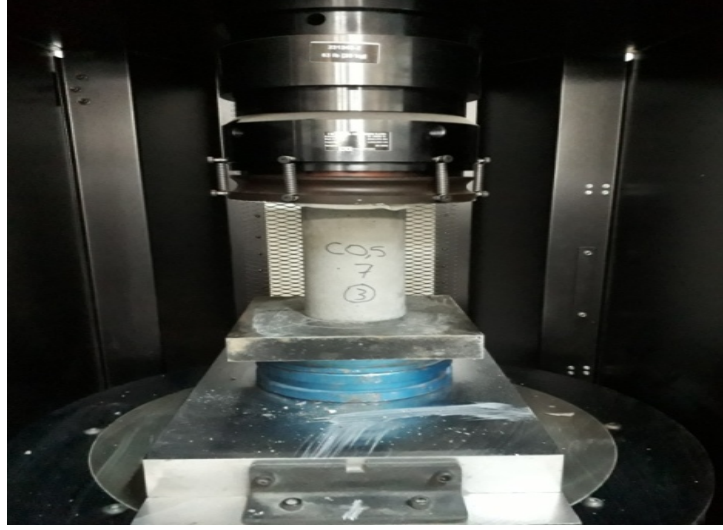
Sertleşmiş betonun, birim ağırlıklarının bulunması taze birim ağırlığı deneyi için kullanılan beton serilerinden yararlanılmıştır. Ağırlığın kabın hacmine bölünmesi ile sertleşmiş birim hacim ağırlığı değeri belirlenmiş olur. Şekil 3.22’de yapılan deneye ait görsel sunulmuştur.



Şekil 3. 22: Sertleşmiş birim ağırlık deneyi.

3.4.2. Basınç Dayanım Deneyi ve Elastisite Modülü Deneyi

Kür havuzundan günü gelen beton serileri çıkarılarak kırım öncesi başlıkları yapılmış ve daha sonra beton kırım işlemleri gerçekleştirilmiştir. Başlık yapımı için tüm örnekler hızlı sertleşen alçılı karışımlar kullanılmıştır. 90 günlük örnekler de ise basınç dayanımı testi esnasında ekstansometre kullanılarak elastisite modülü ölçümleri de gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanım tayinleri TS EN 12390-3 kapsamında yapılmış olup kırıma ait görsel Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



Şekil 3. 23: Basınç dayanım testi.

Başlıkları yapılan silindir numunelerine ekstansometre ile gerilme-deformasyon diyagramı ile elastisite modülleri (Sekant yöntemi) hesaplanmıştır.

Öncelikli olarak başlığı yapılan silindir numunesi basınç dayanımının yapıldığı kırım cihazının haznesine yerleştirilir. Silindir numunesine ekstansometre cihazı takılır. Daha sonra ekstansometre beton kırılması durumunda karşı zarar görmemesi için belirli bir yük altında eksenel basınç kuvveti durdurulur ve ekstansometre silindirden sökülür. Yüksek dayanımlı betona sahip olduğumuz için eksenel basınç kuvvetini 50 MPa'da durdurup ekstansometreyi silindirden çıkardık. Daha sonra kırım işlemine devam edildi. Ekstansometre ve kullanımı Şekil 3.24'de gösterilmiştir.



Şekil 3. 24: Ekstansometre ve kullanımı.

3.4.3. Kılcallık Deneyi

Yüzeyi su ile temas halinde bulunan beton, suyun yüzey gerilimi sebebi ile betonda bulunan kılcal boşluklar ile yükselme gösterir. Betonda bulunan bu kılcal boşluklar 0,1µ-2,5 mm arasında olmaktadır. TS EN 12390-2 kapsamında hazırlanan 7, 28 ve 90 günlük beton serileri kür havuzundan çıkarılıp 110°C’de 24 saat etüve bırakılarak nem tamamen betondan uzaklaştırılmış oldu. Daha sonra deneyi yapılan beton serisinin dış yüzeyleri su tut veya parafin ile geçirimsiz hale getirilip bir kap içerisinde 5 mm suya batacak şekilde bırakılmıştır. Deney boyunca kaptaki su seviyesinin korunumuna dikkat edilmiştir. Yapılan kılcallık deney okuma süreleri; 0',5',10',20',30',60',180',360' ve 1440' olmak üzere 24 saat sürmüştür. Her okuma dakikasında deney numuneleri sudan çıkarılarak nemli yüzeyi bir bez ile hafifçe silinerek tartımları yapılmış ve tekrar su dolu kabın içerisine bırakılmıştır. Dakikası gelen okuma, ilk (etüv kurusu) okumadan çıkarılarak kılcal nem miktarı bulunur ve yüzdesi hesaplanır. Şekil 3.25’te yapılan deneye ait görsel sunulmuştur.



Şekil 3. 25: Kılcallık deneyi.

3.4.4. Ultrases Deneyi

Sertleşmiş betonun mikro yapısındaki yoğunluğunu incelemek için uygulanan bu test yöntemi, betonun bir yüzeyinden diğer yüzeyine gönderilen ultrases dalgalarının pot denilen başlıklar ile süresinin tespit edilerek betonun yoğunluğu hakkında fikir sahibi olunmasını sağlamaktadır.

Ultrases deneyi TS EN 12504-4'e uygun olarak yapılmış ve ölçümler mikro saniye cinsinden yapılmıştır. Silindir başlık yüzeylerine ultrason jeli sürüldükten sonra bir probdan çıkan ses dalgasını diğer prob ile yakalanıp cihazın göstergesinde okunmuştur. Bu okuma her deney serisi için üçer kere yapıp ortalamaları alınmak sureti ile kaydedilmiştir. Yapılan deneye ait cihaz ve okuma Şekil 3.26'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 26: Ultrases deneyi.

3.4.5. SEM Görüntüleme

Elektrooptik prensibi çerçevesinde tasarlanan ve elektron ışını katı cisme gönderip daha sonrasında katı cisimden yansıyan elektronlarla cismin içyapısını gösteren cihaza taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) denilmektedir. Elektronlar bu katı cisme çarptığında, elektronlar yansır veya yutulur. Yansıyan elektronlar çeşitli sinyaller üretmektedir. Bu tür bir analiz için numunelerin katı bir malzeme olması gerekmektedir. Sıvılar ve gazlar üzerinde SEM incelemesi yapılamamaktadır.

Temel olarak elektron tabancası, manyetik lensler ve detektörler olmak üzere üç bölümden oluşmaktadır. Elektron tabancasından çıkan hızlandırılmış elektronlar, manyetik lensler yardımı ile odaklanarak numune üzerine gönderilir elektron numune etkileşmesi sonucu saçılan elektronlar çeşitli detektörler vasıtasıyla malzeme içerisindeki mikro ve nano mertebesinde görüntülenerek analiz edilmektedir. Yansıyan elektron sinyalleri, ikincil (SE), geri yansıyan (BSE), Auger (AE) ve diğer yansıyan elektron sinyalleri olarak adlandırılmaktadırlar. Yansıyan elektronların şiddeti yapı malzemesinin özgül ağırlığı ve atom numarası ile orantılıdır. Atom numarası ne kadar yüksek ise malzeme o kadar parlak görüntü verecektir. SE görüntüleme de daha ayrıntılı yüzey bilgisi vermektedir.

Yapılan bu çalışma ile çimentonun, kolemanit ve KKA ile reaksiyonları sonucu hidratasyon ürünlerinin yapısı C-S-H jelleri, Ca(OH)_2 , etrenjit gibi ürünler ve betonun önemli fazlarından biri olan agrega-hamur yüzeyinin incelenmesi baz alınmıştır. Şekil 3.27’de yapılan çalışma cihazı sunulmuştur.



Şekil 3. 27: SEM cihazı.

SEM’in kullanım avantaj ve dezavantajları;

1. İkincil elektronlar kullanıldığından üç boyutlu ve net görüntüler elde edilebilmektedir.
2. Gönderilen elektronların geri yansımaya dayalı bir kesit işleyiş mekanizmasına sahip olması incelenen kesitin kalınlığı sınırlayıcı bir değer konusu değildir. Düzgün olmayan yüzeyli numunelerde de kullanılabilir.
3. Optik mikroskoba oranla çok daha iyi odak derinliği geniş bir büyütme alanına sahiptir.
4. Hidrate olmuş çimento yapısını görsel olarak inceleme imkanı vermektedir. Bu sayede hidratasyon ve mikro yapı incelemelerinde sıklıkla görülür.
5. Pahalı bir tekniktir.
6. Malzemeler sabit olmalı ve optik çerçeveye sığmalıdır. Yatay uzunluk maksimum 10 cm olabilirken dikey uzunluk daha kısıtlı olmaktadır.
7. Numuneler vakumda sabit kalmalıdır. Sem içerisinde bulunan EDS sensörleri, aşırı hafif atomları (helyum, hidrojen gibi) tespit edemez.

3.4.6. XRD Analizleri

X-ışınları kırım yöntemi, kristal malzemelerin karakterizasyonunda kullanılan temel tekniklerden birisi X-ışını difraktometresi olmaktadır. X-ışını kırınım yöntemi (XRD), her kristal fazı için kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarının karakteristik bir düzen içerisinde kırılması esasına dayanmaktadır. Numune üzerine gönderilen X-ışınları farklı açılarda Bragg teorisine göre malzemedeki düzlemler tarafından kırınımına uğratılır. Bragg teorisine göre, gelen bir dalganın kristaldeki atomların oluşturduğu düzlem tabakalardan yansması esasına dayanır. Çünkü her tabaka gelen ışının bir kısmını yansıtır ve böylece farklı tabakalardan yansıyan dalgaların kırınımı olayı oluşmaktadır. Bu yöntem sonucu elde edilen veriler, her faz için parmak izi niteliği taşımakta ve malzeme içerisinde bulunan fazların tanımlanmasında kullanılmaktadır (Cullity, 1956; Jenkins vd., 1996).

XRD, Portland çimentosunun hidrate olmuş ve olmamış fazlarının tanımlanması ve saptanmasını sağlamaktadır. Katkı varlığında veya yokluğunda hidrasyon kinetiklerinin incelenmesinde yer alan başlıca tekniklerdendir. Yüksek sıcaklıklarda oluşan birçok hidrasyon ürününün X ışınları ile tanınmasına yardımcı olmaktadır (Durgun, 2017).

XRD analizleri sayesinde, çimento ile suyun reaksiyonu sonucu oluşan fazların varlığı doğru bir biçimde ölçülebilmektedir. Çimento ile suyun tepkimesi sonucu bağlayıcı özellikteki C-S-H jelleri ve dayanıma herhangi bir katkısı olmayan Ca(OH)_2 kristalleri meydana gelmektedir. Ca(OH)_2 kristalleri betonun kalıcılığı bakımından ileriki yaşlarda probleme neden olabilmektedir. Şekil 3.28’de yapılan çalışma cihazı sunulmuştur.



Şekil 3. 28: XRD cihazı.

3.4.7. TGA Analizi

Çimento numunelerinde sıcaklıktan kaynaklanan kütle kayıplarının belirlenmesi ve oluşan hidrasyon ürünlerinin ileri analizler ile tanımlanabilmesi için termogravimetrik analizinden (TGA) faydalanılır. Termogravimetri, genel anlamda malzemelerde sıcaklığın veya zamanın bir fonksiyonu olarak meydana gelen kütle kaybı veya kazanımları olarak belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Deney numunesi, sabit ısıtma hızında ısıtılır ve kütle değişimi sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülerek kaydedilir. Kütlenin zamana veya sıcaklığa karşı çizilen grafiği TG eğrisi olarak adlandırılır ve sıcaklığın fonksiyonu olarak malzemenin kütlesindeki değişim ve bu değişimin yayıldığı aralık malzemenin termal kararlılığının göstergesidir. TG verileri, elde edilen ölçümler ışığında, aynı monomerden elde edilmiş polimer ailesinin bağlı termal kararlılıklarının değerlendirilmesinde ve polimer-polimer veya polimer-katki maddesi etkileşimlerinin irdelenmesinde kullanılmaktadır. Ruiz vd. (2005) tarafından yapılan termogravimetrik analizde (TGA), üç önemli ağırlık kaybı görülmektedir. Malzemede ki ilk ağırlık kaybı, 100-200°C aralığında C-S-H, karboalüminatlar ve etrenjit gibi birçok hidratin dehidratasyonu, ikinci ağırlık kaybı 450-550°C aralığında portlanditin dehidroksilasyonu ve son olarak üçüncü ağırlık kaybı, 750-800°C aralığında klinker ve filler malzemelerden gelen karbonatın dekarbonasyonu ile oluşmaktadır. Dehidroksilasyon ve dekarbonasyon reaksiyonları birbirleri ile ilişkilidir. 700-800°C üzerinde portlandit artarken dekarbonasyon reaksiyonları azalır. Bunun ana sebebi, portlanditin fırın içinde soğurken yeniden kristalleşmesidir. TGA cihazı Şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3. 29: TGA cihazı.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Referans betonunun belirlenmesinden sonra %0,5-%1,0-%1,5 ve %2,0 oranlarında çimentonun ikamesi olarak kolemanitli KYB karışımı daha sonra ise %1,0-%1,5-%2,0 ve %2,5 oranlarında KKA ile KYB karışımları yapılmıştır. Taze beton deneylerinden sonra kirece doymun kür havuzunda 7, 28 ve 90 gün bekletilip daha sonra sertleşmiş beton deneyleri uygulanmıştır. Yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4. 1: Taze ve sertleşmiş beton deneyleri.

Taze beton deneyleri	Sertleşmiş beton deneyleri
Taze birim ağırlık deneyi	Sertleşmiş birim ağırlık deneyi
T ₅₀₀ süresi deneyi	Kılcallık deneyi
Çökme-yayılma deneyi	Basınç dayanım deneyi
V-hunisi deneyi	Elastisite modülü deneyi
J-ring deneyi	Ultrases deneyi
Elek segregasyon deneyi	SEM görüntüleme
Vicat deneyi	XRD analizi
Reoloji deneyi	TGA analizi

4. Bulgular

4.1. Taze Beton Deney Sonuçları

Referans betonu, kolemanitli ve KKA’lı her bir KYB serisi bütün taze beton deneylerine tabi tutulmuştur ve elde edilen veriler karşılaştırmalı olarak bu bölümde verilmiştir.

4.1.1. Priz Süresi Tayini

Öncelikli olarak referans örneği ve daha sonrasında kolemanit ve KKA ile üretilmiş taze beton örneklerinin vicat deneyi sonucu bulunan başlangıç ve bitiş süreleri Tablo 4.2’de gösterilmiştir.

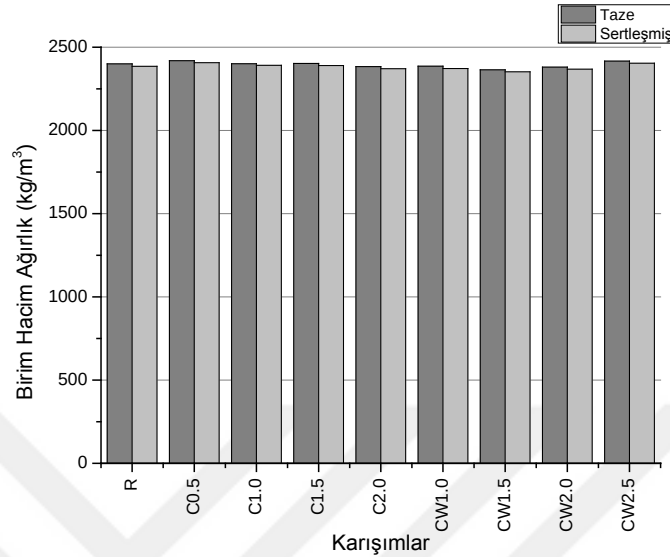
Tablo 4. 2: R, kolemanit ve KKA ile üretilmiş hamurların priz süreleri.

Karışım	Çimento (g)	UK (g)	Kolemanit (g)	KKA (g)	Su (g)	Priz süresi (dk)	
						Başlangıç	Bitiş
R	384,62	115,39	0	0	155	265	345
C0,5	382,69	115,39	1,92	0	150	285	365
C1,0	380,77	115,39	3,85	0	150	305	385
C1,5	378,85	115,39	5,77	0	148	325	405
C2,0	376,92	115,39	7,69	0	146	345	425
CW1,0	380,77	115,39	0	3,85	150	260	330
CW1,5	378,85	115,39	0	5,77	148	265	335
CW2,0	376,92	115,39	0	7,69	148	285	355
CW2,5	375,00	115,39	0	9,62	146	305	375

Sonuçlar kolemanit ve KKA kullanımı ile priz başlangıç ve bitiş sürelerinin referans örneğine kıyasla genel bir artış olduğunu göstermektedir. Tek başına kolemanit kullanılması durumunda, bor minerallerinin priz geciktirici özelliği çok daha belirgin bir şekilde görülmektedir. Bunun sebebi kolemanitin B_2O_3 konsantrasyonunun daha yüksek olmasıdır. KKA’da ise B_2O_3 konsantrasyonu daha düşük olduğundan bu geciktirici etki ancak yüksek oranlarda kullanıldığında belirginleşmektedir. Literatürde daha önce yapılan farklı çalışmalarda bor elementinin bu özelliği rapor edilmiştir (Targan vd., 2003; Topçu ve Boğa, 2010). Bu konu her ne kadar bilinse de bu çalışma da ele alınan reolojik özellikler üzerindeki etkin parametrelerden birisinin de priz süresi olması nedeniyle bu çalışma kapsamında da tekrar ele alınması ve kullanılan bor bileşenlerinin etkisini gözlemlenilmesinin yerinde olacağına karar verilmiştir.

4.1.2. Birim Ağırlık

Taze ve sertleşmiş birim ağırlık sonuçlarının değerleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4. 1: Taze ve sertleşmiş beton birim ağırlık sonuçları.

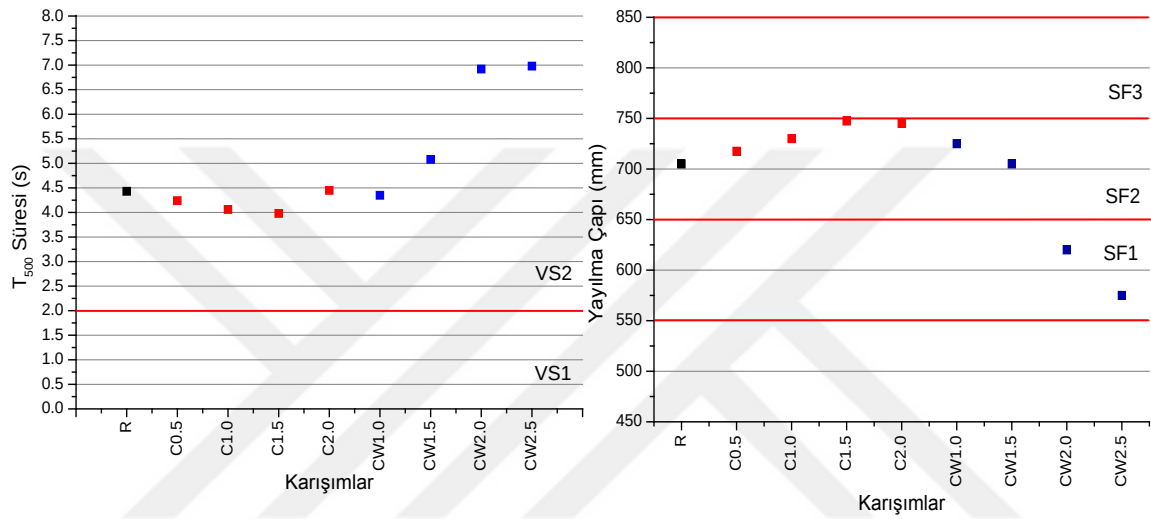
Taze birim ağırlık sonuçları $2400-2419 \text{ kg/m}^3$ arasında, sertleşmiş birim ağırlık sonuçları ise $2352-2407 \text{ kg/m}^3$ aralığında değişkenlik göstermektedir. Taze birim ağırlık değerleri arasında en düşük değer C2,0 örneğinden elde edilmiş olup en yüksek değer ise C0,5 örneğinden elde edilmiştir. Sertleşmiş birim ağırlık sonuçlarına baktığımızda ise en düşük değer C2,0 ve en yüksek değer yine C0,5 örneğinde elde edilmiştir. Ancak sütun grafiğinde görüleceği üzere, taze ve sertleşmiş birim hacim ağırlığında R numunesinin, kolomanit ve KKA içeren örnekler arasında en fazla %1 değer farkı bulunmaktadır. Genel olarak hem taze hem de sertleşmiş birim ağırlık değerleri birbirlerine yakın değerler olduğu saptanmıştır.

Veriler ışığında çimento oranı düştükçe karışımın taze birim ağırlık oranlarının değişmediği veya az miktarda düştüğü gözlenmektedir. Bunun sebebi ise kolemanit ve KKA ait yoğunlukların çimento yoğunluğuna çok yakın azlıkta olmasından kaynaklanmaktadır. Maksimum kolemanit %2 oranında kullanılırken KKA oranı maksimum %2,5 olarak kullanılmıştır.

4.2. Tek Nokta Reoloji Testleri

4.2.1. T_{500} Süresi ve Çökme-Yayılma Testi

Referans betonu, kolemanit ve KKA ait KYB karışımlarının T_{500} süreleri ve çökme yayılma çap değerleri Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4. 2: T_{500} süreleri ve çökme-yayılma çapı değerleri.

EN 12350-8’e göre çökme-yayılma çapı KYB’nin akışkanlığının bir göstergesidir. Çökme-yayılma çapları 575-747,5 mm arasında değişmektedir. Referans örneğin (R), 705mm’lik yayılma çapına sahip olup Şekil 4.3’te gösterilmiştir.

Şekiller üzerinde bulunan kırmızı çizgiler çökme-yayılma testi için EFNARC (2005) belirtilmiş sınırlamaları ve sınıflandırmaları göstermektedir. Buna göre, referans örneği SF2 sınıfı çökme-yayılma çapına sahiptir. R örneğine benzer şekilde kolemanit içeren bütün seriler SF2 sınıfı çökme-yayılma değerleri vermişlerdir.



Şekil 4. 3: Referans KYB serisine ait çökme-yayılma deney sonucu.

Kolemanit kullanılarak üretilen bütün karışımların çökme-yayılma değerleri R örneğinden daha yüksek bulunmuştur. Genel bir eğilim olarak yayılma çapındaki artışın kullanılan kolemanit oranı ile paralel olduğunu söylemek mümkündür. Sadece C2,0 örneği C1,5 örneğinden 2 cm daha az yayılma çapı vermiştir diğer taraftan KKA kullanımının yayılma çapını düşürücü bir etki yaptığı gözlenmiştir. %1,0 oranında KKA kullanıldığında yayılma çapında 20 cm'lik bir artış görülmesine rağmen bu oran %1,5'e çıktığında elde edilen yayılma çapı tekrar referans karışımı ile eşit hale gelmektedir. Bu noktadan sonra daha yüksek oranda KKA kullanımı çökme-yayılma çapı sınıflarının SF2'den SF1'e düşürmektedir.

T_{500} süresi ise EFNARC (2005)'e göre viskoziteyi ifade eden bir büyüklüktür. Bu çalışmada T_{500} süreleri 3,98-6,98 s aralığında değişkenlik göstermektedir. Referans örneği 4,43 s'lik bir T_{500} süresi vermiştir. Kolemanit katkısının %1,5'e kadar kullanımı bu sürenin azalmasına neden olmuştur. %2,0 oranında kolemanit kullanımı bu süreyi tekrar referans karışımının yayılma süresinin seviyesine getirmiştir. Böylece en hızlı yayılma süresi C1,5 örneğinde elde edilmiştir. Diğer taraftan %1,0 KKA kullanımı yayılma süresini 4,43 s'den 4,35'ye düşürmüştür. Ancak daha yüksek oranlarda KKA kullanımı T_{500} süresini belirgin bir biçimde arttırmıştır.

Her iki test birlikte değerlendirildiğinde kolemanit kullanımının tüm örneklerde yayılma çapı ve yayılma süresi açısından olumlu bir etki yaptığı gözlenmiştir. Bu durumun kolemanit katkısının içerisinde bulunan B_2O_3 'ün çimento hidratasyonunda meydana getirdiği geciktirici etkiden kaynaklandığı düşünülmektedir (Csetenyi vd., 1993; Davraz, 2010).

Bor minerallerinin çimento hidratasyon ürünlerinin birbiri ile bağ yapma özelliğini engellediği düşünülmektedir (Varshney vd., 2017). Bu durum yapının akışkanlığını sürdürülebilmesini sağlamaktadır. Diğer yandan KKA kullanımı her iki özellik üzerinde de olumsuz bir etkiye sahip olmuştur. Bir yandan yayılma süresini uzatmış, aynı zamanda da yayılma çapında azalmalara neden olmuştur. KKA'nın yapısındaki B_2O_3 miktarı kolemanit ile karşılaştırıldığında çok azdır. Aynı zamanda literatürde, bor minerallerinden doğan atıkların önemli bir kısmının çıkarılma ve işlenme süreçlerinde birbirlerinden ayrılmayan bor ve kil minerallerinden oluştuğu bilinmektedir. Bu nedenle bor atıkları önemli miktarda kil bileşenleri (kaolinit, illit, montmorillonit vb.) içermektedir. Bu durum KKA'nın bor mineralleri içermesine rağmen, yapısında barındırdığı kil minerallerinin su tutma ve iyon değiştirme etkisi nedeniyle karışımın akışkanlığını olumsuz etkilediğini düşündürmektedir.

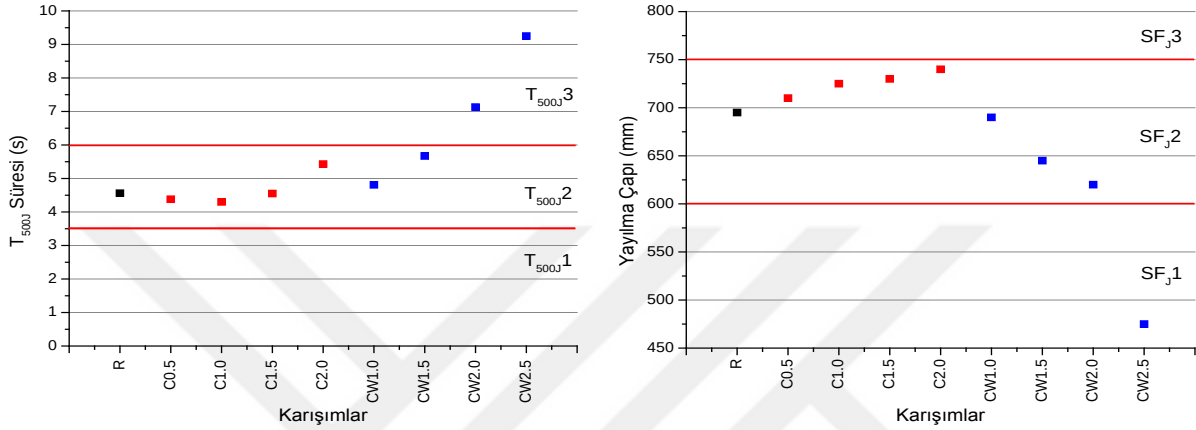
KKA beton serilerinde, içeriğindeki kil miktarının artmış olması sebebi ile yayılımın KKA oranının artması ile düştüğü gözlemlenmiştir. CW2,5'e ait KYB serisinin 500 mm çember mesafesine ve SF1 sınıf aralığı olan 550-650 mm sınırları aralığına zor ulaştığı görülmüş ve Şekil 4.4'te gösterilmiştir. Bundan sonra üretilebilecek KKA içeren KYB serilerinin KYB'lik özelliğini kaybedebileceklerini söylemek mümkün olmaktadır.



Şekil 4. 4: CW2,5 KYB serisine ait çökme-yayılma deney sonucu.

4.2.2. J-Halkası Testi

Şekil 4.5, J-halkası akış süreleri (T_{500j}) ve J-halkası yayılma çapı (SF_j) değerleri gösterilmektedir. Buna ek olarak Tablo 4.3’de J-halkası bloklanma adımına göre hesaplanan geçme yeteneği değeri (PJ) görülmektedir.



Şekil 4. 5: T_{500j} süreleri ve J-halkası yayılma çapları.

Tablo 4. 3: J-halkası geçiş yeteneği (PJ-J-halkası bloklanma adımı).

Karışım	PJ (mm)	EFNARC 2002’ye göre kabul kriteri (0-10 mm)
R	3,5	✓
C0,5	3,8	✓
C1,0	2,3	✓
C1,5	1,0	✓
C2,0	5,3	✓
CW1,0	6,3	✓
CW1,5	8,5	✓
CW2,0	8,8	✓
CW2,5	22,3	✗

Şekil üzerinde yer alan kırmızı çizgiler EN 12350-12’ye göre belirlenmiş olan sınır değerlerini ifade etmektedir. Test sonuçlarına göre J-halkası yayılma çapı değerleri 475-740 mm arasında değişkenlik göstermektedir. R karışım örneği 695 mm yayılma çapına ulaşmıştır. Yayılma çapları kolemanit katkısı kullanımı ile artmıştır. %2,0 kolemanit içeren karışım en yüksek yayılma çapını vererek 740 mm değerine ulaşmıştır. KKA kullanımı

karışımlarda ise tam tersi etki göstermiştir. KKA kullanım oranının artmasıyla yayılma çapı değerleri belirgin biçimde azalmıştır. R karışımı ve kolemanit içeren bütün karışımlar SF_J2 sınıfına uygun yayılma değeri vermiştir. KKA içeren karışımlar da ise CW2,0 örneği hariç diğer örnekler aynı sınıfa uygun değerler göstermiştir. CW2,0 karışımı ise 475 mm yayılma çapı ile SF_J1 sınıfına uygun değer göstermiştir.

T_{500j} süreleri 4.30-9.25 s aralığında değişkenlik göstermektedir. R karışımı 4,56 s'lik T_{500j} yayılma süresi vermiştir. %0,5, %1,0, %1,5 oranlarında kolemanit katkısı kullanıldığında referans karışımından daha düşük veya benzer süreler elde edilmiştir. Ancak %2,0 oranında kolemanit kullanıldığında yayılma süresi hafifçe artmıştır. Diğer taraftan, KKA içeren örnekler referans karışımına göre daha yüksek yayılma süreleri vermiştir. KKA kullanımı yayılma sürelerini belirgin biçimde arttırmıştır. Referans karışımı ve kolemanit içeren bütün karışımlar T_{500j}2 sınıfına uygun yayılma değeri vermiştir. CW1,0 ve CW1,5 örnekleri de bu sınıfa uygun sürelerle sahiptir. Ancak CW2,0 ve CW2,5 örnekleri sırasıyla 7,13 s ve 9,25 s yayılma süresi ile T_{500j}3 sınıfına girmektedir. Burada CW2,5 örneği Şekil 4.6'de görüldüğü üzere 500 mm'lik yayılma çapına ulaşamadığına dikkat edilmektedir. Fakat bu bölümde CW2,5 örneği için verilmiş olan süre değeri yayılmasının tamamıyla durduğu ana kadar geçen süre olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 4. 6: CW2,5 KYB serisine ait J-ring deney sonucu.

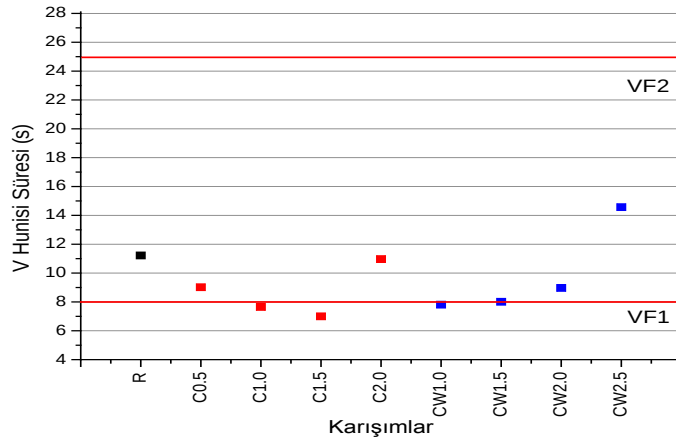
Diğer taraftan, J-halkası bloklanma adımları incelendiğinde CW2,5 örneği hariç bütün örneklerin EFNARC limitlerine uygun değerler gösterdiği görülmektedir. Bu değer 1 mm ile 22,3 mm aralığında değişmektedir. Referans karışımı 3,5 mm değerine sahiptir. En

düşük bloklanma değeri C1,0 örneğinden elde edilmiştir. C2,0 örneğinin bloklanma değeri ise bütün kolemanit içeren örnekler ve referans karışımından daha fazla bulunmuştur. C2,0 karışımı, diğerlerine nazaran içerdiği yüksek kolemanit miktarı nedeniyle kararlılığını bir miktar yitirmiştir. Kolemanit hidratasyon üzerindeki negatif etkisi nedeniyle bir miktar segregasyon olduğu gözlenmiş ve bu durum donatılar arasındaki agrega bloklanmasını arttırmıştır. Ancak T_{500j} süresi artmıştır. Bloklanma gerçekleşmesine rağmen T_{500j} süresinde artış meydana gelmesi ve aynı zamanda C2,0 örneğinin yayılma çapı değerleri arasında en yüksek değere sahip olması düşündürücüdür. Bu durum bloklanmanın bir sonucu olarak, bir kısım çimento hamurunun agregalardan ayrılarak donatılar arasında serbest bir biçimde akmasına neden olmuştur. Böylece, bu örnekte diğerlerinden daha yüksek bir yayılma çapı olduğu izlenimini meydana getirmiştir.

CW2,5 değeri, bütün örnekler arasında 22,3 mm değeri ile en yüksek değeri vermiştir. Bu durum T_{500j} ve yayılma çapı değerleri ile örtüşmektedir. Önceki bölümlerde verilen çökme-yayılma çapı değerleri ile de benzer eğilimler elde edilmiştir. Oluşan durumun daha önce bahsedildiği gibi KKA'nın yapısında bulunan kil minerallerinden ileri geldiği düşünülmektedir. Karışıma giren KKA miktarında meydana gelen artış, aynı zamanda karışıma giren B_2O_3 miktarını da arttırmış olmasına rağmen aynı zamanda diğer minerallerinde miktarının artmasına neden olmuş ve böylece baskın etkisi ortaya çıkmıştır.

4.2.3. V-Hunisi ve Elek Segregasyonu Testleri

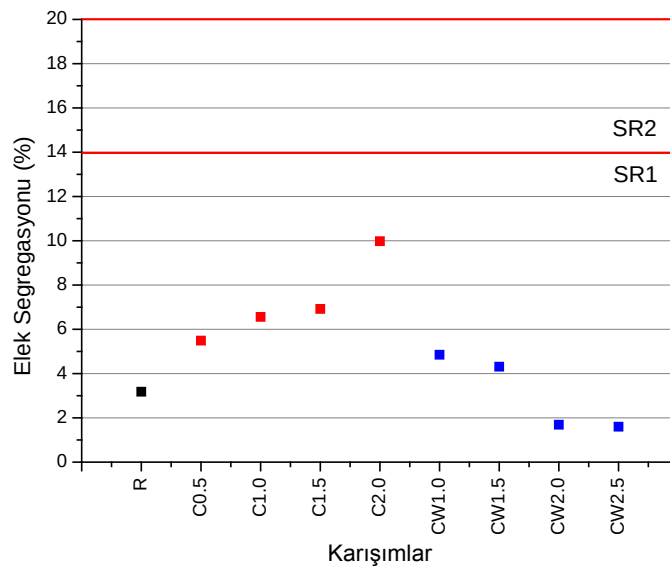
Şekil 4.7, karışımların V hunisi sürelerini ve Şekil 4.8, elek segregasyon değerlerini göstermektedir.



Şekil 4. 7: V-hunisi süreleri.

V-hunisi süresi viskozitenin bir ifadesi olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada V hunisi süreleri 7-15,57 s aralığında değişkenlik göstermektedir. Referans karışımı 11,22 s'lik V-hunisi süresine sahiptir. Kolemanit kullanımı bu süreyi düşürmüştür. %1,5 oranına kadar V-hunisi süresi sürekli düşmüştür. En düşük süre C1,5 örneğinden elde edilmiştir. Ancak %2,0 oranında kolemanit kullanıldığında sürede bir artış gözlenmiştir. Daha önce C2,0 örneğinde bir miktar segregasyon meydana geldiği belirtilmiştir. C2,0 karışımının, kolemanit kullanımı ile meydana gelen V-hunisi sürelerindeki düşüş eğilimine uymamasının arkasında bu segregasyonun olduğu düşünülmektedir. V-hunisinin daralan bölümünde bazı agregaların bloklandığı, böylece harekete ve akışa engel oldukları, bu nedenle V-hunisi akış süresinin umulandan daha uzun olduğu ve olması gereken süreye ulaşamadığı gözlenmiştir. Bunu dışında %1,5 oranına kadar kolemanit kullanımının V-hunisinden akışı kolaylaştırdığı gözlenmiştir.

KKA kullanımı ise genel olarak V-hunisi süresini arttırmıştır. %1,0 oranında KKA kullanımı R karışımına göre V-hunisi süresini hafif bir şekilde düşürse de KKA oranının artması akış süresini uzattığı gözlenmiştir. Bu durum diğer taze hal testleri ile örtüşmektedir. KKA'nın yapısındaki kil minerallerinin olumsuz etkisi burada da gözlemlenmiştir. C1,0 ve C1,5 örnekleri dışındaki bütün örnekler VF-2 sınıfına uygun değerler göstermiştir. CW2,5 KYB serisinin V-hunisi akış süresinin 25 saniyeye yakın olması bundan sonra üretilebilecek KKA içerikli KYB serilerinin bu süreyi aşabilecek olmasını söylemek mümkündür.



Şekil 4. 8: Elek segregasyon değerleri.

Elek segregasyonu testi taze KYB'nin segregasyona olan direncinin bir ifadesidir. Segregasyon değeri %1,6-9,98 aralığında değişkenlik göstermektedir. R karışımı %3,18'lik segregasyonu değerine sahiptir.

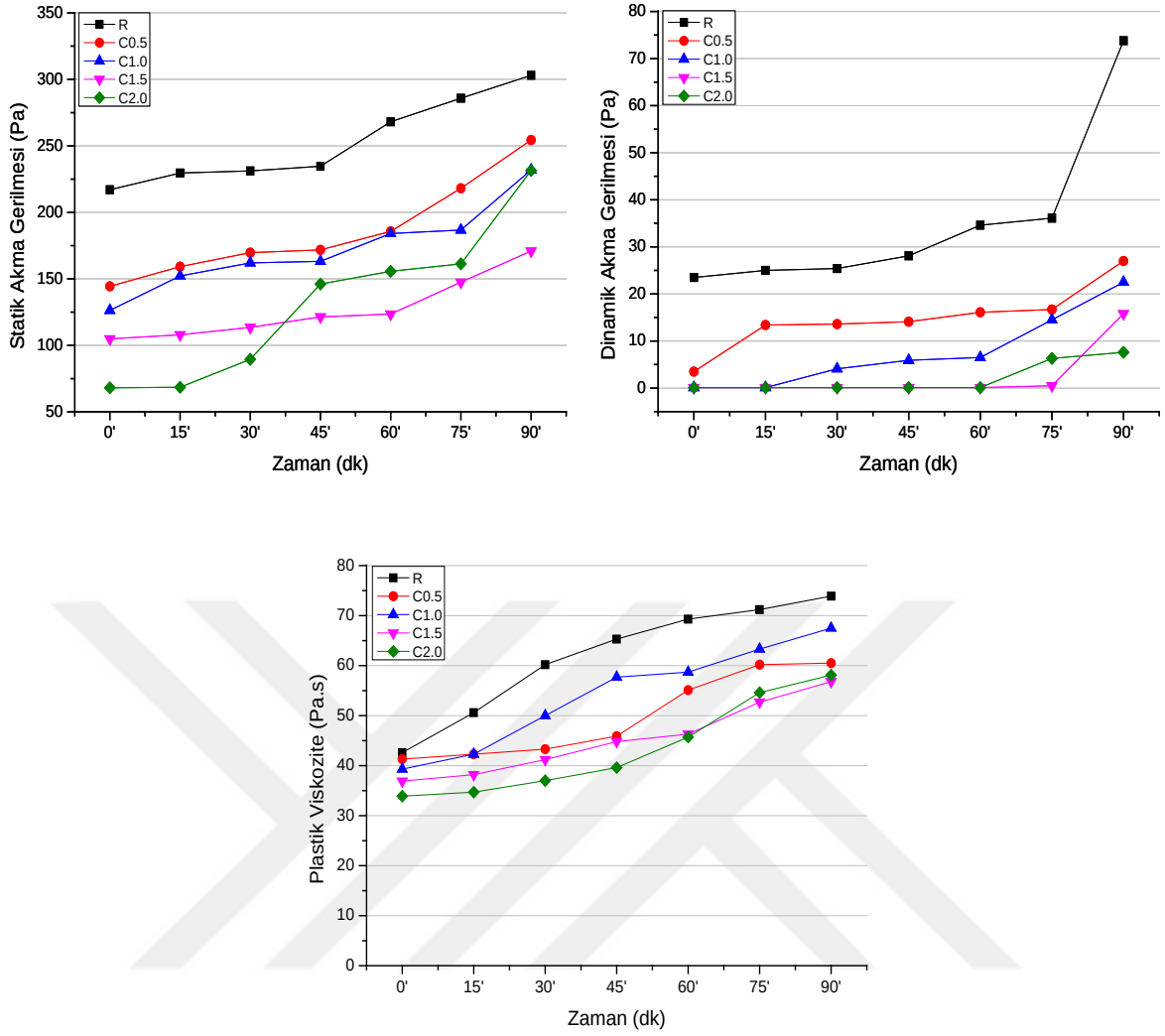
Kolemanit kullanımı ile elek segregasyon arasında pozitif bir korelasyon görülmektedir. %1,0 ve %1,5 oranında KKA kullanımı segregasyon değerini hafifçe yükseltirken daha yüksek oranlarda KKA kullanımı elek segregasyonunun yüzdesini belirgin bir şekilde düşürmüştür. Görece daha yüksek miktarda KKA içeren karışımların düşük B_2O_3 ve yüksek kil içermesi sebebi ile kohezyonu belirgin bir biçimde artmıştır. Bu nedenle elek boşluklarında kendi ağırlığı altında geçebilen malzeme miktarı oldukça azalmıştır. Bu durum önceki taze hal deneylerinde düşük yayılma çapları ve yüksek yayılma süreleri olarak karşımıza çıkmıştır.

Segregasyon değerleri tek başlarına değerlendirildiklerinde oldukça düşük ve istenilen değerlere sahipmiş gibi görünsede, diğer taze hal testleri ile birlikte değerlendirildiklerinde aslında karışımların istenilen performansı göstermedikleri anlaşılmaktadır. C2,0 örneği %9,98 ile en yüksek segregasyon değerini vermiştir. Bu karışımda, V-hunisi ve J-halkası testlerinde meydana gelen bloklanma etkisinin segregasyon sonucunda olduğu düşüncesi bu testin sonucu ile onaylanmıştır.

4.3. Reometre Testleri

Reometre testleri kapsamında “stress growth” ve “flow curve” testleri uygulanmıştır. Bu testlerin uygulanması için ICAR beton reometresi kullanılmıştır. Bu testler ile KYB’de kalıp basıncı ve kararlılık gibi özellikler üzerinde etkin olan “statik akma gerilmesi” ve geleneksel olarak taze betonun reolojisinin karakterize edilmesi ve başlayan akışın sürdürülebilmesi için kritik olan “dinamik akma gerilmesi” değerleri hesaplanmıştır. Ek olarak karışımın akmaya karşı direncini ifade eden “plastik viskozite” değeri ölçülmüştür.

Başlangıçtan (0. dk), 90.dakikaya kadar her 15 dakikada bir olmak üzere ölçümler yapılmıştır. Şekil 4.9 kolemanit içeren karışımların reolojik parametrelerini gösterirken Şekil 4.10, KKA içeren karışımların reolojik parametrelerini göstermektedir.



Şekil 4. 9: Kolemanit içeren beton karışımlarının reometre test sonuçları.

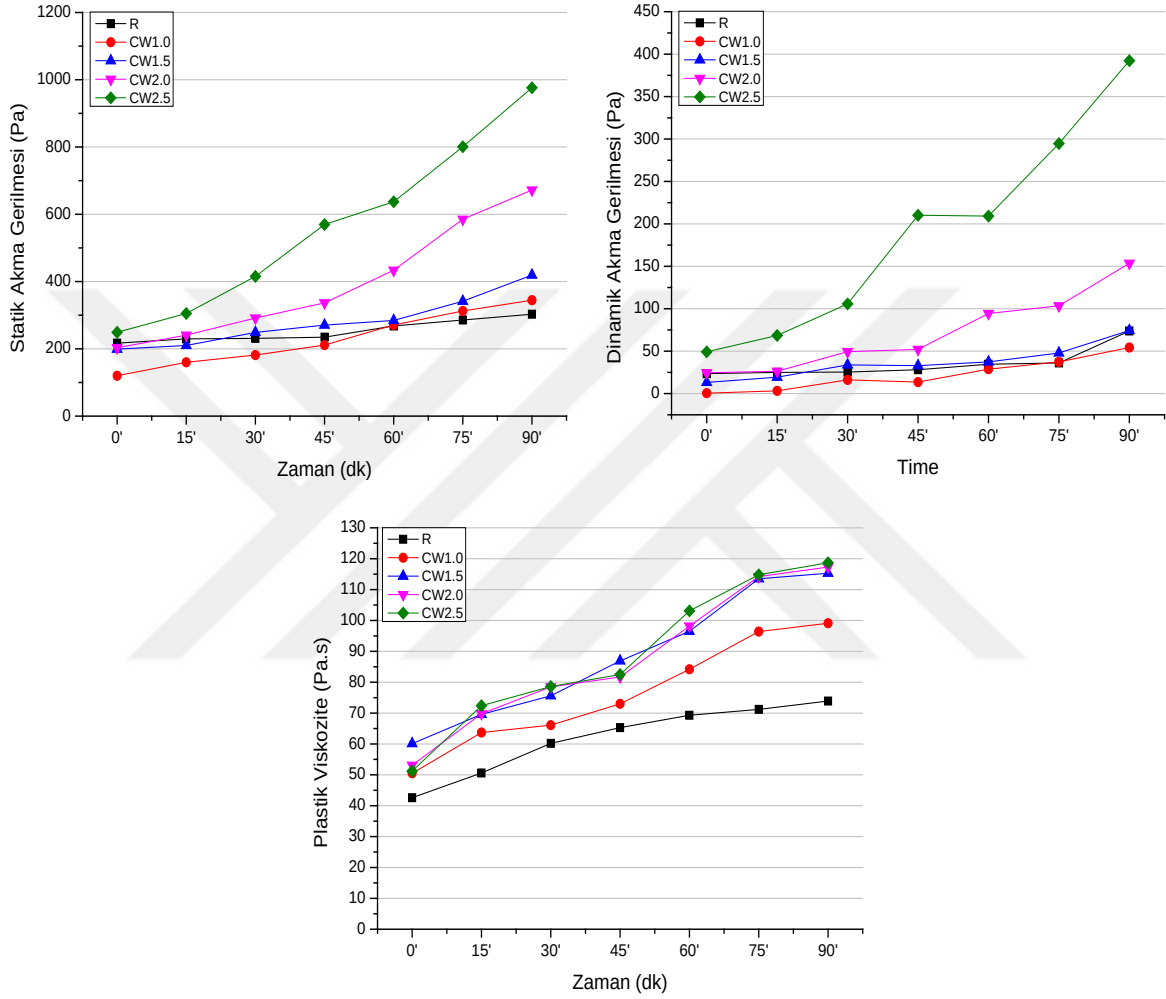
Görüldüğü üzere kolemanit katkısının statik ve dinamik akma gerilmesi üzerinde belirgin bir etkisi vardır. Bu noktada, C2,0 örneği hariç bütün örneklerin kendi içerisinde statik akma gerilmelerinde tutarlı bir artış eğilimi söz konusudur. Bu eğilim, C2,0 karışımında farklılık göstermiştir. Daha önce tek nokta testlerinde C2,0 karışımının bir miktar segregasyon eğiliminde olduğu belirtilmişti. Bu nedenle C2,0 karışımında meydana gelen bu segregasyon nedeniyle bir kısım agregalar konteynırın dibine doğru hareket etmiş ve hamur kısmı üst bölgelerde yer almıştır. Dolayısıyla C2,0 örneğinde ölçülen değerler tam olarak beton karışımından değil de daha çok hamur karışımından ölçülmüştür denilebilir. Bu nedenle diğer örneklerle göre içerisinde daha az agregaya barındıran bir karışımdan ölçüm alınmış olduğundan bu karışımdan elde edilen değerler olması gerekenden daha düşükmüş gibi görünmektedir.

R karışımı başlangıç 217 Pa statik akma gerilmesine sahiptir. %0,5 oranında kolemanit kullanımında bu değer 144,4 Pa'ya düşmektedir. Bu değer %1,5 kolemanit kullanımı ile 104,9 Pa'ya kadar düşme göstermiştir. Statik akma gerilmesinin zamana göre değişimi incelendiğinde, 90 dakikalık ölçüm süresi boyunca R karışımına göre görece daha düşük değerler elde edilmiştir. 90 dakikalık sürenin sonunda (son ölçümde) R karışımının statik akma gerilmesinin 303 Pa'ya yükseldiği görülmüştür. Bu değer C1,5 örneğinde 170,9 Pa olarak ölçülmüştür. Bu sürenin sonunda R karışımının %56,4'ü kadar bir statik akma gerilmesi değeri elde edilmiştir. Neredeyse yarı yarıya bir azalma söz konusu olmuştur. Bu durum karışımın dinlenme halinden akış haline geçişinde bağların kırılmasının ve akışın başlatılmasının daha kolay olacağına işaret etmektedir (Nguyen ve Boger, 1992).

Başlangıç değerlerine bakıldığında R karışımının dinamik akma gerilmesi 23,5 Pa'dır. Sadece %0,5 oranında kolemanit kullanımı bu değeri 3,5 Pa'ya düşürmüştür. Daha yüksek oranda kolemanit kullanımı ise bu değerleri minimum seviyeye (neredeyse sıfıra) düşürmüştür. Bu durum betonun akmaya başlaması için minimum derecede gerilme ihtiyacı olduğunu ifade etmektedir. (Nguyen ve Boger, 1992). Bir başka ifade ile beton kendi ağırlığı altında rahatça akabilecektir. R karışımının dinamik akma gerilmesi 90. dakikanın sonunda 73,8 Pa olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan %0,5 kolemanit içeren karışım 90. dakika sonunda 27 Pa ve %1,5 kolemanit içeren karışım ise 15,8 Pa değerlerini vermiştir. %1,5 oranında kolemanit kullanımı dinamik akma gerilmesinde 90 dakikanın sonunda neredeyse %80'lik bir azalma sağlamıştır.

Plastik viskozite değerleri incelendiğinde kolemanit içeren örneklerin 90 dakikalık ölçüm süresi boyunca R karışımından daha düşük değerler verdiği görülmüştür. Başlangıçta karışımlar arası plastik viskozite farklılıkları düşükken 90.dakikanın sonuna doğru bu farklar belirgin şekilde artmıştır. R karışımı başlangıç ölçümünde 42,6 Pa.s değeri vermiştir. %0,5 kolemanit kullanımı bu değeri 41,3 Pa.s'ye ve %1,5 kolemanit kullanımı 36,9 Pa.s'ye düşürmüştür. 90 dakikanın sonunda R karışımı 73,9 Pa.s plastik viskozite değeri vermiştir. Diğer taraftan %0,5 kolemanit içeren karışım başlangıçta R karışımı ile %3'lük bir farka sahipken, 90 dakikanın sonunda 60,5 Pa.s değeri ile yaklaşık %18'lik bir farka sahip olmuştur. C1,5 örneği ise 56,8 Pa.s değeri ile referans örneği ile yaklaşık %23'lük bir farka sahiptir. Kolemanit katkısı kullanımı ile plastik viskozite değerlerinde meydana gelen farklar, üretilen karışımların akmaya kadar daha az direnç

göstereceklerini ifade etmektedir. Bütün reolojik parametreler birlikte irdelendiklerinde kolemanit katkısının reolojik parametreleri üzerinde azaltıcı bir etki yaptığı açıkça söylenebilir. Kolemanit içeren karışımların akış özelliklerini daha uzun süre koruyabileceği ve akmanın sağlanması için daha az gerilmeye ihtiyaç duyacağı görülmektedir.



Şekil 4. 10: KKA içeren beton karışımlarının reometre test sonuçları.

KKA içeren örneklerin reolojik parametreleri incelendiğinde sonuçların büyük bir bölümünün referans karışımından daha yüksek değerler verdiği görülmüştür. KKA kullanımının artmasıyla sonuçların belirgin bir şekilde yükseldiği görülmüştür. Zamanında ilerlemesiyle sonuçlar arasındaki farklılıklar çok daha belirgin hale gelmiştir. Başlangıçtaki statik akma gerilmesi değerleri incelendiğinde CW2,5 karışımı hariç bütün karışımlarda referans karışımına çok yakın veya daha düşük değerler elde edilmiştir. Ancak 30 dakika sonrasında CW1,0 karışımı hariç diğer karışımları statik akma gerilmesi değerleri referans

karışımına yakınlaşmış veya geçmiştir. Diğer taraftan CW1,0 karışımı ilk 60 dakikalık ölçümlerde referans karışımından daha düşük değerler vermiş daha sonrasında ise referans karışımından hafifçe daha yüksek değerler vermiştir. Başlangıçta R karışımı 217 Pa statik akma gerilmesine sahipken, CW1,0 karışımı 120 Pa ve CW2,5 karışımı 249,2 Pa değeri vermiştir. 90 dakikalık sürenin sonunda R karışımının statik akma gerilimi 303 Pa'ya yükselirken, CW1,0 karışımı 344,5 Pa'ya ve CW2,5 karışımı ise 976,2 Pa değerlerine yükselmiştir. Düşük oranlarda KKA kullanımı (%1,0) referans karışımına benzer sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Yüksek oranlarda (%2,5) KKA kullanımı ise referans karışımının verdiği 3 kat daha yüksek statik akma gerilmesi elde edilmesine neden olmuştur.

Dinamik akma gerilmesi değerleri incelendiğinde, sonuçların statik akma gerilmesi değerlerine benzer bir eğilim içerisinde olduğu görülmektedir. Test süresince %1,0 KKA içeren karışımın referans karışımına çok yakın veya biraz daha düşük değerler verdiği görülürken, %1,5 oranında KKA kullanıldığında karışımın zamana bağlı olarak referans örneğine paralel değerler verdiği görülmüştür. KKA oranının artmasıyla dinamik akma gerilmesi değerlerinde bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bu artış zamanında artmasıyla çok daha belirgin bir hale gelmiştir. Örneğin, R karışımı başlangıçta 23,5 Pa değeri verirken, CW1,0 karışımı 0 (sıfır) Pa civarında bir değer vermiştir. CW1,5 karışımı 13,2 Pa ve CW2,5 karışımı 49,2 Pa değeri vermiştir. Bu referans karışımına ait değer yaklaşık 2 katı kadardır. 90 dakika sonunda R karışımının dinamik akma gerilmesi değeri 73,8 Pa'ya yükselmiştir. CW1,5 örneği ise referansa çok yakın bir değer vermiştir (74,4 Pa). CW2,5 örneği ise 392,3 Pa değerini vermiştir ki bu değer referans karışımının 5 katından fazladır.

R karışımının plastik viskozite değeri her zaman diğer karışımlarından daha düşük bulunmuştur. Başlangıç testlerinde %1,0 oranında KKA kullanımının bu değeri yükselttiği ve referans karışımının biraz üzerine çıkarttığı görülmüştür. Testin sonuna doğru referans karışımı ile %1,0 KKA içeren karışımın arasında farkın yükseldiği görülmektedir. İkinci ölçümlerde (15.dk) diğer karışımlar CW1,0 karışımından daha yüksek ancak birbirlerine yakın değerler vermişlerdir. 90 dakikalık sürenin sonunda referans karışımı 73,9 Pa.s'lik değere sahipken, CW1,0 karışımı 99,1 Pa.s değerine sahiptir. Bu sürenin sonunda en yüksek plastik viskozite değerini veren karışım olan CW2,5 karışımı 118,7 Pa.s olmuştur.

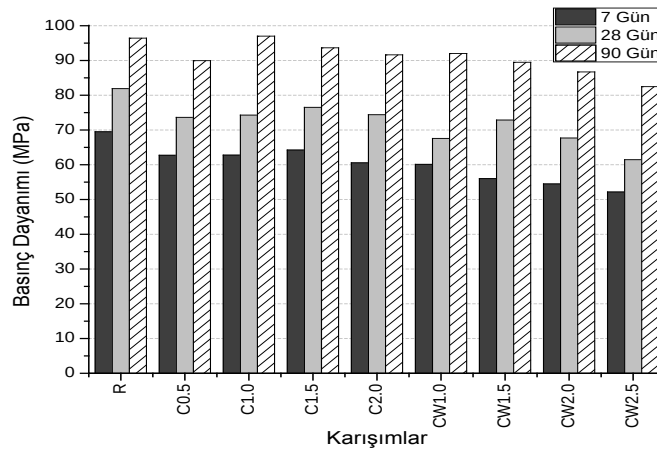
Bütün reolojik parametreler birlikte değerlendirildiğinde KKA kullanımının genel olarak KYB'nin taze özelliklerini olumsuz etkilediği söylenebilir. Küçük miktarda KKA kullanımının olumlu bir etki oluşturduğu görülebilmektedir. Ancak %1,0 oranından daha yüksek miktarda kullanıldığında özellikleri iyileştirmek yerine bütün reolojik parametreleri arttırmakta ve referans örneğinden büyük sapmalara neden olmaktadır. Bu durum daha önce bahsedilen, KKA'nın yapısında kil mineralleri barındırdığı gerçeği ile bağdaştırılmaktadır. KKA'nın yapısındaki bu yabancı maddeler KYB'nin taze özelliklerini ve reolojik parametrelerini olumsuz etkilemiştir.

4.4. Sertleşmiş Hal Testleri

Betonun taze ve performans değerleri ölçüldükten sonra 10x20 cm silindir beton numuneleri kalıplarından bir gün sonra çıkarılıp $23\pm2^{\circ}\text{C}$ 'lik kirece doymun olan su havuzuna 7, 28 ve 90 gün kürlendikten sonra öngörülmekte olan sertleşmiş beton deneylerine tabii tutulmuşlardır.

4.4.1. Basınç Dayanımı

Yapılan bütün testlerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım sonuç değerleri Şekil 4.11'de verilmiştir.



Şekil 4. 11: 7,28 ve 90 günlük basınç dayanımı sonuçları.

7 günlük basınç dayanımı sonuçları 52,2 MPa ve 69,5 MPa arasında değişmektedir. En yüksek değer R örneğinden elde edilmiştir. Kolemanit ve KKA kullanımının basınç dayanımı düşürdüğü gözlenmiştir. Bütün kolemanit içeren örnekler arasında en yüksek değer 64,2 MPa ile C1,5 örneğinde, en düşük değer ise 60,5 MPa ile C2,0 örneğinden elde edilmiştir. KKA içeren örnekler arasında ise en yüksek değer 60,1 MPa ile CW1,0 olurken, en düşük değer 52,2 MPa ile CW2,5 örneğinden elde edilmiştir.

28 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde yine en yüksek dayanımın R örneğinden elde edildiği görülmektedir. Değerler 61,5 MPa ile 81,9 MPa arasında değişmektedir. Referans örneğinden sonra en yüksek değer 76,5 MPa ile C1,5 örneğinden elde edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarında da KKA içeren örnekler kolemanit içeren örneklerden daha düşük dayanımlar vermiştir. KKA içeren örneklerden en yüksek değer 72,9 MPa ile CW1,5, en düşük dayanım değeri 61,5 MPa ile CW2,5 örneği olmuştur.

90 günlük dayanım değerleri 82,5 MPa ile 97,0 MPa arasında değişmektedir. R örneği 96,4 MPa değeri vermiştir. En yüksek dayanımı 97,0 MPa ile C1,0 örneğinden elde edilmiştir. Kolemanit içeren örneklerin hiçbiri 90 gün sonunda 90 MPa'nın altında basınç dayanımı değeri vermemiştir. KKA içeren örnekler arasında en yüksek değeri 92 MPa ile CW1,0 verirken, en düşük değeri 82,5 MPa ile CW2,5 örneği vermiştir.

Literatürde bor minerallerinin çimentolu sistemlerin basınç dayanımı üzerine etkilerini inceleyen bazı araştırmalar bulunmaktadır. Ancak bu çalışma, KYB'nin geleneksel betona göre çok daha farklı bir karışım dizaynına sahip olması ve yüksek oranda UK içermesi nedeniyle literatürde bulunan çalışmalardan belirgin bir şekilde ayrılmasına sebep olmaktadır. Gezmen ve Türkel (2017), UK içeren harç karışımlarında %10'a kadar kolemanit kullanmışlardır. UK içermeyen karışımlarda kolemanit kullanımının 7 ve 28 günlük dayanımları düşürdüğü görülmüştür. Diğer taraftan, %10 oranında UK içeren karışımlarda 7, 28, 56 ve 90 günlük dayanım sonuçları referans örneğinden daha iyi sonuçlar vermiştir. %20 oranında UK kullanıldığında da aynı durum söz konusu olmuştur. Ancak %30 oranında UK kullanılması durumunda hiçbir yaş grubunda referans karışımından daha yüksek değerler elde edilememiştir. Çalışmada %2 ve %4 oranında kolemanit kullanımı öne çıkmıştır. Durgun ve Sevinç (2019), %1, 3 ve 5 oranlarında kolemanit kullanarak betonlar üretmişlerdir. 28 ve 90 günlük dayanımlarda %1 ve %3

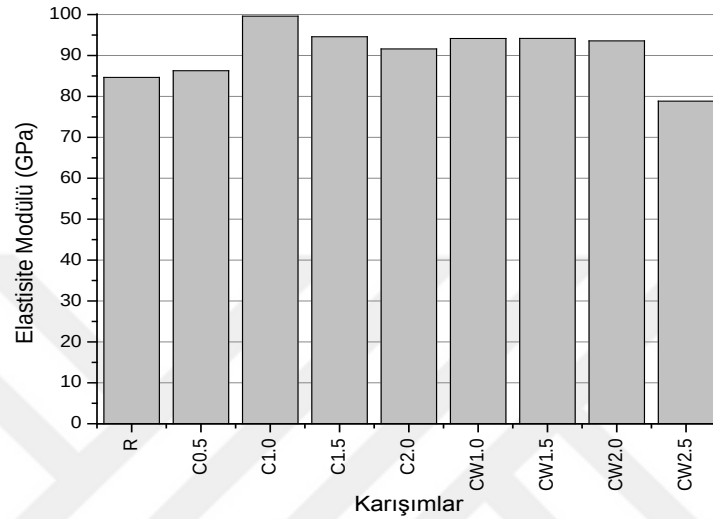
kolemanit kullanımı ile referans örneğinde hafifçe daha yüksek basınç dayanımı elde ettiklerini rapor etmişlerdir.

Erdoğan vd. (1998), çimentolu karışımlarda %1, 3, 5 ve 7 oranlarında kolemanit atığı kullanmıştır. 2 ve 7 günlük örneklerde %1 oranında kolemanit atığı kullanılmasıyla ve 28 günlük örneklerde %3 kolemanit atığı kullanılmasıyla en yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Kula vd. (2001), kolemanit atığı ve UK'nın bir arada bulunduğu karışımları incelemiştir. Kolemanit atığının %9 oranına kadar kullanmıştır. 2, 7, 28 ve 90 günlük örnekler üzerinde yaptıkları testler sonucu kolemanit atığı kullanımının basınç dayanımlarında düşüşe neden olduğu belirtilmiştir. Diğer taraftan, tek başına kolemanit atığı kullanılan örneklerin basınç dayanımlarının, kolemanit atığı ve UK'nın beraber kullanıldığı örnekler göre bütün yaş gruplarında daha düşük dayanım verdiği belirtilmiştir. Kula vd. (2002), tinkal atıkları kullanılarak betonlar üretmiş ve bazı karışımlar UK kullanılarak modifiye edilmiştir. Tinkal atığının tek başına kullanıldığı örneklerde ve tinkal atığı ile UK'nın bulunduğu karışımlarda 28 günlük basınç dayanımı sonuçlarına göre sadece %1 oranında tinkal atığı içeren örnekler referanstan hafifçe daha yüksek basınç dayanımı vermiştir. Geriye kalan bütün örneklerin dayanımlarının referanstan daha düşük olduğu belirtilmiştir. 90 günlük dayanım sonuçlarına göre UK ile birlikte %1 ve %3 oranında tinkal atığının kullanıldığı örnekler, tek başına %1 ve %3 tinkal atığı kullanılan örneklerden hafifçe daha düşük dayanım değeri vermişlerdir. Sevim vd. (2017), %15'e kadar kolemanit atığı kullandıkları çalışmalarında 28 ve 180 günlük örneklerde %3 ve %5 oranında kolemanit atığı kullanımı ile referans örneğinden hafifçe daha yüksek dayanım değerleri elde ettiklerini belirtmiştir.

Literatürlerde özellikler erken dönemlerde B_2O_3 içeren mineral katkıların basınç dayanımı üzerindeki olumsuz etkilerinin, B_2O_3 'ün hidratasyon mekanizmaları üzerinde yaptığı etki ile ilgili olduğu belirtilmiştir (Davraz, 2010). Ancak, ileri yaşlarda meydana gelen artışın sebebi tam olarak ifade edilmemiş, bazı çalışmalar da KKA'nın küçük bir miktar da olsa puzolanik aktiviteye sahip olduğu belirtilmiştir (Kula vd., 2001). Kolemanitin, puzolanik aktivite testleri uygulandığında yeterli sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Bideci ve Bideci, 2018). Aynı zamanda, mineral katkılarda bulunan borun etrenjitin yapısına katıldığı ve bu durumun dayanımı arttırdığı da belirtilmiştir (Targan vd., 2003).

4.4.2.Elastisite Modülü

Şekil 4.12, 90 günlük örneklere uygulanan tek eksenli basınç dayanımı testinden elde edilen elastisite modülü değerleri gösterilmektedir.

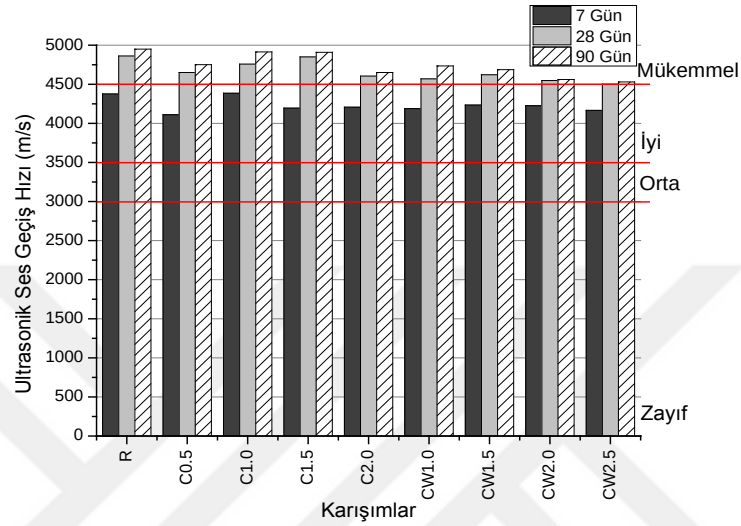


Şekil 4. 12: 90 günlük örneklerin elastisite modülü değerleri.

Elastisite modülü ile basınç dayanımını birbiri ile ilişkili büyüklükler olduğu söylenebilir. Örneklerin elastisite modülleri incelendiğinde 78,83 GPa ile 99,60 GPa arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek değer C1,0 örneğinden elde edilmiştir. R örneğinin elastisite modülü değeri ise 84,64 GPa'dır. KKA içeren örnekler arasında en yüksek elastisite modülü değeri 94,17 GPa ile CW1,5 örneğinden elde edilmiştir. Tüm örnekler arasında en düşük değer ise CW2,5 örneğinden elde edilmiştir. KKA içeren örneklerin değerleri CW2,5 örneği hariç birbirlerine oldukça yakındır. Kolemanit katkılı örneklerde de C0,5 örneği hariç bütün örnekler 90 GPa'nın üzerinde elastisite modülü değeri vermiştir. Genel olarak incelendiğinde örneklerin elastisite modülü değerleri arasında çok ciddi farklılıklar olmadığı söylenebilir.

4.4.3. Ultrasonik Ses Geçiş Hızı

7, 28 ve 90 günlük örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri Şekil 4.13’de verildiği gibidir.



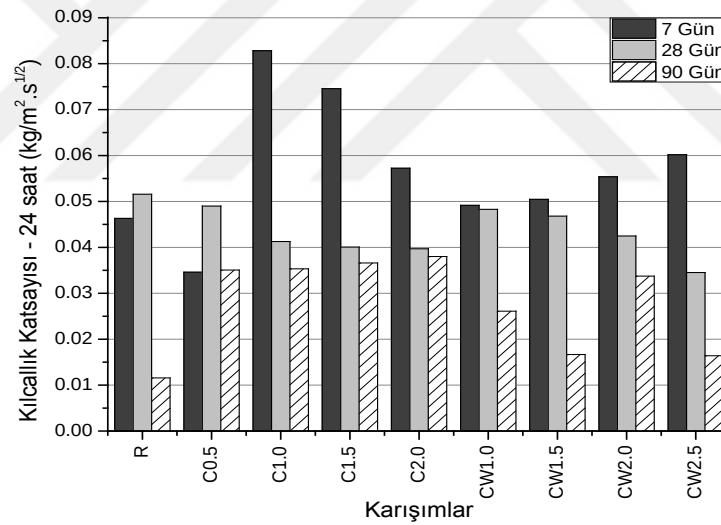
Şekil 4. 13: 7,28 ve 90 günlük örneklerin ultrasonik ses geçiş hızı değerleri.

Şekil 4.13’deki kırmızı çizgiler literatürde ultras ses geçiş hızına bağlı olarak beton kalitesinin tespitinde kullanılan sınır değerleri ifade etmektedir. Buna göre ultras ses geçiş değeri 3000 m/s’den düşük olan örnekler zayıf olarak veya düşük kalitede olarak kabul edilirler. 3000-3500 m/s arasında değer veren örnekler orta kalitede örnekler olarak kabul edilirler. 3500-4500 m/s arasında değer veren örnekler iyi kalitede kabul edilirken, 4500 m/s’nin üzerinde değer elde edilen örnekler mükemmel kalitede kabul edilebilir (Neville, 2011). 7 günlük ultras ses geçiş değerleri 4110 m/s ile 4385 m/s arasında değişmektedir. Bu durumda 7 günlük örneklerin tamamı iyi kalitede betonlar olarak kabul edilebilir. 7.günde en yüksek değer C1,0 örneğinden elde edilmiştir. Referans örneğin bu değere çok yakın bir değer olan 4376 m/s’dir. Kolemanit içeren örnekler arasında en düşük değer 4110 m/s’ye sahip olan örnek C0,5 örneğidir. KKA içeren örneklerde en yüksek değer ise 4234 m/s ile CW1,5, en düşük değer ise 4166 m/s ile CW2,5 örneğinden elde edilmiştir. 28 günlük sonuçlar ise 4501 m/s ile 4862 m/s arasında değişmektedir. En yüksek değer referans örneğinden elde edilmiştir. Kolemanit içeren örneklerde ise en yüksek değer 4850 m/s ile C1,5 örneğinden elde edilmiştir. Bütün örneklerden elde edilen değerler 4500 m/s’nin

üzerinde olduğu için 28 günlük bütün betonlar mükemmel kalitede kabul edilebilirler. Her iki yaş grubunda değerlerin kendi içerisinde birbirine çok uzak olmadığını belirtmek gerek. 90 günlük ultrases geçiş hızı değerleri ise 4530 m/s ile 4950 m/s arasında değişmektedir. En yüksek değer yine referans örneğinden elde edilmiştir. C1,0 örneği 4919 m/s ile kolemanit içeren örnekler içeren örnekler arasında en yüksek değere sahiptir KKA içeren örnekler arasında ise CW1,0 örneği en yüksek ultrases geçiş hızı 4735 m/s değerine sahiptir. Yine örnekler 4500 m/s'nin üzerinde değer verdiği için bütün beton örnekleri mükemmel kalitede kabul edilebilirler.

4.4.4. Kılcal Su Emme Testi

Şekil 4.14'de örneklerin 24 saatlik kılcal su emme testleri sonucunda hesaplanan kılcallık katsayıları verilmiştir.



Şekil 4. 14: Örneklerin 24 saatlik kılcal su emme katsayıları.

7 günlük kılcal su emme katsayısı incelendiğinde değerler 0,035-0,083 $\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ arasında değişmektedir. En düşük kılcal su emme katsayısı C0,5 örneğinden elde edilmiştir. En yüksek değer ise C1,0 örneğinden elde edilmiştir. Referans örneğinden 0,046 $\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ kılcallık katsayısı elde edilmiştir. KKA içeren örnekler arasında ise en düşük 0,049 $\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ değeri ile CW1,0 örneği olurken en yüksek 0,060 $\text{kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ ile CW2,5 örneğinden elde edilmiştir.

28 günlük değerler ise $0,040-0,052 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ arasında değişmektedir. En yüksek değer referans örneğinden elde edilirken en düşük değer C2,0 örneğinden elde edilmiştir. Ancak C1,0 ve C1,5 örnekleri ile çok yakın değerler vermiştir. Kolemanit içeren örnekler arasında en yüksek değer $0,049 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ ile C0,5 örneğinden elde edilmiştir. KKA içeren örnekler arasında ise en yüksek değer $0,048 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ ile CW1,0, en düşük değer ise $0,035 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ ile CW2,5'den elde edilmiştir. Her iki katkı grubunda da katkı miktarının artıyor olması kılcal su emme katsayılarında bir düşüşe neden olmuştur.

90 günlük kılcal su emme katsayıları $0,012-0,038 \text{ kg/m}^2.\text{s}^{1/2}$ arasında değişmektedir. En yüksek değer C2,0 örneğinden elde edilirken, en düşük değer referans örneğinden elde edilmiştir. Kolemanit içeren örnekler arasında en düşük değer C0,5 ve C1,0 örneklerinden elde edilmiştir. KKA içeren örneklerde ise en düşük değer CW1,5 ve CW2,5 örneklerinden elde edilmiştir.

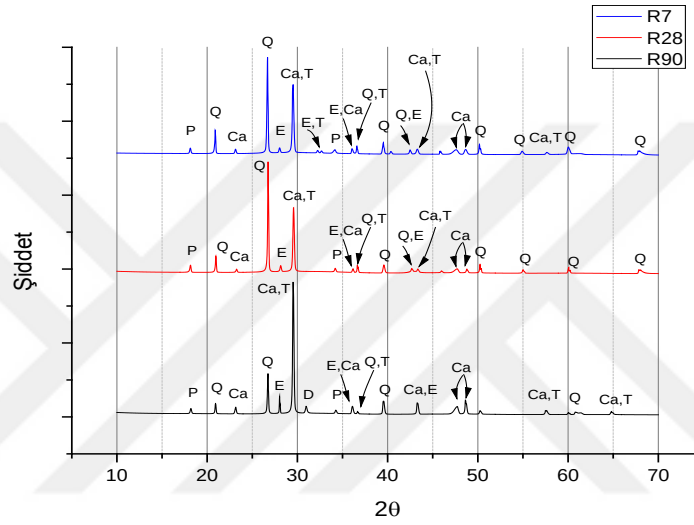
Kılcal su emme bir malzemenin bünyesindeki boşlukların çapları ile ters orantılıdır. Dolayısı ile bir örneğin kılcal su emme katsayısının yüksek olması, o örnekteki boşlukların daha ince olduğu anlamına gelebilir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde genellikle basınç dayanımı yüksek olan örneklerin kılcal su emme katsayılarının da yüksek olduğu gözlenmiştir.

Basınç dayanımı boşluk yapısı ile ilişkili bir büyüklüktür. Basınç dayanımı yüksek olan örneklerin matris yapılarında boşluk miktarının daha az olduğu ve boşlukların daha ince olduğu söylenebilir. Böylece kılcal su emme gerçekleştiğinde bu dar boşluklar daha fazla yükselme imkanı bulabilir. Bu durum örneklerin kılcal su emme katsayılarının büyük görünmelerini sağladığı düşünülmektedir.

4.5. Mikroyapı İncelemeleri

4.5.1. X-Işını Difraktometrisi (XRD)

Örneklerde oluşan fazların belirlenmesi için XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.15 referans örneğinin 7, 28 ve 90 günlük XRD analizini içermektedir.



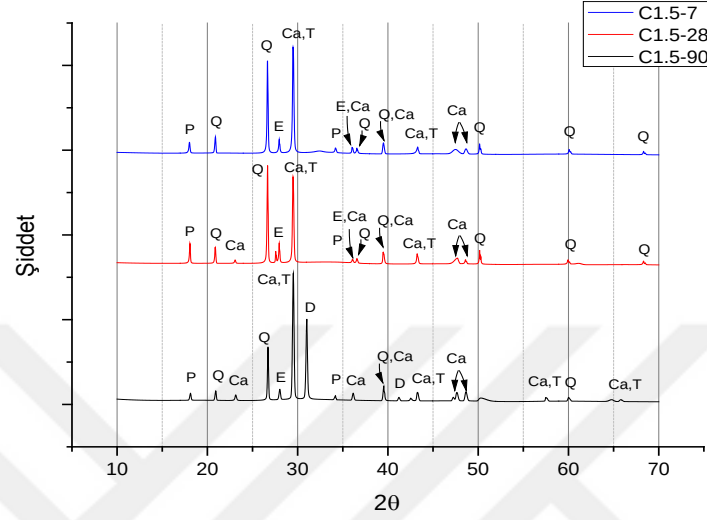
p: Portlandit, Q:kuvars, Ca: Kalsit, E: Etrenjit, T: Tobermorit, D: Dolomit

Şekil 4. 15: Referans örneğinin 7, 28 ve 90 günlük XRD analizi.

Referans örneğinin XRD analizleri incelendiğinde genel olarak hidrasyondan kaynaklı ürünlerin varlığının tespit edildiği görülmektedir. Burada etrenjit ve portlandit ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) hidrasyon reaksiyonları sonucu ortaya çıkan fazlardır. Bunun dışında tespit edilen tobermorit (C-S-H) çimentonun hidrasyonu sonucu ortaya çıkan ve bağlayıcılığı sağlayan esas fazdır.

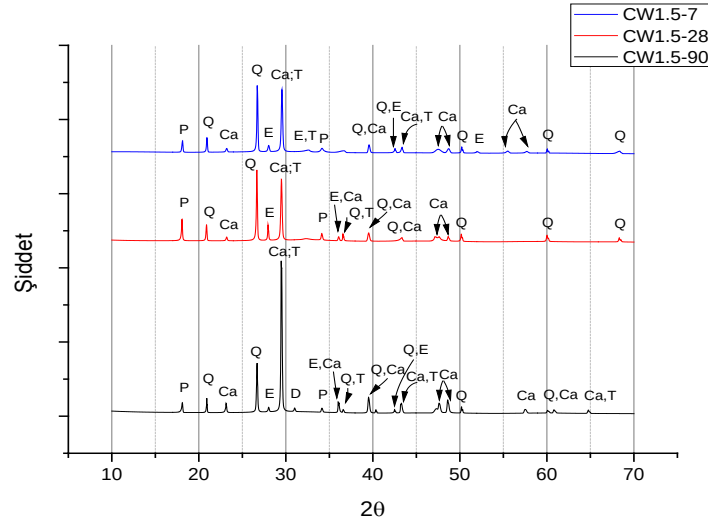
Çimentodaki CaO kaynaklı oluşan (CaCO_3) ve yine hem çimento hem de UK kaynaklı olabilecek kuvars (SiO_2) fazları ile karşılaşmıştır. Bunun dışında 90 günlük örnekte küçük bir dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) piki tespit edilmiştir. Dolomit de yine çimento hammaddesi olan kalkerin içerisinde bulunabilen minerallerdendir. Burada portlandit piklerinin

ilerleyen yaşlara doğru bir miktar azaldığı görülmektedir. Bunun nedeni KYB'nin yapısında yüksek oranda UK olması ve bunun puzolanik bir özellik göstermesindendir. Şekil 4.16 ve Şekil 4.17 sırasıyla %1,5 kolemanit içeren ve %1,5 KKA içeren örneklerin 7, 28 ve 90 günlük XRD analizlerini göstermektedir.



p: Portlandit, Q:kuvars, Ca: Kalsit, E: Etrenjit, T: Tobermorit, D: Dolomit

Şekil 4. 16: %1,5 kolemanit içeren örneklerin 7, 28 ve 90 günlük XRD analizleri.



p: Portlandit, Q:kuvars, Ca: Kalsit, E: Etrenjit, T: Tobermorit, D: Dolomit

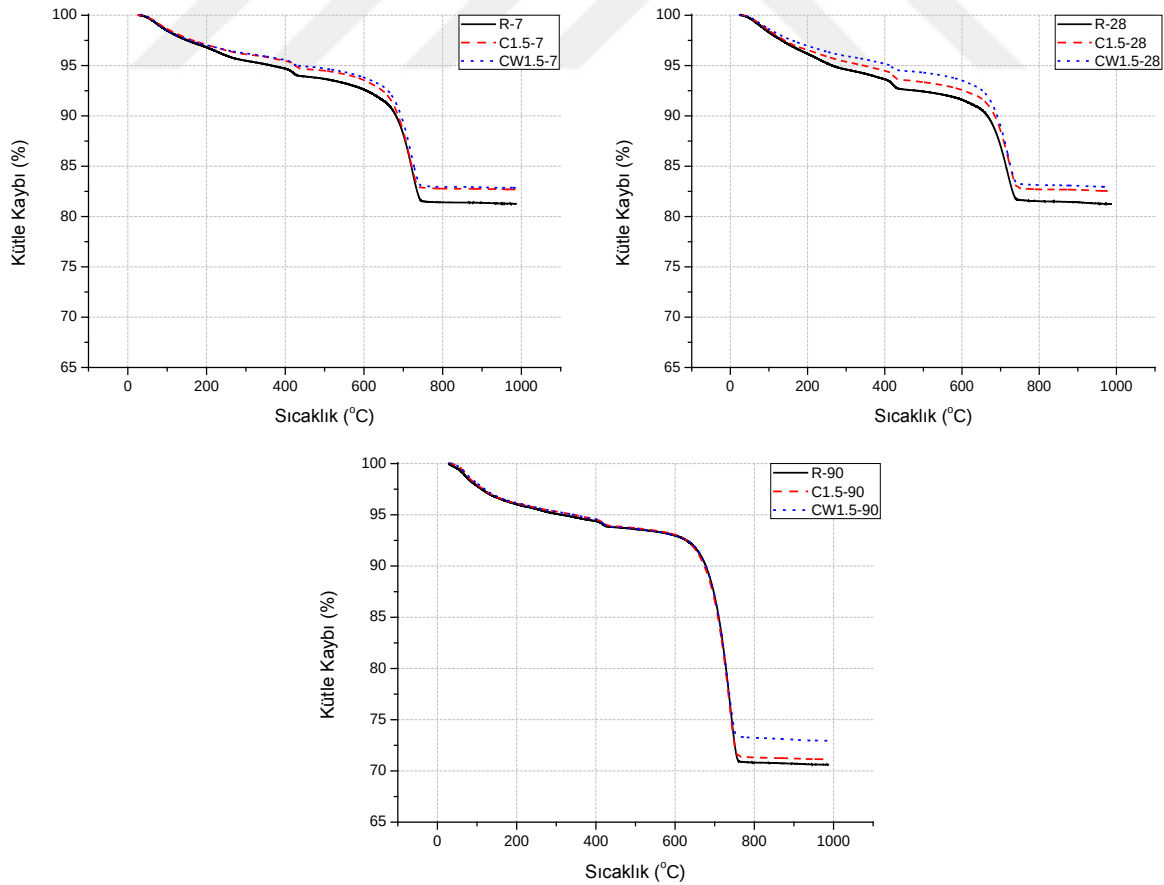
Şekil 4. 17: %1,5 KKA içeren örneklerin 7, 28 ve 90 günlük XRD analizleri.

Her iki örnek grubu da incelendiğinde elde edilen fazların referans örneği ile aynı olduğu görülmektedir. Aynı zamanda örneklerin pik şiddetleri de birbirlerine benzerdir. KKA

içeren örneklerde 7 ve 28 günde tobermorit piklerinin kolemanit içeren örneklerle göre biraz daha zayıf olduğu görülmektedir. Her iki analizde de portlandit piklerinin 7 ve 28 günde artış ve daha sonra tekrar azalma göstermektedir. Bu durum ortamda bir puzolanik aktivite varlığının belirtisi olabilir. Ancak bu durum termogravimetrik analizlerde (TGA) daha detaylı ele alınacaktır. Her iki grupta da 90 günde dolomit piki meydana gelmiştir ancak kolemanit içeren grupta dolomit piki hem referans hem de KKA içeren örneklerle göre çok daha belirgindir. Belirtilen incelemelerin dışında XRD analizleri ciddi farklılıklar ortaya koymamıştır.

4.5.2. Termogravimetrik Analiz (TGA)

Şekil 4.18, 7, 28 ve 90 günlük örneklerin TGA analizlerinden oluşan kütle kaybı değerlerini göstermektedir. Analizler için R örneği, kolemanit ve KKA'ya ait %1,5 katkı içeren örnekler seçilmiştir.



Şekil 4. 18: Örneklerin kütle kayıpları (a) 7 günlük (b) 28 günlük (c) 90 günlük.

TGA kütle kayıpları temel olarak ana pik içermektedir. Bunlardan birincisi $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'nin (CH) dehidrasyonunu ifade etmektedir ve yaklaşık 400-500°C arasında yer almaktadır. İkinci temel pik ise 600-800°C arasında görülmektedir ve bu pikin sebebi CaCO_3 'ün bozunması ve CO_2 salınımıdır (Aono vd. 2007). Literatürde TGA kütle kayıplarını kullanarak hidratasyon üzerine değerlendirmeler yapılan birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada Pane ve Hansen tarafından önerilen (Pane ve Hansen, 2005) kimyasal olarak bağlı suyun miktarının hesaplandığı ve hidratasyon derecesinin elde edildiği yöntem kullanılmıştır. Bu yöntemde, denklem 4.1'i TGA kütle kayıpları kullanılarak kimyasal olarak bağlı suyun miktarını hesaplamada kullanmak için önermiştir;

$$W_b = Ldh + Ldx + (Ldc - Ldc_a) \quad (4.1)$$

Ldh, C-S-H bağın dehidrasyonu sonucu oluşan rölatif kütle kaybı olarak, Ldx, CH'in dehidroksilasyonundan kaynaklanan kütle kaybı olarak ve Ldc, CaCO_3 'ün bozunmasından kaynaklanan kütle kaybı olarak değerlendirilmiştir. Pane ve Hansan (2005), 140-440°C arasındaki kütle kaybını Kdh, 440-520°C arasındaki kütle kaybını Ldx ve 520-1000°C arasındaki kütle kaybını ise Ldc olarak aldıklarını belirtmiştir. Bu çalışmada TGA eğrileri üzerinde yapılan incelemelere göre uygun olan kütle kaybı aralıkları Ldh için 105-390°C, Ldx için 390-600°C ve Ldc için 600-1000°C olarak tespit edilmiştir. Burada Ldc'nın hidrate olmayan malzemelerdeki (çimento, UK, kolemanit ve KKA) CaCO_3 'ün bozunmasından kaynaklanan TGA kütle kayıpları olduğuna dikkat edilmelidir. Bu değer Portland çimentosu için %0,13, UK için %0,67, kolemanit için %5,9 ve KKA için %4 olarak hesaplanmıştır. Buna göre denklem 4.2 hidratasyon derecesinin hesaplanması için önerilmiştir;

$$\alpha = \frac{W_b}{W_{b\infty}} \quad (4.2)$$

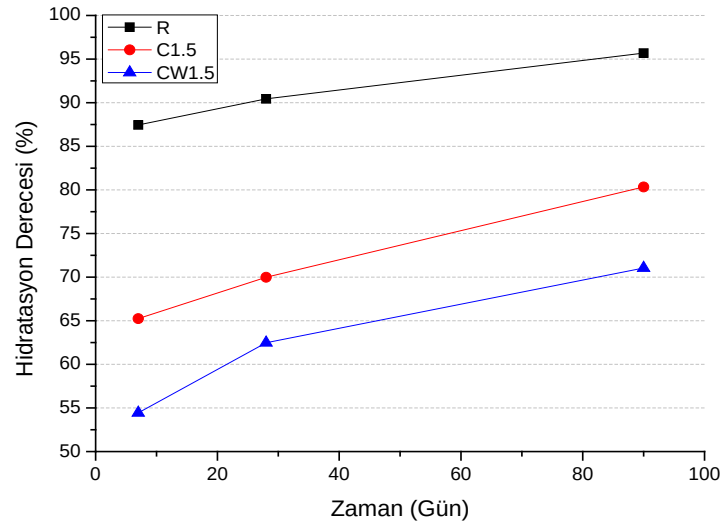
Burada α hidratasyon derecesi ve $W_{b\infty}$ nihai kimyasal olarak bağlı sudur. Pane ve Hansen (2005), $W_{b\infty}$ değerinin mineral katkısının tipi ve miktarına göre değişiklik gösterdiğini ve ancak denklem 4.3'de verilen üç parametrelili bir denklem ile ifade edilebileceğini belirtmişlerdir;

$$W_b = W_{b\infty} \times \exp \left[- \left(\frac{\tau}{t} \right)^a \right] \quad (4.3)$$

Burada τ ve a logaritmik bir ölçekte çizilen kesişimi ve eğriliğini ifade eden terim iken, t kütleme süresini ifade etmektedir. $W_{b\infty}$ değerini elde etmek için önce TGA eğrilerinden elde edilen kütle kaybı değerleri kullanılarak W_b hesaplanmıştır. Daha sonra $W_{b\infty}$, τ ve a değerleri Pane ve Hansen'in (2005) önerdikleri üç parametrelilik denklemin için non-lineer eğri uydurma yaklaşımı ile $W_{b\infty}$ değerlerinin zamana bağlı grafiği çizdirilerek tahmin edilmiştir. Yapılan iterasyonlar sonucu elde edilen $W_{b\infty}$, τ ve a değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Karışımların hidrasyon derecelerinin zamana bağlı değişimi ise Şekil 4.19'de gösterildiği gibidir.

Tablo 4. 4: Pane ve Hansan, 2005; Debaucha, 2017'de önerilen metoda göre hesaplanan $W_{b\infty}$, τ ve a değerleri.

Karışım	Zaman (gün)	$W_b(\%)$	$W_{b\infty}(\%)$	τ	a
R	7	4,80	5,49	0,94	0,38
	28	4,97			
	90	5,26			
C1,5	7	4,96	7,60	6,58	0,25
	28	5,32			
	90	6,10			
CW1,5	7	5,27	9,68	19,44	0,22
	28	6,05			
	90	6,88			



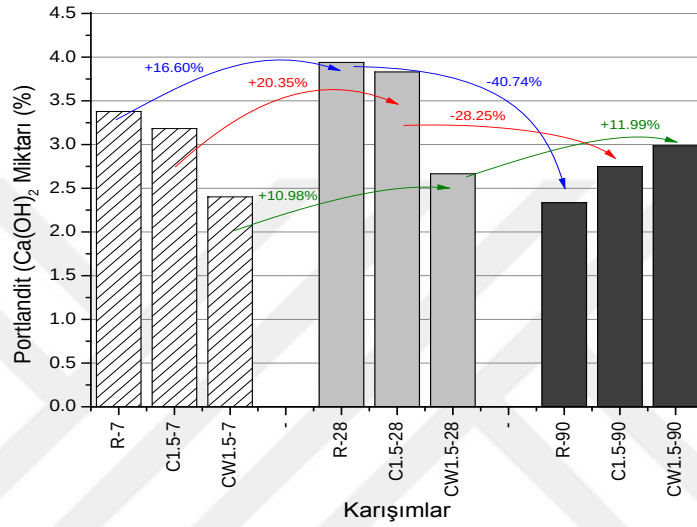
Şekil 4. 19: Pane ve Hansan, 2005; Deboucha, 2017’de önerilen metoda göre hesaplanan hidrasyon dereceleri.

Pane ve Hansen (2005), Deboucha vd. (2017) önerdiği metoda göre hesaplanan hidrasyon dereceleri kolemanit ve KKA kullanımının hidrasyon üzerindeki etkilerini göstermektedir. Yapılan hesaplara göre R örneğinin hidrasyon derecesi 7 günlük süre içerisinde %87,4 olarak bulunmuştur. Ancak bu değer, %1,5 kolemanit kullanıldığında %65,2’ye ve %1,5 KKA kullanıldığında %54,4’e düşmüştür. Böylece R örneğinin açıkça daha yüksek bir hidrasyon derecesi verdiği görülmektedir.

28 günlük yapılan ölçümler ve hesaplamalar çok farklı sonuçlar vermemiştir. R örneğinin hidrasyon derecesi %90,4 olurken, C1,5 örneği %70 ve CW1,5 örneği %62,5 değerini vermiştir. 90 günlük sonuçlara göre R örneği hidrasyonunun %95,7’sini tamamlamıştır. C1,5 örneği %80,3’de kalırken CW1,5 örneği %71’de kalmıştır. Sonuç olarak, bor mineralleri içeren katkıların hidrasyon üzerindeki geciktirici etkisi görülmektedir.

TGA kütle kayıplarında yapılan inceleme ise hidrasyon sonucu oluşan portlandit (CH) miktarı üzerine yapılan incelemedir. Portlanditin dehidrasyonunun 400-500°C civarında gerçekleştiği bilinmektedir (Aono vd. 2007). Buna göre diferansiyel termak analiz (DTA) kullanılarak CH dehidrasyonunun tam olarak hangi sıcaklıklarda başladığı ve hangi sıcaklıklarda bittiği tespit edilmiş ve bölgelerde meydana gelen kütle kayıpları hesaplanmıştır.

CH'n dehidrasyonu ile meydana gelen kütle kayıplarının CH'n yapısındaki suyun bünyeden ayrılması ile gerçekleştiği bilinmektedir. H₂O'nun moleküler ağırlığı 18,015 g/mol olduğu göz önüne alındığında ve CH'n moleküler ağırlığı 74,092 g/mol olduğu düşünüldüğünde, H₂O/Ca(OH)₂ oranının 4,11 olduğu görülmektedir. Bu nedenle sistemde yer alan CH miktarı, o bölgeden hesaplanan kütle kaybının aslında 4,11 katı kadardır. Buna göre hesaplanan CH miktarı Şekil 4.20'de verilmiştir.



Şekil 4. 20: Karışımların TGA sonuçlarına göre hesaplanan portlandit miktarı.

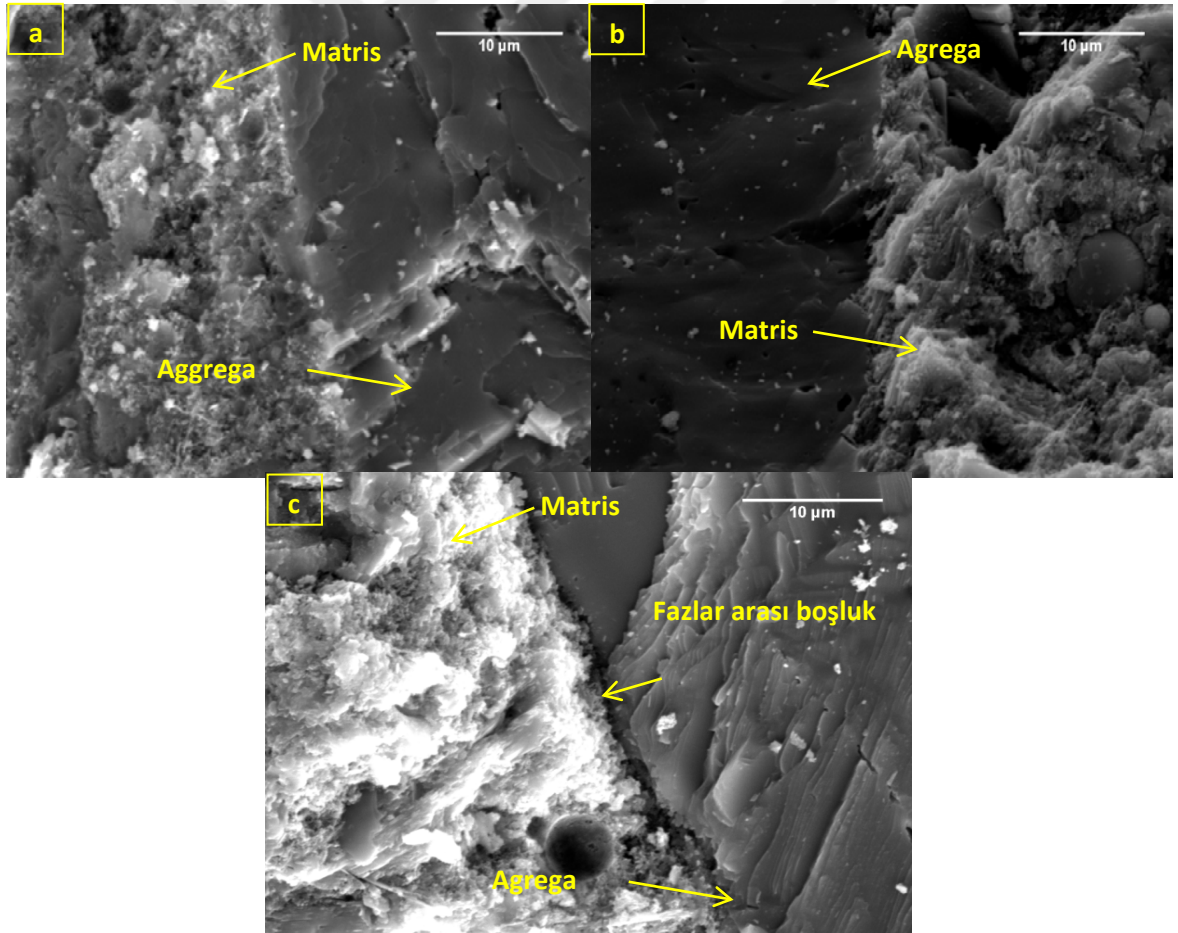
7 gün boyunca kürlenmiş örnekler incelendiğinde R örneğinin portlandit miktarı %3,38, C1,5 örneğinin %3,18 ve CW1,5 örneğinin ise %2,40 olduğu görülmektedir. Bu durum, kolemanit ve KKA kullanımı sonucu yapıya eklenen bor minerallerinin erken dönemde hidratasyon üzerinde geciktirici bir etki yaptığının göstergesi olarak düşünülebilir, çünkü hidratasyon reaksiyonlarının ana ürünlerinden biri olan CH oluşumu bu katkıların kullanımı ile azalmıştır. 28 gün kürlenmiş örnekler incelendiğinde hidratasyonun gelişmesiyle portlandit miktarında bir artış meydana geldiği görülmektedir. R örneği için %3,94, C1,5 örneği için %3,83 ve CW1,5 örneği için %2,67 olarak hesaplanmıştır.

90 günlük kürlenmiş R örneğinde ise CH miktarının başlangıca göre puzolanik reaksiyonların başlaması ile %40'tan daha fazla azaldığı gözlenmiştir. C1,5 örneğinde ise yaklaşık %28'lik bir CH azalması gözlenmektedir. Bu durum daha önceki çalışmalarda

belirtilen, kolemanit yeterli ölçüde puzolanik aktivite oluşturduğu ifadesinin bir sağlaması olabilir. Ancak KKA kullanımı ile CH miktarındaki artışın devam ettiği görülmüştür. 28 günlük değerler ile karşılaştırıldığında yaklaşık %12'lik bir artış tespit edilmiştir. Bu durum literatürde bulunan KKA'nın bir miktar puzolanik etki gösterdiği ifadesi ile ters düşmektedir (Kula vd., 2001).

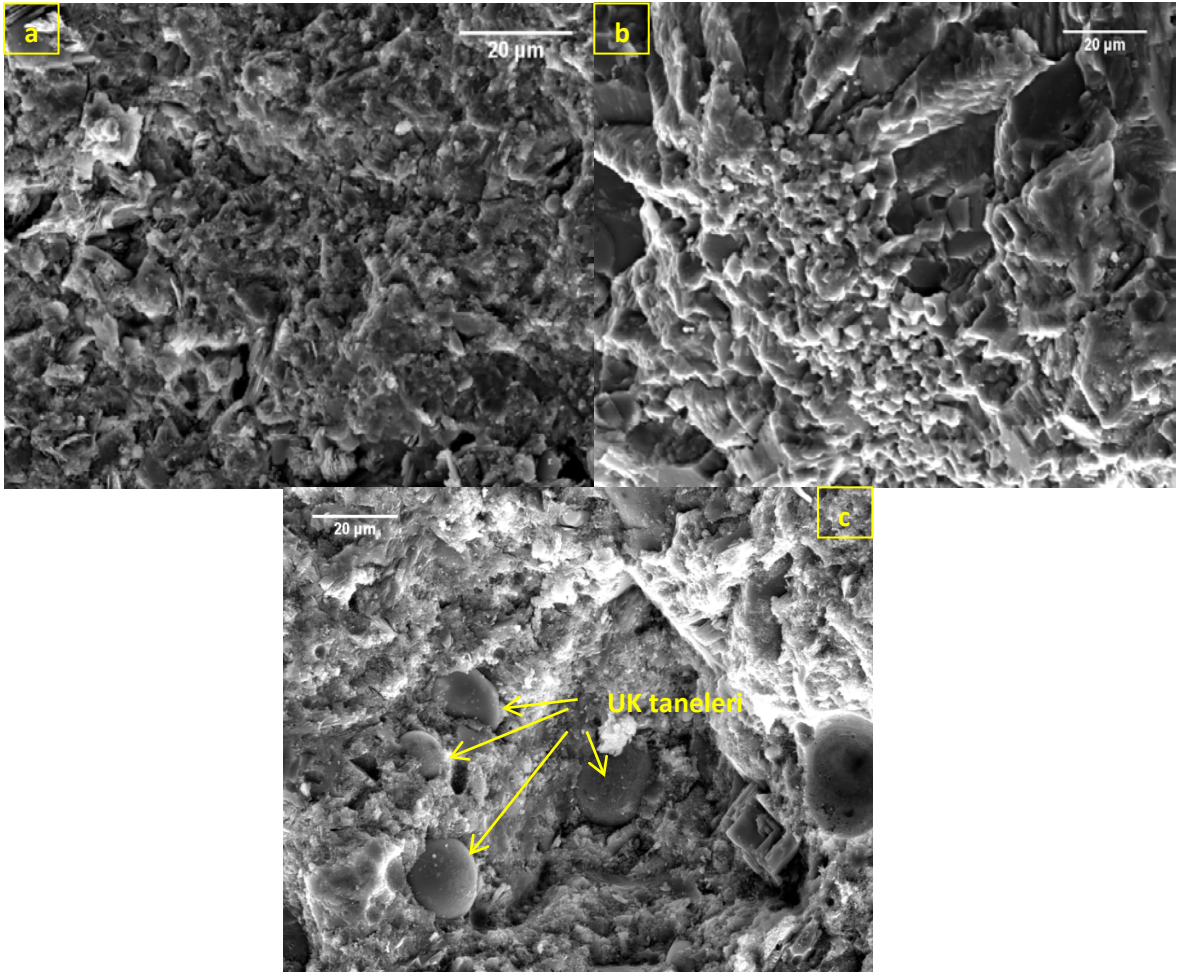
4.5.3. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntülemeleri

Mikroyapı incelemeleri yapmak üzere seçilen örneklerden SEM görüntüleri alınmıştır. Alınan görüntüler Şekil 4.21-4.24 arasında verilmiştir.



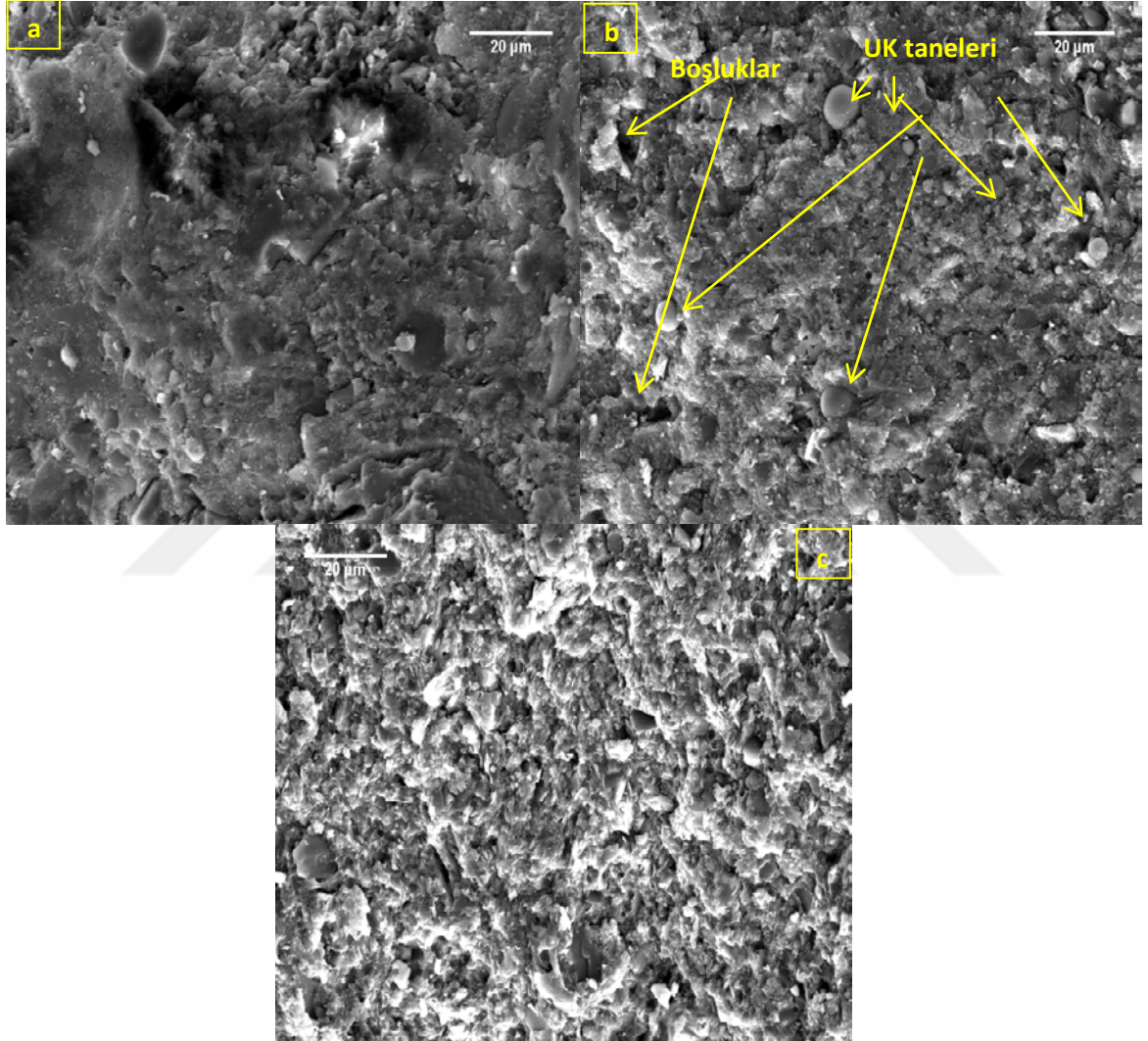
Şekil 4. 21: 7 gün kürlenmiş örneklerin SEM görüntüleri (a) R (b) C1,5 (c) CW1,5.

SEM görüntülemeleri için R, C1,5 ve CW1,5 örnekleri seçilmiştir. Şekil 4.21, 7 gün kürlenmiş örneklerin SEM görüntülerini göstermektedir. Görüntüler matris fazı ile agrega arasındaki kesişme yüzeyini göstermektedir. Diğer örneklerle karşılaştırıldığında agrega ve matris arasındaki geçiş çok daha belirsizdir. Kolemanit içeren örneklerde, iki faz arasındaki bağın biraz daha zayıf olduğu gözlenmektedir. Geçiş bölgesi burada daha belirgindir ve burada kaliteli bir kenetlenme olmadığı söylenebilir. Matris fazları incelendiğinde ise R örneğinin matris fazı daha düzenli ve sıkı görülürken, KKA içeren örneğin matris bölümü diğer örneklerle karşılaştırıldığında daha gevşek olarak görülmektedir.



Şekil 4. 22: 28 gün kürlenmiş örneklerin SEM görüntüleri (a) R (b) C1,5 (c) CW1,5.

28 günlük örnekler incelendiğinde (Şekil 4.22) R örneğini çok sıkı bir yapı oluşturmaya başladığı görülmektedir. Kolemanit içeren örnekte ise taneli bir yapının var olduğu gözlemlenirken, KKA içeren örneğin 28 günlük kürlenme süresi sonunda yeterince sıkı bir hal almadığı görülmektedir. Dahası, reaksiyonlarda yer almayan UK tanelerinin matris içerisinde gömülü vaziyette kaldıkları görülmektedir.

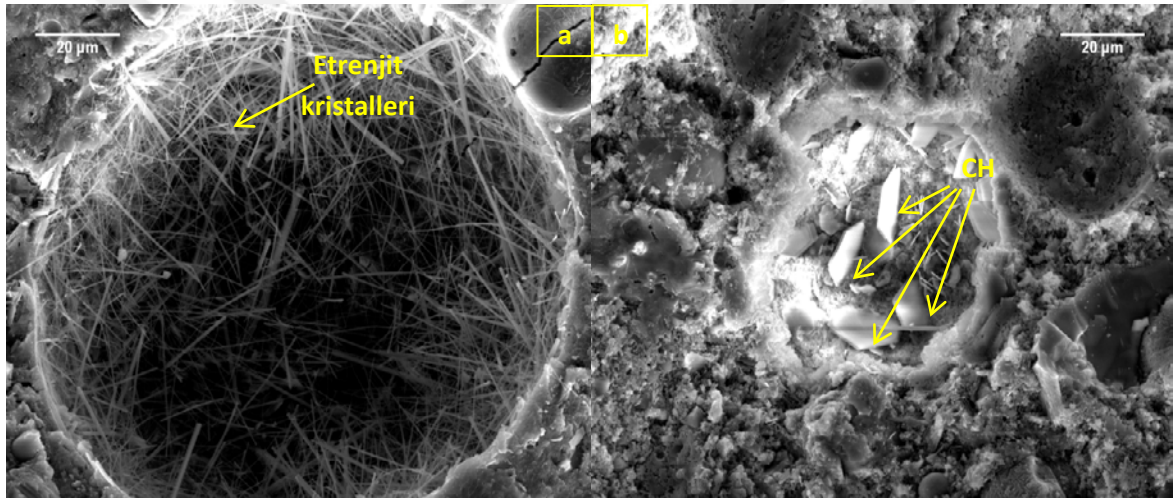


Şekil 4. 23: 90 gün kürlenmiş örneklerin SEM görüntüleri (a) R (b) C1,5 (c) CW1,5.

90 gün kürlenmiş örneklerden alınan SEM görüntülerinde R örneğinin içyapısının oldukça sıkı ve yoğun olduğu gözlenmiştir. Kolemanit içeren örneğin içyapısı da R örneğine benzer bir yapıdadır. Ancak görüntüde bazı boşlukların bulunduğu ve reaksiyonlarda yer almayan bazı UK tanelerinin matris içerisinde varlığı görülmektedir. KKA içeren örneklerin

içyapısı incelendiğinde diğer örneklerle göre çok daha düzensiz ve gevşek bir yapıda olduğu görülmektedir. Görüntülerden elde edilen bulgular, daha önceki bölümlerde elde edilen sonuçlar ile uygunluk göstermektedir. Örneğin, KKA içeren örneklerde bütün yaş gruplarında matris yapılarının daha zayıf olduğu gözlemlenmiş ve bu durum basınç dayanımı sonuçlarına direk olarak yansımıştır.

Şekil 4.24, R ve C1,5 örneklerinde 90 günlük kürleme sonrası sıklıkla görülmeyen bazı yapıları göstermektedir. Örneğin Şekil 8.24a bir boşlukta oluşan yoğun etrenjit kristallerini gösterirken, Şekil 4.24b başka bir boşlukta yer alan CH kristallerini göstermektedir.



Şekil 4. 24: 90 gün kürlenmiş R ve C1,5 örneğindeki etrenjit CH formasyonları.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, KYB’de kolemanit ve KKA’nın, taze, reolojik ve sertleşmiş özellikler üzerine etkileri incelenmiş ve yapılan deneysel çalışmalara göre aşağıdaki sonuçlara varılmıştır;

1. Kolemanit ve KKA katkısı kullanılarak üretilen örneklerin priz sürelerinin katkı sürelerinin katkı kullanılmadan üretilen örneklere göre daha uzun olduğu görülmektedir. Bu durum literatürler üzerinden de belirtilmiştir.

2. Örneklerin taze ve sertleşmiş birim ağırlıkları kolemanit ve KKA kullanımından belirgin bir biçimde etkilememiştir.

3. Tek nokta reoloji testleri incelendiğinde, kolemanit katkısı kullanımının genel olarak akış özelliklerini geliştirdiği sonucuna varılmıştır. Bu durum kolemanit katkısının çimento hidratasyon üzerindeki geciktirici etkisi ile ilişkilendirilmiştir. Ancak kolemanit katkısının yüksek miktarlarda kullanımının segregasyon eğilimi meydana getirdiği görülmüştür. Diğer taraftan KKA kullanımı küçük oranlarda pozitif sonuçlar sağlarken, kullanım oranı biraz yükseldiğinde akış özelliklerini olumsuz bir biçimde etkilemektedir. Yapısında bor mineralleri barındırıyor olmasına rağmen, barındırdığı kil minerallerinin etkisinin daha dominant olduğu görülmüştür.

4. Reolojik parametrelerin zamana bağlı değişimi kolemanit katkısının akış özelliklerini iyileştirdiğini ve bir süre daha korunmasını sağladığını göstermiştir. 90 dakikalık süre boyunca statik ve dinamik akma gerilmesi ile plastik viskozite değerleri R karışımından daha düşük çıkmıştır. Özellikle C1,5 örneği iyi sonuçlar vermiştir. Tek nokta testleri ile reometre testleri bir arada değerlendirildiğinde kolemanit katkısının KYB’nin taze özelliklerini geliştirici ve sağlayıcı bir mineral katkı olabileceği sonucuna varılmıştır.

5. KKA'nın kullanımı genel olarak reolojik parametrelerde bir yükselişe neden olmuştur. Zamanın ilerlemesiyle, statik ve dinamik akma gerilmesiyle plastik viskozite değerleri yükselmiş ve R karışımının üzerine çıkmıştır. Burada sadece CW1,0 örneğinin bazı reolojik parametreler anlamında bir parça R örneğine benzer sonuçlar ortaya koyduğu söylenebilir.

6. R örneği basınç dayanımı olarak 7 ve 28 günlük değerleri bakımından en yüksek değeri vermiştir. Bu durumun kolemanit ve KKA'nın yapısında bulunan bor minerallerinin hidratasyonu geciktirici etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. 90 gün kürlenmiş örneklerde, R örneği 96,4 MPa basınç dayanımı verirken, C1,0 örneği 97 MPa değeri vererek referans örneğinin hafif üzerine çıkmıştır. KKA içeren örneklerde ise, KKA içeriğinin artmasıyla basınç dayanımlarında bir miktar azalma olduğu gözlenmiştir. Ancak CW1,0 örneğinin 90 MPa'nın üzerinde bir değer verdiği görülmüştür.

7. TGA kütle kayıpları incelenerek karışımların hidratasyon dereceleri incelenmiş, kolemanit ve KKA kullanımının hidratasyon derecesini düşürdüğü görülmüştür. 90 günlük kütleme sonrası R örneği %95,7'lik hidratasyon derecesine sahipken, C1,5 örneği %80,3 ve CW1,5 örneği sadece %71 değerini vermiştir.

8. Mikroyapı incelemeleri KKA içeren örneklerin tüm üç yaş grubunda da matris yapılarının diğer örneklerle karşılaştırıldığında daha gevşek olduğu görülmüştür. Diğer taraftan, R örneği çok daha sıkı ve yoğun bir içyapıya sahiptir. Bu durum basınç dayanımı sonuçlarına yansımıştır.

KAYNAKLAR

- Acarkan, N. (2002). Bor Ürün Çeşitleri ve Kullanım Alanları. 1.Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya, s.1-5.
- Akyıldız, A. (2012). Beton Üretiminde Bor Atıklarının Pozzolan Materyal Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Biyosistem Mühendisliği Anabilim Dalı, Tekirdağ, 102 s.
- Alkaya, Ş. (2010). Hafif Beton Üretiminde Organik Atıkların Kullanılabilme Olanakları. Yüksek Lisans Tezi, Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ, 38 s.
- Aono, Y., Matsushita, F., Shibata, S. and Hama, Y. (2007). Nano-structural Changes of C-S-H in Hardened Cement Paste Durin Dryinf at 50°C. J. Adv. Concr. Technol, pp. 313-323. doi:10.3151/jact.5.313.
- ASTM C 618. (2000). Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standart.
- Aydın, Ü. (2009). Kolemanit Atığının Beton Dayanımına Olan Etkisinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, M. Kemal Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Hatay, 67 s.
- Aycul, Ö. (2008). Eti Bor Emet Hisarcık Kolemanit Atıklarının Dekrepatasyon Yöntemi ile Zenginleştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 104 s.
- Banfill, P.F.G. (1991). Rheology of Fresh Cement and Concrete. E&F.N. Spon Publisher, London, 373 s.
- Banfill, P.F.G. (2003). The Rheology of Fresh Cement and Concrete a Review. 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, pp.50-62.
- Baradan, B., Yazıcı H. ve Ün, H. (2002). Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Yayınları, İzmir, 220 s.
- Baradan, B. ve Yazıcı, H. (2003). Betonarme Yapılarda Durabilite ve TS EN 206-1 Standardının Getirdiği Yenilikler. Türkiye Mühendislik Haberleri, s. 62-69.
- Baradan, B., Felekoğlu, B. ve Türkel S.(2004). Kendiliğinden Yerleşen Betonda Toz Madde Kullanımının Taze ve Mekanik Özelliklere Etkisi. Beton 2004 Kongresi, 68-77 s.
- Bartos, P. (1992). Fresh Concrete: Properties and Tests. Elsevier Science Pub., Amsterdam, Netherlands, 289 s.
- Batar, T., Köksal, N.S ve Yersel, Ş.E. (2009). Atık Bor Kâğıt ve Perlit Katkılı Sıva Malzemesinin Üretimi ve Karakterizasyonu. Ekoloji, s. 45-53.

- Baylavlı, H. (2008). Lastik Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Taze Beton Özelliklerine Farklı Katkıların Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 85 s.
- Bell, S. and Coveney, P.V. (1998). Molecular Modelling of Mechanism of Action of Borate Retarders on Hydrating Cement at High Temperature. Molecular Simulation, Informa Ltd., U.K., pp. 331-356.
- Bentli, T., Özdemir, O., Çelik, M.S. ve Ediz, N. (2002). Bor Atıkları ve Değerlendirilme Stratejileri. I.Ulusal Bor Sempozyumu, Kütahya, s. 250-258.
- Beshr, H., Almusallam, A.A. ve Maslehuddin, M. (2003). Effect of Coarse Aggregate Quality on the Mechanical Properties of High Strength Concrete. Construction and Building Materials, pp. 97-103.
- Best, J.B. and Lane, R.O. (1982). Properties and Use of Fly Ash in Portland Cement Concrete. CI, pp. 50-52.
- Bideci, Ö.S. ve Bideci, A. (2018). Öğütülmüş Kolemanit Katkısının Çimento Harçlarına Etkisi. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, s. 133-138.
- Boddu, S.R. and Kumar C.R, (2016). Self-Compacting Concrete. Imperial Journal of Interdisciplinary Research, Vol: 2, ISSN: 2454-1362, pp. 697-701.
- Boren (2020). Türkiye Topraklarında Bor-Tarım. Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü.
- Bütüner, R. (2011). Emet Bölgesi Düşük Tenörlü Kolemanit Stoklarının Değerlendirilebilirliğinin Araştırılması. Doktora Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 161 s.
- Chatterjee, A.K. (1996). High Belite Cements. Present Status and Future Technological Options: Part-I, Cement and Concrete Research, pp. 1213-1225.
- Cullity, B.D. (1956). Elements of X-Ray Diffraction. Addison-Wesley Publishing Company, USA, 545 s.
- Csetenyi L.J. and Glasser, F.P. (1993). Borate substituted ettringites, in: Mater. Res.Soc.Symp. Proceedings, USA, Vol: 294, pp. 273-278.
- Çağlar, A. (2018). Geleneksel Kastamonu Evlerinde Kullanılan Harman Tuğlası Özelliklerinin Bor Atığı Katkısı ile İyileştirilmesi Üzerine Deneysel Araştırma. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Ana Bilim Dalı, Konya, 118 s.
- Çankaya, A., Gökçe, M. ve Levent, K.Y. (2009). Taze Beton Bünyesindeki İnce Malzeme Hamuru Reolojik Özelliklerinin İncelenmesi. Yapılarda Kimyasal Katkıları 3.Sempozyumu Bildiriler Kitabı, s. 25-42.
- Davraz, M. (2010). The Effects of Boron Compounds on the Properties of Cementitious Composites. Science and Engineering of Composite Materials, 17 s.

- Demirel, B. ve Nasıroğlu, S. (2017). Bor Mineralleri ve Atıklarının Çimentoda Kullanılma Stratejileri. Fırat Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, s. 95-100.
- Demirtaş, M. (2001). Yüksek Akışkanlığa Sahip Betonlarda Bileşimin Taze ve Sertleşmiş Beton Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 109 s.
- Dirak, S. (2011). Eti Maden Müdürlüğü Kırka Bor İşletmesi Bor Endüstri Atıklarında Eser Elementlerin Tayini ve Lityumun Kazanılması. Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 96 s.
- Doğan, M.Z., Kaylaz, Y., Ona, G. ve Perek, K.T. (1997). Bigadiç ve Kestelek Bor Atıklarının Isıl İşlem, Elektrostatik Ayırma ve Flotasyon ile Zenginleştirme Olanaklarının Araştırılması. II. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, s. 76-85.
- Durgun, M.Y. (2011). Pomza, Kolemanit, Barit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Boyalarla Kaplanan Beton ve Donatıların Korozyon Performansı. Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kahramanmaraş, 181 s.
- Durgun, M.Y. (2017). Nano Silika Kullanımının Kendiliğinden Yerleşen Betonların Reolojik, Mekanik ve İçyapısal Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 192 s.
- Durgun, M.Y ve Sevinç, A.H. (2019). High Temperature Resistance of Concretes with GGBFS, Waste Glass Powder and Colemanite Ore Wastes After Different Cooling Conditions. Constr. Build. Mater. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.087.
- Durgun, M.Y., Özen, Ö., Kobra, V., Karakuzu, K. ve Aghabaglou, A.M. (2022). Effect of Colemanite Ore Wastes Utilization on Fresh Properties and Compressive Strength of Cementitious Systems. Arabian Journal for Science and Engineering, doi.org/10.1007/s13369-022-06641-8.
- DPT. (2001). Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu. Endüstriyel hammaddeler Alt Komisyonu, Kimyasal Sanayi Hammaddeleri, Cilt-II, Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Ankara.
- Ediz, N., Bentli, I., Ceylan, T. ve Tatar, I. (2004). Kestelek Bor İşletmesi 3 mm Klasifikatör Çökeni Ürünün Farklı Pervaneli Dağıtıcılarda Zenginleştirilmesi. II.Uluslararası Bor Sempozyumu, Eskişehir, s. 93-97.
- EFNARC (2002). Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete. The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Con. Systems.
- EFNARC (2005). Specificatons and Guidelines for Self-Compacting Concrete, The European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems.

- Erdoğan, M. (1993). İstanbul ve Dolayının Yapay Agrega Potansiyeli. 3.Mühendislik Jeolojisi Sempozyumu, Ç.Ü. Mühendislik Fakültesi, Adana, s. 29-41.
- Erdoğan, Y., Zeybek, M.ve Demirtaş, A. (1998). Cement Mixes Containing Colemanite from Concentrator Wastes. Cem. Concr. Res. doi:10.1016/S0008-8846(98)00018-0.
- Erdoğan, T.Y. (2003). Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, s. 513-604.
- ERMCO (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete Specification. Production and Use, The European Ready Mix Concrete Organisation, pp.10-68.
- Ersoy, U. ve Özcebe G. (2012). Betonarme. 3.Basım, Evrim Yayınevi, İstanbul, 826 s.
- Erzengin, S.G. (2015). Newtonyen Olmayan Akışkanların Reolojik Davranışları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Isparta, 7 s.
- Eti maden. (2020). Bor Sektör Raporu. Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, Ankara.
- Felekoğlu, B. (2003). Kendiliğinden Yerleşen Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, s. 196.
- Felekoğlu, B. (2004). Kendiliğinden Yerleşen Beton Potansiyel Avantaj ve Dezavantajları, İMO İzmir Şubesi Bülteni, Sayı: 120, s. 32-26.
- Felekoğlu, B., Baradan, B. ve Türkel, S. (2004). Kendiliğinden Yerleşen Betonda Toz Madde Kullanımının Taze ve Mekanik Özelliklere Etkisi. Beton Kongresi 2004, s. 68-77.
- Felekoğlu, B. ve Türkel, S. (2004). Aşırı Dozda Akışkanlaştırıcı Kimyasal Katkı Kullanımının Taze ve Sertleşmiş Betonun Bazı Özellikleri Üzerine Etkisi. DEÜ, Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, İzmir, s. 77-89.
- Felekoğlu, B., Önal, O. ve Özden, G. (2005). Kendiliğinden Yerleşen Betonların Boşluk Yapısının Normal Betonla Karşılaştırılması. 6.Ulusal Beton Kongresi Yüksek Performanslı Betonlar, İstanbul, s. 147-156.
- Gezmen, T. ve Türkel, S. (2017). Bor Minerali ve Uçucu Kül İçeren Harçların Mekanik Özelliklerinin ve Sülfata Dayanıklılığının İncelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, Cilt: 19, Sayı: 57, İzmir, s.757-778. DOI: 10.21205/deufmd.2017195768.
- Gomez, J.F. and Landsberger, G.A. (2007). Evaluation of Shrinkage Prediction Models for Self-Consolidating Concrete. ACI Materials Journal, pp. 464-473.
- Gökçe, H.S. ve Çakır, Ö.A. (2017). Hiper Akışkanlaştırıcı Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonun Segregasyon Özellikleri. Uluslararası Yapılarda Kimyasal Katkılar 5.Sempozyum, s. 87-103.

- Güneyisi, E., Atewi, Y.R. and Hasan, M.F. (2019). Fresh and Rheological Properties of Glass Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete with Nanosilica and Fly Ash Blended. *Construction and Building Materials*, Volume: 211, pp: 349-362.
- Güyagüler, T. (2001). Türkiye Bor Potansiyeli 4.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, İzmir, s. 18-27.
- Helvacı, C. ve Orti, F. (2004). Zoning in the Kırka Borate Deposit., Western Turkey; Primary Evaporitic Fractionation or Diagenetic Modifications. *The Canadian Mineralogist*, Vol: 42, pp. 1179-1204.
- Huang, F., Li, H., Yi, Z. and Xie, Y. (2018). The Rheological Properties of Self-Compacting Concrete Containing Superplasticizer and Air-Entraining Agent. *Construction and Building Materials*, Volume: 166, pp: 833-838.
- Jenkins, R. And Snyder, R.L. (1996). *Introduction to X-Ray Powder Diffractometry*. John Wiley and Sons, Canada, 403 s. DOI:10.1002/9781118520994
- Jiang, L.H. and Malhotra, V.M. (2000). Reduction in Water Demand of Non-Air-Entrained Concrete Incorporating Large Volumes of Fly Ash. *Cem.Concr. Res.*, pp.1785-1789.
- Kaplan, G. ve Gültekin, A.B. (2010). Yapı Sektöründe Uçucu Kül Kullanımının Çevresel ve Toplumsal Etkiler Açısından İncelenmesi. *International Sustainable Buildings Symposium*, Ankara, s. 59-64.
- Kaya, A.O. (2010). Farklı Türde Mineral Katkı Kullanımının Kendiliğinden Yerleşen Betonun Taze Faz ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. *Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul*, 83 s.
- Keleş, H., Kocakerim, M. ve Boncukoğlu, R. (2005). Borojips ve Kolemanit Konsatrasyon Atığının Çimentoda Kullanılması, *I.Ulusal Bor Çalıştayı*, Ankara, s. 105-112.
- Kula, I. (2000). Bor Endüstri Atıklarının Çimento Üretiminde Katkı Maddesi Olarak Değerlendirilmesi. *Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya*, 117 s.
- Kula, I., Olgun, A., Erdoğan, Y. ve Sevinç, V. (2001). Effects of Colemanite Waste, Cool Bottom Ash and Fly Ash on the Properties of Cement. *Cem. Concr. Res.*, s.491-494. doi:10.1016/S0008-8846(00)00486-5.
- Kula, I., Olgun, A., Sevinç, V. ve Erdoğan Y. (2002). An Investigation on the Use of Tincal Ore Waste, Fly Ash and Coal Bottom Ash as Portland Cement Replacement Materials. *Cem. Concr. Res.*, s. 227-232.
- Lowke, D., Krankel, T., Gehlen, C. and Schiebl, P. (2010). Effect of Cement on Superplasticizer Adsorption, Yield Stress, Thixotropy and Segregation Resistance, Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. *Proceedings of SCC 2010, Canada*.

- Massazza, F. (1989). Puzolanlar, Puzolanlı Çimentolar ve Kullanım Alanları. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, s. 41-79.
- Mehta, P.K. (1986). Concrete, Structure Properties and Materials. Printice Hall, USA, pp.152-158.
- Mohammed, H.A. (2011). Effect of Fly Ash and Silica Fume on Compressive Strength of Self-Compacting Concrete Under Different Curing Conditions. Ain Shams Engineering Journal, pp: 79-86.
- Morrison, R.E. (1970). A Review of Ash Specifications. Symposium on Fly Ash Utilization, Pittsburg, pp. 24-31.
- Nergis, V. (2007). Yüksek Dayanımlı Betonlarda Durabilite ve İşlenebilirlik. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, s. 97.
- Neville, A.M. (2011). Properties of Concrete, fifth ed.. Pearson Education Limited, Edinburg Gate, UK, 872 s.
- Neville, A.M. (1995). Properties of Concrete. Longman Group, Burnt Mill, Harlow Essex CM 20 2JE, ISBN: 0-582-23070-5, 844 s.
- Nguyen Q.D. and Boger, D.V. (1992). Measuring the Flow Properties of Yield Stress Fluids. Annu. Rev. Fluid Mech. pp.47-88. doi:10.1146/annurev.fl.24.010192.000403.
- Okamura, H. and Ozawa,K. (1995). Mix-Design for Self-Compacting Concrete. Concrete Library of JSCE, Tokyo, pp. 107-120.
- Okamura, H. (1997). Self Compacting High Performance Concrete. Concrete International, Vol:19, No:7, pp. 50-54.
- Onacak, T. (1990). Borlu Atıksuların Eskişehir Kırka Yöresi Yüzey Sularına Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeo. Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, 63 s.
- Ozawa, K., Sakata, N. and Okamura, H. (1995). Evaluation of Self-Compactibility of Fresh Concrete Using the Funnel Test. Concrete Library of JSCE, Vol:25, pp. 59-75.
- Ören, Y., Linder, C., Daltrophe, N., Mirsky, Y., Skorka, J. ve Kedem, O. (2006). Boron Removal from Desalinated Seawater and Brackish Water by Improved Electrodialysis, Desalination, pp.52-54.
- Özkul, M.H. (2002). Beton Teknolojisinde Bir Devrim: Kendiliğinden Yerleşen Beton. THBB Dergisi, ss. 64-71.

- Özorak, C. (2014). Bor Atığı Katkılı Polimer Kompozitlerin Aşınma ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 87 s.
- Pane, I. and Hansen, W. (2005). Investigation of Blended Cement Hydration by Isothermal Calorimetry and Thermal Analysis. Cem. Concr. Res. pp. 1155-1164. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.027.
- Pehlivanoglu, H.E., Davraz, M. ve Kılınçarslan, Ş. (2013). Bor Bileşiklerinin Çimento Priz Süresine Etkisi ve Denetlenebilirliği. SDU International Technologic Science, Vol: 5, No: 3, pp. 39-48.
- Postacıoğlu, B. (1981). Cisimlerin Yapısı ve Özellikleri, Cilt-I, İç Yapı ve Mekanik Özellikler. İTÜ Yayını, 614 s.
- Postacıoğlu, B. (1986). Yapı Malzemesi Üretiminde ve Tüketiminde Karşılaşılan Sorunlar. Türkiye İnşaat Malzemeleri Paneli, İstanbul.
- Ramachandran V.S. and Malhotra, M. (1984). Concrete Admixtures Handbook-Part 7: Superplasticizers. Noyes Publications, pp. 462-463.
- Reiner, M. (2007). Technology, Environment, Resource and Policy Assessment of Sustainable Concrete in Urban Infrastructure. Ph.D.Thesis, University of Colorado ar Denver, USA.
- Roussel, N. (2006). A Thixotropy Model for Fresh Fluid Concretes. Theory Validation and Applications, Cement and Concrete Research, Vol: 36, pp.1797-1806.
- Ruiz, A.L., Platret, G., Massieu, E. and Ehrlacher, A. (2005). The Use of Thermal Analysis in Assessing The Effect of Temperature on a Cement Paste. Cement and Concrete Research, pp. 609-613.
- Saçlı, İ.H. (2015). Ordu İli Fındık Bahçelerinin Bor Beslenme Durumunun Saptanması. Yüksek Lisans Tezi, Ordu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ordu, 77 s.
- Safiuddin, M. (2008). Development of Self-Consolidating High Performance Concrete Incorporating Rice Husk Ash. Thesis Presented to the University of Waterloo in Fulfillment of the Thesis Requirement for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering, p. 326.
- Sağlam, A.R., Parlak, N., Doğan, Ü.A., Özkul, M.H. (2004). Kendiliğinden Yerleşen Beton ve Katkı-Çimento Uyumu. Beton Kongresi 2004, s. 213-224.
- Sağlam, R.A., Parlak, N., Doğan, A.Ü. ve Özkul, M.H. (2005). Kendiliğinden Yerleşen Betonda Çimento Katkı Uyumu. 6.Ulusal Beton Kongresi, İTÜ, s. 213-224, İstanbul.
- Sağlık, A., Kocabeyler, F. ve Tunç, E. (2007). Kimyasal ve Mineral Katkıların Kütle Beton Tasarımında Yeri. II.Yapılarda Kimyasal Katkıları Sempozyumu, Ankara, s. 277-297.

- Saha, A.K. (2018). Effect of Class F-Fly Ash on the Durability Properties of Concrete. Sustainable Environment Research, Volume: 28, pp: 25-31.
- Sarıdemir, H. (2006). Mineral ve Süper Akışkanlaştırıcı Katkıların Kendiliğinden Yerleşen Betonun İşlenebilme ve Basınç Dayanımına Etkisi. Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 78 s.
- Schutter, G.D., Bartos, P.J.M., Domone, P. ve Gibbs, J. (2008). Self-Compacting Concrete. Whittles Publishing, Dunbeath, Scotland, p. 312.
- Sevim, U.K., Öztürk, M., Bankir, M.B. ve Aydın, U. (2017). Utilization of Colemanite Waste in Concrete Design. Int. J. Adv. Eng. Res. Sci., pp. 170-175. doi:10.22161/ijaers.4.12.25.
- Shah, P. ve Ahmad, S.H. (1994). High Performance Concretes and Applications. Tottenham Court Road, London, pp. 141-374.
- Skarendahl, A. ve Petersson, O. (2000). Self-Compacting Concrete. State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC, 154 s.
- Şahmaran, M., Yaman, İ., ve Tokyay, M. (2004). Yeni Nesil Yüksek Akışkanlaştırıcı Katkı Maddeleri ile Yüksek Hacimde Uçucu Kül İçeren Kendiliğinden Yerleşen Beton. Beton 2004 Kongresi, İstanbul, s. 225-233.
- Şeker, O. (2020). Granüle Yüksek Fırın Cürufunun Kendiliğinden Yerleşen Beton Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Bartın, 93 s.
- Targan, Ş., Erdoğan, Y., Olgun, A., Zeybek, B. ve Sevinç, V. (2002). Kula Cürufu, Bentonit ve Kolemanit Atıklarının Çimento Üretiminde Değerlendirilmesi. I.Uluslararası Bor Sempozyumu, Kütahya, s. 259-265.
- Targan, Ş., Olgun, A., Erdoğan, Y. ve Sevinç, V. (2003). Influence of Natural Pozzolan, Colemanite Ore Waste, Bottom Ash and Fly Ash on the Properties of Portland Cement. Cem.Concr.Res., pp. 1175-1182. doi:10.1016/S0008-8846(03)00025-5.
- Tattersall, G.H. ve Banfill, P.F.G. (1983). Rheology of Fresh Concrete. Pitman Advanced Pub. Program, Boston, USA, p. 256.
- Tattersall, G.H. (1991). Workability and Quality Control of Concrete, E&F.N. Spon Publisher, London, p. 262.
- TMMOB. (2016). Türk Mühendis ve Mimar Odaları Birliği Bor Raporu. ISBN: 978-605-01-0883-5.
- Topçu, İ.B., Canbaz, M. ve Karakurt, C. (2006). Beton Üretiminde Kimyasal Katkı Kullanımı. Politeknik Dergisi, Cilt: 9, Sayı:1, s. 59-63.

- Topçu, İ.B., Ünal, O. ve Uygunoğlu, T. (2007). Kendiliğinden Yerleşen Betonda Mineral Katkıların Taze Beton Özelliklerine Etkilerinin Araştırılması. 2.Yapıda Kimyasal Katkılar Sempozyumu, Ankara, s. 181-193.
- Topçu, İ.B. ve Uygunoğlu, T. (2008). Kendiliğinden Yerleşen Betonda Pomza Hafif Agregası Kullanımının Araştırılması. Beton Prefabrikasyon, Sayı: 85, s. 5-14.
- Topçu, İ.B., ve Uygunoğlu, T. (2008). Kendiliğinden Yerleşen Harçlarda Harç Bileşiminin Eşik Kayma Gerilmesine Etkisi. Çimento ve Beton Dünyası Dergisi, s. 82-98.
- Toros, H. (1987). Afşin Elbistan Termik Santrali Uçucu Küllerinin Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 117 s.
- TS EN 1008 (2003). Beton Karma Suyu Numune Alma ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dâhil, Suyun Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları, Ankara.
- TS EN 12350-8 (2010). Taze Beton Deneyleri-Bölüm 8-KYB-Çökme Yayılma Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-9 (2010). Taze Beton Deneyleri-Bölüm 9-KYB-V Hunisi Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-11 (2010). Taze Beton Deneyleri-Bölüm 11-KYB-Elekte Ayırışma Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-12 (2010). Taze Beton Deneyleri-Bölüm 12-KYB-J Halkası Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-2 (2019). Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 2: Dayanım Deneylerinde Kullanılacak Deney Numunelerinin Hazırlanması ve Küre Tabi Tutulması. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3 (2010). Sertleşmiş Beton Deneyleri-Bölüm 3: Deney Numunelerinde Basınç Dayanımı Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 12504-4 (2004). Beton Deneyleri-Bölüm 4: Ultrases Geçiş Hızının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-3 (2010). Çimento Deney Metotları-Bölüm 3- Priz Süresi ve Hacim Genleşme Yayını. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1. (2002). Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriteri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 206. (2014). Beton Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk. Bölüm 4: Sınıflandırma, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS 802 (2009). Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2 (2002). Beton, Harç ve Şerbet için Kimyasal Katkılar, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Turner, K., Bui, V.K., Montgomery, D. ve Hinczak, I. (2002). Rapid Testing Method for Segregation Resistance of Self-Compacting Concrete. Cement and Concrete Research, pp.1489-1496.
- Uygunoğlu, T. (2008). Hafif Agregalı Kendiliğinden Yerleşen Betonun Özellikleri. Doktora Tezi, Isparta Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta, 155 s.
- Uygunoğlu, T., Güneş, İ., Ersoy, B. ve Evcin, A. (2017). Kendiliğinden Yerleşen Polimerik Harçlarda Mineral Katkının Reolojik Özelliklere Etkisi. Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Dergisi, s. 1365-1377.
- Uysal, M., Yılmaz, K. ve İpek, M. (2012). The Effect of Mineral Admixtures on Mechanical Properties, Chloride İon Permeability and İmpermeability of Self-Compacting Concrete. Construction and Building Materials, pp: 263-270.
- WHO. (1998). Environmental Health Criteria 204 Boron. International Programme on Chemical Safety, Ohio, USA.
- Varshney A., Gohil, S., Chalke, B.A., Bapat, R.D., Mazumder, S., Bhattacharya, S. and Ghosh, S. (2017). Rheology of Hydrating Cement Paste: Crossover Between Two Aging Processes. Cem. Concr. Res., pp. 226-231.
- Volkman, D.E and Bussolini, P.L. (1992). Comparison of Fine Particle Colomanite and Boron Frit in Concrete for Time Strength Relationship. Journal of Testing and Evaluation, Vol: 20, No:1. ISSN 0090-3973.
- Yahia, A., Esmaeilkhani, B., Feys, D. and Khayat, K.H. (2014). Effects of Mix Design Parameters and Rheological Properties on Dynamic Stability of Self-Consolidating Concrete. Cement and Concrete Composites, Vol: 54, pp.21-28.
- Yılmaz, A.E, Boncukoğlu, R.Kocakerim, M.M. ve Keskinler, B. (2005). The Investigation of Parameters Affecting Boron Removal by Electrocoagulation Method. J.Hazard, Mater, B125, pp.160-165.
- Youjun, X., Baoju, L., Shiqiong, Z. and Qianlian, Y. (2000). Influence of Ultrafine Fly Ash Composite on the Fluidity and Compressive Strength of Concrete. Cement Concrete Research, 30, pp.1489-1493.
- Yüceer, Z. ve Gürdal, H. (2004). Türkiye ve Dünyada Kendiliğinden Yerleşen Beton Uygulamaları. Hazır Beton Kongresi 2004, İstanbul, s. 266-276.

