

**BORLU AKTİF BELİT ÇİMENTOLU ISIL İŞLEM
GÖRMÜŞ VE GÖRMEMİŞ BETONLARIN
HİDRATASYON ÖZELLİKLERİ**

İlker FAYETORBAY

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN
2013
Her Hakkı Saklıdır**

**ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**BORLU AKTİF BELİT ÇİMENTOLU ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ VE
GÖRMEMİŞ BETONLARIN HİDRATASYON ÖZELLİKLERİ**

İlker FAYETORBAY

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ERZURUM
2013**

Her Hakkı Saklıdır



**T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TEZ ONAY FORMU

**BORLU AKTİF BELİT ÇİMENTOLU ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ VE GÖRMEMİŞ
BETONLARIN HİDRATASYON ÖZELLİKLERİ**

Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN danışmanlığında, İlker FAYETORBAY tarafından hazırlanan bu çalışma 06/08/2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans tezi olarak ~~oybirliği/oy çokluğu~~ (3/3) ile kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Ensar OĞUZ

İmza :

Üye : Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

İmza :

Üye : Doç. Dr. Ahmet TORTUM

İmza :

Yukarıdaki sonucu onaylıyorum

Prof. Dr. İhsan EFEOĞLU
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: BAP 2008/154

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BORLU AKTİF BELİT ÇİMENTOLU ISIL İŞLEM GÖRMÜŞ VE GÖRMEMİŞ BETONLARIN HİDRATASYON ÖZELLİKLERİ

İlker FAYETORBAY

Atatürk Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

Bu tez çalışmasında, Borlu Aktif Belit (BAB) çimentolu harç numunelerinin hidratasyon ısıları ve hızları yarı adyabatik yöntem kullanılarak belirlenmiştir. BAB çimentosuyla beraber 6 farklı çimentolu harç numuneleri üzerinde de aynı deneyler tekrarlanmış ve hidratasyon özellikleri ortaya konulmuştur. Çimento tiplerine ait hidratasyon ısı-zaman, hidratasyon hız-Zaman grafikleri bütün çimento tipleri için karşılaştırmalı olarak hazırlanmış olup hidratasyon süreçleri bölümlendirilerek detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca hidratasyon özellikleriyle dayanım ilişkilerini belirleyebilmek amacıyla ısıl işlem görmüş ve görmemiş 3 farklı çimento tipindeki betonlara; basınç dayanımı, schmidt çekici, birim ağırlık gibi çeşitli deneyler uygulanmış ve deney sonuçları grafikler yardımıyla yorumlanmıştır.

Sonuç olarak Borlu Aktif Belit (BAB) çimentolu ısıl işlem görmüş ve görmemiş betonların hidratasyon özellikleri karşılaştırmalı olarak incelenmiş olup BAB çimentolu numune harçlarının hidratasyon ısılarının deney yapılan diğer çimento tiplerine göre oldukça düşük olduğu tespit edilmiştir. Isı çıkış hızlarına göre hidratasyon süreçleri ayrı ayrı karşılaştırmalı olarak analiz edildiğinde ise yine BAB çimentolu numunelerin, alit fazının olmayışı ve düşük C₃A içeriğinin büyük avantajlar sağladığı görülmüş olup konu araştırma bulguları ve tartışma bölümünde detaylı olarak irdelenmiştir.

2013, 255 Sayfa

Anahtar Kelimeler: Borlu aktif belit çimento (bab), yarı adyabatik yöntem, hidratasyon süreçleri, hidratasyon özellikleri

ABSTRACT

Ms Thesis

HYDRATION PROPERTIES OF STEAM CURED AND NON-STEAM CURED BORON ACTIVE BELITE CEMENT CONCRETE

İlker FAYETORBAY

Ataturk University
Graduate school of Natural and Applied sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN

In this study, boron active belit cementitious mortar samples were determined the hydration heat and hydration rate using by semi-adiabatic method. the same experiments were repeated in 6 different cement type and its hydration properties were determined. For samples heat-hydration time, hydration velocity-time graphs for all types of cement were prepared comparatively. and hydration processes were comparatively analyzed in detail. additionally in order to determine the strength properties of hydration relations, schmidt hammer, unit weight, compressive strength tests applied to samples and the test results are interpreted with the help of graphs.

As a result hydration properties of steam cured and non-steam cured boron active belite cement concrete were comparatively analyzed and heat of hydration of BAB cementitious mortar samples were found significantly lower than other types of cement. As the cause of this situation is the lack of alit (C_3S) phase and low C_3A (belit) content of boron active cement. The Topic were discussed in detail in the research findings and discussion.

2013, 255 Pages

Keywords: boron active belite cement, semi-adiabatic method, hydration process, hydration properties

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince her türlü yardım, destek ve anlayışını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Doç. Dr. Abdulkadir Cüneyt AYDIN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmamın değişik aşamalarında yardım ve desteğini esirgemeyen Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Doktora öğrencisi Sayın İnş. Yük. Mühendisi Sayın Ali ÖZ'e, arkadaşım ve yüksek lisans öğrencisi Sayın İnş. Yük. Müh. Fuat CANDAN'a içtenlikle teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, her zaman ve her konuda yanımda olan, desteklerini esirgemeyen çok değerli aileme de şükranlarımı sunarım.

İlker FAYETORBAY

Temmuz 2013

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	ix
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
1.1. Amaç	2
1.2 Kapsam.....	2
1.3 Kaynak Özetleri	3
2. KURAMSAL TEMELLER.....	10
2.1. Çimento	11
2.1.1. Portland çimentosu.....	12
2.1.1.a. Portland çimento tarihçesi	12
2.1.1.b. Portland çimentosunun Türkiye’deki tarihi gelişimi.....	15
2.1.1.c. Portland çimento hammaddeleri.....	17
2.1.1.d. Portland çimento oksitleri	26
2.1.1.e. Portland çimento ana bileşenleri	28
2.1.1.f. Portland çimento üretimi süreci.....	41
2.1.1.g. Portland çimento hidratasyonu ve hidratasyon ürünleri.....	52
2.1.1.h. Çimento üretiminde enerji kullanımı	70
2.1.2. TS-EN-197-1’e göre çimento çeşitleri ve işaretleme.....	74
2.1.2.a. Genel çimento tipleri, bileşim ve işaretleme	75
2.1.2.b. Standart İşaretleme.....	78
2.1.3. Bazı çimento türleri ve özellikleri.....	81
2.1.3.a. Cürufu çimentolar	81
2.1.3.b. Traslı çimentolar	92
2.1.3.c. Kalker katkılı çimentolar.....	107
2.1.3.d. Silis dumanı katkılı çimentolar	115

2.1.3.e. Özel çimentolar	136
2.1.3.f. TS 13353 Borlu Aktif Belit (Bab) Çimentosu	138
3. MATERYAL ve YÖNTEM.....	160
3.1. Materyal	160
3.1.1. Agregas.....	160
3.1.2. Çimento	161
3.1.3. Karma suyu	161
3.1.4. Standart kum	161
3.1.5. Mineral yağ	162
3.1.6. Diğer malzemeler	162
3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler	162
3.2.1. Elekler	162
3.2.2. Betoniyer	163
3.2.3. Çökme konisi ve şişleme çubuğu	164
3.2.4. Kalıplar.....	164
3.2.5. Pres.....	165
3.2.6. Karıştırıcı.....	165
3.2.7. Shmidt çekici.....	166
3.2.8. Digital boy ölçüm cihazı	167
3.2.9. Teraziler.....	167
3.2.10. Mortar Kabı	168
3.2.11. Kalorimetre	168
3.2.12. Termometre	170
3.2.13. Bilgisayar ve ağ sistemi	170
3.2.14. Enjektör	171
3.2.15. Atmosferik buhar kuru makinesi.....	172
3.2.16. Diğer Aletler.....	173
3.2.17. Agregas deneylerinde uygulanan yöntemler	174
3.2.17.a. Tane büyüklüğü dağılımı (Granülometri)	175
3.2.17.b. Organik kökenli madde tayini deneyi	176
3.2.18. Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi	177
3.2.19. Beton dökümü	178

3.2.20. Taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	179
3.2.21. Betonun kürü.....	180
3.2.22. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler.....	182
3.2.22.a. Schmidt çekici yöntemi	183
3.2.22.b. Yarı adyabatik yöntemle hidrasyon ısıısının tayini	183
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA	189
4.1. Agregada deneyleri sonuçları	189
4.1.1. Tane büyüklüğü dağılımı (Granülometri)	189
4.1.2. Agregada organik madde tayini	190
4.2. Taze betonun birim hacim ağırlığı	190
4.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri.....	191
4.3.1. Schmidt çekici ve basınç dayanımı sonuçları ve değ�rlendirilmesi.....	191
4.3.2. Hidrasyon deney sonuçları ve değ�rlendirilmesi	198
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER	234
KAYNAKLAR	239
EKLER.....	249
EK 1	250
EK 2	251
EK 3	252
EK 4	253
EK 5	254
EK 6	255
ÖZGEÇMİŞ	256

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

cal	kalori
cm	santimetre
cm ²	santimetrekare
cm ³	santimetreküp
dm ³	desimetreküp
g	gün
gr	gram
J	Joule
kg	kilogram
kJ	Kilo Joule
lt	litre
m ³	metreküp
mg	miligram
ml	mililitre
mm	milimetre
mm ²	milimetrekare
MPa	megapaskal
°C	santigrat derece
ppm	parts per million(milyonda bir)
s	saniye

Kısaltmalar

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAB	Borlu Aktif Belit
BOREN	Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü
CEM I	Portland Çimento
CEM II	Cüruflu Portland Çimento
DIN	Alman Standartları Enstitüsü
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
DSİ	Devlet Su İşleri
DSİ TAKK	Devlet Su İşleri Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol
GYFC	Granüle Yüksek Fırın Cürufu
HES	Hidroelektrik Santral
MTON	Milyon Ton
PÇ	Portland Çimentosu
SA	Süperakışkanlaştırıcı
SEM	Taramalı Eltron Mikroskobu
TB	Teknik Bülten
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TOC	Toplam Organik Karbon
TS	Türk Standardı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
XRD	X-Işını Kırınımı
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
YNSA	Yeni nesil süperakışkanlaştırıcı

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Klinker minerallerinin dayanımlarının gelişimi	30
Şekil 2.2. Çimento üretim tesisleri	42
Şekil 2.3 Çimento üretiminde kullanılan tipik döner fırın	44
Şekil 2.4. Çimento Üretim Prosesi	45
Şekil 2.5. Klinker soğuma süreci	46
Şekil 2.6. Farinden klinkere geçişte çimento ham maddelerindeki mineral faz değişimleri.....	47
Şekil 2.7. Klinker mikroskop fotoğrafları	52
Şekil 2.8. Hidratasyon sürecinde ana bileşenlerin durumu.....	54
Şekil 2.9. Hidratasyon sürecinde çimento hamurunun durumu	55
Şekil 2.10. Hidratasyon süreci ve meydana gelen değişiklikler	56
Şekil 2.11. Hidratasyon sürecinde kalsiyum silikat içinde gözeneklerin değişimleri.....	57
Şekil 2.12. Çimento hamurunun hidratasyon bağlangıcından; a) 10 dk, b) 2 saat, c) 10 saat, d) 20 saat, e) 24 saat ve f) 7 gün sonra mikroyapı görünüşleri .	62
Şekil 2.13. Çimento hamurunun boşluklu yapısı	64
Şekil 2.14. Çimento inceliği-dayanım ilişkisi.....	67
Şekil 2.15. Su/ Çimento oranının çimento hamuru üzerindeki değişimin etkisi	68
Şekil 2.16. Çimento hamurunun sahip olduğu boşluklu yapı	69
Şekil 2.17. CO ₂ salınımının çimento tiplerine göre değişimi	73
Şekil 2.18. Üçlü diyagramda YFC'nin yeri	82
Şekil 2.19. Cürüflü çimentonun üretim şeması.....	83
Şekil 2.20. Çimentodaki doğal puzolan miktarının normal kıvam için gerekli su miktarına etkisi.....	96
Şekil 2.21. Portland çimentosunun doğal puzolanlarla ikame edildiği harçlarda dayanım	99
Şekil 2.22. Doğal puzolanlı harçların dayanımı -dayanım değerleri portland çimentolu harçların 28 günlük dayanımının yüzdesi olarak ifade edilmiştir.	100

Şekil 2.23. Çimentodaki doğal puzolan miktarının farklı inceliklerdeki çimentolu harçlarda 2 ve 28 günlük basınç dayanımına etkisi	101
Şekil 2.24. Çeşitli puzolan ikamelerine göre zaman bağlı olarak kuruma büzülmesi ..	104
Şekil 2.25 Portland çimentosu ve portland puzolan katkılı çimentoların erken safha hidratasyonları	106
Şekil 2.26. Çimentodaki puzolan miktarının farklı yaşlardaki hidratasyon ısılarına etkileri	106
Şekil 2.27. Doğal puzolanların 7 günlük hidratasyona etkisi.....	107
Şekil 2.28. Silis dumanının çeşitli mikroskoplarla çekilmiş resimleri.....	116
Şekil 2.29. Silis dumanının ara yüze etkisi	118
Şekil 2.30. Silis Dumanlı Hamurlarda CH Miktarı.....	119
Şekil 2.31. Silis dumanı katkılı hamurlarda hidratasyon ısısı.....	119
Şekil 2.32. Silis dumanı katkısının betonda su ihtiyacına etkisi.....	122
Şekil 2.33. Silis dumanının betonda terlemeye etkisi.	123
Şekil 2.34 Sertleşmiş çimento hamurunda gözenek dağılımı	125
Şekil 2.35. Silis dumanının beton dayanımına etkisi	126
Şekil 2.36 Betonlarda s/ç oranı-dayanım ilişkisi	128
Şekil 2.37. Silis dumanı katkısının beton basınç dayanımına etkisi	129
Şekil 2.38. Silis dumanlı betonlarda dayanım artışı	129
Şekil 2.39. Uçucu küllü betonun dayanımı üzerinde silis dumanının etkisi.....	130
Şekil 2.40. Silis dumanlı betonlarda kuruma rötresi.....	134
Şekil 2.41. Ticari açıdan en önemli ve en yaygın olarak kullanılan bor mineralleri	140
Şekil 2.42. BAB çimentosunun izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen hidratasyon hızı ve ısısı ile Portland çimentosu ve %35 uçucu küllü Portland çimentosunun karşılaştırmalı olarak verilen hidratasyon hızları.....	149
Şekil 2.43. BAB çimentosunun izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen hidratasyon hızı ve ısısı ile Portland çimentosu ve %35 uçucu küllü Portland çimentosunun karşılaştırmalı olarak verilen hidratasyon toplam hidratasyon ısıları.	149

Şekil 2.44. Göлтаş Çimento Fabrikası ürünü 4 farklı incelikteki BAB çimentolarının izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen ve Portland çimentosu ile karşılaştırmalı olarak verilen hidrasyon hızları	150
Şekil 2.45. Göлтаş Çimento Fabrikası ürünü 4 farklı incelikteki BAB çimentolarının izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen ve Portland çimentosu ile karşılaştırmalı olarak verilen toplam hidrasyon ısıları	150
Şekil 2.46. Göлтаş Çimento Fabrikası ürünü BAB çimentosunun izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen ve BAB çimentosuna %10 ve %20 uçucu kül ilavesi ile karşılaştırmalı olarak verilen hidrasyon hızları.....	151
Şekil 2.47. Göлтаş Çimento Fabrikası ürünü BAB çimentosunun izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen ve BAB çimentosuna %10 ve %20 uçucu kül ilavesi ile karşılaştırmalı olarak verilen toplam hidrasyon ısıları	151
Şekil 2.48. BAB çimentosu ile portland CEM I 42,5R çimentosu su geçirgenliği.....	155
Şekil 2.49. Ermenek baraj şantiyesinde imal edilen 3 farklı bağlayıcılı (3*3*3) m boyutlarındaki beton blokların içerisine yerleştirilen sıcaklık ölçerlerin (Thermo Couple: Isıl Çift) şematik olarak gösterimi	158
Şekil 2.50. 3 Farklı bağlayıcı ile yapılan kütle beton bloklarının merkezlerinde oluşan adyabatik sıcaklık artışları	158
Şekil 3.1. Agrega deneylerinde kullanılan elek takımı	163
Şekil 3.2. Betoniyer	163
Şekil 3.3. Beton numune kalıpları.....	164
Şekil 3.4. Beton numunelerin kırıldığı pres	165
Şekil 3.5. Çimento numune harçlarının karıştırıldığı karıştırıcı	166
Şekil 3.6. Schmidt çekici	166
Şekil 3.7. Dijital boy ölçüm cihazı	167
Şekil 3.8. Terazı	167
Şekil 3.9. Mortar kabı	168
Şekil 3.10. Tipik kalorimetre kesiti (TS-EN-196/9).	169

Şekil 3.11. Kalorimetre Çifti.....	170
Şekil 3.12. Deney düzeneğinden bir görünüm.....	171
Şekil 3.13. Enjeksiyon işlemi	172
Şekil 3.14. Atmosferik buhar kürü makinesi	172
Şekil 3.15. Çökme değeri ölçümü.....	179
Şekil 3.16. Kür havuzu ve su kürü uygulanan numuneler	181
Şekil 3.17. Sertleşmiş beton deneyleri için hazırlanan numuneler	182
Şekil 3.18. Deney düzeneği	184
Şekil 4.1. Suda kür Yöntemiyle(28 Gün) Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanım Grafiği.....	192
Şekil 4.2. Atmosferik Buhar Kürü Yöntemiyle (36,5 Saat) Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanım Grafiği	193
Şekil 4.3. Tüm Gruplara Ait Suda Kür (28 Gün), Buhar Kürü Yöntemleriyle Kür Edilen Numunelere Ait Basınç Dayanım Değerleri Grafiği	195
Şekil 4.4. Tüm Gruplara Ait Suda Kür(28 Gün) ve Buhar Kürü Yöntemleriyle (36,5 Saat) Kür Edilen Numunelere Ait Basınç Dayanım Değerleri Karşılaştırma Bar Grafiği.	197
Şekil 4.5. Tüm Gruplara Ait Schmidt Çekici-Basınç Dayanım İlişkisini Gösteren Bar Grafikler	197
Şekil 4.6. BAB, CEM I 42,5 R ve CEM I 52,5 R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isılarını (Toplam Isı Mik.) Gösteren Grafik	205
Şekil 4.7. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik.....	208
Şekil 4.8. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R çimentolarının hidratasyon aşamalarını gösteren grafik (Karıştırma süreci-uyku süreci)	209
Şekil 4.9. Hidratasyon karıştırma ve uyku sürecinde çimento hamurunda meydana gelen değişiklikler	210
Şekil 4.10. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R çimentolarının hidratasyon aşamalarını gösteren grafik (Sertleşme süreci)	212
Şekil 4.11. Sertleşme sürecinde C-S-H ve C-H oluşumu	213
Şekil 4.12 Taramalı elektron mikroskobundan bakıldığında çimento hamurunda oluşan etrenjitlerin görünümü	214

Şekil 4.13. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R çimentolarının hidratasyon aşamalarını gösteren grafik (Soğuna süreci)	214
Şekil 4.14. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R çimentolarının hidratasyon aşamalarını gösteren grafik (Yoğunlaşma süreci).....	215
Şekil 4.15. Yoğunlaşma Süreci Boyunca Çimento Hamurundaki Değişim	216
Şekil 4.16. BAB, CEM II 32,5-B-M (P-LL) R, CEM II 42,5-B-M (P-LL) N, CEM II 42,5-A-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isılarını (Toplam Isı Mik.) Gösteren Grafik	217
Şekil 4.17. BAB, ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak hidratasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik	220
Şekil 4.18. BAB, CEM II 42,5-B-M (P-LL) N Çimentolarının zamana bağlı olarak hidratasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik	221
Şekil 4.19. BAB,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak hidratasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik	221
Şekil 4.20. CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik.....	222
Şekil 4.21. BAB, CEM II 42,5-A-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak hidratasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik	222
Şekil 4.22. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik.....	223
Şekil 4.23. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentolarının zamana bağlı olarak hidratasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik	224
Şekil 4.24. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik.....	225
Şekil 4.25. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik.....	228
Şekil 4.26. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve	

CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak	
Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik.....	229
Şekil 4.27. Hidratasyon ısısı ile suda kür yöntemiyle 7 günlük basınç	
mukavemetlerinin ilişkisini gösteren grafik.....	230
Şekil 4.28. Hidratasyon ısısı ile atmosferik buhar kürü yöntemiyle 36,5 saatlik	
basınç mukavemetlerinin ilişkisini gösteren grafik.....	231
Şekil 4.29. Yarı adyabatik yöntemle 41 saat sonunda toplam hidratasyon ısısı ile	
su kürü yöntemiyle 7 günlük basınç mukavemetlerinin ilişkisini	
gösteren bar grafik.....	231
Şekil 4.30. Yarı adyabatik yöntemle 41 saat sonunda toplam hidratasyon ısısı ile	
atmosferik buhar kürü yöntemiyle 36,5 saatlik basınç	
mukavemetlerinin ilişkisini gösteren bar grafik.....	232

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Deneylerde Kullanılan Malzeme İhtivası	4
Çizelge 2.1 Çimentonun kısa tarihçesi.....	15
Çizelge 2.2. Türkiye Türkiye’de Yıllara Göre Çimento Üretimi/Tüketimi.....	16
Çizelge 2.3. Çimento üretiminde dünyanın büyük üreticiler	17
Çizelge 2.4. Kireçtaşı oluşum formu	18
Çizelge 2.5. İnce taneli durumdaki doğal puzolan katkıların beton özelliklerine etkileri	21
Çizelge 2.6. Yüksek fırın cürufu için ortalama kimyasal bileşim örneği	22
Çizelge 2.7. Alaşım Türü-SiO ₂ ilişkisi.....	24
Çizelge 2.8. Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları.....	26
Çizelge 2.9. Çimentonun Ana Bileşenleri	28
Çizelge 2.10. Yedi eksen sistemi	30
Çizelge 2.11. Kristal sistemleri.....	31
Çizelge 2.12. Çimentodaki ana bileşenlerin relatif özellikleri)	35
Çizelge 2.13. Normal Portland Çimentosunun (ASTM Tip I'in) kimyasal analizi sonucunda elde edilen tipik değerler	36
Çizelge 2.14. Çimento üretim süreci ilk adımları	43
Çizelge 2.15. Genel çimentoların bileşimi.....	79
Çizelge 2.16. İki Ayır İncelikte Öğütülmüş Cürufıyla Üretilmiş Çimentoların Hızlandırılmış Dayanım Deney Sonuçları.....	87
Çizelge 2.17. Kalker, doğal puzolan ve uçucu kül katkılı (%15 ikame oranı) çimentoların öğütme parametreleri ve bu çimentolarla hazırlanan örneklerin basınç dayanımları	110
Çizelge 2.18. Kalker ikame oranı ile fiziksel ve mekanik özelliklerin değişimi	112
Çizelge 2.19. TS EN 197-1 çimentoları için uygun görülen mekanik ve fiziksel özellikler	135
Çizelge 2.20. Gerekli Kimyasal özellikler için Karakteristik Değerler	136
Çizelge 2.21. BAB çimentosunun bileşimi.....	144

Çizelge 2.22. BAB Çimentosunun karakteristik değerlerle ifade edilen kimyasal özellikleri.....	144
Çizelge 2.23. Göltaş Çim.Fab. ürünü farklı inceliklere ait BAB çimentosu üzerinde gerçekleştirilen fiziksel analiz deney sonuçları	145
Çizelge 2.24. BAB Çimentosunun karakteristik değerlerle ifade edilen mekanik ve fiziksel özellikleri.	146
Çizelge 3.1. CEN referans kum tane büyüklüğü dağılımı	161
Çizelge 3.2. Organik kökenli madde raporu	176
Çizelge 3.3. Beton karışım oranı.....	177
Çizelge 3.4. Deney gruplarında artan su ve değişen su/çimento oranları	178
Çizelge 3.5. Buhar kürü çevrimleri ve karakteristikleri.....	181
Çizelge 3.6. Hazırlanan numuneler ve kullanım sayıları	182
Çizelge 3.7. Hidratasyon hesaplamaları sonuçları (TS-EN-196/9)	185
Çizelge 3.8. İlk dört zaman aralığı için hesaplama detayları (TS-EN-196/9)	186
Çizelge 3.9. TS-EN-196/9 standartlarına göre hidratasyon ısısının yarı adyabatik yöntemle belirlenmesinde deneyinde kullanılan malzeme miktarları	187
Çizelge 4.1. Agregâ özellikler	189
Çizelge 4.2. Agregalar için elek analizi sonuçları	190
Çizelge 4.3. Sertleşmiş beton deneyleri sonuçları	191
Çizelge 4.4 Hidratasyon deneylerine tabi tutulan çimento tipleri.....	198
Çizelge 4.5. BAB, CEM I 42,5 R ve CEM II B-M 32,5 R çimentosuna ait kalorimetreden alınmış sıcaklık, toplam ısı değerleri.....	199
Çizelge 4.6. CEM-II/B-M(P-LL)-425N , CEM-II 42,5-A-M-(P-L)-R ve CEM I 52,5 R Çimentosuna ait Kalorimetreden Alınmış Sıcaklık, Toplam Isı Değerleri	202
Çizelge 4.7. Hidratasyon reaksiyon süreçleri	209
Çizelge 4.8. Hidratasyonu etkileyebilecek kimyasal analiz parametreleri	219

1. GİRİŞ

Beton, agrega, çimento, su ve gerektiğinde bazı katkı maddelerinin karılması ile elde edilen plastik karışımın belirli bir süre sonunda plastikliğini kaybederek sertleşen ve zamanla dayanım kazanan bir yapı malzemesidir.

Çimento hamurunun bağlayıcılık kazanma hızı ve miktar, çimento ile su arasındaki hidrasyonun (çimento ile su arasındaki kimyasalların) ne ölçüde oluştuğuna bağlıdır. hidrasyonun ne hızda ve ne ölçüde yer alabileceği hususu ise, sıcaklık ve rutubet ortamlarına ek olarak, büyük ölçüde çimento kompozisyonuna, çimento inceliğine,

Erdoğan'a göre (2000) çimento ve suyun birleşerek kimyasal reaksiyonların yer alması olayına "çimentonun hidrasyonu" denilmektedir (Erdoğan 2003). Güner ve Sürme'ye göre (2000) de priz süresi hidrasyonun sertleşme bölgesinde gerçekleşen ve çimentonun prizi su ile reaksiyona girmesi sonucu başlayan katılaşma olayına ise priz süresi denilmektedir. Standartlara göre bu olayın 1 ile 10 saat arasında gerçekleşmesi beklenir (Güner ve Sürme 2000).

Yine Erdoğan (1995) yapmış olduğu bir başka çalışmada, çimentoların katılaşması (prizi) ve sertleşmesi bu reaksiyonlar sonucunda meydana geldiğinden çimentonun hidrasyonu sözcüğü genellikle çimentonun su ile birleşerek sertleşmesi sürecini ifade ettiğini vurgulamaktadır (Erdoğan 1995).

Bu süreç içinde önce plastik bir çimento macunu oluşur, bu zamanla sertleşip son biçimini alır. Sertleşme iki aşamalıdır:

- Priz: Çimentonun suyla karışması sonunda oluşan macunun koyulaşması, bu karışıma biçim verilebilir, dayanımı çok azdır.
- Sertleşme: Macun giderek koyulaşıp sertleşir ve dayanım kazanır.

Çimentonun bu süreçlerinin incelenmesi çeşitli yöntemlerle belirlenmektedir. BAB çimentosunun hidrasyon ısısı için ise ilgili standartta 2 yöntemden bahsedilmektedir.

Bunlar Çözelti Methodu ve Yarı Adyabatik yöntemdir (TS EN 13353). Tezimizin ana konusunu oluşturan hidratasyon süreci yarı adyabatik yöntem yardımıyla belirlenmiştir.

Bu standard, Langavant yöntemi olarak da bilinen yarı adyabatik kalorimetreye çimentonun hidratasyon ısısının ölçüm yöntemini kapsar. Deneyin amacı ilk birkaç gün boyunca çimentonun hidratasyon ısısının sürekli olarak ölçülmesidir. Hidratasyon ısısı, bir gram çimento için joule (Joule. g⁻¹) olarak ifade edilir. Yarı adyabatik yöntemle 41 saatte elde edilen sonuçlar ile çözelti yöntemiyle 7 günde elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, iki yöntem arasında çok iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür (TS EN 196/9). Bu yüzden deneylerimizde 41 saatlik doneler esas alınmıştır.

1.1. Amaç

Bu çalışmada, yöremiz ve ülkemizde çok fazla miktarda bulunan B₂O₃ (Bor oksit)'un minerallerinden olan kolemanit katkılı yeni bir çimento tipinin hidratasyon ve dayanım özelliklerini belirleyebilmek amacıyla hidratasyon ısıları ve hızları yarı adyabatik yöntem kullanılarak belirlenmiştir.

1.2 Kapsam

BAB çimentosuyla beraber CEM II B-M(P-LL)32,5 R, CEM I 42,5-R, CEM II A-M (P-LL) 42,5 R, CEM II B-M (P-LL) 42,5 N, CEM I 52,5 R süper beyaz çimentolu harç numuneleri üzerinde de hidratasyon ısıları ve hızları yarı adyabatik yöntem kullanılarak belirlenmiştir. Bu çalışmayla hidratasyon özellikleri karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur. Çimento tiplerine ait hidratasyon ısı-Zaman, hidratasyon Hız-Zaman grafikleri bütün çimento tipleri için karşılaştırmalı olarak hazırlanmış olup hidratasyon süreçleri bölümlendirilerek detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca hidratasyon özellikleriyle dayanım ilişkilerini belirleyebilmek amacıyla ısıl işlem görmüş ve görmemiş CEM II B-M(P-LL)32,5 R, CEM I 42,5-R ve BAB çimento katkılı betonlara; basınç dayanımı, schmidt çekici, birim ağırlık gibi çeşitli deneyler uygulanmış ve deney sonuçları grafikler yardımıyla yorumlanmıştır. Bölümün sonunda daha önce yapılmış olan

alışmalar zetlenecektir. İkinci bölümde kuramsal temellere yer verilmiş olup, Üçüncü bölüm, materyal ve yöntem bölümlerinden oluşmaktadır. Materyal kısmında, çalışmada kullanılan malzemelerin özellikleri verilmektedir. Yöntem kısmı deneylerin yapılmasında kullanılan yöntemlerin detaylı olarak değerlendirilmesini kapsamaktadır. Dördüncü bölüm ise, deneysel yöntemler sonucu elde edilen bulgular ve bu bulguların tartışılmasına ayrılmaktadır. Çalışmanın bütününden çıkartılabilecek sonuçlar ve öneriler beşinci bölümde özetlenmekte ve bu son bölümü kaynaklar listesi izlemektedir.

1.3 Kaynak zetleri

Beton dökümü sonucunda oluşan reaksiyona istinaden oluşan ısıya hidrasyon ısısı denilmektedir. Bu reaksiyonlar, betonda içsel gerilmelere neden olur, bu gerilemelerde çatlaklara sebebiyet verir. Bu çatlaklar sebebiyle beton geçirimli hale gelir ve buda demir donatılarının korozyona uğramasına neden olur. Geçirimsizlik devam ettiği sürece donatı paslanmaya devam eder ve betonun taşıma kabiliyeti azalır.

Bütün bu nedenlerden dolayı hidrasyon ısını kontrol altında tutabilmek(düşürebilmek) son derece önemlidir. Hidrasyon ısını kontrol altında tutabilmek, etki eden faktörleri belirleyebilmek amacıyla bilim insanları yıllarca araştırmalar yapmıştır. Tez konumuzu oluşturan bu çalışmalar aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır.

Collepardi vd (1978; 1980) yılında hidrasyon kontrolünde ana bileşen etkisini araştırmak amacıyla bir araştırma yapmış ve doğal puzolan ikamesinin C_3A hidrasyonunun hızını yavaşlattığını tespit etmişlerdir. Bu azalmanın puzolanın tipine ve buradan hareketle puzolanın inceliğine bağlı olarak gerçekleştiği düşünülmektedir. Plowman (1981) aynı amaçla yapmış olduğu bir başka çalışmada doğal puzolanların hem laboratuvar da üretilen C_3A 'nın; hem de klinkerden ayırma yöntemiyle elde edilen C_3A 'nın hidrasyon hızını azalttığını saptamıştır.

Wainwright *et al.* (1980) cürufun imento hidrasyon kontrolü üzerindeki etkisini araştırmak amacıyla yapmış olduğu çalışmada cürufu imento kullanımı, hidrasyon

ısısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte olduğunu, hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi kısalttığını tespit etmişlerdir.

Regourd (1986) yapmış olduğu çalışmada, cürufun hidratasyon ısısının kontrolündeki etkisini belirleyebilmek amacıyla oluşturduğu 3 farklı kombinasyonda (Çizelge 1.1) kalorimetre yardımı ile 24 saatlik hidratasyon ısılarını belirlemiş ve cüruf katkılı çimentoların ilk 24 saatteki hidratasyon ısıları değerlerinin normal portland çimentolu bileşimlere göre düşük olduğunu tespit etmiştir. Ayrıca cüruf reaktivitesinde hidratasyon ısısında etkili olduğu yine bu çalışmada görülmüştür. Yine Regourd (1986) yaptığı bir araştırmada %70'in üstünde cüruf içeren çimentolarda erken dayanımlar daha çok cüruf reaktivitesine, daha az cüruf içeren çimentolarda ise daha çok klinker özelliklerinin etkisine bağlı olduğunu tespit etmiştir.

Çizelge 1.1. Deneylerde Kullanılan Malzeme İhtivası

Deney No	İhtivası
OPC	Normal Portland Çimentosu
1.Tür Cüruf	%70 Cüruf, %30 Portland Çimentosu
2.Tür Cüruf	%70 Cüruf, %30 Portland Çimentosu

Sellevold (1982); Meland (1983) ve Bentur vd (1989) yıllarında silis dumanı ikamesinin çimento hidratasyon kontrolü üzerindeki etkileri incelemek amacıyla yapmış oldukları araştırmalarda silis dumanı katkısının ilk 2-3 saat içinde hidratasyon ısısını arttırdığını, ancak ileri yaşlarda eşit çimento dozajı bazında açığa çıkan ısıyı azalttığını belirtmişlerdir. Araştırmacılara göre, başlangıçtaki ısı artışı silis dumanının çimento hidratasyonunu hızlandırması ile açıklanmaktadır. Yine Malhotra (1993) tarafınan benzer konulu bir araştırmada silis dumanı katkısının hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi çimentonun ne kadarı yerine katıldığına ve akışkanlaştırıcı kullanılma durumlarına bağlı olarak da değişebildiği tespit edilmiştir.

Hewlett (1986) tarafından yapılan araştırmada, ortamda doğal puzolanın varlığı C_3S hidratasyonunda hidratasyon ısısı-zaman eğrisinde bazı farklılıkların oluşmasına yol açtığını, eğride görülen durgun dönem (dormant period) kısaldığını ve ikinci tepe nokta doğal puzolan olmayan duruma göre biraz daha yükseldiğini tespit edilmiştir.

Editör Swamy (1992) tarafından, puzolan ikamesininin hidratasyon kontrolü üzerindeki etkilerini araştırmak için birçok araştırmacının yaptığı çalışmaları taramış olup, doğal puzolanlarla yapılan çalışmalara göre doğal puzolanlı çimentolarda bulunan portland çimentosu kısmının hidratasyonu trasın etkisiyle hızlandığını, bu durum genel olarak bütün ince öğütülmüş puzolanları kapsadığını belirlenmiştir.

Massazza and Daimon (1992) yine aynı amaçla yapmış olduğu bir başka araştırmada ise yüksek aktifliğe sahip bir tuf kullanımıyla C_3S hidratasyonunun hızlandığını belirlemişlerdir. Bu durumun sebebi, doğal puzolan parçacıklarının, yüksek incelikleri nedeniyle, ortamda hidratasyon ürünü olan C-S-H jellerinin toplanabileceği bir yüzey arz etmesiyle açıklanmaktadır. Böylelikle doğal puzolan, ortamda CSH jellerinin toplandığı bir çekirdek görevi üstlenmekte ve C_3S hidratasyonu ile açığa çıkan, göreceli olarak daha az geçirgen olan ve dolayısıyla, C_3S hidratasyonunu yavaşlatan CSH jellerinin C_3S üzerinde birikmesini önlediğini tespit etmişlerdir.

Takemeto *et al.* (1980) ve Hewlett (1998) yapmış oldukları çalışmalarda, puzolan etkisinin hidratasyon kontrolü üzerindeki etkilerini klinker fazından ayrı olarak bir bütün olarak araştırmışlar ve portland çimentosunun yerine doğal puzolan ikame edildiği durumlar için aşağıdaki sonuçları tespit etmişlerdir.

- i. Hidratasyon ısısı-zaman eğrisinde görülen durgun dönem (dormant period) kısalmır.
- ii. Hidratasyon ısısı-zaman eğrisinde ikinci tepe noktası bir miktar yükselir.
- iii. Genel olarak, doğal puzolan katkılı çimentonun klinker kısmının hidratasyonu hızlanır.

iv. Genel olarak, özgül yüzey alanı, kimyasal kompozisyon, yüzeyin fiziksel durumu ve alkalilerin çabuk ya da yavaş açığa verilmesi gibi puzolan özelliklerinin hepsinin klinker hidratasyonunun hızlanmasına etkisi olduğu söylenebilir.

Erdoğan (2002) tarafından kalker ikame oranının hidratasyon üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla bir araştırma yapılmış ve kalker ikame oranı %5 olan çimentolarda hidratasyon ısısının ilk zamanlarındaki gelişiminin sadece Portland çimento içeren numunelere göre daha hızlı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Erdoğan'ya göre toplam hidratasyon ısısı açısından da benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak daha yüksek ikame oranlarında, çimento miktarının azalması nedeniyle hidratasyon ısısının düşme eğiliminde olduğunu çalışmasında rapor etmiştir.

Rahhal (2005) tarafından yine benzer amaçla yapılmış olan çalışmada, belirli bir kullanım oranına kadar, ince öğütülmüş kalker tanecikleri kalsiyum silika hidrat ve kalsiyum hidroksitin oluşumu için çekirdek vazifesi görerek hidratasyonu hızlandırdığını ayrıca kalker katkısının hemikarbonat, monokarboalüminat ve kalsiyum trikarboalüminat oluşumunda rol oynayarak, hidratasyon ısısını, hidratasyonun erken aşamalarında arttırdığını tespit edilmiştir.

Rahhal and Tolero (2005) ince öğütülmüş kalker ve kuvars tozunun, farklı içeriklere sahip portland çimentolarına ikame edildiklerinde erken yaşlarda hidratasyon mekanizmasını nasıl etkilediklerini incelemişlerdir. Bu amaçla kalorimetre, hidrolik aktivite ve XRD analizleri yapılmıştır. Her iki inert katkı ilavesinin de farklı çimento içeriklerinde şiddeti değişmekle beraber, hidratasyonu aktive edici veya yavaşlatıcı etki gösterdiklerini belirlemişlerdir. Bu değişimin C_3A oranının çimentoda ikame miktarı fazla olduğu durumlarda yükseltici bir etki yaptığı, düşük olduğu durumlarda ise yavaşlatıcı bir etki yaptığı rapor edilmiştir.

Bu konuda benzer araştırmalar yapan Bentz (2006) tarafından, kalker tozu katkısının çimento hidratasyonu üzerindeki etkisini incelemiş ve CEMHYD3D programını kullanarak bazı bilgisayar simülasyonları ve modellemeler yapılmıştır. Bu

modellemelerde hidrasyon derecesi, mikro yapı ve dayanım gelişimi zamanın fonksiyonu olarak modellenmiştir. CEMHYD3D programı kalker katkısının etkileri dikkate alınarak revize edilmiştir. %20 oranına kadar kalker tozu ikamesinin çimento hidrasyonuna etkileri farklı su/çimento (S/Ç) oranları için incelendiğinde, özellikle S/Ç oranının kalker tozunun etkinliğini göstermesinde kritik olduğu saptanmıştır. S/Ç oranı 0.4'ün altındaki karışımlarda kalker katkısı hidrasyonu tetikleyici, hızlandırıcı etki gösterirken, yüksek S/Ç oranlarında etkinliğini kaybetmekte olduğu rapor edilmiştir.

Hidarasyon ısı ve Hızına etki eden faktörler Üzerine Yapılan çalışmalar

Çimentonun ne hızla ve ne kadar iyi hidrasyon yapabileceği, çimentonun sahip olduğu incelik, su/çimento oranı, geçirimsizlik gibi parametrelere göre değişkenlik gösterir. Erdoğan (2003) tarafından birçok kaynağın analiz ederek oluşturulan kitapta, belirli bir ağırlıktaki "klinker + alçıtaşı" ne kadar ince taneli olarak öğütülürse, elde edilen çimento tanelerinin yüzeylerinin toplamı o kadar artmakta olduğu ifade edilmiştir. Erdoğan (2002) tarafından, böyle bir durumda, su ile temas eden tanelerin yüzeyi daha fazla olmakta, kimyasal reaksiyonlar (hidrasyon) daha hızlı ve daha iyi gelişebilmekte olduğunu rapor edilmiştir. Kuleli (2012) tarafından çeşitli kaynaklar üzerinde araştırma yaparak hazırlanan kitabında çimento ne kadar ince tane iriliği dağılımı ne kadar dar olursa çimento dayanım gelişimi o kadar kısa sürede olur sonucuna ulaşılmıştır. Erdoğan'a göre (2003), aynı hidrasyon ürünlerinin hacmi, çimentonun hacminden daha büyük yer kapladığı için, hidrasyon ürünleri kapiler boşlukları (çimento taneleri ve ara yüzeyleri arasındaki boşluklar) azaltacak tarzda geliştiğinin, o nedenle, hidrasyon süreci devam ettikçe, jel miktarı artmakta ve önceden mevcut olan kapiler boşlukların oranı azalmaktadır. Sertleşmiş çimento hamurunda yer alan kapiler boşluk oranı, çimento hamurunun hem dayanımını hem de su geçirgenliğini ve dayanıklılığını etkilemektedir. Boşluk oranı yüksek olan sertleşmiş çimento hamurunun dayanımı daha az olmakta, su geçirgenliği daha çok olmakta ve dayanıklılığı azalmaktadır (Erdoğan 2003). Bu nedenle betonda geçirimsizliği, dayanımını ve dayanıklılığını artırabilmek için jel miktarını artıracak, çimento hidrasyon sürecini kontrol altına alabilecek

önlemleri almak gereklidir. Erdoğan aynı çalışmada Su/çimento oranını azaltmak veya alternatif tipte çimento tipi seçimi yapılmasının bu önlemlerden bazıları olduğunu rapor etmiştir.

Alternatif tipte çimento tipi seçiminde ülkemizde büyük bir rezervi bulunan, henüz yeni standartlaştırılan (TS 13353) çok düşük hidratasyon özellikli BAB Çimentosu üzerinde bilim insanlarının yaptığı bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

BAB Çimentosu Üzerine Yapılan çalışmalar

Bor katkılı çimento üzerinde DSi TAKK Dairesi ve BOREN arasında yapılan protokol ile çok yönlü bir araştırma programı başlatılmış olup araştırma ile ilgili deneysel çalışmalar tamamlanmış ve daha sonra DSi TAKK dairesi ve TÇMB'nin birlikte oluşturduğu teknik bir komisyon tarafından yürütülen çalışmalar sonucunda Türk Standartları Enstitüsünce TS 13353 standart No'su ile Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu dünyada ilk defa bir Türk çimentosu olarak standartlaştırılmıştır. Bu çimento ile üretilen betonlar üzerinde yapılan kapsamlı deneyler sonucunda hazırlanan nihai raporda hidratasyon ısısı ve hızı açısından çok önemli ve umut verici sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar aşağıda özetlenmeye çalışılmıştır.

- Çimento fabrikaları, klinkeri döner fırında 1450°C yerine 1325°C'ta pişirmek suretiyle daha düşük enerji (en az %10) harcayacak ve CO₂ emisyonunda en az %25'lere varan oranda azalma sağlanacaktır.
- Kolemanit'in borik asit üretiminde yüksek tenörlü kısmının kullanılmasının ardından kalan düşük tenörlü kısmının da çimento sektöründe kullanılmasıyla yeni bir pazar payı oluşması sağlanacaktır. Daha düşük tenörlü kolemanitin kireçtaşının yerine daha fazla kullanılması ile CO₂ emisyonunun daha da azaltılması mümkündür.
- BAB Çimentosunun hidratasyon ısısı çok düşük olduğundan özellikle ince kemer tipindeki baraj kütle betonlarında kullanılması çok uygundur. Bu çimentonun

kullanılması ile özellikle ön-soğutma ve bazen de ard-soğutma gibi yüksek maliyetli işlemlerin kaldırılması mümkündür. Ayrıca, kütle betonlarında çok sık rastlanılan termal çatlak oluşumlarının önüne geçilmesi ile betonda hasar oluşma olasılığı ortadan kaldırılmış olacaktır.

- Diğer bir önemli bulgu, BAB Çimentosu kullanılarak hazırlanan betonun karışım suyu gereksiniminin, PÇ kullanılabileceğine göre daha az olmasıdır. Bunun sebebi, BAB Çimentosu ile yapılan betonun çökme (slump) kaybının çok az olması ve Belit hidratasyonu sırasında gereken su miktarının, Alit hidratasyonu sırasında gereken su miktarından daha az olmasıdır. BAB Çimentosu kullanılarak imal edilen düşük kıvamlı beton için hedeflenen dayanım değeri, daha düşük çimento dozajı ile sağlanabilir ve bu özelliği ile BAB Çimentosunun hazır beton sektöründe avantaj sağlayacağı aşikârdır.

BAB çimentosunun daha birçok avantajından yine aynı raporda bahsedilmektedir. Konu ile ilgili ayrıntılı bilgiler kuramsal temeller bölümünde verilmiştir.

2. KURAMSAL TEMELLER

Yeğinoğlu (2003) yapmış olduğu araştırmalar ve derlemelerde Çimentonun insanoğlunun geçmişte en fazla kullandığı ve gelecekte en fazla kullanacağı sanılan harç ve beton gibi çimentolu ürünlerin yapı malzemesi olmasına karşın aynı zamanda en fazla küçümsenen ve özellikleri en az bilinen malzeme olduğu ifade edilmiştir. Yeğinoğlu'na göre bunun nedeni ilk bakıştaki basit görünümü ve kolay üretilmeleri düşüncesinden kaynaklanmaktadır. Sonuçta çimento toprağa benzeyen gri renkli bir tozdur. Bir çocuk dahi önüne konulan çimento, kum, çakıl ve suyu karıştırarak betona benzer bir karışım yapması zor bir işlem olmamaktadır. Gerçekte ise istenilen özelliklerde bir beton elde etmek teknik bilgi ve deneyim isteyen, itina ile yerine getirilmesi gereken çeşitli işlemleri içeren bir olaylar bütünüdür. Çimentonun kimyasal yapısı ve su ile reaksiyonu son derecede karmaşık olduğu bilinmektedir. Çimento ve betonun iyi tanınmaması can ve mal kaybına neden olabilecek yanlış uygulamalara yol açabilmektedir (Yeğinoğlu 2003).

Yeğinoğlu'na göre (2003) istenilen özelliklerdeki iyi bir beton üretimi ancak çimento, agrega, su ve katkı maddelerinin uygun oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulmaktadır. Öte yandan, kötü beton üretimi de, bu malzemeler kullanılarak elde edilmektedir. Beton, bir başka çok popüler yapı malzemesi olan çelik gibi fabrikada kontrol altında üretilerek kullanıma hazır bir malzeme olmadığı için istenilen kalitedeki betonun üretiminde kullanılacak malzemeler özenle seçilmeli, malzeme karışım oranları çok iyi saptanmalı, malzemelerin karılma işlemi, taze betonun taşınma, yerleştirilme, sıkıştırılma işlemleri ve betona uygulanması gereken kür uygun tarzda yerine getirilmesiyle oluşturulmaktadır. İstenilen kalitedeki betonun, doğru yerde, doğru tarzda kullanılabilmesi için, beton özelliklerinin çok iyi bilinmesi gerekmektedir.

Erdoğan tarafından (2003) yapılan araştırmada ise betonun özellikleri, önce, betonu oluşturan malzemelerin özelliklerine ve beton karışımında kullanıldıkları miktarlara bağlı olduğunu ve bunun yanı sıra, uygulanan karılma, taşınma, yerleştirilme, sıkıştırılma ve yüzey düzeltilmesi işlemleri ve ayrıca, taze betona uygulanan kür

yöntemi ve kür süresi, beton özelliklerini etkileyen çok önemli faktörler olduğunu ifade edilmiştir (Erdoğan 2003). Betonun oluşturan bu malzemeleri inceleyecek olursak, bunların başında bağlayıcı madde gelmektedir.

Postacıoğlu tarafından (1986) konuyla ilgili yapılan araştırmada, bağlayıcı maddeleri, ince toz halinde olan ve su eklenmesi ile hamur haline geldikten sonra zamanla plastikliğini kaybedip sertleşen, bağlayıcı özelliği olan malzemeler olarak tanımlanmıştır. Postacıoğlu'na göre (1986), bağlayıcı maddeler; yağlı kireç, muhtelif tür çimentolar ve alçı gibi önemli türlerin yanı sıra çeşitli malzeme türlerini içerisinde barındırmaktadırlar. Çimento; yapıların strüktür (taşıyıcı) elemanlarının meydana getirmelerinden dolayı en çok kullanılan bağlayıcı maddedir (Postacıoğlu 1986).

Tezimizin de ana konusunu oluşturan çimento, çimento özellikleri ve çimento çeşitlerini yakından inceleyecek olursak;

2.1. Çimento

Güner ve Süme (2000) tarafından konuyla ilgili yapılan araştırmada çimento, su ile ıslatıldığında hidrasyon olayı sonucu sertleşen ve bir daha yumuşamayan hidrolik bağlayıcılar olarak tanımlanmışlardır (Güner ve Süme 2000).

Erdoğan (2003) tarafından yapılan çalışmada çimento ve suyun birleştirildiği andan itibaren bu iki malzeme arasında "hidrasyon" olarak adlandırılan kimyasal reaksiyonların başlamakta ve devam etmekte olduğu ifade edilmiştir. Erdoğan'a göre önceleri yumuşak plastik durumda olan çimento hamurunun, zaman ilerledikçe daha az plastik duruma geldiği ve katılaşp, sertleştiği ve çimento hamurunun katılaşma göstererek şekil verilemez bir duruma gelmesi ise "priz alma" şeklinde tanımlanmakta ve "sertleşmiş çimento hamuru" çimento hamurunun katılaşma olayından sonraki safhada oluşan durumu olarak adlandırılmıştır (Erdoğan 2003).

2.1.1. Portland çimentosu

Erdoğan tarafından (2003) konu ile ilgili yapmış olan bir araştırmada, portland çimentosu killi ve kalkerli hammaddelerin pişirilmeleriyle elde edilen klinkerin, az miktarda (%3-%6 oranında) alçıtaşı ile birlikte çok ince parçacıklar oluşturabilecek derecede öğütülmesi sonucunda elde edilen ve su ile birleştiğinde bağlayıcı özellik kazanan bir ürün olarak tanımlanmıştır (Erdoğan 2003). Erdoğan'a göre portland çimentosu genellikle gri renkli toz halinde maddedir. Tane boyutları 1-200 mikron; özgül ağırlığı ise 3.10-3.15 arasında değişmektedir. Torbalanmış halde birim ağırlığı 1,5 ton/m³ civarındadır. Elde edilmesi için önce kalker, kil ve gerekiyorsa bir miktar alüminyum ve demir oksitler istenilen kimyasal bileşimi sağlamak üzere orantılı olarak harmanlanıp öğütülmektedirler. Farin olarak adlandırılan ham madde karışımı döner fırında 1450°C civarında bir sıcaklığına kadar pişirilir. Fırının çıkış ucuna doğru farin taneleri önce ergiyerek ve sonra çeşitli reaksiyonlar sonucu granüle halde klinker adı verilen toprakları meydana getirmektedirler. Yeğinobalı'ya göre (2003) portland çimentosu elde etmek için klinkerin az bir miktar kalsiyum sülfat (örneğin alçıtaşı) ile birlikte öğütülmesi gerektiği düşünülmektedir (Yeğinobalı 2003).

Yeğinobalı tarafından (2003) yapılan bir başka araştırmada ise insanoğlunun en temel ihtiyaçlarından birisi barınabileceği bir yer, bir "konut" olduğu ifade edilmiştir. Yeğinobalı'ya göre (2003) insanaoğlu ilk zamanlarda bu ihtiyacını doğadan kolayca temin edebildiği taş, toprak ve ahşap ile karşılamıştır ancak kaynakların tükenmesi ve gereksinimlerin değişmesi ile bağlayıcı madde teknolojisine yöneldikleri gözlemlenmektedir (Yeğinobalı 2003). Çimentonun tarih içerisindeki gelişimini inceleyecek olursak;

2.1.1.a. Portland çimento tarihçesi

Erdoğan tarafından (1995) konu ile ilgili yapmış olan bir araştırmada, Çimento" kelimesi, yontulmuş taş kırıntısı anlamındaki Latince "caementum" kelimesinden türediği belirtilmiştir. Erdoğan'a göre Daha sonra bu kelime "bağlayıcı" anlamında

kullanılmaya başlanmıştır. Bağlayıcı malzemelerin kullanımı tarih öncesinde, muhtemelen ateşin bulunmasından hemen sonra, kireç ve alçı ile başlamaktadır (Araştırma sonuçları Anadolu'da Çatalhöyük'teki evlerin yapımında kullanılan sıvanın 7000 yıl eski olduğu ortaya çıkarmıştır). Kireç ve alçının kullanımı önceki ve sonraki tarihlerde eski Mısırlılar ve Romalılar tarafından geniş alanlar bulmuştur. Yaklaşık 2000 yıl önce, Romalılar söndürülmüş kireci volkanik küllerle ve sonraları, pişirilmiş tuğladan elde edilen tozlarla karıştırarak bugünkü çimentonun özelliklerine benzer bir hidrolik bağlayıcı kullanmaya başlamışlardır. Daha sonraki yıllar ve ortaçağ, büyük eserlerin yapılmasında bir durgunluk sergilemiş ve bağlayıcı maddelerin gelişmesinde yenilik getirmemiştir (Erdoğan 1995).

Yeğinobalı (2003) tarafından yapılan çalışmalarda; Orta Çağlarda bağlayıcı malzeme teknolojisi fazla gelişme göstermediği; volkanik tüfler her yerde bulunmadığından ve pişirme sıcaklıklarına özen gösterilmediğinden yüksek dayanımlara ulaşamadığı; ancak kalker yerine killi kalker 1000°C'da pişirerek hava kireci yerine hidrolik özelliğe sahip su kireci elde edilmeye başlandığı ifadeleri yer almıştır (Yeğinobalı 2003). 1750 yılında Cornvull, İngiltere'de Eddystone Deniz Feneri binasının yapımını üstlenen John Smeaton çeşitli kalker, kil ve alçı bileşimleri kullanarak elde ettiği su kireçlerinin deniz suyuna karşı dirençlerini puzolan da katarak inceledikten sonra en uygun ham maddeleri belirleyip, su kirecinin özelliklerini geliştirmiştir. Bu tür çalışmalar Fransa'da Louis Vicat tarafından devam ettirilmiştir (1812). Killi kalkerlerin 1200°C sıcaklığa kadar pişirilmesi ile daha yüksek dayanımlı bir su kirecinin elde edilmesi ve mineral katkılarla priz sürelerinin ayarlanması mümkün olmaktadır ve tabii (doğal) çimento olarak da anılan bu bağlayıcı malzeme portland çimentosu üretimine başladıktan sonra da çeşitli ülkelerde uzun süre, kullanım alanı bulmaktadır.

Yeğinobalı (2003) tarafından yapılan aynı çalışmada, ilk kez Portland Çimentosunun 1824'de İngiltere'de bir duvarcı ustası olan Joseph Aspdin tarafından keşfedildiğini ifade edilmiştir. Yeğinobalı'ya göre aspdin doğal killi kalkerler yerine 3 kısım kalker ve 1 kısım kili uygun bir bileşim elde etmek üzere karıştırıp yüksek sıcaklıkta pişirerek üstün dayanım ve dayanıklılığa sahip yeşilimsi gri renkte bir

çimento elde etmiştir. Rengi güney İngiltere’de Portland yarımadasındaki killi kalkerleri andırdığından çimentoyu Portland Çimentosu ismi ve 5022 sayılı patent ile tescil ettirilmiştir. Ancak benzer ve daha gelişmiş çimentolar 19.yüzyıl içerisinde diğer ülkelerde de üretilmeye başlanmıştır. Temelde ham madde ve üretim prensipleri aynı olan bütün bu çimentolar da portland türü çimentolar olarak adlandırılmaktadır. Bugün dünyada kullanılan hidrolik çimentoların büyük çoğunluğu portland türündeki çimentolardan oluşmaktadır (Yeğınobalı 2003).

Aynı çalışmada, günümüze kadar geçen süre içinde portland çimentosu özellik ve üretim prosesleri yönlerinden sürekli olarak gelişim gösterdiği, klasik ham maddelere ve doğal puzolanlara ilaveten 19. yüzyılın sonlarına doğru yüksek fırın cürufu kullanılmaya başlanıldığı, uçucu kül ve silis dumanı gibi diğer endüstriyel yan ürünlere ilaveten çeşitli mineral ve sonraları bazı kimyasal katkıların kullanımı 20. yüzyılda artış gösterildiği belirtilmiştir. Yeğınobalı’ya göre (2003) üretimde başlangıçta kullanılan düşey fırınların yerini 1886’dan itibaren döner fırınlar almaktadır. Konu ile ilgilenen Thomas Edison da döner fırınların gelişmesine katkıda bulunmuştur. Bugünün çimento fabrikaları yüksek düzeyde elektronik otomasyonla çalışmakta olup, enerji tasarrufu sağlayan ve çevreye duyarlı ileri teknolojilere sahip özelliktedirler. Üretilen çimentoların kaliteleri de ilk zamanlarla kıyaslanamayacak kadar yükseltilmiştir.

Çizelge 2.1. Çimentonun kısa tarihçesi (Kuleli 2012)

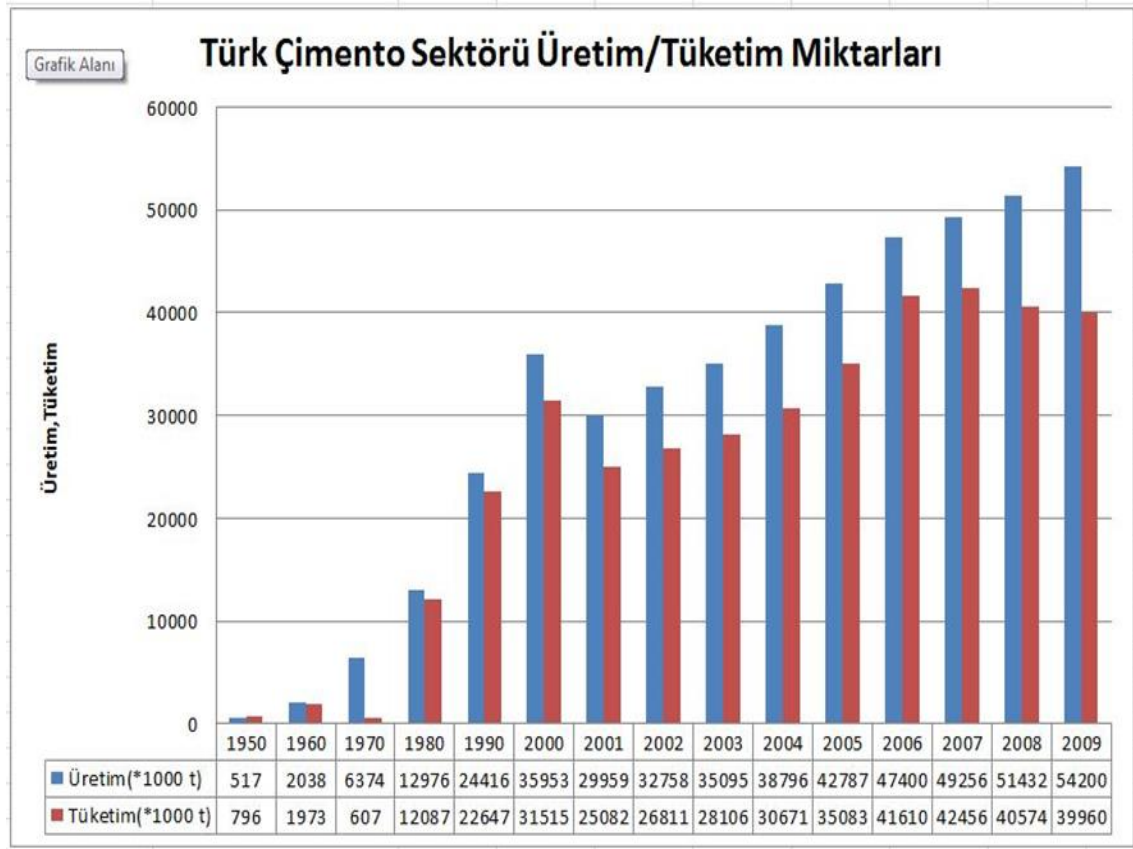
MÖ 3000	Mısırlılar Piramitleri yaptı.
MÖ 124	Romalılar Pantheon'u yaptı. Kullandıkları hidrolik bağlayıcı(Sönmüş kireç +Volkanik küller (Tuğla tozu)
1756	İngiltere'deki Eddystone Deniz Feneri'ni inşa eden John Smeaton kirecin kimyasal özelliklerini araştırıp hidrolik özelliklerinin hammaddesinin içindeki kile bağlı olarak geliştiğini buldu.
1818	Vicat kireçtaşı ve kil karışımlarını ısıtıp inceleyerek çimento kimyasının temellerini kurdu.
1824	Joseph Âspdin İngiltere'de belirli oranlarda karıştırdığı kireçtaşı ve killeri yüksek sıcaklıkta pişirerek ilk Portland Çimentosu'nu üretip patentini aldı.
1843	V Vüliam Âspdın pişirmeyi daha yüksek sıcaklıklarda yaparak birbiri içinde kısmen erimiş minerallerden oluşan gerçek Portland çimentosunu üretti.
	Bu malzeme Londra'da Meclis Binası'nın yapımında kullanıldı, (1840-1852)
1848	İngiltere'de ilk çimento fabrikası kuruldu,
1885	F. Ransome ilk döner fırın patentini aldı
1898	İlk döner fırın Almanya'da devreye alındı
1941	Bogue kitabında klinkerin potansiyel bileşiminin hesaplanmasını gösterdi

2.1.1.b. Portland çimentosunun Türkiye'deki tarihi gelişimi

Yeğinoğlu tarafından (2003) yapılan çalışmalarda; Ülkemizin portland çimentosu ile tanışması 1912 yılına rastladığı ve ilk yerli üretimler “Aslan Osmanlı Anonim Şirketi'nin Eskişehir ve Darıca fabrikalarında gerçekleştiği belirtilmiştir. Cumhuriyetin kuruluşuna kadar yıllık toplam üretim 35.000 tonu geçmezken bugün Türk çimento endüstrisi 39 fabrikası ve 18 öğütme tesisi ile yılda 65.000.000 tonu bulan bir üretim

kapasitesine sahip olduğu, yıllara göre küçük değışiklikler olmakla beraber Türkiye, çimento üretiminde Avrupa’da genellikle 1. sırada, dünyada ise 7. sırada yer aldığı ifade edilmektedir (Yeğınobalı 2003).

Çizelge 2.2. Türkiye Türkiye’de Yıllara Göre Çimento Üretimi/Tüketimi (TÇMB Sektör Raporu 2009)



Çizelge 2.3. Çimento üretiminde dünyanın büyük üreticiler (Cemberau 2008)

DÜNYANIN BÜYÜK ÜRETİCİLERİ		
	mton	Sıra
ÇİN	1388	1
HİNDİSTAN	186	2
ABD	88	3
JAPONYA	68	4
G.KORE	55	5
RUSYA	54	6
TÜRKİYE	53	7
BREZİLYA	52	8
İSPANYA/İTALYA	43	10,11
ALMANYA	35	17
FRANSA	22	20

Çimento karakteristiği içerdiği hammaddelerin çeşidine ve hammadde çeşidi sonucu oluşan ana bileşenlerinin özelliklerine göre şekillenmekte ve bu ana bileşenler ise kendini oluşturan çimento hammadde içeriğine göre davranış göstermektedirler. Çimentonun Karakteristiğinin belirlenmesinde en önemli faktör olan çimento hammaddelerini ve çimento ana bileşenlerini yakından inceleyecek olursak;

2.1.1.c. Portland çimento hammaddeleri

Çimento hammaddelerinin karakteristiği; çimentonun tipinin belirlenmesindeki en önemli faktörü oluşturmaktadır. Kuleli (2012) tarafından yapılan çalışmalarda; çimento ham maddelerinin dikkatle orantılanmış bir karışımı olan farinin ana bileşenleri kireç ve silis olduğunu ve bunları alumin ve demir oksit takip ettiğini, ayrıca daha az miktarlarda

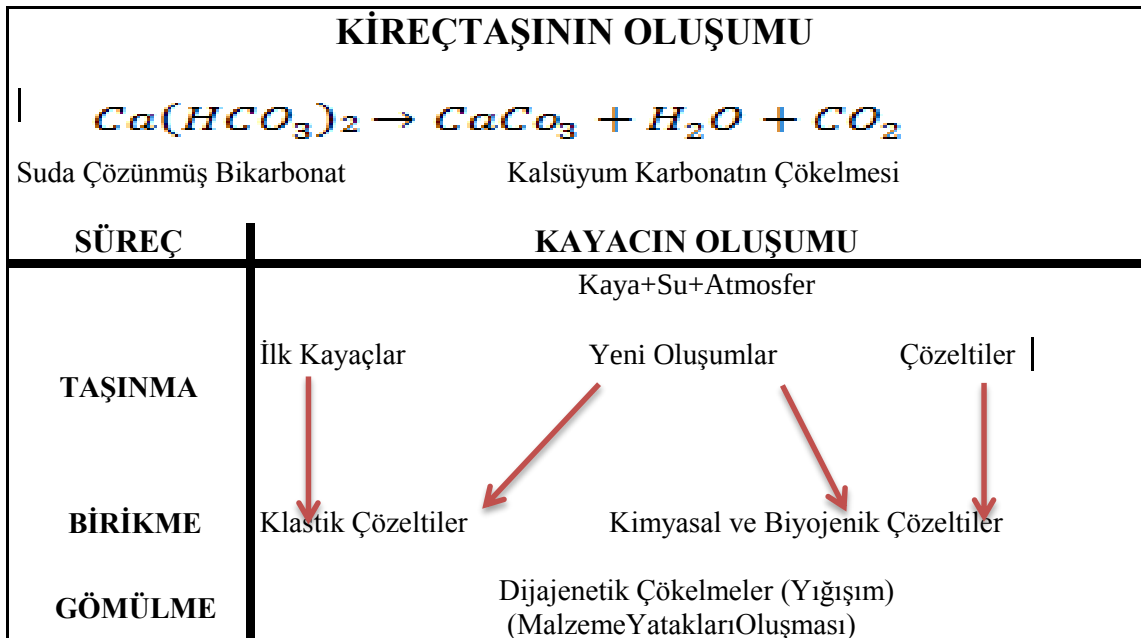
ise magnezyum ve alkali oksitler gibi diğer maddelerin bulunduğunu ifade etmiştir. Kireç (CaO) daha ziyade kalker veya marn gibi kalsiyum karbonat içeren kayalardan ortama girmekte; Silis (SiO₂) için ise başlıca kaynağı kil oluşturmaktadır. Alumin (Al₂O₃) ve demir oksit (Fe₂O₃) de genellikle kilden elde edilmekte veya ilaveten katılmaktadırlar (Kuleli 2012).

Çimento hammaddeleri için temel teşkil eden doğal malzemeleri yakından inceleyecek olursak;

a. Kireçtaşı (Kalker)

Kuleli tarafından konuyla ilgili yapılan araştırmalarda, sanayinin temel hammaddesi, çoğunluğu kalsiyum karbonat olan mineral, en kalımlı türünün kalsit olduğu ifade edilmiştir. Kuleli'ye göre genellikle içinde karbonat ve silikat olarak Mg, Al ve Fe bileşikleri SiO₂ bulunmaktadır. Oluşumu organik ya da biyojeniktir. İnorganik süreçte çökeltme $Ca(HCO_3)_2 = CaCO_3 + H_2O + CO_2$ şeklindedir. Aşağıdaki Çizelge 2.4'de kireçtaşının oluşum süreci gösterilmektedir (Kuleli 2012).

Çizelge 2.4. Kireçtaşı oluşum formu (Kuleli 2012)



b. Kil

Kuleli (2012) konu ile ilgili yapmış olduğu araştırma ve derlemeler neticesinde, kayaçların hava, su ve erozyon etkisi ile parçalanması sonucu oluşan çökeltiler olduğunu belirtmiştir. Kuleli'ye göre kayaçların belirgin bir yatakları yoktur, nemlenince plastik kütleler oluşturur içerisinde hacimce fazla su tutma potansiyeline sahiptirler. Kil, illit, montmorillonit, kaolinit mineralleri gibi çeşitleri bulunmaktadır. Kil gerek duyulan silisyum, alüminyum ve demir oksitlerin kaynağını oluşturmaktadır.

Kuleli'ye göre Kil, kalker, marn gibi doğal malzemelerin ana oksitlerden herhangi birisini karşılayamadığı durumlarda;

- Silika sağlayıcı olarak kum, kumtaşı, çakıl;
- Alümina sağlayıcı olarak boksit, şeyl, uçucu kül, alimünyum sanayii atıkları;
- Demir sağlayıcı olarak hematit, piri külü, yüksek fırın cürufu kullanılmaktadır.

Kuleli yine aynı çalışmasında çimento ihtivası için gerekli hammaddeler gerek klinker gerekse karma oksit olarak çimento birleşimine katıldığını ifade etmiştir (Kuleli 2012).

Kuleli tarafından yine aynı çalışmada, yukarıda bahsedilenden başka beton üretiminde mineral katkı maddesi olarak kullanılan birçok malzeme türünün bulunduğu ve elde edildikleri kaynaklara göre, mineral katkı maddelerini aşağıda belirtildiği gibi üç grupta toplayabilmenin mümkün olduğu belirtilmiştir.

1. Doğal malzemeler (volkanik küller, traslar(Puzolanlar)), diatomlu topraklar ve taş unu;
2. Beton üretimi ile doğrudan ilgili olmayan bir endüstri kolunda yan ürün olarak elde edilen malzemeler (uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu),
3. Isıl işlem uygulanmış olan malzemeler (pişirilmiş kil, pişirilmiş şeyi) (Kuleli 2012).

Portland Çimentosuna katılan mineral katkıları yakından inceleyecek olursak;

c. Traslar (Puzolanlar)

Kuleli (2012) tarafından konu ile ilgili yapmış olunan araştırma ve derlemeler neticesinde, Türkiye’de yaygın kullanılan tras kelimesinin uluslararası yayınlarda karşılığı puzolan oluşunu ve Tras TS25’e göre kendisi hidrolik bağlayıcı olmadığı halde ince öğütülmüş kireç ya da çimento gibi maddelerle sulu ortamda karıştırıldığında (kalsiyum hidroksit oluştuğunda) bağlayıcılık özelliği kazanan bir malzeme olduğuna değinilmiştir (Kuleli 2012).

Erdoğan (2003) tarafından yine aynı konu ile ilgili yapmış olunan araştırma ve derlemeler neticesinde, puzolanların yapısında büyük miktarda yer alan silisin ve alüminin yanı sıra, bir miktar da demir oksit, kalsiyum oksit, alkaliler, ve karbon bulunabileceğini belirtilmiştir. Erdoğan’a göre puzolanlar iki genel gruba ayrılmaktadır:

1. Doğal puzolanlar, Doğada bulunan volkanik küller, volkanik tütler, volkanik camlar, 1511 işlem görmüş killer ve şeyller, ve diatomlu topraklar bu grup içerisindeki puzolanlardır.
2. Yapay puzolanlar, Bunlar endüstriyel yan ürünlerdir. Uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu, yapay puzolanlardır (Erdoğan 2003).

Doğal puzolanlar Türkiye’de daha çok Orta Anadolu bölgesinde bol olarak bulunmaktadır. TS 25’e göre yapılacak kimyasal deneyler ve puzolanik aktivite deneyi sonucunda trasın katkı olarak kullanılıp kullanılamayacağına karar vermektedirler. Katkı olarak kullanılacak malzemenin puzolanik aktivitesinin yüksek olması, SO_3 miktarının düşük olması istenmektedir.

Kuleli (2012) yapmış olduğu çalışmalar neticesinde elde ettiği derlemeler, puzolanların CEM II, IV ve V tipi portland çimentolarına öğütülme sırasında katıldığını ve uzun dönem boyunca dayanıma katkıda bulunduğunu ifade etmiştir (Kuleli 2012).

Aşağıdaki Çizelge 2.5’de puzolanların yararlı ve zararlı etkilerinden bahsedilmektedir.

Çizelge 2.5. İnce taneli durumdaki doğal puzolan katkıların beton özelliklerine etkileri (Erdoğan 2003)

Olumlu Etkileri
İşlenebilmeyi artırmaktadır, Terlemeyi ve segregasyonu azaltmaktadır, Hidratasyon ısısının hızını ve miktarını azaltmaktadır, Su geçirgenliği azaltmaktadır, Alkali-agrega reaksiyonunu azaltmaktadır, Sülfat hücumlarına karşı dayanıklılığı artırmaktadır, Nihai basınç dayanımının yeterince yüksek olmasına yol açmaktadır, Ekonomiklik sağlamaktadır.
Dikkat Edilmesi Gerekenler
Puzolanik katkı malzemesi kullanımı, özellikle soğuk hava koşullarında, prizi geciktirir İlk günlerdeki dayanımın daha az olmasına yol açabilir. Puzolan katkılı betonların daha uzun süreli ve daha dikkatli kür edilmeleri gerekebilir. Betonda belirli miktarda sürüklenmiş havanın yer alabilmesi için, mineral katkısız betonda kullanılan daha yüksek miktarda hava sürükleyici katkı maddesi kullanımını gerektirebilir

d. Cüruf :

Kuleli (2012) yapılmış olan çalışmalar neticesinde elde ettiği derlemelerinde, demir-çelik tesislerinin atığı olan cüruf değerli bir çimentolaşabilir malzeme olduğu ve çimento-beton sektöründe yaygın kullanıma sahip olan cüruf yüksek fırın ürünü olduğu ifadesi yer almıştır. Kuleli’ye göre oluşan cürufun suyla hızla soğutulması sonucunda

granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılan iri kum tanelerine benzer, sert, camsı yapılı ve hidrolik özelliğe sahip cüruf elde edilmektedir. Amorf yapılı granüle yüksek fırın cürufu yeterli miktarda silika ve alümina içerdiğinden öğütüldüğünde puzolanik aktivite göstermektedir. Zor öğütülen cüruf ne kadar ince taneli olursa puzolonik özelliği de o kadar artmaktadır. CEM II, III ve V tip çimentolarda katkı olarak kullanılan cürufun çimentonun uzun dönem dayanımına ve betonun uzun ömrüne çok değerli katkısı bulunmaktadır. Türkiye'de üretilen yüksek fırın cürufları için ortalama kimyasal bileşim örneği aşağıda gösterilmektedir (Kuleli 2012).

Çizelge 2.6. Yüksek fırın cürufu için ortalama kimyasal bileşim örneği (Kuleli 2012)

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	MnO	S	SO ₃
Ağ %	34-41	34-36	13-19	0.3-2.5	3.5-7	1-2.5	1-2	-

e. Uçucu Kül

Kuleli (2012) konu ile ilgili yapmış olduğu derlemede, kalsiyum, demir ve magnezyum oksitlerini, yanmamış karbon gibi maddelerin dışında çok yüksek miktarda silika ve alümina içeren, genellikle küresel tanecikli yapıya sahip olan, uçucu külü puzolanik özelliğe sahip ince, inorganik bir malzeme olarak tanımlamıştır. Kuleli'ye göre uçucu küller termik santrallerde yakıt olarak kullanılan kömürün yakılması sonucunda yan ürün olarak elde edilmektedir. Eskiden atılan bu malzeme şimdi çimento ve hazır beton sanayilerinde katkı olarak kullanılmaktadır (Kuleli 2012).

Kuleli (2012) tarafından yapılan araştırma ve derlemede, çok ince taneli (Blaine>4000) ve yığın yoğunluğu çok düşük (0.4 t/m³) olan bu malzemenin genellikle çimento öğütüldükten sonra eklendiğini (CEM II, IV ve V tipi Portland çimentolarına), separatörde çimento ile karışması sağlandığını belirtilmiştir. Kuleli'ye göre yüksek alümina içeriği nedeni ile doğrudan hammadde karışımına da eklenebilir, bu durumda içerdiği yanmamış karbon miktarına dikkat etmek gerekmektedir. Uçucu küller TS EN 450/1 standardına uygun olmalıdır (Kuleli 2012).

Uçucu külün özellikleri kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıkları göstermektedir. Genellikle silisi ve alüminli olan bileşimi dolayısıyla puzolanik özellik göstererek çimento ve betonda katkı maddesi olarak yararlı olmaktadır. İnce ve küresel taneleri dolayısı ile taze betonda işlenebilmeyi arttırmakta; ayrıca hidrasyon ısını azaltmaktadır. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle reaksiyona girerek ilave bağlayıcı jel oluşturmakta, çimento hamurundaki boşlukları doldurmakta ve betona dayanıklılık kazandırmaktadır. Linyit kömürü yakılması ile elde edilen uçucu külden kireç oranı genellikle yüksek olup bu tür küller aynı zamanda hidrolik, yani bağlayıcılık özelliği göstermektedirler.

Türker vd (2009) antrasit kömüründen veya iyi yakılmayan diğer kömürlerden elde edilen uçucu küllerde karbon miktarı yüksek olduğunu ve bunun da çimento ve betonda su ihtiyacını arttırdığını; puzolanik özelliği ve kaliteyi olumsuz etkilediğini ifade etmişlerdir. Bilim adamlarına göre uçucu kül genellikle çimentodan daha ince taneli olarak elde edilmektedir ve dolayısıyla ilave öğütme gerektirmeden kullanılabilir. Gerekğinde seperatörden geçirilerek inceliği daha da artırılmakta ve olumlu özellikleri daha etkin hale getirilmektedir (Türker *et al.* 2009).

Türker vd (2009) yapmış olduğu çalışmalarda, çevreyi olumsuz olarak etkileyecekleri için, uçucu küllerin santral bacasından çıkarak havaya karışmaları önlenmesi ve bu amaçla, küller mekanik ve elektrostatik yöntemle toplanarak santral çevresinde veya başka uygun yerlerde depolanması gerektiği bildirilmiştir. Türker ve arkadaşlarına göre Zamanla biriken küller geniş alanları kapsamaya başlar ve santral idaresi için bir problem oluşturmaktadır. Bugün Dünya’da ortaya çıkan uçucu kül miktarı yılda 600 milyon ton civarındadır (Türker *et al.* 2009).

Türker vd (2009) yaptığı çalışmada; Türkiye’de halen Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy santralleri olmak üzere 11 termik santral faaliyet gösterdiği ve bu santrallerden yıllık uçucu kül üretimi ortalama 13 milyon kadar olduğu, ancak doğalgaz santrallerinin devreye girmesi ile yıldan yıla değişiklik gösterdiği belirtilmiştir. Türker vd (2009)

göre, ülkenin enerji üretiminde dışa bağımlılığını azaltmanın bir yolu da, endüstrinin diğer kesimlerinde yararlanılamayan düşük kalorili linyit kömürlerini termik santrallerde kullanmaktan geçmektedir. Dolayısıyla yıllık uçucu kül miktarlarının gelecekte daha fazla artacağı tahmin edilmektedir (Türker *et al.* 2009).

Kuleli (2012); beton sektöründe bu malzeme oldukça fazla kullanıldığını ve uçucu küller ile yapılan betonların hidrasyon ısısı düşük olduğu için, bu tür malzeme özellikle kütle beton yapımında önem taşımaktadır; ince ve küresel taneleri dolayısı ile de betonda işlenebilmeyi arttırdığını ifade etmektedir. Çimento hidrasyonu sonucu oluşan kireçle tepkiyerek bağlayıcı jel oluşturmaktadır (Kuleli 2012).

f. Silis Dumanı

ACI Komitesi (2000); silis dumanı silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli toz olduğunu ifade etmiştir. Komiteye göre Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO₂ olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturmaktadır. Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanındaki SiO₂ miktarı da artmaktadır. Bu miktar silisyum metalinde %98'e ulaşmaktadır (ACI Committee 234 2000).

Çizelge 2.7. Alaşım Türü-SiO₂ İlişkisi (ACI Committee 234 2000)

Alaşım türü	Silis dumanındaki SiO ₂ (%)
%50 Ferrosilisyum	61 – 84
%75 Ferrosilisyum	84 – 91
Metal silisyum	87 – 98

Araştırmalarda ve pratikte kullanılan silis dumanları genellikle %75 ve yukarı oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan elde edilmiştir. Daha dūřuk oranlı silis dumanlarının kullanımı konusunda fazla bilgi yoktur (Tūrker *et al.* 2009). Rengi gridir, yığın yoğunluğu 0.15-0.4 t/m³ tūr. CEM II ve IV tip imentoalarda katkı olarak kullanılır. Çok ince taneli olduğundan çimentonun hidratasyonu sırasında iri imento tanelerinin arasına girerek burada sıkışan suyu dışarı iter. Çimento harcındaki CH ile tepkiyerek puzolanik C-S-H jeli oluşturur. Bu olumlu etkiye karşın silis dumanı tanelerinin oluşturduğu bōyōk yōzey alanı su gereğini artırır, bu da harcın kıvamını olumsuz etkilemektedir. Sōper akışkanlaştırıcı kimyasal katkılardaki gelişmelerle yōksek dayanımlı ve yōksek performanslı betonlarda kullanımı artmıştır (Kuleli 2012).

g. Alçıtaşı

Kuleli (2012); klinker alçıtaşı ile birlikte oęōtōlerek imento yapıldığına çalışmalarında yer vermiştir. Kuleli'ye gōre, alçının içerdiği sōlfatın imento su ile karıştığında oluşan hidratasyon sōrecinde çok oņemli bir işlevi bulunmaktadır. Klinker içindeki C₃A minerali (Alōminat) su ile çok hızlı tepkimeye girer ve harcın / betonun çok hızla sertleşmesine yol açmakta ve bu istenmeyen durumu denetim altına alabilmek için klinker her zaman alçıtaşı ile birlikte oęōtōlmektedir. Klinkere %3-5 oranında eklenen alçıtaşı sulu ortamda alōminat ile birleşerek ettringit oluşturur, bu sırada genel hidratasyon tepkimeleri de harca/betona son biçim verilinceye dek yavaşlatılmış ve işleme sōreci denetim altına alınmış olur. Bu sōre priz denetleme sōrecinde çok oņemlidir (Kuleli 2012).

Alçıtaşı kurak/yarı kurak iklim bōlgelerinde ōkelmiř tortul kōtleler arasında, kil ve marl yatakları içinde / yakınında bulunan bir mineraldir. Sertlięi 2.0 - 2.4 Mohr; oēgōl ağırlığı 2.2 - 2.4 gr/cm³, kimyasal formōlō CaSO₄.2H₂O dūr.

Kuleli çalışmalarında; son yıllarda doğal alçıtaşı yerine/ona ek olarak termik santrallerin baca gazından kōkōrt arıtma tesislerinden açığa çıkan (atslan) alçı da kullanıldığını ve

çok nemli, bazen de çok renkli olan bu alçının kullanımı için özel koşulların dikkate alınması gerektiğini belirtmiştir (Kuleli 2012).

Yukarıda özellikleri açıklanan bu malzemelerden yalnızca tras ve alçıtaşı doğal minerallerdir. Kullanılan diğer katkılar başka sanayi dallarının atıklarıdır. Çimento fabrikaları bu atıkları değerlendirerek çevreye ve kamu yararına önemli bir katkıda bulunmaktadır.

2.1.1.d. Portland çimento oksitleri

Çizelge 2.8. Portland çimentosunu oluşturan oksitler ve miktarları (Erdoğan 2003)

Genel İsmi	Oksit	Sembolü	Miktarı (%)
Kireç	CaO	C	60 – 67
Silis	SiO ₂	S	17 – 25
Alümin	Al ₂ O ₃	A	3 – 8
Demir Oksit	Fe ₂ O ₃	F	0,5 – 6
Kükürt Trioksit	SO ₃	S	1 – 3
Magnezyum Oksit	MgO	M	0,1 – 4
Alkaliler	Na ₂ O + K ₂ O	N+K	0,2 - 1,3

Erdoğan (2003) yaptığı konu ile ilgili yaptığı çalışmada, portland çimentosunun içerisinde yer alan oksitler ve yaklaşık miktarları Çizelge 2.7'de ki gibi olan çimento kimyasında, çimentolarla ilgili formülleri daha kısa ifade edebilmek amacıyla, çimentoyu oluşturan her oksit tek harf halinde belirtilmekte olduğunu ifade etmiştir. Çizelge 2.8' de, portland çimentosunda yer alan oksitlerin sembolleri de gösterilmiştir (Erdoğan 2003).

Çizelge-2.8' de yer alan SO_3 dışındaki bütün oksitler çimento klinkerini de oluşturan oksitlerdir. Klinkerin içerisinde SO_3 bulunmamaktadır. Çimentonun içerisinde yer alan SO_3 çimento üretimi için klinkerin yanı sıra kullanılan alçıdan ($\text{CaSO}_4=\text{CaO}.\text{SO}_3$) gelmektedir.

Erdoğan (1995) tarafından yapılan çalışmalarda; Çizelge 2.8' de yer alan çok küçük miktarlarda magnezyum oksit ve alkalilerin çimentoya hiçbir yararı olmadığı ve bu maddelerin çimento içerisinde fazla miktarlarda yer aldıklarında çok zararlı olabilecekleri ifadesine yer verilmiştir. Çimentoya faydalı olmadıkları halde Çizelge 2.8' de, yer almalarının nedeni, hammaddelerin içerisindeki çok küçük yüzdelerde bulunan bu maddelerden ekonomik bir şekilde tamamen kurtulmanın mümkün olmayışından kaynaklanmaktadır (Erdoğan 1995).

a Portland Çimentosunun Temel Oksitleri

Yine Erdoğan (2003) tarafından yapılan çalışmalarda; Klinkerde (ve portland çimentosunda) yer alan oksitlerden FeO , hammadde karışımındaki kalkerden, SiO_2 ve Al_2O_3 ise, kilden elde edildiği, hammaddelerin içerisinde bir miktar Fe_2O_3 bulunduğu ve bu dört oksitin çimentonun ana bileşenlerini oluşturan ana oksitler olduğu rapor edilmiştir (Erdoğan 2003). Bunların yanında ikincil (minör) oksitlerde her zaman hammaddelerde vardır.

Kuleli'nin (2012) aynı konu üzerine yaptığı bir diğer araştırma ve derlemede, hammaddelerin döner fırında pişirilmesi sonucunda karma oksitler ortaya çıktığı ve bunların klinker içinde birleşmiş ve bütünleşmiş özgün kristaller olarak bulunduğu ve bu karma oksitlerin yapısı klinkerin de yapısını oluşturduğu belirtilmiştir (Kuleli 2012). Portland Çimentosunun temelini teşkil eden bu karma oksitleri yakından inceleyecek olursak;

2.1.1.e. Portland çimento ana bileşenleri

Erdoğan tarafından (2003) konu ile ilgili yapılan çalışmalarda, hammadde karışımının döner fırında pişirilmesi sonucunda ortaya çıkan ve klinkerin yapısını oluşturan ana bileşenler olduğu ve bu ana bileşenlerin yapısı ve sembollerinin Çizelge 2.9'da gösterildiği rapor edilmiştir. Çimentonun yapısını oluşturan ana bileşenler, klinkerdekinin aynıdır (Erdoğan 2003).

Konu ile ilgili Baradan vd (2002) tarafından yapılan bir diğer araştırmaya ise karma oksit olarak adlandırılan ve çimentonun birçok özelliğini belirleyen bu bileşenlerden en önemlilerinin trikalsiyum silikat ($C_3S=3CaO.SiO_2$), dikalsiyum silikat ($C_2S=2CaO.SiO_2$), trikalsiyum alüminat ($C_3A=3CaO.Al_2O_3$) ve tetrakalsiyum alüminaferrit ($C_4AF=4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$) olduğu belirtilmiştir (Baradan *et al.* 2002).

Yine aynı çalışmada, safsızlık içeren C_3S alite, C_2S belit, C_4AF ise celit olarak adlandırılır. Safsızlıkların kalsiyum silikat hidrateler üzerinde önemli etkileri olduğu bildirilmiştir (Baradan *et al.* 2002).

Çimentonun ana bileşenlerinin yakından inceleyecek olursak;

Çizelge 2.9. Çimentonun Ana Bileşenleri (Baradan et al 2002)

Anabileşenler	Çimento Kimyasına Göre Sembolü
Dikalsiyum silikat, $2CaO.SiO_2$	C_2S
Trikalsiyum silikat, $3CaO.SiO_2$	C_3S
Trikalsiyum alüminat, $3CaO.Al_2O_3$	C_3A
Tetrakalsiyum aluminoferrit, $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$	C_4AF

a. Alit (Trikalsiyüm Silikat, C_3S)

Kuleli'nin yaptığı çalışmalarda (2012); temel oksitlerin en çok kullanılan elementi Kalsiyum olduğu, Kalsiyum oksitin (Kireç) simgesi CaO olduğu, ana kaynağının kireçtaşı (kalker) olduğu ve çimento literatüründe C simgesiyle kullanıldığı belirtilmektedir (Kuleli 2012). İkincil Kaynaklar ise Marl, tebeşir, mermer, deniz kabukları, kireç sanayii atıkları. Ortalama olarak klinkerin %60 Alit olduğu ve bunların yüksek C_3S içeren klinkerler “reaktif”=etkin olarak tanımlandıkları belirtilmiştir. Reaktif olması sayesinde; dayanımları yüksek olabilir, çimentonun öğütülme işlemi sırasında daha çok katkı kullanılabildikleri yine aynı çalışmada belirtilmiştir (Kuleli 2012).

Yine aynı çalışmada alit'in hiçbir zaman klinker içerisinde saf C_3S olarak bulunmadığı, her zaman içerisinde MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 gibi oksitlerle beraber bulunduğu, bu beraberliğin ise dayanımın artmasını hızlandıran faktör olduğu belirtilmektedir (Kuleli 2012).

Bu yapay mineralin oluşması için sinterleşmenin olması gerekir. Klinkerde olması istenen en önemli maddedir.

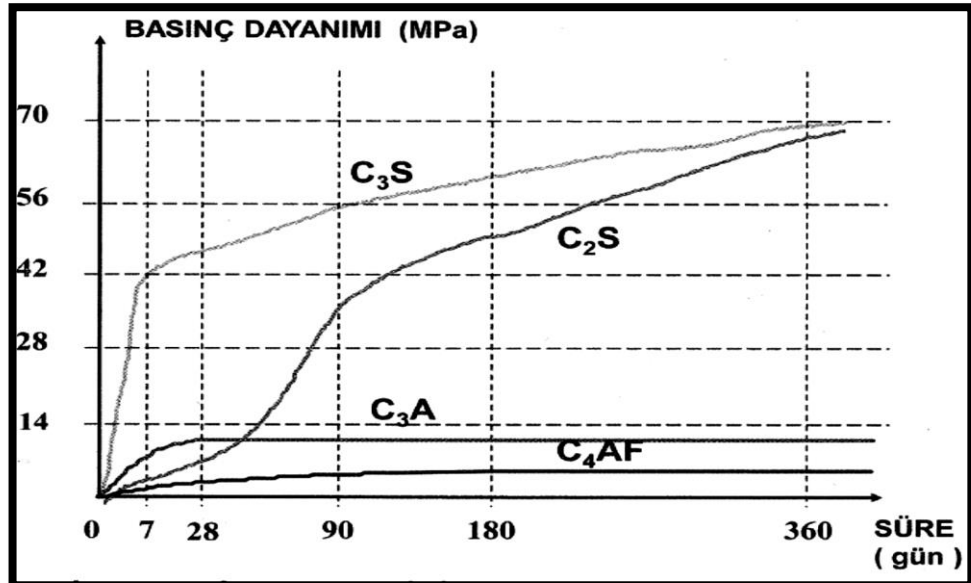
Konu ile ilgili bir diğer araştırmada Yalçın ve Gürü (2006) ; en önemli klinker bileşeni olan trikalsiyum silikatın ($3CaO.SiO_2$), oda sıcaklığı ile $1100\text{ }^{\circ}C$ arasında 6 değişik allotropik şekilde kristal yapıya sahip olduğu. Bu kristallerin hepsinin su ile reaksiyona girerek priz yapabilme özelliğine sahip olduğu, döner fırının sinter bölgesinde C_3S meydana geldikten sonra soğumaya bırakıldığı takdirde $1050^{\circ}C$ 'de monoklinik kristal yapısına geçeceği ve sıcaklığın azalmasıyla triklinik ve rombohedral yapıda kristallere dönüşebileceği belirtilmektedir (Yalçın and Gürü 2006).

Kristallerde örgü kavramını belirleyen ilk gösterim Bravais tarafından bulunduğu için bu 14 değişik örgü çeşidine Bravais örgüleri ismi verilmiştir. Doğada gözlenen kristal eksenleri aralarındaki uzaklıklar ve açılara göre sınıflandırılırsa kübik, tetragonal,

hekzagonal, trigonal, rombik, monoklinik ve triklinik olmak üzere toplam yedi eksen sistemi vardır. Çizelge 2.10’da bu yedi eksen sistemi özetlenmiştir (Durlu 1992).

Çizelge 2.10. Yedi eksen sistemi (Durlu 1992)

Sistemin Adı	Birim Hücre Parametreleri	Örgü sayısı
Kübik	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	3
Tetragonal	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	2
Heksagonal (altigen)	$a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	1
Trigonal (rombohedral)	$a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma < 120, \neq 90$	1
Rombik (ortorombik)	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90$	4
Monoklinik	$a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90 \neq \beta$	2
Triklinik	$a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90$	1



Şekil 2.1. Klinker minerallerinin dayanımlarının gelişimi (Kuleli 2012)

ana Kaynaklarının Kil, Kum, Kumtaşı, Çakıl olduğu ikincil Kaynakların ise uçucu kül olduğu belirtilmiştir (Kuleli 2012).

Kuleli (2012) aynı çalışmasında, C_2S 'nin klinker içerisinde arı olarak bulunmadığını, her zaman diğer oksitlerle beraber bulunduğunu belirtmiştir. Kuleli'ye göre klinkerin ortalama olarak %15'i belittir. Basınç dayanım hızı yavaştır (Şekil 2.1). Ancak 20.günün sonunda itibaren bir yıllık periyotta en hızlı dayanım değerine erişerek C_3S ile aynı dayanım değerine ulaşır (Kuleli 2012).

Yalçın ve Gürü (2006) konu ile ilgili yapmış olduğu çalışmada; $CaO.SiO_2$ 'nin trikalsiyum silikattan sonra klinker içinde en çok bulunan bu bileşik olduğu ve bu bileşiğin dört allotropik hali bulunduğunu belirtmiştir. Yalçın ve Gürü'ye göre dikalsiyum silikatın en önemli değişimi (β) silikatının (γ) silikatına dönüşmesidir. Bu tek yönlü bir değişimdir. Yani (β), (γ) haline geçtikten sonra, (γ) nın tekrar (β) halini alması olanaksızdır. Bu değişme klinker üretimi açısından büyük önem taşır. Çünkü yukarıda sözü geçen üç tür silikattan yalnız (γ) silikatının priz yapma özelliği yoktur. Bundan dolayı klinker içinde (γ) silikatının fazla miktarda bulunması istenmez. Bunun için, döner fırın pişme bölgesinden çıkan klinker içinde bulunan dikalsiyum silikatın (β) kristal yapısından (γ) kristali haline dönüşmesine fırsat verilmeden sıcaklığının ani olarak düşürülmesi yoluna gidilir. C_2S 'in hidratasyon reaksiyon hızı C_3S 'in hidratasyonuna göre çok yavaştır (Yalçın and Gürü 2006).

Yeğinobalı (2003) konu ile ilgili yapmış olduğu araştırmada, belit fazının su ile reaksiyonunun yavaş olduğunun az miktarda ısı açığa çıkardığının ve yüksek olan bağlayıcılık özelliğinin kendini ileri yaşlarda göstereceğini belirtmiştir (Yeğinobalı 2003).

c. Alüminat (C_3A)

Kuleli (2012) yapmış olduğu araştırmalar neticesinde, 3.temel karma oksit olan aliminyum oksit tabanlı alüminatın simge olarak Al_2O_3 (Aliminyum Oksit) olarak adlandırıldığını ancak çimentocuların bunun yerine A simgesini kullandığını belirtmiştir. Kuleli'ye göre Aliminyum yer kabuğunda en çok bulunan 3.elementtir. Al_2O_3 olarak ağırlık %15,2 dir. Ana Kaynakları; Kil, boksit, kum, şeyl ikincil Kaynakları ise Uçucu Kül, Al-Sanayi Atıkları (Kuleli 2012).

Yalçın ve Gürü (2006) konu ile ilgili yapmış olduğu araştırmalarında, Alüminatların içlerinde özellikle alkaliler olmak üzere iyonlar içerdiği ve bunların çok etkin olduğunu belirtmiştir. Yalçın ve Gürü'ye göre (2006) klinkerin ortalama olarak %11 Alüminattır. Sülfatlarla tepkimeye girerek hacim genişlemesine neden olur. Suyla çok hızlı birleşir. Yüksek hidratasyon ısıları erken dayanımı artırır. Klinker bileşiminde en çok bu alüminat bulunur ve çimento prizi olayında önemli rol oynar. Trikalsiyum alüminat, taşınmış olduğu büyük kimyasal enerji nedeniyle su ile hızlı bir şekilde reaksiyona girerek çözelti haline geçer. Çözeltiye geçen trikalsiyum alüminat priz süresini ayarlamak amacıyla çimento içine katılmış bulunan kalsiyum sülfat (yaklaşık olarak %2,5) ile reaksiyona girerek klinker tanecikleri yüzeyinde bir kabuk oluşturur ve böylece klinker taneciklerinin su içinde çözünme hızını kontrol eder. Bu nedenle trikalsiyum alüminat çimento bileşiminde mutlaka bulunması gereken bir bileşendir. Ancak bu bileşiğin çimentonun mekanik mukavemeti üzerinde fazla etkisi yoktur. Ayrıca sülfat korozyonuna yol açması nedeniyle çimento bileşiminde fazla miktarda C_3A bulunması istenilmez (Yalçın and Gürü 2006).

d. Ferrit (C_4AF)

Kuleli (2012) yapmış olduğu araştırmalar neticesinde; 3.temel karma oksit olan dördüncü anabileşen Ferritin demir oksit tabanlı olduğunu belirtmiştir. Kuleli'ye göre demir yer kabuğunda en çok bulunan 4.elementtir. Ana kaynakları; hematit, limonit, gibi cevherler, ikincil kaynakları ise pirit külü, kömür külü, demir fırın cürufudur. Bu

evre aslında C_2A , C_6A_2F , C_4AF , C_2F gibi evrelerin bir katı çözeltisidir. Bileşim, C_4AF formülü ile yeterince uygun olarak tanımlanabilmektedir. Klinkerin yaklaşık olarak %8 i ferittir. Diğer evrelere göre işlevi daha azdır. Çimentoya bilinen rengini verirler. Basın dayanımına etkisi ana bileşenleri içerisinde en azdır (Şekil 2.1) (Kuleli 2012).

Yalçın ve Gürünün (2006) aynı konu ile ilgili yapmış olduğu bir başka araştırmada, klinker hammaddesi içinde bulunan elemanların ikişer ikişer birbiriyle birleşmesi ile meydana gelen klinker bileşenleri yanında, belli sıcaklık ortamında iki eleman yerine üç elemenda birbiriyle birleşebildiği, bu şekilde meydana gelen en önemli klinkerin tetrakalsiyum alüminaferrit (C_4AF), $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ olduğu belirtilmektedir. Yalçın ve Gürü'ye göre bu bileşiğin hidratasyonu C_3A 'nın kine benzer şekildedir, fakat ondan daha yavaş bir seyir izler ve mekanik mukavemet üzerine katkısı da çok azdır (Yalçın and Gürü 2006).

e Portland Çimentosunun Ana Bileşenlerin Özellikleri

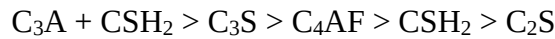
Çeşitli bilim adamları yapmış olduğu araştırmalarda, çimento hamuru veya beton elde edebilmek için, çimento ve su bir araya getirilir getirilmez, her ana bileşen ile su ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve her ana bileşenin reaksiyon hızı, reaksiyon esnasında açığa çıkan ısı ve reaksiyon sonucunda oluşan ürünün çimento hamurunun bağlayıcı özeliğine (dayanımına) katkısının farklı olduğunu belirtmişlerdir.

Bu bilim adamlarının yapmış olduğu araştırmalar ana bileşenlerin relatif özellikleri Çizelge 2.12'de belirtilmektedir (Hayward and Radar 1955; Davis and Kelly 1968; Anonim 1975; Mindess and Young 1981; Neville 1981; Bye 1983; Troxell and Erdoğan 1995).

Çizelge 2.12.den görülebileceği gibi, çimento hamurunun kazanabileceği nihai dayanım, C_3S ve C_2S gibi kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidratasyonu sonunda oluşmaktadır. Ancak, C_2S 'nin 20 çimento hamurunun dayanımına ilk günlerdeki katkısı az, sonradan daha çoktur. C_3A 'nın çimento hamurunun dayanımına katkısı hem ilk günler hem de son

günler için düşük olarak belirtilmiştir. Aslında, C₃A'nın ilk birkaç saat içerisinde dayanıma sağladığı katkı oldukça yüksektir. Ama ilk zamanlar olarak ilk bir-iki hafta gözönüne alınacak olursa, C₃A'nın bağlayıcılık değerinin düşük olduğu belirtilebilmektedir. Çimentoyu oluşturan ana bileşenlerin su ile reaksiyonu sonucunda elde edilen dayanım artışı, Şekil 2.12'de gösterilmektedir (Erdoğan 2003).

C₃A ve C₄AF'nin özellikleri çizelge 2.12'de belirtilirken, çimentonun içerisinde bulunan bir miktar alçıtaşının etkisi de göz önünde tutulmuştur. C₃A ve C₄AF'nin su ile birleşmelerinde oluşan kimyasal reaksiyonlarda alçıtaşı da görev almakta, bu reaksiyonları yavaşlatmaktadır. Alçıtaşı olmazsa, C₃A ve su çok daha hızlı reaksiyon yapmakta ve ayrıca, çimento hamurunun dayanımına önemli katkıda da bulunamamaktadır. Alçıtaşının etkisi de göz önünde tutularak çimento hamurundaki ana bileşenlerin reaksiyon hızı belirtilecek olursa, şöyle bir sıralama ortaya çıkmaktadır:



Çizelge 2.12. Çimentodaki ana bileşenlerin relatif özellikleri (Erdoğan 2003)

Anabileşenlerin Reaksiyon Hızı, Hidratasyon Isısı ve Çimento Hamurunun Dayanıma Katkısı	C₃S	C₂S	C₃A	C₄AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidratasyon Isısı	Orta	Az	Çok Yüksek	Orta
Dayanıma Katkısı:				
İlk Günlerde	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Sonunda	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

f. Ana Bileşenleri Belirleme Yöntemleri

Erdoğan (2003) yapmış olduğu araştırma ve derlemelerde, çimentonun yapısında yer alan oksitlerin miktarları çimento standartlarında belirtilen kimyasal analiz yöntemlerinin uygulanması sonucunda bulunduğu belirtilmiştir. Bu konudaki Türk ve ASTM standartları şunlardır: TS 687 ve ASTM C 114 Kimyasal analiz sonucunda çimentoda yer alan oksit miktarlarının tayin edilmelerinin yanısıra, "çözünmeyen kalıntı", "kızdırma kaybı", ve klor iyonu olarak adlandırılan bazı değerler de elde edilmektedir. Çizelge 2.13'de Normal Portland Çimentosunun (ASTM Tip I'in) kimyasal analizi sonucunda elde edilen tipik değerler gösterilmektedir.

Çizelge 2.13. Normal Portland Çimentosunun (ASTM Tip I'in) kimyasal analizi sonucunda elde edilen tipik değerler (Erdoğan 2003)

Oksitler Ve Diğer Değerler	Miktarları (Ağırlıkça,%)
CaO	63.6
SiO ₂	20.7
Al ₂ O ₃	6
Fe ₂ O ₃	2.4
SO ₃	2.1
MgO	2.6
Na ₂ O	0.1
K ₂ O	0.9
Çözünmeyen Kalıntı	0.2
Kızdırma Kaybı	1.4
Serbest CaO	1.4
CL ⁻	Max 0.1

Erdoğanın yine aynı çalışmasında belirttiği kimyasal analiz sonucunda bulunan değerlerin ifade ettikleri önem aşağıda açıklanmaktadır:

CaO, SiO₂, Al₂O₃ ve Fe₂O₃ miktarlarının önemi

Erdoğan'a göre (2003); çimentonun bağlayıcılık kazanma hızı, hidrasyon hızı, hidrasyon ısı gibi özellikleri, çimentodaki C₃S, C₂S, CSA ve C₄AF ana bileşenlerinin ne miktarda yer almış olduğuna bağlıdır. Yukarıdaki oksitler, çimento ana bileşenlerini oluşturan temel oksitlerdir. O nedenle, bu oksitlerin ne miktarda yer almış oldukları, çimentonun içerisindeki ana bileşenlerin miktarını etkilemektedir (Erdoğan 2003).

SO₃ miktarının önemi

Erdoğan'a göre (2003); daha önce değinildiği gibi, çimentonun çok erken priz yapmasını önlemek amacıyla, çimento üretiminde, klinker ve küçük bir miktar alçıtaşı (CaSO₄.2H₂O) birlikte öğütülmektedir. SO₃ miktarı %3 civarında olmalıdır (Erdoğan 2003).

MgO Miktarının Önemi

Erdoğan'a göre (2003); portland çimentosunun içerisindeki MgO, serbest CaO ve alkaliler, çimento hamurunun ve betonun özelliklerinde, olumsuz etkiler yaratabilecek oksitlerdir. MgO'nun su ile reaksiyonu sonucunda hem açığa ısı çıkmakta, hem de hacim genişmesi meydana gelmektedir. MgO ile su arasındaki reaksiyonlar, çimento hamurunun sertleşmesinden sonraki zaman içerisinde oluşmaktadır. Sertleşmiş durumdaki çimento hamurunun içerisinde genişlemeye yol açan reaksiyonların oluşması, çimento hamurunun (ve betonun) çatlamasına yol açabilmektedir. O nedenle, 27 çimentolarda bulunabilecek MgO miktarının belirli bir yüzdeden (%5'den) fazla olmaması istenmektedir (Erdoğan 2003).

Na₂O ve K₂O miktarının önemi

Erdoğan'a göre (2003); çimento üretiminde kullanılan hammaddelerde bulunabilecek Na₂O ve K₂O (alkaliler), üretilen çimentonun yapısında da yer almaktadırlar. Beton yapımında kullanılan agregalar reaktif silis veya reaktif karbonat içerdiği takdirde, alkalilerle agrega arasında "alkali - agrega reaksiyonu" olarak adlandırılan kimyasal olaylar gelişmektedir. Sonuç olarak çok büyük su emme kapasitesine sahip olan alkali - silika jelleri meydana gelmekte, betonda çok büyük genleşmelere yol açılmaktadır (Erdoğan 2003).

Çözünmeyen kalıntı miktarının tanımı ve önemi

Erdoğan'a göre (2003); hidroklorik asit içerisine konulan çimento numunesinin asit içerisinde çözünme göstermeyen kısmına "çözünmeyen kalıntı" denilmektedir ve numune ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Çözünmeyen kalıntı yüzdesi, döner fırındaki reaksiyonların tam olarak yer alıp almadığını, dolayısı ile ana bileşenlerin ne derece mükemmel oluşabildiğini işaret etmektedir (Erdoğan 2003).

Kızdırma kaybı miktarının tanımı ve önemi

Erdoğan'a göre (2003); ağırlığı önceden bilinen (1 ± 0.05 g) bir çimento numunesinin çok yüksek sıcaklıkta ($975 \pm 25^\circ\text{C}$) kızdırılması sonunda meydana gelen ağırlık kaybına, "kızdırma kaybı" denilmektedir ve bu değer %olarak ifade edilmektedir. Yüksek sıcaklıkta kızdırılma sonucunda çimentoyu terkedecek maddeler, çimentoda bulunabilecek nem ve karbon dioksittir. Kızdırma kaybı, çimentonun uygun koşullarda saklanmadığını veya çok uzun süre bekletilmiş olduğunu işaret etmektedir (Erdoğan 2003).

Serbest CaO miktarının önemi

Erdoğan'a göre (2003); hammaddede bulunan CaO'nun tamamının C_3S , C_2S , C_3A ve C_4AF gibi anabileşenlerinin oluşmasında görev alması gerekmektedir. Ancak, bazan bir miktar CaO, çimento içerisinde serbest olarak yer alabilmektedir. Serbest CaO'nun $Ca(OH)_2$ oluşturması eşnasında açığa ısı çıkmakta ve hacim genişmesi olmaktadır (Erdoğan 2003).

Cl⁻ miktarının önemi

Erdoğan'a göre (2003); klor iyonu, betonun içerisinde gömülü durumdaki çelik çubukların korozyonunu artıran çok önemli bir faktördür. Betonun içerisindeki klor iyonunun düşük seviyede olması için çimentoda yer alacak klor iyonu miktarının %0.1'den az olması istenmektedir (Erdoğan 2003).

Kimyasal analiz sonucunda bulunan değerlerin ifade ettikleri önem yukarıda açıklanmıştır. Bu değerler çimento özelliklerini (özellikle hidrasyon hızını ve ısısını) etkileyen, çimento tipini, belirleyen en temel parametrelerdir. Bu nedenle ana bileşen miktar tayinini doğru belirleyebilmek çok önemlidir.

g. Portland Çimentosu Anabileşen Miktar Tayini

Erdoğan'ın (2003) konu ile yaptığı araştırmalarda; Portland çimentosunun veya klinkerin kompozisyonunda yer alan anabileşenlerin miktarlarının tayininde aşağıdaki üç yöntem kullanıldığı belirtilmiştir. Bu yöntemler;

1. X - ışını kırılma yöntemi
2. Optik veya elektron tarama mikroskobu ile inceleme yöntemi,
3. Hesap yöntemi.

Erdoğan'a göre (2003); kullanılan yöntemler arasında en çok ve en kolay şekilde uygulanan yöntem, hesap yöntemidir. Çimentodaki ana bileşenlerin oranlarının hesap yöntemiyle tayini için Bogue denklemleri denilen bir dizi denklem kullanılmaktadır (Erdoğan 2003).

Yine aynı konuyla ilgili Kuleli'nin (2012) yapmış olduğu araştırmalarda; klinker evrelerinin miktarları en iyi mikroskop analizi ya da XRD (X-Işını Kırınımı) yöntemleri ile hesaplanabildiği, ancak bunların hem yavaş hem de pahalı yöntemler olduğu belirtilmiştir. Kuleli'ye göre işletmede günlük yapılacak değişiklikler ve düzeltici işlemler için bunların sonuçlarını beklemek olanaksızdır. Ürünün potansiyel bileşimini önceden oldukça yakın olarak hesaplayabilmek için çimentonun kimyasal analiz sonuçlarını kullanan **Bogue Formülleri** kullanılır. Bu formüllerde hesaplanan alit miktarı gerçekten düşük, belit miktarı ise gerçek yüksektir. Diğer evreler ise gerçeğe çok yakındır (Kuleli 2012).

Erdoğan (2003) yine aynı çalışmasında; çimentonun içerisinde bulunan oksit miktarları bilindiği takdirde, ana bileşenlerin oranlarını hesaplayabilmek için kullanılan Bogue denklemleri aşağıdaki gibi olduğunu belirtmiştir (Erdoğan 2003).

- $\%C_3S = (4.071 \times \%CaO) - (7.600 \times \%SiO_2) - (6.718 \times \%Al_2O_3) - (1.430 \times \%Fe_2O_3) - (2.852 \times \%SO_3)$
- $\%C_2S = (2.876 \times \%SiO_2) - (0.7544 \times \%C_3S)$
- $\%C_3A = (2.650 \times \%Al_2O_3) - (1.692 \times \%Fe_2O_3)$
- $\%C_4AF = (3.043 \times \%Fe_2O_3)$

Erdoğan'a göre (2003); bu denklemlerin kullanılabilmesi için $(Al_2O_3 / Fe_2O_3) \sim 0.64$ koşulunun mevcut olması gerekmektedir. Şayet, $(Al_2O_3 / Fe_2O_3) < 0.64$ ise, çimentonun içerisinde bir miktar alüminoferrit katı eriyiği, $(C_4AF + C_2F)$ oluşmaktadır ve bu durumda aşağıdaki denklemler kullanılmaktadır:

- $\%(C_4AF + C_2F) = (2.100 \times \%Al_2O_3) + (1.072 \times \%Fe_2O_3)$

- $\%(C_3S) = (4.071 \times \% CaO) + (7.600 \times \% SiO_2) + (4.479 \times \% Al_2O_3) + (2.859 \times \% Fe_2O_3) + (2.852 \times \% SO_3)$

Bu kompozisyondaki çimentolarda C_3A oluşmamakta ve C_2S oranını tayini için yukarıdaki denklem aynen kullanılmaktadır:

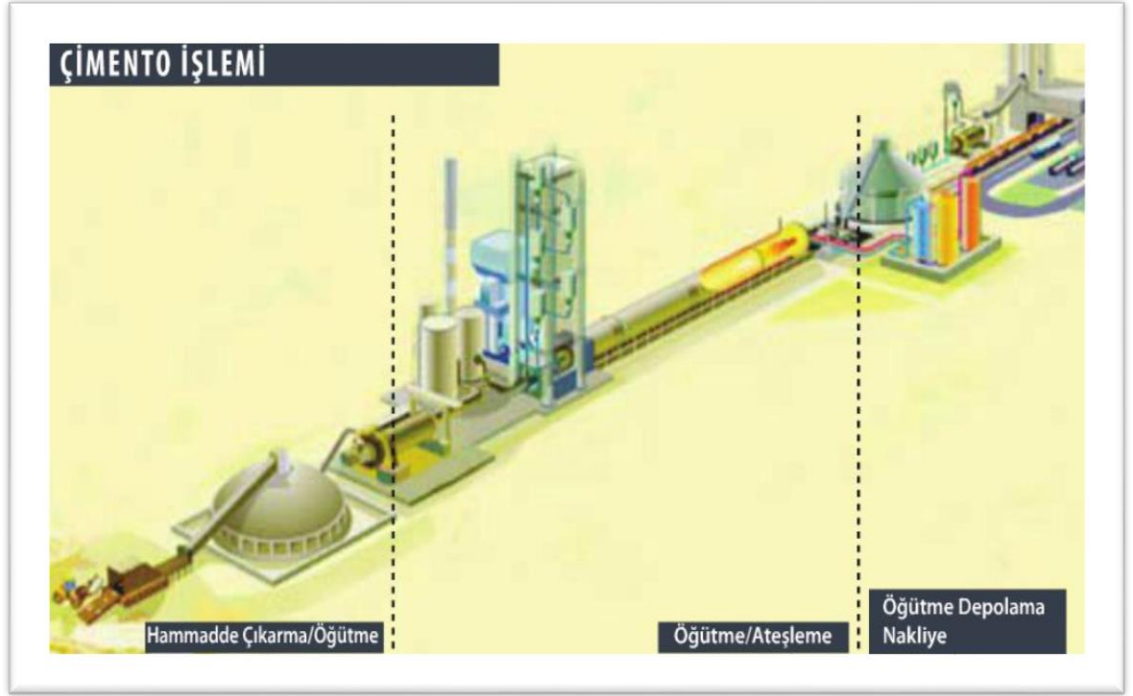
Yine Erdoğan'a göre (2003); Bogue denklemlerinin kullanılabilmesinde aşağıdaki varsayımlar geçerlidir:

- Anabileşenlerin oluşumuna yol açan kimyasal reaksiyonlar denge durumuna gelmiştir ve soğuma koşulları bu dengeyi değiştirmemektedir;
- Hammaddede yer alan oksitler anabileşenlerin oluşumunda tam olarak yer almakta ve hammaddedeki tali maddeler ihmal edilmektedir;
- Kalsiyum silikatlı anabileşenler saf haldedir ve içerlerinde yerel oksitler yer almamaktadır.

Yine Erdoğan aynı araştırmasında katkılı çimentoların anabileşenlerinin oranlarının tayininde Bogue denklemleri kullanılmayacağını belirtmiştir (Erdoğan 2003).

2.1.1.f. Portland çimento üretimi süreci

Yeğinoğlu (2003) yapmış olduğu araştırmalarda; çimento üretiminin ilk aşaması uygun hammaddelerin yer kabuğundan çıkartılması ve yüksek sıcaklıklarda yapılacak tepkimelere hazırlanması olduğunu bildirmiştir. Yeğinoğlu'ya göre yer kabuğundan çıkartılan m ve cm boyutlarındaki iri parçalar birbirleriyle iyi karışmaları, ısı ve kütle aktarım süreçlerine daha iyi girebilmeleri için mikron boyutunda parçalara indirilirler. Patlatma, kırma ve öğütme işlemleri neticesinde parçaların boyutları yaklaşık 100.000 kez küçültülür. Bütün bu fiziksel işlemlerin ardından farin adı verilen homojen bir karışım elde edilir.



Şekil 2.2. Çimento üretim tesisleri (Yeğinoğlu 2003)

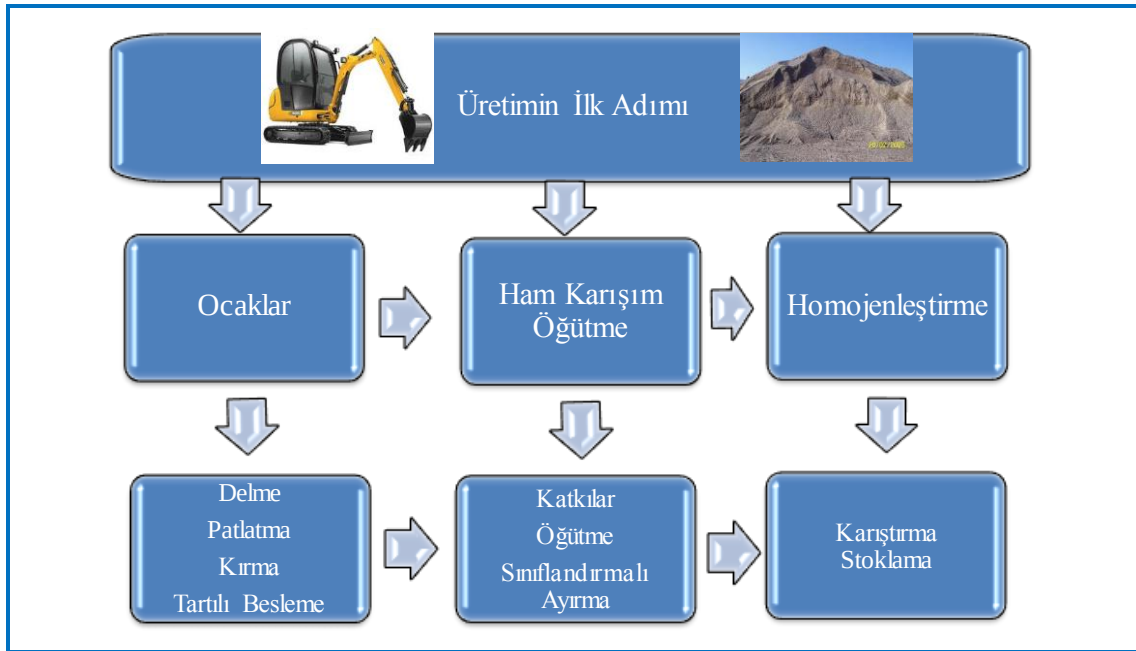
Yine Yeğinoğlu (2003), çimento hammaddelerinin dikkatle orantılanmış bir karışımı olan farinin ana bileşenleri kireç ve silis olduğunu belirtmiştir. Yeğinoğlu'ya göre bunları alümin ve demir oksit takip eder. Daha az miktarlarda magnezyum ve alkali oksitler gibi diğer maddeler de vardır (Yeğinoğlu 2003).

Yine Yeğinoğlu (2003) aynı çalışmasında, farinin fırında pişerken bu oksitlerin de önce serbest hale geldiği ve sonra, sıcaklık yükseldikçe aralarında yeni bileşikler oluşturdukları belirtilmiştir. Yeğinoğlu'ya göre burada kireç miktarının yeterli olması ve ham maddelerin gereken oranlarda birleştirilmesi önem kazanır. Bu amaçla farin bileşimi bazı formüllerle kontrol edilir, ayrıca laboratuvarında sürekli denetim altında bulundurulur. Örneğin "kireç standardını hesaplamak için kullanılan bir bağıntı şöyledir (Yeğinoğlu 2003).

$$100 C / (2.8 S + 1.18 A + 0.65 F)$$

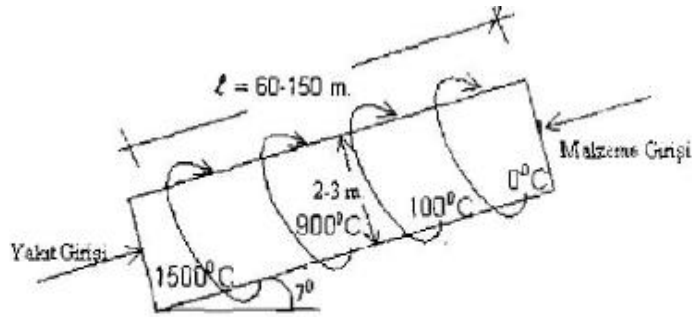
Kuleli (2012) aynı konu üzerine yapmış olduğu araştırmalarda; yukarıdaki eşitlikten bahsetmektedir. Kuleli'ye göre burada C, S, A ve F oksitlerin bileşimdeki yüzdeleri gösterir. Klinkerin hızlı soğuması halinde fırında oluşan kimyasal denge oda sıcaklığında devam eder ve normal dayanımlı bir çimento için kireç standardının 90-93 arasında olması istenir. Daha yüksek değerler ile çimento dayanımı artar. Ancak, 100'ün üzerindeki değerler dengenin bozulduğunu ve tüm kirecin bağlanamayacağını gösterir. Serbest kalan kireç pişirmede ve çimentonun hacim sabitliği ile dayanımı üzerlerinde olumsuz etki yapar. Hammaddeler kendi bileşimleri esas alınarak yapılan bu tür hassas ayarlama ve kontrollerden sonra orantılı olarak birleştirilip öğütülürler üretim süreci ilk adımları çizelge 2.14'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.14. Çimento üretim süreci ilk adımları (Kuleli 2012)



Yeğinobalı (2003) aynı konu üzerinde yapmış olduğu araştırmalarda, döner fırına girecek hammaddelerin karışımı farin, etkin bir şekilde ısıtılıp kalsine edilebilmesi için önce öğütülmesi gerektiği belirtilmiştir. Yeğinobalı'ya göre Şekil 2.3'de tipik bir modeli gösterilen, çimento fabrikalarına karakteristik görünümü veren kuleler ve döner fırın bu aşamada kullanılırlar (Yeğinobalı 2003).

Erdoğan (1995) aynı konu üzerinde yapmış olduğu araştırmalarda; öğütme işlemi düşey değirmenlerde veya yatay bilyalı değirmenlerde gerçekleştirildiğini belirtmiştir. Erdoğan'a göre öğütme işlemi, ince boyutlara getirilmiş kalkerli ve killi maddelerin kuru veya su ile birlikte çamur durumuna getirilmesi şeklinde gerçekleştirilir. Bu nedenlerle, uygulamalara, "kuru sistem" veya "yaş sistem" denilmektedir. Bazen, malzeme karışımının çok az miktarda su ile birleştirilerek işlemlerin yürütüldüğü 'yarı-kuru sistem' de uygulanmaktadır. Yaş sistemde, karışımın içerisinde yaklaşık %35 kadar su bulunduğu için, fırındaki pişirme işleminde daha çok enerji gerekmekte ve daha pahalı olmaktadır. Ancak, yaş sistem, toz kontrolünün daha kolay olması ve ekolojik yönden tercih gören bir sistemdir. Yarı-kuru sistemde, malzeme karışımının içerisinde yaklaşık %12-14 su bulunmaktadır (Erdoğan 1995).



Şekil 2.3 Çimento üretiminde kullanılan tipik döner fırın (Erdoğan 2003; Kuleli 2012).

Kuleli'ye göre (2012); çevre sıcaklığında yapılan bu fiziksel dönüşümler sonrasında hazırlanan karışımlar ısıtılır. 1450° C'ye varan yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen bir dizi karmaşık tepkime sonunda KLİNKER denen temel çimento bileşeni üretilir (Kuleli 2012).

Yeğinobalı (2003) konu ile ilgili çalışmasında; prosesi ele alarak Şekil 2.4'deki numara sırasına göre prosesi özetlemiştir.

1-Yeğinobalı'ya göre modern çimento fabrikalarında farin enerji tasarrufu amacı ile fırına girmeden önce bir ön ısıtmaya tabi tutulur. Yükseklikleri 60 metreyi geçen ön

ısıtma kulelerinde seri halindeki siklonlarda farin taneleri fırından gelen sıcak egzoz gazları içinde savrularak ısınırlar ve kısmen kalsine olurlar.

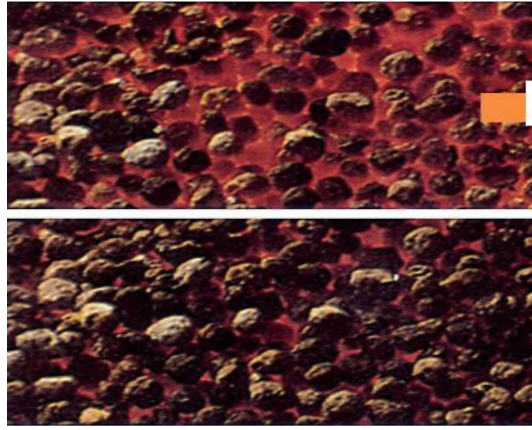
2- Yeğınobalı'ya göre bazı ön ısıtıcılarda kulenin altında ve döner fırından hemen önce bir ön kalsinasyon ünitesi bulunur. Son siklon aşamasından buraya sıcak hava ve yakıtla birlikte giren farin tanelerinde kalsinasyon, ham maddelerden CO_2 'in ayrıştırılması, %95'e varan ölçüde tamamlanabilir (Yeğınobalı 2003).



Şekil 2.4. Çimento Üretim Prosesi (Yeğınobalı 2003).

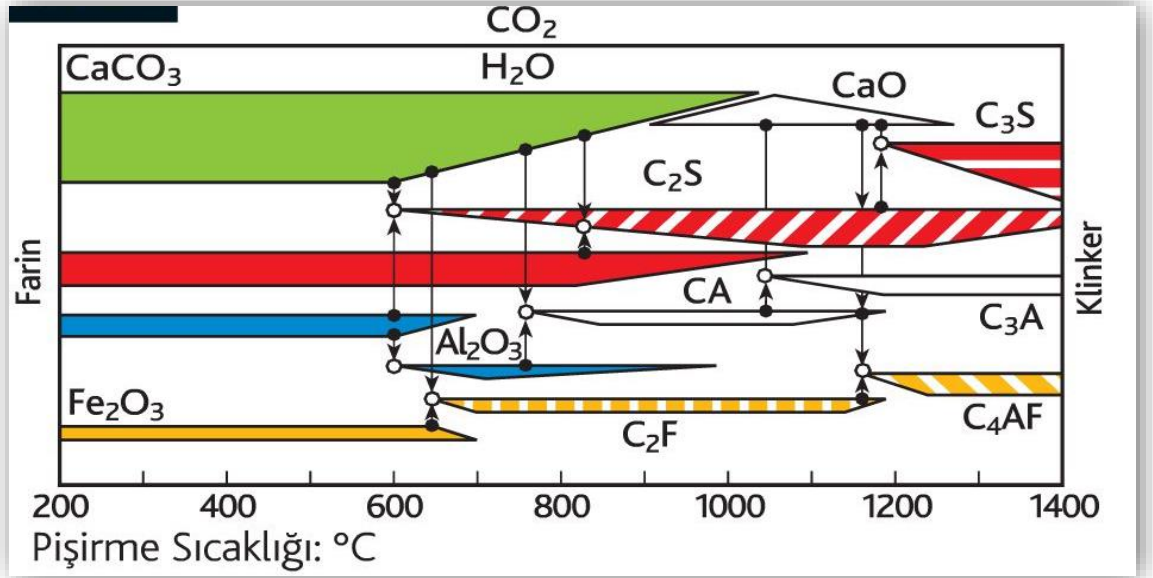
3- Yeğınobalı'ya göre döner fırın dünyada endüstri tesislerinde bulunan en büyük proses elemanı olarak kabul edilir. Çapı 3-7 m, uzunluğu 50-75 m kadar olup 50 mm kalınlığında çelik saçtan yapılmış, refrakter tuğla astarlı dev bir borudur. Yaklaşık %3-4 eğimli olarak monte edilen fırın dakikada 1.5-4 devir yaparak döner. Ön ısıtıcıdan gelen malzeme fırına yukarı uçtan girer ve fırınla beraber dönerek, yuvarlanarak, kayarak daha sıcak bölgelere, alt uçtaki aleve doğru ilerler. Bu arada geri kalan CO_2 'de malzemedan ayrılır ve ilerde özetlenecek bir dizi kimyasal reaksiyon meydana gelmeye başlar (Yeğınobalı 2003).

4- Yeğınobalı'ya göre döner fırının alt ucunda toz kömür, doğal gaz, fuel oil gibi yakıtların yakılması ile oluşturulan alevin çıktığı boru bulunur. Alev borusundan çıkan beyaz kor halindeki alevin sıcaklığı 1870°C değerine -yani güneş yüzeyindeki sıcaklığın üçte birine ulaşır. Bu en sıcak bölgede sıcaklığı 1480°C'ye varan kalsine malzeme kısmen ergiyip sıvılaşmaya başlar, ince taneler birbirlerine yapışıp daha büyük boydaki klinker tanelerini oluştururlar. Fırının alt ucundan çıkan klinker üzerinde soğutma işlemi uygulanır (Yeğınobalı 2003).



Şekil 2.5. Klinker soğuma süreci (Yeğınobalı 2003)

Yeğınobalı'ya göre (2003); döner fırında çimento ham maddeleri içindeki kireç, silis ve alumin sıcaklık arttıkça önce serbest hale gelirler, sonra da kendi aralarında birleşip yeni bileşikler meydana getirirler. Ön ısıtmada ve fırının en üst bölgesinde malzemedeki serbest ve kristal sular buharlaşır, kil ayrışır ve CO₂ kalkerden ayrılmaya başlar. Aşağıya doğru, daha sıcak bölgelerde kalsinasyon tamamlanır, serbest kalan CaO kilden ayrılan SiO₂ ve Al₂O₃ ile birleşerek kalsiyum silikat ve kalsiyum aluminatları meydana getirir. Farinden klinkere geçişte çimento ham maddelerindeki mineral faz değişimleri Şekil 2.6'da gösterilmiş olup pişirme sırasında gerçekleşen fiziksel ve kimyasal değişimler aşağıda özetlenmiştir (Yeğınobalı 2003).

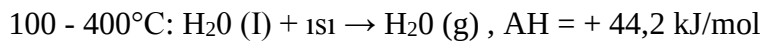


Şekil 2.6. Farinden klinkere geçişte çimento hammaddelerindeki mineral faz değişimleri (Yeğınobalı 2003)

a. Çimento üretimi sırasında gerçekleşen fiziksel ve kimyasal değişimler

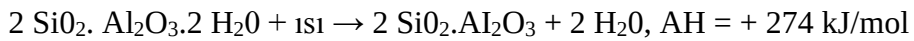
Kuleli (2012) yapmış olduğu araştırmalar neticesinde; çimento hammaddelerindeki mineral faz değişimlerini aşama aşama incelemiştir.

1. Buharlaşma Bölgesi

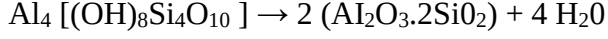


2. Kil Dehidrasyon Bölgesi

350 - 650°C: Kil kristal suyunu yitirmeye başlar:



Kuleli'ye göre (2012); Kaolinitin dehidrasyonu örneğinde gösterildiği gibi kimyasal olarak bağlı su bünyeden dışarı atılır (dehidrasyon) (Kuleli 2012):



Kaolinit Metakaol

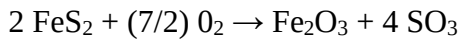
Kuleli'ye göre (2012); metakaolin yüksek sıcaklıklarda bozunarak Al_2O_3 and SiO_2 gibi çok etkin oksitlere dönüşür (Kuleli 2012).

400°C:

Kuleli'ye göre Magnezyum karbonat bozunmaya başlar:



Organik bileşikler ve sülfidler buharlaşır ve yükseltgenir:

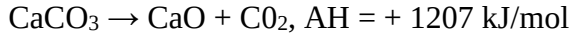


550°C:

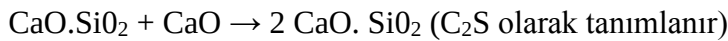
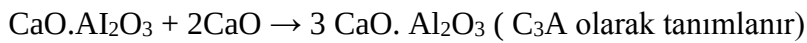
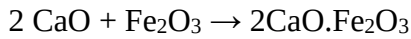
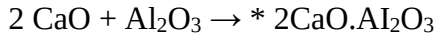
Kuleli'ye göre (2012); çimento hammaddelerininin %74-79 nu oluşturan CaCO_3 bozunmaya başlar (eşdeğer terimler: ayrışmak, dekarbonize olmak, kalsinasyon). Asit ortam ve SiO_2 Al_2O_3 gibi serbest kireçle tepkimeye giren diğer oksitlerin varlığı CaCO_3 m bozunmasma yardımcı olur (Kuleli 2012).

3. Kalsinasyon (: dekarbonizasyon) Bölgesi 900°C

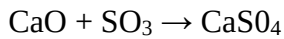
- Kuleli'ye göre (2012); bu sıcaklıkta ayrışma basıncı 1 bar'dan büyük olduğu için CaCO_3 hızla CaO ve CO_2 e ayrışır (Kuleli 2012):



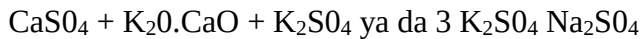
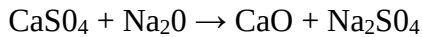
Kuleli'ye göre oluşan serbest kireç ortamda bulunan diğer oksitlerle tepkimeye başlar:



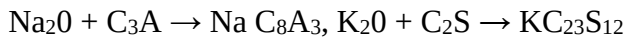
- Serbest CaO anhidrit oluşturmak üzere SO₃ ile tepkir:



- Bu anhidrit kilden gelen alkalilerle tepkiyerek alkali sülfatları oluşturur (Kuleli 2012):



- Kuleli'ye göre (2012); çoğunlukla SO₃ miktarı alkalilerin tamamı ile birleşmek için yetersizdir (Kuleli 2012).



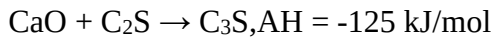
4. Klinkerleşme Bölgesi

1200°C

- Belit (C₂S) oluşumu: $2 \text{CaO} + \text{SiO}_2 \rightarrow 2\text{CaO.SiO}_2, \text{AH} = -125 \text{ kJ/mol}$

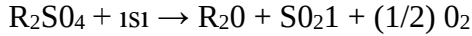
Kuleli'ye göre; $C_{12}A_7$ kireçle zenginleşir ve C_3A 'ya dönüşür. C_2A ve C_2F bir katı eriyik oluştururlar: C_4AF , $AH = - 50,4 \text{ kJ/mol}$ $1250 - 1450^\circ\text{C}$ (Sinterleşme, klinkerleşme tepkimeleri) (Kuleli 2012).

- C_3A ve C_4AF sıvılaşır ve bağlayıcıyı oluştururlar (sıvievre). Bu ortamda C_2S serbest kireçle birleşir ve C_3S (Alit) oluşur (Kuleli 2012) ;

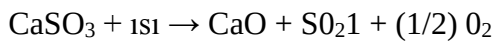


Kuleli'ye göre (2012); Trikalسيومsilikat = Alit = C_3S klinkerin ana ve en değerli bileşenidir, çimentonun dayanım kazanmasını sağlar (Kuleli 2012).

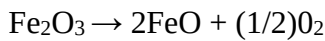
- Kuleli'ye göre alkali sülfatlar alkali ve SO_2 oluşturarak bozunurlar:



- Anhidrit CaO ve SO_2 ye ayrıştır:



- İndirgen ortamda demir 3-oksit demir 2-oksit dönüşür:



Kuleli'ye göre (2012); sinter eriyiği içinde C_3S ve C_2S katı evreler olarak bulunurlar. Sıcaklık $>1400^\circ\text{C}$ olduğunda diğer oksitler de (SiO_2 ve Al_2O_3) sıvı evre içindedirler (Kuleli 2012).

Eriyiğin (bağlayıcının) yaklaşık bileşimi:

$$C=56, S=7, A=23, F=14(\text{ağ}\%)$$

Kuleli'ye göre (2012); 450°C'deki sıvı evre miktarı, yaklaşık olarak, aşağıdaki formülle hesaplanır:

$$\text{Sıvı Evre (toplamın Ağ\%olarak)} = 3,00 A + 2,25 F + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}$$

Aşağıdaki koşullar bu tepkimeleri hızlandırır:

- Sıvı evrenin oranını artırmak
- Sıvı evrenin kıvamını azaltmak
- Farin içindeki iri tanelerin, özellikle kuvarsın, orantısını düşürmek (Kuleli 2012).

5. Soğutma Bölgesi

1450-1250°C:

- Al biçimindeki C_2S su ile daha kolay birleşebilen C_2S biçimine dönüşür.
- C_3A ve C_4AF kristalleşir, erimiş bulunan sülfatlar kristalleşir.

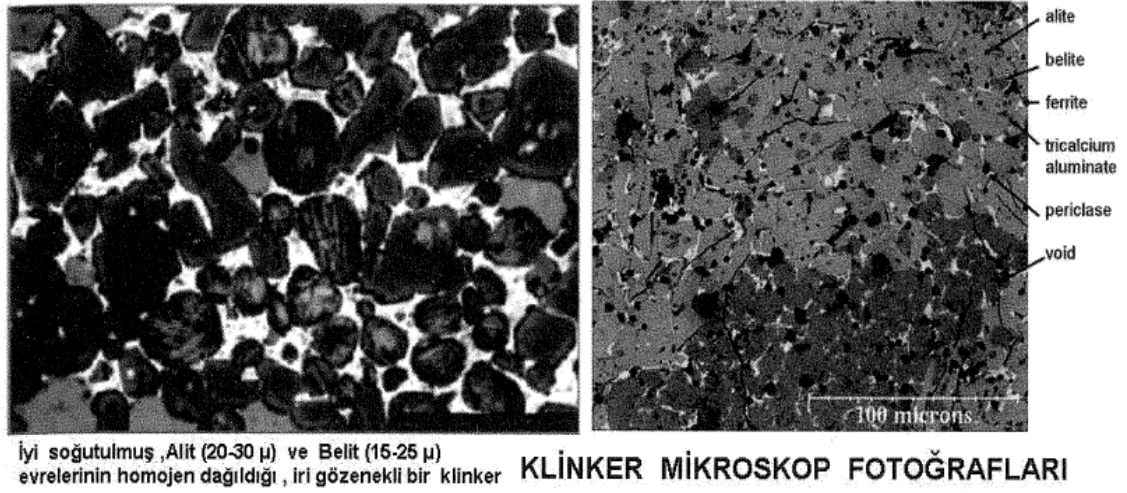
Kuleli'ye göre (2012); sinterleşme tepkimelerinin tersinmesini önlemek için klinker (KK) hızla soğutulur, böylece oluşan C_3S miktarı da olabildiğince korunur; bir başka deyişle klinkerleşme sıcaklığında sağlanan denge "dondurulur." Soğutulan klinkerin bileşimi fırında sinterleşme sıcaklığında üretilen klinker ile aynıdır (Kuleli 2012).

Klinkeri 100-150°C lere dek hızla soğutmak

- Alit miktarını korur, böylece reaktif (etkin) bir klinker üretilir.
- Çimento yapmanın son basamağında klinker alçıtaşı ile birlikte öğütülürken daha iyi bir öğütülebilirlik sağlar.

- Alüminat ve ferrit evrelerinin diğerleri arasında dağılıp kristalleşmeleri çimentonun daha yavaş sertleşmesini sağlar.

Farin içindeki MgO > %2,5 olduğunda genleşmeyi önler



Şekil 2.7. Klinker mikroskop fotoğrafları (Kuleli 2012)

Kuleli'ye göre (2012); yukarıda açıklanan kimyasal tepkimeler sonunda üretilen klinker miktarı FARIN / KLİNKER (F/K, ton/ton) oranı ile belirlenir, "klinker faktörü" denen bu oran 1,52-1,58 kadardır (Kuleli 2012).

$F / K = 100 / \text{"(100 - \%Farin Kızdırma Kaybı)"} \text{ olarak tanımlanır.}$

2.1.1.g. Portland çimento hidratasyonu ve hidratasyon ürünleri

a. Hidratasyon Tanımı

Erdoğan'a göre (2003); çimento ve suyun birleşerek kimyasal reaksiyonların yer alması olayına "çimentonun hidratasyonu" denilmektedir (Erdoğan 2003).

Güner ve Sürme'ye göre (2000); priz süresi hidrasyonun sertleşme bölgesinde gerçekleşen ve çimentonun prizi su ile reaksiyona girmesi sonucu başlayan katılaşma olayına ise priz süresi denilmektedir. Standartlara göre bu olayın 1 ile 10 saat arasında gerçekleşmesi beklenir (Güner and Sürme 2000).

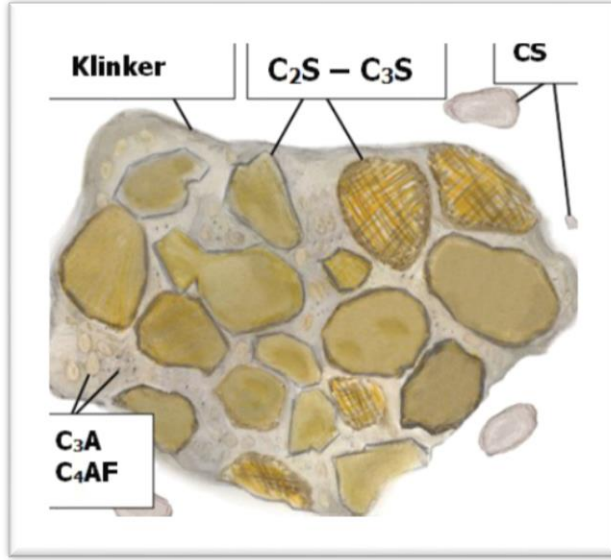
b. Hidratasyon Süreci

Erdoğan (2003) konu ile ilgil yapmış olduğu araştırmalarda, çimentoların katılaşması (prizi) ve sertleşmesi bu reaksiyonlar sonucunda meydana geldiğinden çimentonun hidrasyonu sözcüğü genellikle çimentonun su ile birleşerek sertleşmesi sürecini ifade ettiğini belirtmiştir (Erdoğan 2003). Erdoğan'a göre; bu süreç içinde önce plastik bir çimento macunu oluşur, bu zamanla sertleşip son biçimini alır. Sertleşme iki aşamalıdır:

1. Priz: Çimentonun suyla karışması sonunda oluşan macunun koyulaşması, bu karışıma biçim verilebilir, dayanımı çok azdır.
2. Sertleşme: Macun giderek koyulaşıp sertleşir ve dayanım kazanır. 1.durumdan 2.sine geçiş çeşitli evrelerde oluşur.

Bu evreleri daha yakından incelemek için Kuleli benzer bir araştırma yapmış ve aşağıdaki sonuçlara ulaşmıştır.

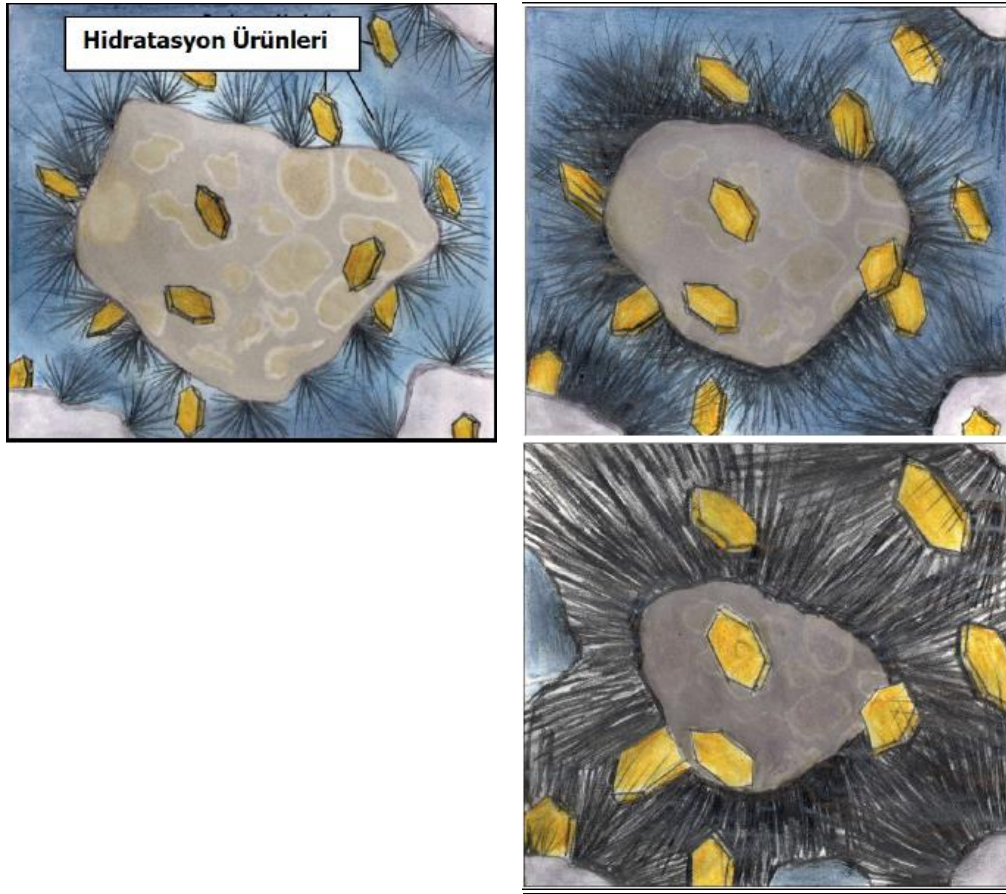
- Kimyasal tepkimeler: Hidratasyon, hidroliz
- Çözünme ve kristalleşme: Aşırı doymuş sulu çözeltiden macunumsu görünümlü kristaller oluşması
- Ara yüzeylerde değişimler: Çimento macunu içinde oluşan yeni bileşenler yüzey etkin kuvvetlerle birbirlerine bağlanırlar (Kuleli 2012).



Şekil 2.8. Hidratasyon sürecinde ana bileşenlerin durumu (Kozmatka *et al.* 2006)

Kozmatka vd (2006) yapmış oldukları araştırmalar neticesinde; hidratasyon sürecini ve bu süreçte ana bileşenlerin durumunu analiz etmişlerdir (Şekil 2.8). Kozmatka vd (2006) göre şekil 2.8’de belirtilen üç ana bileşenin ortak yanı kalsiyum(Ca) içermeleridir. Bu üç ana bileşenin kimyasal özellikleri ve etkileri oldukça farklıdır. Kozmatka vd göre, hidratasyon reaksiyonunun süreçleri; Karıştırma süreci, Uyku süreci, Sertleşme (priz) süreci, Soğuma süreci, Yoğunlaşma süreci olarak belirlenmiştir (Kozmatka *et al.* 2006).

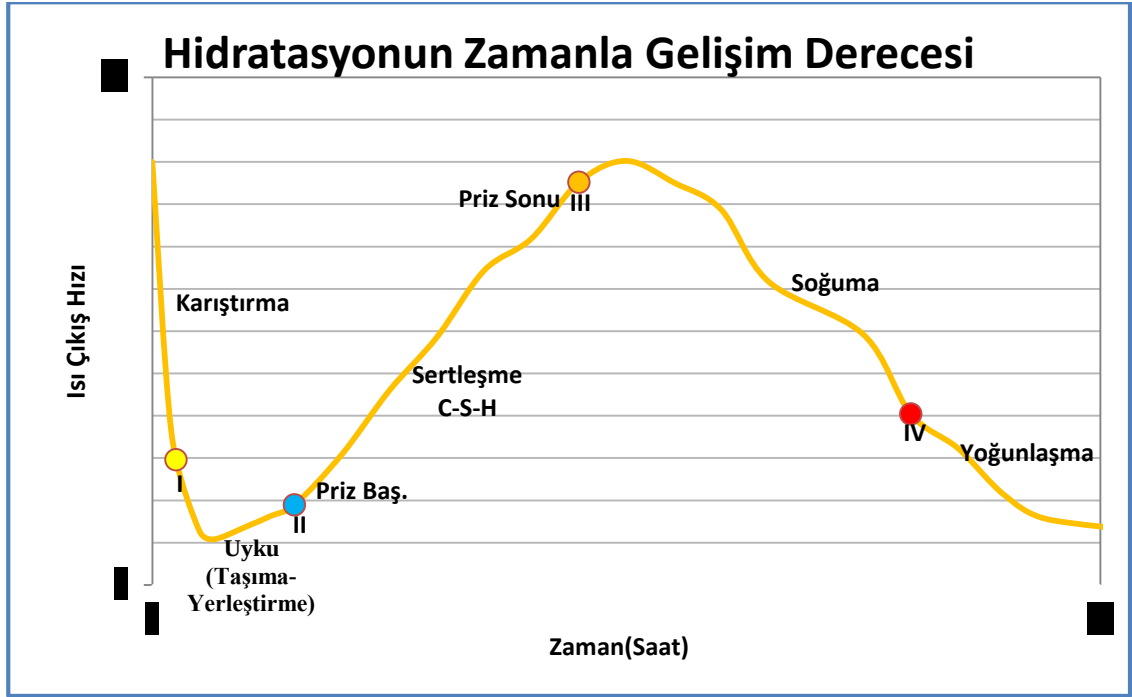
Kozmatka vd (2006) göre; hidratasyon sürecinin sonunda yüksek dayanıma sahip katılaşmış bir ürün elde edilir. Hidratasyon tepkimeleri ısı verir. Isı oluşumu 1-gün içinde en üst değerine ulaşır, 3-gün sonunda azalır. Şekil 2.9’da katkısız tipik bir çimento tipi için betonun sertleşmeye başladığı andan itibaren hidratasyon sürecinde çimento hamurundaki değişim gösterilmiştir. Şekil 2.10’da ise hidratasyon süreci ve evreleri özetlenmiştir.



Şekil 2.9. Hidratasyon sürecinde çimento hamurunun durumu (Kozmatka *et al.* 2006)

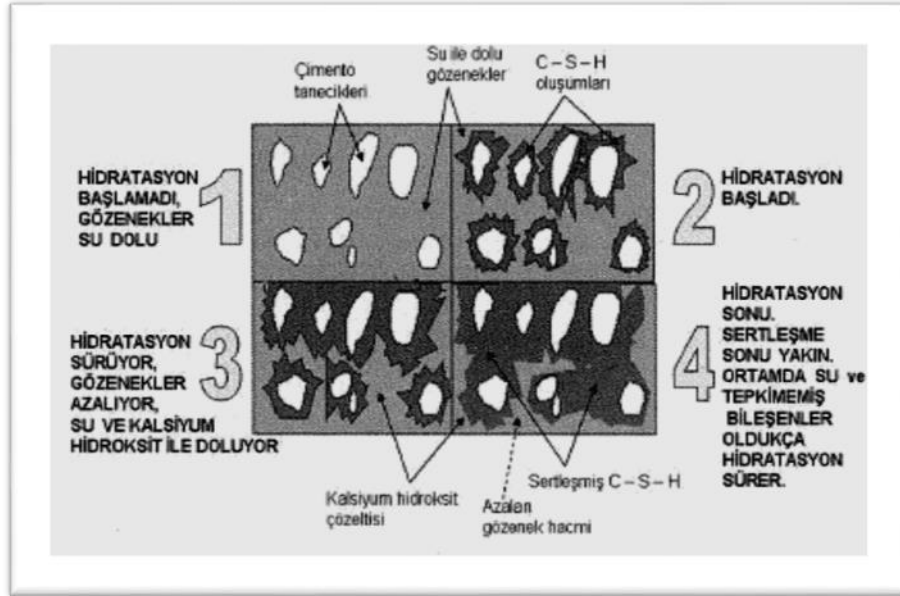
Kuleli’de hidratasyon süreçleri ile ilgili araştırmalarında aşağıda ki sonuçlara ulaşmıştır.

1. Evre hızlıdır, sıcaklık artar. 2.Evrede (1-3 saat) sıcaklık artışı çok azdır, betonun taşınması ve işlenmesi bu sırada tamamlanmak zorundadır. 3.ve 4. Evrelerde beton sertleşmeye başlar (Kuleli 2012).



Karıştırma	Uyku Süreci	Sertleşme Süreci	Soğuma Süreci	Yoğunlaşma
Başlangıç ile I Arası	I-II Arası	II-III Arası	III-IV Arası	IV'den sonraki Süreç
10-15 dk. İçinde Gerçekleşir	2-4 saat içinde sona erer.	2-4 saat içerisinde sona erer.		Yıllarca Devam Eder
Yüksek Isı Çıkışı aniden gerçekleşir ve aniden düşüş gösterir	Karışım plastik ve işlenebilirdir. Isı çıkışı çok düşük seviyededir.	Yüksek Isı çıkışı olur. Betonda sertleşme başlar. Beton dayanım kazanmaya başlar.	Büzülme ve sürtünme sonucu oluşan iç gerilme, dayanım kazanımını geçmemelidir. Bu çatlamalara neden olabilir.	Beton dayanım ve dayanıklılık kazanmaya devam eder.
Karışım tasarımı önemlidir.	Beton kolayca taşınabilir, yerleştirilebilir ve bölme işlemi yapılabilir.	Çok geçmeden küre ve korumaya başlanılmalıdır.	Gerilmeleri azaltmak için derz kesimine başlanır.	Erken yaşta beton ani sıcaklık değişimlerinden etkilenmemesi için üzerine yalıtkan örtüler serilerek korunmalıdır.

Şekil 2.10. Hidratasyon süreci ve meydana gelen değişiklikler (Kozmatka et al. 2006)



Şekil 2.11. Hidratasyon sürecinde kalsiyum silikat içinde gözeneklerin değişimleri (Kuleli 2012)

Erdoğan (2003); çimento hamurunun sertleşip dayanım kazanabilmesi sürecine yapmış olduğu araştırmada bu konuya ait iki klasik teori bulunduğunu rapor etmiştir. Erdoğan'a göre; bunlardan birincisi, 1882'de Le Chatelier tarafından öne sürülmüştür. Buna göre, çimentonun hidratasyon ürünlerinin çözünme özelliği orijinal ana bileşenlerinkinden daha düşüktür ve hidratlar süperdoygün bir solüsyondan çökmektedir. Çökeltiler, yüksek kohesif ve adhesif özellikteki dantel dokusu gibi iç içe girmiş kristallerden oluşmaktadır. İkinci teori ise, 1893'de Michaelis tarafından öne sürülmüştür. Çimento hamurunun ilk dayanımı, kristal alüminatlar, sülfoalüminatlar ve kalsiyum hidroksit tarafından sağlanmaktadır. Daha sonra, kirece doygün su, silikatlarla reaksiyona girmekte ve erimeyen özellikteki kalsiyum-silika-hidrat jellerini oluşturmaktadır. Kolloidal boyutlardaki bu çok küçük hidratasyon ürünleri çok büyük yüzey alanlarına sahiptir. Çimento hamurunun dayanımı kolloidal büyüklükteki hidratasyon ürünleri arasındaki kohezyon nedeniyle sağlanmaktadır. Çimento hamurunun dayanım kazanmasında hidratasyon ürünlerinin tümünün az çok katkısı olmakla beraber, dayanımın oluşmasındaki en büyük pay C-S-H jellerine aittir. Hatta çimento hamurunun dayanımının C-S-H jellerinin oluşmasından kaynaklandığı söylenmektedir (Erdoğan 2003).

Kuleli (2012) aynı konu üzerindeki araştırmalarında; süreci gözlemlemiş ve yukarıdaki Şekil 2.11 hidrasyon süreci boyunca Kalsiyum silikat içerisindeki gözeneklerin gelişim sürecini analiz etmiştir (Kuleli 2012).

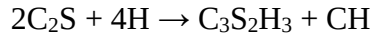
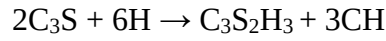
Erdoğan'a göre (2003); C-S-H jellerinin çimento hamuruna sağladığı dayanımın nasıl kaynaklandığı kesin olarak bilinmemekle birlikte, ortaya çıkan dayanımın muhtemel nedeni iki tür bağ kuvvetinin varlığıyla açıklanmaktadır: Bağ kuvvetlerinin birincisi, birbirinden çok küçük mesafeyle jel boşluğu kadar uzakta olan çok küçük katı parçacıkların arasındaki fiziksel çekimdir. Bu tür bağ, genellikle, van der Waal kuvvetleri olarak anılmaktadır. Bağ kuvvetlerinin ikincisi ise, van der Waal kuvvetlerinden çok daha büyük olan, kimyasal (iyonik ve kovalant) bağlardır. Jel parçacıkları bu tür bir bağ nedeniyle bir dokuma örgüsü gibi çarpaz olarak bağlanmaktadır. Çimento hidrasyonu sonucunda C-S-H oluşumunun daha fazla olması arzu edilir. C-S-H'in fazla oluşması ile çimento pastasında daha düşük boşluk oranı ve sonuçta da kompakt bir yapının oluşması sağlanmaktadır. C₃S fazının su ile hidrasyon reaksiyonu sonucu C₂S fazından oluşana göre daha az C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) ve 2 kat daha fazla Ca(OH)₂ oluşmaktadır. BAB çimentosunda α veya α' -C₂S'den dolayı oluşan C-S-H yaklaşık 99 g iken normal bir Portland çimentosunda C₃S'den dolayı 75 g kadar C-S-H oluşmaktadır. BAB Çimentosunun bu yönüyle önemli bir avantaj sağlayacağı düşünülmektedir (Erdoğan 2003).

c. Klinker minerallerinin hidrasyonu ve hidrasyon ürünleri

Erdoğan (2003) konuyla ilgili yapmış olduğu araştırmalarda, çimento ve su birleştirilir birleştirilmez, her ana bileşen su ile ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve hidrasyon sonunda her ana bileşen tarafından değişik hidrasyon ürünleri oluştuğunu belirtmiştir. Erdoğan'a göre; bu reaksiyonların etkisiyle çimento hamuru katılaşmakta (priz almakta) ve sertleşmektedir (dayanım kazanmaktadır). Çimento hamurunun özellikleri, kimyasal reaksiyonlar sonucunda ortaya çıkan değişik özelliklerdeki hidrasyon ürünlerinin çimento hamurunun içerisinde ne oranda yer almış oldukları tarafından belirlenmektedir (Erdoğan 2003).

Aşağıda, Erdoğan'ın yapmış olduğu araştırmalara neticesinde derlemiş olduğu çimento anabileşenlerinin hidratasyonu ve ortaya çıkan hidratasyon ürünlerinin özellikleri açıklanmaktadır (Erdoğan 2003).

C₃S ve C₂S Anabileşenlerinin (Kalsiyum Silikatların) Hidratasyonu ve Hidratasyon Ürünlerinin Özellikleri – Erdoğan'a göre Trikalsiyum silikat (C₃S) ile su (H) arasındaki reaksiyon ve dikalsiyum silikat (C₂S) ile su arasındaki reaksiyon aşağıdaki denklemlerle gösterilmektedir:

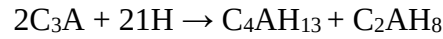


Erdoğan'a göre (2003); gerek C₃S, gerekse C₂S, bir miktar su ile birleştiğinde, ortaya çıkan hidratasyon ürünlerinin türü aynıdır: CH ve C₃S₂H₃• CH, kalsiyum hidroksittir. (CaO.H₂O=Ca(OH)₂). C₃S₂H₃ (yani, 3CaO.2SiO₂.3H₂O), "tobermorit" olarak adlandırılmaktadır. Tobermorit ismi, bu hidratasyon ürününün, doğada aynı isimle anılan bir minerale benzerliğinden dolayı verilmiştir. Kalsiyum-silika32 hidrat olarak ortaya çıkan hidratasyon ürünü, son yıllarda, sadece C-S-H (kalsiyum-silika-hidrat) jeli olarak adlandırılmaktadır. "Jel" sözcüğü, kolloidal katı malzeme topluluğunu ifade etmektedir. C₃S ve C₂S ana bileşenlerinin hidratasyonu için gereken su miktarı yaklaşık olarak aynıdır. Ancak, C₃S anabileşeninin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit miktarı, C₂S anabileşeninin hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan kalsiyum hidroksit miktarının iki katından biraz daha fazladır (Erdoğan 2003).

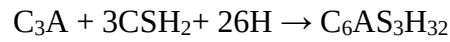
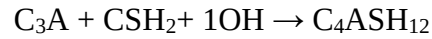
Çizelge 2.12'ye tekrar göz atılacak olursa, çimento hamurunun bağlayıcılık özeliğinin (dayanımının), kalsiyum silikatlı anabileşenlerin hidratasyonu sonucunda kazandığı dikkat çekmektedir. Kalsiyum silikatlı anabileşenlerin hidratasyonu sonucunda elde edilen kalsiyum hidroksit'in çimento hamuruna kazandırdığı dayanım çok yüksek değildir. O halde, çimento hamurunun kazandığı dayanımın C-S-H jelleri tarafından sağlandığını belirtebilmek doğru olmaktadır. Çimento hamurunun kazandığı dayanım

C₃S ve C₂S anabileşenlerin hidratasyonu ile ortaya çıkan C-S-H jellerinin miktarına bağlıdır.

C₃A Anabileşeninin Hidratasyonu ve Ortaya Çıkan Hidratasyon Ürünlerinin Özellikleri; Erdoğan'a göre C₃A ve su arasındaki reaksiyonlar çok büyük bir hızla yer almakta ve kalsiyum-alümino-hidratların oluşmasına yol açmaktadır (Erdoğan 2003):



Yukarıdaki kalsiyum-alumino-hidratlar kararlı değildir ve kısa sürede kararlı formdaki kübik hidregamet (C₃AH₆) durumuna dönüşmektedir. C₃A ile su arasındaki reaksiyonlar çok büyük miktarda ısı açığa çıkartacak tarzda ve büyük bir hızla olduğundan, çimento hamurunun "ani priz"ine yol açmaktadır. Ani priz sonucunda çimento hamuru derhal katılaşma gösterdiği gibi, önemli sayılabilecek bir dayanım da kazanmamaktadır. Çimento hamurunun ani priz yapmasını önlemek amacıyla, çimento üretimi esnasında, klinkere bir miktar (%3 • 6) alçıtaşı katılmakta ve bu iki malzeme birlikte öğütülmektedir. Çimentonun yapısında yer alan C₂SH₂ (alçıtaşı), C₃A ve su ile birlikte reaksiyona girmekte, böylece reaksiyon hızını yavaşlatmaktadır. C~, su ve alçıtaşı arasında aşağıdaki reaksiyonlar yer alabilmektedir:



Yukarıdaki denklemlerden görülebileceği gibi, C₃A, su ve alçıtaşının reaksiyonları ile çimento hamurunun içerisinde hem bir miktar C₄ASH₁₂, hem de C₆AS₃H₃₂ ürünleri oluşabilmektedir. C₄ASH₁₂, (kalsiyum-alumino-monosülfhidrat) ürünü, bünyesine 12 molekül su alarak oluşmaktadır. Bu kristalin oluşması, çimento hamurunun içerisinde bir miktar genleşmeye yol açmaktadır. Plaka şekline sahip (tipik boyutu 1x1x0.1mm olan) bu kristaller yarı-kararlı özelihtedir. Yani, daha fazla sülfatın bulunduğu ortamda C₆AS₃H₃₂ durumuna dönüşebilmektedirler.

Erdoğan'a göre (2003); sonuç olarak Süifatl  ortamlardaki betonlar için kullanılacak çimentonun daha az C_3A oranı içermesi halinde, betonun genle mesi ve buna bağlı olarak betonun hasar görmesi olasılığı daha az olmaktadır. Bu nedenele bu bölgelerde sülfata dayanıklı tip çimentoların kullanılması etrengit oluşumunu ve hasarı azaltaca ından kullanımları uygun olacaktır (Erdoğan 2003).

Hidratasyon sürecinde önemli bir rol oynayan etrengit hidratasyon sürecinde önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır.

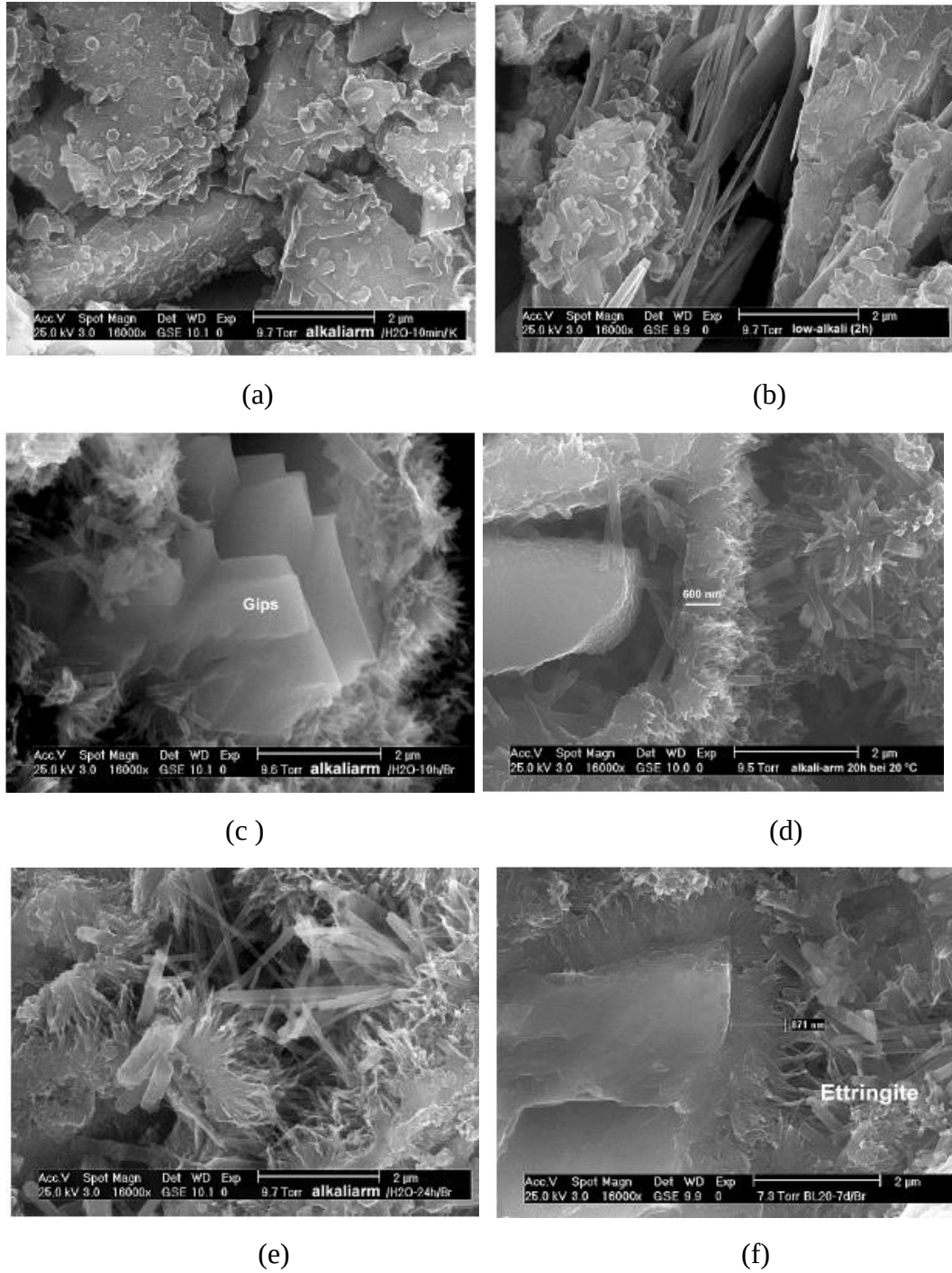
d. Hidratasyon sürecinde Etrenjitin rolü

$C_6AS_3H_{32}$, "kalsiyum-alumino-tris lfohidrat", "Candlot tuzu", veya daha popüler bir isim olan "etrenjit" olarak anılmaktadır. $CsAS_3H_{32}$ için verilen etrenjit (ettringite) ismi, bu ürünün doğada aynı isimle anılan bir minerale benzerliğinden gelmektedir. Hekzagonal kesitli ve çubuk şekilli etrenjit kristalleri oldukça kararlıdır. Bünyesinde 32 molekül su bulunduran etrenjitin oluşması,  imento hamurunun içerisinde çok büyük genle melerin yer almasına yol açmaktadır.

M ser ve Starkın (2000) konu ile ilgili yapmış oldukları araştırmada, hidratasyon gelişiminin takibine yönelik olarak son yıllarda yapılan çalışmalar daha çok geli mi  mikroskopların ( evresel taramalı elektron mikroskobu) kullanımı ile yo unla mı  olduğu ifade edilmiştir (M ser and Stark 2000). M ser ve Stark'a göre çevresel taramalı elektron mikroskobu hidratasyon ürünlerinin gerçek görüntülerini (karbonatlaşma, kuruma vb. etkilerin olu madı ı) elde etmeye imkân sağlamaktadır. M ser ve Starkın yapmış olduğu bu çalışmalardan biri, gerçekteki hidratasyon ürünlerinin gelişimini ve etrenjitin buradaki rolünü yorumlamak açısından aşağıda özetlenecektir.

7 günlük örneklerle yapılan mikroyapı incelemeleri sonucunda hidratasyon ürünlerinin ortaya  ıkı ları ve kristal boyutlarının zamana bağlı gelişimi  ekil 2.12.'de hidratasyon ba langıcından 10 dk, 2 saat, 10 saat, 20 saat, 24 saat ve 7 gün sonraki mikroyapı fotoğraflarından örnekler verilerek hidratasyon ürünlerinin boyutlarının değişimi

incelenecektir. Şekil 2.13'de ise 14-179-185 gün süreyle kür edilmiş çimento hamurunun mikro yapı fotoğrafları ve çimento hamurunun mikroyapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Çimento hamurunun hidrasyon bağlangıcından; a) 10 dk, b) 2 saat, c) 10 saat, d) 20 saat, e) 24 saat ve f) 7 gün sonra mikroyapı görünümleri (Tosun-2007)

Şekil 2.12. (a)'da hidrasyon başlangıcından 10 dakika sonraki durum görülmektedir. Küçük hekzagonal etrenjit kristallerinin çimento taneleri üzerinde düzensiz şekilde oluştuğu ve tane etraflarını sarmaya başladıkları görülmektedir.

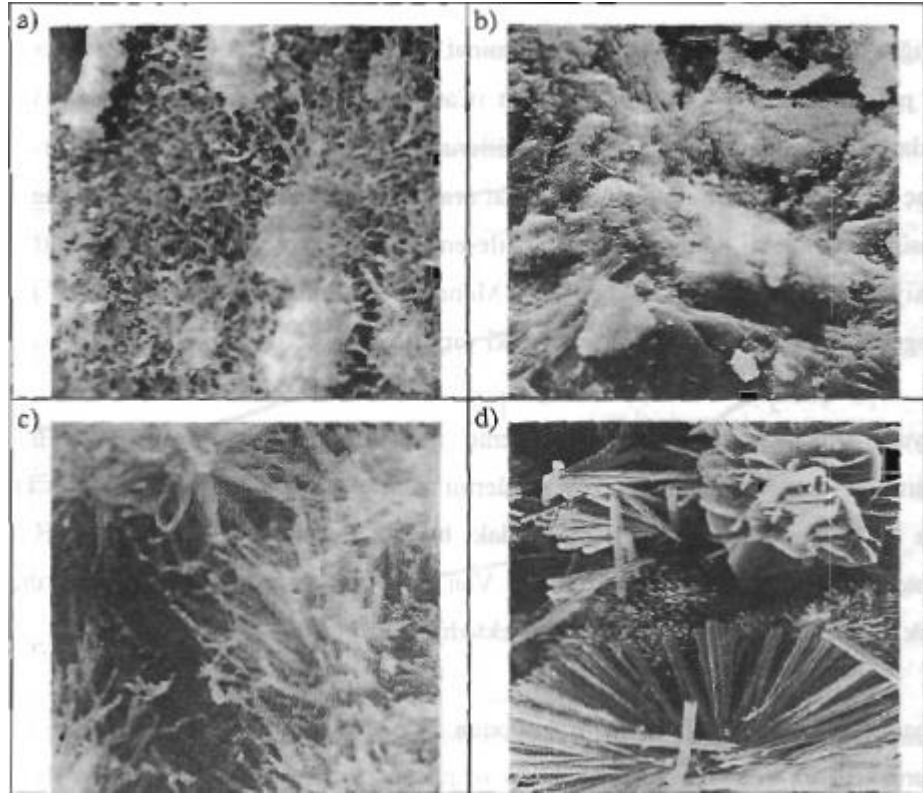
Şekil 2.12. (b)'de 2 saat sonraki durum verilmiştir. Etrenjit kristalleri klinkerlerin etrafını sarıp, C_3A 'nın reaksiyonunu durdurmuştur.

Şekil 2.12. (c)'de 10 saat sonraki görüntü verilmiştir. Etrenjit yüzeyden ayrılmış, bozularak çözülmüş ve boşlukta daha iri ve uzun kristaller şeklinde yeniden oluşmuştur (kristal uzunluğu yaklaşık 600 nm). Bu esnada ayrışan etrenjitten salınan sülfat ile boşluk suyundaki kalsiyum iyonları reaksiyona girip ikincil alçıtaşını oluşturmuştur. CSH uzunluğu yaklaşık 500 nm'ye ulaşmıştır.

Yirminci saatte çekilen fotoğrafın verildiği **Şekil 2.12. (d)**'de etrenjit ve CSH kristallerinin boylarındaki uzamanın sürdüğü görülmektedir.

Şekil 2.12. (e)'de örnek bir günlük olup, etrenjitlerin uzunluğu 2,5 mikrona ulaşmıştır. Etrenjit kristallerinin prizmatik iğnecik görünüşleri daha belirgindir. CSH uzunluğu da yaklaşık 600 nm'ye ulaşmıştır. Son olarak **Şekil 2.12. (f)** de 7 günlük durum verilmiştir. Etrenjit kristallerinin boyu 2,5 mikronda sabitlenmiş ve CSH kristalleri de yaklaşık 900 nm – 1 mikrona ulaşmıştır. İçyapıda masifleşme görülmüştür. Tüm bu görüntüler 16000 kat büyütmede çekilmiştir (Tosun 2007).

Aşağıdaki şekilde ise 14-179-185 gün kür edilmiş çimento hamurunun yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.13. Çimento hamurunun boşluklu yapısı (Baradan *et al.* 2002)

Şekil 2.13’de gösterilen çimento hamuru örneklerinin özellikleri aşağıda kısaca açıklanmıştır:

- a) S/Ç oranı 0,6 olan ve 14 gün 24°C de kür edilmiş Portland çimentosu hamurunun CSH yapısı
- b) S/Ç oranı 0,6 olan ve 179 gün 6 °C de kür edilmiş Portland çimentosu hamurunun CSH yapısı ve Ca(OH)_2
- c) S/Ç oranı 0,6 olan ve 185 gün kür edilmiş Portland çimentosu hamurunun CSH yapısı ve boşlukları
- d) Mono sülfü alüminatın hekzogonal kristalleri ve iğne formundaki etrenjit kristalleri (Baradan *et al.* 2002).

C₄AF Anabileşeninin Hidratasyonu:

Erdoğan (2003) konu ile ilgili yapmış olduğu araştırma ve derlemede, C₄AF hidratasyonunun, C₃A anabileşeninin gösterdiği hidratasyona benzer olduğu belirtilmiştir. Erdoğan'a göre C₃A'nın hidratasyonundaki bir kısım alüminanın yerini demiroksit almaktadır. Ortaya çıkan kalsiyum-alüminosülfohidrat ürünleri C₄(A,F)SH₁₂ ve CB(A,F)S₃H₃₂ kompozisyonuna sahip olmaktadır. Bu ürünlerin yanısıra, bir miktar (A₄F)H₃ meydana gelmektedir. Ortamdaki demir oksitin fazlalaşması, reaksiyonun daha yavaş yer almasına yol açmaktadır. Çimento Üretiminde alçıtaşı kullanılmadığı veya gereğinden az kullanıldığı takdirde, C₄AF anabileşeninin göstereceği hidratasyon, C₃A anabileşeninin hidratasyonu kadar şiddetli olmasa bile, oldukça hızlıdır ve açığa büyük miktarda ısı çıkaran türdendir; ani prize yol açabilmektedir. Çimento üretiminde alçıtaşı kullanılmış olması, ani prizi önlemektedir.

Erdoğan tarafınan yine aynı çalışmada, C₃A, oranı düşük fakat C₄AF oranı yüksek olan çimentolarla yapılan betonların sülfat hücumlarına oldukça dayanıklı olduğu gözlemlendiği ifade edilmiştir. Erdoğan'a göre Bunun nedeni tam olarak bilinmemekle beraber, muhtemel açıklama şu şekilde yapılabilmektedir: Demir iyonu içeren kalsiyum-alumino-monosülfat ürünleri, sülfatlı ortamda etrenjit haline dönüşmemektedir veya (A₃F)H₃ ürününün oluşmuş olması, daha çok sülfatın bulunduğu ortamda etrenjit oluşmasını önleyebilmektedir (Erdoğan 2003).

e. Hidratasyona Etki Eden Faktörler:

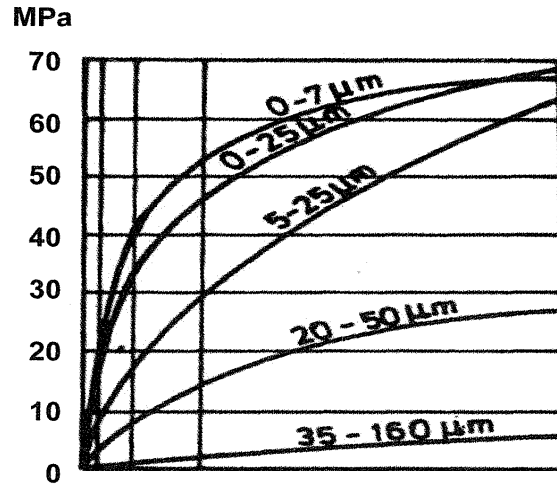
Hidratasyon hızına ve ısisına, çimento ana bileşenlerinin yanında başka faktörlerde etki etmektedir. Bu faktörleri yakından inceleyecek olursak;

İncelik

Erdoğan (2003) tarafından konuyla ilgili yapmış olunan çalışmada, “incelik” sözcüğü, çimentodaki tanelerin ortalama boyutunu ifade edilmiştir. Erdoğan’a göre, öğütölme işlemine tabi tutulan "klinker + alçıtaşı", 1 - 200 Jlm arasında değişik boyutlardaki tanelerden oluşmaktadır. Belirli bir ağırlıktaki "klinker + alçıtaşı" ne kadar ince taneli olarak öğütülürse, elde edilen çimento tanelerinin yüzeylerinin toplamı o kadar artmaktadır. Böyle bir durumda, su ile temas eden tanelerin yüzeyi daha fazla olmakta, kimyasal reaksiyonlar daha hızlı ve daha iyi gelişebilmektedir (Erdoğan 2003).

Yine Erdoğan aynı çalışmada, çimento özgül yüzeyi Blaine aleti denilen bir cihaz yardımıyla tayin edildiğini belirtmiştir. Erdoğan’a göre; portland çimentosunun sahip olması gereken Blaine incelik değerinin 2800 cm²/g'dan az olmaması istenmektedir. Türkiye’de üretilen çimentoların inceliği 2800-4000 cm²/g civarındadır. Herhangi bir çimentonun inceliği 2800 cm²/g'dan ne kadar az olursa, çimentodaki tanelerin o kadar kalın olduğu anlaşılmaktadır (Erdoğan 2003).

Kuleli (2012) tarafından benzer konu ile ilgili yapılan araştırmada; çimentonun özellikleri, çimentonun içerisinde yer alan ana bileşenlerin oranları tarafından etkilendiği bildirilmiştir. Erdoğan’a göre; bunun yanı sıra, çimentonun ne hızla ve ne kadar iyi hidrasyon yapabileceği ve ne hızla dayanım kazanabileceği, çimentonun sahip olduğu incelik tarafından da önemli ölçüde etkilenebilmektedir (Erdoğan 2003). Aşağıdaki şekil 2.14’de incelik dayanım ilişkisi gösterilmiştir. Çimento ne kadar ince tane iriliği dağılımı ne kadar dar olursan çimento dayanım gelişimi o kadar kısa sürede olur (Kuleli 2012).



Şekil 2.14. Çimento inceliği-dayanım ilişkisi (Kuleli 2012)

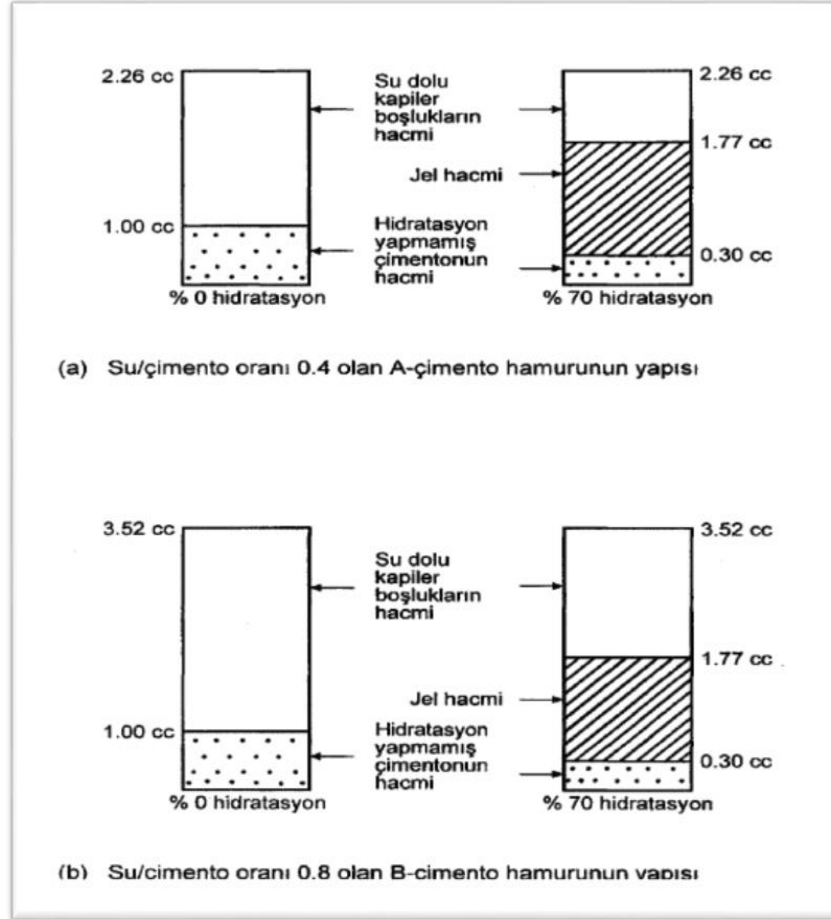
Su/Çimento Oranı

Erdoğan (2003) tarafından konuyla ilgili yapılmış olan araştırmada, çimentoya eklenen su hidrasyon suyu ya da hidroksit olarak birleşir, miktarı çimentonun ağırlığının %30 u kadar olduğu bildirilmiştir. Uygulamada Su: Çimento oranının 0.3 - 0.4 olması istenirse de genellikle daha yüksek olacağı. Su: Çimento oranı arttıkça dayanım azalacağı, harcın/betonun işlenmesi kolaylaşacağı belirtilmektedir. Erdoğan'a göre; düşük Su: Çimento oranı'nın anlamı harcın yüksek dayanımı ve düşük işlenebilirliğidir. Beton yapımında ve uygulanmasında bu oran önemlidir, bağlı faktörleri aşağıda gösterilmiştir (Erdoğan 2003).

Yapılan harç/ betonun dayanımı;

- Çimentonun türüne ve kalitesine,
- Su: Çimento oranına,
- Agregaya (tür, irilik, biçim),
- Katkılara (plastikleştirici, geciktirici.),
- Sıkıştırma ve kürlemeye,
- Sıcaklık ve zamana bağlı olarak değişir.

Su/Çimento oranının çimento hamuru üzerindeki değişimin etkisi şekil 2.15’de gösterilmeye çalışılmıştır.

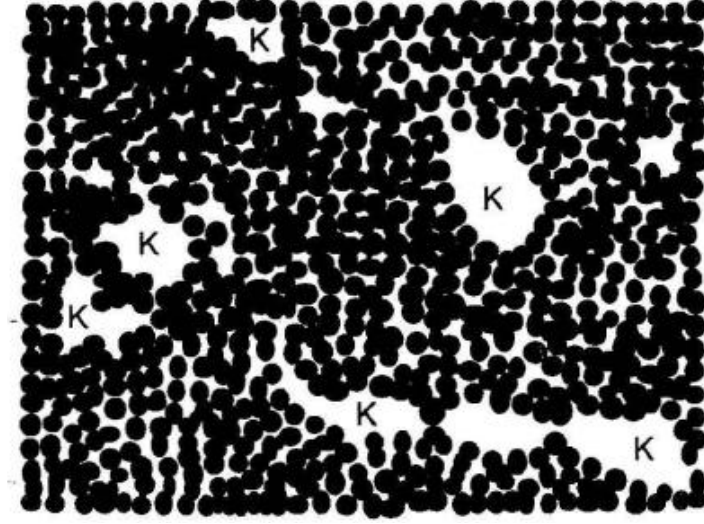


Şekil 2.15. Su/ Çimento oranının çimento hamuru üzerindeki değişimin etkisi (Erdoğan 2003)

Geçirimsizlik:

Erdoğan (2003) tarafından yapılmış olan araştırmada, çimento ve suyun karıldığı anda, çimento hamurunun yapısında çimento taneleri ve çimento tanelerinin arasında su dolu küçük boşluklar yer aldığı ifade edilmiştir. Erdoğan'a göre; bu su dolu küçük boşluklara, kapiler boşluklar, birbiriyle bağlantısı bulunan bu sisteme de kapiler sistem denilmektedir. Çimento hamurunun sahip olduğu yapı şekil 2.16'da basit bir modelle

gösterilmektedir. Şekilde yer alan noktalar çimento jeli parçacıklarını, K harfiyle gösterilen bölümler ise kapiler boşlukları temsil etmektedir (Erdoğan 2003).



Şekil 2.16. Çimento hamurunun sahip olduğu boşluklu yapı (Basit Model) (Erdoğan 2003)

Erdoğan yine aynı çalışmasında; hidrasyon ürünlerinin hacmi, hidrasyon yapan çimentonun hacminden daha büyük olduğu için (çimentonun hacminden daha büyük yer kapladığı için), hidrasyon ürünleri, kapiler boşlukları azaltacak tarzda geliştiğini belirtmiştir. Erdoğan'a göre; yukarıda açıklanan nedenden dolayı, hidrasyon devam ettikçe, jel miktarı artmakta ve önceden mevcut olan kapiler boşlukların oranı azalmaktadır. Sertleşmiş çimento hamurunda yer alan kapiler boşluk oranı, çimento hamurunun hem dayanımını hem de su geçirgenliğini ve dayanıklılığını etkilemektedir. Boşluk oranı yüksek olan sertleşmiş çimento hamurunun dayanımı daha az olmakta, su geçirgenliği daha çok olmakta ve dayanıklılığı azalmaktadır (Erdoğan 2003).

Betonda geçirimsizliği, dayanımını ve dayanıklılığını artırabilmek için jel miktarını artıracak önlemleri almak gereklidir. Su/çimento oranını azaltmak veya alternatif tipte çimento tipi seçimi bu önlemlerden bazılarıdır.

2.1.1.h. Çimento üretiminde enerji kullanımı

Atmosferde sera gazlarının seviyelerinin yükselmesi ve bununla bağlantılı olarak çevre sıcaklığının artmaya başlaması ile dünya üzerindeki mevcut yaşamsal oluşumlar potansiyel olarak farklı alternatif çözümlere doğru yönelmektedir. Bu sera gazlarının içinde karbon dioksit, metan, ozon, NO_x ve Klorofluora karbonlar en önemli olanlarıdır. En önemli sera gazı ise karbondioksit (CO₂) dir. Küresel ısınmanın asıl nedeninin tam olarak ne olduğu konusunda da tartışmalar sürmektedir. Ancak, bilim adamları sera gazlarının yer kürenin troposfer tabakasının sıcaklığını artırdığına kesin olarak inanmaktadırlar. Bu nedenle dünyada enerji elde etmek amacıyla kullanılan ve yandıklarında büyük oranda CO₂ gazı çıkaran fosil yakıtların kullanımları üzerinde sınırlamalar getirilmeye çalışılmaktadır. Hükümetler arası İklim Değişikliği Paneli (IPCC) önümüzdeki 100 yıl içinde çevre sıcaklığının 1,9 ila 5,3°C artacağını tahmin etmektedir. Bu sıcaklık artışı dünya üzerinde çok büyük değişmelere neden olabilecek kadar yüksek olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle özellikle Avrupa Birliği CO₂ emisyon oranları üzerinde limitler getirerek 1990 yılındaki seviyeye ulaşmak için yeni enerji kaynakları ve alternatif yakıtların kullanımı ve yakıt vergisi getirmeyi düşünmektedir (DSİ TAKK 2009). Bu yüzden, bugün küresel ısınmada en önemli rolü oynayan CO₂ gazı emisyonunun çimento üretiminde azaltılması amacıyla birçok araştırma ve girişimler başlatılmış ve devam ettirilmektedir. Yakın gelecekte de çimento üretimi ile ilgili olarak aşağıdaki faktörlerin ciddi şekilde dikkate alınmaya başlanacağı beklenmektedir (Yeğınobalı 2009):

1. Alternatif yakıt kullanımıyla maliyetlerin ve CO₂ emisyonunun önemli ölçüde azaltılabilmesi,
2. Alternatif hammadde kullanımıyla maliyetlerde ve CO₂ emisyonunda düşüş,
3. Teknolojideki gelişime paralel olarak çimento kullanım alanlarının genişlemesi,
4. Taşıt trafiğinin yoğun olduğu yollarda asfalt yerine beton yol uygulaması,
5. Türkiye'nin Kyoto Protokolü'nü imzalaması durumunda CO₂ emisyonlarına sınırlama getirilmesi

Çimento sanayi çok yoğun enerji tüketen bir ağır sanayi dalıdır. Çimentodan yapılan betonun da dünyada adam başına sudan sonra en çok tüketilen bir malzeme olduğunu gözetirsek dünya enerji tüketiminde çimento sanayinin payı çok büyüktür. Kullanılan enerjinin büyük bölümü fosil kaynaklı olduğundan çimento sanayinin karbon gazı (CO₂) şahmında (dünyanın %5'i), sera gazlarının artışında, dolayısı ile küresel ısınmada payı önemlidir. Enerjinin giderek pahalılaştığı, dış enerji kaynaklarının da güvenilir olmaktan çıktığı bir dünyada fabrika üretiminde her tür enerjiyi en verimli biçimde kullanıp, her tür ikincil yakıtı ve ikincil ham madde kaynaklarının değerlendirmeye çalışarak (Kuleli 2012).

- Maliyetleri azaltmak,
- Çevre sorunlarının azaltımına katkıda bulunmak temel bir mühendislik görevidir.

Bu büyüyen problemi sönümlemek için Uluslararası Enerji Ajansı (IEA), Dünya Sürdürülebilir Kalkınma İş Konseyi (WBCSD) ile birlikte ortak olarak, 2050 yılına kadar olan zaman dilimi için, çimento endüstrisindeki karbon emisyonlarının azaltılması ile ilgili teknolojik olanakları ortaya koyan bir yol haritası yayınladılar. Bu haritada; termal ve elektrik verimliliğindeki son teknolojiler, alternatif yakıt kullanımı, katkılı çimento kullanımıyla klinker kullanım oranının azaltılması veya yer değiştirmesi ve karbon yakalama ve depolama konularına yer verilmiştir (Yeğinobalı 2009).

Bu emisyon azaltım önlemleri;

- Termal ve Elektrik Verimliliği: Yeni çimento fabrikalarındaki son model mevcut teknolojilerin konuşlandırılması ve ekonomik olarak uygulanabilir olan enerji verimli ekipmanların donanımlarının daha da iyileştirilmesini kapsar.
- Alternatif Yakıtlar: Çimento üretim prosesinde daha az karbon yoğunluklu fosil yakıtların, daha alternatif olan yakıtların (fosil olmayan) ve biokütle yakıtların kullanımı. Alternatif yakıtlar, çeşitli atıklardan oluşmaktadır.

- Karbon Yakalama ve Depolama: Oluşan CO₂' nin atmosfere salınımından önce tutularak güvenli bir şekilde depolanması. Gelecekte, zarar içerecek şekilde çevreye salınmayacaktır.
- Klinkerin Yer Değiştirmesi (Klinkerin yerine geçme): Karbon yoğunluklu olan klinkerin, diğer karbon yoğunluğu düşük olan çimento özelliği taşıyabilen malzemeler ile yer değiştirmesidir.

Klinker, çimentodaki ana bileşendir. Öğütülerek ve içine %4-5 alçıtaşı katılarak çimento oluşturulur ve su ile birleştğinde sertleşme gösterir. Çimentoda katkı olarak kullanılan diğer bileşenler (yüksek fırın cürufu, uçucu kül, doğal volkanik maddeler vb.) hidrolik özellik göstermekte olup, klinkerin oranının azaltılarak bunun yerine geçmesiyle yapıya katılırlar. Dolayısıyla klinkerin oranının azalması ile yakıt, enerji ve CO₂ emisyonlarında azalma görülmektedir (Yeğinoğlu 2009).

Aşağıdaki tabloda çimento tiplerine göre karbon gazı salınımını gösteren grafikte çimento tiplerine göre karbon salınımındaki farklılıklar gösterilmektedir. Geleneksel Portland çimentosu CEM I olarak tanımlanan içinde klinker dışında (max %5 minör bileşen çimentodur. Olabilecek diğer çimento bileşenleri içinde gerek pişirirken, gerek öğütürken en büyük enerji klinker için harcanır. (CO₂) salınımı bu bileşen için en yüksektir. Oysa demir çelik sanayinin atığı olan cüruf da çok iyi bir çimentolaşabilir malzemedir, çimento üretiminde kullanıldığında cürufun payına düşen pişirme enerjisi, oldukça düşer ve karbon salınımına katkısı olmaz, yalnızca öğütme için kullanılan enerji de karbon salınımına katkısı vardır ancak pişirmeye göre bu katkı çok daha az bir katkıdır. CEM II tip cürufu, traslı, uçucu küllü, kalkerli, silis dumanlı Portland çimentoları, CEM III yüksek fırın cürufu çimento, CEM IV puzolanik çimento ve CEM V kompoze çimentoların hepsi Türk ve Avrupa standartlarına uygun çimentolardır, uygun kullanım yerlerinde işlevlerini yeterince görürler, hepsi de çimento sanayinin enerji ve doğal ham madde kaynaklarının daha akılcı kullanımına, sera gazı oluşumunun azalmasına yardım ederler (Kuleli 2012).

Çimento Tipi	İçindeki KK (Ağ %)	Üretimde Salınan Co2 (t/t)	Δ - Salım
CEM I	95-100	0,98	0
CEM II /A	80-94	0,82	-16%
CEM II /B	65-79	0,7	-28%
CEM III /A	35-64	0,45	-54%

Şekil 2.17. CO₂ salınımının çimento tiplerine göre değişimi (Kuleli 2012)

Teknik açıdan bakıldığında, yüksek oranlarda katkı katılabilmekle birlikte, aşağıdaki 5 sebepten dolayı bazı sınırlamalar söz konusu olmaktadır,

- Klinkerle yer değiştirecek maddelerin bölgesel olarak mevcudiyeti, bu katkı maddelerinin zamanla artan fiyatları,
- Katkı maddelerinin özellikleri ve bunlarla yapılacak çimentoların kullanım alanları,
- Portland çimentosu ve kompozit çimentoların ulusal standartları,
- Müteahhitler ve alıcılar tarafından kompozit çimentoların kabulü (Kuleli-2012).

Bu sınırlandırmalardan dolayı klinkerin yerine geçme yöntemi belirli bir noktaya kadar işlevini yerine getirebilmektedir. Bunu daha ileri bir boyuta taşımak için alternatif klinker kullanımı yöntemi daha etkin bir method olarak ön plana çıkmaktadır. Alternatif klinker metodlarından olan BAB çimentosunda bu konuda büyük bir avantaj sağladığı yapılan araştırmalar sonucu tespit edilmiştir (DSİ TAKK 2009).

Günümüzde sürdürülebilir gelişme için enerji, doğal kaynaklar ve çevrenin korunması üç önemli olgu olarak karşımıza çıkmaktadır. Dünyada toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık %7'si portland çimentosu üretimi esnasında meydana gelmektedir. Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu ile CO₂ emisyonunda %25'lere varan oranlarda azalma ve enerjide de yaklaşık %10 civarında tasarruf sağlanacağı DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi ve TÇMB'nin birlikte oluşturduğu teknik bir komisyon tarafından yürütülen çalışmalar sonucunda tespit edilmiştir. Bu Komisyonun çalışmaları Türk Standartları Enstitüsünce TS 13353 standart No'su ile Borlu Aktif Belit (BAB)

çimentosu Dünyada ilk defa bir Türk çimentosu olarak standartlaştırılmıştır (DSİ TAKK 2009; TS 13353).

2.1.2. TS-EN-197-1’e göre çimento çeşitleri ve işaretleme

TS EN 197 1 “Çimento - Bölüm 1: genel çimentolar bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri” standartının TSE Teknik Kurulu’nun 11 Mart 2002 tarihli toplantısında kabul edilerek yayınlanmasına karar verilmiştir (TS EN 197/1 2002). Bu yeni standartın yürürlüğe girmesi ile başta en eski ulusal çimento standardı TS 19 olmak üzere mevcut çimento standartlarımızdan 13 tanesi ve portland çimentosu klinkeri standardının geçerlilik süresinin iptal tarihi 2005 yılı sonu olarak belirtilmiştir. TS EN 197/1’de tanımlanan çimentoların özellikleri mevcut TS 24 ve TS 687 standartları (TS EN 196/1 2002; TS EN 196/2 2002) yerine yeni kabul edilen TS EN 196 serisi standartlara göre belirlenmektedir (TS EN 196/3 2002; TS EN 196/5 2002; TS EN 196/6 2000; TS EN 196/7 2002; TS EN 196/21 2002; TS EN 197/2 2002; Erdoğan 2004).

Diğer taraftan genel amaçlı olmayıp “özel” olarak tanımlanan Beyaz Çimento (TS 21), Harç Çimentosu (TS 22) ve Sülfatlara Dayanıklı Çimento (TS 10157) ile ilgili mevcut standartlar yürürlükte kalmış olup; bunların özelliklerinin tanımlanmasında da mevcut EN 196 serisi deney standartları kullanılmıştır.

Aşağıda daha ayrıntılı olarak açıklanacağı gibi yeni standart genel çimento türlerini daha da arttırmakta, yeni bazı kavramlar getirmekte ve mineral katkıların daha yaygın kullanımına olanak sağlamaktadır. Çimentoların bu standarda ve karakteristik değerler olarak verilen sınırlara uygunluğu TS EN 197/2’de açıklanan prosedürlerle belirlenmektedir (Katnaş 2004).

2.1.2.a Genel çimento tipleri, bileşim ve işaretleme

TSEN 197/1 - Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri standardı, 89/106/EEC Direktifi (Yapı Malzemeleri Yönetmeliği) kapsamında yayınlanmıştır.

Yeni Genel Çimentolar TS EN 197/1’de “CEM çimentosu” olarak adlandırılırlar. Ayrıca bir klinker standardı bulunmadığından dolayı, klinkerde aranan özellikler de çimento standardının içine alınmış olup; İlgili tanımlamalar ise şöyle özetlenebilir:

CEM Çimentosu: Hidrolik sertleşmesi öncelikle kalsiyum silikatların hidratasyonu sonucu oluşan ve içindeki reaktif CaO ve reaktif SiO₂ toplamının kütlece en az %50 olması gereken çimentodur. Bileşimi portland çimentosu klinkeri, kalsiyum sülfat ve çeşitli mineral katkılardan meydana gelmektedir.

Portland Çimentosu Klinkeri: Kalker ve kil gibi hammaddelerin CaO, SiO₂, Fe₂O₃, Al₂O₃ gibi oksitlerini içeren, hassas bir orantı ile birleştirilip ince öğütülmüş karışımının (farinin) döner fırında 1400-1500°C sıcaklıkta sinterlenmesi sonucu elde edilen yaklaşık 1 - 3 cm çapında granüle malze-medir. Kütlece en az 2/3 oranında kalsiyum silikat içermeli, CaO/SiO₂ oranı 2,0’den az olmamalı ve MgO içeriği en fazla %5 olarak sınırlandırılmalıdır.

TS EN 197/1 standartı genel amaçlı çimentoları (CEM çimentoları) 5 ana tip içerisinde toplamaktadır:

Ana Tipler:

CEM I Portland Çimentosu

CEM II Portland Kompoze Çimento

CEM III Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimento

CEM IV Puzolanik Çimento

CEM V Kompoze Çimento

Bu anatipler çizelge 2.15’de gösterilen toplam 27 çimento tipini içermektedir. Çimentoların çizelgedeki bileşimleri ana bileşenler ile minör ilave bileşenlerden oluşturulmuştur.

Söz konusu standart AB ülkelerinde 2000 yılında yürürlüğe girmiş olduğundan, 5 yıllık kullanım süresi sonunda; CEN TC/51 Avrupa Standart-izasyon Komitesi tarafından tekrar ele alınarak revizyon süreci başlatılmıştır. Bu standartdaki diğer bir yenilik, 2005 yılında yürürlüğe giren 'A1' ekidir. A1 ekinde “LH” harfleriyle gösterilen Düşük Hidratasyon Isılı Genel Çimentolar olarak adlandırılmıştır (TS EN 197/1).

TS EN 197/1 standartına 2008 yılında yürürlüğe giren A3 ekinde ise uçucu kül ile ilgili yapılmış olan değişikliklere yer almakta olup; uçucu kül kızdırma kaybı özelliğine göre üç ayrı sınıfta toplanmıştır.

Ana Bileşenler:

Çimento ana bileşenleri: klinker ile TS EN 197/1, çizelge 2.15’de belirtilen ve miktarları kütlece %5’in üzerinde olan ana bileşen mineral katkılardır.

Tiplerin ve çimento ana bileşenlerinin belirlenmesinde aşağıda verilen semboller kullanılmıştır:

Tip ve Ana Bileşen Sembolleri:

A : Çimentonun en az mineral katkı içeren tipi

B : Çimentonun A tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi

C : Çimentonun B tipinden daha fazla mineral katkı içeren tipi

K : Klinker	S : Granüle yüksek fırın cürufu
D : Silis dumanı	P : Doğal puzolan
Q : Doğal kalsine edilmiş puzolan	V : Silissi uçucu kül
W : Kalkersi uçucu kül	T : Pişmiş şist
L : Kalker (TOC < %0.5)	LL : Kalker (TOC < %0.2)

Yukarıdaki ana bileşenlerin özellikleri standartlarda verilen ve ilerde değinilecek olan hususlara uygun olması gerekmektedir.

Minör İlave Bileşen:

Her çimento tipine kütlece %0-5 arasındaki bir minör ilave bileşen katılabilmektedir. Bu madde o çimentoda ana bileşen olarak kullanılmamış bir mineral katkı veya çimento özelliklerini iyileştirecek başka bir inorganik madde kullanılabilmektedir (TS EN 197/1). Genel çimentoların tipleri ve bileşimleri ile ilgili genel bilgiler çizelge 2.15’de verilmiştir.

Bileşim Oranları:

Çizelge 2.15 ’de çimento tipleri için verilen bileşim yüzde değerleri klinker, ana bileşen katkı ve minör ilave bileşen katkıların toplamı esasına uygun olmalıdır. Yani bunların toplamı 100 olacaktır. Katılması gereken kalsiyum sülfat 100’e ilave edilecektir.

Portland kompoze, puzolanik ve kompoze çimentolarda toplam ana bileşen katkı yüzdesi en az iki değişik katkı maddesi kullanılarak elde edilmesi gerekmektedir (TS EN 197/1). Miktarı kütlece %5’i geçen katkılar ana bileşen sayılacaktır.

Dayanım Sınıfları:

Çimentolar için 32.5, 42.5 ve 52.3 olmak üzere 3 dayanım sınıfı belirlenmiştir. Bu değerler TS EN 196/1'e göre tayin edilen ve MPa olarak ifade edilen 28 günlük basınç dayanımları ile alakalıdır. TS EN 197/1'de karakteristik değerler olarak saptanmıştır.

Ayrıca, her standart dayanım sınıfı için üç erken dayanım sınıfı tanımlanmıştır. Bu amaçla kullanılan sembollerden,

N : Normal erken dayanım sınıfı

R : Yüksek erken dayanım sınıfı

L : Düşük erken dayanım sınıfı ifade etmektedir.

2.1.2.b. Standart İşaretleme

Genel çimentolar Standart numarasını ve çizelge 2.15'deki ifadelerine dayanım sınıflarını ilave ederek tanımlanırlar. Ayrıca CEM II/A-M II/B-M, IV/A, VI/B, V/A ve V/B çimentolarında klinkerin yanındaki diğer ana bileşenlerin sembolleri de parantez içinde belirtilmelidir.

Deneylerde Hidratasyon özelliklerini incelediğimiz çimentolardan bazılarına ait örnekler aşağıda verilmiştir.

-CEM II B-M(P-LL)32,5 R

-CEM II A-M(P-LL)42,5R

-CEM II B-M(P-LL)42,5 N

-CEM I 42,5-R

- CEM I 52,5-R

- Toplam olarak kütlece %21-35 arasında tras(doğal puzolan) içeren ve toplam organik karbon oranı $\leq 0,2$ 'den küçük kalker içeren dayanım sınıfı 32,5 olan yüksek erken dayanımlı kompoze portland çimentosu: TS EN 197/1 - CEM II/ B-M(P-LL) 32,5 R (Aşkale Çimento A.Ş)
- Toplam olarak kütlece %21-35 arasında tras(doğal puzolan) içeren ve toplam organik karbon oranı $\leq 0,2$ 'den küçük kalker içeren dayanım sınıfı 42,5 olan kompoze portland çimentosu: TS EN 197/1 - CEM II/ B-M(P-LL) 42,5 N (Aşkale Çimento A.Ş)
- Toplam olarak kütlece %6-20 arasında tras(doğal puzolan) içeren ve toplam organik karbon oranı $\leq 0,2$ 'den küçük kalker içeren dayanım sınıfı 42,5 olan yüksek erken dayanımlı kompoze portland çimentosu: TS EN 197/1 - CEM II/ A-M(P-LL) 42,5 R(Aşkale Çimento A.Ş)
- Dayanım sınıfı 42.5 olan, yüksek erken dayanımlı portland çimentosu: TS EN 197/1 - CEM I 42,5 R (Aşkale Çimento A.Ş)
- Dayanım sınıfı 52.5 olan, yüksek erken dayanımlı süper beyaz portland çimentosu: TS EN 197/1 - CEM I 32,5 R (Çimsa A.Ş)

Çizelge 2.15. Genel çimentoların bileşimi (Kütlece % olarak)

[illegible]

Çizelge 2.15 Devam

[illegible]

Çizelge 2.15 Devam

		CEM II/A - LL	80-94	—	—	—	—	—	—	—	—	6 - 20	0-5
		CEM II/B - LL	65-79	—	—	—	—	—	—	—	—	21-35	0-5
	Portland Kompoz Çimento	CEM II/A - M	80-94	6 - 20									0-5
		CEM II/B - M	65-79	21-35									0-5
CEM III	Yüksek Fırın Cürufllu Çimento	CEM III/A	35-64	36-65	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
		CEM III/C	5-19	81-95	—	—	—	—	—	—	—	—	0-5
CEM IV	Puzolanik Çimento	CEM IV/A	65-89	—	11-35					—	—	—	0-5
		CEM IV/B	45-64	—	36-55					—	—	—	0-5
CEM V	Kompoze Çimento	CEM V/A	40-64	18-30	—	18-30			—	—	—	—	0-5
		CEM V/B	20-38	31-50	—	31-50			—	—	—	—	0-5

2.1.3. Bazı çimento türleri ve özellikleri**2.1.3.a. Cürufllu çimentolar**

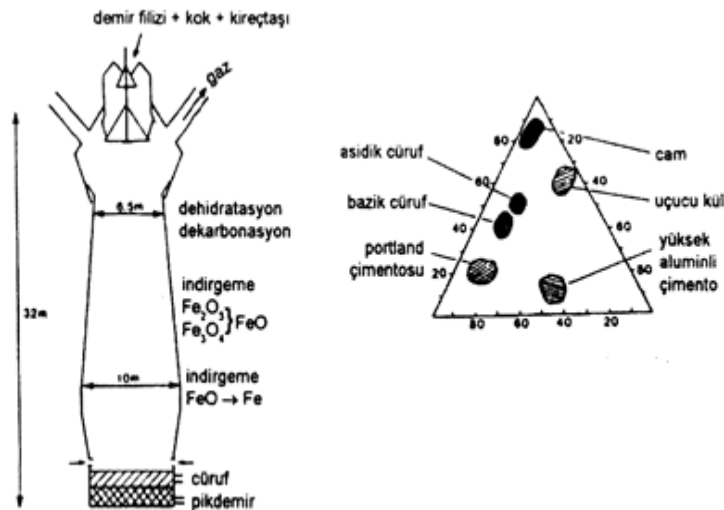
Cürufllar çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık madde gruplarından birisidir. Kimyasal kompozisyonları ve özellikleri elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak birbirinden çok farklılık gösterir.

Örneğin, yüksek fırın cüruflarının kendi başına bağlayıcı özelliği olmasına karşın nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzolanik özellikleri vardır.

Cürufların çimento ve beton sektörlerinde çok çeşitli kullanım olanakları bulunmaktadır. Konvansiyonel çelik üretim teknikleriyle elde edilen cüruflar kristal yapıya sahip kütleler olarak ortaya çıkar. Bu tür cüruflar ya hiç kullanılmaz ve atılırlar ya da yol malzemesi veya beton agregası olarak kullanılırlar. Buna karşılık, modern teknolojiyle çelik üretimi yapılan tesislerde camsı yapıya ve bir miktar hidrolik özelliklere sahip olan cüruflar elde edilir. Bunları çimentolu sistemlerde kullanmak mümkün olmaktadır.

Tüm cüruflar arasında en önemlisi ve en yaygın kullanım alanına sahip olanı yüksek fırın cüruflarıdır (YFC). Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen YFC yüksek fırınlarda, daha hafif olmasından dolayı, ham demirin üstünde yer alır. Demir filizi gangi, kok ve kireçtaşının yanma sonrası artıkları YFC'yi meydana getirirler. YFC'nin oluşum sıcaklığı 1400-1600°C'dir.

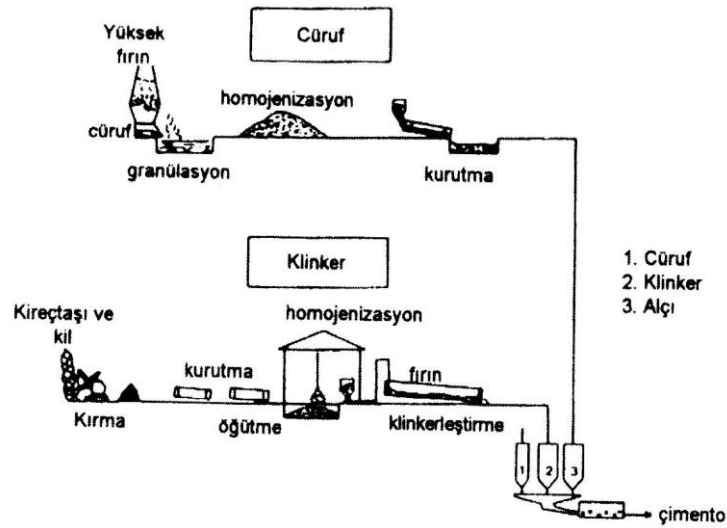
YFC'nin kimyasal kompozisyonu bir üçlü diagramda ($\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$) (Şekil 2.18) diğer bazı malzemelerle birlikte karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Üçlü diyagramda YFC'nin yeri (Tokyay ve Erdoğan 2009)

YFC yavaş soğutulduğu takdirde kristal bir yapıya sahip olur. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan, hızlı soğutma uygulanması sonucunda ise camsı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruflar granüle yüksek fırın cürufu (GYFC) olarak adlandırılırlar. GYFC bir miktar hidrolik özelliğe sahiptir.

Cürufli çimentolar granüle yüksek fırın cürufunun portland çimentosu klinkeri ve alçı taşı ile birlikte veya ayrı ayrı öğütülüp karıştırılmasıyla elde edilir. Cürufli çimentonun üretimi şematik olarak Şekil 2.19’da gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Cürufli çimentonun üretim şeması (Tokyay ve Erdoğan 2009).

Cürufli çimento üretiminde kullanılan cüruf miktarı farklı ülkelerde, çimento türlerine de bağlı olarak, önemli farklılıklar göstermektedir. Fransa’da Ciment de Fer %25-35 Ciment Métallurgique Mixte %45-55, Ciment de Haut Fourneau %65-75 ve Ciment de Laitier au Clinker %80’in üstünde granüle yüksek fırın cürufu içerir. Almanya’da DIN 1164’de Eisenportland ve Hochofen çimentoları olarak iki tip cürufli çimento tanımlanmış ve bunlardan birincisinde cüruf miktarı en fazla %40, ikincisinde ise %41-85’dir. Amerika Birleşik Devletleri’nde ASTM C 595’de belirtilen Portland Yüksek Fırın Cürufu Çimentoları’nda (Portland Blast Furnace Slag Cement) cüruf oranı %25-65’dir. Ülkemizde standartta bulunan üç tip cürufli çimentodan TS 20’de belirtilen

cüruflu çimentolar CÇ 32.5 ve CÇ 42.5’da %20 80, TS 809’da belirtilen Süper Sülfat çimentosu SSC 32.5’da ise en az %65 granüle yüksek fırın cürufu içermektedir (Spelmann 1982).

Genel hatlarıyla, üretim enerjisi ve hammadde kullanımı değerlerine bakıldığında, 1 ton %65 cüruf (%15 rutubetli) içeren bir cüruflu çimento üretimi için 1 ton Portland Çimentosu üretiminde gerekli olan hammadde miktarında yaklaşık %65, kullanılan enerji miktarında ise yaklaşık %50 bir azalma sağlanır (Regourd 1986).

a. Cüruflu Çimentoların Hidratasyonu

GYFClerin hidratasyonlarının hızlandırılması için gereken iki kutup aktivatör çimentolu sistemlerde zaten yer almaktadır: alçı ve çimentonun silikat bileşenlerinin hidratasyonu ile oluşan Ca(OH)_2 bütün ticari cüruflu çimentolarda klinker kısmı cüruftan daha hızlı olarak hidrate olur. Ancak, cüruf da çok erken yaşlarda suyla reaksiyona girmektedir (Regouro 1980; Regourd 1986). %70 cüruf ve %30 portland çimentosu içeren bu karışımlarda 1. cürufun ikincisine göre daha reaktif olduğu gözlenmektedir. Açığa çıkan hidratasyon ısılarının piklerine bakıldığında, birinci cüruflu çimento ile Portland çimentosunun yaklaşık aynı sürede (~6 saat) maksimum hidratasyon ısısına ulaştıkları saptanmıştır. Ayrıca, bu süre içerisinde yalnızca %30 portland çimentosundan elde edilecek hidratasyon ısı 15.6 J/g*s olacakken 70/30’luk cüruflu çimentolardan, birinci cüruf için, 29 J/g*s, ikinci cüruf için de 18 J/g*s ısı açığa çıkmıştır. Bu durum da cürufların daha çok erken yaşlardan itibaren hidrate olmaya başladığını göstermektedir.

Cüruflu çimentolarda cüruf ve klinker fazlarının hidratasyonu ile meydana gelen C-S-H jelleri Tarayıcı Elektron Mikroskop ve EDAX’la incelendiğinde cüruf taneciklerinin yüzeylerinin klinkerin hidratasyonu ile oluşan C-S-H’nin kompozisyonuna göre Al_2O_3 ve MgO bakımından daha zengin olan bir C-S-H tabakası ile kaplandığı saptanmıştır. Sülfat iyonları bu tabakayı eriterek daha pürüzlü bir yapıya sahip ve dolayısıyla suyun

penetrasyonunu engellemeyen ikinci bir jel oluşturmasına neden olur (D'ans and Eick 1953; Regourd 1980).

Ca(OH)_2 aktivasyonuyl a ilk olarak etringit oluşur. Daha ileri yaşlarda, alçı tamamıyla tük etildikten sonra, etringit monosülfat formuna dönüşür ve tetrakalsiyum aluminat hidratla (C_4AH_{13}) katı eriyik haline gelir (Regouro1980; Regourd 1986).

Düşük MgO içeren cüruflu çimentolarda $\text{C}_3\text{ASH}_{14}$, yüksek MgO içerenlerde ise C_4AH_x ve bunun magnezyum analogu olan M_4AH_x , diğ er hidratasyon ürünleri olarak gözlenmiştir (Taneja 1974; Sersale *et al.* 1976; Mascolo *et al.* 1977). Bunların dışında, cüruflu çimentoların hidratasyonu sonucunda afwillit (C_3SH_3) ve tobermorit ($\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$) oluşumu da söz konusudur (Koerth 1976).

Cürufun camsı yapısının ve kristalinitesinin etkileri

%3-5 merwinit (C_3MS_2) içeren cürufların kullanıldığı çimentolarla en yüksek dayanımları elde edilmiştir (Demoulian *et al.* 1980).

Aynı portland çimentosu ve yedi değışik GYFC kullanılarak üretilen cüruflu çimentolar üzerine yapılan bir mikro yapı araştırmasında cürufun hidratasyon hızıyla, rekristalize hale geldikten sonra, iç erdiği akermanit (C_2MS_2) miktarı arasında 0.98 korelasyon katsayısına sahip bir bağıntı saptanmıştır. Buna göre, rekristalize cüruf içindeki akermanit miktarı ne kadar yüksekse cüruf o kadar yavaş hidrate olmaktadır (Regourd 1980).

b. Klinker Özellikleri ve Cüruf İnceliğinin Etkileri

Cüruflu çimentoların hidratasyonunda GYFCyle portland çimentosu arasında karşılıklı bir etkileşim söz konusudur. Normal inceliklerde ($3000 \text{ cm}^2/\text{g}$) öğütölmüş olan cüruflu çimentolarda klinker özellikleri, çok ince ($6000 \text{ cm}^2/\text{g}$) öğütölmüş olanlardakine göre,

daha önemlidir (Demoulian *et al.* 1980). C_3S miktarı yüksek olan klinkerler cürufun erken yaşlarda aktivasyonu için daha elverişlidir. 28 günün üstündeki yaşlarda ise cürufun inceliği ve reaktivitesi klinker özelliklerinden daha fazla önem kazanmaya başlar (Demoulian *et al.* 1980; Regouro 1980; Regourd 1986). Genel olarak %70'in üstünde cüruf içeren çimentolarda erken dayanımlar daha çok cüruf reaktivitesine, daha az cüruf içeren çimentolarda ise daha çok klinker özelliklerinin etkisine bağlıdır (Regourd 1986).

Cürufli çimento üretiminde cüruf ve klinkerin birlikte öğütülmesi klinkerin daha ince buna karşılık cürufun daha kaba kalmasına yol açar. Aynı öğütme sonucunda daha ince cüruf elde etmek mümkün olur.

X-ışınları Diffraksiyonu ve Tarayıcı Elektron Mikroskop analizleri ile aynı klinkerden üretilen bir portland çimentosunun ve %85 cüruf içeren bir cürufli çimentonun hidrasyonlarının takibinden aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır (Regouro 1980):

1. İki günlük hidrasyon sonucunda, cürufli çimentoda meydana gelen etringit miktarı portland çimentosuna oranla daha fazladır. Bu fazlalığın nedeni alçının hem klinkerdeki C_3A hem de cürufun alumina fazıyla reaksiyona girmesi ile açıklanmıştır. Öte yandan, cürufli çimentonun X-ışınları difraktogramında C-S-H'a tekabül eden yaygın ve geniş pikin altındaki alanın portland çimentosundakine göre %30 daha fazla olması, cürufun hidrasyonu ile da erken yaşlarda C-S-H jeli meydana geldiğinin göstergesidir.
2. Hidrasyonun yedinci gününde etringitin kısmen monosülfat formuna transformasyonun başladığı gözlenmiştir. Cürufli çimentonun X-ışınları difraktogramlarında C-S-H jeli yansımalarında artış olmuştur. Etringit, cürufli çimentoda, portland çimentosuna göre, hala daha fazladır.
3. Yedi ve yirmi sekizinci günler arasında C-S-H oluşumu devam etmiştir.

Cüruf inceliğinin etkisine hızlandırılmış deneylerle bakılmış olan bir araştırmada aynı cüruf $6310 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Blaine) ve $3500 \text{ cm}^2/\text{g}$ inceliklerde öğütülmüş ve 6 ve 24 saat sonunda çimentoların dayanımları belirlenmiştir (Regourd 1980). Bu çalışmada portland

çimentosunun inceliği sabit ($3500 \text{ cm}^2/\text{g}$) tutulmuş, cürufun aktivasyonu soda kullanılarak yapılmıştır. Deneylerde kullanılan cürufllu çimentolar %85 GYFC, %13 portland çimentosu ve %2 alçı içermektedir. Elde edilen sonuçlar çizelge 2.15’de verilmiştir.

Çizelge 2.16. İki Ayrı İncelikte Öğütülmüş Cüruflla Üretilmiş Çimentoların Hızlandırılmış Dayanım Deney Sonuçları (Regouro 1980)

Yaş (saat)	$6310 \text{ cm}^2/\text{g}$		$3500 \text{ cm}^2/\text{g}$	
	Basınç (mpa)	Eğilme (mpa)	Eğilme (mpa)	Basınç (mpa)
6	23.7	5.7	2.2	8.5
24	32.2	8.8	4.5	15.7

c. Isıl İşlemlerinin Etkileri

Bütün kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi, ortam sıcaklığının artması hidrasyon hızının artmasına neden olur. Hidrasyon sırasında meydana gelen reaksiyonlar için gerekli alan aktivasyon enerjisi cürufllu çimentolarda, eşdeğer portland çimentolarına göre yaklaşık %8 daha yüksektir (Regouro 1980; Regourd *et al.* 1980; Roy and Idorn 1982). Bu nedenle, cürufllu çimento içeren sistemlere ısı işlem uygulanması, dışarıdan ilave bir enerji kaynağı sağlayarak hidrasyonu kolaylaştırıcı ve hızlandırıcı bir yöntem olarak kabul edilmektedir.

Ayrıca, çok yüksek sıcaklıklar ve basınç altında otoklavlama yöntemi uygulanarak yaptırılan hidrasyon cürufllu çimentoların dayanımlarını çok artırmaktadır (Regouro 1980).

d. Fiziksel Özellikler

Portland Yüksek Cürufu Çimentoları Portland Çimentosundan daha açık renklidir. Özgül ağırlığı, Portland Çimentolarına oranla biraz düşüktür (3.00-3.05). Priz süreleri, rötre, sünme, betonarmede donatı aderansı özellikleri bakımından portland yüksek fırın cürufu çimentolarıyla portland çimentoları arasında önemli farklılıklar yoktur (Lea 1970).

Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentolarının hidrasyon ısıları kullanılan klinkerin ve GYFC nin kompozisyonu ve miktarıyla orantılı olarak değişir ancak, genel olarak, normal portland çimentolarınınkinden daha düşüktür (Lea 1970; Totani *et al.* 1980).

f. Dayanım özellikleri

Cürufu çimentolar hidrasyon mekanizması ve hidrasyon ürünleri bakımından portland çimentolarıyla benzer nitelikler göstermekle birlikte, normal incelikte öğütülmüş durumda dayanım kazanma hızı, özellikle erken yaşlarda, portland çimentolarından daha düşüktür. Aynı 28 günlük dayanımın elde edildiği, birbirine çok yakın inceliklerdeki ($3000 \text{ cm}^2/\text{g}$) bir portland çimentosuyla %65 cüruf içeren bir cürufu çimento karşılaştırıldığında, erken yaşlarda portland çimentosunun geç yaşlarda ise cürufu çimentonun daha yüksek dayanıma sahip olduğu bilinmektedir (Smolczyk 1980; Regourd 1986). Durum betonda incelendiğinde, eğilme dayanımlarının %25-45 cüruf içeren çimentolarla yapılan betonlarda, normal portland çimentosuyla yapılanlara göre, ya eşit ya daha yüksek olduğu saptanmıştır (Malhotra 1983).

Cürufu çimentoların uygun erken dayanımlara sahip olabilmesi için özgül yüzeylerinin ve cüruf miktarlarının ayarlanması gerekir. Erken yaşlarda dayanımın yükseltilmesi için uygulanan bir başka yöntem de ağırlıkça %0.5 miktarında trietanolamin kullanılmasıdır (Tachibata *et al.* 1982).

Cüruf inceliğinin etkilerine bölüm 3.2.2’de değinilmiştir. Cürufun klinkere oranla daha zor öğütülebilir bir malzeme olması, birlikte öğütme koşullarında, klinkerin ince cürufun ise daha kaba kalması durumunu ortaya çıkarmaktadır. Ayrı öğütme koşullarında elde edilmiş, %30-50 cüruf içeren çimentolarla yapılan betonlarda gerek işlenebilirlik gerekse erişen dayanım bakımından önemli artışlar sağlanmıştır (Meusel and Rose 1983).

Cürufllu çimentoların dayanımlarının tahmini için önerilen çeşitli Hidrolik İndeksler bölüm 2.4’de verilmiştir. Bunların yanısıra, iki Japon araştırmacı tarafından önerilen bir çoklu regresyon denkleminde cürufllu çimentoyla aynı klinkerden elde edilmiş olan bir normal portland çimentosunun 28 günlük dayanımlarının oranı (Y) cürufun alkalinitesine (X_1), camsı faz miktarına (X_2) ve Cürufllu çimentonun pikrik asit-metanol karışımında eritildikten sonraki kalıntı miktarına (X_3) bağlı olarak verilmiştir (Kameshima and Takemura 1982):

$$Y = -73.33 + 74.06X_1 + 0.482X_2 - 2.41X_3$$

f. Taze Beton Özellikleri

İşlenebilme

Yüksek fırın cürufunun, klinkere göre, daha az bir yüzey pürüzlülüğüne sahip olması ve özgül ağırlığının daha düşük olması, dolayısıyla hacimce daha fazla çimento hamuru elde edilmesi cürufllu çimentoların betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkileyeceğinin göstergeleridir. Ancak, bu iyileşme çökme deneyi sonuçlarında tam olarak gözlenemez (Wainwright 1986).

Eşdeğer kohezyon için cürufllu çimento kullanımı karışım suyu gereksinmesinde yaklaşık %5’lik bir azalmaya yol açar (Reeves 1985).

Priz Süresi İle Zaman İçinde İşlenebilme Kaybı

Cürüflu çimentoların priz sürelerinin portland çimentolarına göre daha uzun olduğu ve dolayısıyla zamanla işlenebilme kaybının da daha az olduğu yönündeki genel kanıya karşın düşük sıcaklıklarda priz sürelerinin çok uzadığı, normal sıcaklıklarda ise portland çimentolarıyla bir fark olmadığı saptanmıştır (Wainwright 1986). Aynı şekilde, çökme kaybı konusunda cürüflu çimentolarla portland çimentoları arasında önemli fark bulunmamaktadır (Meusel and Rose 1983; Wainwright 1986).

Terleme

Yapılan deneysel çalışmalarda cürüflu çimento kullanılarak üretilmiş betonların hem terleme hızlarının hem de terleme miktarlarının daha fazla olduğu saptanmıştır (Cesarini and Frigione 1968; Wainwright 1986). Öte yandan, şantiye koşullarında cürüflu çimentoların neden olduğu terlemenin yarattığı ciddi problemlere ilişkin bir çalışma veya rapor bulunmamaktadır (Wainwright 1986).

Hidratasyon Isısı

Cürüflu çimento kullanımı hidratasyon ısını azaltarak hem maksimum beton sıcaklığını düşürmekte hem de bu maksimum sıcaklığa erişilen süreyi uzatmaktadır (Bamforth 1980; Wainwright and Tolloczko 1986).

Sertleşmiş Beton Özellikleri

- Dayanımlar

Eşit çimento miktarı ve eşit su-çimento oranları söz konusu olduğunda cürüflu çimentolar normal portland çimentolarına göre, erken yaşlarda nisbeten düşük, geç yaşlarda ise yüksek beton dayanım değerlerine neden olurlar (Reeves 1985; Wainwright

1986). Buradan anlaşılacağı gibi, eşdeğer 28 günlük beton dayanımları söz konusu olduğunda beton karışımlarında cüruflu çimento miktarı normal portland çimentosu miktarına göre biraz daha fazla olmalıdır. Bu durumda geç yaşlardaki dayanımlar cüruflu çimento ile yapılmış betonlarda çok daha yüksek olmaktadır (Reeves 1985; Wainwright 1986).

- Elastisite Modülü

Dayanımlar için belirtilmiş olan durum Elastisite Modülü için de geçerlidir. Eşit 28 günlük dayanımlar için, cüruflu çimento kullanılarak yapılmış olan betonların Elastisite Modülleri az bir miktar daha yüksek olmaktadır (Bamforth 1980; Wainwright 1986; Wainwright and Tolloczko 1986).

- Rötire

Cüruflu çimentolarla üretilmiş betonların rötireleri konusunda yapılan araştırmaların sonuçları birbirlerinden, deney koşulları ve kullanılan malzemelerin değişik olması nedeniyle, farklılıklar göstermekle birlikte bu farklar çok önemli ölçüde değildir (Wainwright 1986). Genel olarak ifade etmek gerekirse, cüruflu çimento kullanımının rötreyi portland çimentosu kullanıldığı durumlardan daha değişik etkilemediği söylenebilir (Wainwright 1986).

- Sünme

Betonun sünme davranışıyla ilgili en önemli parametre uygulanan gerilme-dayanım oranıdır. Bu oran sabit olduğu sürece, çimentoların sünme davranışları arasında önemli bir farklılık söz konusu değildir (Neville *et al.*1983).

- Isıl Genleşme ve Isıl İletkenlik

Betonun bu özellikleri büyük ölçüde kullanılan agrega tipi ve özelliklerine bağlı olduğundan çimento tipinin önemli bir etkisi söz konusu değildir (Wainwright 1986).

- Cürüflu Çimentoların Beton Kimyasal Katkı Maddeleriyle Uyum

Genel olarak, cürüflu çimentolar çoğu kimyasal katkı maddeleriyle sorunsuz olarak kullanılabilir. Ancak, tüm diğer çimentolarda olduğu gibi, cürüflu çimentolarla üretilen betonlarda kimyasal katkı kullanmak gerektiği takdirde, gerçek koşullara uygun koşullarda denemeler yapılmasında yarar vardır (Wainwright 1986).

2.1.3.b Traslı Çimentolar

Tras kelimesi özel bir tip olmayıp, doğal puzolanı tarif etmekteyse de ülkemizde tüm doğal puzolanlarda tras kullanılmaktadır. Ülkemizde aynı şekilde, TS 26'ya göre %19'dan fazla doğal puzolan içeren çimentolara da traslı çimento ifadesi kullanılmaktadır.

Tüm puzolanlar, daha önce de tanımlandığı gibi özel şartlar altında kireçle tepkime veren malzemelerdir. Kireç-doğal puzolan tepkimesi aynı şekilde portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarında da görülür. Çünkü portland çimentosunda bulunan C_3S ve C_2S minerallerinin hidrasyonu ile $Ca(OH)_2$ açığa çıkar ve gözeneklerde çözelti halinde birikir. Portland çimentosu hidrasyonu ile açığa çıkan $Ca(OH)_2$; suda çözünür ve yıkanmayla geride boşluklar bırakarak ortamdan ayrılır. Ayrıca $Ca(OH)_2$ betonda zararlı kimyasal etkilere en açık bileşiktir. Dolayısıyla, traslı çimentolarda portland çimentosu kısmının hidrasyonu ile açığa çıkan $Ca(OH)_2$ 'in puzolanlarla birleşerek dayanım kazanımını sağlayan C-S-H jelleri vermesi betonun dayanıklılığı açısından olumlu gelişmeler sağlamış olur.

a. Traslı Çimentoların Üretimi

Traslı çimento üretimi için fabrikalarda çimentoya tras katılması işlemi iki şekilde gerçekleştirilebilir;

- i. Klinker alçıtaşı karışımı ayrı, tras ayrı öğütülür ve elde edilen öğütülmüş iki malzeme karıştırılır.
- ii. Tras, portland çimentosu klinkeri ve priz süresini düzenlemek için bir miktar alçıtaşı beraber öğütülür.

Beraber öğütme tekniğiyle daha homojen bir karışım elde edilebilmesine karşın, üretilen çimentoda tane boyutu dağılımını kontrol etmek daha zor olabilir. Çünkü tras ve klinker farklı öğütülebilirliklerdeki malzemelerdir. Klinker daha sert olduğundan, belirli bir incelikte çimento üretildiğinde trasa göre daha kaba kalır.

Öte yandan, trasın ve klinkerin ayrı ayrı öğütülüp sonradan karıştırıldığı üretim tekniğinde çimentodaki klinker ve tras bileşenlerinin tane boyutu dağılımı daha iyi ayarlanabilmektedir, fakat karışımın homojenleştirilmesi problemi ortaya çıkar. Bu durum fabrikalarda uygun karıştırma sağlayan ekipmanlara ihtiyaç duyulmasına neden olmaktadır.

Beraber öğütme tekniğiyle üretilen traslı çimentoların değirmende belirli bir inceliğe ulaşmaları için ton başına gereken enerji miktarını inceleyen bir araştırmada, aynı inceliğe ulaşmak için portland çimentosuna göre traslı çimentolar, çok daha az enerji tüketmiştir. Yapılan araştırmaya göre klinkerin trasla ikame oranı arttıkça bu durum daha da belirginleşmiştir. Aynı incelikteki portland çimentosu üretimi için gereken enerji yüzdesel olarak ifade edildiğinde, üretilen traslı çimentonun inceliği arttıkça, değirmende tüketilen enerji miktarı azalır. Başka bir ifadeyle yüksek incelikte traslı çimento üretimi, aynı incelikteki portland çimentosu üretimine göre daha yüksek oranlarda enerji tasarrufu sağlamaktadır (Erdoğan 1996). Türkiye’de genel olarak traslı çimentolar beraber öğütme tekniğiyle üretilmektedir.

b. Traslı Çimentoların Hidratasyonu

Esas olarak, kireç-doğal puzolan karışımlarında oluşan tepkimeler portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarında da meydana gelmektedir. Fakat portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarında doğall puzolanın tepkime verebilmesi için gerekli kireç, karışımın suyla karıştırıldığı ilk anda ortamda bulunmaz. Zamanla portland çimentosundaki C_3S ve C_2S minerallerinin hidratasyonu ile ortamda $Ca(OH)_2$ birikimi olur ve tras puzolanik tepkimelerin neticesinde C-S-H jelleri vermeye başlar.

Çeşitli doğall puzolanlarla yapılan çalışmalara göre doğall puzolanlı çimentolarda bulunan portland çimentosu kısmının hidratasyonu trasın etkisiyle hızlanır. Bu durum genel olarak bütün ince öğütölmüş puzolanları kapsamaktadır (Editör Swamy 1992). Ayrıca opal ve allopheane içeren doğall puzolanlar volkanik camsı faz içerenlere göre C_3S ile daha reaksiyon verirler (Ogawa *et al.* 1980). Bir başka çalışmada ise yüksek aktifliğe sahip bir tuf kullanımıyla C_3S hidratasyonunun hızlandığı belirlenmiştir (Massazza and Daimon 1992). Bu durumun sebebi, doğall puzolan parçacıklarının, yüksek incelikleri nedeniyle, ortamda hidratasyon ürünü olan C-S-H jellerinin toplanabileceği bir yüzey arz etmesiyle açıklanmaktadır. Böylelikle doğall puzolan, ortamda C-S-H jellerinin toplandığı bir çekirdek görevi üstlenmekte ve C_3S hidratasyonu ile açığa çıkan, göreceli olarak daha az geçirgen olan ve dolayısıyla, C_3S hidratasyonunu yavaşlatan C-S-H jellerinin C_3S üzerinde birikmesini önlediği tespit edilmiştir. Ayrıca ortamda doğall puzolanın varlığı C_3S hidratasyonunda hidratasyon ısısı-zaman eğrisinde bazı farklılıkların oluşmasına yol açar. Eğride görölen durgun dönem (dormant period) kısalır ve ikinci tepe nokta doğall puzolan olmayan duruma göre biraz daha yükselir (Hewlett 1986).

Ortamda doğall puzolan olması, C_3A hidratasyonunun hızını yavaşlatır. Bu durum C_3A hidratasyon ısısı-zaman grafiğinde ikinci tepe noktasının doğall puzolan olmayan duruma göre azalmasından dolayıdır (Collepari *et al.* 1978; Uchikawa and Uchida 1980). İkinci tepe noktasının azalması puzolanın tipine ve buradan hareketle puzolanın inceliğine bağılı olarak düşünölebilir. Yapılan bir araştırma doğall puzolanın inceliğinin

artmasının C_3A hidratasyon hızını yavaşlattığının ispatlanmasını sağlamıştır. Fakat bu araştırmada tüm parametreler iyice değerlendirilmemiş ve C_3A hidratasyon hızındaki yavaşlamanın nedeni başka esaslardan da kaynaklanabilir (Plowman 1981). Aynı çalışmada doğal puzolanların hem laboratuvarında üretilen C_3A 'nın; hem de klinkerden ayırma yöntemiyle elde edilen C_3A 'nın hidratasyon hızını azalttığı saptanmıştır. Genel olarak bu yavaşlatıcı etki klinkerden ayırma yöntemiyle elde edilen C_3A üzerinde daha büyük bir etkiye sahiptir. 7 günlük kütleme neticesinde kullanılan puzolanın tipinden ve varlığından bağımsız olarak C_3A 'nın hidratasyon dercesi %90 civarında sabit olarak tespit edilmiştir (Collepardi *et al.* 1978).

Önemli klinker fazlarından sonra çimento bir bütün olarak ele alındığında ise portland çimentosunun yerine doğal puzolan yerleştirildiği durumlar için şu sonuçlardan bahsedilebilir (Takemeto *et al.* 1980; Hewlett 1998);

- i. Hidratasyon ısısı-zaman eğrisinde görülen durgun dönem (dormant period) kısalmır.
- ii. Hidratasyon ısısı-zaman eğrisinde ikinci tepe noktası bir miktar yükselir.
- iii. Genel olarak, doğal puzolan katkılı çimentonun klinker kısmının hidratasyonu hızlanır.
- iv. Genel olarak, özgül yüzey alanı, kimyasal kompozisyon, yüzeyin fiziksel durumu ve alkalilerin çabuk ya da yavaş açığa verilmesi gibi puzolan özelliklerinin hepsinin klinker hidratasyonunun hızlanmasına etkisi olduğu söylenebilir.

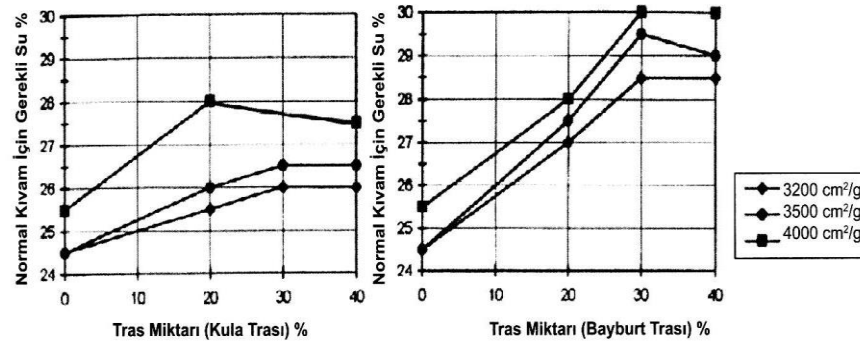
c. Taze Harç ve Beton Özellikleri

Kıvam ve İşlenebilirlik

Portland çimentosu-doğal puzolan karışımı içeren betonlarda aynı kıvamı sağlamak için gerekli su bir miktar daha fazla kullanılabilir.

Beraber öğütme tekniğiyle üretilen ve portland çimentosu klinkeri yerine Türkiye'deki iki farklı trasın %20, 30 ve 40 oranlarında kullanıldığı farklı inceliklerdeki çimentoların

normal kıvamı üzerine yapılan bir çalışmada, Şekil 2.20’de sunulan sonuçlar ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlara göre kullanılan doğal puzolanlar için çimentodaki ikame oranı arttıkça, normal kıvam için gerekli su miktarı da artmaktadır. Fakat %30 düzeyindeki tras miktarlarından sonra su ihtiyacı dikkat edilmesi gereken derecede değişim gözlenmemiştir (Erdoğan 1996).



Şekil 2.20. Çimentodaki doğal puzolan miktarının normal kıvam için gerekli su miktarına etkisi (Erdoğan 1996)¹

Betondaki portland çimentosu ile aynı incelikte herhangi bir puzolan ikamesiyle betonun işlenebilirliği genel olarak fazla değişmez. Doğal puzolanlı harçlar üzerinde yapılan bir çalışmada, doğal puzolanların portland çimentosu yerine bir miktar kullanıldıklarında harçların işlenebilirliğini, düşük mertebelerde azalttığı belirlenmiştir (Stuart *et al.* 1980).

Betonda bir miktar portland çimentosu yerine doğal puzolan kullanılmasının çökme (slump) değerine etkisini inceleyen bir başka çalışmada çeşitli beton karışımlarında öğütülmüş skorya²(scoria) eklenmiş ve yüksek çimento dozajlı betonlarda skorya ikamesinin çökmeyi azalttığı belirlenmiştir. Bu azalma skoria ikame oranıyla doğru orantılı gerçekleşmektedir. Bununla beraber, 300 kg/m³ veya daha az çimento dozajlı betonlarda skoria kullanımı çökme üzerinde önemli etkiler oluşturmamıştır.

¹ Çimentolar, tras ve klinkerin beraber öğütülmesiyle üretilmiştir.

² Scoria: Bir tür doğal puzolan.

Diatomitli topraklar aşırı derecedeki pürüzlü yüzeyleri ve dolayısıyla yüksek özgül yüzey alanları nedeniyle betonda işlenebilirliği zorlaştırıcı etki yapmaktadır. Bundan dolayı, bu malzemelerin kullanılması halinde betona akışkanlaştırıcı kimyasal maddeler katılması gerekmektedir. Bununla beraber, diatomitli toprakların düşük miktarlarda kullanılması betonda terlemeyi önler ve de plastikliğin artmasını sağlar (Hewlett 1998).

Priz Süreleri

Portland çimentosu-doğal puzolan karışımlarının kullanıldığı betonlarda priz başlangıcı ve sonu süreleri puzolanın portland çimentosu yerine koyulan miktarına, inceliğine ve reaksiyon özelliğine bağlıdır. Ancak iki araştırmada %20 ve %25 mertebesinde doğal puzolan içeren çimentolarda, portland çimentosu içeren kontrol numuneleriyle yaklaşık aynı priz süreleri saptanmıştır (Efes 1980). Bunun yanında, yüksek miktarlarda doğal puzolan kullanımının (%30-70 arası) priz sürelerini önemli miktarlarda geciktirdiği belirlenmiştir (Editör Swamy 1986).

Hava Miktarı

Betonda bulunan hava iki şekilde olabilir. Bunlardan ilki tamamen rastlantı sonucu olarak betonun karışması ve yerleştirilmesi sırasında kendiliğinden beton içerisine hapsolmuş havadır. İkincisi ise betonun donma-çözünme dayanımını arttırmak için hava sürükleyici katkı kullanımı suretiyle betona bilinçli olarak sürüklenen havadır.

Düşük çimento dozajlı betonlarda betona belirli bir miktarda hava sürüklemek için gerekli hava sürükleyici katkı miktarı, betonda kullanılan pümisit ve diatomit miktarı arttıkça artmaktadır. Bu durum betonda ısıtma işlemi tabi tutulmuş doğal puzolanların kullanımı için de geçerlidir.

Terleme

Betonda veya çimentoda bir miktar portland çimentosu yerine doğal puzolan kullanılması terleme miktarını önemli derecede azaltır. Aynı şekilde kalsine edilmiş şeyl ve kaolinin de taze betonda terlemeyi azalttığı belirlenmiştir.

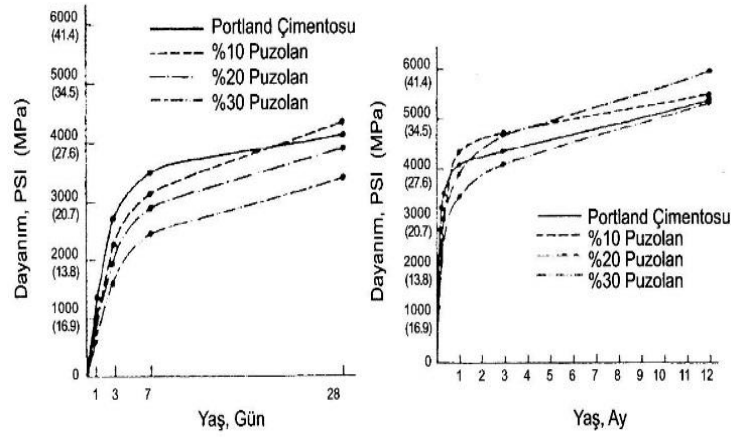
d. Sertleşmiş Harç ve Beton Özellikleri

Dayanım

Puzolan içeren betonlardaki dayanım gelişmesi, puzolanlı harçlar ve pastalarda hasıl olan durumla benzerlik göstermektedir. Puzolanlar, betonda, klinkerin hidrasyonundan oluşan Ca(OH)_2 ile tepkime verirler ve bu nedenle betona karışım suyu ilavesinden itibaren bir süre ortamda Ca(OH)_2 birikene kadar portland çimentosunu seyreltici etki yapar. Fakat zamanla ortamda Ca(OH)_2 birikmesi sonucunda; puzolanların da sistemin dayanımını arttıran etkilerinin ortaya çıkmasını sağlamış olur. Bu sebeple, puzolan kullanımıyla erken dayanımlarda bir düşüş olması beklenir. Sonuç olarak, portland çimentosu-puzolan karışımı içeren betonlar aynı incelikteki portland çimentosu içeren betonlara göre daha uzun süreli kürlemeye ihtiyaçları olur.

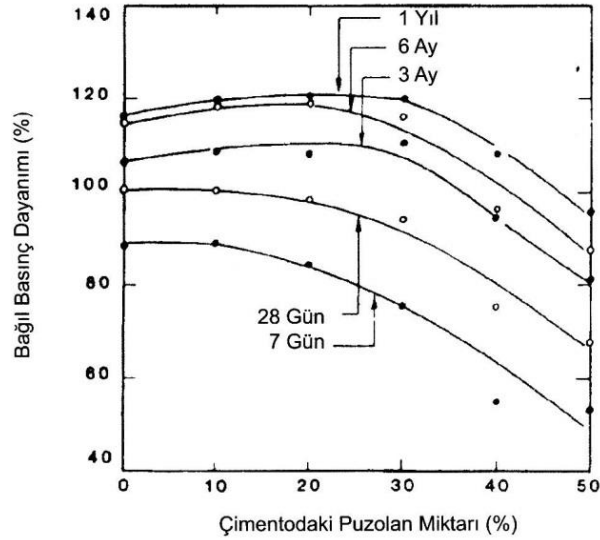
Doğal puzolanlı çimento içeren harçların dayanım gelişmesini inceleyen bir çalışmanın sonuçları şekil 2.21’de verilmektedir (Mehta 1981). Bu çalışmada, harçlarda portland çimentosu, doğal puzolan ile %10, 20 ve 30 oranlarında yer verilerek, 0.5 su/portland çimentosu + doğal puzolan oranında hazırlanan harçların dayanımları saptanmıştır. Harçlarda hasıl olan puzolanik tepkimelerin 7 güne kadar dayanımda gelişme yapmadığı sadece şeklidir. Buna karşılık 7-28 günlük süreçte %10 tras içeren çimentolu harçlar kontrol numunesinin dayanımını geçmiştir. 28-90 günlük süreçte ise; %20 tras içeren çimentolu harçların dayanımının kontrol numunesinden yüksekliğiyle anlaşılacağı gibi puzolanik aktivite daha da belirgindir. Birinci yılın sonunda ise %30 tras içeren çimento, kontrol numunesiyle yaklaşık aynı dayanıma sahiptir. Bu çalışmada öğütülmüş

doğal puzolan ikamesinin harçlarda portland çimentosu yerine yapıldığı gözardı edilmemektedir.



Şekil 2.21. Portland çimentosunun doğal puzolanlarla ikame edildiği harçlarda dayanım (Mehta 1981)

İtalyan doğal puzolanları ile oluşturulan portland çimentosu-doğal puzolan harçları için Massazza tarafından bulunmuş dayanım değerleri ise Şekil 2.22'den anlaşılabilir (Massazza 1974). Bu çalışma da bir öncekinde olduğu gibi harçlarda portland çimentosu yerine öğütülmüş doğal puzolan ikamesinin etkileri incelenmektedir. Sonuçlar, şekil 2.21'de belirtilenleri doğrular niteliktedir. Bu bilgilerin ışığında öğütülmüş doğal puzolan yerleştirmesi yapılmış harçların erken dayanımlarının düştüğü ancak %30 gibi yüksek doğal puzolan yerleştirmesi oranlarında bile 1 yılda puzolanlı harçların kontrol numunelerinin değerlerini yakaladığı ve hatta geçtiği gözlenmektedir.



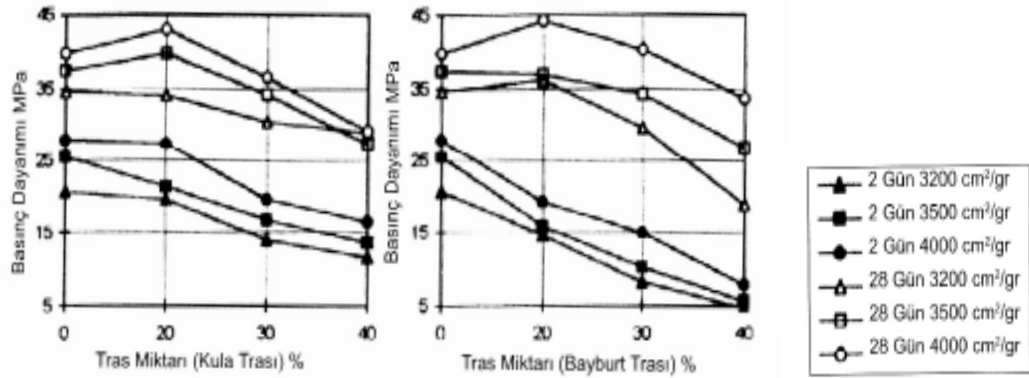
Şekil 2.22. Doğal puzolanlı harçların dayanımı -dayanım değerleri portland çimentolu harçların 28 günlük dayanımının yüzdesi olarak ifade edilmiştir (Massazza 1974)

Sonuç olarak, ortalama incelikteki ($3000-4000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ incelik) bir puzolanın yerleştirilmesiyle betonda ya da harçlarda geçici olan dayanım kaybının belirli bir süre zarfında ortadan kalkacağı söylenebilir. Bu süre puzolanın tipine ve yerleşim miktarına bağlıdır (Berry *et al.* 1994.). Örneğin rhyolitic glass'ın %15 oranında kullanılmasıyla portland çimentosu içeren harç numunelerinin dayanımını 7 günde yakalamak mümkün olmuştur (Asgeirsson 1979). Bununla yanında, birçok doğal puzolan için bu durum 28 günden önce gerçekleşmez (Hewlett 1998).

Genel olarak, ileri ki yaşlardaki dayanım göz önüne alındığında, doğal puzolan ikamesi, düşük dozajlı betonlarda (bağlayıcı miktarı 200 kg/m^3 'ten az) yüksek dozajlı betonlara göre daha yüksek oranlarda dayanım kazanımı sağlanmış olur (kontrol numunesinin dayanımının oranı olarak ifade edildiğinde) (Swamy and Mahmud 1986).

Türkiye'deki genel durum trasların harç veya betonlara doğrudan katılması yerine bu malzemelerin çimento üretiminde yer almasıdır. Dolayısıyla Şekil 2.21 ve 2.22'deki eğilimler Türkiye'de üretilen doğal puzolanlı çimentolarla üretilen harçlardaki ve betonlardaki durumu tam olarak yansıtmayabilir. Ülkemizde traslı çimentolarda geçici olan erken dayanım kayıpları bu tip çimentoların portland çimentolarına göre daha ince

öğütülmesiyle ortadan kaldırılmaktadır. Türkiye'deki Kula ve Bayburt trasları üzerinde klinkerle beraber öğütme tekniğiyle üretilen traslı çimentolar için yapılan bir araştırmadan elde edilen verilere ise Şekil 2.23'de yer verilmiştir. Buna göre Kula ve Bayburt trasları katkılı çimentolar aynı incelikteki portland çimentosu ile karşılaştırıldıklarında Şekil 2.21 ve 2.22'de sunulanlara benzer olarak erken dayanım düşüşleri göstermişlerdir. Fakat traslı çimentonun bir miktar daha ince öğütülmesi erken dayanım kaybının yok edilmesini sağlamıştır. Örneğin 2 günde $3500 \text{ cm}^2/\text{gr}$ incelikteki portland çimentosunun dayanımı şekilden de görüleceği gibi 25 MPa civarındadır. %20 Kula trası katkılı çimentonun dayanımı bu değeri $4000 \text{ cm}^2/\text{gr}$ incelikte aşmıştır. Öte yandan, her iki tras için de 28 günde %20 katkılı çimentolar kontrol numunelerinin dayanımlarına ulaşmışlar ve hatta yüksek incelikteki çimentolar aynı incelikteki kontrol dayanımını bir miktar aşmışlardır (Erdoğdu 1996).



Şekil 2.23. Çimentodaki doğal puzolan miktarının farklı inceliklerdeki çimentolu harçlarda 2 ve 28 günlük basınç dayanımına etkisi (Massazza 1974)³

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği'nde yapılan, traslı çimentolarda kullanılan klinkerlerin özelliklerinin etkisini inceleyen bir araştırmada aynı tras (Nevşehir Himmetdede Trası) Türkiye'de üretilen farklı klinkerlere katkı malzemesi olarak kullanılmış ve üretilen traslı çimentoların dayanımları karşılaştırılmıştır. Burada değişik yaşlardaki dayanım sonuçları çeşitli parametrelerin (traslı çimentoda kullanılan klinker için; C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF yüzdeleri ve C_3S/C_2S oranı, traslı çimento için; 45 mm'den ince kısmının yüzdesi ve çimentodaki tras miktarı) fonksiyonu olarak ifade edilmeye

³ Çimentolar, tras ve klinkerin beraber öğütülmesiyle üretilmiştir.

çalışılmıştır. Araştırmada parametreleri kullanarak dayanımı tahmin etmekte kullanılan denklemler 0.944 ile 0.994 arasında oldukça yüksek korelasyon katsayılarına sahiptir. Buna göre yukarıda parantez içerisinde verilmiş olan parametreler kullanılarak traslı çimento dayanımları başarıyla saptanabilir (Yılmaz 1996).

Bir miktar portland çimentosunun doğal puzolan veya herhangi bir puzolanla yerleştirildiğinde harçlarda erken dayanımın sabit su/çimento oranında düşeceği ancak zamanla bu farklılığın kaybolacağı daha önce belirtilmişti.

Bu bilgilere dayanarak, amacımız her iki numune için de aynı erken dayanımı elde etmek olduğumuzda, öğütölmüş puzolan katılmış harcın ya da betonun su-çimento oranını azaltmak ve dolayısıyla erken dayanımı artırmak gerekecektir. Bu ise sistemde akışkanlaştırıcı katkı kullanılması ya da puzolanlı çimento dozajının artırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bu uygulamalardan birisinin yapılması halinde erken dayanımlar aynı olacak, fakat ileriki yaşlarda puzolanlı harçların dayanımı yalnızca portland çimentosu içerenlere göre daha fazla olacaktır.

Harçlara katılmak yerine puzolanların doğrudan çimento üretiminde klinker yerine kullanılması halinde ise yine erken dayanım düşüşleri meydana gelebilir. Önceden de belirtildiği gibi Türkiye’de genel olarak puzolanlı çimento üreten fabrikalar çimentolarını bir miktar daha ince öğütmek yoluyla erken dayanım kayıplarını azaltılmaktadır.

Gözeneklilik ve Geçirgenlik

Bir kısım portland çimentosunun belirli bir miktarda puzolan ile ikame edildiği çimento pastalarında toplam gözeneklilik portland çimentosu içeren kontrol numunelerinden daha fazladır (Berry *et al* 1989; Hooton 1984; ASTM 1986; Cook and Cao 1987; Massazza and Costa 1987; Manmohan and Mehta 1981; Feldman 1981). Bu durumun hem uçucu kül hem de doğal puzolan içeren pastalar için geçerli olduğu belirlenmiştir (Massazza 1991; Spon 1992). Puzolanın tipi ne olursa olsun toplam gözeneklilik

zamanla azalır ancak yine de portland çimentosu içeren pastaninkinden yüksektir (Manmohan and Mehta 1981; Massazza and Costa 1987).

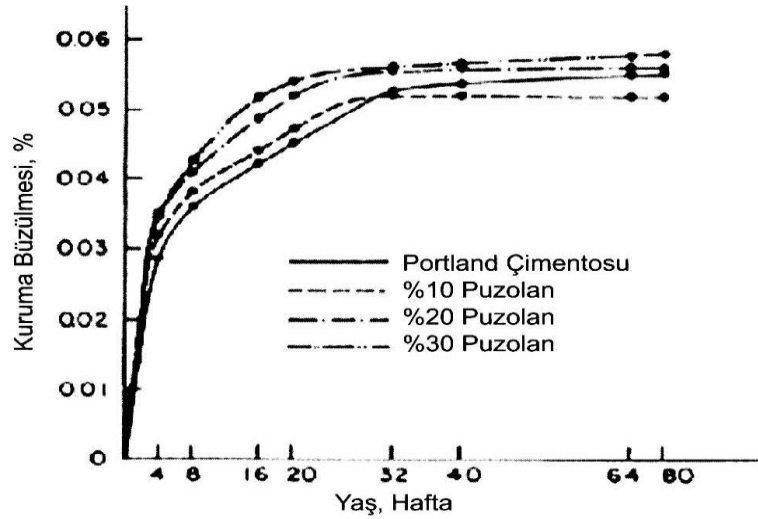
Betonun geçirgenliği, yalnızca beton gözenekliliğinin bir fonksiyonu olmayıp, gözeneklerin boyutlarına, dağılımına ve şekillerine göredir. Genel olarak, Mehta'nın sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, 500 A'den büyük boyutlu gözeneklerin betonun geçirgenliği, dayanımı ve dayanıklılığı üzerinde etkili olduğu kabul edilmektedir (Mehta 1981; Swamy 1986). Neticede, betonda gözenekliliğin artması kesin olarak geçirgenliğin de artması anlamına taşımaz. Esas olarak doğal puzolan kullanımıyla gözenekliliğin bir miktar arttığı fakat bu gözeneklerin puzolanik tepkimeler neticesinde zamanla birbirinden kopması sebebiyle geçirgenliğin azalabileceği de anlaşılabılır. Bu olumlu etkinin oluşabilmesi tabii ki uygun kalitede puzolanın uygun miktarlarda kullanımıyla mümkündür.

Doğal puzolan kullanımı, geçirgenliğin azaltılmasında düşük çimento dozajlı betonlarda yüksek dozajlı betonlara göre daha etkilidir. Geçirgenlik portland çimentosu içeren betonlarda olduğu gibi doğal puzolan içeren betonlarda da kürlenmeyle azaltılabilir. Hatta uzun süreli kürlenme doğal puzolanlı betonlarda yalnızca portland çimentosu içeren betonlara oranla etkili bir şekilde geçirgenliği azaltır.

Büzülme (Rötme)

Genel olarak, çimentoya alışlageldik dozajlarda puzolan ilavesiyle harçlardaki kuruma büzülmesinin küçük bir miktar arttığı belirlenebilir (Hewlett 1998).

Santorin toprağıyla yapılan bir çalışmada %30 katkı oranına kadar bu malzemenin kuruma büzülmesine etkisi incelenmiştir. Şekil 2.24'den de görüleceği gibi bu malzemenin kullanılışı kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında önemsiz kademelerde artan kuruma büzülmesine neden olur (Mehta 1981).



Şekil 2.24. Çeşitli pozolan ikamelerine göre zaman bağlı olarak kuruma büzülmesi (%) (Mehta 1981)

Davis vd (1950) çalışmaları yukarıda verilen verileri doğrular nitelikte doğal pozolan kullanımıyla betonun hacim değişmesinin artacağını göstermiştir (Davis 1950). Yine aynı araştırmacılar bu durumu doğal pozolan kullanımının betonda su ihtiyacını artırmasıyla ifade etmişlerdir (Davis 1950). Betondaki karışım suyu miktarının artması büzülmeyi artırır (Shacklock and Keene 1957). Bu nedenle, doğal pozolanların büzülmeye etkisini betonun su ihtiyacına olan etkisi ile ilişkilendirmek daha doğru bir yaklaşımdır.

Konuya bir başka yaklaşım ise şu şekilde olabilir; portland çimentosu kullanılan bir betonla, doğal pozolanlı çimento kullanılan bir betonun aynı erken dayanıma sahip olmalarını sağlamak için, doğal pozolanlı çimento içeren betonun çimento dozajı diğerine göre biraz daha fazladır veya pozolanlı çimento bir miktar daha incedir. Çimento dozajının veya inceliğinin artması ise betonda büzülmeyi genellikle artırır.

Sünme

Sünme sabit yük altında betonun zamanla artan deformasyon göstermesi olarak ifade edilebilir. Sünme betonda yalnızca çimento pastasında meydana gelir ve agregalar

sünmeyi kısıtlayıcı yönde olumlu bir etki yapmaktadırlar. Bu nedenle, sünme; betonda çimento pastasının hacimce miktarının bir fonksiyonudur.

Sünme miktarı yükün uygulandığı andaki beton dayanımı ile sıkı bir ilişki içerisinde. Bu nedenle, diğer tüm şartlar aynı tutulduğunda bu miktar; çimento dayanımına, su çimento oranına ve kürlenme şartlarına bağlı olarak değişir (Hewlett 1998).

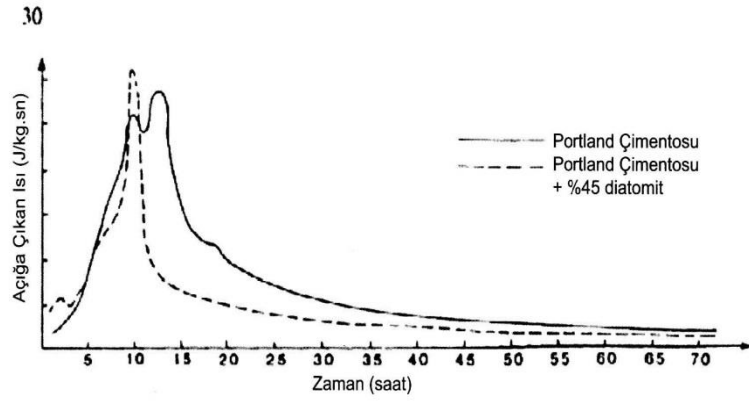
Sonuçta, betonda kullanılan çimento tipi beton dayanımını etkilediği ölçüde betonun sünme davranışına da etki de bulunur. Buradan hareketle, bir kısım portland çimentosunun herhangi bir puzolanla ikame edildiği betonlara erken yaşlarda yükleme yapılması halinde sünme miktarı daha fazla olur (Sri and Tam 1989). Fakat aradaki farklılık betonun geç yaşlarda yüklenmesi halinde önemsiz bir hal arzeder. Bu durum geç yaşlarda puzolan katkılı çimentolu betonların portland çimentolu beton dayanımına ulaşmasından dolayıdır. Dolayısıyla, herhangi bir puzolan içeren betonlarda görülen sünme miktarı, yükleme anındaki beton dayanımına bağlı olarak puzolansız betonlarınkinden fazla veya az olabilir. Yapılan bir çalışmada uzun süre kürlenmiş uçucu küllü betonların portland çimentosu içeren betonlardan daha az sünme gösterebileceği saptanmıştır (Swamy and Mahmud 1989).

Puzolanlı betonun erken yaşlarda yüklenmesi halinde daha fazla sünmeye maruz kalması, masif yapılar için beton fazla katılaşmadan yapının oturmasına sebep olması nedeniyle olumlu bir gelişme olarak gösterilebilir (Troxell *et al.* 1958).

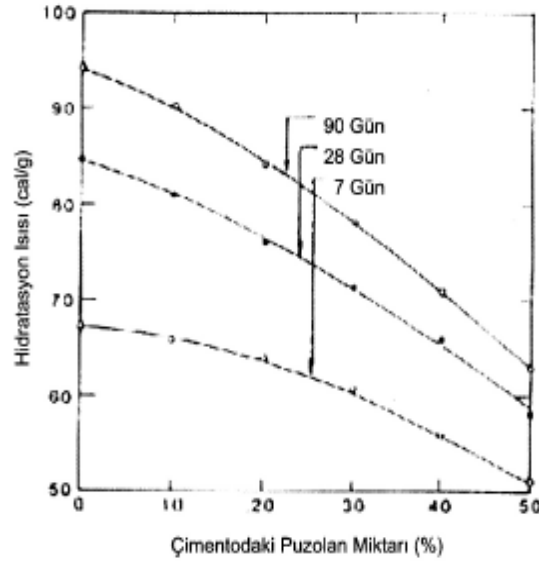
e. Hidratasyon Isısı

Portland çimentosunun toplam hidratasyon ısısı portland çimentosu-doğal puzolan karışımından genellikle daha fazla olmalıdır. Bununla yanısıra, puzolanik tepkimelerin de ısı açığa çıkarttığı gözardı edilmemelidir. Çimentoya puzolan katılması hidratasyon ısısı hızı-zaman diagramının daha dikleşmesine, pasif dönemin (dormant period) kısalmasına ve maksimum değere daha erken ulaşılmasına sebep olur. Bu durum Şekil 2.25’den de anlaşılabılır (Grzymek *et al.* 1980). Bu doğal puzolanların alit (C_3S)

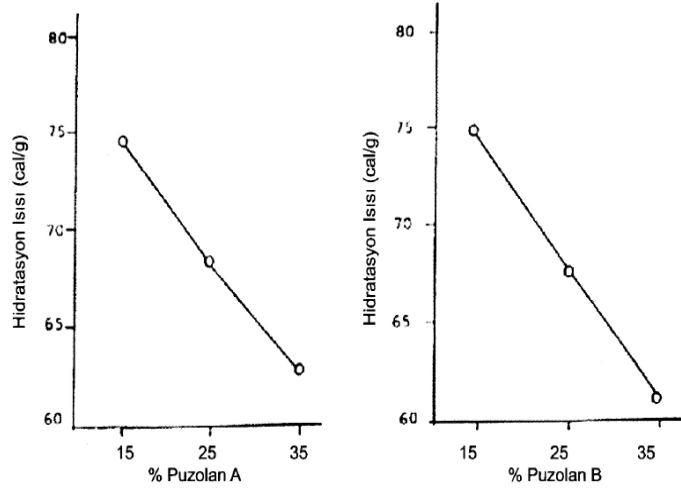
hidratasyonunu hızlandırdığı yolundaki düşüncüyü destekler niteliktedir. Alit hidratasyonunun doğal puzolanlar tarafından hızlandırılmasının sebebi henüz tam olarak belirlenememiştir.



Şekil 2.25. Portland çimentosu ve portland puzolan katkılı çimentoların erken safha hidratasyonları (Grzymek *et al.* 1980)



Şekil 2.26. Çimentodaki puzolan miktarının farklı yaşlardaki hidratasyon ısısına etkileri (Grzymek *et al.* 1980)



Şekil 2.27. Doğal puzoalanların 7 günlük hidrasyona etkisi (Shannang and Yeğınobalı 1995)

Şekil 2.26’da ise puzolan katkısıyla hidrasyon ısısında değişik yaşlarda meydana gelen düşüşleri göstermektedir (Massazza 1974). Davis’e göre; bir miktar portland çimentosunun yerine puzolan ikamesiyle elde edilen hidrasyon ısısı düşüşü oranı ikame yüzdesinin yarısı olarak öngörülebilir.

Doğal puzolan ikamesinin hidrasyon ısısına etkisinin incelendiği bir başka araştırmanın sonuçları ise şekil 2.27’de sunulmaktadır (Shannag and Yeğınobalı 1995).

2.1.3.c. Kalker katkılı çimentolar

Katkılı çimentoların kullanımı, sağladıkları ekonomik ve teknik avantajlarının yanı sıra klinker üretimini azaltarak CO₂ emisyonunu azaltmadaki dolaylı faydaları ile günümüzde tercih edilme sebeplerini oluşturur. Geçmişte çoğunlukla puzolanik özellikteki malzemeler bu amaçla kullanılırken, kalker katkısı çimentoda genellikle minör bileşen olarak ağırlıkça %5’lik kullanım oranı ile sınırlı bırakılmıştır. Ancak, asıl ilave bileşen olarak kalkerin kullanıldığı katkılı çimentoların üretimi son yıllarda TS EN 197/1 standardıyla artış göstermiştir. Ülkemizde de TS EN 197/1 standardına göre üretilen CEM II/A-L, CEM II/B-L sınıfı kalker katkılı çimentolar kullanılmaya başlanmıştır. Kalker katkısı aynı zamanda CEM II sınıfı Portland kompoze çimento

üretiminde, ilave bileşen olarak da yer almaktadır. Kullanılan maddelerin kodlarının çimento isimlendirilmesinde belirtilmediler. Örneğin CEM II/A-M (S-V-LL) 32.5 R, toplam olarak kütlece %6-20 arasında granüle yüksek fırın cürufu, silissi uçucu kül ve kalker (Toplam organik karbon miktarı %0.2'den az) içeren 32.5 dayanım sınıfında, yüksek erken dayanımlı Portland kompoze çimento olarak isimlendirilmektedir. Çizelge 2.15'de TS EN 197/1 standartına göre yapılan sınıflandırmaya yer verilmiştir (Yeğinoğlu ve Ertün 2004). Minör bileşenin de kalker olduğu göz önünde bulundurulduğunda standart en azından 32.5 sınıfının sağlanması halinde %40'a kadar kalker ikamesini tasdik etmektedir (CEM II/B-L 32.5 N). Fakat yüksek kalker ikamelerinin bu çimento ile hazırlanan harç ve/veya betonun dayanıklılık özelliklerini nasıl etkileyeceği hakkında çalışmalar halen devam etmekte olup; henüz derlenmiş bir bilgi yoktur. Bu çalışma kapsamında da, incelenen klinkerin, %0, 5, 10, 20 ve 40 oranlarında kalker ile ikame edilmesiyle üretilen kalker katkılı çimentolar ile hazırlanan harçların mekanik özellikleri ve sülfat etkisine karşı dayanım durumlarının tespiti yapılmıştır. Böylece kalker katkılı çimentoların kullanım oranları için, dayanıklılık açısından bir üst sınırın ortaya konulması amaçlanmıştır.

TS EN 197/1 standardına göre katkılı çimento üretiminde kullanılacak kalkerin CaCO_3 oranı en az %75 olması gerekmektedir. Ayrıca kalkerin kil içeriği de %1.2'yi geçmemelidir. Kalker, hammadde safsızlıklarına göre bünyesinde organik karbon içerebilir. Organik karbon miktarının yüksek olması, beton üretimi sırasında kullanılabilir hava sürükleyici katkı maddeleri ile olumsuz etkileşime girmesine neden olacağından, çimento katkısı olarak kullanılacak kalkerdeki toplam organik karbon (TOC) miktarı TS EN 13639 standardına göre belirlenmelidir. Organik karbon içeriği %0.5'i aşan kalker, çimento katkısı olarak kullanılamaz. TS EN 197/1 standardına göre kalker katkılı çimentoları, TOC değerinin en fazla %0.5 (L) ve %0.2 (LL) olduğu iki sınıfa ayrılmıştır.

Bu kısımda, kalker katkısının fiziksel ve mekanik özellikleri ile ilgili literatür bilgilere yer verilecektir.

a. Öğütülebilirlik

Kalker katkılı çimentolar hedeflenen dayanıma ulaşmak amacıyla çok yüksek Blaine değerlerine kadar öğütülmektedir. Fakat, incelik (32 mikron elek üstünde kalan miktar) ve Blaine değerleri kalker katkısının yüksek oranlarda kullanımında paralel gitmemektedir. Literatürde kalker katkısıyla doğru orantılı olarak, çimentonun Blaine değerini arttırırken, tane boyut dağılımını daha geniş bir aralığa yaydığına dair tespitler bulunmuştur (Tsivilis *et al.* 1999; Tsivilis *et al.* 2002; Voglis *et al.* 2005). Voglis vd (Voglis *et al.* 2005) kalker katkısının klinker ile birlikte öğütülerek kullanıldığı katkılı çimentolarla ilgili çalışmalarında, kalkerin öğütülebilirliğini, doğal puzolan ve uçucu kül katkılı (%15 ikame oranı) çimentolarla karşılaştırarak deneyler yapılmıştır. Bu çimentolarla hazırlanan harçların hedef basınç dayanımı (28 günlük) sabit tutulup, gerekli Blaine değerleri ve öğütme süreleri kıyaslaması yapılmıştır (Çizelge 2.17). İçerisinde katkı malzemesi bulundurmada en kolay öğütülebilen malzemeler sırasıyla kalker, uçucu kül, doğal puzolan ve son olarak da klinkerdir. Fakat kalker katkılı çimentoların gerekli dayanıma ulaşması için hedeflenmesi gereken Blaine değeri en yüksek çıkmış ve öğütme süresi de en uzun olan katkı olarak tespit edilmiştir. Tek başına kolay öğütülen kalkerin kullanıldığı çimento, aynı dayanıma ulaşmak için daha yüksek öğütme enerjisine gereksinim vardır (Voglis *et al.* 2005).

Tsivilis vd (Tsivilis *et al.* 2002)'de, kalker katkılı çimentoların farklı ikame oranlarında (%10, 20, 30, 40) ve farklı öğütme sürelerinde (35, 50, 65, 85 dakika) öğütülebilirliklerini araştırılmıştır. Araştırmacılar, karışımdaki kalker katkısı oranının ve karışımın blaine değerinin artmasıyla doğru orantılı olarak, tane boyut dağılımının genişlediğini belirlemişlerdir. Fakat %40 kalker içeren çimentolarda, hem klinkerin hem de kalkerin öğütülebilirliğinin olumsuz etkilendiği ve %30'la kıyaslandığında kalker ve klinkerin daha düşük incelik değerlerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 2.17. Kalker, doğal puzolan ve uçucu kül katkılı (%15 ikame oranı) çimentoların öğütme parametreleri ve bu çimentolarla hazırlanan örneklerin basınç dayanımları (Sezer 2007)⁴

Çimento tipi	Kompozisyon		Öğütme süresi (dk)	Blaine değeri (m ² /kg)	28 günlük basınç dayanımı (MPa)
Portland çimentosu	%100 klinker	%5* alçıtaşı	41	30 ₃	40.3
Kalker katkılı çimento	%85 klinker + %15 kalker	%5* alçıtaşı	60	511	40.5
Doğal puzolan katkılı çimento	%85 klinker + %15 doğal puzolan	%5* alçıtaşı	52	418	41.2
Uçucu kül katkılı çimento	%85 klinker + %15 uçucu kül	%5* alçıtaşı	40	388	41.0

Sezer (2007), klinkerin %0-6-21 ve 35 oranlarında kalker ikamesi ile birlikte öğütülerek hazırlanan çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerini araştırılmıştır. Öğütme hedefi olarak, klinkerin Blaine değerinin 330 m²/kg olması için gereken süre tespit edilmiştir. Diğer tüm katkılı çimentoları bu sürede öğütüp Blaine ve incelik (32-90 mikron elek üstü) değerlerini tespit etmiştir. Sabit öğütme süresinde kalker katkılı çimentoların Blaine değeri artarken, be artışa doğru orantılı olarak, incelik değerlerinin de arttığı (elek üstünde kalan kaba malzemenin arttığı) rapor edilmiştir. Bu çimentolarla hazırlanan harçların basınç dayanımları da kalker oranı artışı ile azalmıştır. Sonuç olarak öğütme süresinin yetersiz kaldığı söylenebilir. Böylece, sadece Blaine değerine bakılarak kalker katkılı çimentolar için yorum yapmanın hataya yol açabileceği gösterilmiştir. Çalışmanın ikinci aşamasında ise, ayrı ayrı öğütülen kalker ve klinkerin karıştırılmasıyla hazırlanan çimentoların göreceli performansının daha iyi olduğu ancak yine de dayanım sınıfı açısından kalker oranı artışı ile azalış gözlemlendiği rapor edilmiştir.

Yukarıda sunulan çalışmalar, aslında kalker ikame oranının, öğütülebilirlik açısından da dikkate alınması zorunluluğunu ortaya çıkarmaktadır.

⁴ Klinkerin ağırlıkça %'si

b. Kıvam Suyu İhtiyacı ve Priz Süresi

Kıvam suyu ihtiyacı ve priz süresi çimentolarda Vicat sondası ve iğnesi ile belirlenmektedir. Teorik olarak, kalker katkılı çimento, normal Portland çimentosuna kıyasla hedef dayanıma ulaşmak için daha ince öğütüleceğinden yüzey alanı artmakta ve bu artışa bağlı olarak kıvam suyu ihtiyacının artması beklenir. Ancak, kalker oranı artışı ile kıvam suyu ihtiyacının azaldığını rapor eden araştırmacılar bulunmaktadır (Tsivilis *et al.* 1999; Tsivilis *et al.* 2002; Voglis *et al.* 2005; Sezer 2007). Örneğin, Sezer (Sezer 2007), kıvam suyu ihtiyacının, kalker ve klinkerin birlikte öğütüldüğü durumda azaldığını belirlemiştir. Çünkü tüm çimentolar hazırlanırken öğütme süresi sabit tutulmuş ve kalker katkılı çimentoların Blaine değerleri artmasına karşın, katkı içermeyen çimentoya kıyasla daha kaba kalmışlardır. Bu durum 32 ve 90 mikron elek üstleri incelendiğinde ortaya çıkmıştır. Bunun yanı sıra, çimento kompozisyonunun oluşturulmasında kullanılan alçıtaşı miktarı ve kalkerin mikroporozitesi ve morfolojik özellikleri de (öğütmes sırasında oluşan yüzey pürüzlülüğü) kıvam suyu ihtiyacına etki edebilir. Örneğin, Erdoğan (2002); %5-10-20 ve 30 kalker ikameli çimentoları sabit Blaine değerinde hazırlamıştır ve kıvam suyu ihtiyacının kalker ikamesi ile azaldığına dair rapor hazırlanmıştır. Kıvam suyundaki azalmanın sebebini, kalker tanelerinin öğütme sonrasındaki düzgün yüzeyine ve gözeneksizliklerine dayanmaktadır. Fakat özellikle yüksek kalker ikamelerinde ulaşılan dayanımların kâfi gelmediği, kalker katkılı çimentoların daha ince öğütülmesi gerektiğini de vurgulamıştır.

Dhir *et al.* 2007, %15-45 oranlarında kalker ikameli çimentoların özelliklerini inceledikleri araştırmalarda, Çizelge 2.18'deki sonuçları elde etmiştir. Kalker ikamesi ayrı öğütülüp sonradan karıştırma ile yapılmıştır. Penetrasyon derinliğinin 30 ± 5 mm'de sabit tutulması için gerekli kıvam suyunun %26-27 aralığında değiştiği tespit edilmiştir.

Çizelge 2.18. Kalker ikame oranı ile fiziksel ve mekanik özelliklerin değişimi (Dhir *et al.* 2007)

Fiziksel ve mekanik özellikler		Kalker ikame oranı (ağırlıkça)				
		%0	%15	%25	%35	%45
Vicat sondası penetrasyonu (mm)		28	30	34	31	35
Kıvam suyu (%)		26.5	26.8	26.8	26.8	27
Priz başlangıcı (dk)		105	128	128	122	118
Hedeflenen dayanım sınıfı (MPa)		42.5	42.5	32.5	32.5	-
Basınç dayanımı (MPa)	2 gün	30.6	25.3	21.6	17.7	14.1
	7 gün	45.8	37.7	33.0	28.5	22.4
	28 gün	63.5	45.0	40.1	34.7	26.9
Hacim sabitliği (mm)		0.5	0.5	0.5	0.5	0

c. Hacim Sabitliği

Kalker katkılı çimentolarda kalker ikame oranı arttıkça, Le Chatelier yöntemi ile belirlenen hacim sabitliğinde kayda değer bir değişiklik tespit edilmiştir (Tsivilis *et al.* 1999; Sezer 2007; Dhir *et al.* 2007). Fakat kalker katkılı çimentolarla hazırlanan harçların, kalker oranı artışı ile su emme oranlarının arttığı bulguları rapor halinde sunulmuştur. Açık boşluk oranı kalker oranı artışı ile artmakta ve emilen su, bir miktar geri dönüşümlü genleşmeye sebep olmaktadır.

d. Hidratasyon Isısı

Kalker ikame oranı %5 olan çimentolarda hidratasyon ısısının, hidratasyonun ilk zamanlarındaki gelişimi sadece Portland çimentosu ile üretilen örneklerle kıyasla daha hızlıdır.

Toplam hidratasyon ısısı açısından da benzer sonuçlar ortaya çıkarılmıştır. Ancak daha yüksek ikame oranlarında, çimento miktarının azalması sebebiyle hidratasyon ısısı düşüş göstermeye meyillidir (Erdoğan 2002). Belli bir kullanım oranına kadar, ince öğütülmüş kalker tanecikleri kalsiyum silika hidrat ve kalsiyum hidroksitin oluşumu için çekirdek görevi görerek hidratasyonu hızlandırmaktadır. Bunun yanı sıra kalker katkısının hemikarbonat, monokarboalüminat ve kalsiyum trikarboalüminat oluşumuna etki ederek, hidratasyon ısısını, hidratasyonun erken aşamalarında arttırdığı bildirmişlerdir (Rahhal and Tolero 2005).

Son yıllarda artmakta olan Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB) uygulamalarında, yüksek viskozite ve ayrışma direncinin oluşmasında yüksek oranda kalker katkısı kullanımı, hem kalkerin ekonomik açıdan uygun olması hem de hamur fazında sağladığı reolojik özellikler açısından kullanımı uygun görülmektedir (Yahia *et al.* 2005). Bu konuya yönelik araştırmalarında Poppe ve Schutter (Poppe and Schutter 2005), 240 kg/m³ kalker katkısı içeren KYB'ler ile geleneksel yöntemlerle üretilen betonların, izotermal ve adyabatik yöntemler kullanımı sonucunda oluşan hidratasyon ısılarındaki farklılıklarını gözlemlemek üzere deneyler yapılmıştır. Bu çalışmalarda elde ettikleri bulguları kullanarak bir modelleme yapmış ve yüksek oranda kalker katkısı kullanımının hidratasyon ısısında yükselme yarattığını tespit etmişlerdir. Ancak bu yükselmenin, KYB'nin geleneksel betona kıyasla çelişkili olarak çok daha düşük su/toz oranlarında üretilmesinden de kaynaklanabileceği düşünülebilir. Bu bakımdan çalışmalar sonucu elde edilen veriler tartışmaya açıktır.

Bu konuda benzer araştırmalar yapan Bentz (2006), kalker tozu katkısının çimento hidratasyonunu üzerine etkisi araştırmış ve CEMHYD3D programını kullanarak bazı

bilgisayar simülasyonları ve modellemeler oluşturmuştur. Bu modellemelerde hidrasyon derecesi, mikro yapı ve dayanım gelişimi zamanın fonksiyonu olarak modellenmiştir. (CEMHYD3D) programı kalker katkısının etkileri dikkate alınarak yeniden geliştirilmiştir. %20 oranına kadar kalker tozu ikamesinin çimento hidrasyonuna etkileri farklı su/çimento (S/Ç) oranları için incelendiğinde, özellikle S/Ç oranının kalker tozunun etkinliğini göstermesinde kritik olduğu tespit edilmiştir. S/Ç oranı 0,4'ün altındaki karışımlarda kalker katkısı hidrasyonu tetikleyici, hızlandırıcı etki gösterirken, yüksek S/Ç oranlarında etkinliğini yitirmektedir.

Rahhal and Tolero (2005), ince öğütülmüş kalker ve kuvars tozunun, farklı kompozisyonlara sahip Portland çimentolarına karıştırılarak kullanılması durumunda, erken yaşlarda hidrasyon mekanizmasına etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla kalorimetre, hidrolik aktivite (Fratini deneyi) ve XRD analizleri yapılmıştır. Her iki inert katkı ilavesinin de farklı çimento kompozisyonlarında şiddeti değişmekle beraber, hidrasyonu aktive edici veya yavaşlatıcı etki gösterdiklerini tespit edilmiştir. Deneylerde özellikle C₃A içeriği yüksek çimento kullanıldığında, her iki filler için de hidrasyon reaksiyonlarının hızlandığı, bu fillerlerin ilavesinin hidrasyon ürünlerinin daha hızlı oluşmasına olanak sağlayan çekirdek noktalar olarak görev aldığı belirlenmiştir. Ancak C₃A içeriği düşük çimentolarda ise, her iki filler ilavesinin de hidrasyonu geciktirdiği saptanmıştır.

e. Basınç Dayanımı

Kalkerin basınç dayanımına doğrudan bir katkısı bulunmamaktadır. Yalnızca dolgu yapıcı vazifesi bulunmaktadır. Puzolanik bir özelliğinin olmadığı varsayılır (Rahhal and Tolero 2005). Kalker katkısının %5 oranında kullanımı halinde hidrasyonu hızlandırıcı dolaylı etkisi ile erken dayanımı arttırabildiği bilinmektedir. Ancak daha yüksek oranda kullanımlarında basınç dayanımını düşürücü etki yapar (Rahhal and Tolero 2005; Sezer 2007).

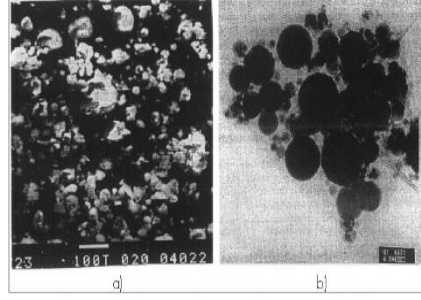
2.1.3.d. Silis dumanı katkılı çimentolar

Silis dumanı, silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO_2 gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO_2 olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen tamamını oluşturur.

Araştırmalarda ve pratikte kullanılan silis dumanları genellikle %75 ve yukarı oranlarda ferrosilisyum içeren alaşımlardan oluşmaktadır. Daha düşük oranlı silis dumanlarının kullanımı hakkında detaylı bir veri bulunmamaktadır.

Silis dumanı; elde edildiği gibi, sulandırılmış olarak, sıkıştırılmış olarak veya topak halinde piyasada yer almaktadır. Elde edildikten sonra çimento, uçucu kül gibi dökme olarak veya torbalar içinde kullanılmaya imkân tanımaktadır. Örneğin; Etibank Antalya tesislerinde zaman zaman 80x80x140 cm boyutlarında bez torbalar kullanılmıştır. Çok ince taneli oluşu ve gevşek birim ağırlığının azlığı sebebiyle ile taşıma, depolama ve harmanlama gibi işlemlerde ayrıca bir özen ister. Bunun yanı sıra boşaltma sırasında toz halinde etrafa kolayca yayıldığından dolayı bu gibi sorunların önüne geçmek için silis dumanı su ile karıştırılarak bir bulamaç halinde de piyasaya sürülebilir.

Ferrosilisyum endüstrisinde çalışan işçilerle ilgili bazı sağlık tüzüklerinde silis dumanını sağlığa zararlı maddeler arasında yer almaktadır. Ancak, silis dumanının çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılması sırasında çalışanların sağlığı üzerinde herhangi olumsuz bir etkisi gözlenmemiştir. Yine de çok ince taneli silis içeren bu madde ile çalışılan yerlerde solunan havada tozlanmanın en aza indirilmesi ve çalışanların gerekli koruyucu önlemleri alması tavsiye edilmektedir (ACI Committee 234 2000).



Şekil 2.28. Silis dumanının çeşitli mikroskoplarla çekilmiş resimleri (Yeğınobalı 2009)

a. Silis Dumanının Çimento Hamuru Üzerindeki Etkileri

Silis dumanı katılan çimento hamurunda belirli bir kıvam için gerekli su ihtiyacı, yapışkanlık, viskosite, terleme ve özellikle agrega ara yüzeyindeki içyapıda değişiklik olur ve bu değişiklikler, taze ve sertleşmiş betonun bazı özellikleri üzerinde de etkilidir.

Su İhtiyacı ve Kıvam

Çok ince ve yuvarlak silis dumanı taneleri daha iri çimento tanelerinin arasına girerek burada sıkışan suyu dışarı iterler ve taze hamurun kıvamı üzerinde etkili hale getirirler. Bu olumlu etkiye karşın silis dumanı tanelerinin oluşturduğu büyük yüzey alanı su ihtiyacını arttıracak ve kıvamı olumsuz etkileyecektir. Dolayısı ile sonuç hamurdaki çimento ve silis dumanı miktarları ile su/ bağlayıcı malzeme (s/b) orantısı gibi faktörlere bağlı olarak değişebilecektir.

Yapılan çalışmalarda çimentonun %5'i kadar katılan silis dumanı su ihtiyacını fazla etkilememekte, daha büyük miktarlarda ise su ihtiyacı artmaktadır (Khayat and Aitcin 1992). Benzer şekilde, çimentonun %7,5'dan fazlası yerine silis dumanı katıldığında hamurun akma sınırı ve viskositesinin arttığı, daha az miktarlarda ise azaldığı saptanmıştır (Ivanov and Roshavelov 1990).

Bağlayıcı malzeme taneleri arasında temasın artması ve iç terlemenin azalması gösterdiklerinden dolayı yüksek dozajlı veya düşük s/ç orantılı hamurlara katılan silis dumanı yapışkanlığı arttırmaktadır.

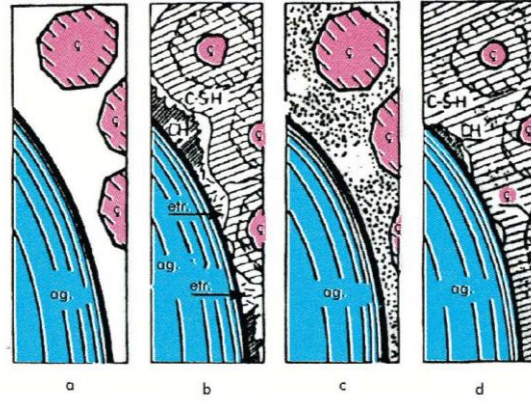
Hamur-agrega arayüzeyi

Araştırmacılar beton dayanımı üzerindeki olumlu etkisini daha ziyade agrega-hamur ara yüzeyini kuvvetlendirmesine, silis dumanı katkısına bağlamaktadırlar. Bazı araştırmacılara göre çimentonun %15'i yerine katıldığında ortalama her çimento tanesine karşın iki milyon silis dumanı tanesi girmektedir (Mindess 1988; Detwiler 1990; Cohen *et al.* 1990). İnce silis dumanı taneleri ara yüzeydeki boşlukları doldurmakta, terleme azaldığı için agrega taneleri altında daha az su toplanmakta ve daha yapışkan hale gelen hamur ile agrega taneleri arasındaki fiziksel aderans artmaktadır. Sellevold, çok ince taneli mineral katkıları -kalker tozu dâhil- çimentonun ilk yaşlardaki hidratasyonunu hızlandırdığını söylemektedir (Sellevold 1987). Bunun yanı sıra bu tür ince taneler CH kristalleri için de daha fazla sayıda çekirdeklenme noktası sağladıklarından ara yüzeydeki iri CH kristalleri yerine daha küçükleri meydana gelmektedir.

Şekil 2.29'de katkısız ve silis dumanı katkılı hamurların agrega ile olan ara yüzeylere yer verilmiştir (Khayat and Aitcin 1992).

- a) Katkısız tane hamurdaki ara yüzeyi işaret etmektedir. Çimento taneleri (ç) arasında su ile dolu boşluklar gözlemlenmiştir.
- b) Aynı ara yüzey sertleştikten sonra kaydedilmiştir. C-S-H ve CH kristalleri, kısmen etrenjit (etr.) içeren boşluklar gözlenmektedir.

Ayrıca şeklin; c) ve d) bölümlerinde ise silis dumanı katkılı taze ve sertleşmiş hamurlardaki duruma yer verilmiş olup; burada silis dumanı (SD) taneleri boşlukların doldurmakta, CH kristallerini küçültmektedir. Ayrıca ek puzolanik C-S-H jeli de oluşarak boşlukları azaltmakta, dayanımı arttırmaktadır.



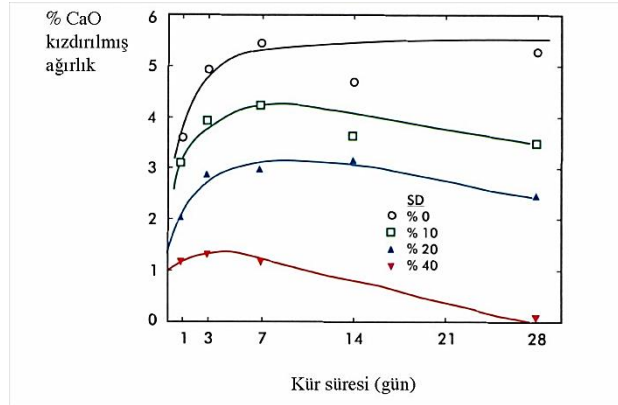
Şekil 2.29. Silis dumanının ara yüze etkisi (Khayat and Aitcin 1992)

Puzolanik Reaksiyonlar

Silis dumanı, çok ince taneleri ve yüksek amorf silis içeriği nedeni ile çimento hamurundaki CH ile reaksiyona girerek puzolanik C-S-H jeli meydana getirirler.

Araştırmacılara göre silis dumanı katkılı hamurdaki puzolanik jel normal olarak meydana gelmekte olan C-S-H jelinin boşlukları içinde yer almakta ve neticede çok yoğun bir jel yapısı oluşmaktadır (Grutzeck *et al.* 1982). Diğer bir çalışmadan elde edilen verilere Şekil 2.30’da yer verilmiştir. S/Ç oranı 0.23 olan bir hamurda CH tüketimi silis dumanı miktarına bağlı olarak artmakta iken, %40 katkı oranı ile 28 günde tüm CH tüketilmektedir (ACI Committee 234 2000).

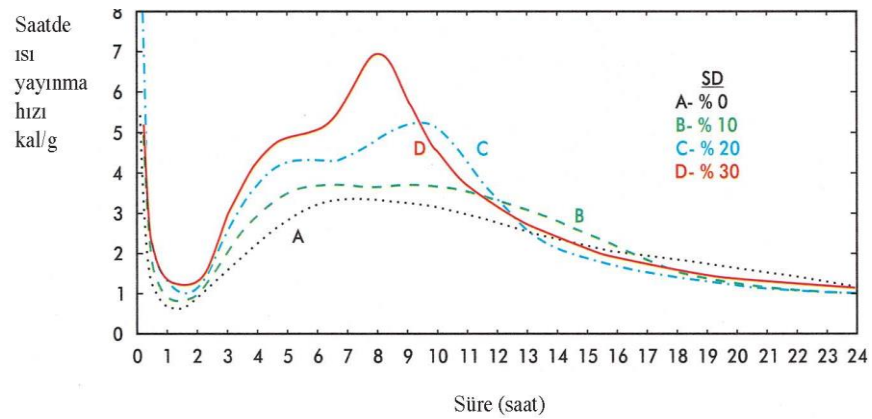
Huang ve Feldman’a göre de; silis dumanı ilk 8 saat içerisinde hidrasyonu hızlandırıp daha fazla CH açığa çıkarmasına karşın daha sonra CH’nin etkin bir şekilde bağlanmasını sağlamaktadır (Huang and Feldman 1985). Silis dumanlarında düşük alkali ve yüksek silika miktarları puzolanik aktiviteyi arttırmaktadır.



Şekil 2.30. Silis Dumanlı Hamurlarda CH Miktarı (%CaO) (Khayat and Aitcin 1992)

Hidratasyon Isısı

Çimentonun belirli bir miktarı yerine katılan puzolanlar hamurda ortama salınan hidratasyon ısını azaltırlarken, silis dumanı katıldığında ise durum başlangıçtan biraz farklı gösterebilmektedir. Yapılan çalışmalara göre silis dumanı katkısının ilk 2-3 saat içinde hidratasyon ısını arttırdığını, fakat ileri yaşlarda eşit çimento dozajı bazında açığa çıkan ısıyı azalttığı bulguları elde edilmiştir. Başlangıçtaki ısı artışı silis dumanının çimento hidratasyonunu hızlandırması ile açıklanmaktadır (Sellevold *et al.* 1982; Meland 1983; Bentur and Goldman 1989).



Şekil 2.31. Silis dumanı katkılı hamurlarda hidratasyon ısı (Huang and Feldman 1985)

Şekil 2.31'deki ısı yayınma eğrilerindeki pikler 5.saat civarında C_3S hidratasyonu, 6-10 saatları arasında da aluminatların hidratasyonu veya puzolanik reaksiyonlarla alakalıdır. Katkı miktarı arttıkça birinci pik daha erken oluşmaya başlarken şiddeti de artmaktadır. Silis dumanı yüzdesi arttıkça ikinci pikin de şiddeti ve bununla birlikte çimento bazında da ısı yayınma hızı artmaktadır. Süre ilerledikçe katkılı hamurlar katkısızla aynı veya daha az ısı yayınlamaktadırlar (Huang and Feldman 1985).

Silis dumanı katkısının hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi çimentonun ne kadarına katıldığına ve akışkanlaştırıcı kullanıma durumlarına bağlı olarak da değişiklik göstermektedir. Silis dumanı katkısının betonda sadece hidratasyon ısını azaltmak amacı ile kullanılması önerilmemektedir (Malhotra 1993).

Priz Süreleri

Silis dumanı katkısı priz zamanını geciktirici etki yapar. Silis Dumanı %10 mertebesinde katıldığında etkisi ortaya çıkmaktadır. Kullanılan akışkanlaştırıcı katkıları da priz geciktirici etkiler yapabilmektedirler (Khayat and Aitcin1992).

Jel Gözenek Suyu

Silis dumanı katkısı arttıkça hidratasyon ürünlerindeki Ca/Si oranı azalır ve C-S-H jeli daha fazla alkali ve aluminat bağlayarak jel gözenek suyu içindeki alkalilerin azalmasına sebep olur. Bunun yanı sıra CH 'nin de silis dumanı tarafından bağlanması sonucu ortamın pH değerinde düşüş gözlenir (Diamond 1983). Ancak Bu düşüş korozyon olayını tetikleyecek kadar etkili değildir. Ayrıca silis dumanının geçirgenliği azaltmasından dolayı korozyon riskini dengelemeye katkı sağlamaktadır.

Çimento Tipi İle İlişki

Silis dumanı etkisi özellikle alit fazı hidratasyonunu hızlandırıp C-S-H jellerini artırdığından dolayı özellikle C₃S miktarı yüksek tipdeki çimentolarda daha fazla etki göstermektedir.

Diğer Mineral Katkılar İle İlişki

Silis dumanının uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi diğer mineral katkılarla ilişkisi irdelenmiştir. Silis dumanı diğer puzolanlar sebebiyle düşük ilk dayanımları yükseltmekte fayda sağlayabilir. Çimento hidratasyonu sırasında başlangıçta meydana gelen CH silis dumanı tarafından bağlanmakta, diğer puzolan(lar) da arta kalan CH ile reaksiyona girmektedir.

Uygun oranlar kullanıldığında takdirde silis dumanı ve mineral katkıları ile hem erken hem de ileri yaşlardaki dayanımları üzerine olumlu etkiler meydana gelmektedir (Malhotra and Carrette 1983; Brickely *et al.* 1991). Uçucu kül katkılı hamurlarda uzayan priz süreleri %8 oranında katılan silis dumanı ile biraz daha azalmaktadır (Temiz ve Yeğınobalı 1995).

Kimyasal Katkılar İle İlişki

Priz hızlandırıcı klor içermeyen katkıları ile kalsiyum nitrat gibi korozyon önleyiciler silis dumanı içeren hamur ve betonlarda normal şekilde kullanılabilmekte, etkilerinde farklılık gözlenmektedir. Hava sürükleyici katkıların ise dozajını bir miktar attırmaya ihtiyaç vardır.

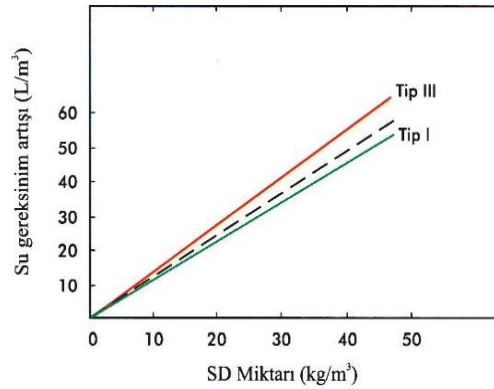
Silis dumanı genellikle süper akışkanlaştırıcı katkıları ile birlikte kullanılır. Bu katkı maddelerinin içerdiği polimer molekül zincirleri çimento tanelerinin yüzeyinde adsorbe olurlar. Kimyasal katkıları çimento tanelerinin birbirlerini iterek hamur içinde kolayca

dağılmasını sağladıkları gibi aynı kıvam için gerekli karışım suyunu azaltırlar (ACI Committee 234 2000).

b. Silis Dumanı Katkısının Taze Beton Özelliklerine Etkisi

Su İhtiyacı, İşlenebilme ve Çökme Kaybı

Bölüm 3.1’de bahsedildiği gibi çimentonun %5’i gibi az miktarlarda katılan silis dumanı çimento hamurunun kıvamı ve bunun yanı sıra betonun işlenebilmesi üzerine fazla bir etki yapamamaktadır. Ancak daha yüksek katkı oranlarında belirli bir işlenebilme düzeyi için gerekli su miktarı silis dumanı miktarı ile birlikte doğru orantılı olarak artmaktadır (Şekil 2.32). Sellevold taze betonda kıvamı sabit tutmak için katılan her 1 kg silis dumanı için karışım suyunu 1 lt. arttırmak gerektiğini ifade etmektedir (Sellevold 1984). Ek su dayanımı azaltacağından silis dumanlı betonlarda akışkanlaştırıcı veya süperakışkanlaştırıcı katkı kullanılması ihtiyacı hasıl olmuştur. Katkı dozajı, katkının türüne, silis dumanı miktarına ve istenilen su/ bağlayıcı oranısına bağlı olarak değişmektedir.



Sekil 2.32. Silis dumanı katkısının betonda su ihtiyacına etkisi (Sellevold 1984)

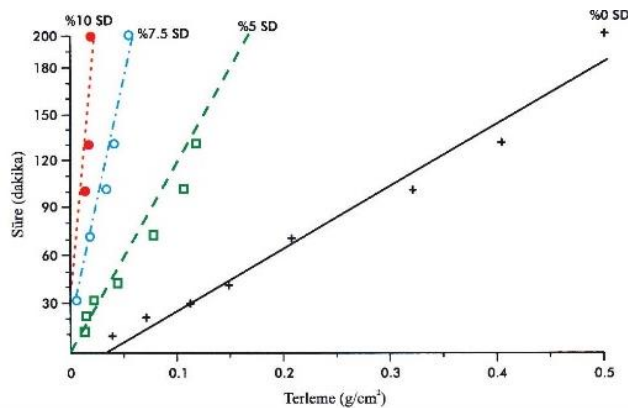
Silis dumanı içeren çimento hamuru daha yapışkan olduğundan taze betonda ayrışma olasılığı azalır. Fakat yüksek çökme değeri, kötü karışım hesabı, aşırı vibrasyon gibi betonda ayrışmaya sebep olabilecek etkenler yine geçerlidir. Ayrıca yüksek dozda silis

dumanı kullanıldığında artan yapışkanlık işlenebilmeyi de güçleştirmektedir. Bu tür betonlarda başlangıç çökme değerinin normal betonunkinden 5 cm daha fazla olması tavsiye edilmektedir (Jahren 1983).

Silis dumanlı betonlarda kullanılan akışkanlaştırıcı veya süper akışkanlaştırıcı katkıları farklı miktarlarda çökme kaybına sebep olabilirler. Bunda katkı ve çimento türlerinin de etkisi olduğundan kullanılacak malzeme ile önceden deneme karışımı yapılması ve çökme kaybının saptanması tavsiye edilmektedir (ACI Committee 234 2000). Alınabilecek önlemler arasında katkı türünün ve beton karışımına giriş zamanının doğru seçimi ve ilk çökme değerinin yüksek tutulması yer almaktadır (Yeğinobalı 1997).

Terleme ve Plastik Rötre

Taze beton içindeki serbest suyun önemli bölümünü, silis dumanı tanelerinin büyük yüzey alanları bağlar. Bunun yanı sıra bu taneler boşluk ve gözenekleri doldurarak suyun beton yüzeyine çıkışını yavaşlatmaktadır. Netice itibarıyla silis dumanı katkılı betonlarda terleme katkı miktarı ile orantılı olarak önemli miktarda azalır (Şekil 2.33) (Bürge 1983; ACI Committee 234 1992).



Şekil 2.33. Silis dumanının betonda terlemeye etkisi (Bürge1983; ACI Committee 234 1992).

Ortamlarda plastik büzülmeden dolayı çatlama riskini; Silis dumanı katılmış betonlarda terlemenin çok azalması ya da hiç meydana gelmemesi özellikle beton yüzeyinden buharlaşmanın fazla olduması arttırır. Çatlakların oluşması priz başlangıcına kadar devam edebilir ve bu süre içinde beton yüzeyinin k r ne  zen gösterilmesi veya beton yüzeyinin örtülerek buharlaşmanın önlenmesi faydalı olur (ACI Committee 234 1992).

Priz Süreleri

Bölüm 3.4’de bahsi geçen şekliyle silis dumanı katkısı  imento hamurunda priz sürelerini uzatır ve bu etki taze betonda da gözlenmektedir. Ayrıca betonda kullanılan süper akışkanlaştırıcı katkıların da priz süreleri üzerinde etkileri mevcuttur. Örneğin,  imentonun %15’i yerine silis dumanı katılmış ve süper akışkanlaştırıcı kullanılmış betonlarda priz başlangıç ve bitiş sürelerinde sırası ile 1 ve 2 saatlik uzamalar tespit edilmiştir (Khayat and Aitcin 1992). Diğer taraftan, daha önce bahsedildiği gibi aktivitesi daha az olan puzolanların neden olduğu priz gecikmeleri silis dumanı il vesi ile kısmen tolere edilebilmektedir.

Renk

Silis dumanı içeren taze ve sertleşmiş betonların rengi diğerlerine kıyasla daha koyudur ve bu koyuluk değeri silis dumanının ve içerdiği karbonun miktarı ile artar. Beton yaşlandıkça bu renk farkının ortadan kalkabileceğine işaret etmektedir (Gj rv and L land 1982).

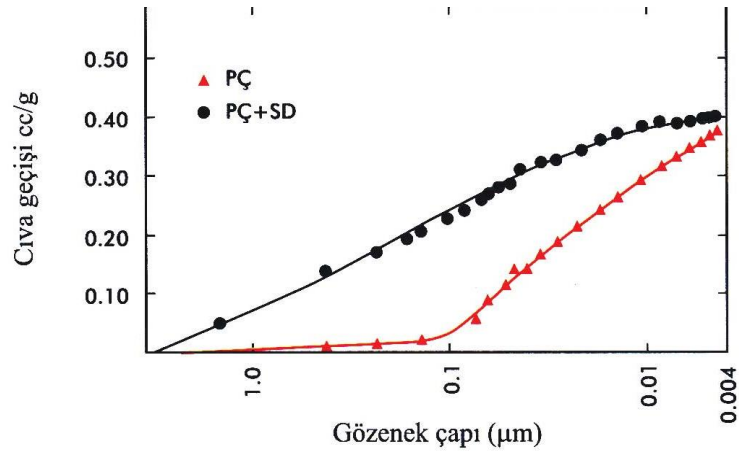
Birim Ağırlık

Silis dumanının özgül ağırlığı  imento ve agregaya kıyasla daha azdır ve bu sebeple de beton birim ağırlığında biraz azalma olabilir. Fakat silis dumanlı betonlarda diğer malzeme miktarları da değişeceğinden genellikle önemli bir ağırlık farkı mevzu bahis değildir (ACI Committee 234 2000).

c. Silis Dumanı Katkısının Sertleşmiş Betonun Özelliklerine Etkileri

Gözeneklilik, Geçirgenlik ve Su Emme

Cıvalı porozimetre ile yapılan deneyler silis dumanı katkısının sertleşmiş çimento hamur ve harçlarında iri gözenekleri azaltarak daha fazla sayıda küçük gözenek oluşturduğunu ve gözeneklerin daha homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir (Şekil 2.34). Ancak içyapıdaki toplam gözeneklilikte fark yoktur. Homojen yapı küçük gözeneklerdeki suyun daha yavaş ve kontrollü olarak buharlaşması ile bağdaştırılacaktır (Mehta and Gjörv 1982; Bentur *et al.* 1988).



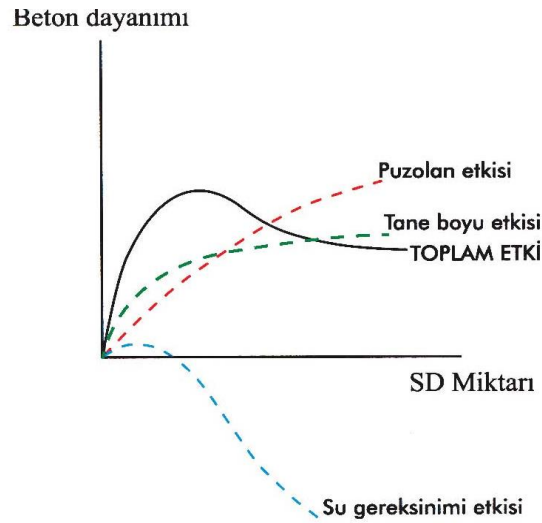
Şekil 2.34 Sertleşmiş çimento hamurunda gözenek dağılımı (Mehta and Gjörv 1982)

Silis dumanı katkısı kılcal boşlukları küçülterek süreksiz hale getirdiği için betonda geçirgenliği azaltır. Örneğin, çimento hamurunda 3.8×10^{-13} m/s olarak ölçülen su geçirgenliği %10 ve %20 miktarlarında silis dumanı katıldığında sırası ile 0.9×10^{-13} m/s ve $< 0.1 \times 10^{-13}$ m/s gibi değerlere düşmektedir (Hooton 1986).

Katkısız betonlara oranla silis dumanı katkılı betonların daha yavaş su emdiği belirtilmektedir (Sellevold and Nilsen 1987).

Agrega - Hamur Ara Yüzeyi

Sertleşmiş çimento hamuru ile agregası arasında yaklaşık 50 µm kalınlığındaki ara yüzey bölgesinin hidratasyonun başlamasından itibaren hamurun diğer bölgelerinden daha farklı bir yapı ile oluştuğu saptanmıştır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve özellikle silis dumanı katkıları bu bölgenin morfolojisini olumlu yönde değiştirerek beton dayanımının artmasına yarar sağlar. Silis dumanı katkısı ile bölgenin kalınlığı azalır. Bölgedeki CH kristalleri küçülür, eğimleri değişir, gözeneklilik azalır ve buradaki hamurun içyapısı zamanla diğer bölgelerdekine benzemeye başlar.



Şekil 2.35. Silis dumanının beton dayanımına etkisi (Jahren 1983)

Basınç Dayanımı

Silis dumanı katkısının beton dayanımına olan etkisi şekil 2.35'deki gibi açıklanabilir. Diğer puzolanlar gibi yeni C-S-H jelleri oluşmasını sağlamaları dolayısıyla ince silis dumanı taneleri agregası-hamur ara yüzey bölgesini sıkılayıp kuvvetlendirerek beton dayanımını arttırmalarının yanı sıra belirli bir işlenebilirlik için su ihtiyacını artırmaları gibi olumsuz etkileri de gözlemlenmiştir. Dolayısıyla betondaki optimum silis dumanı miktarı bu etkilerin göreceli değerlerine bağlı olacak ve çimento, agregası, akışkanlaştırıcı katkı tip ve miktarları ile bakım koşulları gibi klasik faktörlerden de etkilenecektir.

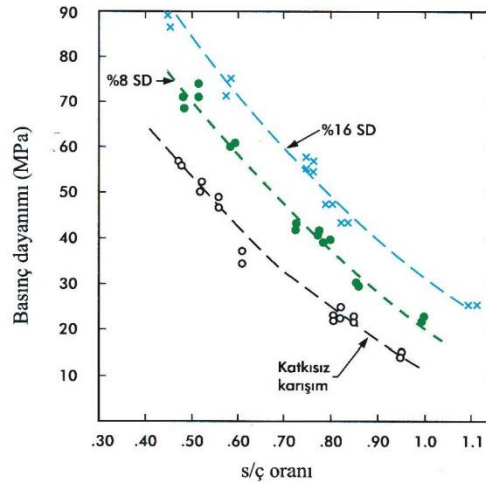
(Jahren 1983). Bazı araştırmacılara silis dumanı katkısının beton dayanımına olan olumlu etkisi agrega-hamur ara yüzeyinin kuvvetlenmesinden dolayı olduğunu savunmaktadır. Zira aynı çimento/silis dumanı orantısında silis dumanı katkılı ve katkısız çimento hamurlarının dayanımları arasında belirgin bir fark tespit edilmemiştir (Bentur *et al.* 1988; Goldman and Bentur 1989). Öte yandan, en önemli etken daha sıkı ve kaliteli bir çimento hamuru oluşması olduğu da iddia edilmektedir (Cong *et al.* 1992).

Puzolanik katkıların beton özellikleri üzerindeki etkilerini kıyaslamak için geliştirilen bir eşdeğerlik faktörü K, aşağıdaki gibi belirtilmektedir (Sellevold and Radjy 1983).

$$(s/\phi)P - (s/\phi) \\ K = P/\phi (s/\phi)$$

Bu faktör katkısız bir beton karışımının (s/ç) orantısı ile aynı yaşta, aynı beton özelliğini (örneğin dayanımını) sağlayan katkılı bir betonun (s/ç)P orantısı ve katkılı dozajı, p kullanılarak hesaplanmaktadır ve bu faktöre göre silis dumanının olumlu etkisi diğer puzolanlarınkinden daha çoktur. Örneğin, silis dumanı ile K faktörü 7 ve 28 günlük dayanımlar bazında 2-5 arası değerler alabilmekte, diğer bir ifadeyle 1 kg silis dumanı bu yönden 2-5 kg çimentoya eşdeğer olduğu ifade edilmektedir. Uçucu küllerde ise K değeri 90 günlük dayanımlarda ancak 1 değerine ulaşabilmektedir (Malhotra 1983).

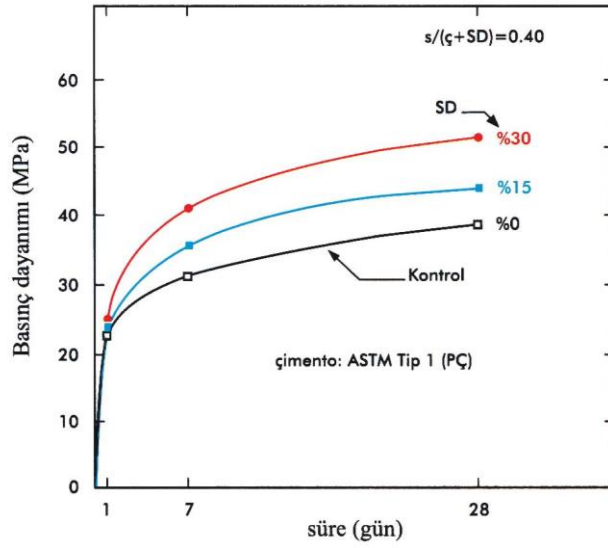
Şekil 2.36'ya göre belirli miktarda silis dumanı içeren betonlar içinde, akışkanlaştırıcı katkılardan bağımsız olarak, s/ç orantısı-dayanım ilişkisi geçerlidir.



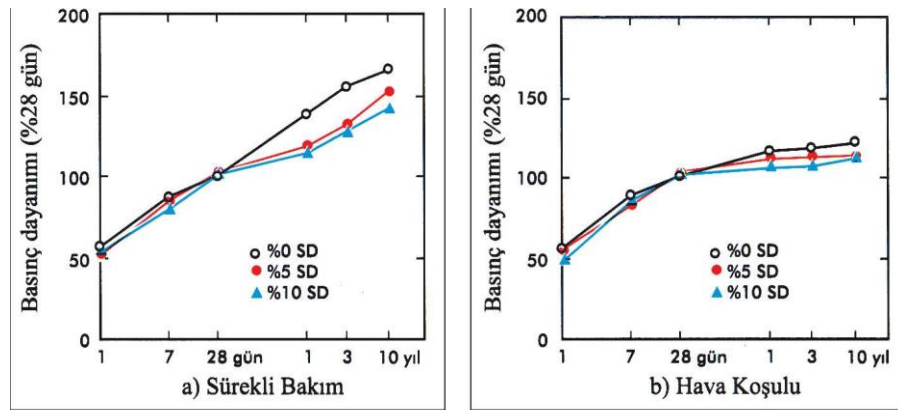
Şekil 2.36 Betonlarda s/ç oranı-dayanım ilişkisi (Sellevold and Radjy 1983)

Silis dumanının beton basınç dayanımına olumlu etkisi erken yaşlarda daha belirgin şekilde görülmektedir. Normal bakım koşullarında bu etki 3-28 gün arasında ortaya çıkar. Fakat s/b orantısını 0.40 civarına indirerek 1 günlük dayanımları dahi yükseltmek olasıdır (Khayat and Aitcin 1992). Şekil 2.32’de görüldüğü gibi süper akışkanlaştırıcı kullanıp s/b orantısını 0.40’da sabit tutarak dökülen betonlarda çimentonun %30’una kadar varan miktarlarda katılan silis dumanı ilk bir kaç günden itibaren dayanımları arttırdıkları belirlenmiştir (Malhotra *et al.* 1987). İleri yaşlarda olumlu etki azalmakta olup bazı araştırmacılar silis dumanlı betonlarda dayanım 90. günden sonra düşebilmekte olduğunu ifade etmektedirler (Carette *et al.* 1987). Öte yandan, 4-6 yıl sonra dahi dayanımlarda azalma olmadığını belirtenler de bulunmaktadır (Aitcin and Laplante 1990).

Diğer puzolanlarda olduğu gibi silis dumanının olumlu etkileri iyi bakım koşulları ile daha da geliştirilebilmektedir (Şekil 2.38). Şekilden ortaya çıkan diğer bir konu da bakım yapılsa dahi silis dumanı katkısının betonlarda 28 günden sonraki dayanımları azaltmasıdır (Maage *et al.* 1990). Tüm silis dumanlı betonlar için geçerliliği tartışmalı olan bu davranışa diğer puzolan katkılı betonlarda görülmemektedir. Maage silis dumanının puzolanik reaksiyonu bazı uçucu küllerinki kadar sıcaklığa duyarlı olmadığına değinmiştir (Maage 1986).

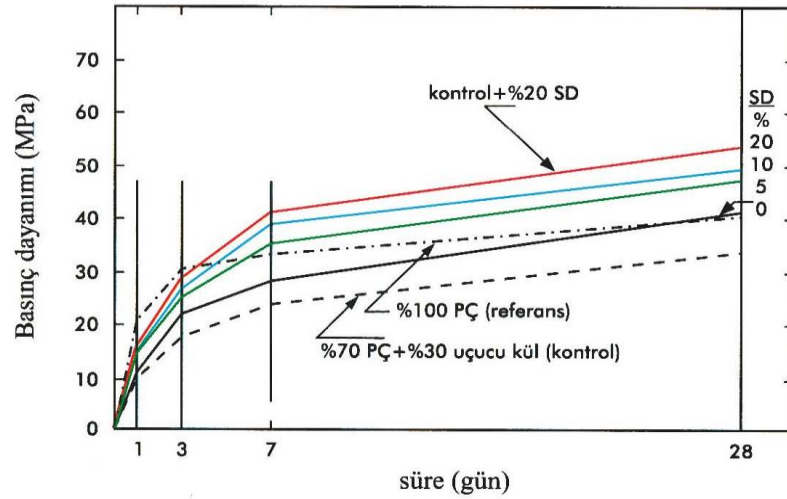


Şekil 2.37. Silis dumanı katksının beton basınç dayanımına etkisi (Malhotra and Carrette 1983)



Şekil 2.38. Silis dumanlı betonlarda dayanım artışı (Maage *et al.* 1990)

Puzolan katkılı çimento ve betonların yavaş dayanım kazanmaları silis dumanı katkısı ile dengelenebilmektedir (Carrette and Malhotra 1983; Türker 1993; Temiz ve Yeğinoğlu 1995). Şekil 2.39’da %30 uçucu kül içeren bir betona silis dumanı katılmasının olumlu etkiler gözlemlenmiştir.



Şekil 2.39. Uçucu küllü betonun dayanımı üzerinde silis dumanının etkisi (Maage 1986)

Betonun 28 günlük dayanımını arttırmayı hedefleyen çalışmalarda silis dumanının genellikle çimentonun %5-%20'si oranlarında betona katıldığı ve gerekli işlenebilmeyi sağlamak için %10'dan yukarı miktarların süper akışkanlaştırıcı katkılarla birlikte kullanıldığı gözlenmektedir. Yüksek dayanımlı betonlarda silis dumanı çimentonun ağırlıkça yaklaşık %15 lik kısmının yerine kullanılmalıdır. Bu betonlarda çimento dozajını 400-500 kg/m³ sınırının üstüne çıkarmak veya s/b orantısını 0.30'un altına indirmek gibi aşırı yüklemelerin herhangi bir faydası yoktur (Yogendran *et al* 1987; Goldman and Bentur 1989).

Silis dumanı katkısı yüksek dayanımlı hafif beton üretiminde de faydalı olmaktadır. Genleşmiş kil agregası kullanarak ve %20 silis dumanı ile birim ağırlığı 1735 kg/m³'ü geçmeyen, basınç dayanımı 100 MPa'a ulaşan betonlar oluşturulmuştur (Zhang and Gjörv 1991). Doğal hafif agregalarla yapılan bir karışımda ise %15 silis dumanı katkısı ile birim ağırlığı 2000 kg/m³, basınç dayanımı 50 MPa civarında olan betonlar olduğu tespit edilmiştir (Yeğinobalı 1997).

Çekme ve Eğilme Dayanımları

Silis dumanı katkılı betonlarda çekme veya eğilme dayanımlarının basınç dayanımına oranı katkısız betonlarına yakın özellikler göstermektedir. Basınç dayanımı arttıkça çekme ve eğilme dayanımları da doğru orantılı olarak artar, fakat bunun yanı sıra artış hızı giderek yavaşlar (Johansen 1983; Goldman 1987). Silis dumanı miktarındaki artış veya süper akışkanlaştırıcı kullanımı eğilme-basınç dayanımları orantısının katkısız betonlarındakinden daha küçük olmasına neden olmaktadır (Khayat and Aitcin 1992).

Aderans

Silis dumanlı betonlarda iç terleme azaldığından dolayı agregâ alt yüzeylerinde olduğu gibi çelik donatı çubuklarının altında da su birikimi ve boşluk oluşumu azalır. Ayrıca, daha sıkı ve yapışkan olan taze beton, agregâyı, donatı çubuklarını ve betonun temasta bulunduğu diğer malzemeyi daha kuvvetli olarak kendine bağlar, aradaki aderans güçlenir.

Değişken tip agregâlar ve %5'den %30'a kadar silis dumanı katkısı içeren betonlarda hamur-agrega arasındaki aderansın kuvvetlendiği çok sayıda araştırmacı tarafından dile getirilmiştir. En az %5 silis dumanı katkısı ara yüzeyindeki kırılma enerjisini önemli ölçüde artış olmaktadır (Chen and Zhang 1986; Wang *et al.* 1986).

Silis dumanlı betonlarda çelik donatıya olan aderans artmaktadır. Ezeldin ve Balaguru, %20 oranına kadar katılan silis dumanı ile donatı aderansı beton basınç dayanımının karekökü ile orantılı olarak artmakta olduğunu ifade etmişlerdir (Ezeldin ve Balaguru 1989). Gjörv *et al.* ise %16'ya kadar silis dumanı katkılı betonlarda nervürlü çubuklara olan aderansın katkı miktarı ve basınç dayanımı ile birlikte arttığını ifade etmişlerdir (Gjörv *et al.* 1990). Aderans artışı %20'nin üzerindeki katkı miktarları ile daha belirgin bir hal alır (Bürge 1983; Khayat and Aitcin 1992). Hafif agregâlı betonlarda da silis dumanı katkı miktarına bağlı olarak donatı aderansını 3-5 kat artış sağlayabilmektedir (Bürge 1983; Robins and Austin 1986).

Arayüzey bölgelerindeki iyileşme silis dumanlı betonların diğer betonlara ve metal levha gibi diğer malzemeye daha kuvvetli yapışması yoluyla da ortaya çıkmaktadır (Sellevold and Nilsen 1987; Johansen and Dahl 1983; Chen and Zhang 1986). Silis dumanlı hamurlarda karbon veya çelik liflere olan aderans da kuvvetlenmektedir. Fakat artan gevreklik sebebiyle ile lif tamamen sıyrılmadan önce hamurun çatlaması ihtimali söz konusudur (Khayat and Aitcin 1992).

Darbeye Karşı Dayanıklılık

Silis dumanı katkılı betonların dinamik yüklere karşı direncini belirlemek için yapılan bir çalışmada %25'e kadar silis dumanı katkısı içeren beton numuneler belirli yükseklikten düşen bir kütlenin ard arda darbelerinin etkisine bırakılmış, ağırlık kayıpları ve ultrasonik puls geçiş hızları ölçülerek katkısız beton değerleri ile kıyaslamalar yapılmıştır. Netice de özellikle %10-15 katkı oranları betonun darbeye karşı direncini artmakta olduğu saptanmıştır (Ekinci ve Yeğinoğlu 1996).

Elastisite Modülü

Katkısız betonlara göre daha yavaş artış göstermekte olan bu betonun elastisite modülü dayanımla birlikte artar. Bazı araştırmacılar normal ve silis dumanlı betonlarda gerilme-birim deformasyon ilişkisi veya aynı dayanımdaki elastisite modülü fazla farklılık göstermediğini ifade etmektedirler (Helland and 1983; Løland 1983; Luther and Hansen 1989). Bir başka araştırmacı grup ise silis dumanı katkısının elastisite modülünü arttıracığını ancak bu artışın dayanımdaki artış kadar fazla olmayacağını iddia etmişlerdir (Bürge 1983; Khayat and Aitcin 1992).

Poisson Orantısı

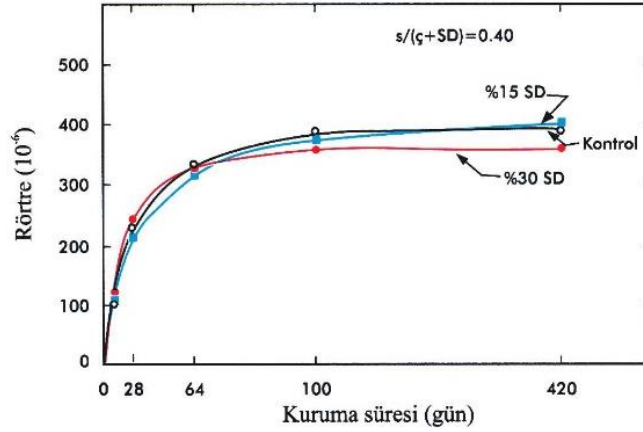
Araştırmalar silis dumanı içeren yüksek dayanımlı betonlarda dayanım 92-113 MPa arasında değişirken Poisson Orantısı da 0.21-0.26 arasında değiştiğini saptamışlardır

(Wolsiefer 1984; Saucier 1984). Normal betonlarla arada belirgin bir davranış farkının olmadığı tespit edilmiştir.

Kuruma Rötresi

Silis dumanlı betonlarda rötre, katkı miktarı, s/b orantısı ve ilk günlerdeki bakım koşullarının etkisi altında kalmakta ve bu etkenlere bağlı olarak elde edilen sonuçlar normal betonla elde edilenlerle kıyaslandığında farklı olabileceği gözlemlenmiştir. Katkı miktarı %10'dan az olduğunda rötre normal betonlardan farklı olmaz. Daha yüksek silis dumanı miktarları, s/b orantısının 0.60'dan büyük olması, yetersiz ıslak bakım ve ileri yaşlar kuruma rötresini göreceli olarak arttırmaktadır (Sellevold and Nilsen 1987; Khayat and Aitcin 1992; ACI Committee 234 2000).

İlk anda 28 gün süre ile bakım yapılmış betonlarda silis dumanı katkısının etkisinin belirginliği çok değildir (Şekil 2.40) (Carette and Malhotra 1983; Malhotra *et al* 1987). Yüksek dayanımlı silis dumanı katkılı betonlarda rötrenin aynı dayanımdaki normal betonlara kıyasla daha az olduğu saptanmıştır (Wolsiefer 1984; Hansen 1987; Luther and Hansen 1989). Bentur ve Goldman s/b orantısı 0.33 olan, çimentonun %13'ü yerine silis dumanı katılmış ve 28 gün suda kür edilmiş betonlarda rötrenin katkısız betona göre büyük ölçüde azaldığını ifade etmişlerdir. Ancak araştırmacılar eşit buharlaşan su miktarı bazında karşılaştırma yapıldığında daha küçük gözeneklerden su kaybının silis dumanlı betonlarda daha büyük rötre gerilme ve deformasyonlarına neden olması sonucuyla karşılaşılabılır (Bentur and Goldman 1989).



Şekil 2.40. Silis dumanlı betonlarda kuruma rötresi (Malhotra and Carrette 1983)

Sünme

Çimento yerine ağırlıkça %15-25 miktarlarında katıldığında silis dumanı 50-100 MPa dayanım sınıflarındaki betonların sünmesi üzerine fazla bir etkisi bulunmamaktadır (Saucier 1984; Buil and Acker 1985; Luther and Hansen 1989). Normal dayanımlı katkısız betonların sünmesi silis dumanıyla oluşturulan yüksek dayanımlı, düşük çimento/ bağlayıcı orantılı betonlarınlarınkinden daha fazladır (Tomaszewicz 1985; Smadi *et al* 1987). Her iki grup beton için 180 günlük sünme katsayısı olarak sırası ile 0.42 ve 2.60 gibi değerler saptanmıştır (Tachibana *et al.* 1990).

Genel Çimento Özellikleri ve Uygunlukları

Mekanik ve Fiziksel Özellikler

TS EN 197-1 çimentoları için uygun görülen mekanik ve fiziksel özellikler Çizelge 2.19’de “karakteristik” değerler olarak yer verilmiştir. Bunun yanı sıra 1997’den önceki çimento standartlarında yer alan tane inceliği ve priz bitiş süreleri ile ilgili sınırlamalar kalkmıştır. Buna ek olarak, 32.5 ve 42.5 dayanım sınıflarında 28 günlük dayanımlar için üst sınırla yer verilmiştir.

Çizelge 2.19. TS EN 197-1 çimentoları için uygun görülen mekanik ve fiziksel özellikler (TS EN 197-1)

Dayanım Sınıfı	Basınç Dayanımı (Mpa)				Priz Başlama Süresi (dk)	Genleşme (mm)
	Erken Dayanım		Standart Dayanım			
	2 Günlük	7 Günlük	28 Günlük			
32.5 N		≥16	≥32.5	≤52.5	≥75	≤10
32.5 R	≥10	-				
42.5 N	≥10	-	≥42.5	62.5	≥60	
42.5 R	≥20	-				
52.5 N	≥20	-	≥52.5	-	≥45	
52.5 R	≥30	-				
		TS EN 196-1			TS EN 196-3	

Kimyasal özellikler

TS EN 197-1 çimentoları için uygun görülen kimyasal özellikler çizelge 2.20’de “karakteristik” değerler olarak yer verilmiştir. Yine 1997’den önceki çimento standartlarında yer alan MgO kısıtlaması bu tabloda gösterilmektedir (Fakat klinker MgO içeriği için %5 sınırı belirtilmiştir). Bunun yanı sıra CEM IV, çimentolarının pozolanik özellik kriterini sağlamaları gerekmektedir. İlave açıklamalar standartdaki tablonun altındaki açıklamalarda yer almaktadır.

Çizelge 2.20. Gerekli Kimyasal özellikler için Karakteristik Değerler (Yeğinobalı 1993)

Özellik	Standart	Çimento Tipi	Dayanım Sınıfı	Özellikler
Kızdırma Kaybı	TS EN 196 - 2	CEM I CEM III	Hepsi İçin	$\leq \% 5.0$
Çözünmeyen Kalıntı	TS EN 196 - 2	CEM I CEM III	Hepsi İçin	$\leq \% 5.0$
Sülfat Miktarı (SO ₃ olarak) TS EN 196-2		CEM I CEM II CEM IV CEM V	32.5 N 32.5 N 42.5 N	$\leq \% 3.5$
		CEM III	42.5 N 52.5 N 52.5 N	$\leq \% 4.0$
Klorür İçeriği	TS EN 196 - 21	Hepsi İçin	Hepsi İçin	$\leq \% 0.10$
Puzolanik Özellik	TS EN 196 - 5	CEM VI	Hepsi İçin	Deneyi Sağlar
Hidratasyon Isısı	TS EN 196 - 8 veya TS EN 196 - 9	Hepsinde LH tipi için	Hepsi İçin	270 J/g en çok

2.1.3.e. Özel çimentolar

TS EN 197-1 Standartının kapsadığı genel kullanım amaçlı çimentoların dışındaki diğer çimentolar; gerek klinker üretimi sırasında, gerekse ilave edilen mineral katkıları sayesinde özel kullanım alanlarına hitap eden çimentolardır.

Özel çimentolar için mevcut standartlar aşağıda verilmiştir:

a. TS 10157 Sülfatlara Dayanıklı Çimentolar

C₃A (trikalsiyum alüminat) miktarı sınırlanmış (max. %5) olarak üretilen klinkerin; kalsiyum sülfat (CaSO₄) ile birlikte öğütülmesiyle oluşmaktadır. Sülfata dayanım özelliği puzzolan ve yüksek fırın cürufu ihtiva eden çimentolarda da gözlenmektedir. Bu özelliği kapsayan tüm çimento türlerini ihtiva eden bir standart oluşturulması için

CEN/TC/51; AB'nin Çimento ve Kireç Teknik Komitesi çalışmalarını devam ettirmektedir (TS 10157).

b. TS 21 Beyaz Portland Çimentosu

Özel nitelikli kil (renk verici oksitler ihtiva etmeyen) ile kireçtaşının birlikte pişirilmesiyle elde edilen beyaz klinkerin bir miktar kalsiyum sülfat (CaSO_4) ile birlikte öğütülmesiyle oluşmaktadır (TS 21).

c. TS EN 413-1 Harç Çimentosu (Çimento-Kâgirde Kullanım için)

Dayanım gelişmesi için gerekli Portland Çimentosu Klinkeri ihtiva eden; ince öğütülmüş hidrolik bağlayıcıdır. İlave bileşene gerek kalmadan sadece kum ve su ile karıştırılarak duvar, sıva ve kaplama işlerinde kullanıma uygun harç yapımı temin eder. Harç çimentosunun imalatını ve özelliklerini geliştirmek için öğütme kolaylaştırıcı, hava sürükleyici ajanlar gibi kimyasal katkıları eklenebilir (TS EN 413-1).

d. TS EN 197-4 Yüksek Fırın Cürufu Katkılı, Düşük Erken Dayanımlı Çimentolar

Genel Çimentoların (TS EN 197-1) hidratasyon reaksiyonlarına ve proseslerine sahip olmakla birlikte, bileşim, incelik ve bileşenlerinin reaktivitelerine bağlı olarak hidratasyon gelişimi daha yavaştır. Sınırlandırılmış hidratasyon ısısına sahip, yüksek fırın cürufu katkı ve erken dayanımı düşük olan çimento türüdür (TS EN 197-4).

e. TS EN 14216 Çok Düşük Hidratasyon Isılı Özel Çimentolar

Su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları ve prosesler nedeniyle priz alan ve sertleşen bir hamur oluşturan ve sertleşme sonrası suyun altında bile dayanımı ve kararlılığını muhafaza eden ve geliştiren, genel çimentoların hidratasyon reaksiyonlarına sahip bir çimento türüdür. Ancak; bileşim, incelik ve bileşenlerinin

reaktivitelerine bağılı olarak hidratasyon gelişimi daha yavaştır. Özellikle barajlar ve kütle beton uygulamaları için elverişlidir (TS EN 14216).

f. TS EN 14647 Kalsiyum Alüminat Çimentosu

Hızlı priz alan, yüksek sıcaklıktan dayanıklı olup; sülfatdirencine de uygundur. Bu çimento yüksek alünlü veya alüminyumlu çimento olarakta adlandırılmaktadır. Ama bileşeni mono kalsiyum alüminattır ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$). Genel çimentoların yerine geçecek şekilde kullanıma uygun olmayıp, hızlı sertleşme; sıcaklık; aşınma ve kimyasal etkilere direncin istendiği yerlerde kullanılması daha uygundur (TS EN 14647).

2.1.3.f. TS 13353 Borlu Aktif Belit (Bab) Çimentosu

Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu, bor cevheri olarak doğada bulunan bor mineralinin çimento hammaddesi olarak belirli bir oranda kullanılması ile oluşan ve bor oksit (B_2O_3) içeren bir çimento türüdür (TS 13353).

Borlu Aktif Belit (BAB) çimentosu üretimi ile ilgili çalışmalar 20. yüzyılın başlarında Amerika'da başlamıştır. Daha sonra bazı araştırmacılar tarafından laboratuvar ölçeğinde çalışmalar yapılmış ve bu çalışmaların ortak yanı; çimento hammaddesine belirli oranlarda katılan bor oksit (B_2O_3) ihtiva eden minerallerin, klinker oluşumunda sinterleşme sıcaklığını düşürerek enerji tasarrufu sağlandığını göstermesidir. Hidrolik bir bağlayıcı olan BAB Çimentosu, ince öğütülmüş inorganik bir malzeme olup su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları ile priz alan ve sertleşen bir pasta oluşturur. Bu çimento pastası hidratasyondan sonra oluşan kararlı hidrate fazlar sayesinde dayanım ve kararlılığını korur. Bu tanım TS EN 197-1'de yer alan çimento tanımına aynen uymaktadır (DSİ TB 2009).

Dünyada bor yataklarına sahip sayılı ülke bulunmaktadır. Bunların arasında Türkiye, dünya toplam rezervinin %72'sine topraklarında bulundururken; bu oranla da dünya sıralamasında ilk sırada yer almaktadır.

Bu konu tez çalışma konumuzun temelini teşkil ettiği için diğer özel çimento tiplerine göre daha detaylı incelenmiştir.

a. Bor Minerali

BAB Çimentosunun üretiminde kullanılan, bileşiminde belirli bir oranda bor oksit (B_2O_3) içeren ve çimento özelliklerini olumsuz yönde etkilemeyecek türdeki mineraldir.

Aslında Çimento üretiminde borun kullanılması (B_2O_3) yeni bir işlem değildir. Bazı araştırmacılar saf B_2O_3 kullanarak ürettikleri çimentonun özelliklerinde önemli sayılabilecek iyileşmeler sağlandığını belirlenmiştir. Bu yönde ülkemizde de çeşitli çalışmalar başlatılmış ve kolemanitin en uygun mineral olabileceği saptanmıştır.

b. Kolemanit

En önemli mineral kolemanit ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) olup; evaporitik (buharlaşmış) çökeltelerde mevcuttur. Boraks çökmesi sonucunda oluşan ikincil bir bor mineralidir ve su içeren bor zamanla sedimanlarla örtülmektedir. Su buharlaştıktan sonra geriye bor kalmakta ve bor ile boraks ve kolemanit gibi minerallerin oluşmasına neden olmaktadır. Kolemanit minerali içinde esas olarak yaklaşık %27,0 CaO, %42,0 B_2O_3 ve %6,5 SiO_2 bulunmaktadır. Uygun olduğu tespit edildiğinde kolemanit dışındaki diğer bazı bor minerallerinin de çimento üretiminde kullanılması mümkündür (TS 13353).

Ticari açıdan ve Türkiye’de bulunma bakımından önemli olan bor mineralleri; Boraks (Tinkal), Kernit, Üleksit, Kolemanit, Pandermit ve Hidroborasit’tir (Şekil2.41). Bunların arasında Kolemanit minerali ($Ca_2B_6O_{11}.5H_2O$) sadece Türkiye ve ABD’de bulunmaktadır. Kolemanit cevherinin kimyasal yapısında %28 CaO, %6,5 SiO_2 , %42 B_2O_3 ve %23,5 H_2O bulunmakta ve çimento üretimi için gerekli olan hammaddeleri de bünyesinde barındırmaktadır. Bu mineralde, çimento özelliklerini olumsuz yönde etkileyecek hiçbir kimyasal bileşen yoktur. Birçok bor minerali içerisinde alkaliler bulunmakta olup; bunlar çimento içinde istenmemektedir. Kolemanitin alkali

içermemesi de büyük bir rastlantıdır. Çimento hammaddelerinden en önemlisi olan kireçtaşı (CaCO_3), öncelikle CaO ihtiyacı için kullanılmaktadır ve 900°C 'un üzerindeki bir sıcaklıkta kalsine edilmesi gerekmektedir. Bu sıcaklıkta yapılan işlem neticesinde, belirli bir miktarda enerji kullanılmakta, aynı zamanda atmosfere çok yüksek oranda CO_2 gazı emisyonu yapılmaktadır. Kolemanit için kalsinasyon söz konusu değildir, zaten yapısında CaO bulunmakta ve çimento üretiminde herhangi bir ön-kalsinasyona tabi tutulmadan doğrudan kullanılabilir. Bileşiminde Kolemanit kullanılan çimentoda, kireçtaşı ve diğer bileşenler belirli oranlarda azaltılmaktadır (DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı 2009).



Şekil 2.41. Ticari açıdan en önemli ve en yaygın olarak kullanılan bor mineralleri

c. Bor Oksit ve Özellikleri

Bor oksit veya B_2O_3 sert ve camsı bir malzeme olup granüler bir yapıya sahiptir. Atmosfere açık olarak maruz bırakıldığında içindeki suyu absorbe eder ve Borik Asit'e (H_3BO_3) dönüşür. Su ile temas ettiğinde egzotermik olarak reaksiyon verir ve borik asit'e dönüşür. Suda çözünür, ancak bu çözünme borik asitten çok daha yavaş gerçekleşir. Yaklaşık 56,3 kg B_2O_3 'ün su ile reaksiyonu sonucunda 100 kg kadar borik

asit meydana gelir. B_2O_3 yaklaşık olarak erimeye başladığı sıcaklık $450^\circ C$ 'dir. Kolemanit ($2CaO_3 \cdot B_2O_3 \cdot 5H_2O$) ergime sıcaklığı ise $1050^\circ C$ 'dir. B_2O_3 cam endüstrisinde işlem sıcaklığını düşürmek üzere bir "flux" veya akışkanlaştırıcı gibi kullanılmaktadır. Burada flux kelimesinin anlamı ergime ve işlem sıcaklıklarını düşürmesi nedeniyle kullanılmaktadır. Ergiyen karışımın viskozitesini de düşürmektedir. Çimento üretimi esnasında döner fırında klinkerleşme sıcaklığını da $1450^\circ C$ 'den $1325^\circ C$ 'ye düşürmektedir. B_2O_3 ile üretilen borosilikatların aynı zamanda kimyasal olarak durabilitelerinin yüksek olduğu da literatürde belirtilmektedir (DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı 2009).

d. Bab Çimentosunun Tanımı

Bor katkılı çimento üretimi esnasında, döner fırının sıcaklığı $1450^\circ C$ 'nin üzerinde dahi olsa B_2O_3 nedeniyle C_3S fazı hiç oluşmamaktadır ve onun yerine C_2S 'in yüksek sıcaklık polimorflarından α ve/veya α' - C_2S kristal yapısına sahip oldukça aktif ve kararlı belit fazının oluşması sağlanmaktadır. Yapılan araştırma sonuçlarına göre bor oksit nedeniyle de çimentoda $1750^\circ C$ sıcaklıkta dahi C_3S oluşumu meydana gelememektedir. Bu nedenle, bu çimento "Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu" olarak adlandırılmaktadır (DSİ TAKK 2009).

e. BAB Çimentosunun Üretimi

Bor katkılı çimento, bir bor minerali olan Kolemanit'in borik asit üretiminde yüksek tenörlü kısmının Borik Asit üretiminde kullanılmasının ardından kalan düşük tenörlü kısmının, diğer çimento hammaddelerine (farin) ilâve olarak belirli bir miktarda kullanılması ile üretilmiştir. Bu değer nihai ürün içerisinde yaklaşık %2,5 B_2O_3 değerine tekabül etmektedir. Kolemanitin kullanım oranı gerçekte içindeki B_2O_3 tenörüne bağlı olarak değişiklik gösterebilir. Klinker içinde %2,5 ilâ %3,0 arasında olacak şekilde girdi oranı ayarlanmalıdır. Nihai ürün içindeki B_2O_3 miktarının %2,5 ilâ %3,0 arasında olması en ideal veya optimum oran olarak bulunmuş değerlerdir. Kolemanitin çimento hammaddesi olan kireçtaşının yerine kullanılması ile pre-kalsinasyon işleminde enerji

tasarrufu ve klinker pişirme sıcaklığı da 1450°C'tan 1325°C'lara düştüğünden, büyük oranda enerji tasarrufu (yaklaşık %10) ve CO₂ emisyonunda %25'lere varan azalma sağlanmıştır.

Kalsiyum boratlar, çimento üretimi esnasında döner fırın içindeki eriyiğin viskozitesini ve yüzey gerilimini düşürdükleri için oldukça faydalı akışkanlaştırıcı maddelerdir. Kalsiyum silikatların stabilitesi ve bileşimleri üzerindeki etkileri, CaO-SiO₂- B₂O₃ üçlü sistem faz diyagramı ile tahmin edilebilir. Faz diyagramına göre boroksit sadece C₂S içinde çözünmektedir. Buna karşın C₃S'in oluşumunu engellemektedir. B₂O₃'ün varlığında C₃S 1700°C'nin üzerinde dahi oluşmamaktadır. Oluşan C₂S'in içerisinde kararlı halde bulunan B₂O₃ nedeniyle 1325°C'de dahi C₂S'in en aktif polimorflarından α ve/veya α' -C₂S biri olan faz oluşmaktadır (DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı 2009).

Bor oksit (B₂O₃) kullanarak yapılan laboratuvar ve endüstriyel ölçeklerde çimento üretimlerinde C₃S yerine oluşan C₂S fazının hızlı soğutulması (>800 C/dak.) ile daha kararlı ve aktif olan α ve/veya α' -C₂S polimorfunun oluştuğu gözlenmiştir. Bu nedenle çimentonun klinkerleşme sıcaklığı 1450°C yerine daha düşük sıcaklıkta oluşan C₂S'in oluşma sıcaklığında 1325°C'ye kadar inilebilmektedir (DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı 2009).

f. Bab Çimentosu Genel Özellikleri

BAB Çimentosu ile yapılan betonların normal Portland çimentosu ile yapılan betona göre boşluk oranı (kapiler boşluklar) çok daha düşük olduğundan daha sıkı bir yapıya sahip olan(kompasitesi yüksek) betonun dayanımı ve dayanıklılığı da bu oranda yüksek olacaktır. Boşluk oranı diğer normal çimentolara göre çok daha düşük olduğundan aynı oranda geçimsizliği de yüksek olmakla birlikte geçirimsizliği yüksek olan bu betonların durabilitesi ve servis ömrü daha uzun olacaktır (DSİ T.B 2009).

BAB Çimentosu kullanılarak hazırlanan betonun karışım suyu ihtiyacının, PÇ kullanılabileceği kadar az olması diğer bir önemli bulgudur. Bunun nedeni, BAB

Çimentosu ile yapılan betonun çökme (slamp) kaybının çok az olmasıdır. BAB Çimentosu kullanılarak üretilen düşük kıvamlı beton için istenen dayanım değeri, daha düşük çimento dozajı ile karşılanabilmektedir. Bu özelliği ile BAB Çimentosunun hazır beton sektöründe avantaj sağlayacağı kesindir (DSİ T.B 2009).

BAB Çimentosu ile yapılan betonların normal Portland çimentosu ile yapılanlara göre erken (3 ve 7 gün) dayanım değerleri daha düşük olduğu saptanmıştır. Fakat beton teknolojisindeki alınabilecek tedbirlerle bu sorunun çözümü mümkün olacaktır. Belirli bir süre sonra (28 gün ile 90 gün arası), BAB Çimentosu dayanımı ile PÇ dayanımının aynı seviyeye ulaştığı, uzun vadede (90 gün ve ötesi) ise, BAB Çimentosunun öne geçtiği gözlenmiştir olup; çimento inceliği arttırılmaksızın beton teknolojisinde sıkça kullanılan beton kimyasalları ile de yüksek erken dayanım değerleri rahatlıkla elde edilebilecektir (DSİ T.B 2009).

BAB çimentosu ile yapılan betonun pH değeri 13,0 değerinden daha yüksek ölçülmüş ve bu değer normal PÇ ile aynı düzeyde olduğu tespit edilmiştir. Karbonasyon oluşumu ve akabinde beton içindeki donatının korozyonu BAB çimentolu betonun daha az geçirimli olması ile büyük oranda engellenmektedir (DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı 2009).

BAB çimentosu ile yapılan betonun korozyonu engellendiğinde, yapının hizmet ömrü uzamış ve zamanla ciddi iklim ve çevre şartlarında dayanım ve dayanıklılığını da korumuş olacaktır. Bunun bu şekilde olması ise deprem etkileri içinde ilâve önlem sağlanmasında yarar sağlayacaktır (DSİ TAKK 2009).

Betonarme yapılarda BAB Çimentosu ile normal çimento dozajlarında ($300 - 350 \text{ kg/m}^3$) istenilen mukavemette ve dayanıklılıkta beton üretmek mümkün olabileceği gibi, normal Portland çimentosu ile çok daha yüksek çimento dozajlarında ($400 - 450 \text{ kg/m}^3$) yüksek mukavemetli ve dayanıklı beton yapılabilir (DSİ TAKK 2009).

g. Kimyasal Özellikler

BAB Çimentosunun kimyasal bileşimi, bu çimentonun kütlesi esas alınarak ifade edilmelidir. BAB Çimentosunun bileşimi Çizelge 2.21’de, kimyasal özellikleri Çizelge 2.22’de verilen değerlere uygun olmalıdır (TS 13353).

Çizelge 2.21. BAB çimentosunun bileşimi (DSİ TAKK-2009)

Ana tip	Malzemenin adı ve işareti		Bileşim (kütlece %olarak)	
			BAB Çimentosu Klinkeri K	Minör ilâve bileşen
BABÇ	Borlu Aktif Belit Çimentosu	BABÇ	95 - 100	0 - 5

Çizelge 2.22. BAB Çimentosunun karakteristik değerlerle ifade edilen kimyasal özellikleri (DSİ TAKK 2009)⁵

Kimyasal özellik	Gerekler, Kütlece %	
Kızdırma kaybı	En çok	5,0
Çözünmeyen kalıntı	En çok	5,0
α veya α' -C ₂ S (belit, di-kalsiyum silikat)	En az	60,0 1)
C ₃ A (trikalsiyum alüminat)	En çok	7,0 1)
B ₂ O ₃	En çok	5,0
SO ₃	En çok	3,5
MgO	En çok	5,0
Klorür, CL ⁻	En çok	0,1

Ayrıca Toplam alkali içeriği TS EN 196-2’ye uygun olmalı, Na₂O’e olarak hesaplanmalı ve betonda kullanılmak istenilen agreganın reaktif (amorf) silis içermesi

⁵ Çizelge 2.22’de verilen hidratasyon ısısı ile ilgili kriterlere uyulduğunda, bu sınır değerlere uyulması gerekli değildir.

durumunda, betona giren bütün bileşenlerden gelen toplam alkali içeriği 3,0 kg/m³ değerinin üzerine çıkmamalıdır (TSE 13353).

Kimyasal katkının toplam miktarı, çimento kütlesinin %1,0'ını (pigmentler hariç) geçmemelidir. Organik katkıların kuru durumdaki miktarı, çimento kütlesinin %0,5'ini geçmemelidir. Kimyasal katkılar seçilirken; donatının korozyonuna sebep olmayacak, çimentonun veya çimentodan hazırlanan beton veya harçların özelliklerini bozmayacak nitelikte olmalıdır (TSE 13353).

h. Mekanik ve Fiziksel Özellikler

BAB Çimentosunun mekanik ve fiziksel özellikleri, Çizelge 2.23'de verilen değerlere uygun olmalıdır (TSE 13353).

Çizelge 2.23. Göltaş Çim. Fab. Ürünü farklı inceliklere ait BAB çimentosu üzerinde gerçekleştirilen fiziksel analiz deney sonuçları

Deney Adı ve Standartı	TS EN 197-1 Verilen Değerler	Göltaş CEM I 42.5 R Blaine (3265)	Göltaş BAB Blaine-1 (3562)	Göltaş BAB Blaine-2 (3778)	Göltaş BAB Blaine-3 (4056)	Göltaş BAB Blaine-4 (4273)
Yoğunluk (g/cm ³) TS EN 196-1	-	3,11	3,09	3,10	3,15	3,16
Özgül Yüzey (Blaine) (cm ² /g) TS EN 196-6	-	3265,00	3562,00	3278,00	4056,00	4273,00
Standart Kıvam Suyu (%) TS EN 196-3	-	26,40	22,00	23,00	24,20	25,20
Prize Başlama Süresi (dk.) TS EN 196-3	▲ 60	155,00	145,00	130,00	100,00	90,00
Prize Sona Erme Süresi (dk.) TS EN 196-3	-	190,00	180,00	180,00	145,00	125,00
Hacim Genleşmesi (mm.) TS EN 196-3	▲ 10	0,50	1,00	1,00	1,00	1,00
45 Nm Elek Kalıntısı (%) (TS EN 196-6)	-	21,20	28,00	21,60	18,20	15,40

Çizelge 2.24. BAB Çimentosunun karakteristik değerlerle ifade edilen mekanik ve fiziksel özellikleri (DSİ TAKK 2009)

Özellikler	Gerekler			
Dayanım sınıfı	32,5 N	32,5 R	42,5 N	42,5 R
2 günlük basınç dayanımı (MPa)	-	≥ 10,0	≥ 10,0	≥ 16,0
7 günlük basınç dayanımı (MPa)	≥ 16,0	≥ 20,0	≥ 20,0	≥ 30,0
28 günlük basınç dayanımı (MPa)	≥ 32,5	≥ 32,5	≥ 42,5	≥ 42,5
	≤ 42,5	≤ 52,5	≤ 52,5	≤ 62,5
90 günlük basınç dayanımı (MPa)	≥ 42,5	≥ 52,5	≥ 52,5	≥ 62,5
Priz başlangıç süresi (min)	≥ 75		≥ 60	
Genleşme (mm)	≤ 10			
Hidratasyon ısı (cal/g) (TS EN 196-8'e göre 7 gün sonunda, TS EN 196-9'a göre 41 saat sonunda veya izotermal kondüksiyon kalorimetre metodu ile 7 gün sonunda tayin edildiğinde)	52,5			

i. Hidratasyon ısısı

Hidrolik bir bağlayıcı olan BAB çimentosu, ince öğütülmüş inorganik bir malzeme olup; su ile karıştırıldığında hidratasyon reaksiyonları ile priz alan ve sertleşen bir pasta meydana getirir. Bu çimento pastası hidratasyondan sonra oluşan kararlı hidrate fazlar sayesinde dayanım ve kararlılığını korur. Bu tanım TS EN 197-1'de yer alan çimento tanımıyla birebir örtüşmektedir (DSİ T.B 2009).

BAB Çimentosunun toplam hidratasyon ısısı TS EN 196-8 veya TS EN 196-9'a uygun olarak veya izotermal kondüksiyon kalorimetre metodu ile tayin edildiğinde, bulunan değer, çizelge 2.24'de verilen gereklere uygun olmalıdır. Hidratasyon ısısı, TS EN 196-

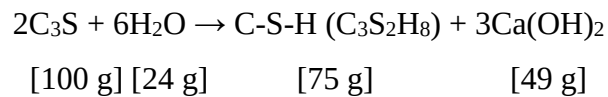
8'e göre 28 gün sonunda veya izotermal kondüksiyon kalorimetre yöntemi ile 28 gün sonunda tayin edildiğinde 70 cal/g değerini aşmaması gerekmektedir (TSE 13353).

BAB çimentosunun hidrolik sertleşmesini sağlayan öncelikle aktif belit fazının hidratasyonudur, ancak diğer çimento fazları da sertleşme sürecinde yer alabilirler (DSİ TAKK Dairesi Başkanlığı 2009).

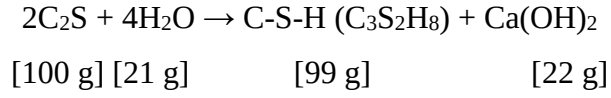
BAB çimentosu klinkerinin ana bileşeni aktif belit fazı olan di-kalsiyum silikası içermektedir (α ve/veya α' - C_2S modifikasyonları). Diğer mineralojik bileşenleri trikalsiyum alüminat (C_3A) ve tetrakalsiyum alüminaferrit (C_4AF) fazıdır. BAB çimentosu klinkerinin Portland çimentosu klinkerinden farkı, alit fazı yerine hidrolik aktivitesi yüksek aktif belit fazının ana bileşen olmasından kaynaklanmaktadır (DSİ TB 2009).

Çimento hidratasyonu sonucunda C-S-H oluşumunun daha fazla olması istenebilir. C-S-H'in fazla oluşması ile çimento pastasında daha düşük boşluk oranı ve sonuçta da kompakt bir yapının oluşması sağlanmaktadır. Normal şartlarda çimentoda oluşan β - C_2S fazının reaktivitesi C_3S fazına göre oldukça yavaştır ve geç dayanım kazanmaktadır. Ancak, nihai dayanımı C_3S ile neredeyse aynı seviyede olabilmektedir. Gerek Alit olarak bilinen C_3S fazının ve gerekse Belit fazının ister β - C_2S veya α veya α' - C_2S olsun, su ile olan reaksiyonları aşağıdaki gibi özetlenebilir,

(Hızlı Reaksiyon)



(Yavaş Reaksiyon)

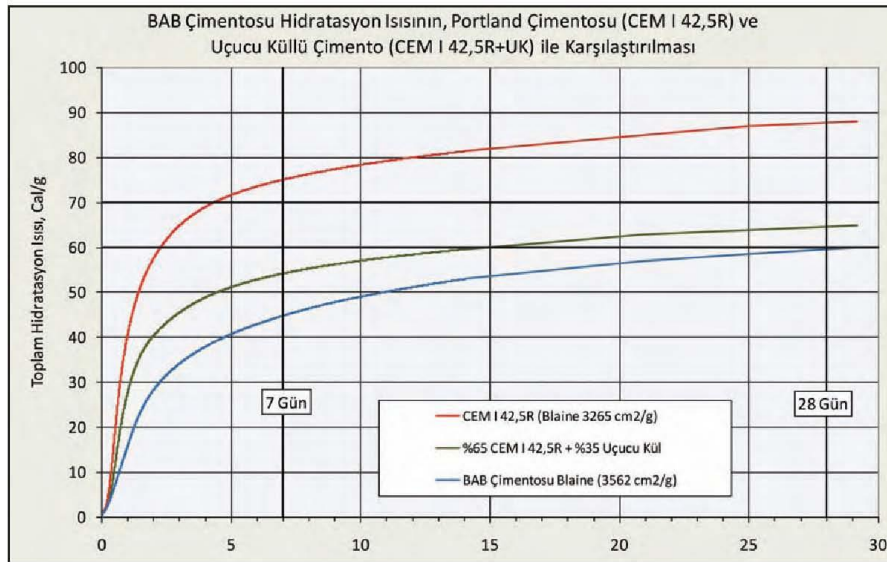
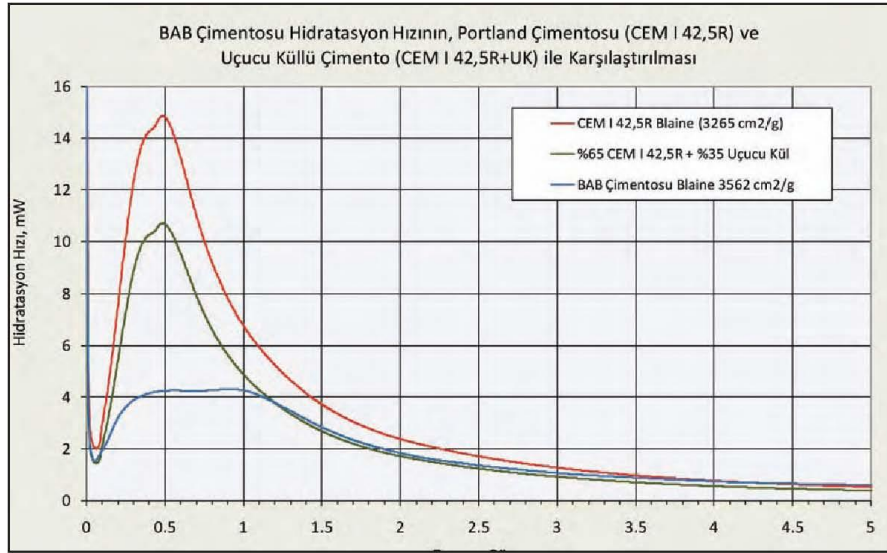


C₃S fazının su ile hidratasyon reaksiyonu sonucu C₂S fazından oluşana göre daha az C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) ve 2 kat daha fazla Ca(OH)₂ oluşmaktadır. BAB çimentosunda α veya α'-C₂S'den dolayı oluşan C-S-H yaklaşık 99 g iken normal bir Portland çimentosunda C₃S'den dolayı 75 g kadar C-S-H oluşmaktadır.

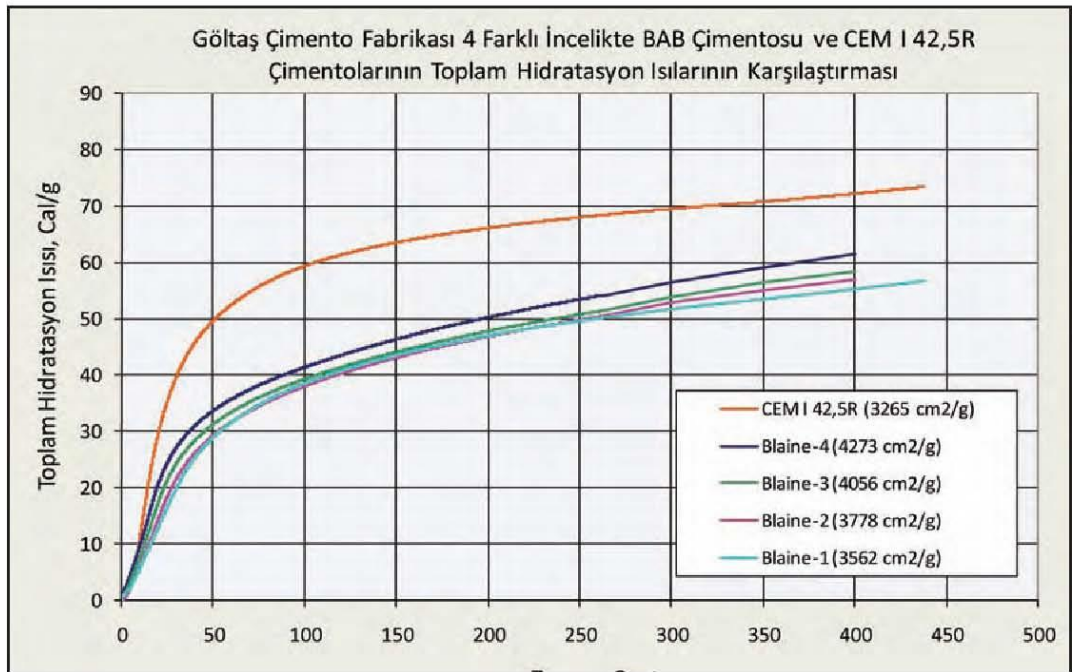
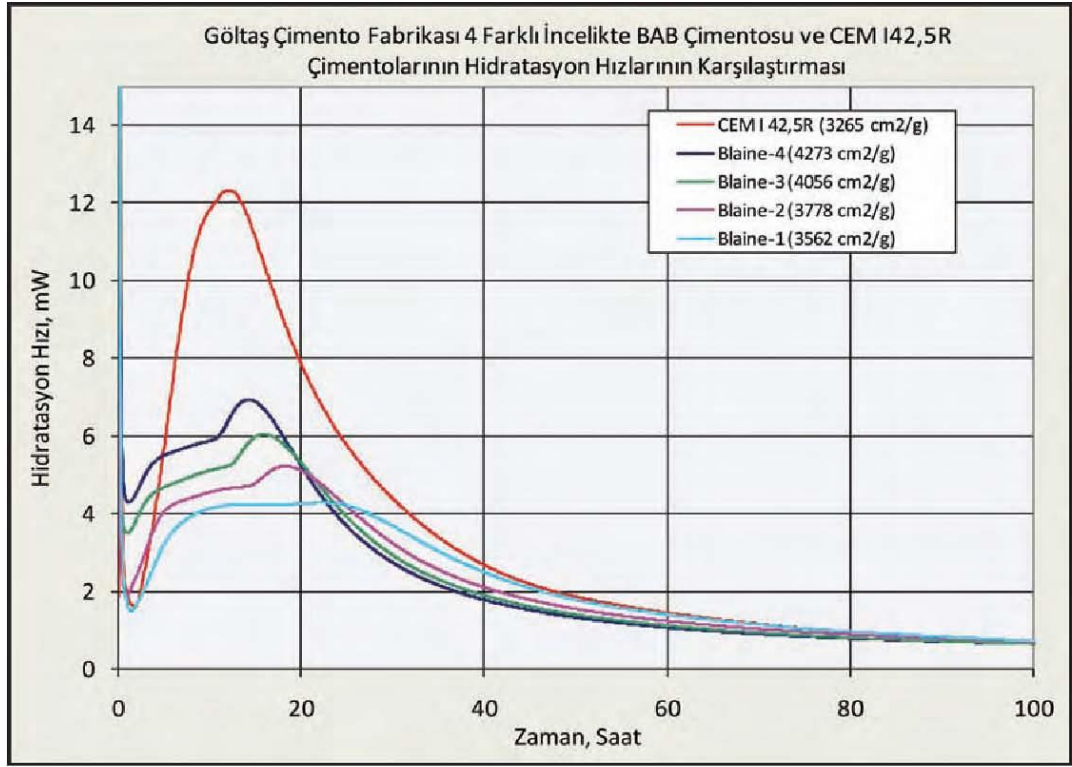
j. Hidratasyon Özellikleri

BAB çimentosunun en önemli özelliklerinden bir tanesi hiç şüphesiz çok düşük toplam hidratasyon ısisına (260 kJ/kg) sahip olmasıdır. Normal bir Portland çimentosunun toplam hidratasyon ısisı yaklaşık 500 kJ/kg veya daha yüksek olarak bilinmektedir. Hidratasyon ısisı ile ilgili olarak DSİ TAKK Dairesi ve Ulusal BOREN Enstitüsü işbirliği ile BAB çimentosunun hidratasyon özelliklerini belirlemek amacıyla izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile yapılan çalışmalar ile farklı incelik değerlerinde BAB çimentosu ve normal CEM I 42,5R Portland çimentosu ile belirli bir oranda (%20 ve %35) uçucu kül ve kimyasal katkı ilavesi ile karşılaştırmalı olarak deneyler yapılmıştır.. Farklı durumlarda yapılan deneyler ve elde edilen sonuçlar Şekil 2.42, Şekil 2.43, Şekil 2.44, Şekil 2.45, Şekil 2.46 ve Şekil 2.47'de verilmiştir. Şekil 2.42 ve Şekil 2.43'da BAB çimentosunun hidratasyon ısisı hızı ve toplam ısisı, Portland çimentosu ve içerisine %35 uçucu kül ilavesi ile elde edilmiş bağlayıcının hidratasyon ısisı hızı ve toplam ısisı ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 2.44 ve Şekil 2.45'de dört farklı incelik değerinde üretilen BAB çimentoları ile sadece normal CEM I 42,5R Portland çimentosunun hidratasyon hızı ve ısisı karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bunlara ilave olarak Şekil 2.46 ve Şekil 2.47'de sadece BAB çimentosu ve %10 ve %20 uçucu kül ilaveleri ile karşılaştırma yapılmıştır. Normal olarak kütle betonu uygulamalarında sıklıkla kullanılan %65 Portland çimentosu ve %35 uçucu küllü bağlayıcı (çimento+uçucu kül) karışımı dahi hidratasyon ısisı problemi

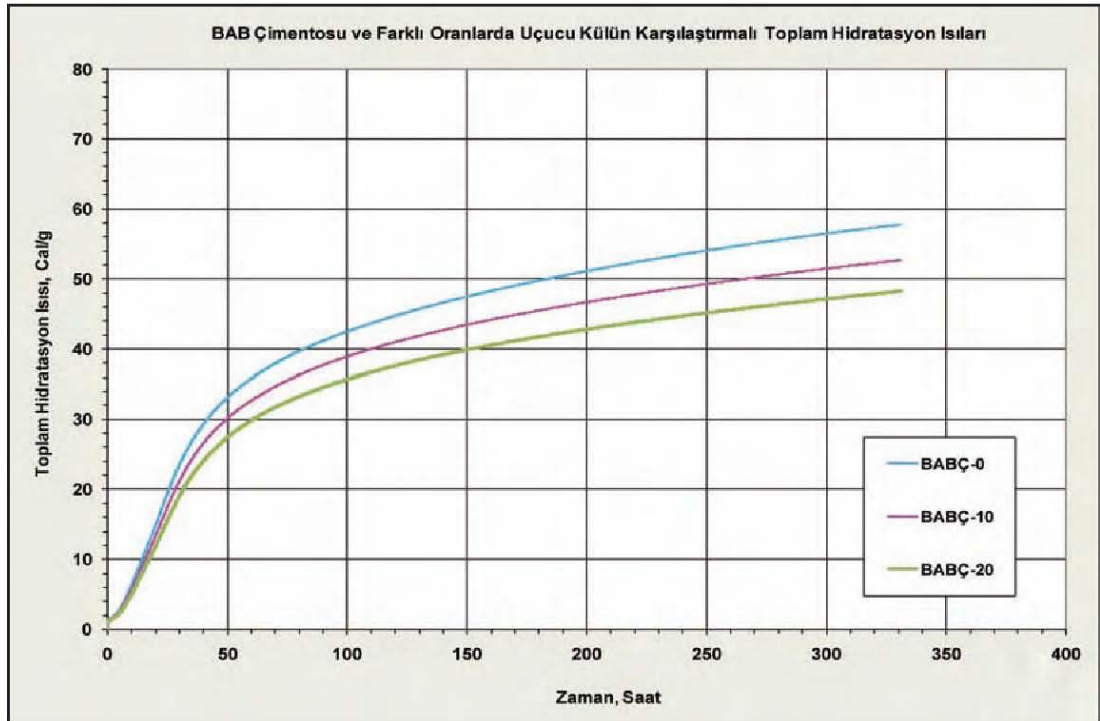
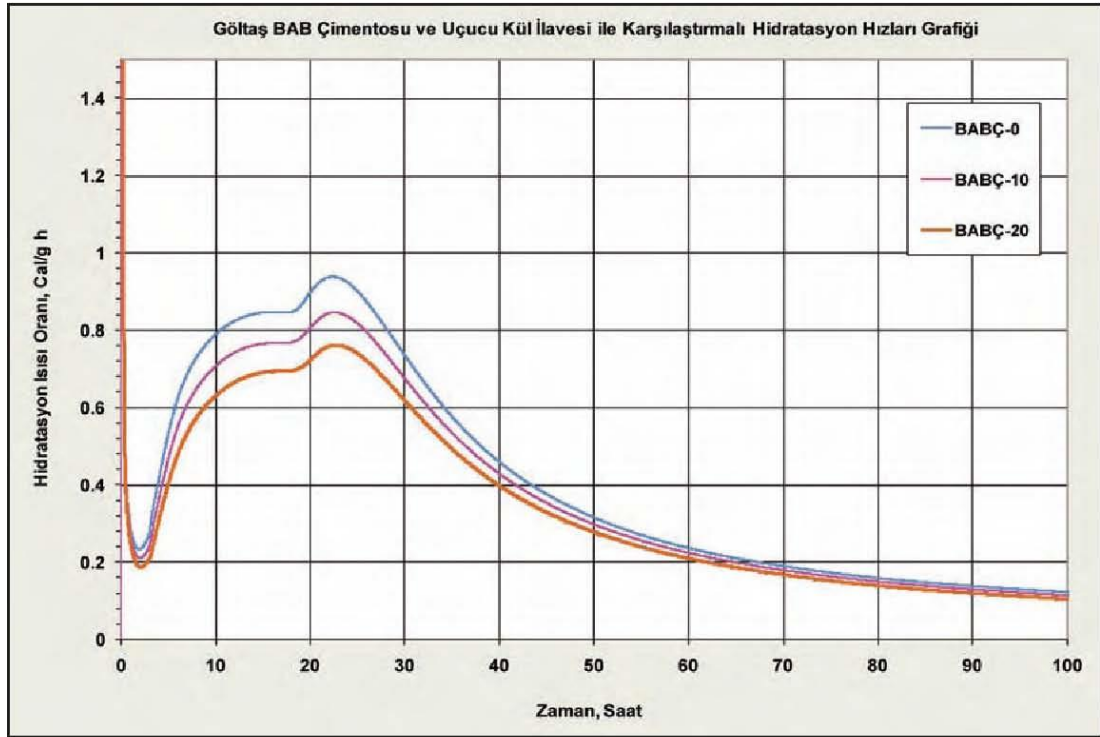
yaratabilmektedir, BAB çimentosu tek başına uçucu küllü çimentodan dahi daha az ısıya sahiptir. Şartname kriterlerini rahatlıkla tek başına başka hiçbir puzolanik malzemeye ihtiyaç olmadan sağlayabildiği görülmektedir (DSİ-TAKK 2009).



Şekil 2.42 ve 2.43. BAB çimentosunun izotermal konduksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen hidratasyon hızı ve ısı ile Portland çimentosu ve %35 uçucu küllü Portland çimentosunun karşılaştırmalı olarak verilen hidratasyon hızları ve toplam hidratasyon ısıları. (DSİ TAKK 2009)



Şekil 2.44. ve 2.45. Göлтаş Çimento Fabrikası ürünü 4 farklı incelikteki BAB çimentolarının izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen ve Portland çimentosu ile karşılaştırmalı olarak verilen hidratasyon hızları ve toplam hidratasyon ısıları (DSİ TAKK 2009)



Şekil 2.46. ve 2.47. Göлтаş Çimento Fabrikası ürünü BAB çimentosunun izotermal kondüksiyon kalorimetre cihazı ile ölçülen ve BAB çimentosuna %10 ve %20 uçucu kül ilavesi ile karşılaştırmalı olarak verilen hidratasyon hızları ve toplam hidratasyon ısıları (DSİ TAKK 2009)

BAB çimentosunun hidratasyon ısısı yönünden diğer çimentolara oranla çok daha düşük olduğu tespit edilmiş (Şekil 2.42,2.43.2.44,2.45,2.46,2.47.) ve elde edilen bulgular BAB çimentosunun özellikle kütle betonu gibi düşük hidratasyon ısısı çimentoların kullanılmasının zorunlu olduğu yapılar için çok ideal bir malzeme olduğunu göstermektedir. Keza kütle betonu yapılar da kullanılacak olan çimentoların toplam hidratasyon ısısı değerlerinin 7 gün ve 28 günde sırasıyla 60 cal/g ve 70 cal/g değerlerini (kütle betonu yapıları için hidratasyon ısısı kriterleri) aşmaması gerekmektedir. BAB çimentosunda bu değerler sırasıyla 50 cal/g (<60 cal/g) ve 60 cal/g (<70 cal/g) olarak elde edilmiştir. Bu sonuçlar normalde uçucu kül vb. bir puzolanik malzemenin Portland çimentosu ile birlikte kullanılması suretiyle ancak sağlanabilen kriterlerin bu çimento kullanılması durumunda (kısmen bir puzolanik malzeme ile ikame edilmeksizin) rahatlıkla sağlanacağını ortaya koymuştur. Kütle betonu imalatlarında oldukça yüksek maliyet getiren ön-soğutma ve ard-soğutma işlemleri ile bunlara bağlı olan diğer bazı işlerde büyük ölçüde tasarruf sağlayacağı ortadadır. Ayrıca bu tür bir çimento kullanımı ile inşaat yapım süresinin kısaltılması da sağlanabilecektir (DSİ TAKK 2009).

BAB çimentosu ve çok düşük hidratasyon ısısı çimentoların özellikle düşük yüzey/hacim oranına sahip yapı elemanları gibi kütle betonlarında kullanılması daha elverişlidir. Kütle betonu yapılarında çimentonun hidratasyonu esnasında çimentonun tipine bağlı olarak ortaya belirli bir miktar hidratasyon ısısı çıkmaktadır. Bu ısı betonun ısı iletiminin çok düşük olması nedeniyle yapı içinde yüksek sıcaklık artışları meydana getirmektedir. Sonuçta yapının iç ve dış kısımları arasında termal gradientler meydana gelmekte ve farklı genleşmeler neticesinde oluşan iç gerilimler betonun çekme gerilimi kapasitesinden yüksek olduğunda beton çatlamakta ve işlevselliğini kaybetmektedir. Ancak, bu özellikleri nedeniyle erken dayanımın istenildiği donatılı ve ön-yapımlı elemanların imalatında kullanılması çok uygun olmamaktadır. Bu alanda kullanılabilirliğinin olup olmadığının belirlenmesi amacıyla detaylı bir çalışma ortaya konmalıdır. BAB çimentosunun çok düşük hidratasyon ısısına sahip olma özelliği, sıcaklıkla oluşabilecek çatlakların daha kolay kontrol edilebilmesi, yüksek dayanıma

sahip yüksek akışkanlı beton yapımı ve sıcaklık yükselmesinin kontrolü hususlarında avantaj yaratacaktır (DSİ TAKK 2009).

k. BAB Çimentosu İle Elde Edilebilecek Teknik ve Ekonomik Faydalar

- Kolemanit'in borik asit üretiminde yüksek tenörlü kısmının kullanılmasının ardından kalan düşük tenörlü kısmının da çimento sektöründe kullanılmasıyla yeni bir pazar payı oluşması sağlanacaktır. Daha düşük tenörlü kolemanitin kireçtaşının yerine daha fazla kullanılması ile CO₂ emisyonunun daha da azaltılması mümkündür (DSİ T.B. 2009.).
- Çimento fabrikaları, klinkeri döner fırında 1450°C yerine 1325°C'ta pişirmek suretiyle daha düşük enerji (en az %10) harcayacak ve CO₂ emisyonunda en az %25'lere varan oranda azalma sağlanacaktır (DSİ T.B. 2009).
- BAB Çimentosunun hidrasyon ısısı çok düşük olduğundan özellikle ince kemer tipindeki baraj kütle betonlarında kullanılması çok uygundur. Bu çimentonun kullanılması ile özellikle ön-soğutma ve bazen de ard-soğutma gibi yüksek maliyetli işlemlerin kaldırılması mümkündür. Ayrıca, kütle betonlarında çok sık rastlanılan termal çatlak oluşumlarının önüne geçilmesi ile betonda hasar oluşma olasılığı ortadan kaldırılmış olacaktır (DSİ T.B. 2009).
- BAB Çimentosu ile imal edilen betonlar, PÇ ile imal edilen betonlara göre daha az çökme kaybına uğradığından dolayı daha düşük çökme değerine sahip beton imal edilebilmesi sonucunda, betonda daha düşük su/çimento oranı kullanılmasına olanak sağlamış olmaktadır. Bu sayede, betonda çimento dozajı düşürülebilmektedir (DSİ T.B. 2009).
- BAB Çimentosu kullanılan beton ile PÇ kullanılan betonların su geçirgenliklerinin karşılaştırılması sonucunda, 275 kg/m³ dozajlı BAB Çimentosu kullanılan beton suya ve kimyasallara karşı geçirimsizlik sağladığı, PÇ kullanılan betonda bu özelliğin

sağlanması için 400 kg/m^3 dozajının kullanılması gerektiği saptanmıştır. Bu özellikler, BAB Çimentolu betonun dayanıklılık ve zararlı etkiye sahip ortamlarda kullanılma bakımlarından önemli derecede üstünlüğe sahip olduğunu göstermektedir (DSİ T.B. 2009).

- Bir önceki maddede belirtilen sonuçların teyit edilmesi amacıyla aynı betonlar klorür iyonları penetrasyonuna karşı gösterdikleri direnç yönünden de değerlendirmeye alınmışlardır. BAB Çimentosu ile yapılan 250 ilâ 300 kg/m^3 dozajlı betonların geçirgenlik sınıfı orta dereceli olduğu tespit edilirken, normal PÇ ile yapılan 350 ilâ 400 kg/m^3 dozajlı betonun geçirgenlik sınıfı yüksek dereceli olduğu tespit edilmiştir. Bu durumda, BAB Çimentosu kullanımı ile çok yüksek oranda çimento tasarrufu sağlanabileceği düşünülmektedir ve dayanıklılık bakımından çok zararlı ortam şartlarına dirençli beton yapıların inşaatı mümkün olacaktır (DSİ T.B. 2009).

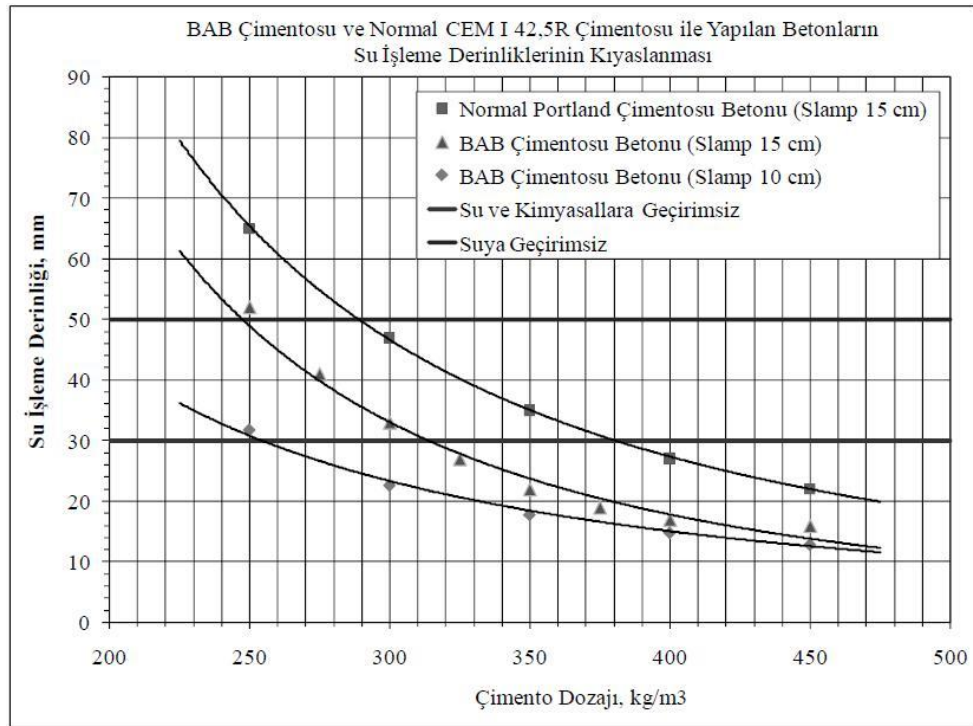
- Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü'nün TÇMB ve DSİ TAKK ile ortak yaptığı projede BAB Çimentosunun nötron tutma kapasitesi, CEM I 42,5 ile karşılaştırılmış ve aynı koşullarda BAB Çimentosu %84 oranında nötron tutarken CEM I 42,5 %68 oranında tutabilmiştir. Bu sonuç, BAB Çimentosunun ülkemizde yapımına yeni başlanacak nükleer santrallerde de kullanılmasının yararlarını ortaya koymuştur (Çakal 2008).

- Özellikle su ve kimyasallara karşı geçirimsizliğin önemli olduğu her türlü beton yapıda (beton yollar, büyük sulama kanalları, önyüzü beton kaplı barajlar, kemer barajlar, baraj dolusavakları, köprü ve viyadükler) BAB Çimentosunun kullanılması birçok avantajı da beraberinde getirecektir (DSİ T.B. 2009).

- Diğer bir önemli bulgu, BAB Çimentosu kullanılarak hazırlanan betonun karışım suyu gereksiniminin, PÇ kullanılabilecek göre daha az olmasıdır. Bunun sebebi, BAB Çimentosu ile yapılan betonun çökme (slump) kaybının çok az olması ve Belit hidratasyonu sırasında gereken su miktarının, Alit hidratasyonu sırasında gereken su miktarından daha az olmasıdır. BAB Çimentosu kullanılarak imal edilen düşük kıvamlı beton için hedeflenen dayanım değeri, daha düşük çimento dozajı ile sağlanabilir ve bu

özelliği ile BAB Çimentosunun hazır beton sektöründe avantaj sağlayacağı nettir (DSİ T.B 2009).

- BAB ve normal Portland çimentoları ile yapılan farklı dozajlardaki beton numuneler üzerinde TS EN 12390-8 standardına uygun olarak su geçirgenliği deneyleri yapılmış ve Şekil 2.48'deki gibi bir ilişki elde edilmiştir. BAB çimentosu ile yapılan betonların geçirgenliklerinin normal Portland çimentosu ile yapılan betonların geçirgenliklerinden çok daha düşük seviyede olduğu belirlenmiştir. BAB çimentosu ile yapılan betonların klorür penetrasyonlarının normal Portland çimentosu ile yapılan betona göre daha iyi oldukları bariz şekilde tespit edilmiştir (DSİ T.B. 2009).



Şekil 2.48. BAB çimentosu ile portland CEM I 42,5R çimentosu su geçirgenliği (DSİ TAKK 2009)

I. Türkiye’de BAB Çimentosu Uygulamaları

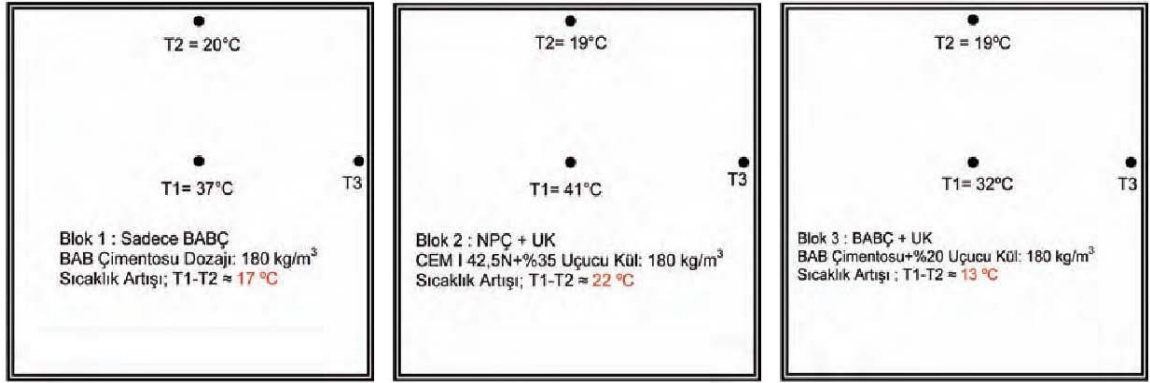
Ülkemizde BAB Çimentosunun geliştirilmesi ve özelliklerinin saptanması üzerine yapılan kurumsal çalışmalar, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) Ar-Ge Enstitüsü merkezli olarak 90’lı yıllarda başlayarak yürütülmüştür. Bu çalışmalarda en önemli atılım noktasını, 2004 yılı sonunda mali desteği BOREN tarafından üstlenilen ve TÇMB Ar-Ge Enstitüsü tarafından yapılan çalışmalar meydana getirmişlerdir. Ertün, Gürbüz, Türk ve Yeğınobalı’nın görev aldığı “Klinker Üretiminde Kolemanit Kullanımının Araştırılması ve Çimento Endüstrisinde Uygulanabilirliği” adlı projede aşamalar halinde laboratuvar çalışması, pilot deneme ve endüstriyel denemeler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda ilk iki aşamada elde edilen değerler, fabrika hammaddesi ile birlikte optimize edilmiş ve Denizli Çimento Fabrikasında 28-30 Kasım 2005’te 3.000 ton klinker olarak ilk üretim gerçekleştirilmiştir. Benzer çalışma daha sonra Göltaş Çimento Fabrikasında 4.000 ton klinker olarak gerçekleştirilmiştir. Bu üretilen klinker kullanılarak elde edilen BAB Çimentoları beton yol yapımında ilk olarak Nisan 2007’de Ankara EİEİ Binası bahçesinde, ardından Eylül-Ekim 2007’de Ordu’da Sivas bölünmüş yolunda ve son olarak Ekim 2008’de Isparta’da Burdur tali yolunda kullanılmış ve gözleme alınmıştır (DSİ T.B 2009).

DSİ IV. Bölge Müdürlüğü, Konya sınırları içerisinde yapımına devam edilen Ermenek Barajı ve HES inşaatı Baraj Gövdesi kütle betonu imalatlarında Adyabatik sıcaklık farklarını gözlemek ve BAB çimentosunun bu perspektifte oluşturabileceği farklılıkları değerlendirebilmek amacıyla, 3 adet (3x3x3) m küp bloklar hazırlanarak şematik gösterimi ve yerleştirilme planı şekil 2.46 de gösterildiği şekilde ısı çiftler (thermocouple) yerleştirilmiş ve zamanla sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Adyabatik sıcaklık farkları incelenmiştir.

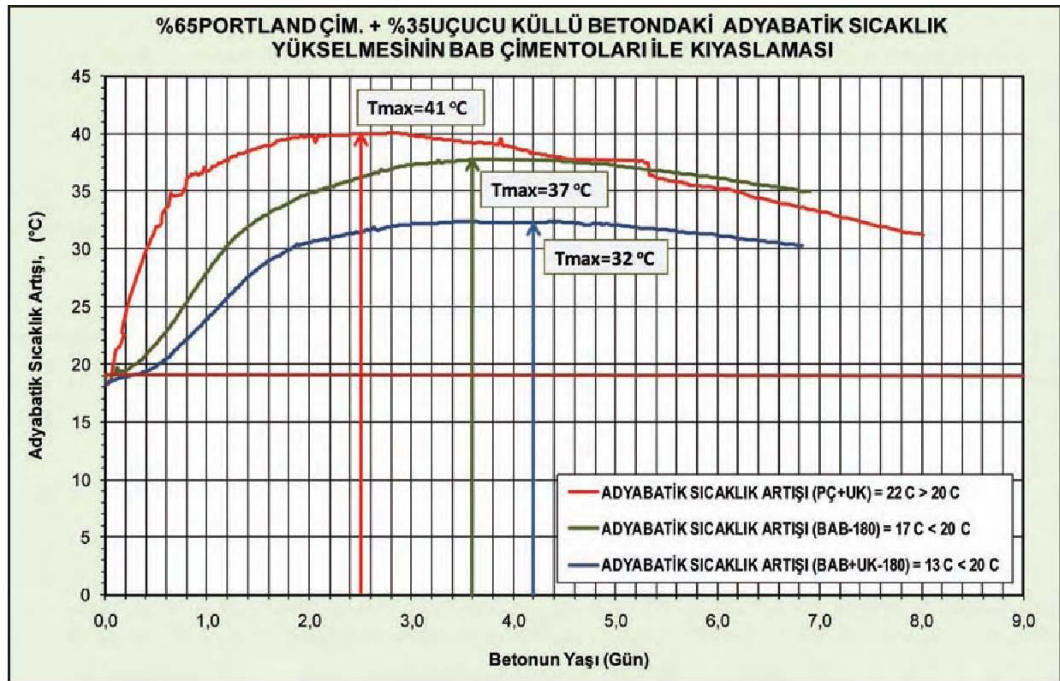
Ermenek Barajı ve HES inşaatı Baraj Gövdesi kütle betonu imalatlarında geneli itibariyle C20/25 sınıfı üretilmektedir. Ermenek Barajı kütle betonunda C20/25 beton sınıfında 180 günlük hedef dayanım esas alınarak hali hazırda toplamda 180 kg/m³ toplam bağlayıcı (%65 normal CEM I 42,5N+%35 Uçucu Kül) ile maksimum tane

büyüklüğü 125 mm olan agregalar kullanılmaktadır. Farklı bir çimento tipi kullanıldığında (traslı çimentolar yaygın olarak tercih edilmektedir) bu toplam bağlayıcı miktarı daha da fazla olabilmektedir. Bu verilen bağlayıcı ile sadece BAB çimentosu ve içerisine bir miktar (%20) uçucu kül ilavesi yapılmış betonlar ile karşılaştırma yapmak amacıyla 3 adet (3x3x3) m küp bloklar hazırlanarak şematik gösterimi ve yerleştirilme planı aşağıda Şekil 2.46'de verilmiştir. Şekil 2.46'de gösterildiği şekilde ısı çiftleri (thermocouple) yerleştirilmiş ve zamanla sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Adyabatik sıcaklık farkları her blokta aşağıdaki gibi meydana gelmiştir. BAB çimentosu ile yapılan kütle betonu tasarımı deneylerinde toplamda 180 kg/m^3 yerine 160 kg/m^3 dozajında istenilen beton sınıfının sağlandığı tespit edilmiştir. Bu deney, eşdeğer basınç dayanımı esas alınarak yapılmış olduğu varsayılırsa elde edilen adyabatik sıcaklık artışı daha düşük gerçekleşecektir. Bunu hesaplamak da mümkündür. BAB çimentosu ile 180 kg/m^3 dozajla yapılan beton blokta sıcaklık farkı yaklaşık 17°C olarak gerçekleşmiştir. Bağlayıcı dozajı 160 kg/m^3 olduğunda ise en fazla $14,5^\circ\text{C}$ 'lik bir fark meydana gelebileceği hesaplanmaktadır. Betonun yerleştirme sıcaklığı bu dökümler esnasında 18°C olarak gerçekleşmiştir. Normal şartlarda betonun yerleştirme sıcaklığı 15°C 'yi geçmeyecek şekilde dökülmüş olsaydı adyabatik sıcaklık artışı da aynı oranda düşük olacaktır.

T3 olarak gösterilen sıcaklık ölçer ısı çiftleri blokların kenarlarda konumlandığından ve dışarıdan yalıtımlı olduklarından beton merkezi sıcaklıklarına daha yakın olarak gerçekleşmiştir. Bundan dolayı adyabatik sıcaklık artışı hesaplamasında göz ardı edilmiştir. T2 olarak gösterilen ısı çiftlerinin konumu çevreye ısı kaybının en fazla olduğu yer olduğundan çevre sıcaklığına daha yakın değerler vermiştir. Adyabatik sıcaklık artışı da zaten T1 ile T2 arasında maksimum değerlere ulaşmıştır. Şekil 2.47'de 3 blok içinde oluşan adyabatik sıcaklık artışları grafik üzerindeki gibi oluşmuştur.



Şekil 2.49. Ermenek baraj şantiyesinde imal edilen 3 farklı bağlayıcılı (3*3*3) m boyutlarındaki beton blokların içerisinde yerleştirilen sıcaklık ölçerlerin (Thermo Couple: Isıl Çift) şematik olarak gösterimi (DSİ-TAKK-2009).



Şekil 2.50. 3 Farklı bağlayıcı ile yapılan kütle beton bloklarının merkezlerinde oluşan adyabatik sıcaklık artışları (DSİ-TAKK 20009).

Beton bloklar içerisinde oluşan sıcaklık profilleri şekil 2.50’de görüldüğü gibi ortaya çıkmıştır. Normal CEM I 42,5 N Portland çimentosu + %35 uçucu kül kullanılarak üretilen beton blokta oluşan adyabatik sıcaklık artışı merkezde maksimum 41°C olarak gözlemlenmiştir. Buna karşın, sadece BAB çimentosu ve BAB çimentosu + %20 uçucu kül kullanılarak üretilen beton blokların merkezlerinde ise sırasıyla 37°C ve 32°C

civarında sıcaklık artışları gözlemlenmiştir. Bu değerler sadece beton blokların merkezlerinde oluşan sıcaklık değişimini göstermektedir. Adyabatik sıcaklık artışları ise betonların yerleştirme sıcaklıkları ile merkezlerinde oluşan maksimum sıcaklık farkından hesaplanabilmektedir. Sadece normal CEM I 42,5N + %35 uçucu küllü çimento ile yapılan betonun yerleştirme sıcaklığı 19°C olarak ölçülürken diğerlerinin yerleştirme sıcaklıkları 20°C olarak ölçülmüştür. Bu durumda adyabatik sıcaklık artışları sadece BAB çimentolu 180 kg/m³ dozajlı kütle betonunda 17°C olurken, BAB çimentosu+%20 uçucu küllü bağlayıcılı betonda 13°C olarak ölçülmüştür. Buna karşın normal CEM I 42,5N çimentosu+%35 uçucu küllü beton blokta 22°C'lik bir adyabatik sıcaklık artışı meydana gelmiştir. Bu değer, literatürde kütle betonlarında tavsiye edilen ve 20°C olarak verilen limit değeri aştığından betonun termal gerilimlerden dolayı çatlaması kaçınılmazdır. Burada CEM I 42,5N çimentosu yerine CEM I 42,5R çimentosu kullanıldığında ise sıcaklık artışı birkaç derece daha yüksek çıkabilecektir. Diğer bir durum ise betondaki maksimum sıcaklıklara ulaşma zamanlarıdır. Normal Portland çimentosu ile uçucu küllü betonda maksimum sıcaklığa 2,5 günde ulaşılırken BAB çimentolu betonlarda sırasıyla 3,5 gün ve 4,2 günde pik sıcaklıklar ortaya çıkmıştır. Bu durum da BAB çimentosu için diğer bir avantajı göstermektedir (DSİ TAKK 2009).

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu bölümde, kırma taş agregası, Portland çimentosu (PÇ), Borlu Aktif Belit Çimentosu (BAB), Standart kum, karma suyu, Mineral Yağ kullanılan diğer malzemeler ile çalışmalarda kullanılan aletler hakkında bilgi verilmiştir.

Agrega deneyleri, beton üretimi, taze beton deneyleri, sertleşmiş beton deneyleri ve çimento deneyleri Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında yapılmıştır.

3.1.1. Agregası

Çalışmada kullanılan agregası Erzurum ili sınırlarındaki Aşkale Çimento'nun kum ocağında üretilen kırma taştan agregalardan temin edilmiştir. Agregası kullanılmadan önce yıkanarak ve doygun kuru yüzeyli duruma getirmek suretiyle fırında 104°C'de kurutulup, kullanılmıştır.

Betonu oluşturan agregaların tane dağılımı en büyük tane büyüklüğüne bağlı olarak TS 802'de belirtildiği gibi gösterilen ideal bölgeye düşecek şekilde seçilmiştir. Bu açıdan araştırma da agregalar ayarlanmış granülometri eğrisine uygun olarak kullanıldığından agregalar 2, 8 ve 16 mm'lik eleklerden elenmiş ve eleklerden elenerek elde edilen agregalar 0-2, 2-8 ve 8-16'lık tane sınıfları halinde sınıflandırılmıştır. Elenen bu malzemeler kirli suyu tamamen gidene kadar yıkanmıştır. Bu şekilde kullanıma hazır hale getirilmiştir.

3.1.2. Çimento

Çalışmada çimento Aşkale Çimento Fabrikası, Ünye Çimento Fabrikasından temin edilmiştir.. Bunlar CEM II B-M(P-LL)32,5 R, CEM II 32,5 B-S, CEM I 42.5 R, CEM I 52,5 R, CEM II A-M(P-LL)42,5 R, CEM II B-M(P-LL) 42,5 N'dır. Borlu Aktif Belit Çimento ise Ankara' da bulunan Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü' den (BOREN) temin edilmiştir.

3.1.3. Karma suyu

Beton karışımlarında kullanılacak suyun temiz olması ve betona olumsuz bir etki yapmaması gerekmektedir. İçilebilir sular beton üretiminde yoğurma suyu olarak rahatlıkla kullanılabilir. Beton karma suyu olarak Atatürk Üniversitesi içme suyu kullanılmıştır.

3.1.4. Standart kum

Deneylerde, TS EN-196-1 standartlarında belirtilen şartlara haiz aşağıdaki çizelgede gösterildiği şekilde her tanecik büyüklüğüne göre ayrı ayrı veya önceden karıştırılmış, deneye hazır halde (1350±5) g.'lık plâstik torbalar içinde bulunan standart kum kullanılmıştır.

Çizelge 3.1. CEM referans kum tane büyüklüğü dağılımı

Kare Göz Açıklığı (mm)	Kümülatif Elekte Kalan (%)
2,00	0,00
1,60	7±5
1,00	33±5
0,50	67±5
0,16	87±5
0,08	99±1

3.1.5. Mineral yağ

Deney numunesi ve termometre arasındaki ısıl temasın sağlanması için termometre cebi $(2,5 \pm 0,5)$ cm³ yağ (örneğin; ince mineral yağ) ile doldurulmalıdır(TS EN 196/8).

Standartta yazan bu hususa riayet edilerek deney ince mineral yağ (Süt Mak. Yağı) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

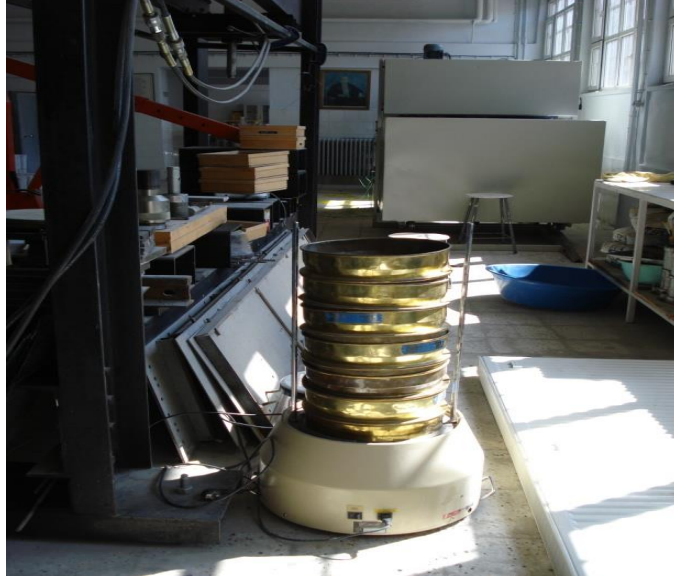
3.1.6. Diğer malzemeler

Beton numunelerin su kürü aşamasında kirece doymuş su ortamının sağlanması için söndürülmüş torba kireç, sertleşmiş silindir numunelerin başlıklanmasında sarı renkli kükürt ve kalıplama işlerinde de ince motor yağından yararlanılmıştır.

3.2. Deneylerde Kullanılan Aletler

3.2.1. Elekler

Deneylerde Şekil 3.1’de gösterilen TS 3310’a uygun toplama kabı, 2 mm, 4 mm, 8 mm ve 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır.



Şekil 3.1. Agrega deneylerinde kullanılan elek takımı

3.2.2. Betoniyer

Şekil 3.2’de gösterilen ELE firmasının ürettiği 135° açı yapacak kadar manevra yapabilen 60 dm³ kapasiteli, 25 devir/dakika karıştırma hızına sahip, düşey eksenli laboratuvar tipi betoniyer kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Betoniyer

3.2.3. Çökme konisi ve şişleme çubuğu

Çökme konisi, taban çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan metalden yapılmış kesik huni şeklindedir. Alt kısmında, çökme konisinin oynamasını önlemek için iki adet basma kulaklığı, yukarı kısmında da ise el tutma için sapları vardır. Beton çökme konisine yerleştirilirken üç aşamada 25'er defa şişlemek üzere yerleştirilir. Şişleme içinde 600 mm uzunluğunda 12 mm çapında şişleme çubuğu kullanılmıştır.

3.2.4. Kalıplar

Şekil 3.3'de gösterilen sertleştirilmiş plastikten imal edilmiş hazır silindir şeklinde 10x20 cm boyutlarında kalıplar kullanılmıştır.



Şekil 3.3. Beton numune kalıpları

3.2.5. Pres

Şekil 3.4’de gösterilen sertleşmiş beton deneylerinden, numunelerin basınç mukavemetlerinin belirlenmesinde İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik laboratuvarında bulunan ELE marka AUTOTEST 3000 tipinde 300 ton kapasiteli, yükleme hızı otomatik olarak ayarlanabilen hidrolik pres kullanılmıştır.



Şekil 3.4. Beton numunelerin kırıldığı pres

3.2.6. Karıştırıcı

Genel olarak şekli Şekil 3.5’de gösterilen, hızı elektrik motoru ile kontrol edilebilen karıştırıcı, kabının eksenine etrafında yörüngesel dönerken kendi eksenine etrafında dönebilen paslanmaz çelikten yapılmış olup, TS EN 196-1 standartlarına uygun bir palet kullanılmıştır.

Harç karıştırılırken düşük hız (145 d-1) ve yüksek hız(290 d-1) 2 devir kullanılmıştır.



Şekil 3.5. Çimento numune harçlarının karıştırıldığı karıştırıcı

3.2.7. Shemidt çekici

Şekil 3.6’de gösterilen ve “Beton test çekici" olarak adlandırılan alet, sertleşmiş betonun yüzey sertliğini ölçmektedir.



Şekil 3.6. Schmidt çekici

3.2.8. Digital boy ölçüm cihazı

Numunelerin boy ve çap ölçümlerinde Şekil 3.7’de gösterilen 300 mm çene aralığına sahip 0,01 mm hassasiyetli TRONIC marka dijital boy ölçüm cihazı kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Dijital boy ölçüm cihazı

3.2.9. Terazı

Deneyin tüm aşamalarındaki numune ağırlık ölçümlerinde ve malzeme ağırlık ölçümlerinde Şekil 3.8’de gösterilen 1 gr hassasiyetli terazi kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Terazı

3.2.10. Mortar Kabi

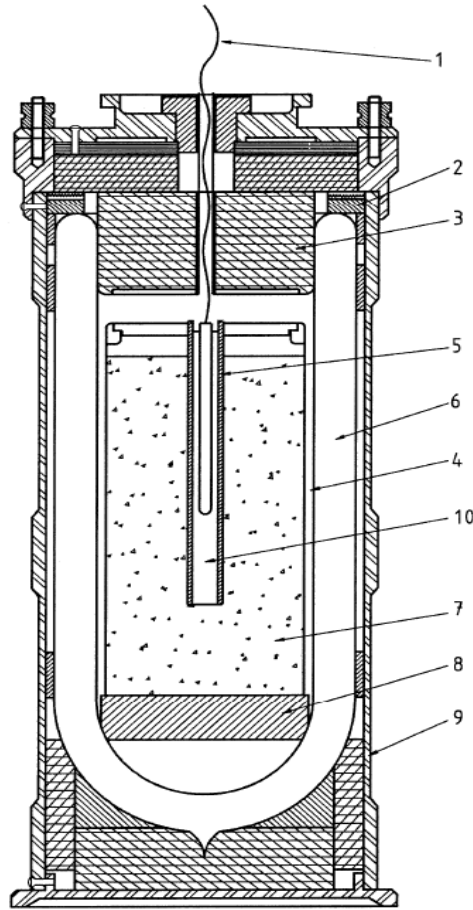
Deneye tabi tutulan harç numunesini içine alacak şekilde tasarlanmış, yaklaşık olarak 800 cm³ hacme sahip, bir kapak takılmış silindirik bir kaptan oluşan su buharı geçirmeyen paslanmaz çelikten imal edilmiş Harç numune kapları kullanılmıştır. Harç numunesi Yaklaşık 80 mm çapında ve yaklaşık 165 mm yüksekliğinde, anma kalınlığı 0,3 mm olan teneke plaka yüksekliği harç kutusunun üstü ile tıpa arasında yaklaşık olarak 10 mm'lik bir hava boşluğu bulunmaktadır. Harç kutusunun kapağı, tabanı kapalı olan silindirik boru şeklindeki termometre cebine termometre merkezlenerek deney numunesinin merkezine kadar uzatılmıştır (TS EN 196/1).



Şekil 3.9. Mortar kabı

3.2.11. Kalorimetre

Deneylerde Şekil 3.10'da tipik kesiti verilen yalıtımlı bir tıpa ile sızdırmaz hale getirilmiş yalıtımlı bir şişeden oluşur ve rijit bir kasa ile kaplanarak desteklenen bir kalorimetre kullanılmıştır. Deneyler Yarı adyabatik yöntem esasına göre gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemin özelliği 41 saatin sonundaki değerler ile çözelti yöntemindeki 7 günlük değerlerin büyük bir korelasyon göstermesidir.



Açıklama:

- 1 Platin dirençli termometre
- 2 Conta
- 3 Yalıtım tıpası
- 4 Harç kutusu

- 5 Termometre cebi
- 6 Dewar şişesi
- 7 Harç numunesi
- 8 Lastik disk

- 9 Rijit kasa
- 10 Yağ

Şekil 3.10. Tipik kalorimetre kesiti (TS EN 196/9).

Deneylerde Şekil 3.10'da gösterilen kalorimetreden 2 adet kullanılmıştır. 1. kalorimetre harç numunesindeki ısı değişimlerini kaydederken 2. kalorimetre ise referans harç numunesi denilen ve içerisinde inert bir harç bulunan numune ölçümlerini gerçekleştirmiştir (Bknz Şekil.3.11). Deney Yöntemi bölümünde konu ayrıntılı olarak açıklanacaktır.



Şekil 3.11. K kalorimetresi Çifti

3.2.12. Termometre

Deneylerde K kalorimetrenin içine konan harç numunelerinin merkezine daldırılan termocouple (Isıl Çift) sayesinde numunelerdeki ısı değişimleri ölçülerek modem vasıtasıyla ağ sistemine entegre edilmektedir.

3.2.13. Bilgisayar ve ağ sistemi

Ölçümler K kalorimetrenin içine yerleştirilmiş termocouple (ısı çiftleri) vasıtasıyla bir modeme oradan da kontrollü bir şekilde bilgisayar programına aktararak deney sonuçları ve grafikleri alınabilmektedir. Konu yöntem bölümünde ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Bilgisayar ve ağ sistemi Şekil 3.12’de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. Deney düzeneğinden bir görünüm

3.2.14. Enjektör

Şekil 3.13 gösterilen enjektör, ince mineral yağın kalorimetre içerisine yerleştirilen harç numunesi ile termometre arasına enjekte edilmek için kullanılmıştır. Termometre cebine yerleştirilen yağ sayesinde Deney numunesi ile termometre arasındaki ısıl temas tam olarak sağlanmıştır.



Şekil 3.13. Enjeksiyon işlemi

3.2.15. Atmosferik buhar kürü makinesi

Isıl işleme uygulanacak numuneler Şekil 3.14’da gösterilen ANKATEST firmasına ait atmosferik buhar kürü cihazı kullanılarak kür işlemine tabi tutulmuştur.



Şekil 3.14. Atmosferik buhar kürü makinesi

3.2.16. Diğer Aletler

Harç sıyırma işlemlerinde raspa, mala gibi aletlerden faydalanılmıştır.

Yöntem

Bu bölümde; agregâ özelliklerini belirlemek için uygulanan yöntemler ile bu agregalarla üretilen farklı beton karışımların belirlenmesi, karışım oranlarının hesaplanması, taze betonun üretimi ve sertleşmiş betonun özelliklerinin saptanmasında uygulanan yöntemler açıklanmıştır. Ayrıca Yarı Adyabatik yöntemle çimento hidratasyon ısıları belirlenmeye çalışılmıştır. Deneyler Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

Gerek agregâ deneylerinde gerekse deneylerinin yapılmasında TSE standartları göz önünde bulundurulmuş ve bu standartlara titizlikle uyulmuştur. Ancak kullanılan standart yöntemlerin ayrıntılarına girilmemiş yalnızca özellik gösteren yöntem ve işlemler belirtilmiştir. Çimentolar menşei belli olan yerlerden tedarik edildiğinden ve kimyasal analizleri yapılmış olduğundan ayrıca çimento deneylerine tabii tutulmamıştır. Çimentoların kimyasal analiz sonuçları Ek 1, Ek 2, Ek 3, Ek 4, Ek 5 ve Ek 6'da bildirilmiştir.

Deneylerden; agregâ deneyleri, agregalar Aşkale Çimento Fabrikası Kum Ocağından alındığı için agregâ özellikleri Aşkale Çimento Fabrikasında tayin edilmiştir. Elek analizi, elenen malzemenin yıkanması Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Malzemeleri ve Tatbiki Mekanik Laboratuvarı'nda yapılmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlar Araştırma Bulguları Bölümü'nde verilmiştir.

3.2.17. Agrega deneylerinde uygulanan yöntemler

Deneylerde kullanılmak üzere laboratuara getirilen dere agregası için agrega deneyleri yapmak üzere numune alınmasında TS EN 13055-1’de belirtilen yöntemle agregalar alınmıştır.

Bu metot da belirtildiği gibi, laboratuardaki malzemenin tümünü temsil etmesi için yığının her tarafından alınan örnekler düz bir zemin üzerine her tarafı eşit ve çapı yüksekliğinin dört katı olan bir daire oluşturacak şekilde serilmiştir. Daha sonra bu dairesel yığın kürekle dörde bölünmüş, karşılıklı iki parçası atılıp, deneyler için yeterli miktarda örnek kalıncaya kadar çeyrekleme işlemine devam edilmiştir. Her bir deney için, numuneler üzerinde üçer defa agrega deneyleri yapılmış ve sonuçların aritmetik ortalamaları alınmıştır. Bu değerler Araştırma Bulguları ve Tartışma bölümünde verilmiştir. Dere agregasının tane büyüklüğü dağılımı TS 3530’a göre belirlenmiştir. Deneylerde TS 3310’a uygun toplama kabı ve 4 mm, 8 mm, 16 mm göz açıklıklı kare delikli tel elekler kullanılmıştır. Elenen bu malzemeler kirli suyu tamamen gidene kadar yıkanarak kurutulmuş ve bu şekilde kullanıma hazır hale getirilmiştir.

Organik madde tayini deneyi TS EN 1744-1’e göre yapılmıştır. Bu deneyde %3’lük NaOH (sodyum hidroksit) çözeltisi içinde numune 24 saat bekletilerek gözlem yapılmıştır.

İnce madde oranı tayini deneyi TS EN 933-10’da belirtilen esaslara göre, özgül ağırlık ve su emme deneyleri ise TS 3526’ya göre yapılmıştır.

3.2.17.a. Tane büyüklüğü dağılımı (Granülometri)

Beton agregaları ile ilgili özelliklerin tarif edildiği TS 706 EN 12620'ye göre agregaların tane büyüklüğü dağılımı TS 3530 EN 933-1'e uygun olarak belirlenmelidir. Bu standarda göre yapılan deneyde yıkanmış ve kurutulmuş malzeme elek takımına dökülmüştür. Elek takımı, yukarıdan aşağıya elek göz açıklıkları düzenli bir biçimde azalacak şekilde birbirine geçirilmiş ve düzenlenmiş elekler, tava ve kapaktan ibarettir. Tecrübeler sonucunda, tüm ince tanelerin yıkama ile uzaklaştırılamadığı belirlenmiştir. Bu nedenle 63 µm göz açıklıklı deney eleği de elek takımına ilave edilmelidir. Tava ve kapak kullanılarak malzeme kaybına meydan vermeden elek takımı makine ile sarsılmıştır. Daha sonra sırayla büyük göz açıklıklı elekten başlamak üzere altına tava ve üzerine kapak konularak her bir elek takımından ayrılarak, elle tek tek eleme işlemine devam edilmiştir. Her eleği geçen malzeme elek setinde bulunan bir sonraki elek üzerine konularak işleme devam edilmiştir. Standarda göre eleme işlemi esnasında, bir dakika süre içerisinde elek üstü malzemede kütlece %1'den daha fazla değişiklik olmuyorsa eleme işleminin tamamlandığı kabul edilebilir. En büyük göz açıklığına sahip elek üzerinde kalan kısım tartılıp, kütlesi %1 hassasiyette R_1 olarak kayıt edilmiştir. Altındaki elekte kalan kısım için aynı işleme devam edilmiş ve kütlesi R_2 olarak kayıt edilmiştir. Elek takımındaki bütün eleklerde aynı işleme devam edilerek her bir elek üzerinde kalan numunelerin kütlesi $R_3, R_4 \dots R_i$ olarak tartma işlemine devam edilmiştir. Tavada kalan malzeme tartılarak kütlesi P olarak kayıt edilmiştir. Değişik kütleler kayıt edilmiştir. Her bir elek fraksiyonunun kütlesi (R_i), orijinal kuru kütlenin (M_1) yüzdesi olarak hesaplanmıştır. 63 mikrometreye kadar her bir elekten geçen orijinal kuru kütlenin kümülatif yüzdesi hesaplanmıştır.

Aşağıdaki eşitlikten 63 mikrometre göz açıklıklı eleği geçen ince tanelerin yüzdesi hesaplanmıştır.

$$f = [(M_1 - M_2) + P / M_1] \times 100$$

Burada M_1 , deney kısmının kuru kütlesi (kg); M_2 , 63 mikrometre göz açıklıklı elek üzerinde kalan malzemenin kuru kütlesi (kg); P, tavadaki malzeme kütlesi (kg)'dir.

TS 3530 EN 933-1'e göre; eğer R_i ve P kütlelerinin toplamı M_2 kütlelerinden %1'den daha fazla farklı ise, deney tekrar edilmelidir.

Yukarıda anlatıldığı şekilde standarda uygun olarak üç farklı tane sınıfa ayrılmış olan agregalar üzerinde yapılan elek analizi deneylerinin sonuçları Araştırma Bulguları bölümünde sunulmuştur.

3.2.17.b. Organik kökenli madde tayini deneyi

Deney numunesi 8 mm göz açıklı kare gözlü tel elekten geçen agrega ölçü silindirisinin 130 ml işaret çizgisine kadar doldurulmuştur. Üzerine 200 ml'lik işaret çizgisine ulaşınca kadar %3'lük sodyum hidroksit çözeltisi ilave edilerek iyice karıştırılmıştır. 24 saat bekletildikten sonra numuneler üzerindeki sıvının rengine bakarak agregada zararlı organik madde olup olmadığına karar verilmiştir.

Çizelge 3.2. Organik kökenli madde raporu⁶

24 saat sonra oluşabilecek renk
Renksiz
Açık sarı
Koyu sarı
Kırmızı
Kahverengi

⁶ İlk iki sonuç organik madde yönünden

3.2.18. Beton karışım seçeneklerinin belirlenmesi

Beton karışım hesabı, istenen kıvam, işlenebilme, dayanım, dayanıklılık, hacim sabitliği ve diğer aranan özelliklere sahip, en ekonomik betonu elde edebilmek amacıyla gerekli agrega, çimento, su, hava ve gerektiğinde katkı maddesi miktarını tespit edebilmek için yapılan hesaptır (Anonim 1985; Türkmen 1997) (Çizelge 3.3).

Çizelge 3.3. Beton karışım oranı

Malzemeler	1 m ³ betondaki miktar (kg)	Her bir grup için (20 dm ³) gerekli miktar (kg)
Çimento	350	7,000
Su	200	4,000
0-2	750	15,000
2-8	455	9,100
8-16	662	13,240
Toplam	2422,25	48,445

Betonu oluşturacak agregaların en büyük tane boyutu, kullanılacağı yapı elamanının cins ve en dar kesitinin boyutu ile ilişkilidir. En büyük tane boyutu en dar kesitin kalıp genişliğinin 1/5'inden, döşeme derinliğinin 1/3'ünden küçük seçilmelidir (Baradan 1994). Beton karışımlarında kullanılan agreganın en büyük tane boyutu 16 mm olarak alınmıştır. Agreganın tane dağılımı ise en büyük tane çapına bağlı olarak TS EN 12620'de verilen sınır değerler içinde kalacak şekilde ayarlanmıştır. Bu ayarlama sonucu tane sınıflarının oranları, 0-2 için %40, 2-8 için %25, 8-16 için %35 olarak belirlenmiştir. 1 m³ yerleşmiş beton için malzeme miktarları hesaplanırken önce çimento dozajı çimentonun özgül ağırlığına bölünerek çimento hacmi hesaplanmış ve çimento dozajı su/çimento oranı ile çarpılarak su miktarı bulunmuştur. Sonra hava hacmi yapılan ön dökümlerle taze beton için hava miktarı bulunmuştur. Bu bilgiler göz önüne alınarak çimento, su ve hava hacimlerinin 1 m³'ten çıkarılmasıyla bulunan toplam agrega hacmi

farklı tane sınıflarına ayrılmış agregaların karışım oranlarıyla ve özgül ağırlıklarıyla çarpılarak ağırlık cinsinden agrega miktarları bulunmuştur.

3.2.19. Beton dökümü

Betoniye malzeme konulmadan önce iç yüzeyleri iyice temizlenerek ıslatılmıştır. İri agregadan başlayarak ince agregaya doğru bir sıralama ile agregalar, ardından çimento ilave edilmiş ve bu şekilde beş dakika karıştırılmıştır. İçerisine su ilave edilip tekrardan karıştırılmıştır. Ara ara mala yardımı ile karışımın dip kısımlarının da yeterince karıştırılması sağlanmıştır. Çökme değeri 15 cm baz alındığından, bu değeri tutturabilmek için suyun tamamı kullanılmadan su ilavesi yapılmış ve istenilen çökme değeri tutturulmasına rağmen (Şekil 3.15) 5 grupta Çizelge 3.4’de gösterildiği gibi bir miktar su artışı olmuştur.

Çizelge 3.4. Deney gruplarında artan su ve değişen su/çimento oranları

Kür tipi	Çimento tipi	Artan Su (gr)	Slamp	Su/Çimento	Düzeltilmiş Su/Çimento	Yaş Ağırlık (gr/dm ³)	Birim
Buhar Kürü	CEM I 42,5 R	372	15	0,57	0,52	2388	
	CEM II 32,5 B-S	426		0,57	0,51	2393	
	BAB	600		0,57	0,49	2360	
Suda Kür	CEM I 42,5 R	438		0,57	0,52	2396	
	CEM II 32,5 B-S	0		0,57	0,57	2364	
	BAB	561		0,57	0,50	2365	

Üretilen betonlar 10x20 cm boyutlarındaki plastik silindir kalıplara yerleştirilmiştir. Yerleştirme işleminden önce, numunenin kalıplardan rahat çıkması için kalıp iç yüzeyleri ince motor yağıyla yağlanmıştır. Karışım üç aşamada doldurulup her aşamada 25 kez 16 mm çapında ve 60 cm çelik çubuk ile şişlenmiştir. Kalıplar tamamen doldurulduktan sonra yeterince tokmaklanarak yüzeyleri çelik mala ile düzeltilmiştir.

Nem kaybını önlemek maksadıyla numune yüzeyleri naylon parçasıyla örtülmüş, su ve hava kürü numuneleri için 24 saat kalıplarda bekletilmiştir.



Şekil 3.15. Çökme değeri ölçümü

3.2.20. Taze beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Beton üretildikten sonra TS EN 12350-1’de belirtilen yönergeler uygulanarak taze beton deneyleri yapılmıştır. Yine standart gereğince bu deneyler karıştırma işlemi bittikten sonra en fazla 15 dakika içinde tamamlanmıştır.

Taze beton deneylerinden, önce kıvam deneyi yapılmıştır. Bu deneyin yapılmasında standartlarda belirtilen yöntemler ve standart çökme hunisi kullanılmıştır. Deneye başlamadan önce çökme hunisinin iç yüzeyi ıslak bir bezle silinmiş ve düz, nemli ve su emmez bir yüzey üzerine konulmuştur (Anonim 2002).

Taze beton huniye üç tabaka halinde ve her tabaka huninin yaklaşık üçte birini dolduracak şekilde yerleştirilmiştir. Her tabaka 16 mm çapında ve 60 cm uzunluğundaki şişleme çubuğu ile 25'er defa kenarlardan ortaya doğru dairesel olarak düşey bir şekilde şişlenmiştir. Daha sonra huni yavaşça düşey olarak yukarı doğru çekilerek yığının yanına konulmuştur. En sonunda huninin üst yüzeyi ile taze betonun üst yüzeyi arasındaki yükseklik farkı okunarak betonun çökme değeri bulunmuştur. Deney parametrelerinde 15 cm sabit çökme değeri bulunduğu için tüm gruplar için gereken çökme değeri sağlanmıştır.

İkinci olarak taze betonun birim hacim ağırlık deneyi yapılmıştır. Bunun için kalıplardan birinin yağlama işleminden sonraki boş ağırlığı ölçülmüş, kalıp doldurulup yüzeyi düzeltildikten sonra ki ağırlığı ölçülmüştür. Bulunan ağırlıktan boş kalıp ağırlığı çıkarılmıştır. Bu darası düşülmüş ağırlık hesaplanan kalıp hacmine bölünerek sertleşmemiş beton için birim hacim ağırlık tespit edilmiştir (Çizelge 3.4.).

3.2.21. Betonun kürü

BAB çimentosunun standart üretimi olmamasından dolayı temininde çekilen güçlükler nedeni ile çalışmada toplam 18 numune dökülmüştür. Bu numunelerin yarısına su kürü, diğer yarısında buhar kürü yöntemi uygulanmıştır. Laboratuvar koşullarında 24 saat bekletilen numuneler kalıpları söküldükten sonra kür işlemine tabi tutulmuştur.

Su kürü için kür havuzuna numuneler yerleştirilmeden önce su ile doldurulmuş, kirece doymun hale getirilmiş ve sıcaklığının $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ olması sağlanmıştır. Su küründeki numuneler 28. gün sonunda kür havuzundan çıkarılmıştır. Normal oda sıcaklığında 24 saat bekledikten sonra gerekli deneyler yapılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Kür havuzu ve su kürü uygulanan numuneler

Buhar kürü için, hazırlanan numuneler Çizelge 3.5’de gösterilen karakteristikler kullanılarak toplam 36,5 saat kür işlemine tabi tutulmuş ve 24 saat dinlendirilen numunelere gerekli deneyler yapılmıştır.

Çizelge 3.5. Buhar kürü çevrimleri ve karakteristikleri

Buhar Kürü Çevrimleri	Ön bekleme Dönemi	Isıtma Dönemi	Isı Emdirme Dönemi	Soğutma Dönemi	Toplam B.K. Çevrimi
Sıcaklık(°C)	25	25-70	70	70-32	-
Zaman(Dakika)	240	240	1440	270	2190

3.2.22. Sertleşmiş beton deneylerinde uygulanan yöntemler

Bu çalışmada CEM I 42,5 R, CEM II 32,5 B-S ve Borlu Aktif Belit Çimento olmak üzere üç farklı çimento türü kullanılmıştır. Üretilen betonların hepsinin boy, en, ıslak birim ağırlık ölçümleri yapılmıştır. Toplam 18 adet Ø100x200 mm boyutunda numune üretilmiş olup, bu numunelere normal su kürü uygulanmıştır. Bu ısıt işlem görmüş ve görmemiş olan 18 adetlik numunelerden, her çimento türü ile 3'er numune hazırlanmıştır. Su kürüne tabi tutulan numunelerden her bir çimento türü için 3'er numune, 28 günlük standart basınç dayanımları tespit edilmek üzere schmidt çekici deneyinin ardından basınç deneyine tabi tutulmuştur. Kür işlemi sonrası tüm numunelerin; ağırlık, boy, çap ölçümleri yapılmıştır.

Çizelge 3.6. Hazırlanan numuneler ve kullanım sayıları

	Buhar Kürü			Suda Kür		
	CEM I 42,5 R	CEM II 32,5 B-S	BAB	CEM I 42,5 R	CEM II 32,5 B-S	BAB
Kür Sonrası Dayanım	3	3	3	3	3	3



Şekil 3.17. Sertleşmiş beton deneyleri için hazırlanan numuneler

3.2.22.a. Schmidt çekici yöntemi

Beton test çekicinin uygulanmasında, aletin içerisinde yer alan bir kütle vasıtasıyla sertleşmiş betonun yüzeyine darbe vurulmaktadır. Yaylı bir sisteme bağlı olan kütle, geri sıçramaktadır. Kütlenin ne kadar geri sıçradığı, alet üzerindeki bir göstergeden sayısal olarak ölçülebilmektedir. Doğal olarak, daha sert yüzeylere sahip olan betonlarda, kütlenin geri sıçraması daha çok olmaktadır.

Numunelerin her birinin yüzeyindeki değişik bölgelere beton test çekici ile 20'şer darbe vurularak, her numune üzerinde elde edilen geri sıçrama değerlerinin ortalaması bulunmuştur. Daha sonra, her numune, deney presi vasıtasıyla kırılma deneyine tabi tutulmuş ve basınç dayanımları hesaplanmıştır. Daha sonra da, deney presi kullanarak bulunan basınç dayanımları ile beton test çekici uygulamalarından elde edilen ortalama geri sıçrama değerleri arasında korelasyon kurulmuştur.

3.2.22.b. Yarı adyabatik yöntemle hidrasyon ısının tayini

Langavant yöntemi olarak da bilinen yarı adyabatik yöntem, kalorimetreyle çimentonun hidrasyon ısının ölçüm yöntemini kapsar. Deneyin amacı ilk birkaç gün boyunca çimentonun hidrasyon ısının sürekli olarak ölçülmesidir. Hidrasyon ısı, bir gram çimento için joule (Joule.g-1) olarak ifade edilir. Yarı adyabatik yöntem, Kimyasal bileşimine bağlı olmaksızın çabuk priz alan çimentolar dışındaki tüm çimentolar ve hidrolik bağlayıcılara uygulanabilir.

Yarı adyabatik yöntemle 41 saatte elde edilen sonuçlar ile çözelti yöntemiyle 7 günde elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, iki yöntem arasında çok iyi bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir (TS EN 196/9). Bu korelasyona uygun hareket edebilmek amacıyla deneylerde 41 saatlik sonuçlar esas alınmıştır. Deneyler (TS EN 196/9) yazan esas ve usullere uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.18. Deney düzeneği

Yarı adyabatik yöntem, bir kalorimetreye yeni (hemen) yapılan harç numunesinin yerleştirilmesiyle oluşan sıcaklık yükselmesine göre yayılan ısı miktarını tayin etmeye dayanır. Verilen bir zaman noktasında numunede bulunan çimentonun hidratasyon ısısı, deney süresi boyunca kalorimetrede toplanan ısı ve ortamdaki atmosfere yayılan ısı kaybının toplamına eşittir. Harcın sıcaklık artışı bir referans kalorimetredeki inert bir numunenin sıcaklığı ile karşılaştırılır. Sıcaklık artışı, esas olarak çimentonun karakteristiklerine bağlıdır ve normal olarak 10 K ile 50 K arasındadır.

a. Hesaplamalar

Yarı adyabatik yöntemle deneylerimizde ki hesap yönteminin daha iyi anlaşılabilmesi için aşağıdaki Çizelge 3.7’de örnek bir hesaplama alınmış ve çizelge 3.8’de bu örnek için hesaplama adımları açıklanmıştır. Hesaplama adımları ilk 4 satır için gösterilmiş olup diğer satırlarda da aynı hesap yöntemi kullanılmıştır.

- Deney ve referans numune sıcaklıklarının ölçümlerinin alındığı zaman;
- Deney kalorimetresinin sıcaklığındaki farkın referans kalorimetreninki ile karşılaştırıldığındaki sıcaklık artışı;

- Kalorimetreden ısı kayıpları;
- İlk 24 saat bitiminde hesaplanan hidrasyon ısısı.

Çizelge 3.7. Hidrasyon hesaplamaları sonuçları (TS EN 196/9)

Zaman h	Sıcaklık artışı K	Isı kayıpları J.g-1	Hidrasyon ısısı J.g-1
0,33	1,92	0,06	12,3
1	1,99	0,29	13,0
2	2,15	0,67	14,4
3	2,40	1,08	16,4
4	2,85	1,56	19,8
5	3,56	2,14	24,9
6	4,47	2,87	31,4
7	5,50	3,79	38,9
8	6,54	4,89	46,7
9	7,54	6,19	54,4
10	8,47	7,67	61,8
11	9,39	9,33	69,4
12	10,24	11,15	76,6
13	11,04	13,14	83,7
14	11,77	15,27	90,5
15	12,47	17,55	97,3
16	13,15	19,95	104,0
17	13,85	22,49	111,0
18	14,55	25,18	118,2
19	15,22	27,99	125,3
20	15,77	30,93	131,8
21	16,16	33,96	137,3
22	16,39	37,05	141,8
23	16,48	40,18	145,5
24	16,40	43,30	148,2

Çizelge 3.8’de hidrasyon ısısı hesabının yapıldığı aşamaları detaylı inceleyecek olursak;

- Kalorimetre, hidrasyon yaşını (sıra 1) ve deney numunesinin belirlenen sıcaklık artışını (sıra 2) kaydeder.

- Bu kayıt işlemi referans numunenin üzerinde olduğunda gerçekleştirilir.
- Hesaplamalar, kalorimetrede toplanan ısı (sıra 3), çimentonun her gramı (sıra 4) (Bağıntı 3'e bakılmalıdır), her süre boyunca ortalama sıcaklık artışı (Bağıntı 7'ye bakılmalıdır), hesaplama süresi esnasındaki toplam ısı kaybının ortalama katsayısı (sıra 5) (Bağıntı 8'e bakılmalıdır) ve her aralıktaki süre (sıra 6) için yapılır.
- Yukarıda belirtilenlerden, atmosfere yayılan toplam ısı kaybı (sıra 7) ve çimentonun her bir gramının ısı kaybı (sıra 8) her sürenin sonunda hesaplanmalıdır (Bağıntı 6'ya bakılmalıdır). Her sürenin sonunda kümülatif (birikimli) hidrasyon ısı (sıra 9) kalorimetrede toplanan ısı toplamı (sıra 3) ve toplam ısı kaybı (sıra 8) olarak tayin edilir.

Çizelge 3.8. İlk dört zaman aralığı için hesaplama detayları (TS EN 196/9)

(Sıra 1) Yaş h	0,33	1	2	3
(Sıra 2) $\Theta_i = T_3 - T_R$ K	1,92	1,99	2,15	2,4
(Sıra 3) $A = (c/mc) * \Theta_i = 6,39 * \Theta_i$ j.g-1	12,28	12,72	13,75	15,35
(Sıra 4) $\bar{\Theta}_i = (Q_i + Q_{(j-1)}) / 2$ K	$(1,92 + 0) / 2 = 0,96$	$(1,92 + 1,99) / 2 = 1,95$	$(2,15 + 1,99) / 2 = 2,07$	$(2,40 + 2,15) / 2 = 2,27$
(Sıra 5) $\bar{\Theta}_{ai} = a + b * \bar{\Theta}_i$ j*1/h*K/1	$63 + (0,216 * 0,96) = 63,2$	$63 + (0,216 * 1,95) = 63,4$	$63 + (0,216 * 2,07) = 63,4$	$63 + (0,216 * 2,27) = 63,5$
(Sıra 6) $\Delta t_i = t_i - t_{(i-1)}$ h	$0,33 - 0 = 0,33$	$1 - 0,33 = 0,67$	$2 - 1 = 1$	$3 - 2 = 1$
(Sıra 7) $\sum \bar{\Theta}_{ai} * \Delta t_i$ J	$63,2 * 0,96 * 0,33 = 20,02$	$20,02 + (63,4 * 1,95 * 0,67) = 103,1$	$103,1 + (63,4 * 2,07 * 1) = 234,4$	$234,4 + (63,5 * 2,27 * 1) = 378,9$
(Sıra 8) $B = 1/mc * \sum \bar{\Theta}_{ai} * \Delta t_i$ j.g-1	$(1/350) * 20,02 = 0,06$	$(1/350) * 103,1 = 0,29$	$(1/350) * 234,4 = 0,67$	$(1/350) * 378,9 = 1,08$
(Sıra 9) Q = A + B j.g-1	$12,28 + 0,06 = 12,3$	$12,72 + 0,29 = 13,0$	$13,75 + 0,67 = 14,4$	$15,35 + 1,08 = 16,4$

Deneylerde bileşimi Çizelge 3.9’da belirtilen miktarlarda TS-EN-196/9 uygun olarak bileşim hazırlanarak, karıştırıcıyla karıştırılarak homojen hale getirilmiştir, Karıştırıcı ile işlem sırasında; karıştırma kabına kum ve daha sonra çimento dökülmüştür, düşük hızda 30 saniye süreyle kum ve çimento karıştırılarak homojenize edilmiştir. Bu karışım suya dökülerek. Zaman kaydedilmiştir ve hemen düşük hızda 60 saniye süreyle karıştırılmıştır. Karıştırıcı yüksek hıza ayarlanarak 60 saniye daha karıştırılmıştır.

Çizelge 3.9. TS EN 196/9 standartlarına göre hidratasyon ısısının yarı adyabatik yöntemle belirlenmesinde deneyinde kullanılan malzeme miktarları

Harç Bileşeni	Miktar
Kum	1080 g
Çimento	360 g
Su	180 g

Çizelge 3.9’da belirtilen miktarlarda harç bileşimi hazırlanmış, Harç karıştırıldıktan sonra önceden darası alınmış mortar kaplarına 1575(gr+- 1) harç bileşimi yerleştirilmiş ve tartılmıştır. Tartma işleminden sonra hemen harç kutusu deney kalorimetresine yerleştirilip tıpa ile kapatılmıştır. Termometre yaklaşık olarak deney numunenin merkezinde olacak şekilde termometre cebindeki yere yerleştirilmiştir. Deney numunesi ile termometre arasındaki ısı temasını sağlamak için termometre cebine (2,5 cm³) ince mineral yağ enjekte edilmiştir. Tıpanın etrafındaki açıklık tıpa boyunca kilitleme cihazıyla kapatılarak yalıtılmıştır. Bütün bu işlemlerin gerçekleşmesi için gerekli sürenin 6 dk’yı geçmemesine dikkat edilmiştir (Karıştırıcıya suyun eklenmesi ile ölçümlere başlanması arasında geçen süre). Bir ucu harç numunesine yerleştirilen Termometrenin bir ucu modeme bağlanmış olup bu modem network sistemi yardımıyla bilgisayara entegre edilmiştir (Şekil 3.18). Bu network sistemi yardımıyla numuneden termometre vasıtasıyla alınan değerler bilgisayara aktarılabilmiştir. Deney toplamı 41 saat sürdürülmüş olup her 1 dk da numunelerden ölçüm alınmıştır. Alınan ölçümler Ciriüs ve Prolab, cemtech programları yardımıyla analiz edilerek hidratasyon Isıları tespit edilmiş ve Excel programı yardımıyla istenilen grafikleri (hidratasyon hızı ve

hidratasyon ısısı) çizilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tartışma ve Yorum bölümünde gösterilmiştir. Ayrıca deney sonunda harç numunesinin darası tekrar alınarak tartılmıştır. Kütle değişimleri 2 gr.'dan fazla ise deney tekrarlanmıştır. Deneyler yapılırken TS EN 196/9 (çimento deney yöntemleri - bölüm 9: hidratasyon ısısının yarı adyabatik yöntemle belirlenmesi) belirtilen hususlara uyulması konusunda özen gösterilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu bölümde agrega ve beton deneylerinden elde edilen sonuçlar sunulmuş ve elde edilen sonuçlar grafikler ve literatür bilgileri yardımıyla yorumlanmıştır.

4.1. Agregada Deneyleri Sonuçları

Deneylerde kullanılan agreganın maksimum tane çapı 16 mm'dir. 8 mm ile 16 mm tane sınırları arası iri, 2-8 mm'nin mm tane sınırları arası, 2 mm altındaki agrega ince olarak seçilmiştir. Bu çalışmaya konu olan betonlarda %40; 0/2 tane sınırları arası agrega, %25; 2/8 tane sınırları arası agrega ve %35; 8/16 tane sınırları arası agrega oranları kullanılmıştır. Kullanılan agregaya ait bilgiler Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Agregada özellikler

Agregada Cinsi	Özgöl ağırlık(gr/cm^3)	Agregada karışım %'leri	(%)rutubet içeriği	Absrb. %'leri su emme
0/2	2,710	40	0	2,75
2/8	2,590	25	0	1,3
8/16	2,650	35	0	1,24

4.1.1. Tane büyüklüğü dağılımı (Granülometri)

Aşkale çimentodan elde edilen elenmiş agregalara ait elek analizi Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Agregalar için elek analizi sonuçları

TS 706/B'ye en uygun yaklaşıma göre								
Agrega Cinsi	Elekler							
	32mm	16mm	8mm	4mm	2mm	1mm	0.5mm	0.25mm
0/2	100	100	100	99	93	79	52	20
2/8	100	100	97	59	21	7	2	1
8/16	100	96	10	1	0	0	0	0

4.1.2. Agregada organik madde tayini

Agregaların organik madde içeriği basit bir asit-baz reaksiyonu ile belirlenmiştir. TS EN 1744-1 Madde 14.1'e uygun olarak yapılan deneyde %3 lük NaOH çözeltisi içinde bekletilen numunede renk değişimi gözlenmemiştir. 24 saat süreyle çözelti içerisinde agrega bekletildikten sonra sıvı berrak ve renksiz gözlemlendiğinden agregada zararlı organik madde olmadığı belirlenmiştir. Böylelikle çalışmada kullanılan agregaların beton üretimi için uygun olduğu gözlenmiştir.

4.2. Taze betonun birim hacim ağırlığı

Bu çalışmada taze betonun birim hacim ağırlıkları kalıplara beton dökümü esnasında yapılmıştır. Seçilerek ayrılan bir kalıbın darası alınmış yerleştirme işlemi hassas bir şekilde yapılarak tartılmıştır. Elde edilen ağırlıktan dara çıkarılarak kalıbın hacmine bölünmek suretiyle taze betonun birim hacim ağırlığı tespit edilmiştir. Buna göre suda küre tabi tutulacak olan gruplardan CEM I 42,5 R, CEM II 32,5 B-S ve BAB çimentosuna ait birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla; 2396 gr/dm³, 2364 gr/dm³ ve 2365 gr/dm³ olarak tespit edilmiştir. Atmosferik buhar küreine tabi tutulacak olan gruplardan CEM I 42,5 R, CEM II 32,5 B-S ve BAB çimentosuna ait birim hacim ağırlık değerleri sırasıyla; 2393 gr/dm³, 2388 gr/dm³ ve 2360 gr/dm³ olarak tespit edilmiştir.

4.3. Sertleşmiş Beton Deneyleri

Su ve atmosferik buhar kürüne tabi tutulan üç farklı çimento tipindeki toplam altı grup numune kür işleminden sonra schmidt çekici deneyi ve basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur.

4.3.1. Schmidt çekici ve basınç dayanımı sonuçları ve değerlendirilmesi

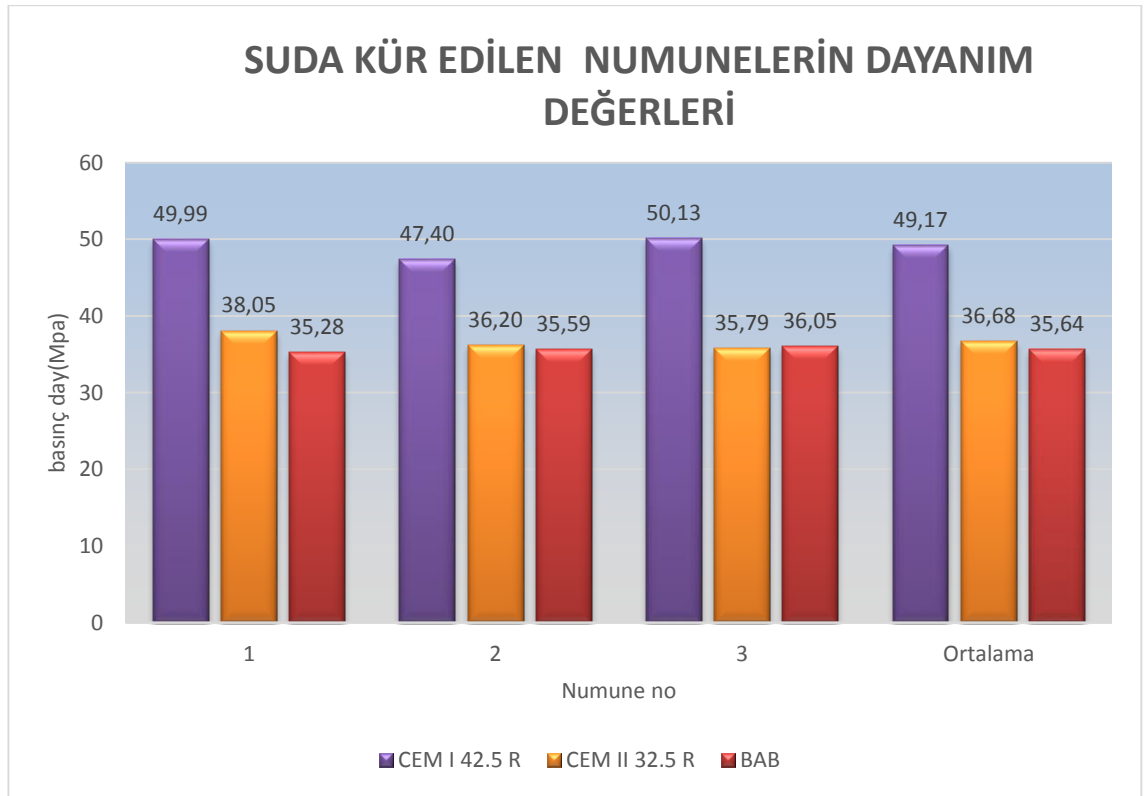
Atmosferik buhar kürü ve 28 günlük su kürü sonunda schmidt çekici deneyinin ardından pres makinesinde kırılan numunelerin basınç dayanımları elde edilmiştir (Çizelge 4.3).

Çizelge 4.3. Sertleşmiş beton deneyleri sonuçları

	Çimento tipi	No	Schmidt	Basınç Dayanımı (MPa)
Atmosferik Buhar Kürü (36,5 saat)	CEM I 42,5 R	1	22,1	31,86
		2	22,7	31,09
		3	21,6	34,48
	CEM II 32,5 B-S	1	17,7	17,75
		2	22,1	17,34
		3	22,0	17,16
	BAB	1	17,2	15,08
		2	18,4	18,21
		3	17,9	16,91
Suda kür (7 günlük)	CEM I 42,5 R	1	21,8	38,0
		2	22,5	35,6
		3	21,1	37,1
	CEM II 32,5 B-S	1	16,0	27,8
		2	13,9	26,8
		3	14,5	26,8
	BAB	1	15,5	25,0
		2	15,0	25,6
		3	15,9	26,3

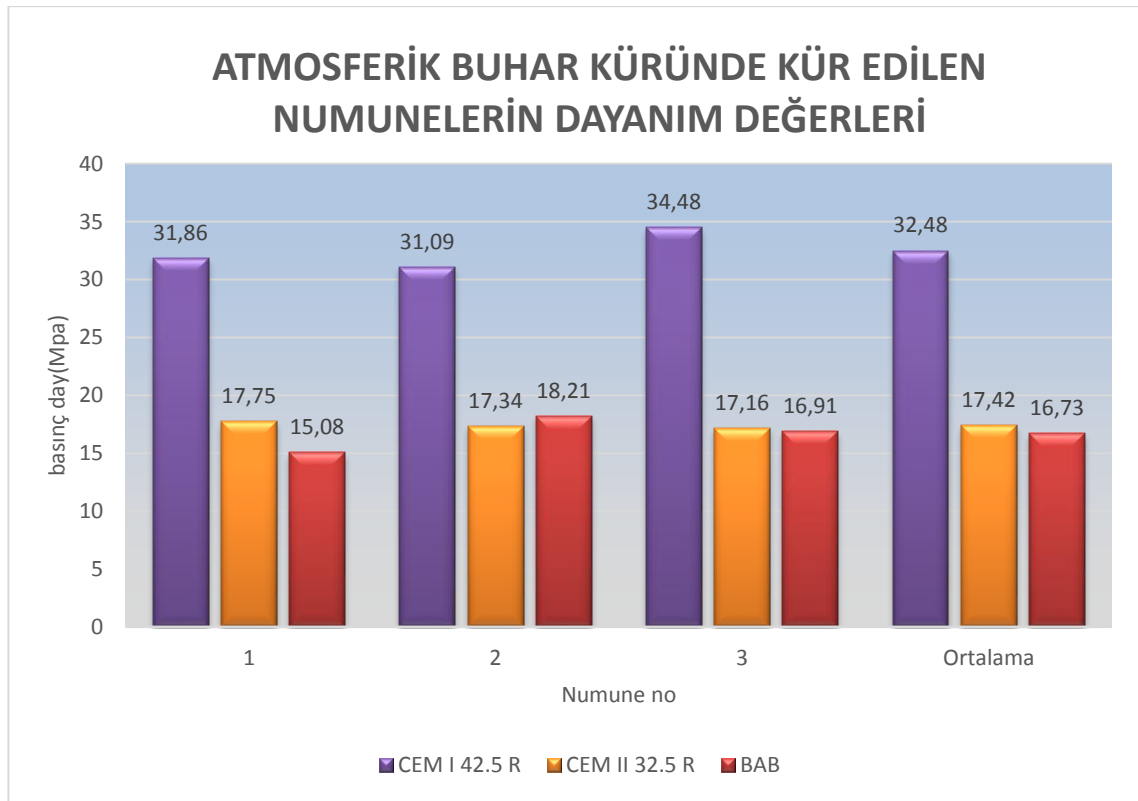
Çizelge 4.3 (devam)

Suda kür (28 günlük)	CEM I 42,5 R	1	29,5	49,99
		2	30	47,40
		3	27,7	50,13
	CEM II 32,5 B-S	1	21,3	38,05
		2	18,8	36,20
		3	19,8	35,79
	BAB	1	21,2	35,28
		2	20,9	35,59
		3	22,4	36,05



Şekil 4.1. Suda kür Yöntemiyle(28 Gün) Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanım Grafiği

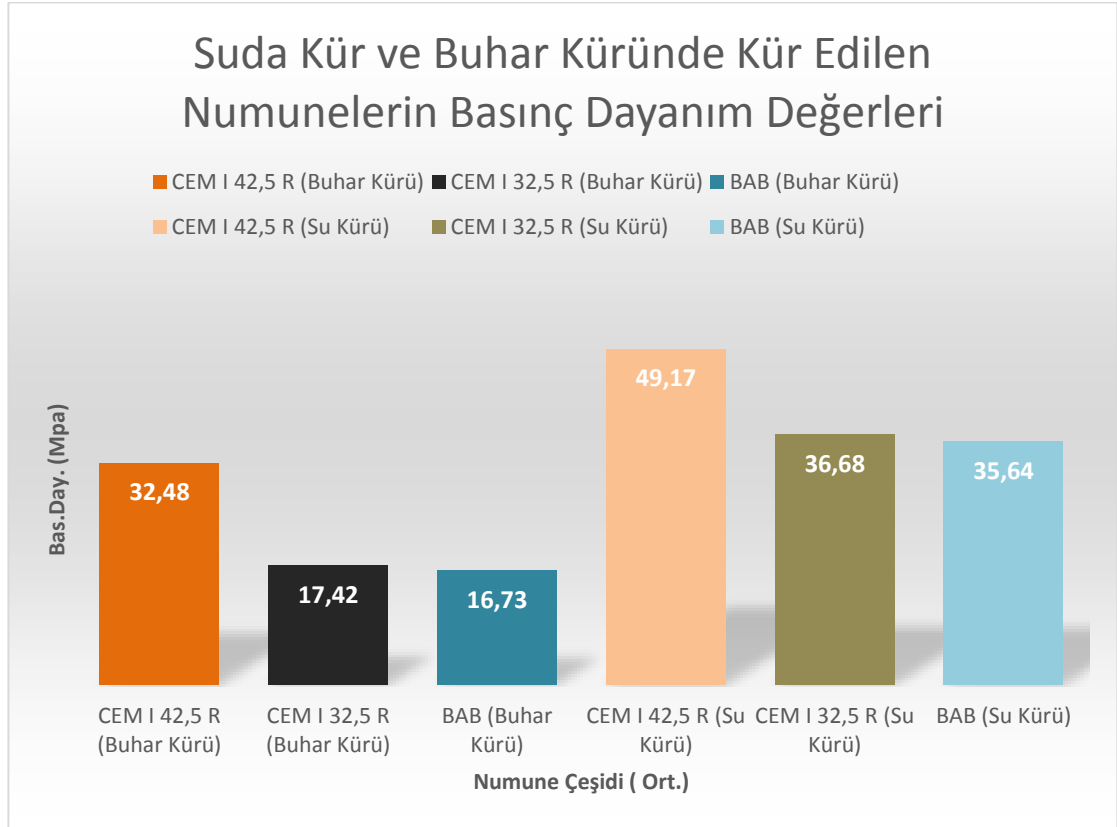
Grafikten de görüleceği üzere en yüksek değerler CEM I 42,5 R çimentosuyla dökülen beton numunelerinde gerçekleşmiştir. Numuneler arasındaki standart sapmalar oldukça düşüktür bu da homojen bir numune grubunun oluştuğunun göstergesidir. Standarta sapması en az olan grup BAB çimentosuyla dökülen numunelere aittir. En fazla fark ise CEM II 32,5 R çimentosuyla dökülen numunelerde gerçekleşmiştir. Yukarıdaki bilgiler ışığında CEM I 42,5 R ve CEM II 32,5 R numunelerinin hepsinde TS EN 197/1 ve kimyasal analiz sonuçlarına uygun değerler elde edilmiştir. BAB Çimentosu ise CEM I 32,5 R değerlerinin gerisinde kalmıştır. Mevcut duruma BAB çimentosunun standart kullanımının olmaması ve buna bağlı olarak standart üretiminin olmaması nedeniyle yeni çimento temin edilememiş olması ve uzun süre bekletilmiş çimento olması sebep gösterilebilir. Ayrıca, beton karışımının kalıplara doldurulması esnasında ani priz görülmüş ve yerleştirme işleminde zorluklar çekilmiştir. Bu olumsuzluklar hazırlanan numunelerin beklenenden daha boşluklu olmasına neden olmuştur.



Şekil 4.2. Atmosferik Buhar Kürü Yöntemiyle (36,5 Saat) Kür Edilen Numunelerin Basınç Dayanım Grafiği

Grafikten de görüleceği üzere en yüksek değerler CEM I 42,5 R çimentosuyla dökülen beton numunelerinde gerçekleşmiştir. Numuneler arasındaki standart sapmalar oldukça düşüktür bu da homojen bir numune grubunun oluştuğunun göstergesidir. Numuneler arasında standart sapması en fazla olan grup suda kürün tersine bu kez BAB çimentosuyla dökülen numunelere aittir. En az fark ise CEM II 32,5 R çimentosuyla dökülen numunelerde gerçekleşmiştir.

Atmosferik buhar kürü yöntemi ile Beton, normal koşullardaki kür yöntemine göre, daha kısa süre içerisinde dayanım kazanmaktadır. O bakımdan, beton elemanlar daha erken bir zamanda kullanılabilirler. Deneyimizde kullanılan numuneler 36,5 saat süreyle buhar kürü makinesinde bekletilmişlerdir. Numunelerin ilk dayanım sınıfı yüksek olan R tipi çimentolu numuneler olduğundan buhar kürü yöntemine tabii tutulmaları ve takip edilmeleri önem arz etmektedir. Grafikten de görüleceği CEM I 42,5 R ve CEM II 32,5 B-M R ait numuneler karakteristiklerine uygun sonuçlar vermiştir. Burdan çıkan bir bulguda BAB çimentosunda erken dayanım kazanım özelliğinin CEM II 32,5 B-M R değerine çok yakın bir değerde seyretmesidir. Düşük hidratasyon değerine sahip olabilecek bir çimentonun erken dayanım değerinin yüksek oluşu çok önemli bir avantaj olarak görülsede bu durumun CEM II 32,5 B-M R yapısındaki %35 mertebelerindeki puzolan ikamesinden de kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Çünkü literatürdeki araştırmalar yüksek miktarlarda doğal puzolan kullanımının (%30-70 arası) priz sürelerini önemli miktarlarda geciktirdiğini ve dayanımı düşürdüğünü ortaya koymuştur (Mortureux *et al.* 1980). Priz sürelerinin önemli miktarda ötelenmesi ve düşürmesi ise erken dayanım üzerinde olumsuz bir etkiye neden olabileceğini düşündürmektedir.



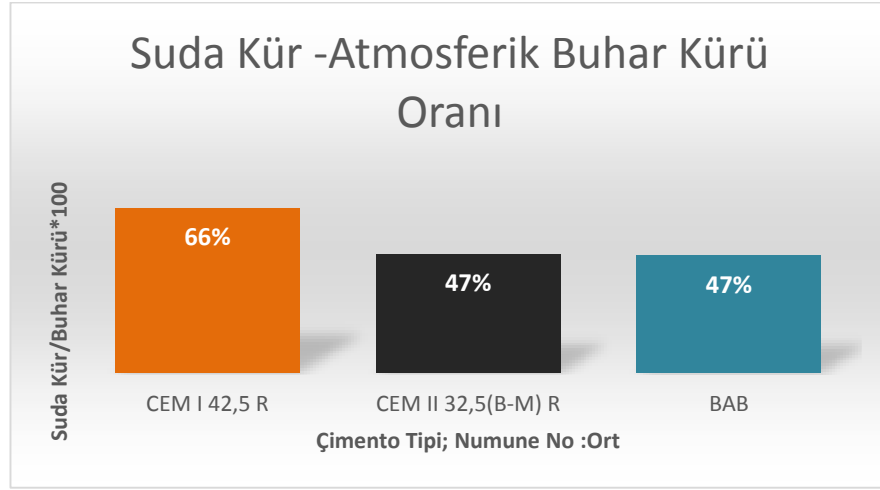
Şekil 4.3. Tüm Gruplara Ait Suda Kür (28 Gün), Buhar Kürü Yöntemleriyle Kür Edilen Numunelere Ait Basınç Dayanım Değerleri Grafiği

Yukarıdaki grafikte tüm gruplara ait suda kür, buhar kürü yöntemlerini kapsayan genel bir tablo yansıtılmıştır. Grafikteki değerler yapılan deneyler neticesinde üç çimento türüne ait ortalama basınç dayanım değerleridir. Bu tabloya göre en çok dikkat çeken hususlardan bir tanesi hemen hemen bütün numune gruplarında Suda kür yönteminde elde edilen değerler ile buhar kürü yönteminde elde edilen değerler arasında bir paralellik söz konusudur (Suda kür değeri yüksek çıkan beton grubunun buhar kürü değeri de yüksek çıkmıştır). Bu paralellik deney sonuçlarının tutarlılığı ve doğruluğu açısından önemli bir göstergedir. Şekil 4.4’de ise buhar kürü yöntemiyle suda kür yöntemlerinin karşılaştırılmasını gösteren bir grafik verilmiştir. Bu grafiğe göre Atmosferik buhar kürü yöntemi uygulanan ortalama numune değerleri ile suda kür uygulanan aynı deney gruplarına oranlanmak suretiyle yüzdelik değerleri bulunmuştur. bu yöntemle 36,5 saatlik hızlı dayanım değerleri ile 28 günlük normal dayanım değerleri ile karşılaştırılmıştır. Grafiğe bakıldığında BAB ve CEM II 32,5 (B-M) R ile

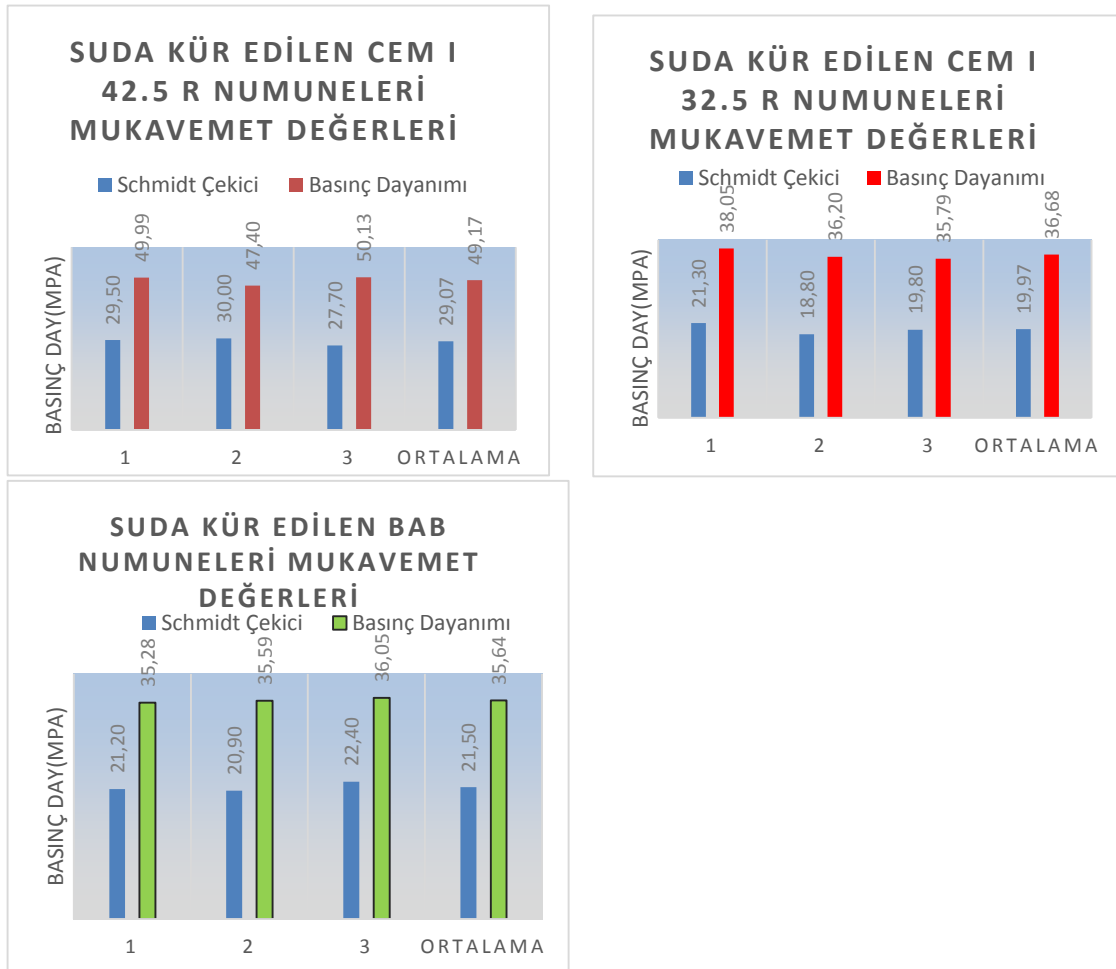
hızlı dayanım değerleri ile 28 günlük değerleri arasında %50 mertebelerinde bir korelasyon söz konusuysa CEM I 42,5 R çimentosuyla yapılan numunelerde bu korelasyon %65 mertebelerindedir. Bu farklılıktaki ana nedenlerden birisi CEM II B-M 32,5 R de bulunan puzolan katkı miktarı CEM I 42,5 R dekinden daha fazla olmasıdır. Çünkü Puzolan veya cüruf katkılı çimentoların üretiminde kullanılan klinker miktarı, portland çimentosunun üretiminde kullanılan klinker miktarından daha azdır. O nedenle, puzolan veya cüruf katkılı çimentoların yapısında bulunan C_3S , C_2S , C_3S ve C_4AF ana bileşenlerin miktarları, portland çimentosunda yer alan miktarlardan daha azdır. Puzolan veya cüruf katkılı çimentolarda bulunan kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin toplamı portland çimentosunda bulunandan daha az olduğu için, puzolan veya cüruf katkılı çimentolar su ile birleştirildiğinde, C-S-H jeli üretimi (dayanım kazanma), portland çimentosunun ki ne kıyasla daha düşük hızda yer almaktadır. O nedenle, puzolan veya cüruf katkılı çimentoların dayanım kazanmaları ilk günlerde daha yavaştır. Ancak, klinkerden gelen kalsiyum silikatlı anabileşenlerin (özellikle C_3S 'nin) hidratasyonu ile oluşan kalsiyum hidroksit, puzolan veya cüruf katkılı çimentolardaki puzolan veya cüruf katkılı reaksiyona girerek yeni C-S-H jellerinin üretimine yol açtıkları için, bu tür çimentoların hidratasyonu ile bir iki hafta sonra, daha çok C-S-H jeli ortaya çıkmaya başlamakta ve ilk zamanlardaki düşük dayanım, sonradan telafi edilmiş olmaktadır. Puzolan veya cüruf katkılı çimentoların nihai dayanımları, portland çimentosunun nihai dayanımı seviyesine gelmektedir (Erdoğan 2003).

Yukarıdaki bulgu ve açıklamalardan da anlaşılacağı gibi puzolan ikamesinin erken dayanımı bir miktar düşürdüğü görülmüştür.

BAB Çimentosu içinde durum benzerdir. Çünkü erken dayanımı sağlayan C_3S (Alit fazı) BAB çimentosunda bulunmamaktadır. Bu nedenle Çimentosu ile yapılan betonların normal Portland çimentosu ile yapılanlara göre erken (3 ve 7 gün) dayanım değerleri daha düşük tespit edilmektedir (DSİ TB 2009).



Şekil 4.4. Tüm Gruplara Ait Suda Kür(28 Gün) ve Buhar Kürü Yöntemleriyle (36,5 Saat) Kür Edilen Numunelere Ait Basınç Dayanım Değerleri Karşılaştırma Bar Grafiği.



Şekil 4.5. Tüm Gruplara Ait Schmidt Çekici-Basınç Dayanım İlişkisini Gösteren Bar Grafikler

Şekil 4.5’de görüldüğü üzere Sonuçlar, gerek numune numarasına (1,2,3 ve ort.) göre kendi aralarında, gerekse çimento tiplerine göre ayrı gruplar halinde değerlendirildiğinde Schmidt Çekici ile basınç dayanım değerleri arasında zayıf bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlara göre Schmidt çekici yönteminin pek güvenilir bir method olmadığı kanısına varılmıştır. Ancak sebebin örnek azlığından olabileceği varsayımında göz ardı edilmemeli ve durum incelenmelidir.

4.3.2. Hidratasyon deney sonuçları ve değerlendirilmesi

Hidratasyon deneyleri 6 ayrı çimento tipi için gerçekleştirilmiş olup çizelge 4.4’de gösterilmiştir. Çimento tiplerine ait detaylı bilgiler Materyal ve Yöntem bölümünde belirtilmiştir. Deneyler ilgili standartlar esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler 48 saatlik hidratasyon periyodunda değerlendirilmiştir. Bunun nedeni Yarı adyabatik yöntemle 41 saatte elde edilen sonuçlar ile çözelti yöntemiyle 7 günde elde edilen sonuçlar arasında çok iyi bir korelasyon olduğunun tespit edilmiş olmasıdır (TS EN 196/9)

Çizelge 4.4 Hidratasyon deneylerine tabi tutulan çimento tipleri

CEM II B-M(P-LL) 32,5 R Çimentosu
CEM I 42,5-R Çimentosu
CEM II A-M (P-LL) 42,5 R Çimentosu
CEM II A-M (P-LL) 42,5 R Çimentosu
BAB Çimentosu
CEM I 52,5 R Beyaz Çimento

Yukarıdaki çimento tiplerine ait hidratasyon deneyleri neticesinde Hidratasyon sürecinde Çimento tiplerine ait zamanla salınan Toplam Isı enerjileri mukayese edilebilmiş ve aynı zamanda zaman faktörüne göre türevleri almak suretiyle eğim değişimleri izlenerek Birim Zamanda Yayılan Isı Miktarları (dq/dt (j /g*t) üzerinden

hidratasyonun hızı, gelişim süreci analiz edilebilmiştir. Tezimizin ana konusu olması münasebetiyle bütün deney grupları BAB çimentosuyla mukayeseli olarak değerlendirilmiştir. Aşağıda karşılaştırmalı olarak deney sonuçları aktarılacaktır.

Aşağıda Çizelge 4.5 ve 4.6’da tüm çimento türleri için kalorimetreden alınan Hidratasyon okumaları verilmiş olup, hidratasyon okumaları Ciriüs Programı tarafından her 1 dk da alınmıştır ve grafikler bu hassasiyet üzerinden çizilmiştir ancak yer işgaline sebep vermemek amacıyla yalnızca saatlik okumalar Çizelge 4.5 ve 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. BAB, CEM I 42,5 R ve CEM II B-M 32,5 R çimentosuna ait kalorimetreden alınmış sıcaklık, toplam ısı değerleri

BAB			CEM I 42,5R			CEM II B-M 32,5 R		
Zaman t(s)	Sıcaklık °C)	Isı Q(J/g)	Zaman t(s)	Sıcaklık °C)	Isı Q(J/g)	Zaman t(s)	Sıcaklık °C)	Isı Q(J/g)
0,00	2,00	14,35	0,00	1,00	7,12	0,00	1,50	10,67
0,30	3,00	21,67	0,30	1,56	10,75	0,30	1,70	15,05
1,00	3,40	24,95	0,50	1,56	12,23	0,50	1,90	15,14
2,02	3,80	27,75	1,00	1,90	13,81	1,00	2,10	15,31
3,00	4,00	30,62	1,30	1,90	14,62	1,30	2,12	15,42
4,00	4,30	33,54	2,00	2,40	17,05	1,50	2,16	15,52
5,00	4,80	37,02	2,50	2,70	19,09	2,00	2,20	16,40

Çizelge 4.5 (devam)

6,00	5,30	42,25	3,00	2,90	21,78	3,00	2,60	19,68
7,00	5,80	47,06	4,00	3,90	29,50	4,00	3,30	24,48
8,00	6,30	52,56	5,00	5,40	40,99	5,00	4,00	30,81
9,00	6,90	58,13	6,00	7,30	55,62	6,00	5,10	39,45
10,00	7,60	63,61	7,00	9,70	74,20	7,00	6,20	48,28
11,00	8,20	69,35	8,00	12,30	94,67	8,00	7,30	57,31
12,00	9,13	77,25	9,00	15,30	118,48	9,00	8,40	66,54
13,00	9,72	82,23	10,00	18,40	143,54	10,00	9,60	76,01
14,00	10,20	88,73	11,0 ₂	21,30	167,77	11,00	10,79	85,40
15,00	10,90	95,68	12,00	23,80	189,51	12,00	12,00	95,05
16,00	11,50	10 ₂ ,O ₃	13,00	25,70	207,44	13,00	13,22	104,70
17,00	12,10	108,49	14,00	27,66	223,25	14,00	14,10	117,0 ₂
18,00	12,60	114,45						
19,00	13,00	119,55	15,00	28,50	237,05	15,00	16,10	133,91
20,00	13,40	124,83	16,00	29,20	247,16	16,00	17,80	149,0 ₄
21,00	13,80	130,18	17,00	29,60	255,23	17,00	18,80	159,42
22,00	14,00	132,08	18,00	29,60	260,49	18,0 ₂	19,30	166,43
23,00	14,20	138,16	19,00	29,40	264,31	19,00	19,60	171,98
24,00	14,40	142,19	20,00	29,73	267,25	20,00	20,09	176,30
25,00	14,50	145,53	21,00	30,07	270,32	21,00	20,10	182,10
26,00	14,50	148,25	22,00	30,27	272,10	22,00	20,20	186,93
27,00	14,50	150,81	23,00	30,54	274,54	23,00	20,35	191,10

Çizelge 4.5 (devam)

28,00	14,50	153,46	24,00	27,50	276,19	24,00	20,30	194,84
29,00	14,50	156,11	25,00	27,70	278,20	25,00	20,20	197,72
30,00	14,40	158,0 ₄	26,00	27,81	279,30	26,00	20,00	199,86
31,00	14,40	160,67	27,00	27,86	279,80	27,00	20,24	20 ₂ ,30
32,00	14,30	162,56	28,00	27,90	280,20	28,00	20,52	205,10
33,00	14,10	163,71	29,00	24,80	280,21	29,00	20,70	206,86
34,00	14,10	166,29	30,00	24,30	281,01	30,00	20,20	208,88
35,00	13,90	167,40	31,00	23,80	281,71	31,00	19,40	211,10
36,00	13,80	169,21	32,00	23,10	280,90	32,00	18,90	212,81
37,00	13,60	170,27	33,00	22,60	281,41	33,00	18,70	214,72
38,00	13,50	172,0 ₂	34,00	22,00	281,12	35,00	18,20	217,71
39,00	13,30	173,0 ₂	35,00	21,60	282,16	36,00	18,33	219,30
40,00	13,00	173,28	36,00	21,10	282,39	37,00	18,50	221,25
41,00	12,80	174,22	37,00	20,60	282,53	38,00	17,40	221,51
42,00	12,60	175,11	38,00	20,10	282,59	39,00	17,54	223,34
43,00	12,50	176,69	39,00	19,60	282,56	40,00	16,90	224,07
44,00	12,20	176,79	40,00	19,10	282,43	41,00	16,92	224,30
45,00	12,00	177,57	41,00	18,60	282,21	42,05	16,40	226,61
46,00	11,90	179,0 ₄	42,00	18,10	281,91	43,00	16,42	226,90
			43,00	17,60	281,52	44,00	16,00	229,37
						45,00	15,78	230,35
			44,00	17,20	281,76	46,00	15,50	231,37

Çizelge 4.5 (devam)

			45,00	16,70	281,21	
			46,00	16,30	281,29	

Çizelge 4.6. CEM-II/B-M(P-LL)-425N, CEM-II 42,5-A-M-(P-L)-R ve CEM I 52,5 R Çimentosuna ait Kalorimetreden Alınmış Sıcaklık, Toplam Isı Değerleri

CEM-II/B-M(P-LL)-42.5 N			CEM-II 42,5-A-M-(P-L)-R			CEM I 52,5 R		
Zaman t(s)	Sıcaklık °C)	Isı Q	Zaman t(s)	Sıcaklık °C)	Isı Q	Zaman t(s)	Sıcaklık °C)	Isı Q
		(J/g)			(J/g)		°C)	(J/g)
0,00	4,80	34,15	0,00	2,90	20,63	0,00	3,10	22,24
0,30	5,20	37,27	0,30	2,92	21,50	0,30	3,80	28,18
1,00	5,60	40,80	0,40	2,93	21,56	0,51	4,40	31,91
1,30	5,80	41,80	0,52	3,00	21,62	1,01	5,20	38,09
2,30	6,10	44,99	1,00	3,0 ₂	21,87	1,30	6,00	41,94
3,00	6,30	47,89	1,30	3,01	22,0 ₃	1,50	6,80	44,89
4,00	7,62	57,89	2,00	3,00	22,39	2,01	7,90	58,62
5,00	8,87	67,45	2,98	3,10	22,91	3,01	13,10	97,80
6,00	10,55	80,21	3,15	3,18	22,98	4,01	22,40	167,68
7,00	12,00	91,25	3,30	3,28	23,78	5,01	31,50	238,01
8,00	13,48	102,50	4,00	3,40	26,33	6,01	35,80	275,05
9,00	14,50	116,58	5,00	4,00	29,83	7,01	37,90	296,88
10,00	19,00	151,49	6,00	4,80	35,95			
11,00	22,30	178,71	7,00	5,20	41,33	8,01	38,90	311,09

Çizelge 4.6 (devam)

12,00	23,50	191,32	8,00	6,00	48,45			
13,50	25,42	206,95	9,00	7,00	56,28	9,01	39,40	321,84
15,00	27,22	221,63	10,00	8,00	64,73	10,01	39,40	329,05
16,00	28,16	229,25						
17,00	29,09	236,85						
18,00	29,93	243,63	11,00	9,10	73,72			
19,00	29,76	249,15	12,00	10,10	82,87	11,01	39,20	334,80
20,00	29,12	253,24	13,00	11,30	93,31	12,01	38,90	339,78
21,00	28,45	256,70	14,00	13,10	108,28	13,01	38,40	343,26
22,00	27,75	259,40	15,00	15,50	127,90	14,01	37,80	345,93
23,00	27,24	262,45	16,00	17,40	144,36	15,01	37,10	347,77
24,00	26,65	264,05	17,00	18,50	155,39	16,01	36,60	350,93
25,00	26,05	266,73	18,00	19,20	163,73	17,01	35,80	351,81
26,00	25,10	269,40	19,00	19,80	172,25	18,01	35,10	353,28
27,00	24,45	270,71	20,00	20,40	179,34	19,01	34,40	354,61
28,00	24,10	271,31	21,00	20,80	185,85	20,01	33,70	355,82
29,00	23,90	272,41	22,00	21,10	191,72	21,01	33,00	356,89
30,00	23,50	273,61	23,00	21,30	196,91			
31,00	23,20	275,63	24,00	21,50	202,17	22,01	32,20	357,12
32,00	22,80	276,87	25,00	21,60	206,71	23,02	31,50	358,02
33,00	22,40	278,04	26,00	21,60	210,55			
34,00	22,10	279,86	27,00	21,50	213,65	25,01	30,10	359,12

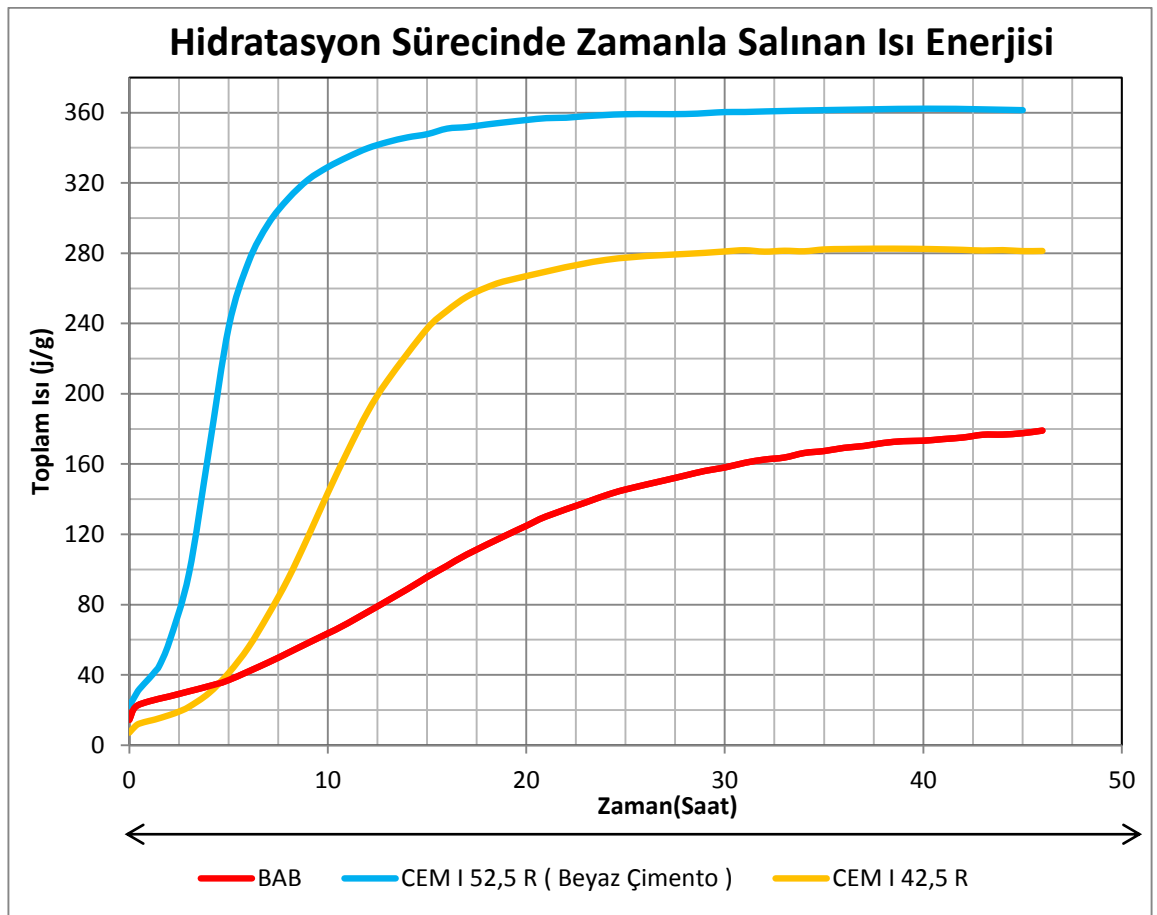
Çizelge 4.6 (devam)

35,00	21,70	280,90	28,00	21,20	215,32	26,00	29,30	359,15
36,00	21,20	281,16	29,00	21,00	217,45	27,00	28,50	359,18
37,00	20,90	282,77				28,01	27,90	359,23
38,00	20,50	283,59	30,00	20,80	219,93	30,00	26,90	360,35
39,00	20,10	284,35	31,00	20,50	221,46	31,01	26,00	360,39
40,00	19,70	285,04	32,00	20,20	222,94	32,00	25,40	360,56
41,00	19,30	285,65	33,00	19,90	224,36	33,00	24,70	360,96
42,00	18,80	285,48	34,00	19,60	225,73	34,01	24,20	361,23
43,00	18,30	285,22	35,00	19,30	227,05	35,00	23,40	361,45
44,O ₃	17,90	285,71	36,00	19,00	228,32	36,00	22,60	361,65
45,00	17,50	285,91	37,00	18,70	229,53	37,00	21,80	361,87
						38,00	21,20	362,12
46,00	17,20	286,86	38,00	18,40	230,68	40,21	20,80	362,26
						41,00	20,10	362,21
						42,00	19,40	361,89
						43,00	19,00	361,67
						44,00	18,70	361,54
			39,00	18,10	231,78	45,01	18,30	361,43
			40,00	17,80	232,83			
			41,00	17,40	233,86			
			42,00	17,10	234,04			
			44,00	16,40	235,01			

Çizelge 4.6 (devam)

			45,00	16,10	235,76	
			46,00	15,80	236,46	

BAB-CEM 42,5 R- CEM 52,5 R Hidratasyon Süreci Detaylı Analizi ve Karşılaştırması



Şekil 4.6. BAB, CEM I 42,5 R ve CEM I 52,5 R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isılarını (Toplam Isı Mik.) Gösteren Grafik

Yukarıdaki grafiğe bakıldığında BAB Çimentosunda CEM I 42,5 R'ye oranla 46 saatin sonunda çıkan ısı miktarında %43 oranında, CEM I 52,5 R'ye göre de oranla da %56 oranında bir azalma söz konusu olduğu görülmektedir. Günümüzde sürdürülebilir teknoloji için enerji, doğal kaynaklar ve çevrenin korunması üç önemli faktör olarak

karşımıza çıkmaktadır. Dünyada toplam CO₂ emisyonunun yaklaşık %8'i çimento üretimiyle ortaya çıkmaktadır. Bugün küresel ısınmada en önemli rolü oynayan CO₂ gazı emisyonunun azaltılması amacıyla birçok araştırma ve girişimler başlatılmış ve devam ettirilmektedir (DSİ Teknik Bülten-105). Böyle bir süreçte toplam hidratasyon ısısı değerlerinde CEM I 42,5 R ile kıyaslandığında %43, CEM I 52,5 R'ye göre de %56 oranında avantaj sağlamak oldukça önemlidir. Tabii böyle bir avantajı tek taraflı değerlendirmemek amacıyla şekil 4.27 ve 4.28 gösterildiği üzere 7 günlük basınç dayanımları ile hidratasyon miktarları da ayrıca karşılaştırılmış ve ileriki bölümlerde değerlendirilmiştir.

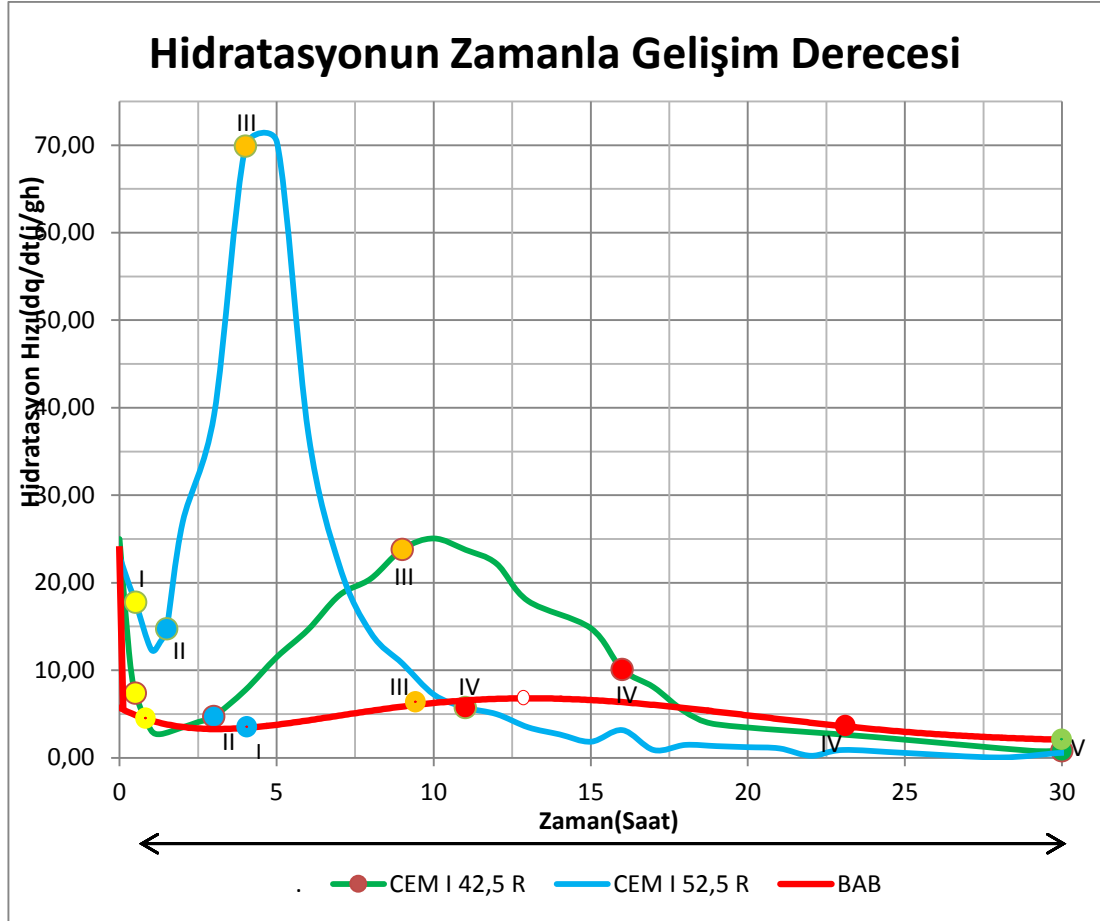
Isı miktarında ki bu önemli azalmanın bir diğer avantajı da BAB çimentosunun çok düşük hidratasyon ısısına sahip olma özelliği, sıcaklıkla oluşabilecek çatlakların daha kolay kontrol edilebilmesi, yüksek dayanıma sahip yüksek akışkanlı beton yapımı ve sıcaklık yükselmesinin kontrolü hususlarında olacaktır.

Hidratasyon ısısının düşüklüğü sıcak havalarda kimyasal reaksiyonlara yardımcı olarak priz, sertleşme ve dayanım kazanmanın normal sürelerde oluşmasına katkıda bulunur. Buna karşın soğuk havalarda bu çimento ile yapılan betonlama işlerinde beton içerisinde priz hızlandırıcı ve orta ve/veya yüksek oranda su azaltıcı tipinde kimyasal katkıların birlikte kullanılması gerekebileceği dikkate alınmalıdır (DSİ TB 2009).

Isı miktarında ki bu önemli azalmanın bir diğer avantajı da BAB çimentosunun özellikle kütle betonu gibi düşük hidratasyon ısıları çimentoların kullanılmasının zorunlu olduğu yapılar için çok ideal bir malzeme olduğunu göstermektedir. Keza kütle betonu yapılarında kullanılacak olan çimentoların toplam hidratasyon ısısı değerlerinin 7 gün ve 28 günde sırasıyla 60 cal/g ve 70 cal/g değerlerini (kütle betonu yapıları için hidratasyon ısısı kriterleri) aşmaması gerekmektedir (Dsi Teknik Bülten-2009). bu değerler ışığında BAB çimentosunun CEM I 42,5 R ve CEM I 52,5 R'ye göre hidratasyon anlamında çok büyük bir üstünlüğünün olduğu görülmüştür.

Yukarıdaki grafikten çıkarabilecek bir diğer bulgu ise hidratasyon sürecinde BAB çimentosunun ait grafiğın eğimi 44.saatten sonra yeni yeni yataylaşıp sabit kalmaya başlarken CEM I 42,5 R çimentosunda bu yataylaşma 22.saatten itibaren, CEM I 52,5 R çimentosunda ise 20.satten itibaren sabit hale gelmektedir. Buradan elde edilen sonuç ise erken dayanımı en iyi olan çimentonun CEM I 52,5 R olduğu, CEM I 42,5 R Çimentosuyla yapılan numunelerin ise BAB çimentosuna göre oldukça iyi olabilmesidir. Bu duruma sebep olan ana unsur; erken dayanımı sağlayan C_3S (Alit fazı) BAB çimentosunda bulunmamasıdır. Bu nedenle Çimentosu ile yapılan betonların normal Portland çimentosu ile yapılanlara göre erken (3 ve 7 gün) dayanım değeri daha düşük tespit edilmektedir.(DSİ TB 2009) CEM I 52,5 R ve CEM I 42,5 R arasındaki farkın ise çimento inceliğı ve karma oksit oranlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

BAB, CEM I 42,5 R ve CEM I 42,5 R Hidratasyon Süreci Detaylı Analizi ve Karşılaştırması



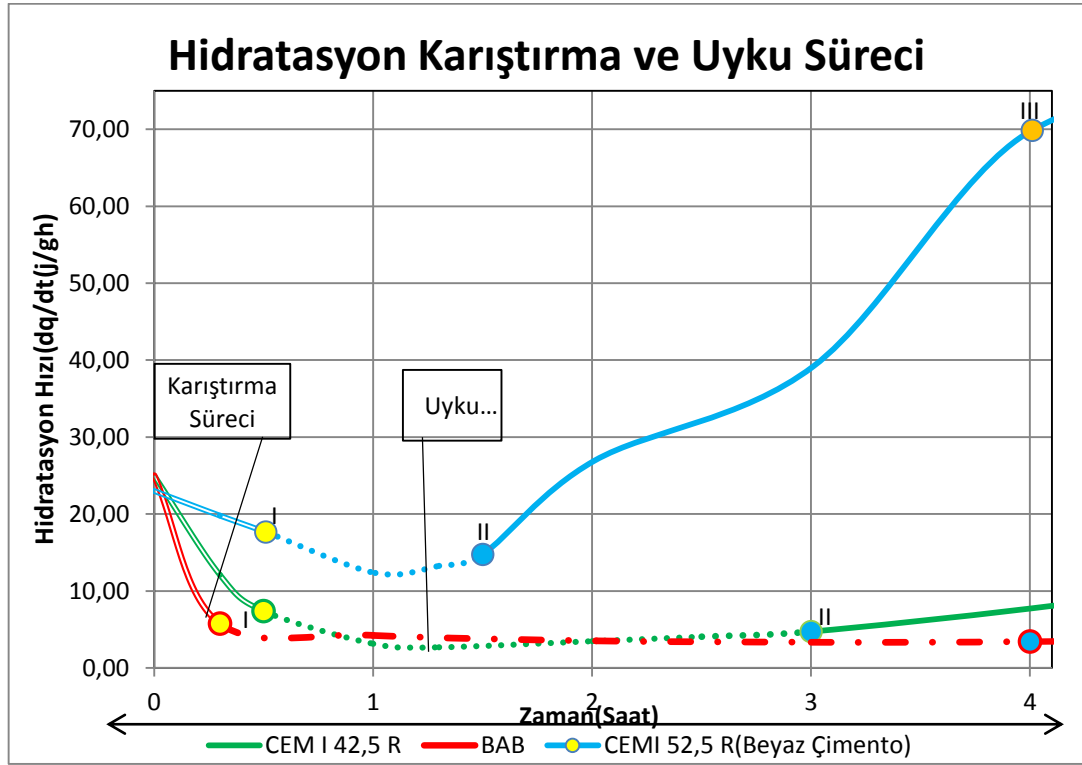
Şekil 4.7. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını (Toplam Isı Mik.) Gösteren Grafik

Yukarıdaki grafikte ısı çıkış hızı, zaman sürecinde analiz edilmiştir. Bu analiz çerçevesinde süreçler çeşitli bölgelere ayrılarak değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme aşamaları Çizelge 4.7’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.7. Hidratasyon reaksiyon süreçleri

 Başlangıç- I. İşaretleyici Arası	Karıştırma Süreci
 I-II İşaretleyici Arası	Uyku Süreci
 II-III İşaretleyici Arası	Sertleşme Süreci
 III-IV İşaretleyici Arası	Soğuma Süreci
 IV-V İşaretleyici Arası	Yoğunlaşma Süreci

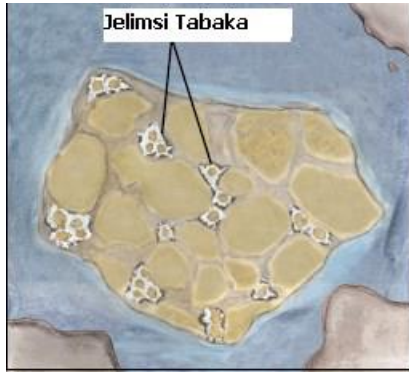
Bu aşamaları ayrı ayrı inceleyecek olursak BAB Çimentosuyla, CEM I 52,5 R ve CEM I 42,5 R Çimentosunu karşılaştırmalı olarak analizini yapmış olacağız.



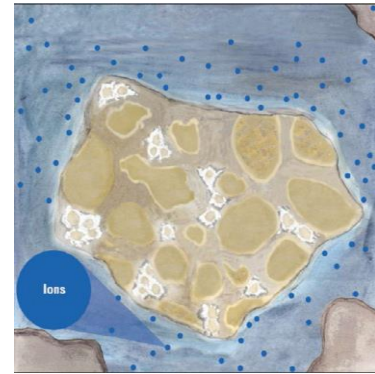
Şekil 4.8. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R çimentolarının hidratasyon aşamalarını gösteren grafik (Karıştırma süreci-uyku süreci)

 **Karıştırma Süreci:** Çimento ve su karıştıktan hemen sonra alüminatlar çözülmeye ve tepkimeye başlarlar. Bu süreçte karışımın tasarımı son derece önemlidir. Alüminatın su ile tepkimesi sonucu jelimsi bir tabaka oluşur (C-A-S-H) (Şeki 4.9). Bunun sonucu ısı çıkışı önemli ölçüde azalır. Şekil 4.8’de başlangıçtan - () işaretine kadar belirtilen

kısım Karıştırma süreci olarak adlandırılmaktadır. I no ile belirtilen bu süreç 10-20 dk içerisinde gerçekleşmiş olduğundan karıştırma sürecini kalorimetre de tam olarak izleyebilme şansımız olmamıştır. Dolayısıyla bu süreçle ilgili 3 çimento türü arasındaki farklılıkları ortaya koyabilmek doğru bir yaklaşım olamayacaktır. Ancak elde edilen tek bulgu 3 çimento türüne ait numunelerin de ani priz gerçekleştirmemiş olması ve süreci standart halde geçirmiş olmasıdır. Bilindiği gibi Mineral katkı yüksek miktarda kalsiyum (özellikle C_3A formunda) ihtiva ediyorsa ve yeteri miktarda sülfat kaynağı yoksa betonda erken (ani) priz görülür (Mehta *et al.* 2006)



Çimento tanecikleri etrafında jel oluşumu



Uyku süreci, karışım suyu çözünen iyonlarla doymaktadır

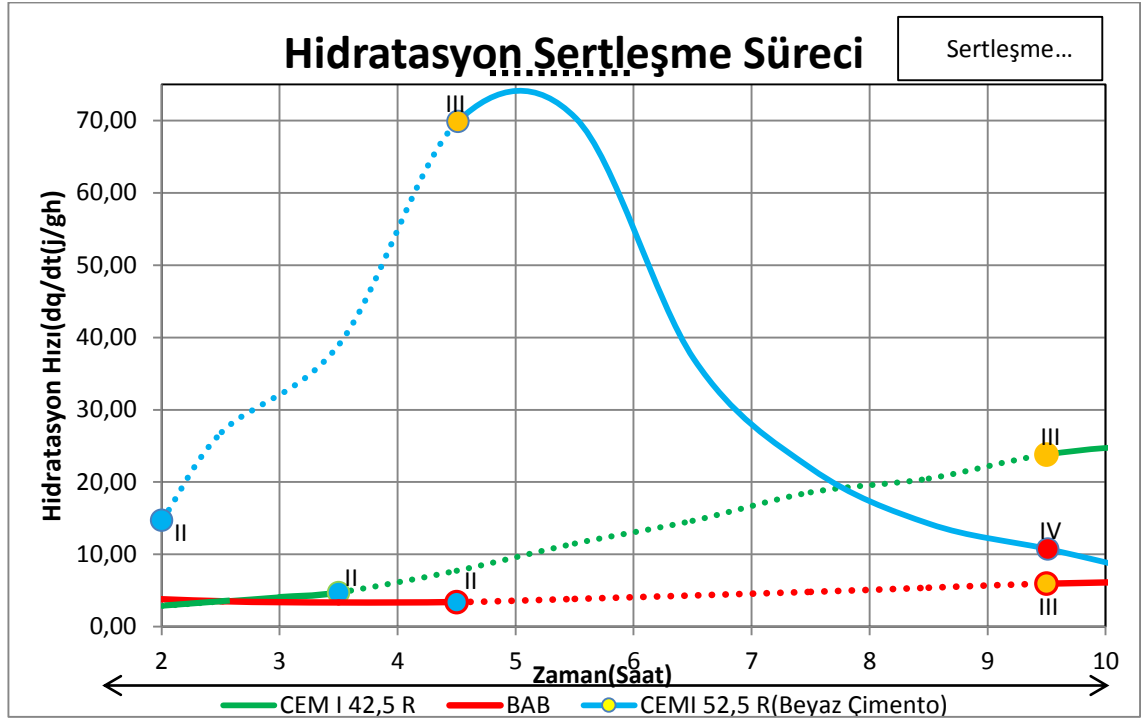
Şekil 4.9. Hidratasyon karıştırma ve uyku sürecinde çimento hamurunda meydana gelen değişiklikler (Mehta *et al.* 2006).

Uyku Süreci : Alüminatların tepkimesinin bu periyotta 2-4 saat arasında kontrol edilebilme şansı vardır. Bunun nedeninin jelimsi tabaka olduğu bilinmektedir. (Bknz Şekil 4.9) Bu süreçte Şekil 4.8 de görüldüğü gibi eğrilerin (I-II işaretleyici arası) yataylaşarak ısı çıkış hızının hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Bu durum uyku süreci olarak nitelendirilebilir. Ancak, bu hiçbir tepkimenin olmadığı anlamına gelmez. Aksine çimento bileşenleri çözünmeye devam etmektedir ve karışım suyu kalsiyum(Ca) ve hidroksil (OH^-) iyonları ile doymaya devam etmektedir (Mehta *et al.* 2006,)

Bu periyodun sağladığı en önemli fayda betonun plastik halde taşınması, yerleştirilmesi ve işlenmesidir. Bu süreçte beton işlenebilirliğini korumaktadır. Grafikteki verilere

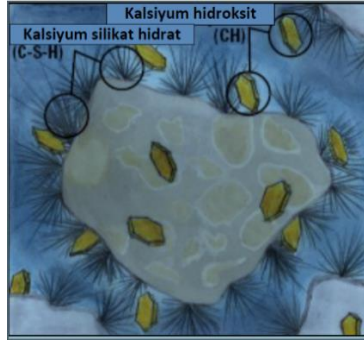
baktığımızda CEM I 42,5 R, ile BAB çimentosuyla elde edilen numuneler de uyku sürecinin yaklaşık olarak aynı ısı çıkış hızıyla gerçekleştiği görülmektedir, ancak burada dikkat edilecek husus BAB çimentosuyla elde edilen numunelerde uyku sürecinin CEM I 42,5 R ve CEM I 52,5 R'ye göre daha fazla sürmüş olmasıdır. Bu bulgudan çıkarılacak en önemli sonuç ise BAB çimentosuyla elde edilen Betonların taşınması, yerleştirilmesi ve işlenebilmesi için geçerli sürenin daha fazla olmasıdır. Böylelikle betonun şantiyeye taşınması ve kalıplara yerleştirilmesi sırasında işlenebilme ömrünün kısalığından dolayı oluşabilecek sorunlar ötelenmiş olacaktır. Ayrıca priz geciktirici katkıların oluşturduğu ek maliyetten de tasarruf sağlanmış olacaktır. Ancak soğuk havalarda dökülecek betonlarda dezavantaj oluşturmaması için BAB çimentosuyla uyumlu priz hızlandırıcı katkıları kullanılması uygun olacaktır.

CEM I 52,5 R çimentolu numunenin ise bu süreçte diğer numunelerden yaklaşık 2-2,5 kat daha fazla ısı çıkış hızına sahip olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak yapısında çok yüksek oranda C_3A ve C_3S içermesi, ince öğütülmüş olması (incelik modülü = $4600 \text{ cm}^2/\text{gr}$, Bu değer CEM I 42,5 R için $=3482 \text{ cm}^2/\text{gr}$ dır.) olarak gösterilebilir. Bu bulguya göre CEM I 52,5 R Beyaz çimento ile yapılan betonların; nihai erken dayanımın çok yüksek olması, Buhar kürü gerektirmemesi(buhar kürü erken dayanımlı çimentolar için önemli bir maliyet gerektirir), Priz hızlandırıcı katkı ilavesine gerek bırakmaması ve erken kalıp alınması zorunlu işlerde önemli oranda zaman tasarrufu sağlaması gibi bir çok avantajı da beraberinde getireceği aşıkardır.



Şekil 4.10. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R çimentolarının hidratasyon aşamalarını gösteren grafik (Sertleşme süreci)

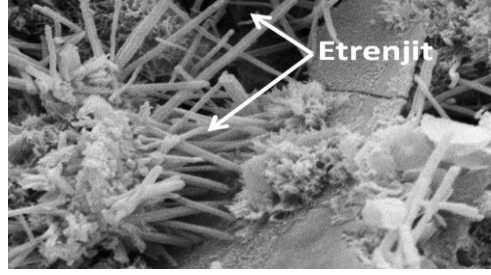
Sertleşme Süreci : Şekil 4.10'a bakıldığında hidratasyon süreci için 3 çimento tipi ile yapılan numunelerden belkide en önemli farklılık bu süreçte ortaya çıkmaktadır. Isı çıkış hızlarına baktığımızda pik değeri en yüksek CEM I 52, 5 R içeren numunede görüldüğü, bu değer CEM I 42, 5 R çimentolu numuneden yaklaşık olarak 2,8 kat , CEM I 42, 5 R çimentosunun da pik değerinin BAB çimentosundan yaklaşık olarak 4 kat daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun en önemli nedeninin, bu süreçte baskın bileşenin C_3S (alit) olduğu düşünülmektedir. BAB Çimentosunda B_2O_3 'ün varlığından dolayı C_3S oluşamamaktayken, CEM I 52, 5 R ve CEM I 42,5 R ile yapılan numunelerde alit bileşeninin etkisinden dolayı Kimyasal Reaksiyonlar sonucu daha fazla C-S-H ve CH (Şekil 4.11) kristalleri oluşmakta ve bunun sonucunda da daha fazla ısı açığa çıkmaktadır. BAB Çimentosu bu avantajıyla pişirme sıcaklığının düşmesine ve karbon salınımını azalması gibi sonuçlara katkıda bulunduğu düşünülmektedir. Tabii bu sonucun oluşmasında tek etkenin bu parametre olmadığı unutulmamalı, incelik vb. parametrelerin de etkisi incelenmelidir.



Şekil 4.11. Sertleşme sürecinde C-S-H ve C-H oluşumu

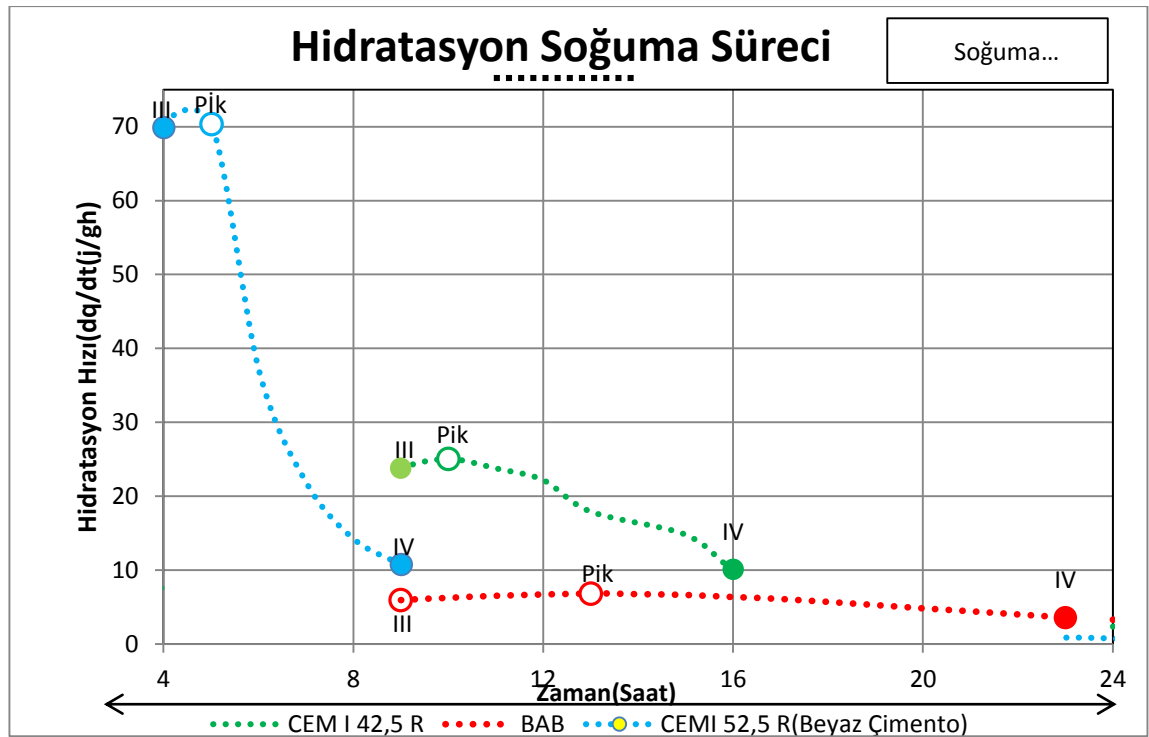
Isı çıkışının hızlanması hidratasyonun hızlanmasının ve çimento hamurunun sertleşmesinin belirtsidir. Reaksiyonun hızlandığı bu periyotta aluminat (C_3A) ve sülfat reaksiyonu da devam eder ve iğnemi yapıda etrenjit kristalleri (C-A-S-H) oluşur.

Şekil 4.10 incelendiğinde en hızlı hidratasyonun CEM I 52,5 R'li numunede gerçekleştiği görülmüştür. Bunun nedeninin inceliğinin fazla olması ve yüksek alkali içeriği olarak gösterilebilir. En geç ve yavaş süreçli hidratasyonun ise BAB çimenolu numunede gerçekleştiği görülmüştür. BAB Çimentosunun priz başlangıç ve bitiş süreleri diğer R sınıflı çimentolara göre her ne kadar geç başlayıp geç noktalansa da düşük hidratasyon ısıları dikkate alındığında kür-bakım şartlarında kullanıcısına fazla bir olumsuzluk çıkarmayacağı düşünülmektedir. Ayrıca soğuk havalarda bu çimento ile yapılacak beton döküm işlerinde beton içerisinde priz hızlandırıcı ve orta ve/veya yüksek oranda su azaltıcı tipinde kimyasal katkıların birlikte kullanılması gerekebileceği dikkate alınmalıdır. Yine grafikteki (Şekil.4.10) sonuçlara göre BAB çimentosunun normal portland çimentosuna oranla erken dayanım hususunda bir miktar dezavantajlı gözüksede yine bu hususunda priz hızlandırıcı veya ilave katkı katılmasıyla çözülebileceği düşünülmektedir.



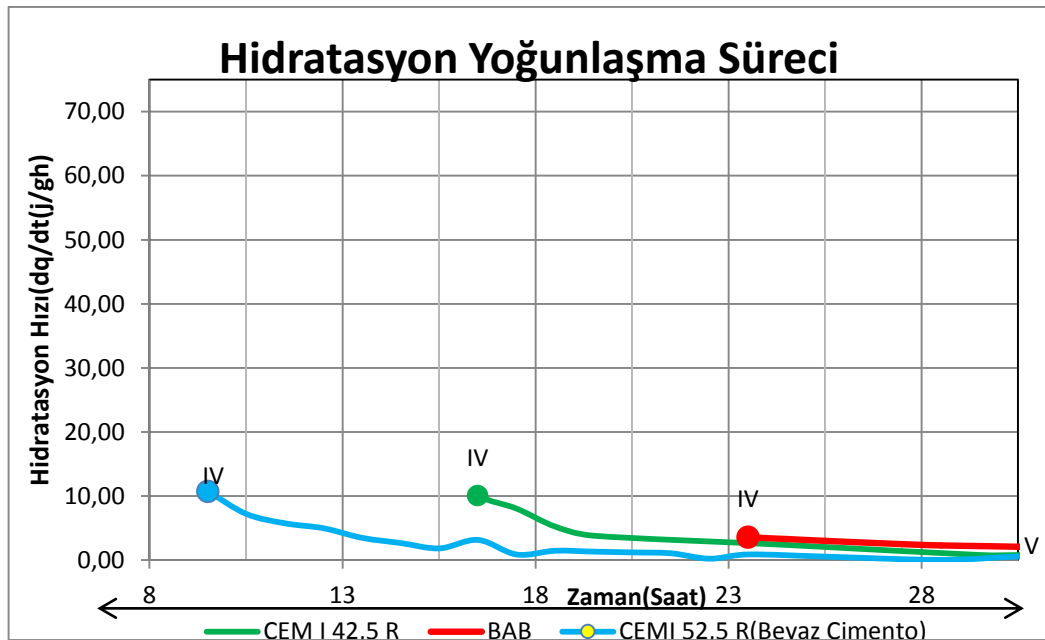
Şekil 4.12 Taramalı elektron mikroskobundan bakıldığında çimento hamurunda oluşan etrenjitlerin görünümü

En erken priz başlama ve bitiş süreleri CEM I 52,5 R içeren numunede görülmüştür. Bunun nedeninin çimento inceliğinin fazla olması ve çimentonun kimyasal bileşimi olarak gösterilebilir.



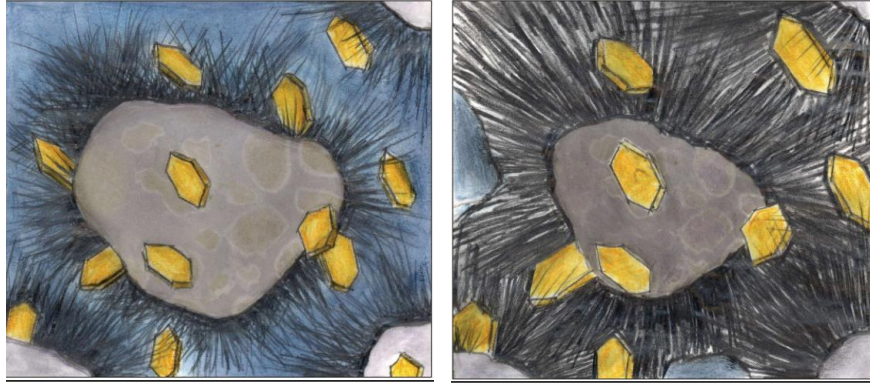
Şekil 4.13. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R çimentolarının hidratasyon aşamalarını gösteren grafik (Soğuma süreci)

● Soğuma Süreci: Bu süreçte C_3S reaksiyonu yavaşlamaya başlar ve zirveye ulaşan ısı çıkışı düşmeye başlar. Bunun nedeni oluşan C-S-H ve CH ürünlerinin su ve çözünmemiş çimento tanelerinin temasını engellemesidir. C-S-H ve CH oluşumu arttıkça betonun dayanım kazanması artar. Ancak yine de beton hala geçirimlidir. Hafif yükleri taşıyabilmektedir. Şekil 4.13'e bakıldığında BAB Çimentosuyla yapılan numune de soğuma sürecinde ısı çıkış hız değişimi oldukça düşük ve sürecin aralığı ise daha geniştir. CEM I 42,5 ve CEM I 52,5 R çimentolu numunelerde ısı çıkış hız değişimindeki büyük farktan dolayı büzülme ve sürtünme sonucu oluşan iç gerilmelerin dayanım kazanımını geçme olasılığı BAB çimentosuna göre oldukça yüksektir. Bu olay önlem alınmazsa çatlamalara ve büzölmelere neden olur, Gerilmeleri azaltmak için derz kesimine başlanmalı veya betonun kür bakımı önemle yapılmalıdır. Özellikle CEM I 52,5 R çimentosu için bu husus daha kritik bir önem kazanmaktadır. Bu bilgiler ışığında BAB çimentosuyla üretilen betonlarda derz aralıklarının daha geniş olabileceği, yekpare daha fazla hacimde beton dökülebileceği ve bunların soğutulabilmesi için bakım masraflarının en aza indirgeyebileceği buradan görülebilmektedir. Ancak incelik vb. parametrelerinde bu hususa etki edebileceği unutulmamalı ve bu parametrelerinde irdelenmesi gerekmektedir.



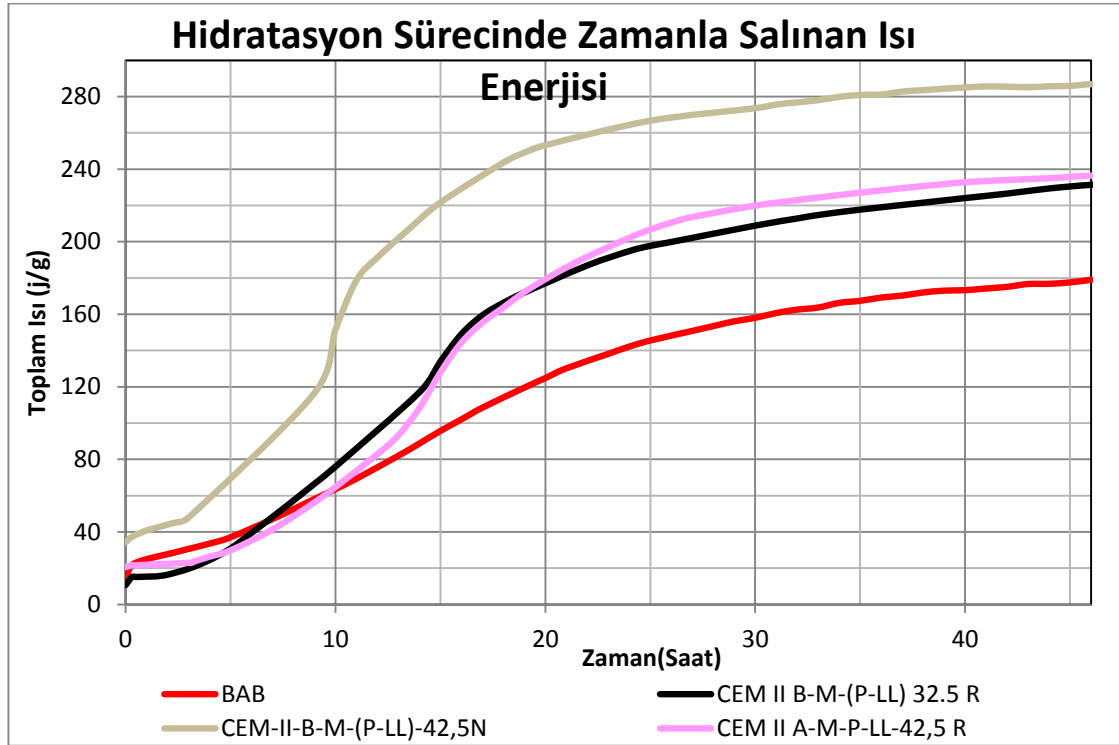
Şekil 4.14. BAB, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R çimentolarının hidratasyon aşamalarını gösteren grafik (Yoğunlaşma süreci)

●Yoğunlaşma Süreci : Bu periyotta Şekil 4.14'den de anlaşılacağı üzere her üç çimento tipine ait numunelerde de ısı çıkış hızı oldukça azalmakta ve eğri yataylaşmaktadır. Bunun nedeni hidrasyon reaksiyonları yavaşlamaya başlamış olması ve ısı çıkışının önemli düzeyde azalmasıdır. Hidrasyon ürünleri artmaya ve gelişmeye devam etmektedir. Şekil 4.14'de görüldüğü gibi beton gittikçe daha sert ve sağlam bir yapıya kavuşmaktadır. Burada Betonun erken yaşta ani sıcaklık değişimlerine maruz kalmayacak şekilde muhafaza edilmesine dikkat edilmelidir (Betonun üzerine yalıtkan örtüler sarılabilir.).Bu süreç yıllar alan bir süreç olmasına rağmen 30.saatten sonra eğim değişimlerinde pek bir farklılık olmadığından 30 saatlik süreç dikkate alınmıştır.



Şekil 4.15. Yoğunlaşma Süreci Boyunca Çimento Hamurundaki Değişim

BAB, CEM II 32,5-B-M (P-LL) R, CEM II 42,5-B-M (P-LL) N, CEM II 42,5-A-M (P-LL) R Hidratasyon Süreci Detaylı Analizi ve Karşılaştırması



Şekil 4.16. BAB, CEM II 32,5-B-M (P-LL) R, CEM II 42,5-B-M (P-LL) N, CEM II 42,5-A-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isılarını (Toplam Isı Mik.) Gösteren Grafik

Yukarıdaki grafiğe bakıldığında BAB Çimentosunda CEM II 32,5-B-M (P-LL) R'ye oranla 46 saatin sonunda çıkan ısı miktarında %23 oranında bir azalma, CEM II 42,5-A-M (P-LL) R N'ye göre %25 oranında bir azalma, CEM II 42,5-B-M (P-LL) N'ye göre %37 oranında bir azalma söz konusu olduğu görülmektedir. Puzolan ve kalker katkılı kompoze çimentolara göre dahi böyle bir fark oluşturmak CO₂ emisyonunu açısından gerçekten oldukça önemlidir. Çünkü puzolan ve kalker yapısal özelliklerinden dolayı Portland çimentosuna göre, CO₂ emisyonunu düşürerek çimentodaki karbon salınımını ve çimentonun pişirme sıcaklığını azaltıcı etki yaptığı bilinmektedir. Bu bilinenlere rağmen BAB çimentosunun yine de büyük oranda bu çimento tiplerine göre fark oluşturması literatür açısından oldukça önemlidir. Tabii böyle bir avantajı tek taraflı değerlendirmek doğru bir yaklaşım olmayacaktır, konuyla ilgili diğer

parametrelerin (incelik, katkı vb.) katkısının daha detaylı bir şekilde incelenmesi daha doğru bir yaklaşım olacaktır.

Ayrıca yapısındaki kalker ve puzolan etkisinin belirli oranlarda kullanıldığı takdirde kompoze portland çimentosunun, normal portland çimentosuna göre hidratasyon ısını bir miktar düşürdüğü bilinen bir gerçekken bu avantajına rağmen yine de toplam hidratasyon ısısı olarak BAB çimentosunun oldukça geride kalması da çok önemli başka bir bulgu olarak göze çarpmaktadır.

Isı miktarında ki bu önemli azalmanın en önemli avantajı özellikle kütle betonu gibi düşük hidratasyon ısılı çimentoların kullanılmasının zorunlu olduğu yapılarda ortaya çıkmaktadır. Keza kütle betonu yapılarda kullanılacak olan çimentoların toplam hidratasyon ısısı değerlerinin 7 gün ve 28 günde sırasıyla 60 cal/g ve 70 cal/g değerlerini (kütle betonu yapıları için hidratasyon ısısı kriterleri) aşmaması gerekmektedir(DSİ TB 2009). Bu değerler ışığında grafikte geçen bütün çimento tipleri kütle betonları için kullanılabilir olmasına rağmen, BAB çimentosunun düşük hidratasyon ısılı çimentosunun en ideal malzeme olduğu ve ard soğutma ve bakım işlemleri konusunda da önemli düşük maliyet, düşük işçilik ve zaman katkıları(düşük maliyet, düşük işçilik ve zaman) sağlayacağı görülmektedir.

CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentoları yapı olarak birbirine oldukça benzeyen çimento tipleridir. Bu çimento tipleri arasında aşağıdaki parametreler açısından farklılıklar tespit edilmiş ve hidratasyon davranışında farklılığa sebebiyet verebileceği düşünülen bu parametreler çizelge 4.8 gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Hidratasyonu etkileyebilecek kimyasal analiz parametreleri (Çimentoların kimyasal analiz raporundan alınmıştır.)

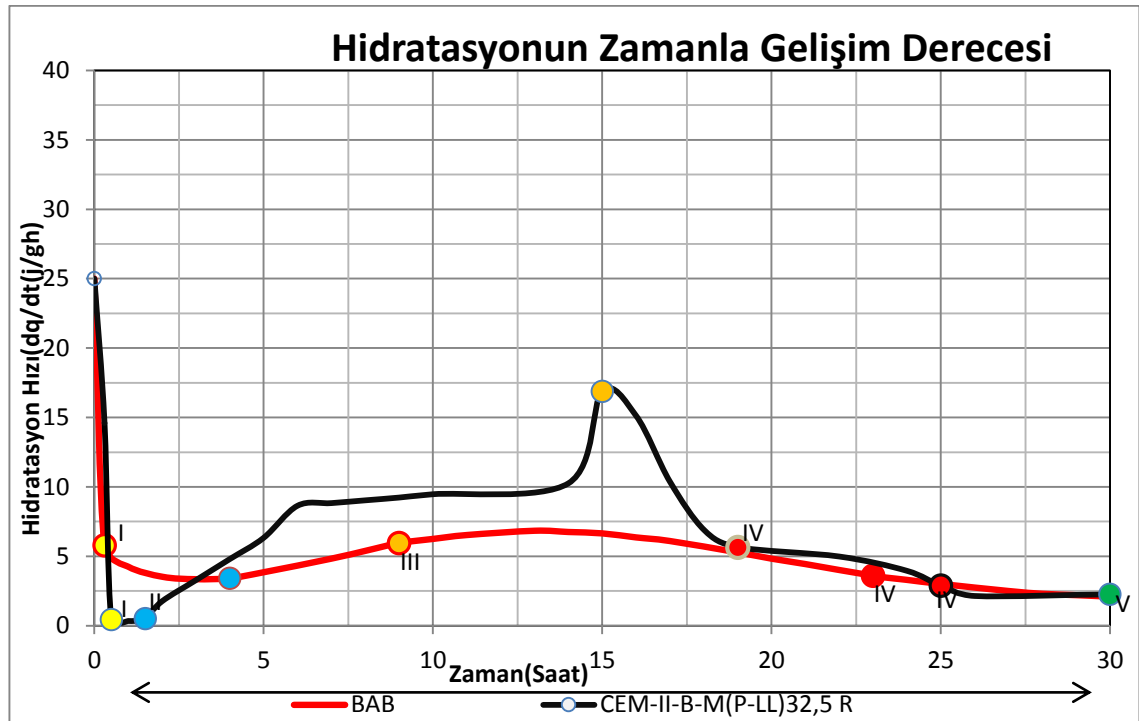
	Bileşimdeki CaO %	Bileşimdeki SiO ₂ %	Bileşimdeki Serbest Kireç	Bileşimdeki Katkı %	Özgül Yüzey (cm ² /g)
CEM II 32,5-B-M (P-LL) R	55,28	18,73	0,5	35,9	4554
CEM II 42,5-B-M (P-LL) N	59,05	18,03	0,5	24,64	4270
CEM II 42,5-A-M (P-LL) R	60,85	18,09	0,35	18,28	4146

Çizelge 4.8’den de görüleceği üzere CEM II 42,5-B-M (P-LL) N serbest kireç oranı CEM II 42,5-A-M (P-LL) R çimentosuna göre bir miktar yüksekken, Silikat yüzdeleri yaklaşık olarak aynı orandadır ($CaO+SiO_2$). C_3S ve C_2S ’nin hammaddesini oluşturan Silikatların aynı oranda olduğu düşünüldüğünde, Serbest kirecin fazlalığı hidratasyon ısını ve hızını bir miktar yükselten bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Çünkü C_3S ve C_2S ’in yaptığı reaksiyon sonucunda C-S-H sembolü ile gösterilen kalsiyum silikat hidrate ile serbest kireç ($Ca(OH)_2$) oluşmaktadır. Dolayısıyla, katkılı çimentolarda portland çimentosu kısmının hidratasyonu ile açığa çıkan $Ca(OH)_2$ ’in puzolanlarla birleşerek dayanım kazanımını sağlayan CSH jelleri vermesi betonun dayanıklılığı açısından olumlu gelişmeler sağlar. (TÇMB-AR-GE/Y99-2) Bütün bu kimyasal tepkimelerin sonucunda ısı çıkışı hızlanır ve hidratasyon ısı yükselmiş olur. CEM II 42,5-B-M (P-LL) N özgül yüzey alanı (incelik) CEM II 42,5-A-M (P-LL) R’ye göre fazla olması da hidratasyon ısını artıran bir diğer parametre olarak ortaya çıkmaktadır.

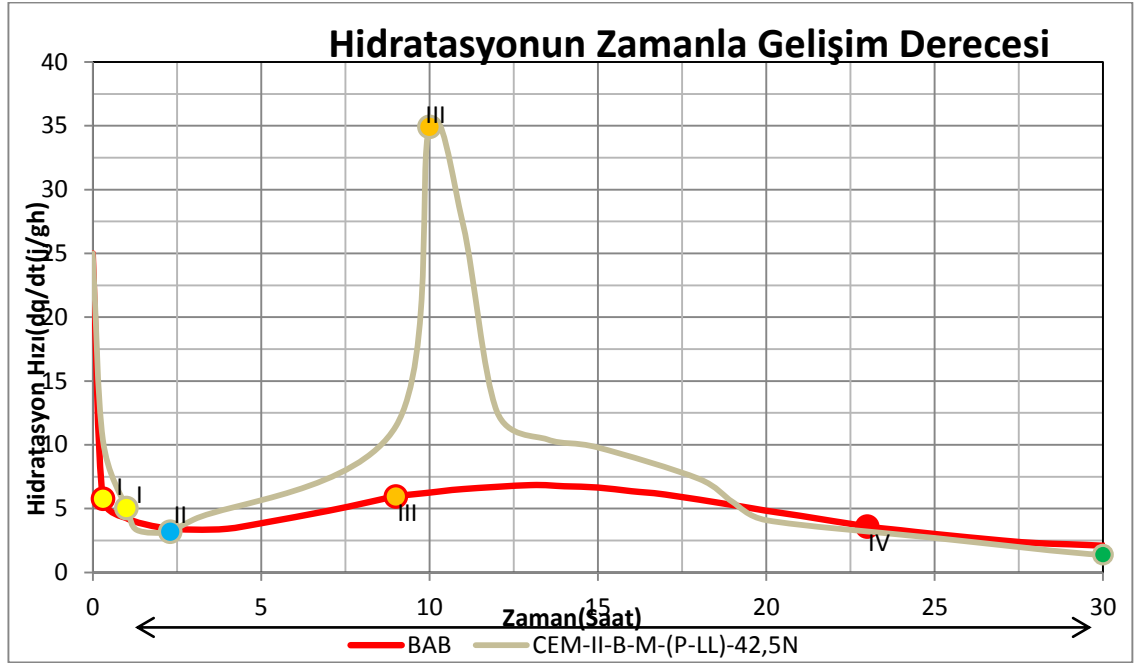
Çizelge 4.8’den de görüleceği üzere CEM II 32,5-B-M (P-LL) R silikat oranı (C_3S ve C_2S) diğer çimentolara göre daha düşükken, incelik ve mineral katkı (puzolan,kalker) yüzdeleri diğer çimentolara göre daha yüksektir. Şekil 4.16’da hidratasyon ısılarına bakıldığında ise CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentosuyla yapılan numunenin CEM II 42,5-A-M (P-LL) R çimentosuyla yapılan numuneye yakın bir değerde olduğu görülmektedir. CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentosunun, yapısındaki C_3S ve C_2S oranı bir miktar az olmasına rağmen serbest kireç ve mineral katkı oranının oldukça fazla olması, portland çimentosu kısmının hidratasyonu ile açığa çıkan $Ca(OH)_2$ ’in

puzolanlarla birleşerek dayanımını artırması ve bu esnada oluşan kimyasal reaksiyonlar ile ısı açığa çıkarması ve bununda hidrasyon ısını artırdığı düşünülmektedir. Ayrıca CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentosunda özgül yüzeyin CEM II 42,5-A-M (P-LL) R' çimentosuna göre fazla oluşu da hidrasyon ısını artıran önemli bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır. Puzolanik malzemelerin özgül ağırlığı çimento hamurununkinden daha azdır. O nedenle, betonda kullanılan bağlayıcı maddelerin toplam hacmi (yani, "çimento + puzolan" hacmi) artmaktadır. Bu durum, betondaki bağlayıcı hamurun hacmini artırmaktadır. Böylece, daha akıcı, işlenebilmesi daha iyi olan bir beton elde edilmektedir(TÇMB-Y99/2).

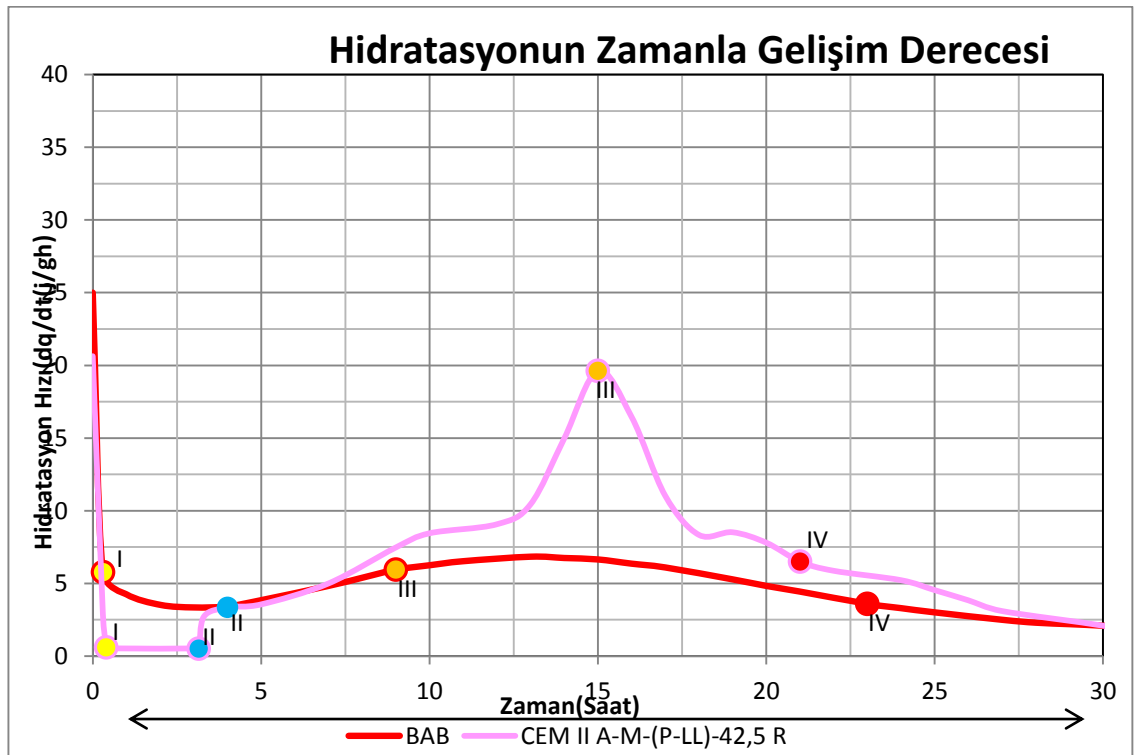
BAB-CEM I 52,5 R Hidrasyon Süreci Detaylı Analizi ve Karşılaştırması



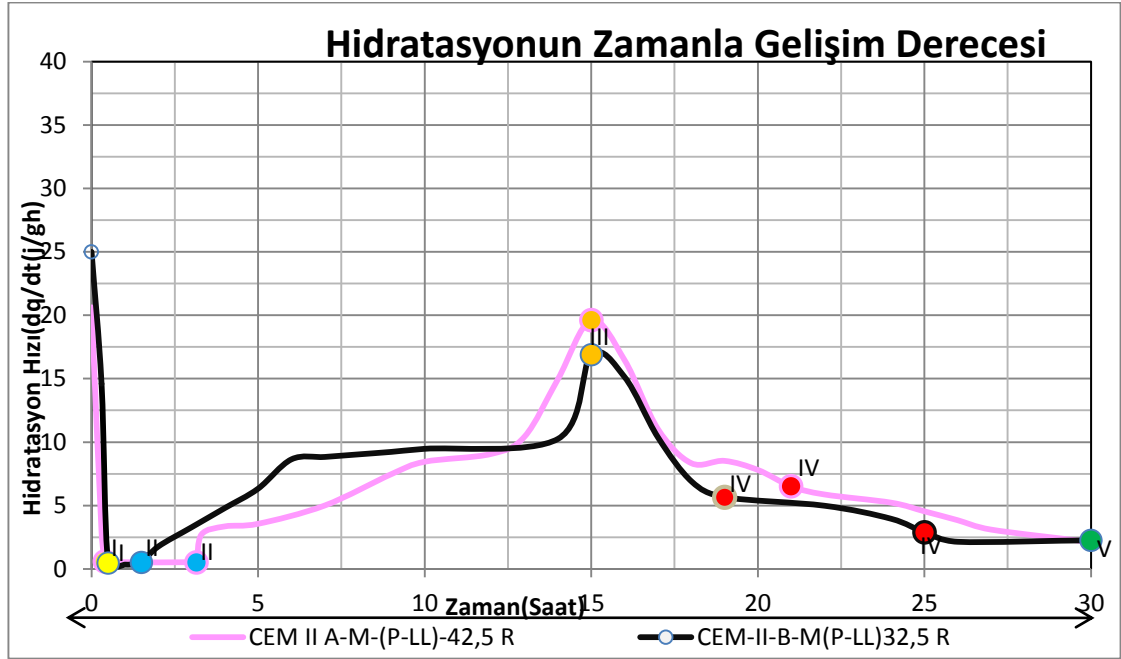
Şekil 4.17. BAB, ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak hidrasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik



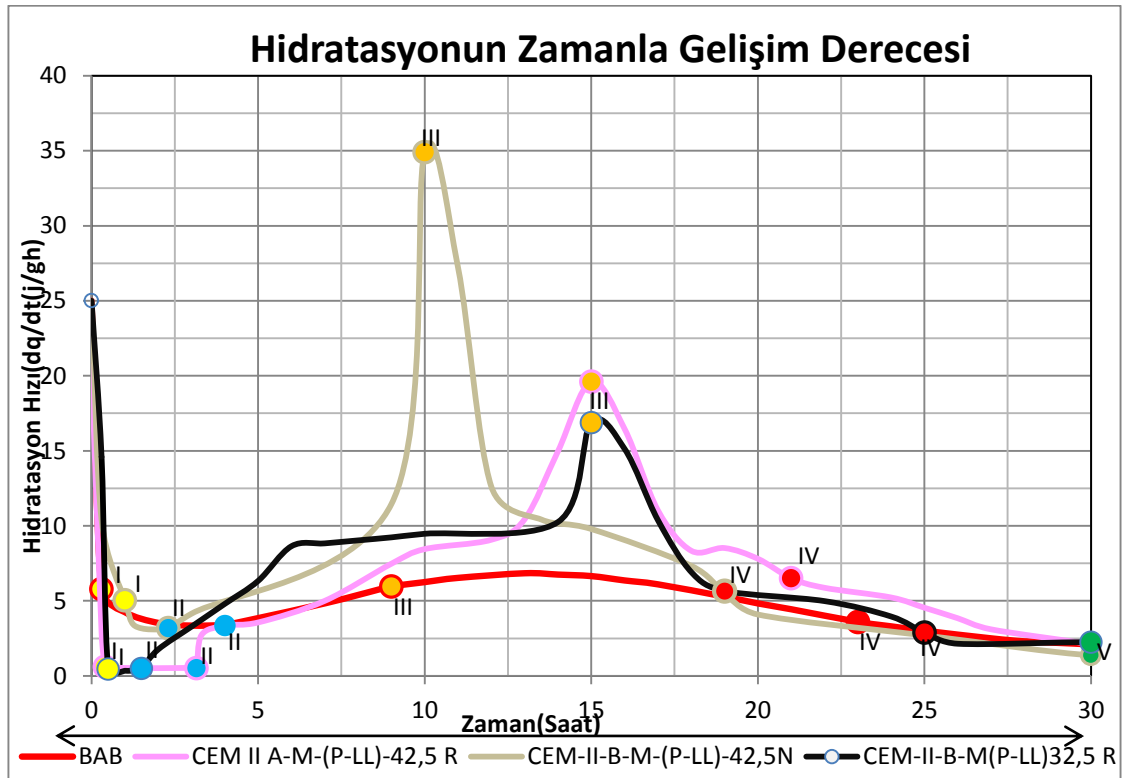
Şekil 4.18. BAB, CEM II 42,5-B-M (P-LL) N Çimentolarının zamana bağlı olarak hidratasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik



Şekil 4.19. BAB,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak hidratasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik



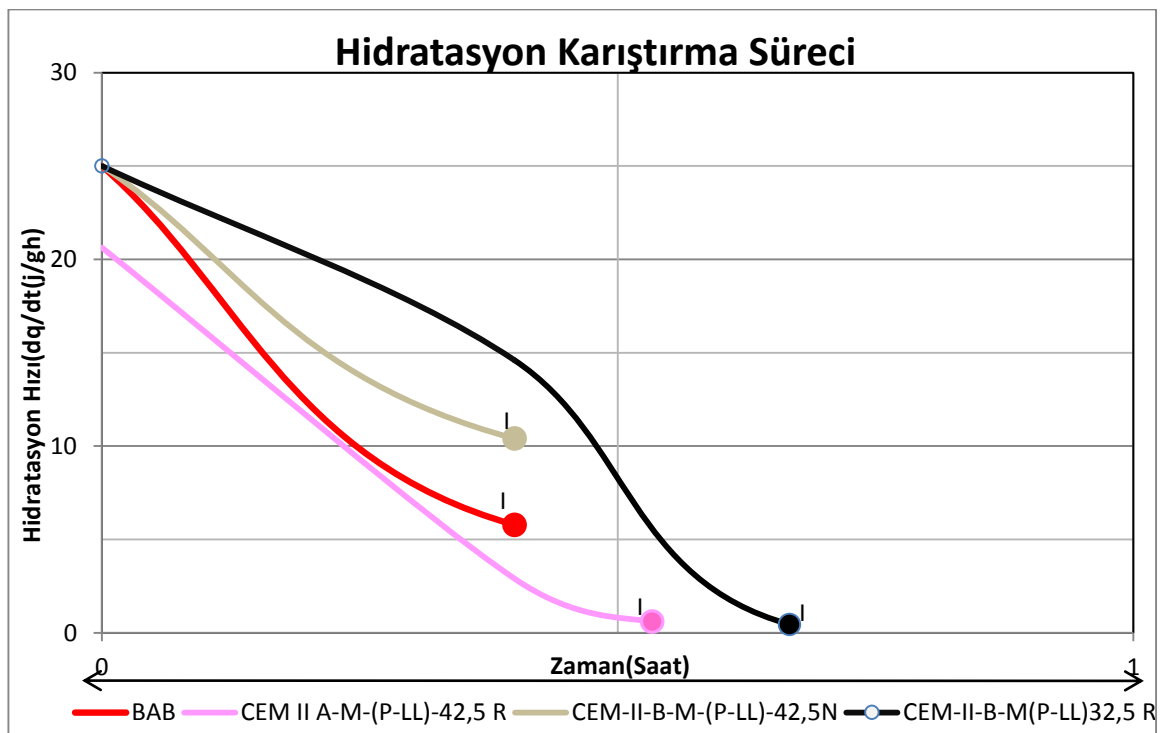
Şekil 4.20. CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik



Şekil 4.21. BAB, CEM II 42,5-A-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak hidratasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik

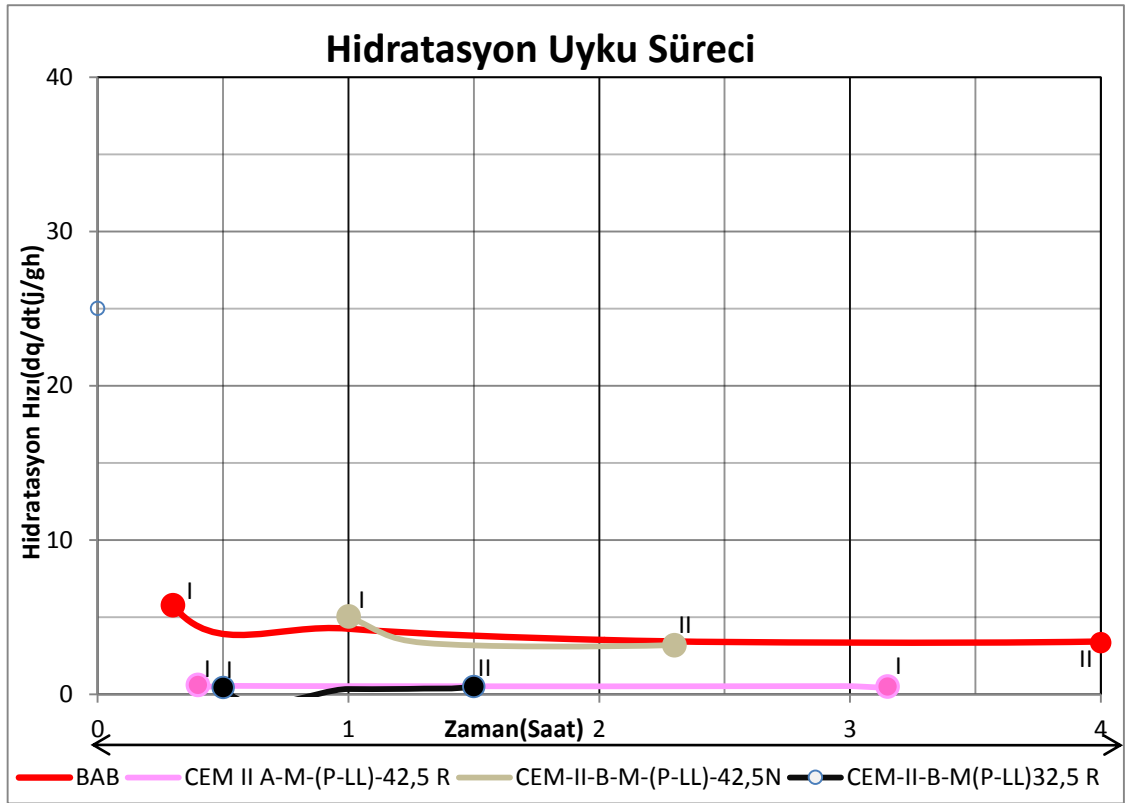
Yukarıdaki grafiklerde ısı çıkış hızı, zaman sürecinde analiz edilmiştir. Bu analiz çerçevesinde süreçler çeşitli bölgelere ayrılarak değerlendirilmiştir.

Bu aşamaları ayrı ayrı inceleyecek olursak BAB Çimentosuyla CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R, çimentolarının karşılaştırmalı olarak analizini yapmış olacağız.



Şekil 4.22. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik

Karıştırma Süreci: Çimento ve su karışıktan hemen sonra alüminatlar çözünmeye ve tepkimeye başlarlar. Bu süreçte karışımın tasarımı son derece önemlidir. Alüminatın su ile tepkimesi sonucu jelimsi bir tabaka oluşur (C-A-S-H) (Şekil 4.22). Bunun sonucu ısı çıkışı önemli ölçüde azalır. Bu süreç 20-30 dk. içerisinde gerçekleşmiş olduğundan karıştırma sürecini kalorimetre de tam olarak izleyebilme şansımız olamamıştır. Dolayısıyla bu süreçle ilgili çimento türleri arasındaki farklılıkları ortaya koyabilmek doğru bir yaklaşım olamayacaktır.



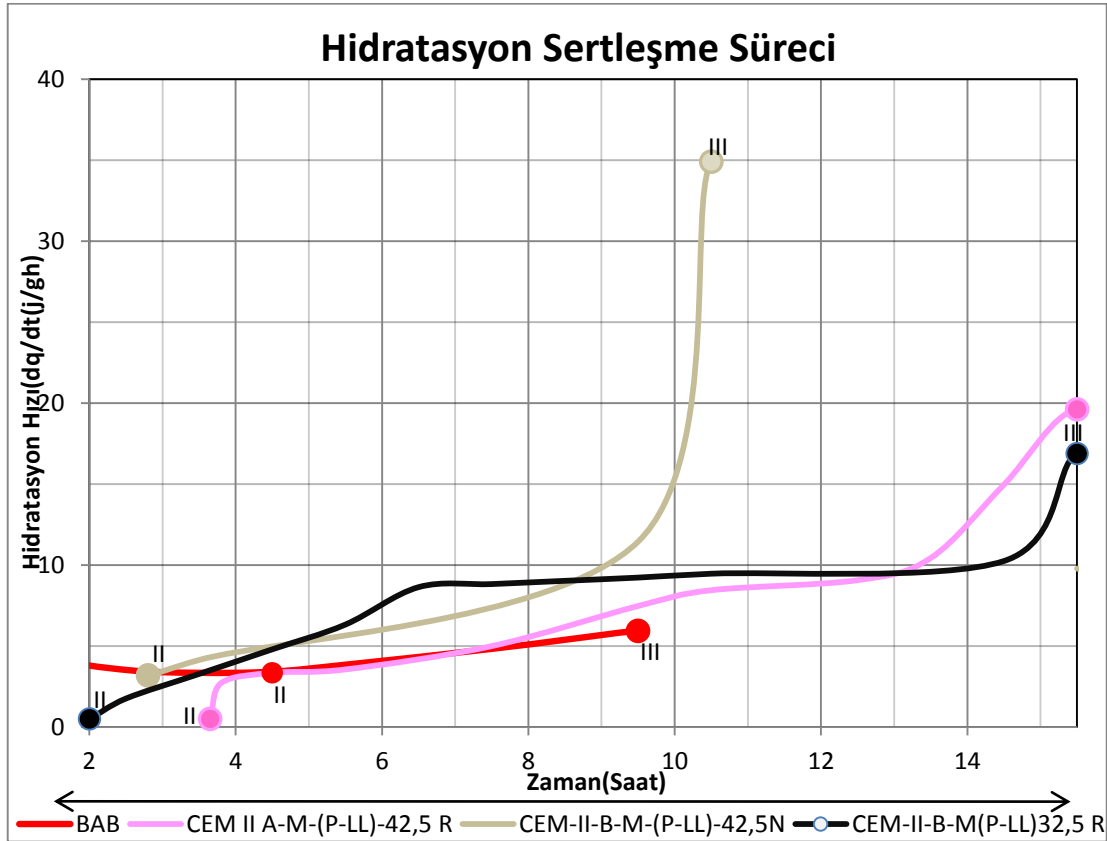
Şekil 4.23. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentolarının zamana bağlı olarak hidrasyon ısı çıkış hızlarını gösteren grafik

Uyku Süreci : Bu süreçte Şekil 4.23'den de görüldüğü gibi ısı çıkış hızının iyice yataylaşarak hemen hemen sabit kaldığı görülmektedir. Ancak, bu hiçbir tepkimenin olmadığı anlamına gelmez. Aksine çimento bileşenleri çözünmeye devam etmektedir ve karışım suyu kalsiyum(Ca) ve hidroksil (OH⁻) iyonları ile doymaya devam etmektedir (Mehta *et al.* 2006).

Bu süreçte CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentolarının yapısında bulunan puzolan ikamesi doğal puzolanların alit (C₃S) hidrasyonunu hızlandırdığı düşünülmektedir. Alit hidrasyonunun doğal puzolanlar tarafından hızlandırılmasının sebebi henüz tam olarak açıklanamamıştır (Troxell and Others 1958), -Alit hidrasyonun doğal puzolanlar tarafından hızlandırılması ise uyku sürecinin kısılmasına neden olmaktadır. B tipi çimentoların katkı miktarı A tipi çimentolara göre fazla olduğundan bu süreç grafikten de görüleceği üzere CEM II 42,5-B-M (P-LL) ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentolara sahip

numunelerde daha kısa sürerken, süreç CEM II 42,5-A-M (P-LL) R içeren numunelerde bir miktar daha uzamıştır.

BAB çimentosunun yapısında alit fazı bulunmadığından uyku süreci, diğer çimentolara oranla oldukça uzun sürmektedir. Bu süreçte beton işlenebilirliğini korumaktadır. Böylelikle betonun şantiyeye taşınması ve kalıplara yerleştirilmesi sırasında işlenebilme ömrünün kısalığından dolayı oluşabilecek sorunlar ötelenmiş olacaktır. Bu nedenle priz geciktirici vb. katkıların oluşturduğu ek maliyetten'de tasarruf sağlanmış olacaktır. Ancak soğuk havalarda dökülecek betonlarda dezavantaj oluşturmaması için BAB çimentosuyla uyumlu priz hızlandırıcı katkıları kullanılması uygun olacaktır. Ayrıca BAB çimentosunun diğer katkı türleriyle uyumu da araştırılması gereken bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır.



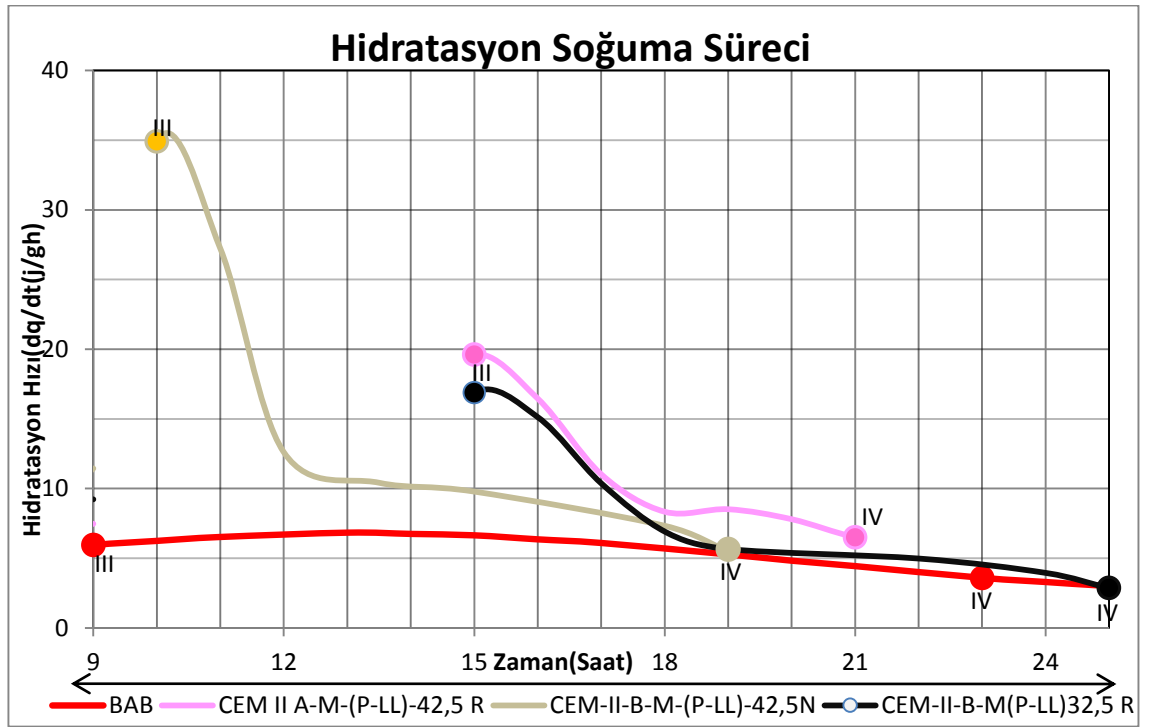
Şekil 4.24. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik

 Sertleşme Süreci : BAB çimentosu dışındaki diğer çimentolar yapısında puzolan ihtiva eden çimento tipleridir. Şekil 4.24'e bakıldığında CEM II 42,5-B-M (P-LL) N, CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R ait grafiklerin tepe noktasının daha dik olduğu ve puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak ikincil başka tepe noktalarının oluştuğu görülmüştür. Bu bulgu Çimentoya puzolan katılması hidrasyon ısı hızı-zaman diyagramının daha dikleşmesine ve puzolanik reaksiyonlar sonucu yerel ısı çıkışlarına sebebiyet verdiğinin bir göstergesidir. (TCMB-AR-GE-Y99/2) Aynı etki Şekil 4.24'e bakıldığında puzolan ihtiva etmeyen CEM I 42,5 R çimentolu numuneler için de geçerlidir onunda tepe noktası BAB çimentosu kadar olmasada diğer çimento tiplerine göre daha yatıktır. Ayrıca Grafikten görüleceği üzere CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentosunun BAB çimentosundan yaklaşık olarak 2,5 kat daha fazla ısı çıkış hızına sahip olduğu, CEM II 42,5-A-M (P-LL) R çimentosunda bu oranın yaklaşık 3 kat olduğu, CEM II 42,5-B-M (P-LL) N çimentosunda ise bu oranın yaklaşık olarak 5 katına kadar çıktığı görülmektedir. Bu durumun en önemli sebebi bu süreçte baskın bileşenin C_3S (alit) olmasıdır ve BAB Çimentosunda B_2O_3 'ün varlığından dolayı C_3S oluşmamasıdır. Bu nedenle CEM II 32,5-B-M (P-LL) R, CEM II 42,5-B-M (P-LL) N ve CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ile yapılan numunelerde alit bileşeninin etkisinden dolayı Kimyasal Reaksiyonlar sonucu daha fazla C-S-H ve CH (Şekil 4.11) kristalleri oluşmakta ve bunun sonucunda da daha fazla ısı açığa çıkmaktadır. BAB Çimentosu bu avantajıyla düşük hidrasyon ısısına sahip CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentosundan dahi pişirme sıcaklığının düşük olmasını ve karbon salınımının az olması gibi avantajları ortaya çıkarmaktadır. Tabii bu sonucun oluşmasında tek etkenin bu parametre olmadığı unutulmamalı ve incelik gibi diğer parametrelerin de incelenmesinin gerektiği düşünülmektedir.

Isı çıkışının hızlanması hidrasyonun hızlanmasının ve çimento hamurunun sertleşmesinin belirtisidir. Bu olay sertleşme sürecinin ana karakteristiğini oluşturur. Şekil 4.24 İncelendiğinde Sertleşme sürecinin en uzun sürdüğü çimento tipleri sırasıyla CEM II 32,5-B-M (P-LL) R ve CEM II 42,5-A-M (P-LL) R çimentosu olurken CEM II 42,5-B-M (P-LL) N çimentosunda süreç biraz daha kısalmıştır. Bunun nedeninin çimentoların R (tipi erken dayanım kazanım özelliğinden kaynaklandığı

düşünülmektedir. Grafikten de görüleceği üzere BAB çimentosunda ise sertleşme sürecinin ve buna paralel olarak sürecin içerisinde gerçekleşen priz başlama ve bitiş sürelerinin de diğer çimento tiplerine göre oldukça erken başlayıp bittiği görülmektedir.

Şekil 4.24'e bakıldığında CEM II 32,5-B-M (P-LL) R, CEM II 42,5-A-M (P-LL) R çimentolarında BAB ve CEM II 42,5-B-M (P-LL) N Çimentolarına oranla sertleşme sürecinin oldukça uzun sürdüğü buna bağlı olarak priz başlangıç ve bitiş sürelerinin daha geç gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca aynı çimento tiplerine ait numunelerde, Grafikten de görüldüğü üzere normal bir portland çimentosu olan CEM I 42,5 R ve CEM I 52,5 R'ye göre de priz bitiş ve başlangıç sürelerinde önemli bir ötelenme söz konusu olduğu görülmüştür. Bu durum çeşitli araştırma bulgularında belirtildiği gibi betonlarda priz başlangıcı ve sonu süreleri puzolanın, portland çimentosu yerine ikame miktarına, inceliğine ve reaktifliğine bağlı olduğu, farklı iki çalışmada %20 ve %25 mertebesinde doğal puzolan içeren çimentolarda, portland çimentosu içeren kontrol numuneleriyle yaklaşık aynı priz süreleri gözlemlendiği (Davis *et al.* 1980). Bununla beraber, yüksek miktarlarda doğal puzolan kullanımının (%30-70 arası) priz sürelerini önemli miktarlarda geciktirdiği bulgularıyla örtüştüğü düşünülmektedir (Mortureux *et al.* 1980). Ancak CEM II 42,5-A-M (P-LL) R çimentosu için durum katkı(kalker) miktarı paralelinde gerçekleşmemiştir. (Bknz. Çizelge 4.8 katkı miktarı) bu çimento türünde katkı miktarının %18,84 olmasına rağmen priz başlangıç ve bitiş sürelerinin oldukça ötelenmiş olması puzolan reaktifliğine ve özgül yüzey tesirinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Ancak CEM II 42,5-A-M (P-LL) R çimento türü ile ilgili kesin bir yargıya varabilmek için puzolanın reaktiflik özellikleri veya diğer parametrelerin derinlik kazandırılarak araştırılması daha doğru olacaktır. Ayrıca bu konu ile ilgili olarak konunun bütünüyle ortaya konulabilmesi için diğer parametrelerin (puzolanik reaktiflik, incelik vb.) hususların ayrıntılı olarak incelenmesi gerektiği düşünülmektedir.

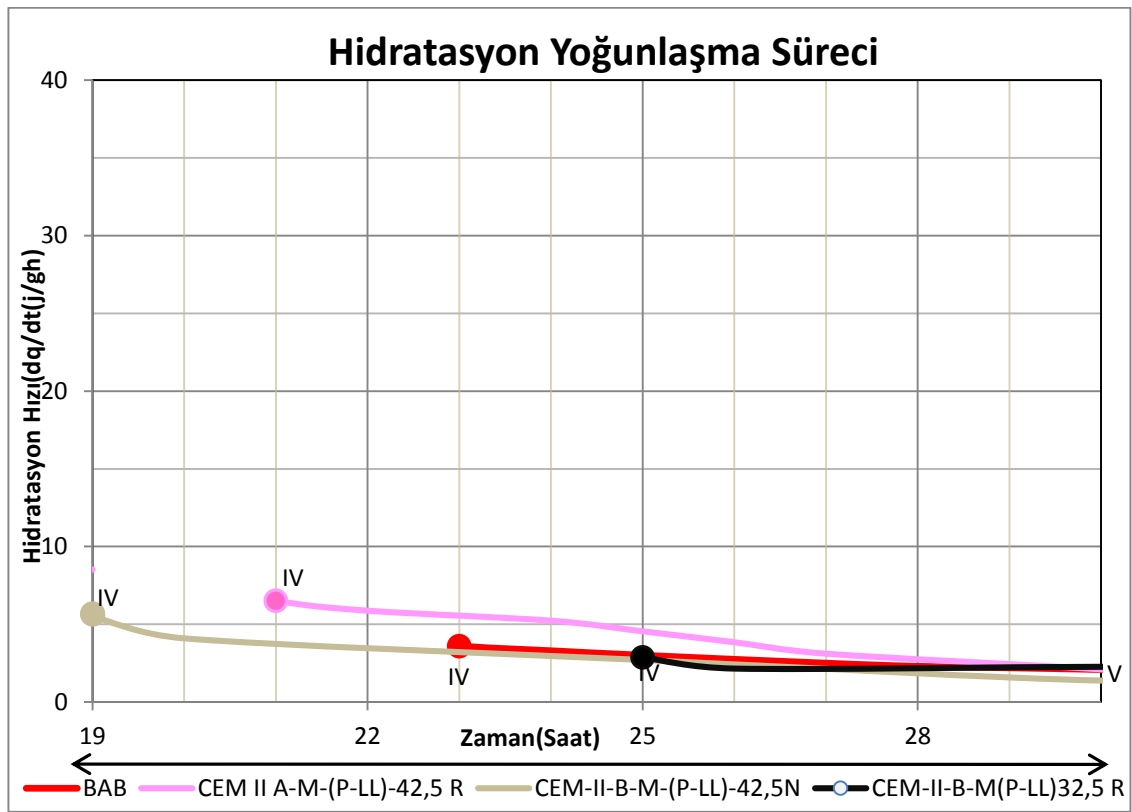


Şekil 4.25. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik

Soğuma Süreci : Bu süreçte C_3S reaksiyonu yavaşlamaya başlar ve zirveye ulaşan ısı çıkışı düşmeye başlar. Bunun nedeni oluşan C-S-H ve CH ürünlerinin su ve çözünmemiş çimento tanelerinin temasını engellemesidir. C-S-H ve CH oluşumu arttıkça betonun dayanım kazanması artar. Ancak yine de beton hala geçirimlidir. Hafif yükleri taşıyabilmektedir.

Şekil 4.25'e bakıldığında CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarıyla yapılan numuneler de sürecin aralığı daha dar ve ısı çıkış hız değişimleri BAB çimentosuna oranla sırasıyla yaklaşık 10, 4 ve 4.5 kattır. Bu sebeple CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentolarıyla yapılan numunelerde büzülme ve sürtünme sonucu oluşan iç gerilmelerin dayanım kazanımını geçme olasılığı BAB çimentosuna göre oldukça yüksektir. Bu olay önlem alınmazsa çatlamalara ve büzülmelere neden olur, Gerilmeleri azaltmak için derz kesimine başlanmalı veya betonun kür bakımı önemiyetle yapılmalıdır (Kosmatka *et al.* 2006). Bu bilgiler ışığında BAB

çimentosuyla üretilen betonlarda derz aralıklarının daha geniş olabileceği, yekpare daha fazla hacimde beton dökülebileceği ve bunların soğutulabilmesi için bakım masraflarının en aza indirgeyebileceği gibi avantajların ortaya çıkabileceği bir kez daha kanıtlanmaktadır. Ancak incelik, puzolan etkisi vb. parametrelerinde bu hususa etki edebileceği unutulmamalı ve bu parametrelerinde derinlemesine irdelenmesi gerekmektedir.

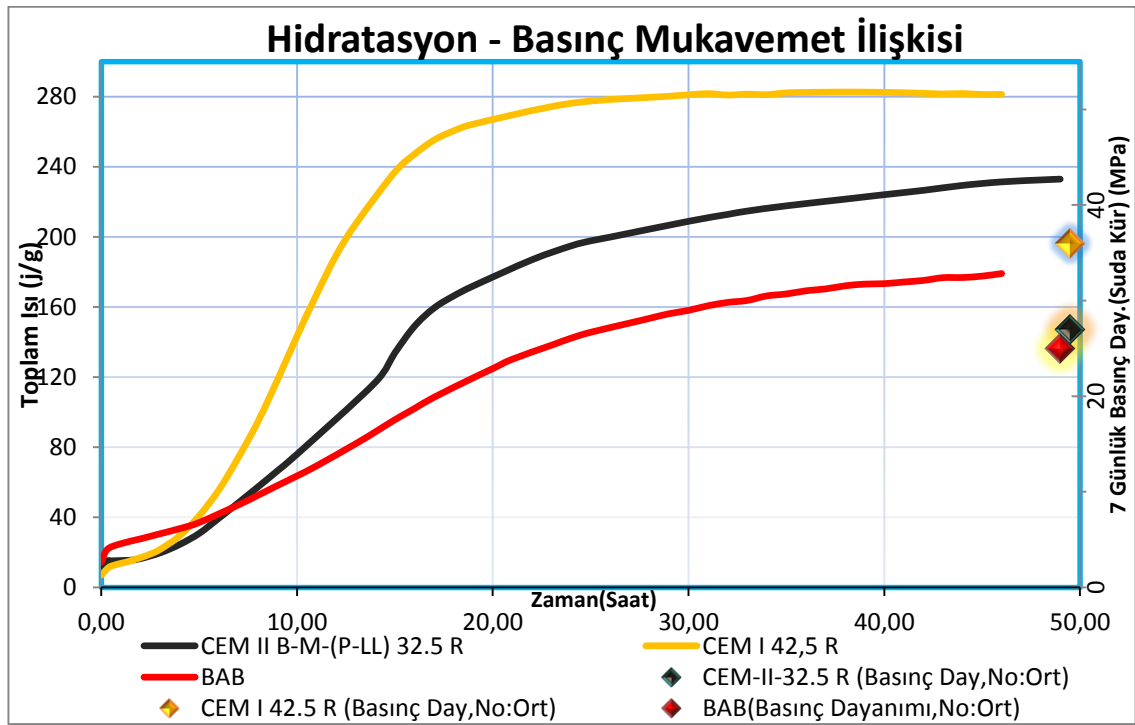


Şekil 4.26. BAB,CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R Çimentolarının zamana bağlı olarak Hidratasyon Isı Çıkış Hızlarını Gösteren Grafik

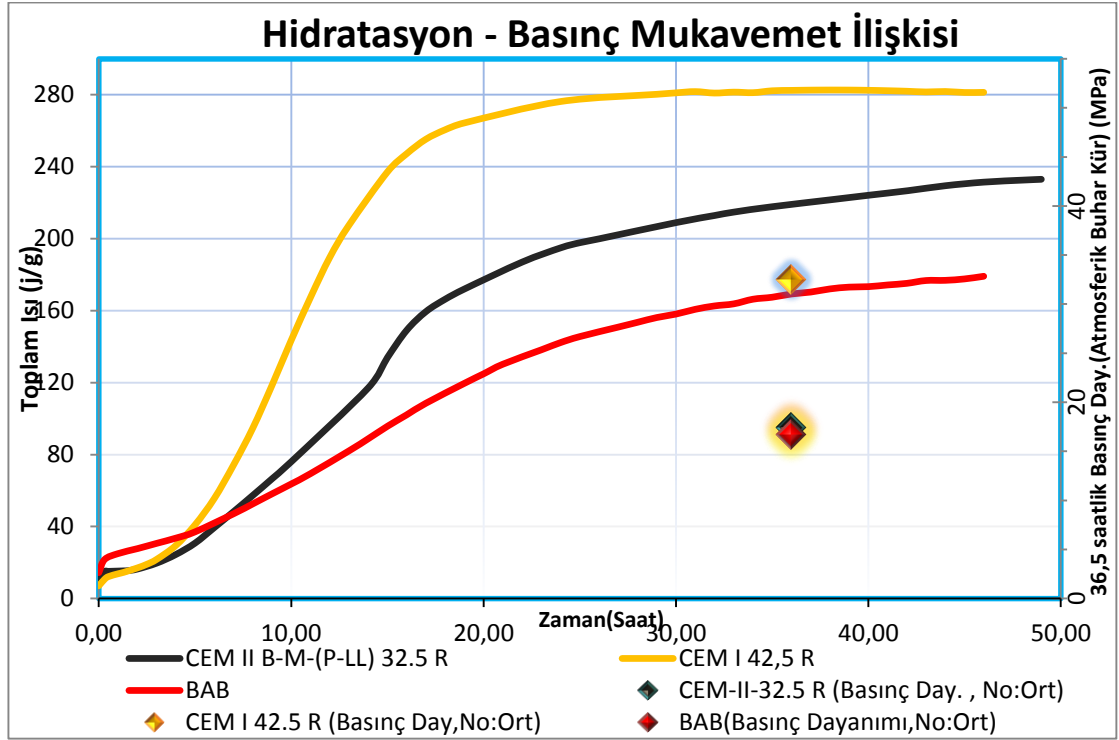
Yoğunlaşma Süreci: Bu periyotta Şekil 4.26'dan da anlaşılacağı üzere bütün çimento tipine ait numunelerde de ısı çıkış hızı oldukça azalmakta ve eğri yataylaşmaktadır. Bunun nedeni hidratasyon reaksiyonları yavaşlamaya başlamış olması ve ısı çıkışının önemli düzeyde azalmasıdır. Bu periyot hidrate olmamış çimento tanecikleri ile suyun bulunması durumunda çok uzun bir süre devan eder. Kısaca, betonun yıllar sürebilecek bir zaman diliminde dayanımı ve dayanıklılığı artar(Mehta *et al.* 2006) Burada Betonun

erken yaşıta ani sıcaklık değişimlerine maruz kalmayacak şekilde muhafaza edilmesine dikkat edilmelidir(Betonun üzerine yalıtkan örtüler sarılabilir). Bu süreç yıllar alan bir süreç olmasına rağmen 30.saatten sonra eğim değişimlerinde pek bir farklılık olmadığından 30 saatlik süreç grafikte dikkate alınmıştır.

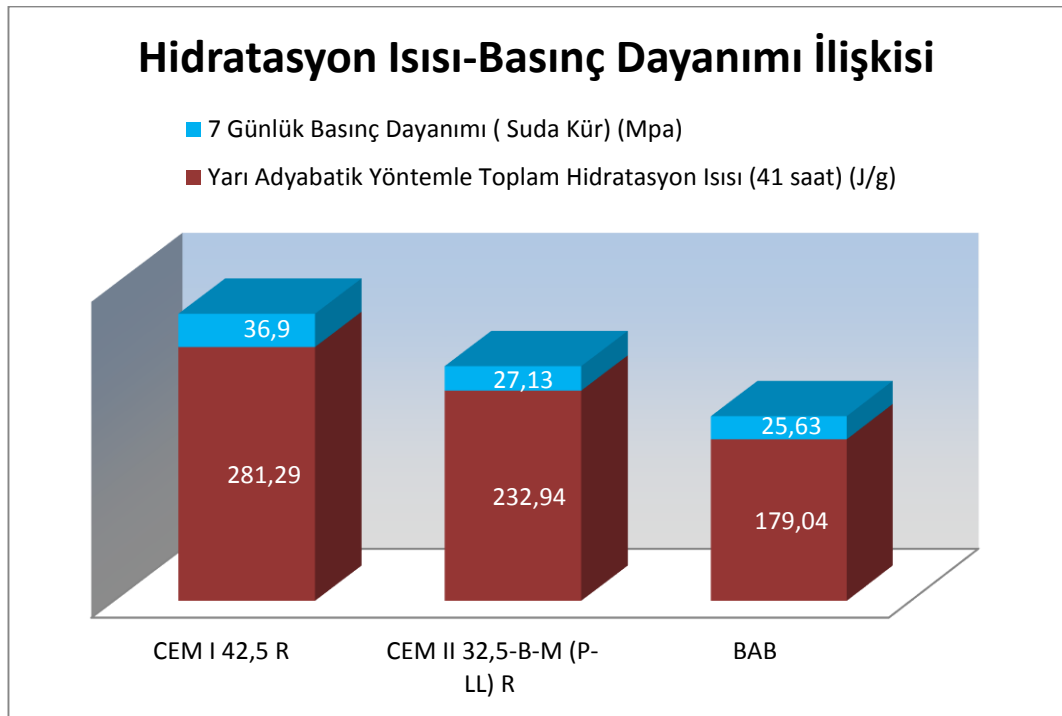
BAB-CEMI42,5R-CEM-II-32,5B-M R Hidratasyon Süreci Detaylı Analizi ve Karşılaştırması



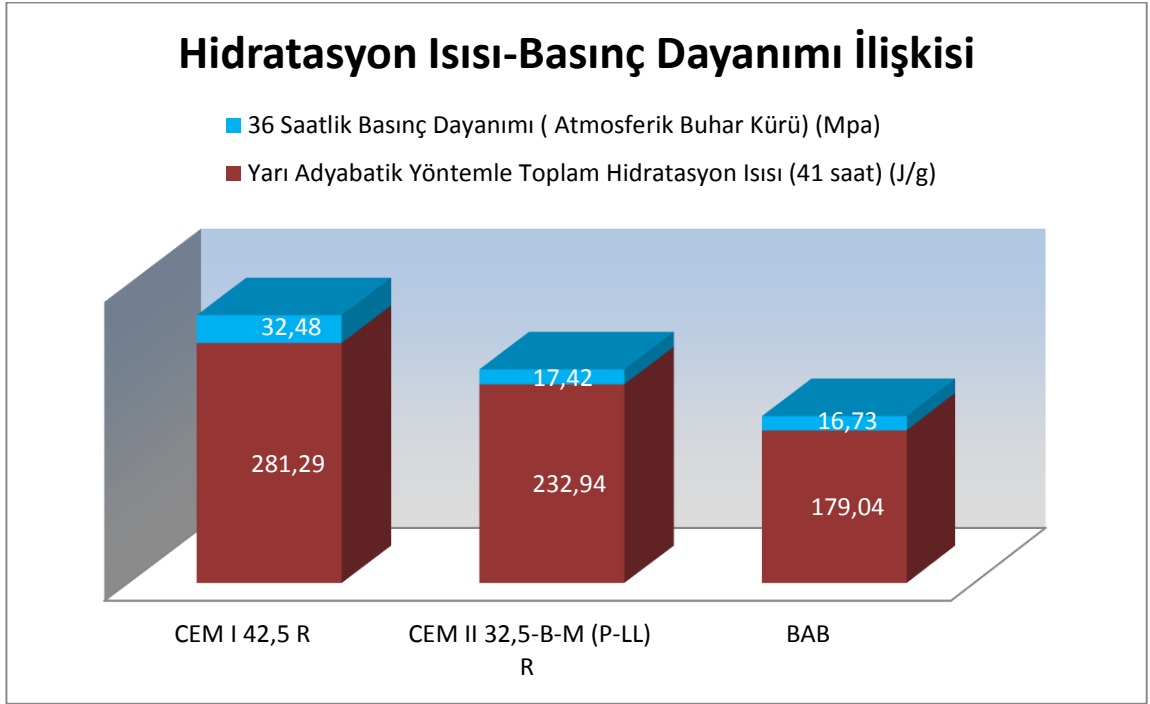
Şekil 4.27. Hidratasyon ısı ile suda kür yöntemiyle 7 günlük basınç mukavemetlerinin ilişkisini gösteren grafik



Şekil 4.28. Hidratasyon ısısı ile atmosferik buhar kürü yöntemiyle 36,5 saatlik basınç mukavemetlerinin ilişkisini gösteren grafik



Şekil 4.29. Yarı adyabatik yöntemle 41 saat sonunda toplam hidratasyon ısısı ile su kürü yöntemiyle 7 günlük basınç mukavemetlerinin ilişkisini gösteren bar grafik



Şekil 4.30. Yarı adyabatik yöntemle 41 saat sonunda toplam hidratasyon ısısı ile atmosferik buhar kürü yöntemiyle 36,5 saatlik basınç mukavemetlerinin ilişkisini gösteren bar grafik

Yukarıdaki grafiklerde 41 saatlik hidratasyon toplam değerleriyle Suda kür edilmiş 28 günlük basınç mukavemeti değerleri karşılaştırılmıştır. Farklı zaman diliminde karşılaştırma yapılmasının nedeni yarı adyabatik yöntemle 41 saatlik sürenin sonundaki hidratasyon değerleriyle, 7 günlük izotermal kalorimetre hidratasyon değerleri arasında tam bir korelasyonun olmasıdır (TS EN 13553). Bu korelasyonun neticesinde 7 günlük hidratasyon ısıları ile 7 günlük basınç mukavemetleri tam bir uyum içerisinde karşılaştırılabilmiştir. Konu 4.27,4.28 no'lu grafiklerle incelenmiş olup konunun daha iyi anlaşılabilmesi için 4.29,4.30 no'lu bar grafiklerle de detaylandırılmıştır.

Şekiller'deki grafiklere bakıldığında suda kür yöntemiyle 7 günlük basınç mukavemetleri ile 41 saatlik toplam hidratasyon arasında net bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Şöyle ki 41 saatin sonunda toplam hidratasyon ısısı değeri yüksek çıkan çimento tipinin basınç dayanım değerleride yüksek çıkmıştır. Bu korelasyon 3 çimento tipinde de bu şekilde gerçekleşmiştir. Buna göre Çimento dayanım sınıfları ile hidratasyon ısıları arasında bir korelasyon olduğundan bahsedilebilmesi mümkün

görülmektedir. Yine grafiklere bakıldığında BAB çimentolu numunelerde, yapısında %35 puzolan katkılı çimento tipi olan CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentolu numunelere oranla bile oldukça düşük hidrasyon ısıya sahip olurken diğer taraftan BAB çimentolu numunelerin basınç dayanım değerleri CEM II 32,5-B-M (P-LL) R çimentosuyla üretilmiş beton numunelerine çok yakın çıkmıştır. Ancak sadece bu bulguya istinaden bir yorum yapmak doğru sonuçlar vermeyebilir. Çünkü gerek beton tasarımında gerekse çimento tasarımında basınç dayanımına etki eden çok çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bütün bu faktörlerin ayrı ayrı değişken kabul edilip deneyler yapılması ve o deney sonuçları ışığında konunun değerlendirilmesinin daha doğru olduğu düşünülmektedir. Ayrıca BAB çimentosunda ki kısıtlı bilgi düzeyinde yorum yapılabilmesini zorlaştırmaktadır. Konunun üzerinde çalışılarak bilgi düzeyinin artırılması gerekmektedir. Deneylerde kullanılan BAB çimentosunun bilimsel araştırmalar için üretildiği ve temininde güçlükler çekildiği için yeni çimento temin edilememiş ve uzun süre bekletilmiş çimento kullanılmıştır. Bu durumun çimentonun özelliklerini yitirmesine neden olabilme ihtimali mevcuttur. Ancak hidrasyon deneylerinde BAB çimento bulguları literatürdeki deney sonuçlarıyla örtüşmektedir. Dolayısıyla çimentonun özelliklerini koruyabileceği fikri ağır basmaktadır. Ayrıca, deney sırasında beton karışımının kalıplara doldurulması esnasında ani priz görülmüş ve yerleştirme işleminde zorluklar çekilmiştir. Konunun derinlemesine irdelenmesi faydalı olacaktır.

Ayrıca Şekil 4.30'a bakıldığında 36,5 saatlik atmosferik kür değerleriyle hidrasyon değerleri arasında paralellik olduğu hidrasyon ısıya yüksek olan çimento sınıfının basınç dayanım değerlerinin de yüksek çıktığı görülmüştür. Yine 36,5 saatlik atmosferik buhar kürü ile 7 günlük suda kür değerleri karşılaştırıldığında en iyi erken dayanım performansına CEM I 42,5 R çimentolu numunelerin ulaştığı bir kez daha görülmektedir. Buna olası nedenin, katkısız bir çimento tipi olması, kimyasal bileşimindeki oksit oranları ve özellikle incelik faktörünün etkili olabileceği sanılmaktadır.

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

CEM II 42,5-B-M (P-LL) N,CEM II 42,5-A-M (P-LL) R ve CEM II 32,5-B-M (P-LL) R, CEM I 42,5 R, CEM I 52,5 R çimentolu harç numunelerinin, BAB Çimentolu numunelerle karşılaştırılarak hidrasyon davranışlarını tespit etmeye yönelik yapılan bu çalışmada varılan sonuçlar aşağıda özetlenmiştir.

1- Çimento fazındaki yapılan deneylerden sonra BAB çimentosunun hidrasyon ısısının çok düşük olması klinker pişirme sıcaklığını düşürecektir. Bu olay daha az enerji sarfiyatı sağlayacaktır. Enerji sarfiyatının azalmasıyla CO₂ emisyonu azalacak ve günümüzde sürdürülebilir teknoloji için enerjinin, doğal kaynakların ve çevrenin korunmasıyla arzulanan çevreci bir çimento tipi ortaya çıkacaktır.

2- Yapılan deneyler neticesinde, erken dayanım yönünden normal ve kompoze Portland çimentosuna göre bir miktar dezavantajlı görünse de gerekli ilâve önlemler alınması suretiyle bu engelin de aşılabileceği görülmektedir. Ancak BAB Çimentosunun erken dayanım özelliklerini artırıcı faktörler iyi analiz edilerek BAB çimentosuyla uyumu daha derinlemesine araştırılması gereken bir konu olarak ortaya çıkmaktadır.

3- BAB çimentosunun yapısında alit fazı bulunmadığından yapılan deneylerde uyku süreci, diğer çimentolara oranla oldukça uzun sürmüştür. Bu süreçte beton işlenebilirliğini korumaktadır. Böylelikle betonun şantiyeye taşınması ve kalıplara yerleştirilmesi sırasında işlenebilme ömrünün kısalığından dolayı oluşabilecek sorunlar ötelenmiş olacaktır. Bu nedenle priz geciktirici vb. katkıların oluşturduğu ek maliyetten'de tasarruf sağlanmış olacaktır. Ancak soğuk havalarda dökülecek betonlarda dezavantaj oluşturmaması için BAB çimentosuyla uyumlu priz hızlandırıcı katkıların kullanılması uygun olacaktır. Ayrıca BAB çimentosunun diğer katkı türleriyle uyumu da araştırılması gereken bir parametre olarak ortaya çıkmaktadır

4- BAB Çimentosuyla yapılan numune de hidrasyonun bir süreci olan soğuma sürecinde ısı çıkış hız değişimi oldukça düşük ve sürecin aralığı ise oldukça daha geniştir. Ayrıca diğer çimento tiplerine ait numunelerde ısı çıkış hız değişimleri BAB çimentosuna oranla fazladır. Bu farktan dolayı büzülme ve sürtünme sonucu oluşan iç gerilmelerin dayanım kazanımını geçme olasılığı diğer çimentolarda, BAB çimentosuna göre oldukça yüksektir. Bu olay önlem alınmazsa çatlamalara ve büzölmelere neden olur, Gerilmeleri azaltmak için derz kesimine başlanmalı veya betonun kür bakımı ehemmiyetle yapılmalıdır. BAB çimentosuyla üretilen betonlarda derz aralıklarının daha geniş olabileceğı, yekpare daha fazla hacimde beton dökülebileceğı ve bunların soğutulabilmesi için bakım masraflarının en aza indirgeyebileceğı hususu bir kez daha bu bulguyla kendini göstermiştir. Ancak incelik vb. parametrelerinde bu hususa etki edebileceğı unutulmamalı ve bu parametrelerinde irdelenmesi gerekmektedir.

5- Yapılan deneyler ve yapılan karşılaştırmalar neticesinde, yapısındaki kalker ve puzolan etkisinin belirli oranlarda kullanıldığı kompoze portland çimento tiplerinde hidrasyon ısısının normal portland çimentosuna göre bir miktar düştüğü ve puzolan kullanım oranının %35 i bulduğu çimento tiplerinde ise priz başlangıç ve bitiş sürelerinin bir miktar ötelendiğı görölmüştür. Ancak çimento inceliğinin ve puzolan reaktifliğinin de bu hususa etkisi olduğu unutulmamalı ve bu parametrelere bağı konunun detaylı olarak incelenmesinin faydalı olacağı düşünölmektedir.

6- Yapılan beton fazı deneyleri neticesinde, Schmidt Çekici ile basınç dayanım değerleri arasında zayıf bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Bu korelasyon ancak CEM I 42,5 R ile diğer çimento tipleri arasında kurulabilmiştir. BAB ile CEM II 32,5 B-M R değerlendirildiğinde ise herhangi bir korelasyon tespit edilememiştir. Bu sonuçlara göre Schmidt çekici yönteminin pek güvenilir bir method olmadığı kanısına varılmıştır. Ancak sebebin örnek azlığından olabileceğı varsayımında göz ardı edilmemeli ve durum detaylı bir şekilde incelenmelidir.

7- Yapılan deneyler ve yapılan karşılaştırmalar neticesinde, CEM I 52,5 R çimentolu numunenin hidrasyonun bütün süreçlerinde diğer numuneler arasında en fazla ısı çıkış

hızına sahip ve hidratasyon sürecini en erken tamamlayan numune olduğu görülmüştür. Bu durumun nedeni olarak yapısında çok yüksek oranda C_3A ve C_3S içermesi, CEM I 52,5 R ile yapılan numunelerde alit bileşeninin etkisinden dolayı Kimyasal reaksiyonlar sonucu daha fazla C-S-H ve CH kristalleri oluşmakta ve bunun sonucunda da daha fazla ısı açığa çıkmaktadır. Isı çıkış hızına etki edene bir diğer faktör olarak CEM I 52,5 R çimentosunun diğer çimento numunelerine göre ince öğütülmüş ve kimyasal bileşimi olması gösterilebilir. Bu bulguya göre CEM I 52,5 R Beyaz çimento ile yapılan betonların ; nihai erken dayanımın çok yüksek olması, buhar kürü gerektirmemesi (buhar kürü erken dayanımlı çimentolar için önemli bir maliyet gerektirir), priz hızlandırıcı katkı ilavesine gerek bırakmaması ve erken kalıp alınması zorunlu işlerde önemli oranda zaman tasarrufu sağlaması gibi bir çok avantajı da beraberinde getireceği düşünülmektedir.

8-CEM I 42,5, CEM II 42,5 B-M (P-LL) N ve CEM I 52,5 R çimentolu numunelerde özellikle hidratasyon soğuma sürecinde ısı çıkış hız değişimlerinde diğer çimentolara göre büyük bir fark oluşmuştur. Bu büyük farktan dolayı büzülme ve sürtünme sonucu oluşan iç gerilmelerin dayanım kazanımını geçme olasılığı BAB çimentosuna göre oldukça yüksektir. Bu olay önlem alınmazsa çatlamalara ve büzülmelere neden olur, Gerilmeleri azaltmak için derz kesimine başlanmalı veya betonun kür bakımı ehemmiyetle yapılmalıdır. Özellikle CEM I 52,5 R çimentosu için bu husus daha kritik bir önem kazanmaktadır. Bu bilgiler ışığında BAB çimentosuyla üretilen betonlarda derz aralıklarının daha geniş olabileceği, yekpare daha fazla hacimde beton dökülebileceği ve bunların soğutulabilmesi için bakım masraflarının en aza indirgenebileceği bu bilgiler ışığında tespit edilmiştir.

9- Yapısında puzolan ihtiva eden çimento tiplerinin hidratasyon hızı-zaman grafikleri incelendiğinde grafiklerin tepe noktalarının daha dik olduğu ve puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak ikincil başka tepe noktalarının oluştuğu görülmüştür. Bu bulgu çimentoya puzolan katılması hidratasyon ısı hızı-zaman diyagramının daha dikleşmesine ve puzolanik reaksiyonlar sonucu yerel ısı çıkışlarına sebebiyet verdiğinin bir göstergesidir.

10-Yapılan deneyler ve karşılaştırmalar neticesinde 7 günlük suda kür yöntemiyle kür edilmiş numunelerin basınç mukavemetleri ile 41 saatlik toplam hidrasyon değerleri arasında net bir korelasyonun olduğu görülmektedir. Şöyle ki 41 saatin sonunda toplam hidrasyon ısı değeri yüksek çıkan çimento tipinin basınç dayanım değerleride yüksek çıkmıştır. Bu korelasyon 3 çimento tipinde de bu şekilde gerçekleşmiştir. Buna göre Çimento dayanım sınıfları ile hidrasyon ısıları arasında bir korelasyon olduğundan bahsedilebilmesi mümkün görülmektedir. Ancak sadece bu bulguya istinaden bir yorum yapmak doğru sonuçlar vermeyebilir. Çünkü gerek beton tasarımında gerekse çimento tasarımında basınç dayanımına etki eden çok çeşitli faktörler bulunmaktadır. Bütün bu faktörlerin ayrı ayrı değişken kabul edilip deneyler yapılması ve o deney sonuçları ışığında konunun değerlendirilmesinin daha doğru olduğu düşünülmektedir.

11- BAB çimentosunun hız zaman eğrisi göre genel olarak değerlendirildiğinde eğrinin diğer çimento tiplerine göre oldukça yatay bir seyir izlediği ve pik noktasının da diğer çimento tiplerine göre oldukça düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bunun BAB çimentosunun kimyasal yapısında C_3S fazının olmayışı ve düşük C_3A fazından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu fazların olmayışı erken zamanlardaki hidrasyonu tetiklememiş ani iniş çıkışlara sebebiyet vermemiş ve eğri oldukça yatay bir seyir izlemiştir. Ayrıca diğer çimento türlerine göre hız-zaman eğrisi genel olarak değerlendirildiğinde ise puzolan katkılı çimentolara ait numunelerin hız-zaman eğrilerinde ikincil tepe noktalarının oluştuğu ve belirli bir orandaki puzolan katkısının, hız-zaman grafiğinde hidrasyon hızını bir miktar düşürdüğü gözlenmiştir.

12- BAB çimentosu ile dökülen betonlarda ani priz görülmüş olup, betonun yerleştirilmesi esnasında zorluklar yaşanmış ve bunun sonucu olarak beklenenden daha boşluklu beton üretilmiştir. Bu durumu aydınlatıcı yeni çalışmaların yapılması faydalı olacaktır.

13- Ayrıca yapılan deneyler neticesinde 36,5 saatlik atmosferik kür değerleriyle hidrasyon değerleri arasında paralellik olduğu hidrasyon ısı yüksek olan çimento tipinin basınç dayanım değerlerinin de yüksek çıktığı görülmüştür. Bu durumun

çimentonun incelik, kimyasal bileşimindeki oksit bileşimine bağlı olduğu düşünölmekle beraber daha bir çok değışkene bağılı olarak değışebileceğı de unutulmamalıdır.

14-Kısacası BAB Çimentosunda B_2O_3 'ün varlığından dolayı hidratasyonda büyük öneme sahip alit(C_3S) fazının oluşamaması ve C_3A fazının düşük oranda olmasından dolayı hidratasyon toplam ısısında ve hızında büyük bir düşüş görölmekte olup bu durum toplam hidratasyon ısısında ve süreçlerinde de yukarıda bahsedildiğı gibi büyük avantajları beraberinde getirmektedir. Deney sonuçları da bu bulguyu desteklemiştir. Bu avantajların yanında yeni yeni keşfedilen BAB çimentoları üzerinde sınırlı bilgi düzeyini ortadan kaldırmak için ; BAB çimentosunun optimum B_2O_3 içeriğinin belirlenmesi, BAB çimentosunun hidratasyonu sonucunda oluşacak olan hidratasyon ürünlerinin mikro yapılarının yani morfolojik, mineralojik ve petrografik yapıları ile birlikte boşluk yapısı, porozitesi gibi,daha bir çok fiziksel özelliklerin araştırılması ve ayrıca BAB çimentosunun kimyasal özelliklerinin derinleştirilerek incelenmesi, BAB çimentosuna farklı puzolan ve kimyasal katkıların ilavesi ile üretilen betonun özelliklerinin incelenmesi, BAB çimentosunun katkılarla uyumu gibi daha bir çok konuda araştırmaların yapılmasının faydalı olacağı kanaatindeyim.

KAYNAKLAR

- ACI Committee 234, 2000. "Guide for the use of silica fume in concrete" , American Concrete Institute, Farmington Hills,
- Aitcin, P.C. ve Laplante, P., 1990. "Long term compressive strength of silica fume concrete" , J.Materials in Civil Engineering, v.3, n.3, 164-170,
- Anonim, 1975. Concrete Manual. Denver: U.S. Bureau of Reclamation.
- Anonim,2002. TS EN 12350-2, Beton- taze beton deneyleri- bölüm 2: çökme (slamp) deneyi. Ankara: TSE.---
- Anonim,2010. Serki.com.tr.
- Anonim, T. 1985. In Beton Karışım Hesap Esasları ed. T. S. Enstitüsü. Ankara.
- Anonymous.1982. Dünyada ve Türkiye'de Metal ve Mineral Kaynaklarının Potansiyeli,Ticareti,Beklenen Gelişmeler. Ankara: MTA Enstitüsü Yayınları, No:187.
- Anonim, 1980. TS 3526: Beton Agregalarında Özgül Ağırlık ve Su Emme Oranı Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Asgeirsson H., Gudmundsson G., 1979. "Pozzolanic Activity of Silica Dust" , Cement and Concrete Research, pp 249-252
- Aydın,A.C.,Sağsöz, A.E., Öz, A.,Güvenç, H, Ceyhun,N., Erdoğan, Ş.,Akışkanlaştırıcı Katkıların Değişik Çimentolarla Uyumu, Uluslar arası Katılımlı Yapılarda Kimyasal Katkılar 3. Sempozyumu ve Sergisi, 2-3 Nisan 2009, s.201-214.)
- Bamforth, P.B., 1980. "in Situ Measurement of the Effect of Partial Portland Cement Replacement Using Either Fly Ash or Ground Granulated Blast Furnace Slag on the Performance of mass Concrete" . Proc. of Inst. of Civ. Engrs., C.69, s.777-800,
- Baradan, B., Yazıcı, H., Ün, H., 2002. Betonarme Yapılarda Durabilite. Dokuz Eylül Mühendislik Fakültesi, İzmir.
- Berry E.E. ve diğerleri, 1989. "Beneficiated Fly Ash: Hydration, Microstructure and Strength Development in Portland Cement Systems" , Proceedings of 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, ACI Special Publication 114, Vol. 1, pp 241-273, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Bentur, A. ve Goldman, A., 1989. "Curing effects, strength and physical properties of high Strength silica fume concretes" , J.Materials in Civil Engineering, v.1, n.1, 46-58,
- Bentur, A., Goldman, A. ve Chen, M.D., 1988. "The contributions of the transtion zone to The strength of high quality silica fume concretes" , Symp. on Bonding in Cementitious Composites, Proc., v.114, 97-103, Pittsburgh,
- Berry E.E. ve diğerleri, 1994. "Hydration in High Volume Fly Ash Concrete Binder" , ACI 90(4), pp 382-389
- Brickely, J.A. ve diğerleri, 1991. "Some characteristics of high strength concrete" , Canadian Journal of Civil Engineering, v.18, n.5, 885-889,

- Buil, M. ve Acker, P., 1985. "Creep of silica fume concrete" , Cement and Concrete Research, v.15, n.3, 463-466,
- Bürge, T.A., 1983. "High strength lightweight concrete with condensed silica fume" , ACI SP-79, 731-745, American Concrete Institute, Detroit,
- Candan F., 2011. "Borlu Aktif Belit Çimentolu Isıl İşlem Görmüş Ve Görmemiş Betonların Sülfat Direnci Yüksek Lisans Tezi", Atatürk Uni.,Erzurum
- Carette, G.G. ve Malhotra, V.M., 1983. "Mechanical properties, durability and drying Shrinkage of portland cement concrete incorporating silica fume" , Cement, Concrete and Aggregates, v.5, n.1, 3-13,
- Carette, G.G., Malhotra, V.M. ve Aitcin, P.C., 1987. "Preliminary data on long-term Strength development of condensed silica fume concrete" , CANMET Int. Workshop on Condensed Silica Fume in Concrete, Montreal,
- Carette, G.G. ve Malhotra, V.M., 1983. "Early-age strength development of concrete Incorporating fly ash and condensed silica fume" , ACI SP-79, v.2, 765-784, American Concrete Institute, Detroit,
- Carette, G.G. ve Malhotra, V.M., 1983. "Mechanical properties, durability and drying Shrinkage of portland cement concrete incorporating silica fume" , ASTM Concrete Aggregates, v.5, n.1, 1-3,
- Cesarini, C. ve Frigione, G., 1968. "A Contribution to the Study of the Physical Properties of Hardened Pastes of Portland Cement Containing Granulated Blast Furnace Slag" , 5th Int. Congr. Chemistry of Cement, C.4, s.237-247, Tokyo,
- Chen, Z. ve Zhang, X., 1986. "Distribution of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and the CSH phase in the oolithic marble/ hydrated cement paste interfacial zone" , 8th Int. Cong. on Chemistry of Cement, Proc., v.III, 449-453, Rio de Janeiro,
- Chen, Z. ve Zhang, X., 1986. "Investigation on the zinc/hydrated cement paste interfacial zone" ,8th Int. Cong. on Chemisty of Cement, Proc., v.III, 444-448, Rio de Janeiro,
- Cohen, M.D., Olek, J. ve Dolch W.L., 1990. "Mechanism of plastic shrinkage cracking in portland cement and portland cement-silica fume paste and mortar" , Cement and Concrete Research,v.20, n.1, 103-119,
- Colleparidi M. ve diğerleri, 1978. "The Effect of Pozzolanas on the C_3S Hydration" . Cement and Concrete Research, 8, pp 741 – 752
- Cong, X. ve diğerleri, 1992. "Role of silica fume in compressive strength of cement paste, Mortar and concrete" , ACI Materials Journal, v.89, n.4, 375-387,
- Cook D.J., Cao H.T., 1987. "An Investigation of the Pore Structure in Fly Ash / OPC Blends" , Proceedings of the 1st International RILEM Congress on Pore Structure and Material Properties, Versailles, Vol. 1, pp 69-76, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Çelik, R., S., Kocabeyler, M., F., Tunç, E., Sağlık, A., Sümer O., Ünal, U., 2009. Borlu Aktif Belit Çimentonun Özellikleriyle Klasik ve Kütle Betonlarda Kullanılabilirliği. ed. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü. BOREN, Ankara.
- D'ans, J. ve Eick, H., 1953. "The System $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ at 20 C Zement, Kalk-Gips,C.6, No.9, s. 302-311,

- Davis R.E., 1950. "A Review of Pozzolan Materials and Their Use on Concretes" , Symposium on Pozzolan Materials in Mortars and Concretes, STP 99, ASTM, 10. Kaynaktan alınmıştır.
- Demoulian E.,Gourdin, R., Hawthorn, F. ,ve Vernet, C., 1980 "Influence de la Composition Chimique et de la Texture des Laitiers sur leur Hydraulicite" , 7 th Int. Congr. Chemistry of Cement, C. II, s.III-89-94, Paris,
- Detwiler, R.J., 1990. "Subcritical crack growth in the cement paste-steel transition zone" , Cement Concrete Research, v.20, n.2, 277-284,
- Diamond S., 1983, "Alkali Reactions in Concrete - Pore Solution Effects" , Proceedings of the 6th International Conference on Alkali Aggregate Reaction, Kopenhag, Danimarka, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- D.S.İ Teknik Bülteni 2009 Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu ve DSİ Projelerinde Uygulanabilirliği. s:105. Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara
- D.S.İ TAKK Dairesi, Boren 2009 "Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu Klasik Ve Kütle Betonlarında Kullanılabilirliği Nihai Rapor". Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Ankara
- Durlu, T. 1992. Katıhal Fiziğine Giriş. Ankara: Set ofset Ltd.
- Editör P.C. Hewlett, 1998. Lea' s Chemistry of Cement and Concrete, John Wiley and Sons Inc.,Fourth Edition, New York,
- Editör Swamy R.N., 1986. "Cement Replacement Materials" , Blackie & Son Ltd., , Londra
- Efes Y., 1980 . "Investigations on two Special Cements" , Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, Sub Theme V, pp 15-20, 10. Kaynaktan alınmıştır.
- Ekinci, C.E. ve Yeğinoğlu, A., 1996. "Silis dumanı katkılı betonların çarpma dayanımı" , 4.Ulusal Beton Kongresi, Bildiriler Kitabı, 279-289, İMO, İstanbul,
- Erdoğan, B., 2004. "Seminer Notları" , TÇMB, Ankara,
- Erdoğan, T. Y. 1995. Beton Oluşturan Malzemeler Çimentolar. Ankara: Türkiye Hazır Beton Birliği
- Erdoğan, T., Y., 2003. Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.S., 741, Ankara.
- Erdoğan K., 1996 . "Effects of Pozzolan Additions on Grindability and Some Mechanical Properties of Pozzolan Cements of Different Fineness Values" , Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara.
- Erdoğan, K., Hydration Properties of Limestone Incorporated Cementitious Systems. PhD. Thesis, METU, Civil Engineering Department, Ankara, 2002.
- Ezeldin, A. ve Balaguru, P., 1989. "Bond behavior of normal and high-strength fiber Reinforced concrete" , ACI Materials Journal, v.86, n.5, 515-524,
- Feldman R.F., 1981. "Pore Structure Formation During Hydration of Fly Ash and Slag Cement Blends" ,Materials Research Society Annual Meeting, Boston, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Gjörv, O.E. ve Løland, K.E., 1982. "Condensed silica fume in concrete" , Report No: BML 82.610,Norwegian Institute of Technology, Trondheim,
- Gjörv, O.E., Monteiro, P.J.M. ve Mehta, P.K., 1990. "Effect of condensed silica fume

- on the Steelconcrete bond” , ACI Materials Journal, v.87, n.6,
- Goldman, A., 1987. M.Sc. Thesis, Technion, Israel Institute of Technology, Dept. of Civil Eng., Haifa, Israel,
- Goldman, A. ve Bentur, A., 1989. “Bond effects in high strength silica fume concretes” , ACI Materials Journal, v.86, n.5, 440-447,
- Grutzeck, M.W., Roy, D.M. ve Wolfe-Confer, D., 1982. “Mechanism of hydration of portland cement composites containing ferrosilicon dust” , 4 th Int. Conf. on Cement Microscopy, Proc.,193-202, Duncanville, Texas,
- Grzymek J. ve diğerleri, 1980. “Hydration of Cements with Pozzolan Additions” , Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cement, Paris, IV, pp 66-71, 10. Kaynaktan alınmıştır.
- Güner M.S. ve SÜME V., 2000. “Yapı Malzemesi ve Beton” Aktif Yayınevi, Ankara.
- Hansen, W., 1987. “Creep and drying shrinkage of very high strength concrete” , Dept. of Civil Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, MI,
- Haşiloğlu G.,2011,” Borlu Aktif Belit Çimetolü Betonların Taramalı Elektro Mikroskop (Sem) Ve Xrd Işınlarıyla Analizi Yüksek Lisans Tezi” Atatürk Üniversitesi,Erzurum
- Helland, S., Hoff, A. ve Einstabland, T., 1983. “High strength concrete” , Norsk Betongdagr seminerinde sunuldu, Trondheim, Norway,
- Hooton R.D., 1986. “Permeability and Pore Structure of Cement Pastes Containing Fly Ash, Slag and Silica Fume” , Blended Cements, Denver 1984, ASTM Special Technical Publication 897, pp 128-143, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Hooton, R.D., 1986. “Permeability and pore structure of cement pastes containing fly ash, Slag and silica fume” , ASTM STP-897, 128-143, American Society for Testing and Materials, Philadelphia,
- Huang, C. ve Feldman, R.F., 1985. “Influence of silica fume on microstructural development In cement mortars” , Cement and Concrete Research, v.15, n.2, 285-294,
- Huang, C. ve Feldman, R.F., 1985. “Hydration reactions in portland cement-silica fume blends” , Cement and Concrete Research, v.15, n.4, 585-592,
- Ivanov, Y.P. ve Roshavelov, T.T., 1990. “The effect of condensed silica fume on the Rheological behavior of cement pastes” , Int. Conf. on Rheological Behavior of Cement Pastes, Proc.,23-26, Liverpool,
- Jahren, P., 1983. “Use of silica fume in concrete” , ACI SP-79, 625-645, American Concrete Institute,Detroit,
- Johansen, R., 1983. “Report: 6, Long-term effects” , Report STF 65 A 81O31, Cement and Concrete Research Institute, Trondheim, Norway,
- Johansen, R. ve Dahl, P.A., 1983. “Bond properties of silica fume concrete”, Bruk av silika: Betong,Norske Sivilingeniørs Forening seminerinde sunuldu. Oslo, Norway,
- Kabak, M. 2004. X-Işınları Kristalografisi. Ankara: Bıçaklar Kitabevi.
- Kameshima, N. ve Takemura, A., 1982 “Relationship Between Chemical properties of Blast Furnace Slags and Strength of Portland Blast Furnace Slag Cements” , Review of the 36th General Meeting of CAJ, s.55-75,

- Katnaş, F., 2004. "Seminer Notları" , TÇMB, Ankara,
- Khayat, K.H. ve Aitcin, P.C., 1992. "Silica fume in concrete: an overview" , ACI SP-132, 835-865, American Concrete Institute, Detroit,
- Koerth, W., 1976. "Volume Stoichiometry of the Formation of Hydrate Cement-a Contribution to Developing a Practicable Theory of Hardening" , Silkattechnik, C.27, No.7, s.244-246,
- Kuleli Ö., 2012. "Çimento Mühendisliği El Kitabı", Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. Ankara.
- Lea, F.M., 1970 The Cemistry of Cement and Concrete, Edward Arnold Ltd,
- Løland, K.E., 1983. "Strength and deformation properties of hardened concrete" , Bruk av Silika; Betong, Norske Sivilingeniørs Forening seminarinde sunuldu, Oslo, Norway,
- Luther, M. ve Hansen, W., 1989. "Comparison of creep and shrinkage of high-strength silica Fume concretes with fly ash concretes of similar strength", ACI SP-114, v.1, 573-591, American Concrete Institute, Detroit,
- Maage, M., 1986. "Strength and heat development in concrete: influence of fly ash and condensed silica fume" , ACI SP-91, v.2, 923-940, American Concrete Institute, Detroit,
- Maage, M. ve diğerleri, 1990. "Long term strength of high-strength silica fume concrete" , ACI SP-121, 399-408, American Concrete Institute, Detroit,
- Malhotra, V.M., 1983. "Strength and Durability Characteristics of Concrete Incorporating aPelitized Blast Furnace Slag" 1st Int. Confr on Fly Ash, Silico Fume and Slag in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-79, C.2, S.891-922, Montebello,
- Malhotra, V.M., 1993. "Fly ash, slag, silica fume and rice-husk ash in concrete: a review" , Concrete International, v.15, n.4, 23-28,
- Malhotra, V.M. ve Carrette, G.G., 1983. "Silica fume concrete-properties, applications and limitations" , Concrete International: Design and Construction, v.5, n.5, 40-46,
- Malhotra, V.M. ve diğerleri, 1987. "Condensed silica fume in concrete" , CRC Press Inc., Boca Raton, Florida,
- Malhotra, V.M., Painter, K.M. ve Bilodeau, A., 1987. "Mechanical properties and freezing And thawing resistance of high-strength concrete incorporating silica fume" , Cement, Concrete and Aggregates, v.9, n.2, 65-79,
- Manmohan D., Mehta P.K., 1981. "Influence of Pozzolan Materials, Slag and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes" , Cement and Concrete Aggregates, pp 65-73, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Mascolo, G., Nastro, A. ve Sabatelli, V., 1977. "Study of the Hydration and Hydraulic Behaviour of Vitreous Blestfurnace Slags in Relation ton the MgO Content" , II Cemento C.74, No.2, s.45-52,

- Massazza F., 1974 . “Chemistry of Pozzolan Additions and Mixed Cements” , Proceedings of 6th International Congress on the Chemistry of Cements, Moscow, 10. Kaynaktan alınmıştır.
- Massazza F., 1992. “Microstructure of Hydrated Pozzolan Cements” , 1st International Workshop on Hydration and Setting, Dijon, 1991, London E & F.N. Spon 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Massazza F., Costa U., 1987. “Permeabilit  di Paste di Cemento Portland a Pozzolanico: Relazione con la Tessitura Porosa” , Convegno AITEC: La durabilit  delle Opere in Calcestruzzo, Padova, pp63-67, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Massazza F., Daimon M., 1992 . “Chemistry of Hydration of Cements and Cementitious Systems” Proceedings of 9th International Congress on the Chemistry of Cements, Tokyo
- Mehta P.K., 1981. “Studies on Blended Portland Cements Containing Santorin Earth” . Cement And Concrete Research, , No. 4, pp 507-518
- Mehta, P. K. (1983) Mechanism of sulfate attack on Portland cement concrete. Another look. Cement and Concrete Research, 13, 401-406.
- Mehta, P.K. ve Gj rv, O.E., 1982. “Properties of portland cement concrete containing fly ash and condensed silica fume” , Cement and Concrete Research, v.12, n.5, 587-595,
- Meusel, J.W. ve Rose, J.H., 1983. “Production of Granulated Blast Furnace Slag at Sparrows Point and the Workability and Strength Potential of Concrete Incorporating the Slag” 1 st Int.Confr. on Fly Ash, Silica Fume and Slag in Concrete, ACI Sp. Publ. SP-79, C.2, s.867-890, Montebello,
- Mills, A. P., H. W. Hayward & I. F. Radar. 1955. Materials of Construction. New York: John Wiley and Sons, Inc.
- Mindess, S., 1988. “Bonding in cementitious composites: how important is it?” , Symp. on Bonding in Cementitious Composites, Proc., 3-10, Pittsburgh,
- M ser, B. & J. Stark. 2000a. A New Model to Ordinary Portland Cement Hydration Derived by means of ESEM-FEG. In Finger Institut für Baustoffkunde, 15p Weimar (Germany): Bauhaus Universität.
- M ser, B. & J. Stark, , . 2000b. A New Model to Ordinary Portland Cement Hydration Derived by means of ESEM-FEG. . In Finger Institut für Baustoffkunde, 15p. Weimar (Germany): Bauhaus Universität.
- Neville, A.M., Dilger, W.H. ve Brooks, J.J., 1983. Creep of Plain and Structural Concrete, Construction University Press, Londra,
- Plowman C., 1981 . “The Influence of Pulverised Fuel Ash on the Hydration Reactions of Calcium Aluminates” , Proceedings of Symposium on the Effects of Fly Ash Incorporation in Cement and Concrete, Boston, Materials Research Society, 10. Kaynaktan alınmıştır.
- Postacıoğlu, B. 1986. Beton Bağlayıcı Maddeler. İstanbul: Matbaa teknisyenleri Basımevi
- Rahhal, V., Tolero, R., Early Hydration of Portland Cement with Crystalline Mineral

- Additions. Cement and Concrete Research, 35, 1285-1291, 2005.
- Robins, P.J. ve Austin, S.A., 1986. "Bond of lightweight aggregate concrete incorporating Condensed silica fume" , ACI SP-91, v.2, 941-958, American Concrete Institute, Detroit,
- Reeves, C.M., 1985. "The Use of ground granulated Blast Furnace slag to Produce Durable Concrete" , Durability of Concrete Conference, Inst. of Cİv. Engineers, s.37-54, Londra,
- Regourd, M., 1986 "Slags and Slag Cements" , Cement Replacement Materials (Ed. R.N.Swamy), s. 73-99, Surrey Univeristy Press,
- Regouro, M., 1980. "Structure and Behavior of Slag Portland CEment Hydrates" , 7th int.Congr.Chemistry of Cement, C. I, s.III-2/10-26, Paris,
- Saucier, K., 1984. "High strength concrete for peace keeper facilities" Mis.Paper SL-84-3, U.S. Army Engineer Waterway: Exp. Sta., Vicksburg, MS,
- Sellevold, E.J., 1984. "Review: microsilica in concrete" , Project Report No: 08O₃7-EJSTJJ, Norwegian Building Research Institute, Oslo,
- Sellevold, E.J., 1987. "The function of condensed silica fume in high strength concrete" , Symp. On Utilization of High Strength Concrete, Proc., 39-49, Stavanger, Norway,
- Sellevold, E.J. ve Nilsen, T., 1987. "Condensed silica fume in concrete: a world review" , Supplementary Cementing Materials for Concrete, 165-243, CANMET, Ottawa,
- Sellevold, E.J. ve Radjy, F.F., 1983. "Condensed silica fume (microsilica) in concrete: water Demand and strength development" , ACI SP-79, 677-694, American Concrete Institute, Detroit,
- Sersale, R., Aiello, R., Collela, C. ve Frigione, G., 1976. "Utilisations Alternatives des Laitiersde Haut Fourneau" , Silicate Industriel, C.41, No. 12, s. 513-519,
- Shacklock B.W., Keene P.W., 1957. "The Effect of Mix Proportions and Testing Conditions onDrying Shrinkage and Moisture Movement of Concrete" , Cement and Concrete Association Tech. Rep. TRA/266, Londra, 28. Kaynaktan alınmıştır.
- Shannag M.J., Yeğınobalı A., 1995. "Properties of Pastes, Mortars and Concretes Containing Natural Pozzolan" , Cement and Concrete Research, 25
- Smadi, M. ve diğerleri, 1987. "Shrinkage and creep of high-medium and low-strength concretes, including overloads" , ACI Materials Journal, v.84, n.3, 224-234,
- Smolczyk, H.G., 1980 "Slag Structure and identification of Slag" , Principal Report, 7th Int.Congr. Chemistry of Cement, C.I, s.III-1-17, Paris,
- Sri R.R., Tam C.T., 1989. "Properties of Concrete Containing Low Calcium Fly Ash under Hot and Humid Climate" , Proceedings of 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, ACI Special Publication 114 Vol.1,pp 139-155, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Stuart K.D., Anderson D.A., Cady P.D., "Cady P.D., 1980. "Compressive Strength Studies On Portland Cement Mortars Containing Fly Ash and Superplastisizer" , Cement and Concrete Research, 10, pp823-832
- Swamy R.N., Mahmud H.B., 1986. "Mix Proportions and Stregth Characteristics of

- Concrete Containing 50 % Low-Calcium Fly Ash” , Proceedings of the 2nd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Madrid, ACI Special Publication 91, Vol.1, pp 413-432, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Swamy R.N., Mahmud H.B., 1989. “Shrinkage and Creep Behavior of High Fly Ash Content Concrete” , Proceedings of 3rd International Congress on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Trondheim, ACI Special Publication 114 Vol. 1, pp 453-475, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Tachibana, D. ve diğerleri, 1990. “High strength concrete incorporating several admixtures” , 2nd Int. Symp. on High Strength Concrete, Proc. 309-330, Berkeley, CA,
- Tachibata, S., Kotani, H. ve Jyo, Y, 1982. “The Effect of Triethanolamine on the Strength Development of Slag Cements” , Review of the 36th General Meeting of CAJ, s.53-54,
- Takemoto K. ve diğerleri, 1980 . “Hydration of Pozzolanic Cements” , Proceeding of 7th International Congress on Chemistry of Cements, Paris, Vol 1, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Taneja, C.A., 1974. “Role of Magnesia on Hydration of High Alumine Slags” , 6 th Int. Congr Chemistry of Cement, Supplementary Paper, Sect. III, Moskova,
- Temiz, H. ve Yeğinobalı, A., 1995. “Uçucu kül ve silis dumanı katkılı çimento hamur ve Harçlarının bazı özellikleri” , Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 213-226, İMO, Ankara,
- Tokuy M., Erdoğdu K. 2009, “Cürufur ve Cürufur Çimentolar” TÇMB/ARGE/Y 97.2 Ankara
- Tomaszewicz, A., 1985. “Pilot tests on creep in high strength concrete, Report no. 5” , SINTEF Report STF65 A85006, Norwegian Cement and Concrete Research Institute, Trondheim,
- Tosun, K. 2007. Farklı Çimento Tiplerinin Gecikmiş Etrenjit Oluşumu Üzerine Etkileri. In İnşaat Mühendisliği Bölümü, Yapı Anabilim Dalı. İzmir: Dokuz Eylül Üniversitesi.
- Totani, Y., Saito, Y, Kageyama, M. ve Tanaka, H., 1980. “The Hydration of Blast Furnace Slag Cement” 7th Int. Congr. Chemistry of Cement, C. II, s. III-95-98, Paris,
- Troxell G.E. ve diğerleri, 1958. “Long Time Creep and Shrinkage Tests of Plain and Reinforced Concrete” , Proceedings of the ASTM Congress, 58, pp 1101-1120, 1. Kaynaktan alınmıştır.
- Troxell, G. E., H. E. Davis & J. W. Kelly. 1968. Composition and Properties of Concrete. New York: McGraw-Hill Book Company
- TÇMB -THBB, 2004 “TS EN 206-1 Ulusal Ek Taslağı”
- TÇMB/AR-GE/Y99.2 1999, “Traslar ve Traslı Çimentolar” Ankara.
- TÇMB/AR-GE/Y01.01 Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Ankara
- TÇMB/AR-GE/Y03.02 Çimento/Yeni Bir Çağın Malzemesi, Ankara
- TÇMB/AR-GE/Y03.03 Türkiye’deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Ankara
- TÇMB/AR-GE/Y04.01 Çimentoda Yeni Standartlar ve Mineral Katkılar, Ankara

- TS EN 196-1, 2002. “Çimento Deney Metodları-Bölüm 1: Dayanım Tayini” , Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-2, 2002. “Çimento Deney Metodları-Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi” , Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 196-3, 2002. “Çimento Deney Metodları-Bölüm 3: Priz Süresi ve Genleşme Tayini” Türk Standartları Enstitüsü,
- TS EN 196-5, 2002. “Çimento Deney Metodları-Bölüm5: Pozolanik Çimentolarda Pozolanik Özellik Tayini” , Türk Standartları Enstitüsü,
- TS EN 196-6, 2000. “Çimento Deney Metodları-Bölüm 6: İncelik Tayini” , Türk Standartları Enstitüsü,
- TS EN 196-7, 2002. “Çimentodan Numune Alma Metodları” , Türk Standartları Enstitüsü,
- TS EN 196-9, 2002. “Çimento Deney Yöntemleri,Yarı Adyabatik Yöntem” , Türk Standartları Enstitüsü,
- TS EN 196-21, 2002. “Çimento Deney Metodları-Bölüm 21: Klorür, Karbon Dioksit ve Alkali Muhtevası Tayini” , Türk Standartları Enstitüsü,
- TS EN 197-1, 2001. “Genel çimentolar-bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri” , Türk Standartları Enstitüsü, Ankara,
- TS EN 197-1, 2002. “Genel Çimentolar-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri” , Türk Standartları Enstitüsü.
- TS EN 13353, Borlu aktif belit (bab) çimentosu - tarifler, bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri 2008” , Türk Standartları Enstitüsü,
- Türker, F., 1993. “Silis dumanı, tras, portland çimentosu oranlarının ve kür sıcaklığının harçlarda basınç ve çekme dayanımına etkisi” , Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 197-213, İMO, Ankara,
- Uchikawa H., Uchida S., 1980. “Influence of Pozzolana on the Hydration of C₃A” Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cements, Paris, Vol.4, pp 24-29, 10. kaynaktan alınmıştır.
- Wainwright, P.J., 1986. Properties of Fresh and Hardened Concrete Incorporating Slag Cements” ,Cement Replacement Materials (Ed. R.N. Swamy), s. 100-133, Surrey University Press,
- Wainwright; P.J. ve Tolloczko, J.J.A., 1986. “The Early and Later Age Properties of Temperature Cycled OPC Concretes” , 2nd Int. Confr. on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, C.2, S. 1293-1321, MADRID,
- Wang, J.Liu, B., Xie, S. ve Wu, Z., 1986. “Improvement of paste-aggregate interface by adding silica fume” , 8th Int. Cong. on Chemistry of Cement, Proc., v.III, 460-465, Rio de Janeiro,
- Wolsiefer, J., 1984. “Ultra high-strength field placable concrete with silica fume admixture” , Concrete International: Design and Construction, v.6, n.4, 25-31,
- Yalçın, H. & M. Gürü. 2006. Çimento ve Beton. Ankara: Palme Yayıncılık.
- Yeğinobalı, A., 1997. “Yüksek dayanımlı doğal hafif agregalı beton” , TÜBİTAK Proje No: NTAG/TOKİ-626 Sonuç Raporu, Ankara,

- Yeğınobalı, A., 1993. “Silis dumanının beton katkı maddesi olarak değeriendirilmesi” , Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, 149-167, İMO, Ankara,
- Yeğınobalı,A. 2003.Çimento Yeni Bir Çağın Malzemesi.Ankara:Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı.
- Yeğınobalı,A. 2010. “Küresel Çimento Endüstrisinde Düşük Karbonlu Geleceğı Doğru Atılan Teknolojik Adımlar” Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı, Ankara.
- Yılmaz A., 1996. “Klinker Özelliklerinin Traslı Çimentolarda Performansa Etkileri” , Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğı Teknik Üniversitesi, Ankara
- Yogendran, V. ve diğeri, 1987. “Silica fume in high strength concrete” , ACI Materials Journal, v.84, n.2, 124-129,
- Zhang, M.H. ve Gjörv, O.E., 1991. “Characteristics of lightweight aggregates for high Strength concretes” , ACI Materials Journal, v.88, n.2, 150-158,

EKLER

ÖZGEÇMİŞ

1982 yılında Erzurum’da doğdu. İlk, orta ve lise tahsilini Erzurum’da tamamladı. 2001 yılında girdiği Atatürk Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü’nden 2005 yılında mezun oldu. 2008 yılında Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans Eğitimine başladı. Halen DSİ Erzurum 8. Bölge Müdürlüğünde İnşaat Müh. olarak çalışmaktadır.