



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KATKISIZ VE KATKILI ÇİMENTOLARIN
HİDRATASYON ISILARININ ÇİMENTONUN DİĞER
ÖZELİKLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI**

**İnş. Müh. Özlem AKYAZI
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemesi Programı**

**Danışman
Prof. Dr. Fahriye M. KILINÇKALE**

İSTANBUL



**İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**KATKISIZ VE KATKILI ÇİMENTOLARIN
HİDRATASYON ISILARININ ÇİMENTONUN DİĞER
ÖZELİKLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI**

**İnş. Müh. Özlem AKYAZI
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yapı Malzemesi Programı**

**Danışman
Prof. Dr. Fahriye M. KILINÇKALE**

İSTANBUL

Bu çalışma 15/07/2011 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Malzeme programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Fahriye M. KILINÇKALE (Danışman)
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Abdurrahman GÜNER
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Yrd. Doç.Dr. Cenk ALHAN
İstanbul Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Nabi YÜZER
Yıldız Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

Yrd. Doç. Dr. Bekir Y. PEKMEZCİ
İstanbul Teknik Üniversitesi
İnşaat Fakültesi

ÖNSÖZ

Tez konusunun belirlenmesinde, çalışmanın yürütülmesinde ve yazım aşamasında beni yönlendiren ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam Sayın Prof. Dr. Fahriye M. KILINÇKALE'ye en içten dileklerle teşekkür ederim. Çalışmamı destekleyen İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü ve YTÜ İnşaat Fakültesi'ne teşekkürlerimi sunarım. Bu çalışmaya verdikleri desteklerden dolayı AKÇANSA Çimento çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

Bana bugüne kadar maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen babam İnş. Müh. Rıdvan AKYAZI, annem Sema AKYAZI, kardeşim Osman Onur AKYAZI'ya teşekkür ederim.

Temmuz, 2011

Özlem AKYAZI

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	I
İÇİNDEKİLER.....	II
ŞEKİL LİSTESİ	V
TABLO LİSTESİ.....	VII
SEMBOL LİSTESİ.....	IX
ÖZET	XI
SUMMARY.....	XII
1. GİRİŞ	1
2. GENEL KISIMLAR	6
2.1. ÇİMENTO ÜRETİMİNİN TARİHÇESİ, ÜRETİMİ VE ÇEŞİTLERİ	6
2.2. PUZOLANİK MALZEMELERİN TANIMI, SINIFLARI VE GENEL ÖZELİKLERİ.....	9
2.3. ÇİMENTONUN ANABİLEŞENLERİ VE OKSİTLERİ	12
2.4. HİDRATASYON ISISI	13
2.4.1. Farklı Çimento Anabilşenlerinin Hidratasyona ve Dayanıma Etkisi....	13
2.4.2. Hidratasyon Isısı, Hesabı, Bu Isıya Etki Eden Etkenler	15
2.4.3. Hidratasyon Isısı Ölçüm Metodları	19
2.4.4. Hidratasyon Isısına Pozolanların Etkisi	20
2.4.4.1. <i>Trasın Hidratasyon Isısına Etkisi</i>	21
2.4.4.2. <i>Uçucu Kükülün Hidratasyon Isısına Etkisi</i>	22
2.4.4.3. <i>Silis Dumanının Hidratasyon Isısına Etkisi</i>	26
2.4.4.4. <i>Cürufun Hidratasyon Isısına Etkisi</i>	27
2.5. HİDRATASYON ISISI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR	30

2.5.1. Çimento Hidratasyon Isısı Kullanarak Beton Eşdeğer Yaş Hesabı	30
2.5.2. Kütle Betonlarında Hidratasyon Isısı	32
2.5.3. Kütle Betonlarında Kullanılabilen Diğer Tip Çimentolar	34
2.5.4. Hidratasyon Isısına Sıcaklığın Etkisi	35
2.5.5. Farklı Metodlarla Hidratasyon Isısı Ölçümü	40
2.5.6. Anabileşenlerin Hidratasyon Isısına Etkisi	40
2.5.7. Farklı Miktarlardaki Puzolanların Hidratasyon Isısına Etkisi	42
2.6. ÇİMENTOLARIN PRİZ SÜRELERİ.....	44
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	44
3.1. KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELİKLERİ.....	44
3.1.1. Çimentolar	44
3.1.2. Puzolanlar	45
3.1.3. Puzolan Karışımları ve Kodları	46
3.1.4. Çözeltilerin Hazırlanması	47
3.2. KULLANILAN ARAÇ VE GEREÇLER.....	48
3.2.1 Kalorimetre.....	48
3.2.2. Karıştırıcı.....	49
3.2.3. Termos	49
3.2.4. Beckman Termometresi ve Ayarı	50
3.2.5. Vicat Cihazı	51
3.3. Yapılan deneyler.....	52
3.3.1. Normal Kıvam Tayini.....	52
3.3.2. Çimentonun Priz Süreleri Tayini.....	52
3.3.3. Hidratasyon Isısı Deneyinin Yapılışı.....	52
3.3.3.1. Kalorimetre Kabının Isı Kapasitesi Tayini	52
3.3.3.2. Kızdırılmış Çimento Kütlesi Tayini	54
3.3.3.3. Kuru Çimentoların Çözünme Isısı Tayini	54
4. BULGULAR.....	55
4.1. NORMAL KIVAM TAYİNİ DENEY SONUÇLARI	55
4.2. ÇİMENTONUN PRİZ SÜRELERİ DENEY SONUÇLARI	55

4.3. ÇİMENTOLARIN ÇÖZÜNME ISISI DENEY SONUÇLARI	57
4.3.1. Kalorimetre Kabının Isı Kapasitesi Deney Sonuçları	58
4.3.2. Kızdırılmış Çimento Kütlesi Deney Sonuçları	59
4.3.3. Kuru Çimentonun Çözünme Isısı Deney Sonuçları	60
4.4. ÇİMENTOLARDA ÇÖZÜNME ISISI DENEY SONUÇLARININ ÇİMENTO ÖZELLİKLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ	61
4.4.1. Çözünme Isısının Anabileşenler ile İlişkisi	61
4.4.2. Çözünme Isısının Katkı İle İlişkisi	62
4.4.3. Çözünme Isısının İncelik ile İlişkisi	66
4.4.4. Çözünme Isısında Sıcaklık Değişimi	73
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	91
ÖZGEÇMİŞ	98

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	: Döner fırın	7
Şekil 2.2	: Çimentonun bileşenlerinin şematik gösterimi	8
Şekil 2.3	: Karmaşık bileşiklerin oluşum sıcaklıkları	8
Şekil 2.4	: Klinker tanelerinin su ile reaksiyonu	10
Şekil 2.5	: Trasın kireç ile reaksiyonu	10
Şekil 2.6	: Çimento hamurundaki anabileşenlerin basınç dayanımı.....	15
Şekil 2.7	: Çimentonun anabileşenlerinin mikroskoptaki görünümü	16
Şekil 2.8	: P.Ç'nin ısı oluşum eğrisi	18
Şekil 2.9	: P.Ç ve Portland-doğal puzolan çimentolarının hidratasyon ısıları	21
Şekil 2.10	: Puzolan miktarının hidratasyon ısısına farklı yaşlarda etkisi	22
Şekil 2.11	: Trasların çimentonun 7 günlük hidratasyon ısısına etkisi.....	22
Şekil 2.12	: U-MK katkılı çimentoların toplam hidratasyon ısısına etkisi	25
Şekil 2.13	: U katkılı çimentonun toplam hidratasyon ısısına etkisi	25
Şekil 2.14	: Silis dumanı katkılı hamurlarda hidratasyon ısısı.....	26
Şekil 2.15	: Kontrol ve YFC hamurunda toplam ısı üretimi	28
Şekil 2.16	: %25 uçucu kül ve cüruf içeren katkılı çimentoda ısı üretimi	28
Şekil 2.17	: %50 uçucu kül ve cüruf içeren katkılı çimentoda ısı üretimi	29
Şekil 2.18	: %75 uçucu kül ve cüruf içeren katkılı çimentoda ısı üretimi	29
Şekil 2.19	: Katkısız ve katkılı PÇ'lerin hidratasyon ısılarının zamanla değişimi.....	30
Şekil 2.20	: Adyabatik şartlarda ölçülen kütle betonda sıcaklık artışı.....	33
Şekil 2.21	: %30 F sınıfı uçucu kül katkılı ve katkısız PÇ'nin hidratasyon ısısı	34
Şekil 2.22	: Farklı tipteki çimentoların hidratasyon ısıları.....	35
Şekil 2.23	: 23°C deki izotermal hidratasyon ısısı	36
Şekil 2.24	: 34°C' deki izotermal hidratasyon ısısı	36
Şekil 2.25	: 24 saatlik sürede farklı sıcaklıkların çimentolar üzerindeki etkisi.....	38
Şekil 2.26	: Sıcaklığın yüksek fırın cürufllu PÇ'nin hidratasyon ısısına etkisi.....	39
Şekil 2.27	: Hidratasyon ısısı tayini.....	40
Şekil 2.28	: C ₃ S sabit, C ₃ A'nın ısı oluşumuna etkisi	41
Şekil 2.29	: C ₃ A sabit, C ₃ S'nin ısı oluşumuna etkisi	41
Şekil 2.30	: Farklı çimento tiplerinin hidratasyon ısısı gelişimi.....	42
Şekil 2.31	: %20 katkı ilavesinin hidratasyon ısısına etkisi	43
Şekil 2.32	: %90 katkı ilavesinin hidratasyon ısısına etkisi	43
Şekil 3.1	: Hidratasyon ısısı tayin cihazı.....	48
Şekil 3.2	: Kalorimetre elemanları.....	49
Şekil 3.3	: Beckman termometresi kalibrasyonu	50
Şekil 3.4	: Vicat cihazı (iğneli).....	51
Şekil 3.5	: Vicat cihazı (sondalı)	51
Şekil 4.1	: Çimento inceliği-normal kıvam için gereken % su.....	55
Şekil 4.2	: İnceliğin priz başlama-bitiş süreleri üzerindeki etkisi	56
Şekil 4.3	: C ₃ S'nin çözünme ısısı üzerindeki etkisi.....	61
Şekil 4.4	: C ₃ A'nın çözünme ısısı üzerindeki etkisi	62
Şekil 4.5	: S3 çimentolarında katkının çözünme ısısına etkisi	63
Şekil 4.6	: S4 çimentolarında katkının çözünme ısısına etkisi	64

Şekil 4.7	: S5 çimentolarında katkının çözünme ısisına etkisi	64
Şekil 4.8	: C4 çimentolarında katkının çözünme ısisına etkisi	65
Şekil 4.9	: C4a çimentolarında katkının çözünme ısisına etkisi	66
Şekil 4.10	: C5a çimentolarında katkının çözünme ısisına etkisi	66
Şekil 4.11	: Kontrol çimentolarında inceliğin çözünme ısisına etkisi	67
Şekil 4.12	: Kontrol çimentolarında incelik-çözünme ısisı	67
Şekil 4.13	: Tras katkılı çimentolarda çözünme ısisına etkisi	68
Şekil 4.14	: Tras katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısisı	68
Şekil 4.15	: Cüruf katkılı çimentonlarda çözünme ısisına etkisi	69
Şekil 4.16	: Cüruf katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısisı	69
Şekil 4.17	: Uçucu kül katkılı çimentonlarda çözünme ısisına etkisi	70
Şekil 4.18	: Uçucu kül katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısisı	70
Şekil 4.19	: Silis dumanı katkılı çimentonlarda çözünme ısisına etkisi	71
Şekil 4.20	: Silis dumanı katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısisı	71
Şekil 4.21	: Buğday külü katkılı çimentonlarda çözünme ısisına etkisi	72
Şekil 4.22	: Buğday külü katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısisı	72
Şekil 4.23	: Kontrol S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	74
Şekil 4.24	: Kontrol C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	75
Şekil 4.25	: Tras katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	76
Şekil 4.26	: Tras katkılı C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	77
Şekil 4.27	: Cüruf katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	78
Şekil 4.28	: Cüruf katkılı C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	79
Şekil 4.29	: Uçucu kül katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	80
Şekil 4.30	: Uçucu kül katkılı C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	81
Şekil 4.31	: Silis dumanı katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	82
Şekil 4.32	: Silis dumanı katkılı C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	83
Şekil 4.33	: Buğday külü katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	84
Şekil 4.34	: Buğday küllü katkılı C çimentoların sıcaklık artışına etkisi	85
Şekil 4.35	: 3000 cm ² /g inceliğe sahip S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	86
Şekil 4.36	: 4000 cm ² /g inceliğe sahip S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	86
Şekil 4.37	: 5500 cm ² /g inceliğe sahip S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	87
Şekil 4.38	: 4000 cm ² /g inceliğe sahip C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	87
Şekil 4.39	: 4630 cm ² /g inceliğe sahip C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	88
Şekil 4.40	: 5550 cm ² /g incelikteki C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi	88

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	: Normal PÇ'nin kompozisyonu.....	13
Tablo 2.2	: ABD'de üretilen PÇ'deki anabileşenlerin yaklaşık oranları.....	14
Tablo 2.3	: Çimento anabileşenlerinin relatif özellikleri.....	14
Tablo 2.4	: a, b, c, d katsayılarının yaşa göre değişim değerleri.....	17
Tablo 2.5	: P.Ç'deki anabileşenlerin hidratasyon ısıları.....	18
Tablo 2.6	: Betonlarda farklı çimento dozajlarında ölçülen sıcaklık artışları.....	23
Tablo 2.7	: Uçucu kül kullanılan beton barajlar.....	24
Tablo 2.8	: Silis dumanlı ve uçucu küllüPÇ'nin 1 günlük hidratasyon ısısı.....	27
Tablo 2.9	: Katkıların özgül yüzeyleri.....	28
Tablo 2.10	: Hidratasyon ısısı deney sonuçları.....	31
Tablo 2.11	: Tip 1,2,3,4,5 çimentolarının kimyasal kompozisyonları ve özellikleri	32
Tablo 2.12	: Puzolan karışım oranları	36
Tablo 2.13	: Çimento tipleri için anabileşenlerin içeriği	37
Tablo 2.14	: 72 saat sonunda değişik sıcaklıklarda hidratasyon ısısı gelişimi	39
Tablo 2.15	: Çimento için bileşenlerinin kompozisyonların sınırları.....	42
Tablo 3.1	: S ve C çimentolarının kimyasal kompozisyonu, (%)	45
Tablo 3.2	: Puzolanların kimyasal kompozisyonu, (%)	46
Tablo 3.3	: Çimento kodları	47
Tablo 4.1	: Priz sürelerinin incelik ile ilişkisi	56
Tablo 4.2	: Katkısız ve katkılı S çimentolarının çözünme ısısı değerleri.....	57
Tablo 4.3	: Katkısız katkılı ve C çimentolarının çözünme ısısı değerleri	58
Tablo 4.4	: S çimentolarının kızdırılmış çimento kütlesi değerleri, g.....	59
Tablo 4.5	: C çimentolarının kızdırılmış çimento kütlesi değerleri, g	59
Tablo 4.6	: Çimentonun anabileşenlerinin çözünme ısısı değerleri	61
Tablo 4.7	: Katkısız ve katkılı S çimentolarının çözünme ısısı değerleri.....	63
Tablo 4.8	: Katkısız ve katkılı C çimentolarının çözünme ısısı değerleri	65
Tablo 4.9	: Kontrol çimentolarının incelik ve çözünme ısısı değerleri	67
Tablo 4.10	: Tras katkılı çimentoların incelik ve çözünme ısısı değerleri	68
Tablo 4.11	: Cüruf katkılı çimentonlarda incelik ve çözünme ısısı değerleri.....	69
Tablo 4.12	: Uçucu kül katkılı çimentolarda incelik ve çözünme ısısı değerleri.....	70
Tablo 4.13	: Silis dumanı katkılı çimentolarda incelik ve çözünme ısısı değerleri ..	71
Tablo 4.14	: Buğday küllü katkılı çimentolarda incelik ve çözünme ısısı değerleri..	72
Tablo 4.15	: Kontrol S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C	74
Tablo 4.16	: KontrolC çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C	75
Tablo 4.17	: Tras katkılı S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C.....	76
Tablo 4.18	: Tras katkılı C çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C	77
Tablo 4.19	: Cüruf katkılı S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C.....	78

Tablo 4.20	: Cüruf katkılı C çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C	79
Tablo 4.21	: Uçucu kül katkılı S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C.....	80
Tablo 4.22	: Uçucu kül katkılı C çimentolarında sıcaklık artışı değerleri, °C.....	81
Tablo 4.23	: Silis dumanı katkılı S çimentolarında sıcaklık artışı değerleri, °C.....	82
Tablo 4.24	: Silis dumanı katkılı C çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C.....	83
Tablo 4.25	: Buğday külü katkılı S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C.....	84
Tablo 4.26	: Buğdaykülü katkılı C çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C	85

SEMBOL LİSTESİ

ASTM	: American Society for Testing and Materials
Al₂O₃	: aliminyum trioksit
B	: buğday sapı külü (buğday külü)
BAB	: borlu aktif belit çimentosu
C	: cüruf, rakamın sağında; CEM 1 rakamın solunda
CEM 1	: yaygın kullanımlı Portland çimentosu
C_c	: kalorimetre kabının ısı kapasitesi
C₂S	: dikalsiyumsilikat
C₃S	: trikalsiyumsilikat
C₃A	: trikalsiyumalüminat
C₄AF	: tetrakalsiyum aluminoferrit
CaOH₂	: sönmüş kireç
Cl	: klor
CSH₂	: alçı taşı
CÇ	: Cürufllu çimento
CH	: Ca(OH) ₂
C-S-H	: hidrate kalsiyum silikat jeli
Fe₂O₃	: demir trioksit
GYFC	: granüle yüksek fırın cürufu
H₁	: kuru çimentonun asitte çözünme ısısı
Ht	: toplam hidratasyon ısısı
K	: kontrol çimentosu
K₂O	: potasyum dioksit
m	: kalorimetre kabına konmuş olan numune kütlesi
m₁	: kızdırılmış numune kütlesi
m₂	: numunenin kızdırılmadan önceki kütlesi
m_k	: numunenin kızdırılmış haldeki kütlesi
MK	: metakaolin
MgO	: magnezyum oksit
N	: normalite
Na₂O	: sodyum dioksit
P	: pirinç kabuğu külü
PÇ	: Portland çimentosu
PKÇ	: Portland kompoze çimento
R°	: düzeltilmiş sıcaklık yükselişi
R	: yüksek erken dayanım
R₀	: gözlenen sıcaklık yükselişi
SDÇ	: sülfata dayanıklı Portland çimentosu
s/ç	: su/çimento oranı
S	: silis dumanı, rakamın sağında; SDÇ, rakamın solunda
SiO₂	: silisyum dioksit
SO₃	: sülfür trioksit
T°	: numunenin kalorimetre kabına konulurken sıcaklığı

T	: tras
t	: kalorimetre kabının son sıcaklığı
TS	: Türk standardı
U	: uçucu kül
YFC	: yüksek fırın cürufu
θ_0	: numune kalorimetre kabına konulduğu andaki sıcaklık
θ_{20}	: numune konulduktan sonra 20. dk.'de okunan sıcaklık
θ_{40}	: numune konulduktan sonra 40. dk.'de okunan sıcaklık
3, 4, 5	: 3180, 4000, 5500 cm ² /g
4a	: 4630 cm ² /g
5a	: 5550 cm ² /g

ÖZET

KATKISIZ VE KATKILI ÇİMENTOLARIN HİDRATASYON ISILARININ ÇİMENTONUN DİĞER ÖZELİKLERİYLE KARŞILAŞTIRILMASI

Çimento hava ile suda sertleşen ve sertleştikten sonra suda çözünmeyen, bu özeliğinden dolayı hidrolik bağlayıcı olarak da adlandırılan toz haldeki maddedir. Çimentonun su ile yaptığı kimyasal reaksiyona hidratasyon denir. Hidratasyon ısı, hidratasyon sonucu açığa çıkan ısıdır. Çimentonun hidratasyonu sonucu açığa çıkan ısı kütle betonları, baraj betonları, temel ayakları..vb. gibi ağır yapılarda termik rötreye neden olmaktadır. Bu yüzden hidratasyon ısını arttıran nedenler ve hidratasyon ısına karşı alınacak önlemler üzerinde çalışmalar yapılmıştır.

Bu çalışmada, farklı tipte ve incelikte çimentolara katkılar ilave edilmiştir. Katkısız ve katkılı çimentoların çözünme ısıları ölçülmüş, çimento özelliklerinin, inceliğinin ve katkıların çözünme ısına etkileri araştırılmıştır. Bu tez kapsamında farklı cins ve incelikte çimentoların (CEM 1 4000 – 4630 – 5550 cm²/g, SDÇ 3180 – 4000 – 5500 cm²/g), çimentolara katılan puzolanların (uçucu kül, silis dumanı, cüruf, buğday sapı külü, tras) cinsinin çözünme ısını ne şekilde ve hangi oranda etkilediği araştırılmıştır. Çimentonun hidratasyon ısının ölçülmesi için çimentonun toz halde çözünme ısı belirlenir. Hidrate çimentonun hidratasyon ısı ise çimentonun çözünme ısından yararlanılarak bulunur. Sıcaklık artışları Beckman termometresi ile hassas ölçümler yapılarak bulunmuş, çözünme ısıları hesap edilmiştir.

Bu çalışma sonunda anabileşenler arasında ısıya en çok etki eden bileşenlerden C₃S ve C₃A miktarları çimento kompozisyonunda arttıkça çözünme ısının da miktarla orantılı olarak arttığı görülmüştür. Deneylerde kullanılan katılardan puzolanik aktivitesi yüksek olan buğday sapı külünün çözünme ısını en çok düşüren puzolan olduğu saptanmıştır. Çimentonun inceliği arttıkça genellikle çözünme ısının arttığı, priz sürelerinin kısaldığı gözlenmiştir.

SUMMARY

HEAT HYDRATION OF CEMENT AND BLENDED CEMENT AND COMPARE IT WITH OTHER CEMENT CHARACTERISTICS

Cement is a fine powder which sets after a few hours when mixed with water, and then hardens into a solid since it never dissolves in water. Also cement is called hydraulic binding. The chemical reaction between cement and water is called hydration. Heat of hydration is the heat which is emitted as a result of hydration. Especially in mass concretes, dam concretes and foundation piers..etc. because hydration heat causes thermal shrinkage in this construction's concrete. For that reason some studying have done about the causes of increasing heat of hydration and actions to be taken guard against this heat.

In this study, cements in different fineness and types with addition of pozzolans are combined. Dissolution heats of pure and mixed cements are measured. Cement's speciality, fineness and additives effects on dissolution heat are researched. In this thesis, different fineness and type of cements (CEM 1 4630 – 4000 – 5550 cm²/g, SDÇ 3180 – 4000 – 5500 cm²/g) and pozzolans (fly ash, silica fume, slag, corn stalk ash, trass) that added to cements are investigated in which quantity and how affects the dissolution heat. To measure the cement's hydration heat, powder cement's dissolution heat have to be determined. Hydration heat of hydrated cement is found profit by cement's dissolution heat. Sensitive measurements are made with Beckman thermometer to see temperature rises.

At the end of the study it is detected that C₃S and C₃A are the compounds of cement that effect heat of hydration more than others. As these compounds increase amount of quantity in cement composition, dissolution heat increases. Additives which are used in tests, corn stalk ash has a high pozzolanic reactivity and decreases dissolution heat most from others. As the fineness of cement incrases, generally dissolution heat increases and time of setting shortens.

1. GİRİŞ

İnşaat mühendisliğinde, yapı malzemesinde beton tipinin artmasıyla, farklı tip yapılardaki çimento çeşidi, çimento özellikleri ile uyumlu katkıların kullanımını gerektirmektedir. Çimento özelliklerini iyileştirmek, dayanıklılığı artırmak ve ekonomikliği sağlamak amacıyla çimento ile birlikte puzolanik özellikte mineral katkılar kullanılmaktadır. Portland çimentosu (PÇ), üretim prosesi büyük bir enerji gerektirdiği için, çimentonun maliyeti yüksektir. Çimento üretiminde kullanılan %10'luk katkı yıllık 2 milyon ton kömüre eşit enerji tasarrufu sağlamaktadır. 1 ton %65 cüruf içeren cürufllu çimento üretimi için 1 ton PÇ üretiminde gerekli olan hammadde miktarında yaklaşık %65, kullanılan enerji miktarında ise yaklaşık %50 azalma sağlamaktadır. Çimento üretiminde enerji maliyeti 3500 kJ/kg çimentodur (White, 2006).

Katkı kullanımı çimentonun üretimindeki CO₂ emisyonunun azalmasını sağlar. Dünyadaki CO₂ emisyonunun yaklaşık %8'i çimento üretimiyle ortaya çıkar. Kyoto Protokolü doğrultusunda Türkiye'nin çimento üretim sektöründe kısıtlama yapması gerektiği ya da CO₂ kotası satın alması gerektiği belirlenmiştir. Avrupa Birliği Ülkeleri ile Türkiye, Kyoto Protokolü'nü imzalayarak çevreye ve canlı sağlığına verdiği önemi göstermiştir (Yeğinobalı, 2004; Sağlık ve diğ., 2009).

Katkı malzemesi olarak puzolanlar ilk çağlardan beri kullanılmaktadır. Eski çağlardan günümüze kadar insanoğlu barınma ihtiyacı için çeşitli malzemeler kullanarak yapılar inşa etmiştir. Eski Mısır'da tuğla (pişmiş kil) öğütülerek kirece katılmıştır. Bu yöntemle elde edilen harca "horasan harcı" denilmektedir. Osmanlılar bu harcı geniş ölçüde ve bilinçli olarak kullanmışlardır (Akman, 1990).

Puzolan adı, İtalya'daki Vezüv Yanardağı'nın eteklerindeki Puzzoli kasabasının yakınında bulunan doğal volkanik taşların bulunduğu kasabanın ismini almıştır. Puzolanik malzemelerin hidrolik bağlayıcılık özelliğinin, Romalılar tarafından

kullanılması MÖ 300 yılına rastlamaktadır. Almanyada puzolana “tras” denir, ülkemizde de bu deyim yaygındır ve standartlarımıza geçmiştir. MÖ 80’de Roma’da doğan Marcus Vitruvius Pollio’nun MÖ 27- MÖ 20 arasında yayımlamış olduğu Mimarlık Üzerine On Kitap’ta puzolan için şöyle demiştir: ‘Vezüv yanardağının eteklerindeki bölgede bulunan bir toz (volkanik kül içeren toprak) kireç ile karıştırıldığında sadece yapıların dayanımını arttırmada yardımcı değil, rıhtım gibi deniz içine kurulan yapılarda su altında sertleşen bir malzemedir.’(Erdoğan, 2007; Mindess ve Young, 1981).

İlk çağlarda betona benzeyen malzemeyi geliştirmek için çeşitli katkıları kullanmışlardır. Romalılar, betona hayvan yağı, süt ve kan katmışlardır. İşlenebilirliği artırması bakımından kullanılan kan hemoglobinden dolayı hava sürükleyici katkı görevini görmüştür. Romalılar bunu bilmeden yapmışlar,ancak beton dayanıklılığını arttırdığı araştırmalarda görülmüştür. Çimento üretiminde de tesadüfen katılan öğütülmüş sıgır toynağı da, betonun donma ve çözülmede daha dayanıklı olduğunu göstermiştir (Erdoğan, 2007; Mindess ve Young, 1981).

Çimento ve su karıştığı andan itibaren hidrasyon denen kimyasal reaksiyon başlar ve bunun sonucunda hidrasyon ısısı açığa çıkar (Erdoğan, 2007).

Hidrasyon ısısı, çimentonun katılaşması ve sertleşmesi esnasındaki ısıdır ve ekzotermiktir. Hidrasyon ısısı, hidrasyon reaksiyonlarının kimyasal ısısından ve hidrasyon ilerleme süreçlerinde oluşan jel yüzeyindeki suyun soğrulma ısısından oluşur. Suyun soğrulmasıyla oluşan ısı, toplamda oluşan hidrasyonun ısısının dörtte biridir. Sonuç olarak, hidrasyon ısısı birçok birçok karma miktardan oluşan bir niceliktir (Neville, 1981; Ün, 2007).

Hidrasyon ısısının açığa çıkma hızı ve miktarı betonun kullanılacağı yapı için çok önemlidir. Hidrasyon ısısı en çok kütle beton gibi yarı adyabatik şartların olması durumunda problem oluşturmaktadır. Kütle betonu yapılarında çimentonun hidrasyon esnasında çimento tipine bağlı olarak belli bir miktar hidrasyon ısısı çıkmaktadır. Bu ısı betonun ısı iletiminin çok düşük olması nedeniyle yapı içinde yüksek sıcaklık artışları meydana getirmektedir. Betondaki sıcaklık artışının boyutu, ısının ne hızla çıktığına ve betondan çevreye ne hızla yayıldığına dayanır. Bundan dolayı ısı oluşması

ve ısının ne hızda oluştuğu önemlidir. Oluşan yüksek iç sıcaklık ilk birkaç günde oluşur, beton hala plastiktir bu yüzden hızlı bir hasara sebep olmamaktadır. Ancak soğuma esnasında, beton rijitlik elde ettiği zaman problem oluşabilir. Sıcaklıktaki farklılıklar yapının iç ve dış kısımları arasında termal gerilmeler oluşturmakta bunlar da rötire çatlağına yol açmakta, beton işlevselliğini yitirmektedir (Sağlık ve diğ., 2009; Mindess ve Young, 1981; Liwu ve Min, 2006).

Kütle betonunda hidrasyon ısısı düşük çimento veya hidrasyon ısını azaltacak katkı maddeleri ilave edilmelidir. Böylece termal çatlaklar önlenmiş olur (Taşdemir, 2002; Liwu ve Min, 2006).

Hidrasyon ısısı çimentonun kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Çimento inceliği arttıkça çimento tanelerinin yüzeyi artar, reaksiyona girme hızı artar. İnce öğütülmüş çimentolar hidrasyon hızını artırır fakat toplam hidrasyon ısında etkili değildir. (Lea, 1970; Mindess ve Young, 1981; Neville, 1981; Ün, 2007).

PÇ'yi oluşturan anabileşenlerin (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) herbirinin hidrasyon ısısı farklıdır. Ancak C_3A ve C_3S en reaktif bileşenler olup, hidrasyon ısına en çok etki edenlerdir (Kamiński ve Zielenkiewicz, 1982).

C_3S ve C_3A fazlarının oranları azaldıkça hidrasyon ısısı ve hızı özellikle erken yaşlarda düşüktür (Sağlık ve diğ., 2009).

Çimento tüketimini azaltmak, enerji tasarrufu sağlamak, hidrasyon ısını azaltmak için puzolanlar genellikle klinker elde edildikten sonra klinkerle birlikte öğütölüp çimetoya katılmaktadırlar. Katkısız PÇ bileşiminde C_3S ve C_2S olarak belirtilen kalsiyum silikatlar ile C_3A ve C_4AF olarak belirtilen kalsiyum alüminatlardır. Katkılı çimentonun hidrasyonu ve özellikleri farklıdır. Karma oksitlerden C_3A azaldığında sülfat direnci artar, C_3S ve C_3A azaldığında hidrasyon ısısı ve erken dayanım azalmaktadır (Yeğınobalı ve Ertün, 2007; Erdoğan, 2007).

Portland puzolan çimentosu orta veya düşük hidrasyon ısı ya da orta dereceli sülfat dayanımlı olarak üretilmektedir. Az miktarda puzolan katkısı orjinal çimentonun özelliklerini önemli ölçüde değiştirmemektedir (Mindess ve Young, 1981).

TS-19'a göre çimentoya katılacak puzolan miktarı çimento ağırlığının %10-35'i arasında olmalıdır. Çimentonun bir kısmı yerine puzolan ilave edilmesi, çimentonun dayanımına, katılaşma süresine etki eder, betonun plastikliğini artırır, su kuma ve çözülme olaylarını önler, hidrasyon ısısını ve beton geçirgenliğini azaltır (Kocataşkın, 1959; Yetgin ve Çavdar, 2005).

Katkılı çimentonun performansının sadece katkının bir fonksiyonu olmayıp, hangi çimento tipiyle katkı yapıldığı da önemlidir (Daugherty ve Funnell, 1983).

Soğuk havada dökülen betonlar için kullanılan çimentoların hidrasyon ısılarının hızlı ve miktarlarının yüksek olması istenir. Böylece soğuk havanın, hidrasyonu yavaşlatma etkisi telafi edilmiş olmaktadır (Erdoğan, 2007).

Genelde katkılı çimentoların hidrasyon ısıları, PÇ'lerden daha düşüktür (Lea, 1970). Katkılı çimentoda reaksiyonlar PÇ'den daha yavaş olur. PÇ'nin hidrasyonuna ek olarak mineral katkıların ve puzolanik maddelerin reaksiyonları da eklenmektedir. Tüm kimyasal reaksiyonları ısı üretimi izler, kompleks sistemlerin hidrasyonunu (örneğin katkılı çimento) hidrasyon ısı miktarı belirlemektedir (Langan ve diğ., 2002).

Çimentoda katkı olarak kullanılan uçucu kül (U) termik santralde kömürün yakılması sonucu elde edilir. Türkiye'de kömür yakan 11 enerji santrali bulunmakta, yıllık uçucu kül üretimi de yaklaşık 15 milyon ton civarındadır. Uçucu külün ancak %1'i çimento ve betonda değerlendirilmektedir (Türker ve diğ., 2004).

Uçucu kül özellikleri, kömürün özelliklerine ve yakılma yöntemine bağlı olarak farklılıklar göstermektedir. Uçucu küller CaO yüzdesi %10' un altında olduğu için düşük kireçli olarak F ve CaO > %10 olan yüksek kireçli kül olarak da C sınıfına ayrılmaktadırlar (Lea, 1970).

Uçucu kül ve PÇ hidrasyonu sonucu ortaya çıkan kalsiyum hidroksit arasındaki kimyasal reaksiyon, çimentonun hidrasyonundan daha yavaştır. Bu durum beton içinde daha yavaş ısı oluşmasına, daha az iç gerilmeye ve daha az rötreye sebep olmaktadır. Uçucu kül bu özelliğinden dolayı özellikle baraj yapılarında kütle

betonlarında ortaya çıkan yüksek ısıları kontrol etmede kullanılmaktadır (Gündeşli, 2008).

Uçucu külün katkı maddesi olarak çimento ve beton özelliklerine etkisi; katılan kül miktarına, külün ve çimentonun özelliklerine, külün çimentoya yerinde veya çimentoya ilaveten katılmasına bağlıdır. Yüksek kireç içerikli reaksiyonlarda daha fazla C-S-H üretilir, bu da beton dayanımını artırır (Lea, 1971; Helmuth, 1983).

Silis dumanı hidratasyon ısısıyla ilgili değişik sonuçlar vermiştir. Silis dumanı kullanımıyla birlikte terlemenin azalmasından dolayı plastik rötre riskinin arttığını belirtilmektedir. Çimentoya %5 oranında katılan silis dumanı su ihtiyacını artırmamakta, daha fazla miktarda kullanımı arttırmaktadır (Khayat ve Aitchin, 1992).

Puzolan veya cüruf katkılı çimentoların dayanım kazanma ve açığa ısı çıkarma hızları, çimentonun yapısında yer alan puzolanın reaktivitesine, miktarına ve çimentonun inceliğine bağlıdır. Cüruf miktarı arttıkça hidratasyon ısısı düşmektedir (Mindess ve Young, 1981; Erdoğan, 2007).

Yapılan araştırmalarda, betonun eşdeğer yaşının çimentonun hidratasyon ısısıyla tahmin edildiği gözlemlenmiştir (Tokyay ve Kasap, 2004).

Bu tez çalışması bu tür hidratasyon ısısı ve betonun eşdeğer yaşı gibi konularda yapılan araştırmalara kaynak oluşturabilir.

Çimentonun hidratasyon ısılarının ölçülmesi için çimentonun toz halde çözünme ısıları belirlenir. Hidrate çimentonun hidratasyon ısısı ise çimentonun çözünme ısısından yararlanılarak bulunur.

Bu çalışmanın amacı da, çimento bileşiminin ve inceliğinin çözünme ısısına etkisi ve çimentoya ilave edilen katkıların çözünme ısısını ne şekilde ve hangi oranda etkilediğini araştırmaktır. Kimyasal kompozisyonları ve incelikleri farklı SDÇ 32.5R ve CEM I 42.5R çimentolarının priz sürelerine etkileri deneylerle bulunmuştur. Uçucu kül, silis dumanı, buğday sapı külü, tras ve cüruf katkı maddesi olarak çimentoya katılarak çözünme ısıları kontrol çimentolarınıninkilerle karşılatılmış, ısıyı düşüren katkın ne oranda ısıya etkili olduğu araştırılmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. ÇİMENTO ÜRETİMİNİN TARİHÇESİ, ÜRETİMİ VE ÇEŞİTLERİ

Çimento, su ile kimyasal reaksiyona girerek katılaşıp sertleşebilen, agregaları birbirine bağlayarak masif bir yapı oluşturan malzemelerdir. Çimento su ile birleştiğinde sertleşip suda çözünmeyen ‘hidrolik bağlayıcılık’ özeliği kazanmaktadır (Neville, 2000).

1453-1690 Yılları: Özellikle 1500’lü yıllarda Mimar Sinan eserlerini “Horasan Harcı” olarak adlandırılan malzemeden yararlanarak yapmıştır.

1824-1850 Yılları: İlk çimentoyu 1824 yılında İngiliz Joseph Aspdin üretmiştir. Renk ve diğer özellikleri bakımından İngiltere’nin güneyinde yapı taşları ile ünlü Portland adasından getirilen taşları andırdığından Portland çimentosu (PÇ) adını vermiştir. Ancak bu çimento, üretim esnasında malzemelerin yeterince yüksek sıcaklıklarda pişirilmediği ve öğütme işlemi iyi yapılmadığı için bugün kullanılmakta olan Portland çimentosunun özelliklerine sahip olamamıştır. Kil ve kalker karışımli hammaddelerin yüksek sıcaklıklara kadar yeterince pişirilip öğütülmesi sonucu çimentonun günümüzde kullanılan tipine daha yakın bir çimento üreterek modern PÇ’nin ilk üreticisi 1850 yılında Isaac Johnson isimli bir İngiliz olmuştur.

1850-1865 Yılları: 1850’li yılların başlarında Fransa, Belçika ve Almanya’da PÇ üreten ilk fabrika kurulmuştur. 1860’lı yıllarda YFC granüle hale getirilerek kullanılmaya başlanmıştır. 1865 yılında Almanya’da bir fabrika öğütölmüş GYFC ve söndürölmüş kireç karışımından oluşun çimento üretilmeye başlamıştır.

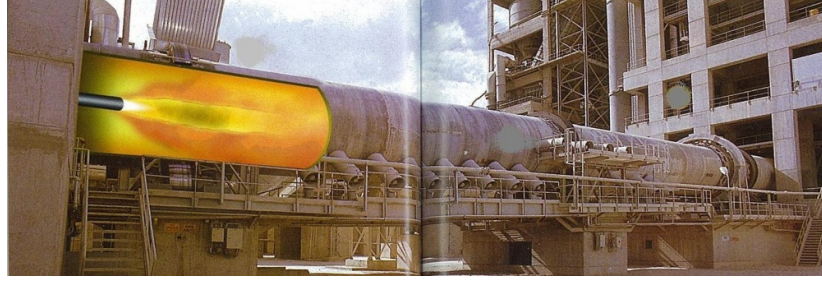
1910-1920 Yılları: 1911 yılında Türkiye’de ilk çimento fabrikası kurulmuştur. Darıca Fabrikası ve Eskihsar Portland Çimento ve Su Kireci Osmanlı Anonim Şirketi 1920 yılında Aslan ve Eskihsar Müttehit Çimento Fabrikaları A.Ş adı altında birleşmiştir.

1950 -1960 Yılları:1957 yılında Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğı kurulmuştur.

1960-1970 Yılları: 1960 yılında Türk Standartları Enstitüsü kurulmuştur (Erdoğan,2007).

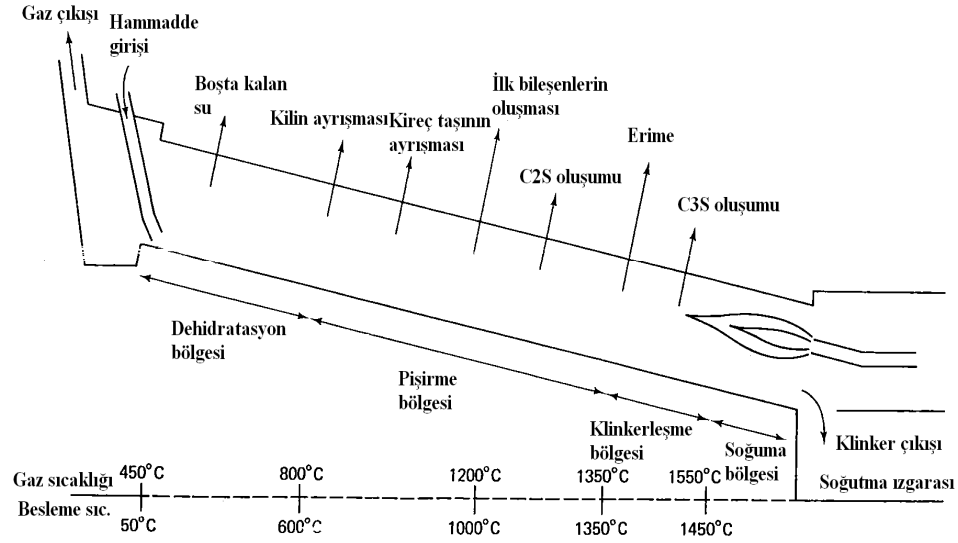
Kil ve kalker birlikte harmanlanıp öğütöldükten sonra farin adını alır. Pişirilme işlemine tabi tutulacak hammadde karışımı, çok ince boyutlara getirilmiş kalkerli ve killi maddelerin kuru veya su ile birlikte çamur durumuna getirilmesiyle hazırlanmaktadır. Bu uygulamalara kuru sistem veya yaş sistem denilir. Kuru yöntemde enerji tasarrufu sağlanırken, yaş yöntemde toz kontrol altında tutulur. Son yıllarda çimento üretimi için

genellikle kuru yöntem kullanılmaktadır.Çimento fabrikalarında farin, enerji tasarrufu amacıyla fırına girmeden önce ön ısıtmaya tabi tutulmaktadır. Yükseklikleri 60 m.'yi geçen ön ısıtma kulelerinde farin taneleri fırından gelen sıcak egzoz gazları ile kısmen kalsine olurlar. Farin döner fırın olarak adlandırılan fırınlarda pişirilmektedir. Çapı 3-7 m, uzunluğu 50-75 m olan 50 mm kalınlığında çelik saçtan yapılmış fırının içi yüzü ateşe dayanıklı tuğlalarla astarlanmıştır. Yaklaşık %3-4 eğimli olarak monte edilen döner fırınlar, kendi eksenini etrafında saatte 60-180 devir yapabilmektedir (Erdoğan, 2007; Yeğınobalı, 2008).



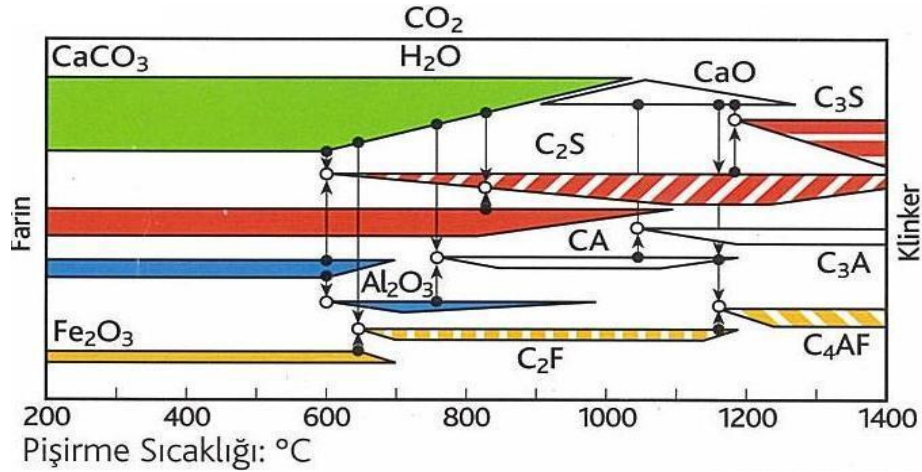
Şekil 2.1 Döner fırın (Yeğınobalı, 2008)

Ön ısıtıcıdan gelen malzeme fırına yukarı uçtan girer ve fırınla beraber dönerek, yuvarlanarak, kayarak daha sıcak bölgelere, alt uçtaki aleve doğru ilerler. 900°C'de CO₂ malzemeden ayrılır. Çıkışta sıcaklığı 1480°C'ye varan kalsine malzeme kısmen ergiyip sıvılaşmaya başlar, ince taneler birbirlerine yapışıp daha büyük boydaki klinker tanelerini oluşturur.



Şekil 2.2 Çimentonun bileşenlerinin şematik gösterimi (Young ve Mindess, 1981)

Çimentoyu oluşturan anabileşenlerden ilk önce C_2S , ilerleyen sıcaklıklarda C_4AF , C_3A , C_3S oluşmaktadır.



Şekil 2.3 Karmaşık bileşiklerin oluşum sıcaklıkları (Yeğinobalı, 2008)

Klinkerler döner fırından yaklaşık $1300^{\circ}C$ de çıkar, üretimin diğer aşamalarına geçmeden önce klinkerin basınçlı dış hava verilerek soğutulması gerekmektedir. PÇ toz gibi ince tanelidir; tanelerin boyutları 1-200 μm arasında değişmektedir. Soğutucudan çıkan klinkerler yaklaşık 2 cm çapındadır. Bunların çimento inceliğine kadar öğütülmesi gerekmektedir. Klinker %3-5 arası alçıtaşı katılarak öğütülmektedir. Bu arada farklı mineraller de öğütülüp bu işleme katıldığında farklı çimento tipleri ortaya çıkmaktadır. TS-EN 197-01'e göre çimentolar 5 ana grupta toplanmıştır. Bunlar Portland Çimentosu

(CEM 1), Portlad-kompoze çimento (CEM 2), Yüksek fırın cürufu çimento (CEM 3), Puzolanlı Çimento (CEM 4), Kompoze Çimento (CEM 5)'tir. Bu 5 ana grup altında çimentoların içerdikleri klinker ve farklı puzolan miktarlarına göre 27 farklı çimento tipi mevcuttur (Yeğınobalı, 2008).

2.2. PUZOLANİK MALZEMELERİN TANIMI, SINIFLARI VE GENEL ÖZELİKLERİ

ASTM C618, (1991)'de puzolan tanımı şöyle yapılmıştır: 'Kendi başlarına bağlayıcılık özelliği olmayan veya çok az olan, fakat ince taneli durumda olduklarında ve sulu ortamda kalsiyum hidroksit ile birleştiklerinde hidrolik bağlayıcılık özelliğın sahip olan silisli veya silisli ve alüminli malzemelerdir.'

Puzolanlar oluşum şekillerine göre doğal veya yapay olmak üzere ikiye ayrılırlar.

1. Doğal Puzolanlar: Volkanik küller, volkanik tüfler, volkanik camlar, ısıl işlem görmüş killer ve şeyller ve diatomlu topraklar bu grup içersinde yer alır. Tras olarak adlandırılır.

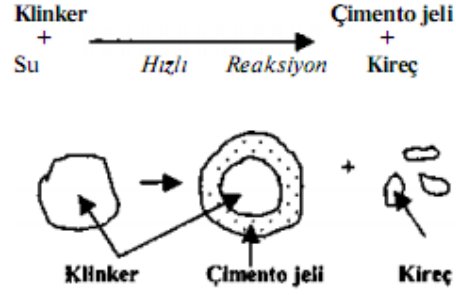
2. Yapay Puzolanlar: Bunlar endüstriyel yan ürünlerdir. Uçucu küller, silis dumanı ve granüle yüksek fırın cürufu en çok kullanılan yapay puzolanlardır. Buğday sapı külü ve pirinç kabuğu külü de, kullanımları olan diğer yapay puzolanlardır (Postacıoğlu, 1986; Kennedy ve Blanks, 1955; Neville, 1987).

Daugherty ve Funnell (1983), yaptığı çalışmalarda katkılı çimentoların üretimi ve kullanımı ile ilgili enerji korunumunu araştırmıştır. Çimentolar ile miktarca %15-40 arasında katkı kullanılmış olup, optimum miktarın %15 olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca deneylerden katkılı çimentonun performansının sadece katkının bir fonksiyonu olmadığı, hangi çimento tipiyle katkı yapıldığının da önemli olduğu gözlemlenmiştir.

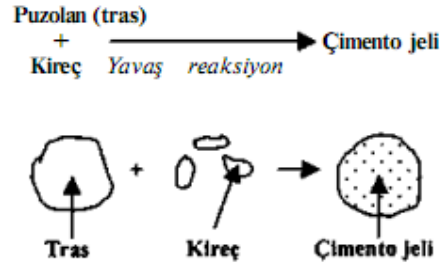
Tras olarak adlandırılan doğal puzolanlar, bazı doğal malzemelerin ısıl işleme tabi tutulmasıyla elde edilen puzolanik malzemelerdir. Doğal puzolanlar volkanik kökenli malzemeler olup, jeolojik anlamda yakın zamanlarda volkanik aktivitelerin meydana getirdiği bölgelerde bulunmaktadırlar. Türkiye doğal puzolan kaynakları bakımından zengin bir ülkedir. Puzolanın kimyasal yapısı, aktivitesi bulunduğu bölgeye göre değişmektedir (Erguvanlı, 1983; Neville, 1977; Postacıoğlu, 1986).

Puzolanik aktivite, bir puzolanın bağlayabileceği en fazla Ca(OH)_2 miktarını ve bağlanma işleminin hızını ifade etmektedir. Ca(OH)_2 miktarının fazla olması, puzolanda aktif madde miktarının fazlalığını gösterir. Trasın yalnız başına hidrolik bağlayıcı

özelliği yoktur. Reaksiyona girmek için kirece gereksinim duyar ve bağlayıcı özelliklere sahip ürün vermektedir.



Şekil 2.4 Klinker tanelerinin su ile reaksiyonu (Bakker, 1999)



Şekil 2.5 Trasın kireç ile reaksiyonu (Bakker, 1999)

Klinkerin su ile reaksiyonu sonucu açığa çıkan kireç puzolanik reaksiyonun meydana gelmesini, trasın bağlayıcı özellik kazanmasını sağlamaktadır (Massazza, 1999).

Taşhane traslarının mineralojik, petrografik ve kimyasal özellikleri ve katkılı çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. PÇ klinkeri ile farklı oranlarda katkılı olarak yapılan puzolanik aktivite testleri, Taşhane traslarının %27 oranına kadar katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini göstermektedir (Deveci ve diğ., 2004).

Düşük kalorili linyit kömürlerinin yakıldığı termik santrallerde, elektrik üretimi sırasında toz haldeki kömürün yanması sonucu baca gazları ile sürüklenen mikron boyutunda kül tanecikleri meydana gelmektedir. Endüstriyel bir atık olan ve uçabilen bu küllere, uçucu kül denmektedir (Arunta, 2006).

Uçucu kül en yaygın puzolan olup, diğer puzolanlar gibi çimentonun son üretim aşamasında klinkere katılabilir ya da çimentoya kullanım aşamasında belli oranlarda katkı maddesi olarak eklenebilmektedir (Ulusoy, 2008).

Uçucu kül hidratasyon ısısını düşürür ve tanelerin küreselliği iç sürtünmeyi azaltarak taze betonun kararlılığını, kolay yerleşmesini ve kolay sıkıştırılmasını sağlar. Betonda U kullanımı erken yaşlarda yavaş dayanım kazanmasına yol açar. Beton karışımın içerisinde yer alan uçucu kül miktarı, çimento ağırlığının %15-%50'si civarında değişebilmektedir (Erdoğan, 1993; Erdoğan 2007; Taşdemir, 2002).

Katkılı çimento içerisindeki U, klinker hidratasyonunu etkiler. Alit (C_3S) reaksiyonunu hızlandırır, belit (C_2S) ve C_4AF reaksiyonunu yavaşlatmaktadır (Sakai ve diğ., 2005).

Silis dumanı alaşım üretiminde kullanılan elektrik ark fırınlarında $2000^{\circ}C$ 'ta yüksek saflıktaki kuvarsın kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozdur. Bu esnada ortaya çıkan gazın hızlı soğutularak yoğunlaştırılması sonucunda elde edilen malzemeye 'silis dumanı' denir. Silis dumanı (S) için silika füme, silis tozu, mikrosilis, baca tozu gibi isimler de kullanılmaktadır. Silis dumanının puzolanik aktivitesi yüksek olduğundan, bu malzemeyle yüksek dayanımlı betonlar elde edilmekte ancak çok ince taneli oluşu su ihtiyacını arttırdığından yanında su azaltıcı katkı maddesi kullanılmalıdır. Türkiye'de silis dumanı Antalya'da Eti Elektrometalurji A.Ş. tesislerinden elde edilmektedir (Yeğinoğlu, 2007; Erdoğan, 2007).

S'nin düşük alkali ve yüksek silika miktarları puzolanik aktiviteyi arttırmaktadır. S katkısı özellikle C_3S hidratasyonunu hızlandırmaktadır. Bu reaksiyonlardan meydana gelen CH'yi de bağlayarak C-S-H jeline dönüştüreceğinden silis dumanının C_3S miktarı yüksek çimentolarda daha etkili olacağı söylenebilir (Yeğinoğlu, 2002; Demir, 2005; Malhotra, 1987; Huang ve Feldman, 1985).

S'nin U ve YFC gibi diğer mineral katkılarla ilişkisi araştırılmıştır. S diğer puzolanların neden olduğu düşük ilk dayanımları yükseltmekte yararlı olmaktadır. U katkılı hamurlarda uzayan priz süreleri %8 oranında katılan silis dumanı ile bir miktar kısaltılabilmektedir. Silis dumanı miktarı çimentonun %16-%20 arasında olmalıdır. %10 oranında katılan U ve S arasında çok fazla bir fark oluşmazken, 28 günlük dayanımlarda S oranı %20'ye kadar arttıkça basınç dayanımı artmaktadır. U oranı %10'a kadar basınç dayanımında artış, %10'dan sonra ise basınç dayanımında düşüş göstermektedir. Bunun nedeni S'nin U'ya göre daha ince olması ve S'nin kimyasal özelliklerinin farklı olmasıdır (Demir, 2009; Erdoğan, 2007; Yeğinoğlu, 2007).

Çimentolar aktif puzolandan örneğin silis dumanı, az miktar içerseler bile erken ve nihai dayanımları normal çimentolardan daha yüksek olmaktadır (Massazza, 1993).

Yüksek fırın cürufu, demir ve çelik endüstrisi ürünüdür, çeşitli metalurji tesislerinden elde edilen atık maddedir. Elde edildikleri sanayi kuruluşlarının ürettiği ana ürün tipine ve üretim yöntemine bağlı olarak kimyasal kompozisyonları ve özellikleri birbirinden çok farklıdır. YFC çok miktarda CaO içermesinden dolayı kendi başına bağlayıcılık özelliği vardır. Nikel ve bakır cüruflarının yalnızca puzolonik özellikler vardır. Cüruf fiziksel olarak soğutma hızına dayanır. Çimento olarak kullanmak için hızlı soğutma gerekmektedir. Cüruf genellikle su ile söndürülür. Bir miktar hidrolik özelliğe sahip olan cüruflara granüle yüksek fırın cürufu denir (GYFC). 1889 yılında Fransa’da Paris metrosunun yapımında kullanılan harçlarda da öğütülmüş GYFC ve söndürülmüş kireç karışımı kullanılmıştır (Erdoğan, 2007; Mindess ve Young, 1981; Lea, 1970).

GYFC’lerin kendi başlarına suyla reaksiyonu, PÇ’lerin hidratasyonu ile kıyaslandığında yavaştır. Genel olarak %70’in üzerinde cüruf içeren çimentolarda erken dayanım, cüruf reaktivitesine, daha az cüruf içerenlerde ise klinker özelliklerinin etkisine bağlı olmaktadır (Cattaneo ve Frigione, 1983; Lea, 1970; Tokyay ve Erdoğan, 2007).

2.3. ÇİMENTONUN ANABİLEŞENLERİ VE OKSİTLERİ

Çimento hammaddelerinin orantılanmış bir karışımı olan farinin ana bileşenleri kireç ve silistir. Killi malzeme esas olarak silika (SiO_2) ve alümin (Al_2O_3)’den oluşmaktadır. Killerde az miktarda Fe_2O_3 ve başka yabancı maddeler de bulunmaktadır. Pişirilme işlemine tabi tutulacak hammadde karışımında uygun oranlarda CaO, SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 gibi oksitlerin yer almış olması gerekmektedir. Aşağıdaki formüllerde oksitlerin bileşimdeki %’leri kullanılmaktadır.

$$\text{Kireç Doygunluğu} = \text{CaO} / (2.8 \times \text{SiO}_2 + 1.18 \times \text{Al}_2\text{O}_3 + 0.65 \times \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (2.1)$$

$$\text{Silika Modülü} = \text{SiO}_2 / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3) \quad (2.2)$$

$$\text{Demir Modülü} = \text{Al}_2\text{O}_3 / \text{Fe}_2\text{O}_2 \quad (2.3)$$

Normal dayanımlı bir çimento için kireç standanının %90-93 arasında olması istenmekte, daha yüksek değerler ile çimento dayanımı artmaktadır. Ancak, 100’ün üzerindeki değerler tüm kirecin bağlanamayacağını göstermekte, serbest kalan kirecin çimentonun hacim sabitliği ve dayanımı üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Silika modülü %20-25, demir modülü %10-30 arasında olmalıdır. Farin fırında pişerken bu

oksitler önce serbest hale gelirler sonra, sıcaklık yükseldikçe aralarında kimyasal reaksiyonlara girerek çimentonun anabileşenleri olan C_3A , C_3S , C_2S , C_4AF 'yi oluşturmaktadır. Oksitlerin klinkerde yer alma miktarı, çimentonun anabileşenlerinin miktarını etkilemektedir.

P.Ç'lerin hangi hızla hidratasyon yapacağı, ne kadar hidratasyon ısısı açığa çıkartacağı, hangi hızla katılaşabileceği ve dayanım kazanabileceği, çimento kompozisyonundaki anabileşenlerin ne miktarda yer almış olduklarına bağlıdır. Bouge formülleri ile anabileşen miktarı hesabı aşağıda gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} \%C_3S = & (4,071 \times \%CaO) - (7,600 \times \%SiO_2) - (6,718 \times \%Al_2O_3) - (2,852 \times \%SO_3) \\ & - (1,430 \times \%Fe_2O_3) \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\% C_2S = (2,876 \times \% SiO_2) - (0,7544 \times \% C_3S) \quad (2.5)$$

$$\% C_3A = (2,650 \times \% Al_2O_3) - (1,692 \times \% Fe_2O_3) \quad (2.6)$$

$$\% C_4AF = (3,043 \times \% Fe_2O_3) \quad (2.7)$$

Katkılı çimentoların anabileşenlerinin oranlarının tayininde Bouge denklemleri kullanılmamaktadır (Erdoğan, 2007; Yeğinobalı, 2008).

2.4. HİDRATASYON ISISI

2.4.1. Farklı Çimento Anabileşenlerinin Hidratasyona ve Dayanıma Etkisi

Çimentonun anabileşenlerinin miktarları değiştirilerek, değişik tipte PÇ'ler üretilmektedir.

Tablo 2.1 Normal PÇ'nin kompozisyonu (Mindess ve Young, 1981)

Kimyasal Ad	Kısa Ad	Ağırlık(%)
Trikalsiyum silikat	C_3S	50
Dikalsiyum silikat	C_2S	25
Trikalsiyumalüminat	C_3A	12
Tetrakalsiyum aluminoferrit	C_4AF	8
Alçıtaşı	CSH_2	3.5

Tablo 2.2 ABD’de üretilen PÇ’deki anabileşenlerin yaklaşık oranları (Erdoğan, 2007)

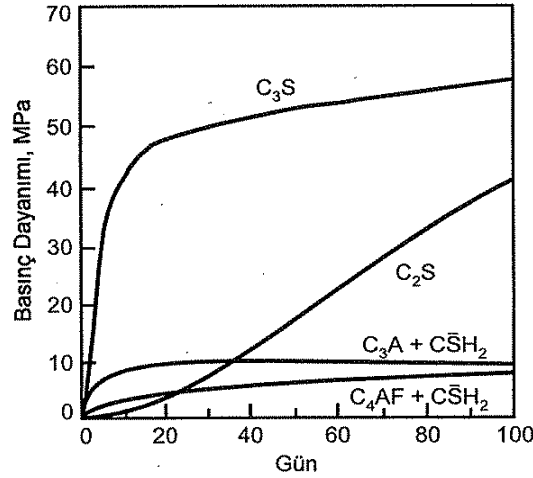
Çimento Tipi ve Genel Açıklama	Anabileşen Miktarı (%)			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Normal PÇ (Genel amaç için kullanılmaktadır)	49	25	12	8
Değiştirilmiş PÇ (Normal PÇ'ye göre daha az hidrasyon ısıya, daha çok sülfat dayanıklılığına sahip)	46	29	6	12
İlk Dayanımı Yüksek PÇ	56	15	12	8
Düşük Isılı PÇ (Hidrasyon ısı az, kütle betonlar için kullanılmaktadır)	30	46	5	13
Sülfata Dayanıklı PÇ	43	36	4	12

C₃S miktarını yükselterek erken dayanımlı yüksek çimento, C₃A miktarı azaltılıp C₄AF miktarını yükseltildiğinde sülfata dayanıklı çimento, C₂S miktarını artırıp C₃S ve C₃A’yı azaltarak düşük ısıli çimento üretilmektedir. C₃A ve C₃S yönünden zengin ve ince öğütülmüş PÇ 42,5 ve PÇ 52,5’nin hidrasyon ısısı genellikle fazladır. Hidrasyon esnasında, her anabileşen ayrı ayrı reaksiyona girmekte ve her anabileşenin reaksiyon hızı, açığa çıkan ısı ve reaksiyon ürünün dayanıma katkısı farklı olmaktadır.

Tablo 2.3 Çimento anabileşenlerinin relatif özellikleri (Mindess ve Young, 1981)

Anabileşenler	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Reaksiyon Hızı	Orta	Yavaş	Hızlı	Orta
Hidrasyon Isısı	Orta	Az	Yüksek	Orta
Dayanıma Katkı (İlk Günlerde)	Yüksek	Düşük	Düşük	Düşük
Dayanıma Katkı (Son Günlerde)	Yüksek	Yüksek	Düşük	Düşük

Çimento hamurunun kazanacağı nihai dayanımı C_3S+C_2S anabileşenlerinin hidratasyonu sonucu ortaya çıkan C-S-H jelleri tarafından sağlanmaktadır. Onun için PÇ’lerde bulunabilecek C_3S+C_2S miktarlarının belli bir düzeyden az olmaması gerekmektedir. Hidratasyon devam ettikçe C-S-H jellerinin üretimi de devam eder. Bunlar ne kadar hızlı olursa çimento o kadar hızlı dayanım kazanmakta, ne kadar çok olursa çimentonun dayanımı o kadar yüksek olmaktadır. İlk zamanlarda C_3S ’nin hidratasyonu C_2S ’ninkinden daha hızlı yer aldığı için, çimentodaki dayanım artışına C_3S ’nin ilk zamanlardaki katkısı çoktur. C_3S erken dayanıma (ilk 3-4 hafta), C_3S ve C_2S ikisi birden nihai dayanıma etki etmeye devam etmektedir. C_3A , çimento hamurunun dayanımına önemli katkıda bulunmamaktadır.



Şekil 2.6 Çimento hamurundaki anabileşenlerin basınç dayanımı (Mindess ve Young, 1981)

Betonların ve çimentoların başlangıç dayanım elde etme hızları farklı olsa bile ultimate (en yüksek) dayanımları birbirine benzemektedir (Erdoğan, 2007; Yeğinobalı, 2008; Young ve Mindess, 1981).

2.4.2. Hidratasyon Isısı, Hesabı, Bu Isıya Etki Eden Etkenler

Çimentoyu oluşturan bileşik maddelerin herbirinin su ile kimyasal reaksiyona girmesi ile hidratasyon olayının başlaması sonucu açığa çıkan ısıya hidratasyon ısı denir (Erdoğan, 2007).

Hidratasyon ısı çimentonun kimyasal kompozisyonuna bağlıdır. Çimento inceliği arttıkça çimento tanelerinin yüzeyi artar, reaksiyona girme hızı artar. Öğütmedeki incelik ısı üretim hızı için önemlidir. İnce öğütülmüş çimentolar hidratasyon hızını

arttırır fakat toplam hidratasyon ısısında etkili olmamaktadır (Lea, 1970; Mindess ve Young, 1981).

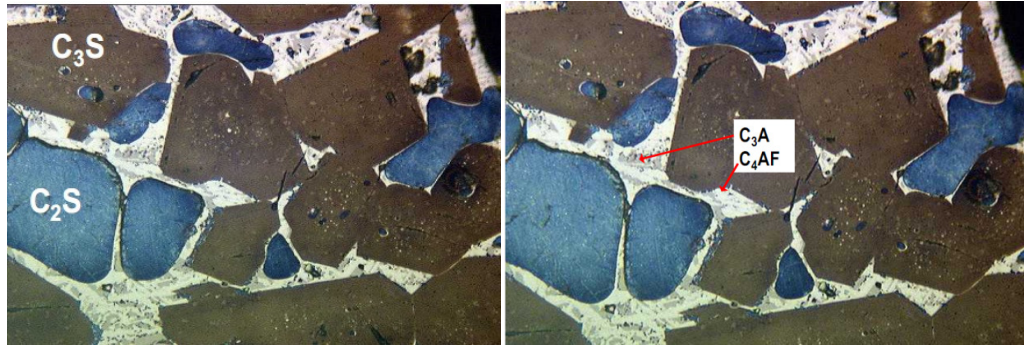
PÇ'yi oluşturan anabirleşenlerin (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) herbirinin hidratasyon ısısı farklıdır. Ancak C_3A ve C_3S en reaktif birleşenler olup, hidratasyon ısısına en çok etki edenlerdir (Kamiński ve Zielenkiewicz, 1982).

C_3S : Su ile reaksiyonu ve ortaya çıkan ısı orta değerdedir.

C_2S : Su ile reaksiyonu yavaştır, az miktarda ısı açığa çıkarmaktadır.

C_3A : Su ile çok hızlı reaksiyona girip çok fazla ısı açığa çıkarmakta, çimento hamurunun çok çabuk katılaşmasına neden olmaktadır.

C_4AF : Reaksiyonlar yavaştır ve daha az ısı üretir. (Mindess ve Young, 1981; Neville, 1981).



Şekil 2.7 Çimentonun anabirleşenlerinin mikroskoptaki görünümü (White, 2006).

Çimento hamurunun ani prizini önlemek amacıyla, çimento üretimi sırasında klinkere bir miktar (%3-%6) alçıtaşı katılmakta ve bu iki malzeme birlikte öğütülmektedir. C_3A ve C_4AF hidratasyon sırasında su ve diğerlerinden farklı olarak alçıtaşı ile reaksiyona girmektedir. Çimento klinkerine eklenen alçı miktarı fazla olursa patlamaya; az olursa ani priz olmasına neden olmaktadır. Optimum alçı miktarı, hidratasyon ısısı oluşma miktarı ile belirlenmektedir (Mindess ve Young, 1981; Neville, 1981).

PÇ'nin su ile olan hidratasyonu ekzotermiktir. Çimento içerisindeki her bir birleşenin toplam ısı üretimine katkısı, toplam hidratasyon ısısına, hızına ve herbir birleşenin çimento içerisindeki miktarına bağlıdır. Herhangi bir yaştaki betonun içerisindeki çimentonun cinsine bağlı olarak toplam hidratasyon ısısı miktarı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$H_t = a(C_3S) + b(C_2S) + c(C_3A) + d(C_4AF) \quad (2.8)$$

H_t= Toplam hidrasyon ısı kJ/kg olarak ,

C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF: Bogue hesabıyla elde edilen ağırlık oranı % olarak ,

a, b, c, d : Beton yaşına göre değişmektedir.

Bir çimentonun ne miktarda hidrasyon ısı üreteceği, çimento hamurunda yer alan anabilesenlerin miktarlarına ve hidrasyonun ne kadar süre ile yer almış olmasına bağlıdır. 3 gün ve 1 yıl sonunda çimento hamurunda açığa çıkan hidrasyon ısılarının J/g cinsinden hesabı aşağıda gösterilmektedir.

$$H_{(3 \text{ gün})} = 240(\%C_3S) + 50(\%C_2S) + 880(\%C_3A) + 290(\%C_4AF) \quad (2.9)$$

$$H_{(1 \text{ yıl})} = 490(\%C_3S) + 225(\%C_2S) + 1160(\%C_3A) + 375(\%C_4AF) \quad (2.10)$$

Yukarıda verilen kümülatif ısı yayılım bağıntısında s/ç=0.4 ve 21°C' da a, b, c, d katsayılarının yaşa göre değişim değerleri Tablo 2.4'te gösterilmiştir (Sağlık ve diğ., 2009).

Tablo 2.4 a, b, c, d katsayılarının yaşa göre değişim değerleri (Sağlık ve diğ., 2009)

Verilen yaş için katsayı değeri, (kJ/kg)									Isı Miktarı (kJ/kg)
Bileşik	Katsayı	3 Gün	7 Gün	28 Gün	90 Gün	1 Yıl	6.5 Yıl	13 Yıl	Tamamlanmış ^a hidrasyon sonunda
C ₃ S	a	243	222	126	435	490	490	510	-520±13
C ₂ S	b	50	42	105	176	226	222	247	-260
C ₃ A	c	887	1556	1377	1301	1167	1372	1356	-1140 ^b ; -1670 ^c
C ₄ AF	d	289	494	494	410	377	464	427	-420 ^d

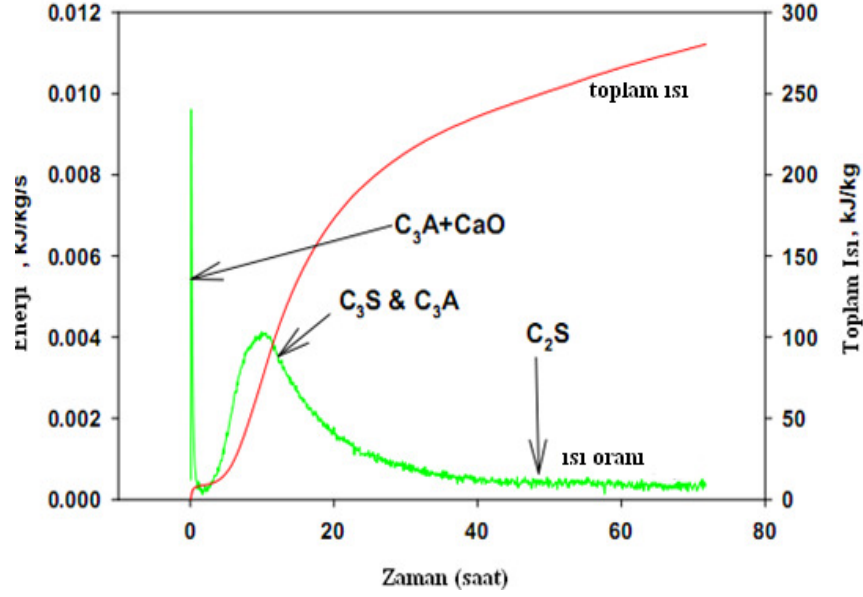
^a Bileşiklerin saf halde reaksiyonları sonucunda açığa çıkan ısı

^b C₃A ile alçıtaşı reaksiyonu açığa çıkan ısı

^c C₃A ile alçıtaşı reaksiyonu sonucunda etringit verirken açığa çıkan ısı

^d Ortamda bulunan fazla CH ile C₄AF'nin reaksiyonu sonucu açığa çıkan ısı

Aşağıdaki şekilden görüldüğü gibi çimentonun ısı oluşumu C_3A , CaO ve C_3S fazlarının hidratasyonuna bağlıdır. Bunlar ilk 24 saatte hidratasyon süresince hızlı reaksiyon göstermektedirler.



Şekil 2.8 P.Ç'nin ısı oluşum eğrisi (Poole, 2007)

Tablo 2.5 P.Ç'deki anabileşenlerin hidratasyon ısıları (Ün, 2007)

Anabileşen	İlk 48 Saatte Çıkan Isı, cal/g	Toplam Hidratasyon Isısı, cal/g
C_3S	100	120
C_2S	10	62
C_3A	150	207
C_4AF	40	100

PÇ pastasının hidratasyonu sonucu açığa çıkan hidratasyon ısısı betonda sıcaklık artışına sebep olmaktadır. Çimentodan ısı çıkışı 500 J/g'a kadar varabilir. Çünkü betonun ısı iletkenliği yavaştır ve izolatör (yalıtkan) olarak davranmaktadır. Bu yüzden geniş kütle betonlarının içinde hidratasyon yüksek sıcaklık artışı gösterebilir. Betonun dışı ısı kaybeder, bu soğuma esnasında ilk birkaç günde çatlakların oluşumuna neden olmaktadır. En büyük sıcaklık artışı yaklaşık olarak ilk 3 günde ortaya çıkmakta, 2 haftada hidratasyon sonuçları çevre sıcaklığına geldiğini göstermektedir. Pozolan katkılı betonlarda daha az PÇ kullanılmasından dolayı betondaki hidratasyon ısısı ve büzülme

daha düşük olmaktadır. Büyük ve ağır yapılarda ısı çıkışı önemlidir. Bunun için yapı projelerinde, ısı üretim özelliklerinden dolayı değişik çimento türleri içerisinde uygun tipte olanı seçilmelidir (Snelson ve diğ., 2008; Poole, 2007).

2.4.3. Hidratasyon Isısı Ölçüm Metodları

Literatürde hidratasyon ısısı ölçüm metodu raporları 1930'larda uygulanmaya başlamıştır. 4 çeşit metod vardır, açıklamaları sırasıyla aşağıda verilmiştir.

- İzotermal konduksiyon kalorimetresi
- Çözelti kalorimetresi
- Adyabatik kalorimetre
- Semi adyabatik kalorimetre

Çimento hidratasyon analizinde ilk olarak izotermal ısı iletim kalorimetresi kullanılmıştır. İzotermal kalorimetrede numunedeki ısı üretimi ölçülürken numune sabit sıcaklıkta tutulmaktadır. Bu metod, taze karışmış çimento hamuru ile numuneden ısı alan ısı alıcı ile ilişki kuran bir yöntemdir. Yaklaşık olarak izotermal şartlar devam ettirilmektedir. Sıcaklığın sabit kaldığı sistemlerde termoelektrik ısı akışı sensörü numune ile ısı alıcı arasında yer alır. Herhangi bir periyottaki toplam hidratasyon ısını uygun kalibrasyon ile ilişkilendirir ve verilen elektriksel çıkış ölçülür.

Çözelti kalorimetresi, çözünme esnasında hidrate olmamış ve hidrate olmuş numune arasındaki enerji çıkışı belirlenmektedir. Çözelti kalorimetresi prensibi, numune temel kimyasal bileşenlere ayrılırkenki sıcaklık artışının ölçülüp, ısı enerjisine çevrilmesidir. Kimyasal çözelti içerisinde hidrate olmamış çimento tamamen hidrate olmuşa göre daha fazla potansiyel kimyasal enerjiye sahiptir. Bundan dolayı hidrate olmamış ve kısmen hidrate olmuş çözeltilerde arasındaki ısı farkı hidratasyon sürecinde oluşan ısıyı vermektedir. Bu metodun kullanımı izotermal konduksiyon kalorimetresinden daha avantajlıdır çünkü laboratuvar aletleriyle kolaylıkla kurulabilmektedir.

Adyabatik kalorimetre numuneden ısı akışı olmamakta, üretilen tüm ısı numunenin ısınmasında kullanılmakta ve sıcaklık ölçülmektedir. Büyük enkesitli beton yapılarda, merkezdeki beton çimentonun hidratasyonu esnasında oluşan ısıyı kaybetmez. İlk birkaç günkü ısı oluşumu bu konumda tutulmaktadır. Kütle betondaki çatlak betonun içi ve dışı arasındaki sıcaklık farkından kaynaklanmaktadır. Betonun dış tarafından çevreye yayılan ısı, adyabatik sıcaklık artışı ve etkinin süresi yapının dizaynı ile ilgilidir. Adyabatik kalorimetre numunenin merkezindeki sıcaklığı ölçmek için dizayn edilmiştir.

Sonrasında ısıtma ve soğutma işlemleriyle numune çevresindeki aynı sıcaklığa getirilmektedir. Numunenin ısı kapasitesi biliniyorsa hidratasyon ısısı hesap edilmektedir. Adyabatik şartlarda tutulan ısı, hidratasyonu ivmelendirir ve bu yüzden ısı oluşumu izotermal testlere göre daha hızlıdır. İzotermal ve adyabatik metodlarla elde edilen sonuçlar hidratasyon tamamlandığında aynı olur fakat ısı oluşum eğrisi grafik şekli daha farklı olmaktadır. Avantajı tüm beton karışımlarında özellikle büyük yapılarda kullanılmaktadır. Dezavantajları ise, test metodunu yürütmek oldukça pahalıdır. Çok hassas olup, operatör becerisine bağlıdır. Piyasadan elde edilebilir teçhizat bulmak zordur.

Semi adyabatik sistem adyabatik kalorimetreye benzer ancak numunenin sıcaklığı geri beslenmez. Numune izole edilmiştir, ısının bir kısmı numuneyi ısıtır, bir kısmı kaybolur. Isı akış sensörleri semi adyabatik kalorimetrenin içinde ısı kaybını ölçmektedir. Numunenin ısı kapasitesi ve ısı kaybı biliniyorsa hidratasyon ısısı hesaplanmaktadır. Avantajları, piyasadan yüksek kaliteli teçhizat bulmak ve metodu gerçekleştirmek kolaydır. Kütle beton uygulamalarında beton ve harçta performans oluşumuna izin verir. Dezavantajları ise, alet büyük ve sadece tek bir numune için kullanıma uygundur. Birkaç numunede bu metodu uygulamak için çok miktarda büyük cihaza ihtiyaç vardır. Beton veya harç testinde çevreye ısı kaybını ölçmek için birçok cihaz kurulmaktadır (Poole, 1998).

2.4.4. Hidratasyon Isısına Puzolanların Etkisi

Kalorimetre deneyleri sonucunda, ilk saatlerde katkılı çimentonun hidratasyon ısısı normal çimentonunkinden daha fazladır, ancak ilerki zamanlarda hesaplanan toplam hidratasyon ısısı daha azdır. Katkılı çimentoda hidratasyon önce çimento ve su arasında başlamaktadır. Puzolanların reaksiyonu C_3S ve C_2S hidratasyonu ile ortaya çıkan $CaOH_2$ kullanılmasıyla olmaktadır. Puzolanlar kimyasal kompozisyona ve puzolan aktivitesine bağlı olarak, kireç ile meydana gelen reaksiyon sonucu genellikle hidratasyonun en üst değerinden sonra ısı üretimini devam ettirmektedir. Hidratasyon ısısındaki azalma katkılı çimentodaki klinker seviyesi ile orantılı değildir (Lea, 1970; Mostafa ve Brown, 2005; Sánchez de Rojas et al, 1993).

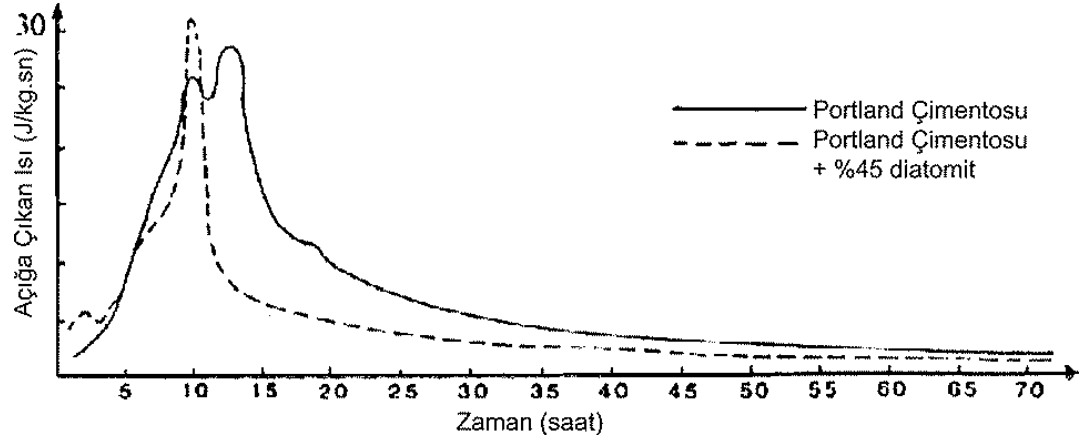
Katkılı çimentolarda hidratasyon ısısı mineral katkının kullanılmış kısmına bağlı olarak artar veya azalır. Cüruf ve uçucu kül erken yaşlarda silis dumanından daha az reaktiftir. Örneğin silis dumanının hidratasyon ısısı, $Ca(OH)_2$ ile puzolanik reaksiyonu esnasında

uçucu kül ve cürufa göre daha fazladır (Wallerve diğ., 1996; Bensted, 1981; Kishi ve Maekawa, 1995).

2.4.4.1. Trasın Hidratasyon Isısına Etkisi

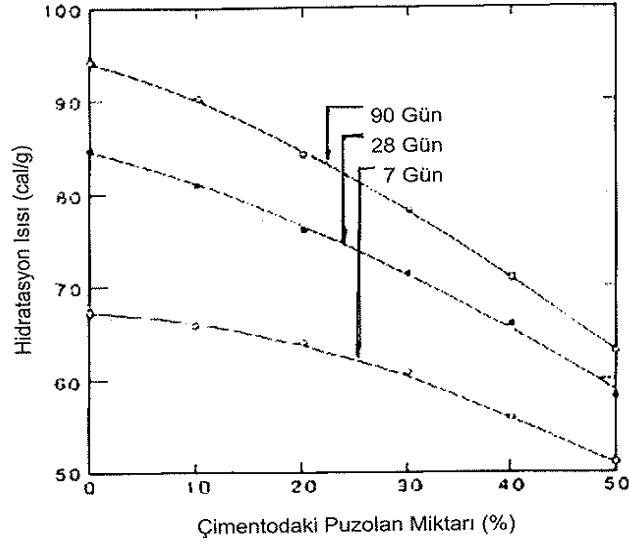
Portland çimentosunun toplam hidratasyon ısısı Portland çimentosu-doğal puzolan karışımından genellikle daha fazladır. Ancak, puzolanik tepkimeler de ısı açığa çıkartır. Doğal puzolanların alit (C_3S) hidratasyonunu hızlandırdığı düşünülmekte ancak sebebi açıklanamamaktadır (Grzymek ve diğ., 1980; Ün, 2007).

Yüksek miktarda kil minerali içeren diatomitlerde, killeri puzolanik aktiviteyi azaltır. Bu yüzden bazı çeşitleri, 760°C ile 1000°C arasında ısı işlemi görerek puzolanik aktiviteleri artırılır. Kısacası diatomitler ısı işlemi görmüş doğal puzolanlardır. Diatomit yatakları A.B.D. , Cezayir, Almanya, Danimarka ve Kanada'da bulunmaktadır.



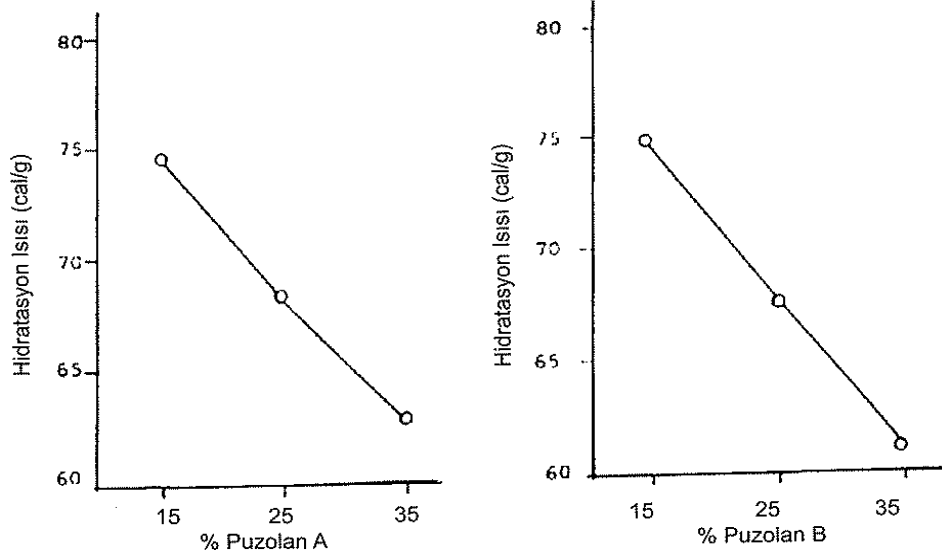
Şekil 2.9 P.Ç ve Portland-doğal puzolan çimentolarının hidratasyon ısıları (Grzymek ve diğ., 1980)

Çimentoya puzolan katılması hidratasyon ısısı zaman diyagramının daha dikleşmesine, pasif dönemin (dormant period) kısılmasına ve maximum değere daha erken ulaşmasına neden olur.



Şekil 2.10 Puzolan miktarının hidratasyon ısısına farklı yaşlarda etkisi (Swamy, 1986)

Farklı miktardaki doğal puzolan ikamesinin hidratasyon ısısına etkisinin incelendiği bir araştırmanın sonucu şekilde gösterilmiştir (Tokyay ve diğ., 2007; Gündeşli, 2008).



Şekil 2.11 Trasların çimentonun 7 günlük hidratasyon ısısına etkisi (Yeğinoğlu ve Şannag, 1995)

2.4.4.2. Uçucu Külün Hidratasyon Isısına Etkisi

Beton üzerinde oluşan sıcaklık yükselmesini etkileyen en önemli ve etkili parametre çimento miktarıdır. Farklı miktarlardaki su/çimento oranlarında, çimento miktarındaki artış, betonda oluşan sıcaklık artışını yükseltmektedir.

Tablo 2.6 Betonlarda farklı çimento dozajlarında ölçülen sıcaklık artışları (Atiş 2000)

Bağlayıcı Miktarı (kg)	Katkı Miktarı (%)	S/Ç Oranları		
		0.35	0.45	0.55
		Sıcaklık Artışı, (°C)		
300	0	4.6	5.8	6.6
	10	5.2	5.9	7.1
	20	4.5	5.8	6.1
	30	5.1	5.5	5.7
400	0	14.5	13.5	16.4
	10	15.8	14.5	18.0
	20	17.8	16.6	16.3
	30	15.6	15.8	14.8
500	0	19.1	20.7	20.8
	10	19.3	21.4	21.0
	20	16.8	20.5	19.2
	30	16.3	18.4	18.2

Çimentoya katılan uçucu külün sıcaklık yükselmesinde her s/ç oranı için önemli bir değişiklik gözlenmemiştir. Bunun nedeninin kullanılan uçucu kül olduğu düşünülmektedir. F sınıfı küllerin sıcaklık artışını azalttığı bilinmektedir. Ancak bu çalışmada kullanılan kül C sınıfı olup, kendi başına bağlayıcılık özelliği göstermesinden dolayı sıcaklık oluşumuna katkıda bulunduğu düşünülmektedir (Atiş 2000).

Literatürde yapılan bir çalışmada, Afşin-Elbistan termik santralinden elde edilen U'nun beton içinde hidratasyon sonucu sıcaklık artışı incelenmiştir. Beton içinde oluşan sıcaklık yükselmesi termometre ile birer saat ara ile 24 saat ölçülmüştür. Afşin-Elbistan uçucu külünün ağırlıkça %10 - 20 oranında beton içine katkı olarak kullanılabileceği gözlemlenmiştir. Ancak, Afşin-Elbistan uçucu külü beton sıcaklığını düşürmediğinden, hidratasyon ısını azaltmada kullanılamayacağı anlaşılmıştır (Binici ve diğ., 2009).

Uçucu kül ile yapılan betonların hidratasyon ısısı düşük olduğu için, özellikle kütle beton yapımında kullanılmaktadır. U ilk kez ABD'de 1940 yılında Hoover ve Hungry Horse barajlarında betonun hidratasyon ısını düşürmek için kullanılmıştır. Ülkemizde ise 1960' lı yılların sonunda Gökçekaya ve Porsuk Barajı betonlarında kullanılmıştır.

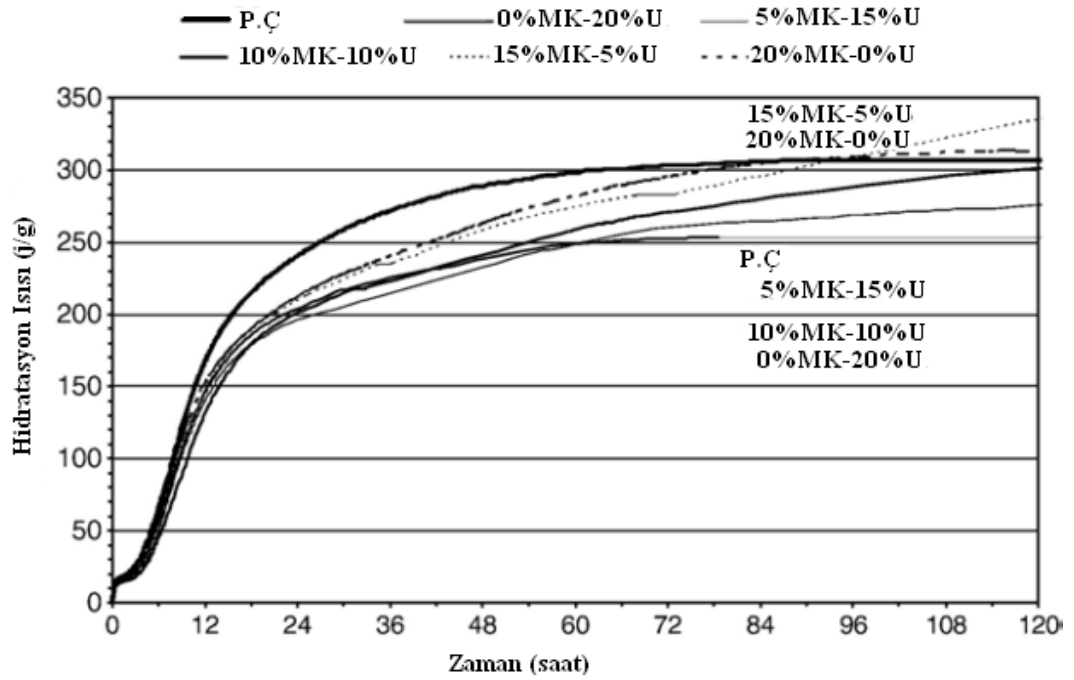
Tablo 2.7’de, betonda uçucu kül kullanımının yaygınlaşmaya başladığı yıllarda yapılan bazı baraj isimleri belirtilmektedir (Erdoğan, 2007).

Tablo 2.7 Uçucu kül kullanılan beton barajlar (Erdoğan, 2007)

Yıl	Baraj	kg
1965	Yellowtail (ABD)	50
1972	Dworshak (ABD)	42
1972	Libby (ABD)	29
1979	Peace Site1 (Kanada)	63

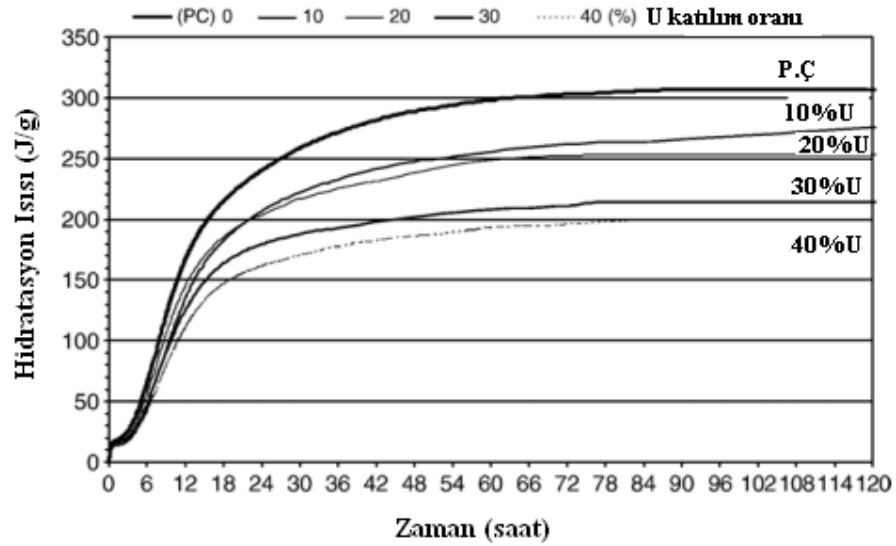
Literatür taramasında bir diğer çalışmada yüksek miktarda (%70) uçucu kül içeren betonun adyabatik kür şartlarında artan sıcaklık ile artan ısı ısı ölçülmüştür. Uçucu kül çimento gibi kullanıldığında, birim hacimdeki çimento miktarı azaldığından max. sıcaklık artışında azalma sağladığı görülmüştür (Atış, 2002; Davis ve diğ., 1937).

Puzolanik maddelerle ilgili bir çalışmada metakaolin (MK) ve uçucu kül çimentoda katkı olarak kullanılmıştır. Hidratasyon esnasında katkıların ısı çıkış hızına ve hidratasyon ısisına etkileri araştırılmıştır. MK yüksek performanslı çimento bazlı malzemelerin üretiminde kullanılan mineral katkıdır. Portland çimentosu hidratasyon hızını ve ısı oluşum hızını puzolanın su gereksinimi belirlemektedir. Katkılı PÇ’de metakaolinin puzolanik reaksiyonu ısı çıkışını arttırmaktadır. Düşük aktiviteli puzolonlardan U katkı PÇ’nin ilk zamanlarda ısı çıkışı fazla olsa da toplam hidratasyon ısisı düşüktür. Yapılan çalışmada PÇ’de ilk 8 saatte hidratasyonda çimento içeriğinin azalması ve U’nun yeralma miktarı artması sonucu hidratasyon ısisını artırmaktadır. Bunun nedeni ince taneli olan uçucu külün bol miktarda su kullanması ve çimento hidratasyonu ile oluşan hidratasyon ürünlerine açılan yer artışı olarak düşünülmektedir. Bu aşamada yeni sergilenen yüzeylerde daha çok su reaksiyona girerek hidratasyon ısisında artışa neden olduğu düşünülmektedir.



Şekil 2.12 U-MK katkılı çimentoların toplam hidrasyon ısısına etkisi (Snelson ve diğ., 2008)

MK'nın yüksek su ihtiyacı PÇ'nin hidrasyonunu yavaşlatır. MK puzolanik aktivitelerden dolayı hidrasyon sürecini artırmakta, 120 saate kadar puzolanik reaksiyonlar ısı akışını sürdürmektedir. Uçucu kül ilk zamanlarda hidrasyon için daha çok suya ulaşarak çimentonun hidrasyonunu arttırmaktadır. Hidrasyonun 1-18 saati arasında, uçucu külün puzolanik aktivitesi azaldığından hidrasyon ısı azalmaktadır.



Şekil 2.13 U katkılı çimentonun toplam hidrasyon ısısına etkisi (Snelson ve diğ., 2008)

Uçucu kül miktarının çimento içinde yer alma miktarı arttıkça çimentonun hidratasyon ısısı azalmaktadır (Langan ve diğ., 2002; Snelson ve diğ., 2008; Kokubu, 1969).

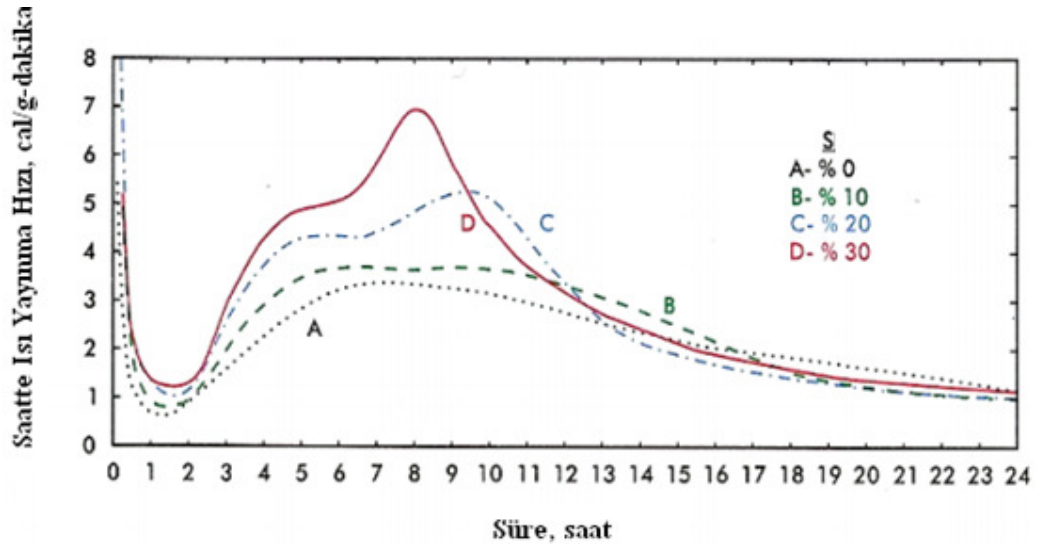
2.4.4.3. Silis Dumanının Hidratasyon Isısına Etkisi

Çimento ağırlığının %10'u kadar silis dumanı kullanılarak yapılan betonun ilk 72 saat içerisindeki hidratasyon ısısı, katkısızlara göre biraz daha fazla olmakta ancak toplam hidratasyon ısısında %8 - %10 azalma olmaktadır. Başlangıçtaki ısı artışı silis dumanının çimento hidratasyonunu hızlandırması ile açıklanmaktadır. S'nin hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi çimentoda yeralma miktarına ve akışkanlaştırıcı kullanma durumlarına bağlı olarak değişmektedir. S katkı olarak sadece hidratasyon ısısını azaltmak amacı ile değil, yüksek dayanım ve dayanıklılık isteyen yerlerde de kullanılmalıdır (Erdoğan, 2007; Yeğinoğlu, 2007).

Çimentoya %10 S ilavesinin hidratasyon ısısının artırdığı, daha yüksek oranlardaki S'nin ise hidratasyon ısısını azalttığı belirtilmiştir (Meland, 1983; Goncalve, 1992).

S'nin hidratasyon ısısı üzerindeki etkileri değişebilmektedir. Bazı araştırmacılar, S ilavesinin hidratasyon ısısını ilk günlerde artırdığını, sonraları ise azalttığını belirtirken, bazı araştırmacılar ise ileri yaşlarda toplam ısıyı artırdığını belirtmektedir (Gündeşli, 2008).

Çimentonun belirli bir miktarı yerine katılan puzolanlar hamurda açığa çıkan hidratasyon ısısını azaltmaktadırlar. Ancak silis dumanı katıldığında ise durum başlangıçta farklı olmaktadır.



Şekil 2.14 Silis dumanı katkılı hamurlarda hidratasyon ısısı (Huang ve Feldman, 1985)

Şekilde ısı yayılma eğrilerindeki pikler 5. saat civarında C_3S hidratasyonu, 6-10 saatleri arası aluminatların hidratasyonu veya pozolanik reaksiyonları ile ilgilidir. Katkı miktarı arttıkça birinci pik daha erken oluşmaya başlar, şiddeti de artar. Silis dumanı yüzdesi arttıkça ikinci pikin de şiddeti, dolayısıyla çimento bazında yayılma hızında artışlar görülmektedir. Süre ilerledikçe katkılı hamurlar, katkısızlarla göre aynı veya daha az ısı yaymaktadır (Huang ve Feldman, 1985).

Puzolan ikamesinin hidratasyon ısisına etkisinin incelendiği bir başka araştırmanın sonuçları ise Tablo 2.8'da sunulmuştur.

Tablo 2.8 Silis dumanlı ve uçucu küllü PÇ'nin 1 günlük hidratasyon ısisı (Langan ve diğ., 2002)

s/ç Oranı	S Katkısı	Hidratasyon Isısı (kcal/kg)	U Katkısı	Hidratasyon Isısı (kcal/kg)
0.35	S0U0	45.9	S0U0	45.9
0.35	S10U0	46.6	S0U20	47.9
0.40	S0U0	46.7	S0U0	46.7
0.40	S10U0	47.4	S0U20	46.6
0.50	S0U0	46.4	S0U0	46.4
0.50	S10U0	48.7	S0U20	43.5

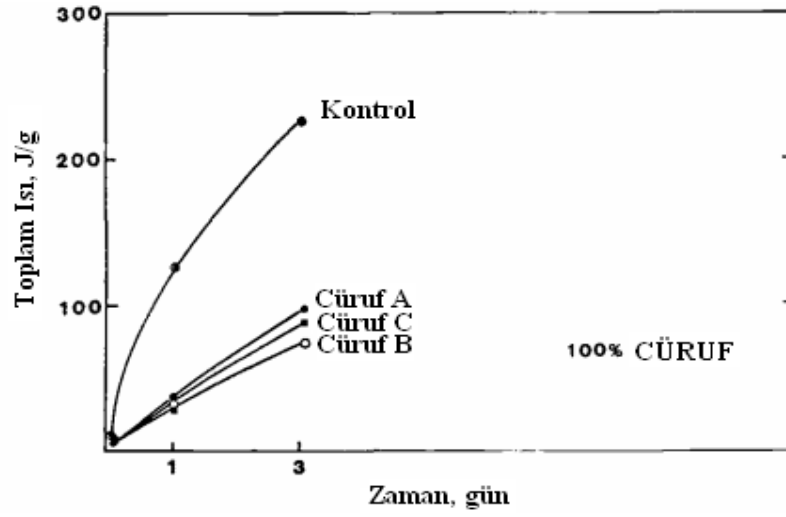
Çimento ağırlığının %20'si U, S %10'u seviyelerinde kısmi olarak çimentoya eklenmiş, katkının çimentonun erken yaşlardaki hidratasyonuna etkisi araştırılmıştır. S çimento hidratasyonunu yüksek s/ç oranında hızlandırırken, U ise yavaşlatmaktadır. Katkılar birlikte bulunduğu zaman U, S reaktivitesini engellemekte ve çimento hidratasyonunu yavaşlatmaktadır. Sudaki artış, hidratasyon sürecine yardım etmektedir. Çünkü yeni sergilenen yüzeylerde daha çok suya ihtiyaç vardır (Langan ve diğ., 2002; Cabrera ve Plowman, 1984).

2.4.4.4. Cürufun Hidratasyon ısisına Etkisi

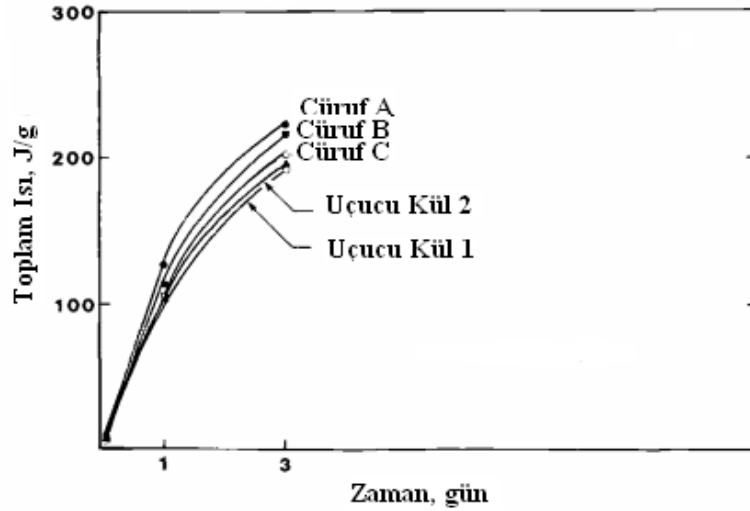
Yapılan bir çalışmada farklı kökenli 3 tip YFC, düşük ve yüksek kireç içeriğine göre 2 tip uçucu kül kullanılmıştır. Çimento içerisinde YFC, %25, 50, 75, 100; U %25, 50, 75 oranlarında kullanılmıştır. Kontrol çimentosunun hidratasyon ısisı, çimento niyetine kullanılan cürufunkinden 2 kat daha fazladır. Cüruf ve uçucu külün incelik değerleri Tablo 2.9'da verilmiştir.

Tablo 2.9 Katkıların özgül yüzeyleri (Douglas ve diğ., 1990)

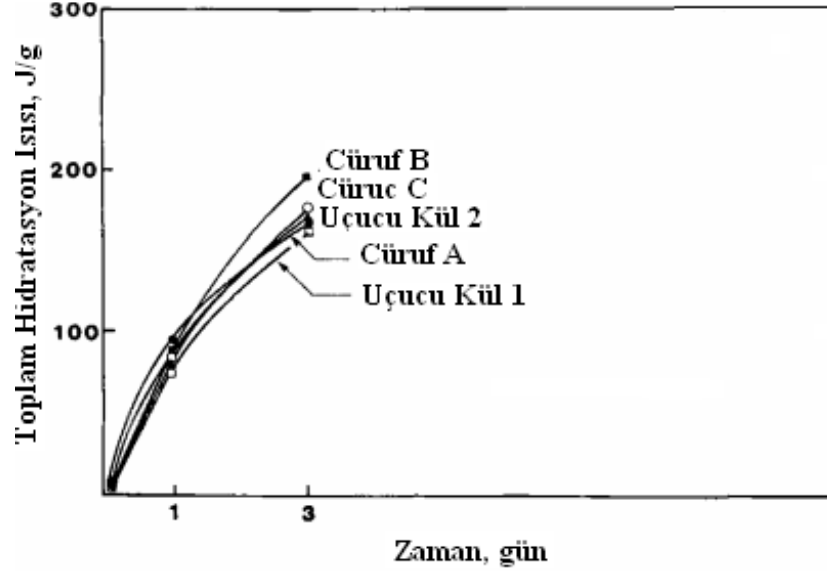
Katkı	Özgöl Yüzey (cm^2/g)
Cüruf A	4600
Cüruf B	5500
Cüruf C	4200
Uçucu Kül 1	2890
Uçucu Kül 2	3260



Şekil 2.15 Kontrol ve YFC hamurunda toplam ısı üretimi (Douglas ve diğ., 1990)

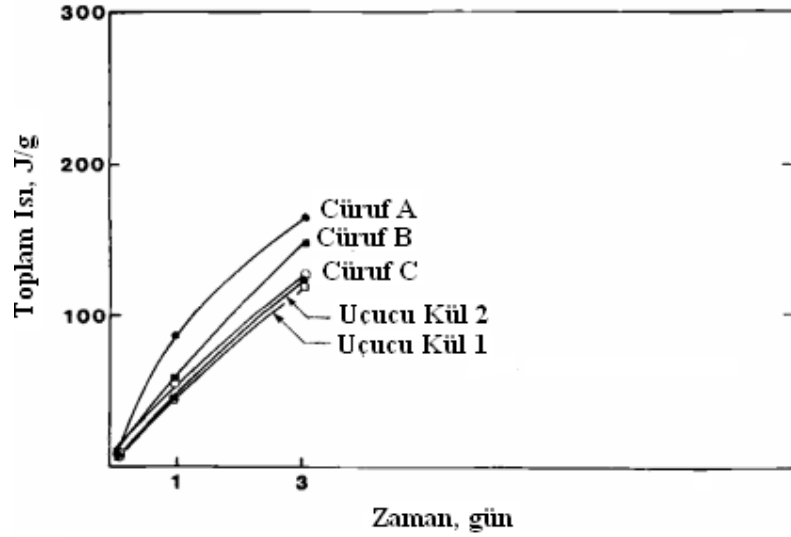


Şekil 2.16 %25 uçucu kül ve cüruf içeren katkılı çimentoda ısı üretimi (Douglas ve diğ., 1990)



Şekil 2.17 %50 uçucu kül ve cüruf içeren katkılı çimentoda ısı üretimi (Douglas ve diğ., 1990)

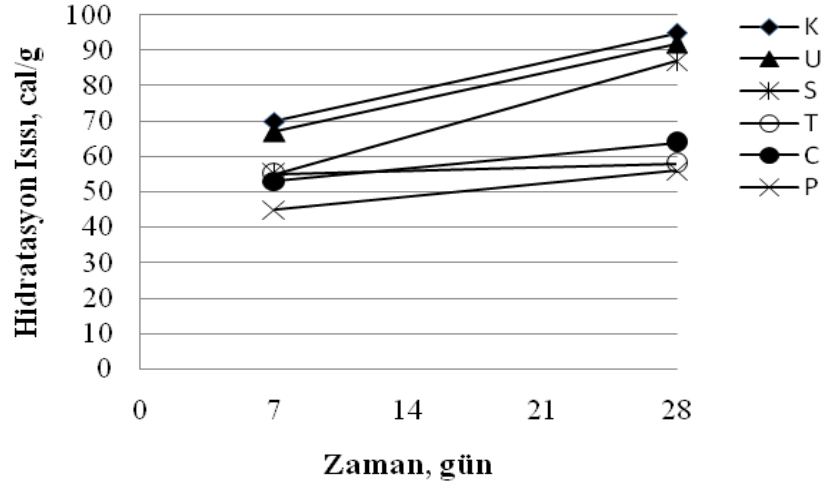
Çalışmanın sonucunda %50 yüksek kireç içerikli uçucu kül katkısı PÇ'de kullanıldığında betonda yüksek dayanım ve düşük hidratasyon ısı gözlenmiştir.



Şekil 2.18 %75 uçucu kül ve cüruf içeren katkılı çimentoda ısı üretimi (Douglas ve diğ., 1990)

Tüm yaşlarda uçucu külün toplam hidratasyon ısı, YFC değerleri ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Genel olarak uçucu külün hidratasyon ısı çimento içerisinde yeralma yüzdesi değişse bile cürufüne göre daha düşük olduğu saptanmıştır (Douglas ve diğ., 1990).

Kılınçkale (1999) yaptığı çalışmada, puzolanların puzolanik aktivitesini ve hidrasyon ısısını incelemiştir. PÇ'ye, ağırlıkça %20 oranında puzolan ikame edilerek harçlar üretilmiş, hidrasyon ısıları kıyaslamalı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.19 Katkısız ve katkılı PÇ'lerin hidrasyon ısılarının zamanla değişimi (Kılınçkale, 1999)

Kontrol çimentosunun hidrasyon ısısı en fazla olup, diğer puzolanlar arasından piring kabuğu küllü çimentonun (P) en düşük olduğu gözlemlenmiştir (Kılınçkale, 1999).

2.5. HİDRATASYON ISISI İLE İLGİLİ YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.5.1. Çimento Hidrasyon Isısı Kullanarak Beton Eşdeğer Yaş Hesabı

Farklı tipte çimentolar kullanılarak üretilen, yaklaşık olarak aynı dayanım sınıfındaki betonların, beton sıcaklıklarının dayanım gelişimine etkisini araştırılmıştır. Bu amaçla çimentoların hidrasyon ısılarıyla tanımlanan hidrasyon dereceleri ile olgunluk arasında bir ilişki kurulmaya çalışılmıştır. Betonun maruz kaldığı sıcaklık geçmişi ile basınç dayanımı tahminine olgunluk metodu denmektedir. Olgunluk fonksiyonları arasında en çok kabul gören, kimyasal bir reaksiyonun başlaması için gerekli olan, ilk enerji olarak adlandırılan, zahiri aktivasyon enerjisidir. Betonun yaşını eşdeğer yaşa çevirebilmek için çimentonun zahiri aktivasyon enerjisi tahmin edilebilmelidir. Bu enerji, hidrasyon ısısı değerleri kalorimetrik yöntemle saptanıp buradan hidrasyon derecesi ve hidrasyon hızı bulunarak, bu ikisi arasındaki ilişkiden bulunur.

Eşdeğer yaş, referans sıcaklıkta bakımı yapılmış beton ile gerçek sıcaklık koşullarında bakımı yapılan betonun aynı olgunluk ve dayanım değerine sahip olması için gereken

süreye denir. Referans sıcaklık Avrupadaki uygulamalarda 20°C, Kuzey Amerikadakilerde 23°C olarak kullanılmaktadır. Bu amaçla 4 farklı tip çimento PÇ 42,5, SDÇ 52,5, PKÇ 32,5, CÇ 42,5 kullanılarak betonlar üretilmiş; 5, 20, 40°C’de bakımları yapılmış; 1, 3, 7, 14 ve 28 günlük basınç dayanımları bulunarak, her çimentonun belirtilen yaş ve sıcaklıklardaki hidrasyon ısıları kalorimetrik yöntemle ölçülmüştür. Hidrasyon ısının maksimum değeri olarak ise 20°C’de bakımı yapılan çimento hamurlarının hesaplanan 90 günlük değerleri alınmıştır. Çünkü PÇ’nin hidrasyon ısının %90’ı ilk 3 ay içinde açığa çıkmaktadır.

Tablo 2.10 Hidrasyon ısıları deney sonuçları (Kasap ve Tokyay, 2004)

Çimento Tipi	Bakım Sıcaklığı (C°)	Hidrasyon Isısı (cal/g)				
		1 Gün	3 Gün	7 Gün	14 Gün	28 Gün
PÇ 42.5	5		49.4	58.9	62.9	78.4
	20	44.7	67.5	74.9	85.2	92.1
	40		78.2	80.8	82.8	95.5
CÇ 42.5	5		66.9	73.1	82.3	91.4
	20	55.1	77.9	84.4	88.6	95.8
	40		78.2	96.9	102.1	107.2
SDÇ 32.5	5		22.6	48.0	61.1	71.9
	20	23.7	43.5	58.9	69.6	78.1
	40		58.6	75.1	82.1	87.3
PKÇ 32.5	5		30.9	39.9	51.6	65.8
	20	10.5	37.1	99.6	61.5	73.6
	40		43.9	59.2	68.4	84.6

Portland çimentolarının hidrasyon ısılarından yola çıkılarak belirlenen eşdeğer yaş hesabında, SDÇ ve PKÇ 32,5 çimentolarının hidrasyon ısılarının diğerlerinden daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçların duyarlılığını ve güvenilirliğini arttırmak için hidrasyon ısını erken yaşlarda sürekli olarak ölçebilen bir kalorimetre cihazı ile benzeri bir araştırma yapılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir (Kasap ve Tokyay, 2004).

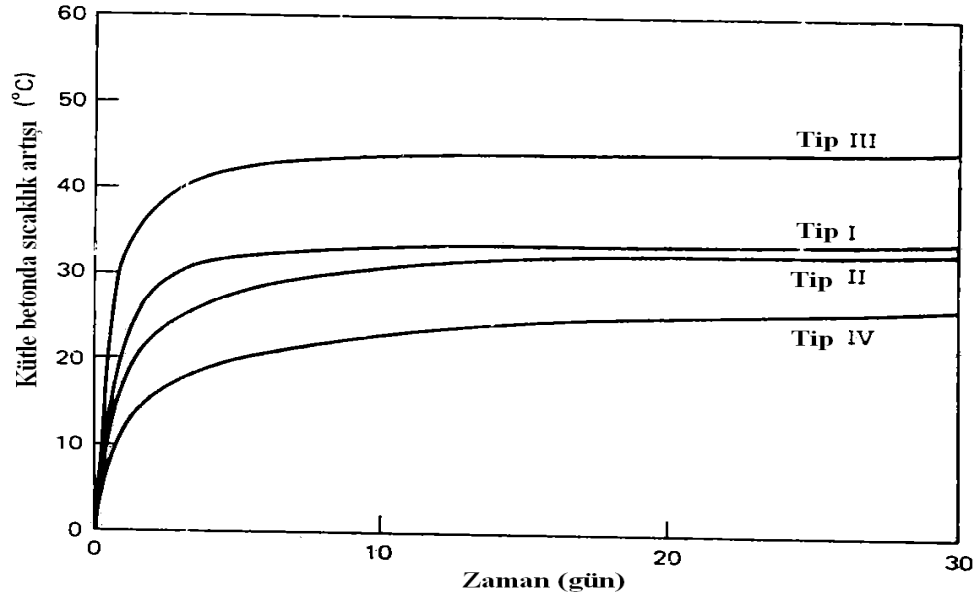
2.5.2. Kütle Betonlarında Hidratasyon Isısı

Portland çimentosunun hidratasyon reaksiyonlarının tümü ekzotermiktir, ısı üretir. Betondaki sıcaklık artışı miktarı, ısıнын ne hızla çıktığına ve betondan çevreye ne hızla yayıldığına dayanmaktadır. Her bileşenin hidratasyon ısısına katkısı farklıdır.

Tablo 2.11 Tip 1,2,3,4,5 çimentolarının kimyasal kompozisyonları ve özellikleri

	Tip1	Tip2	Tip 3	Tip 4	Tip 5
C ₃ S	50	45	60	25	40
C ₂ S	25	30	15	40	40
C ₃ A	12	7	10	5	4
C ₄ AF	8	12	8	12	10
İncelik (m ² /kg)	350	350	450	300	350
Basınç Dayanımı (1 Gün, MPa)	7	6	14	3	6
Hidaratasyon Isısı (7 Gün, J/g)	330	250	500	210	250

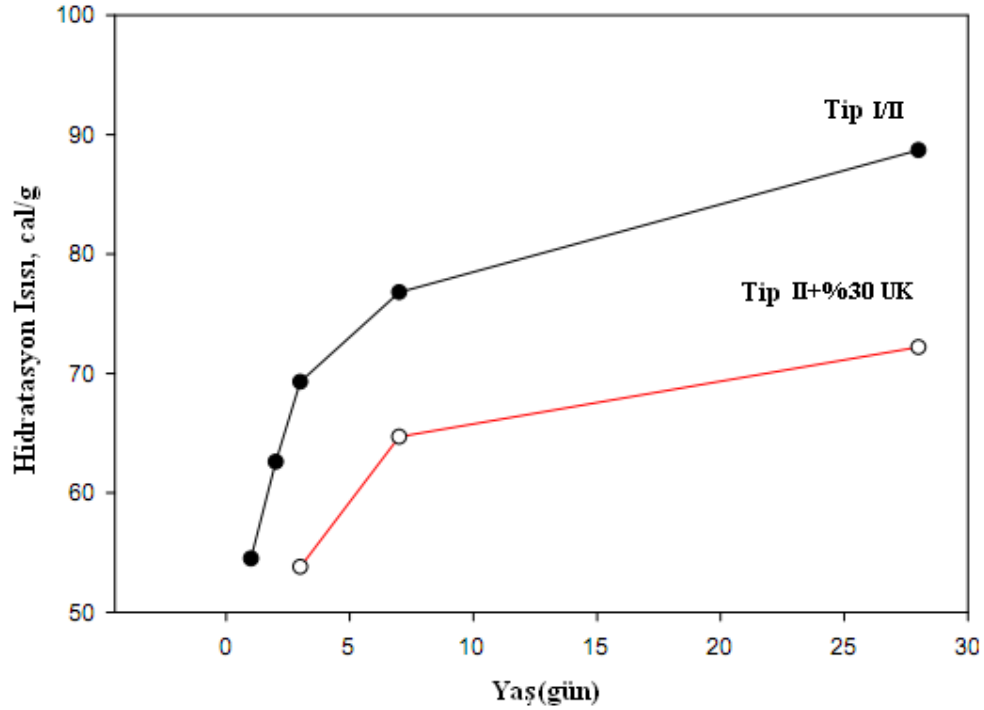
ASTM Tip 1 çimento genel olarak hiçbir özellik gerektirmeyen yapılarda kullanılır. Öndökümlü işlerde formlar tekrar kullanılmak istendiğinde ya da düşük sıcaklıkta beton dökülmesi gerektiğinde kısacası hızlı sertleşme istendiğinde Tip 3 çimento kullanılmaktadır. C₃S'nin miktarındaki artış ve ince öğütülmüş çimento ile hidratasyon ısıısı artmakta ancak bununla birlikte dayanım da artmaktadır. Eğer bu ısıнын (örn. adyabatik şartların var olması gibi) kaçmasına izin verilmezse, sıcaklık artışı Şekil 2.20'de görüldüğü gibi büyük olmaktadır.



Şekil 2.20 Adyabatik şartlarda ölçülen kütle betonda sıcaklık artışı (Mindess ve Young, 1981)

Oluşan yüksek iç sıcaklık ilk birkaç günde oluşur, beton hala plastiktir bu yüzden hızla büyük bir hasara sebep olmamaktadır. Bu beton rijitlik elde ettiği zaman problem oluşturmakta, termal gerilmeler çekme çatlağına yol açmaktadır. Bundan dolayı Tip 3 çimento kalın(>0.5m) beton bölgelerde (örn. temel ayağı, köprü ayağı.. vb.) kullanılmamalıdır. Sıcaklık artışı, kütle beton gibi devasa yapılarda ölçüldüğü zaman 30°C'ye yaklaşmaktadır. Bu problem çimento Tip 4'ün geliştirilmesiyle aşılmaya çalışılmıştır. Düşük hidratasyon ısıli çimentoda erken ısı çıkışından sorumlu C_3S ve C_3A 'nın bileşimdeki miktarlarının azaltılması üretilen ısı miktarını önemli derecede azaltmaktadır. Tip 4 çimento kullanımı ile termal çatlak oluşumu azalmakta, uygun bakım betonun iç sıcaklığı kontrol altına alınabilmektedir. Tip 4 çimento hem sülfata dayanıklı hem de hidratasyon ısısı düşük çimentodur ancak dayanımı da düşüktür (Mindess ve Young, 1981).

Yapılan bir diğer çalışmada kütle betonda katkı kullanımının hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. ASTM'ye göre Portland çimentosu hidratasyon ısısına göre çeşitlendirildiğinde Tip 2 orta hidratasyon ısıli çimentodur. Tip 2 çimentolar max.%8 C_3A , max.%50 C_3S içermektedir. C_3A ve C_3S toplam miktarı max.%58 ve 7 günlük hidratasyon ısısı 290 kJ/kg (70 cal/g) dır. Yapılan deneyde Tip I/II çimentosu ve %30 uçucu kül katkılı Tip II çimentosu kullanılmıştır.

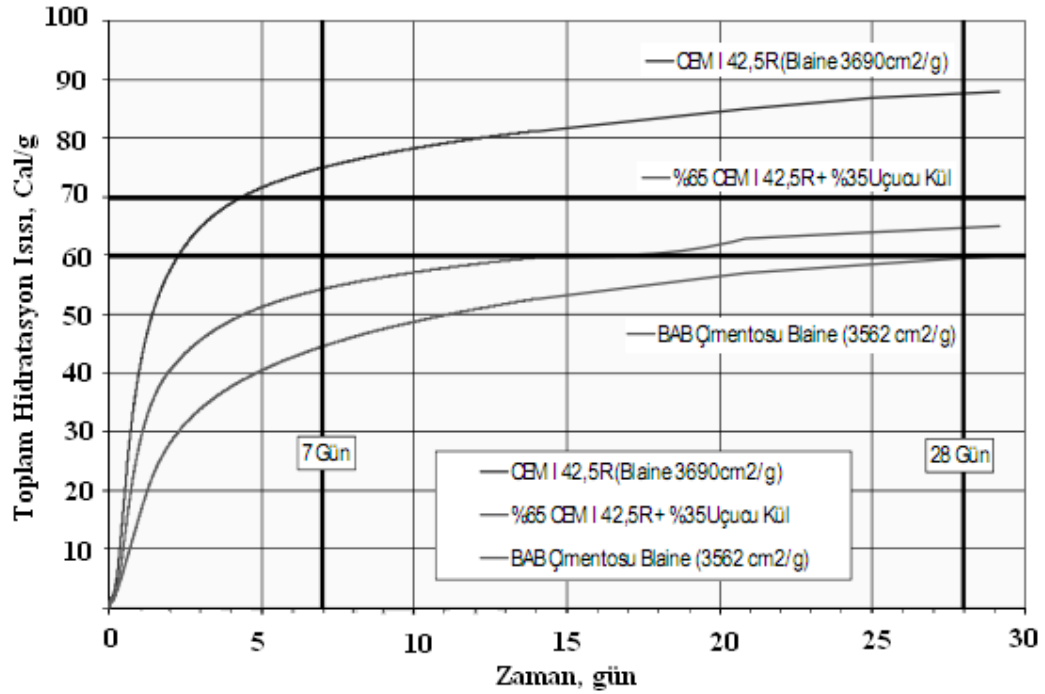


Şekil 2.21 %30 F sınıfı uçucu kül katkılı ve katkısız PÇ'nin hidrasyon ısısı (Poole, 2007)

Katkısız çimentonun ısı çıkışında 7 günlük ısının ilk 3 günde %90'ı, katkılı çimentoda %83'ü oluşmuştur. Bu katkısız çimento için fazla olup, 7 günlük ısının %85'inin ilk 3 günde oluşması normaldir (Poole, 2007).

2.5.3. Kütle Betonlarında Kullanılabilen Diğer Tip Çimentolar

Kütle betonlarında katkılı çimentolar dışında BAB çimentosu da kullanılmaktadır. BAB (Borlu Aktif Belit) çimentosunda, normal PÇ'den farklı olarak çimentonun 4 anafazından (C_3S , C_2S , C_3A , C_4AF) hidrasyon ısısı yüksek ve oldukça reaktif olan C_3S fazı oluşmamaktadır. Düşük sıcaklıklarda üretilmesi nedeniyle C_3A 'nın %7'den daha az oluşmasından dolayı sülfat etkisine maruz yapılarda BAB çimentosu kullanılabilir. Bu özellikleri nedeniyle erken dayanımın istenildiği donatılı ve önyapımlı elemanların imalatında kullanılması uygun olmamaktadır. Ancak hidrasyon reaksiyonu izotermal bir kalorimetre ile izlendiğinde hidrasyon ısısının düşük olduğu gözlemlenmiştir. %65 PÇ ve %35 U katkısı kütle betonlarda kullanılmakta, buna rağmen hidrasyon ısısı problem yaratabilmektedir. Katkılı çimentolar ile BAB çimentosunun hidrasyon ısısı şekilde karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 2.22 Farklı tipteki çimentoların hidratasyon ısıları (Sağlık ve diğ., 2009)

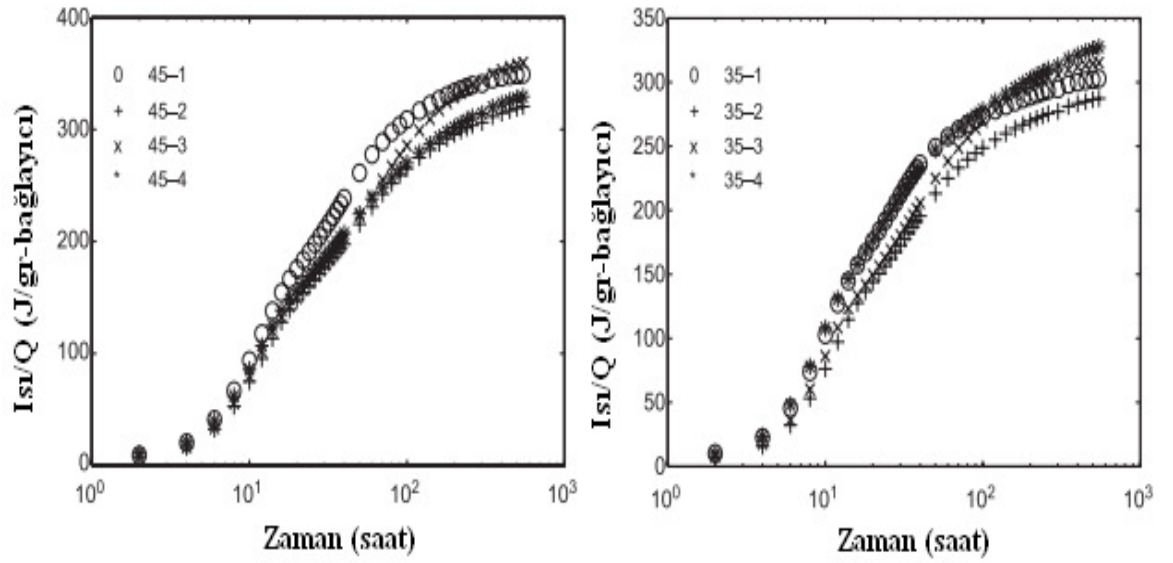
Kütle betonu yapılarda kullanılacak olan çimentoların toplam hidratasyon ısıları değerlerinin 7-28 günde sırasıyla 60-70 cal/g değerlerini (kütle betonu yapıları için hidratasyon ısıları kriterleri) aşmaması gerekmektedir. BAB çimentosunda bu değerler sırasıyla 7 günde 50 cal/g < 60 cal/g ve 28 günde 60 cal/g < 70 cal/g olarak elde edilmiştir. Bu kriterler normalde uçucu kül..vb. puzolanik malzemenin PÇ ile birlikte kullanılması ile sağlanabilir. BAB çimentosu kullanılmasıyla, puzolanik malzeme ikame edilmeksizin bu kriterlerin sağlanacağı görülmüştür (Sağlık ve diğ., 2009).

2.5.4. Hidratasyon Isısına Sıcaklığın Etkisi

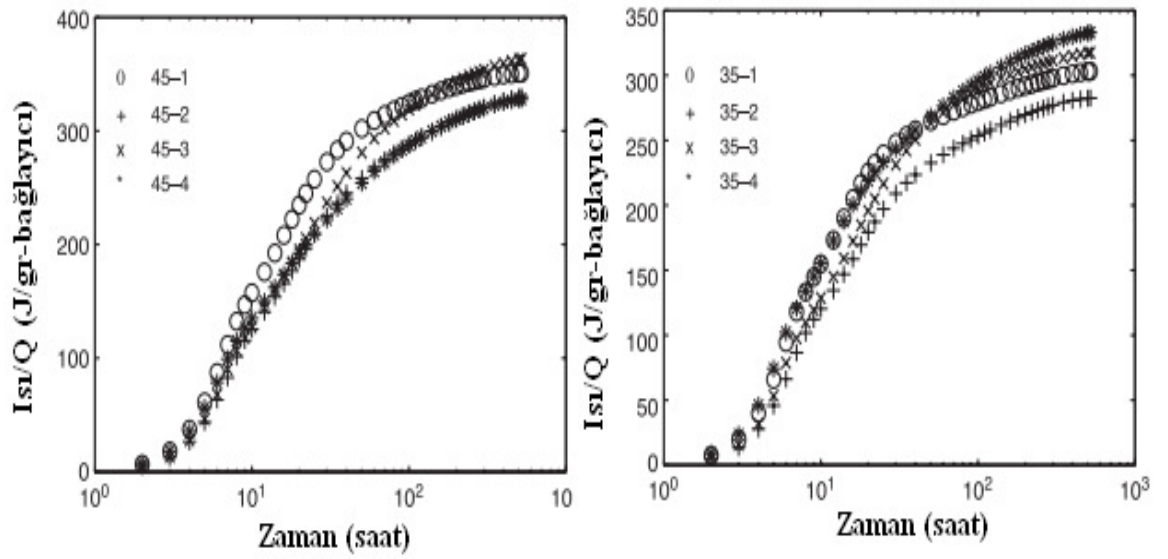
Yapılan çalışmada PÇ uçucu kül, silis dumanı, cüruf olmak üzere 3 farklı katkı içermektedir. Katkılı çimentonun hidratasyonu normal PÇ'ninkinde daha karmaşık olduğundan hidratasyonları birbirine benzemez. Katkılı çimentoda reaksiyonlar PÇ'den daha yavaş olmaktadır. PÇ'nin hidratasyonuna ek olarak ve puzolanik malzemelerin reaksiyonları da eklenmektedir. Kimyasal reaksiyonlar sonucu ısı üretilmektedir. Katkılı çimentoların hidratasyonunu hidratasyon ısı miktarı belirler (Pane ve Hansen, 2005).

Tablo 2.12 Puzolan karışım oranları (Pane ve Hansen, 2005)

% OPC	% Katkı	s/ç	Kod No	s/ç	Kod No
100	0	0.45	45-1	0.35	35-1
75	25 U	0.45	45-2	0.35	35-2
75	25 C	0.45	45-3	0.35	35-3
90	10 S	0.45	45-4	0.35	35-4



Şekil 2.23 23°C deki izotermal hidrasyon ısısı (Pane ve Hansen, 2005)



Şekil 2.24 34°C' deki izotermal hidrasyon ısısı (Pane ve Hansen, 2005)

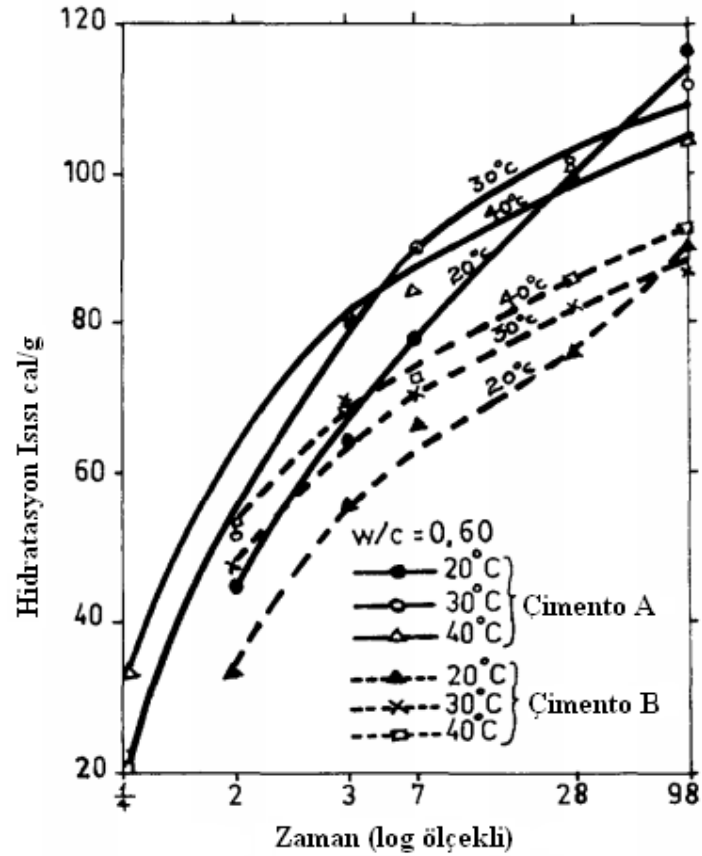
Kalorimetre ile 23, 34°C’de hidrate olan hamurların izotermal ısısı ölçülmüştür. Sırasıyla w/c 0.45 ve w/c 0.35 olan oranlarından düşük w/c de daha az hidratasyon ısısı oluşmuştur. Bunun nedeninin hidratasyon ürünleri için uygun yerin, düşük s/ç için küçük olduğu düşünülmektedir. Yüksek hidratasyon sıcaklığı ilk başta daha yüksek ısı üretmiştir. Ancak bu nihai hidratasyon ısısı için geçerli değildir. U içeren hamurlar için ısı gelişiminin ortaya çıkışı normal PÇ’den daha düşüktür. İlk zamanlarda cüruf hamurunun ısısı düşük, ilerleyen zamanlarda normal PÇ’den daha yüksek olmaktadır. S, cüruf ve U’dan daha erken reaksiyona girmektedir (Pane ve Hansen, 2005; Langan ve diğ., 2002; Zhang ve diğ., 2002; De Schutter, 1999).

Yapılan bir diğer çalışmada, farklı çevre sıcaklıkları altında Çimento A ($C_3A=10.3$), Çimento B ($C_3A=1.0$) ile C_3A miktarındaki farklılığın hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır.

Tablo 2.13 Çimento tipleri için anabileşenlerin içeriği (Berhane, 1983)

Anabileşen	Çimento A (%)	Çimento B (%)
C_3S	56.0	57.7
C_2S	17.4	18.1
C_3A	10.3	1.0
C_4AF	8.9	16.7

A ve B çimentolarının inceliği sırasıyla; 3760, 3550 cm^2/g ’dır.98 günlük peryotta 20, 30, 40 °C’lik farklı sıcaklıkların Çimento A ve çimento B’nin hidratasyon ısısı üzerindeki etkisi şekilde gösterilmiştir. Hidratasyon ısısını en çok etkileyen anabileşenlerden biri olan C_3A ’nın çimento A’da az bulunması hidratasyon ısısını düşürmektedir.



Şekil 2.25 24 saatlik sürede farklı sıcaklıkların çimentolar üzerindeki etkisi (Berhane, 1983)

Farklı 2 çimentoda ilk 24 saat 20, 30, 40°C’de hidratasyon ısısı ölçülmüş; 7, 28, 98 günlük periyotta hidratasyon ısıları ölçülmüş, sıcaklık arttıkça ısıнын azaldığı görülmektedir. Sıcaklık artışları, farklı çevre sıcaklıkları ve çimento çeşitliliği ile değişiklik göstermektedir (Berhane, 1983).

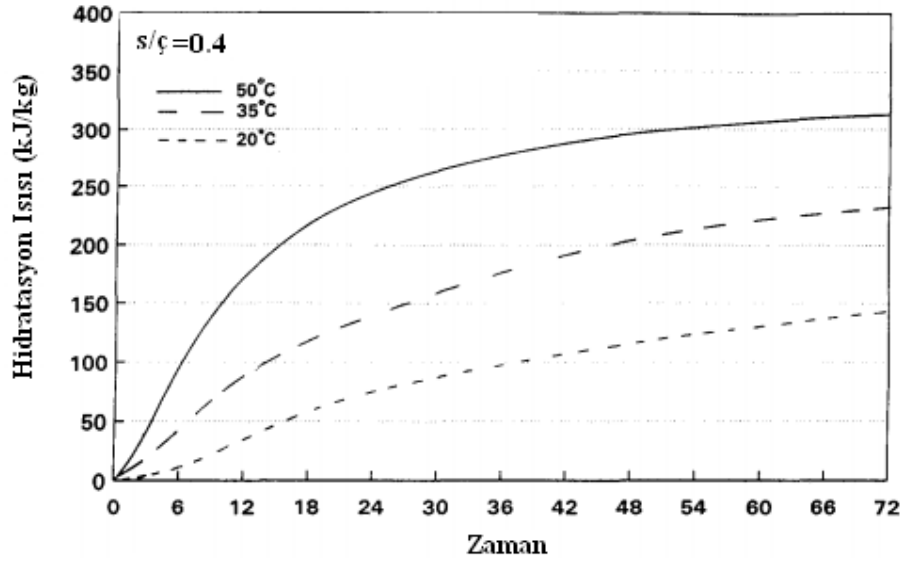
Literatürde hidratasyon ısısı ölçüm metodu raporları 1930’larda uygulanmaya başlamıştır. Bu çalışmada hidratasyon ısısı, nitrik ve hidroflorik asit çözeltilisinde hidrate olmuş ve hidrate olmamış çimentonun hidratasyon ısıları arasındaki fark ölçülerek bulunmuştur. Farklı tipte çimentolarla, farklı sıcaklıklarda yapılan deneylerde 72 saat sonunda açığa çıkan hidratasyon ısılarındaki farklılıklar Tablo 2.15’te gösterilmiştir. Hidratasyonun geliştiği sıcaklık hidratasyon hızının gelişimini etkiler.

Tablo 2.14 72 saat sonunda değişik sıcaklıklarda hidratasyon ısısı gelişimi (Neville, 1981)

Çimento Tipi	Hidratasyon Isısının Geliştiği Sıcaklık							
	4°C (40°F)		24°C (75°F)		32°C (90°F)		41°C (105°F)	
	J/g	cal/g	J/g	cal/g	J/g	cal/g	J/g	cal/g
1	154	36.9	285	68	309	73.9	335	80.0
2	221	52.9	348	83.2	357	85.3	390	93.2
3	108	25.7	195	46.6	192	45.8	214	51.2

Hidratasyon ısısı yüksek çimento kullanılması, hidratasyon esnasında açığa çıkan sıcaklığın yüksek olmasına neden olmaktadır. Bu da soğuk havalarda taze beton içerisindeki suyun donmasını önlemektedir. Bu amaca uygun çimentonun kullanılması ile yüksek hidratasyon ısısı avantajlı bir durum yaratmaktadır (Poole 1998).

Sıcaklığın hidratasyon ısısı üzerindeki etkisini araştıran bir diğer çalışmanın sonucu Şekil 2.26'da sunulmuştur.

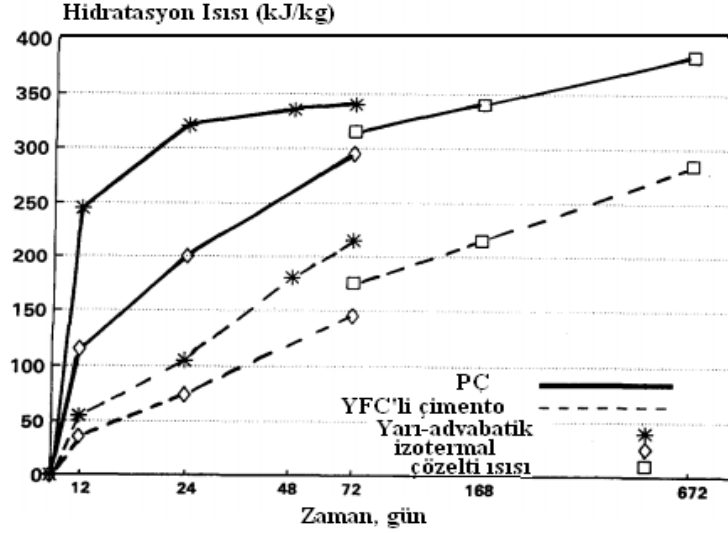


Şekil 2.26 Sıcaklığın yüksek fırın cürüflü PC'nin hidratasyon ısısına etkisi (Livesey ve diğ., 1991)

Sıcaklık arttıkça YFC'li çimentonun hidratasyon ısısı artmaktadır. Adyabatik testlerle betondaki sıcaklık artışı gözlenir. Rutin değerlendirmelerle çimento performansındaki değişiklikler erkenden farkedilmektedir (Livesey ve diğ., 1991).

2.5.5. Farklı Metodlarla Hidratasyon Isısı Ölçümü

Çimentonun hidratasyon ısısı ölçümünde genel olarak çözelti metodu kullanılmakta güvenilirliği operatör yeteneğine dayanmaktadır. Çimentoların 20°C'de 3 günlük hidratasyon ısılarının farklı test metodları ile bulunması sonucu veriler karşılaştırılmıştır.



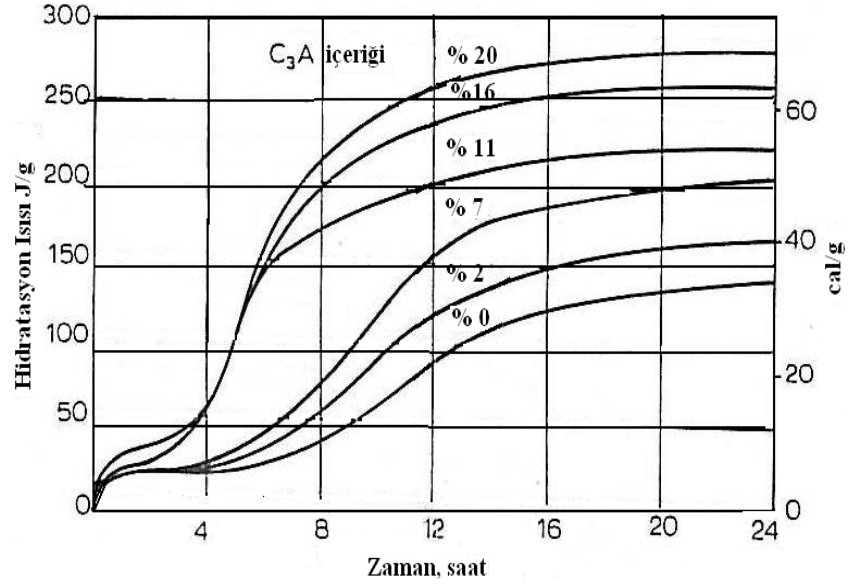
Şekil 2.27 Hidratasyon ısısı tayini (Livesey ve diğ., 1991)

Normal PC'nin hidratasyon ısısı YFC'li çimentonunkinden daha fazladır. Aynı çimentonun hidratasyon ısısı yarı-advabatik metod ile daha yüksek, izotermal metod ile daha düşük ölçülmektedir. Özellikle kütle betonlarda yarı advabatik şartlara yaklaşılmaktadır. Çünkü büyük en kesitten çevreye sıcaklık dağılımı olmaktadır. Kompozit çimentolarda hidratasyon ısısı belirlenirken yarı advabatik değerlendirme metodu tercih edilmektedir (Livesey ve diğ., 1991).

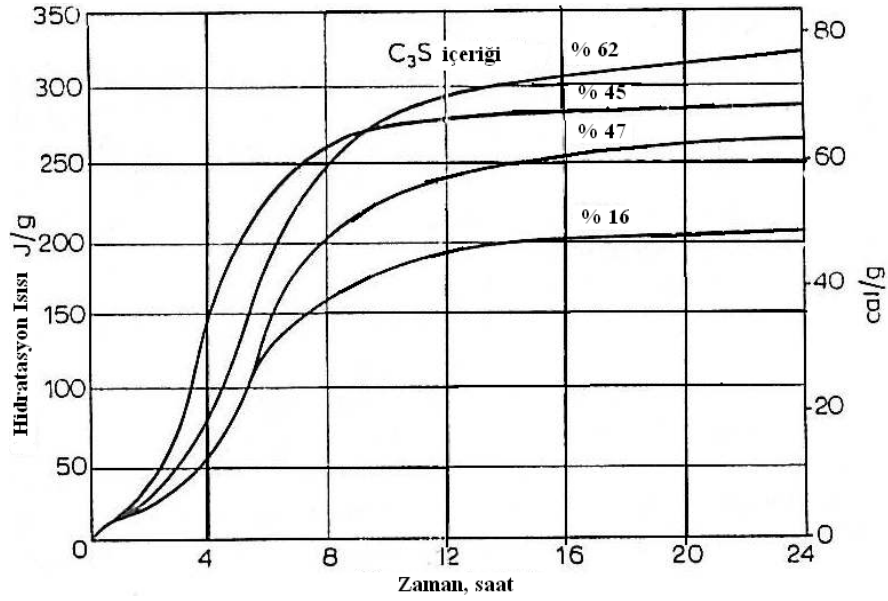
2.5.6. Anabileşenlerin Hidratasyon Isısına Etkisi

Yapılan bir çalışmada sıcaklık değişiminin toplam hidratasyon ısısından daha önemli olduğu düşünülmektedir. Uzun bir peryotta üretilen aynı toplam ısı, küçük bir sıcaklık artışı ile sınırlı olabilmektedir. Yaklaşık olarak çimento hidratasyon ısısı hidrate olan anabileşenlerin herbirinin ayrı ayrı ürettiği ısıların toplamına eşittir.

Hidratasyonun ilk aşamalarında farklı bileşenler farklı hızlarda hidrate olurlar, ısı üretim hızı, toplam ısı çimento bileşenlerinin kompozisyonuna bağlıdır. Çimentoda incelik artışı hidratasyon reaksiyonlarını hızlandırmakta, fakat toplam ısı çıkış miktarını etkilememektedir.



Şekil 2.28 C₃S sabit, C₃A'nın ısı oluşumuna etkisi (Lerch ve Bouge, 1934)

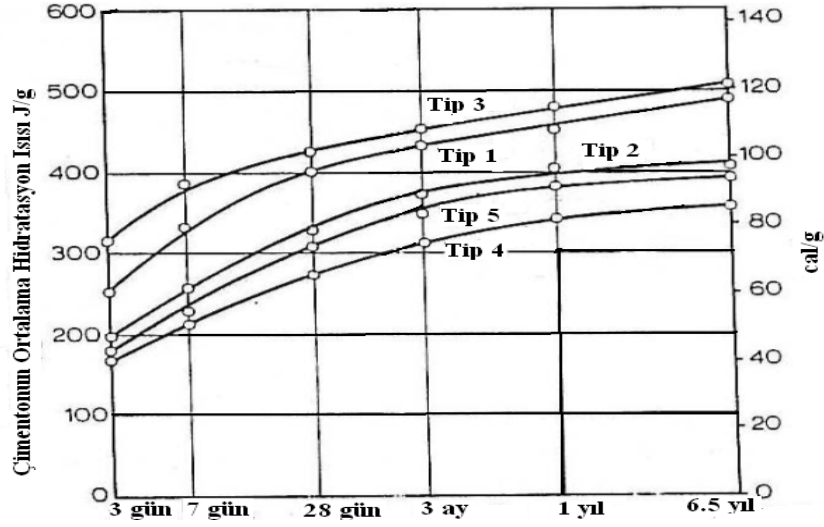


Şekil 2.29 C₃A sabit, C₃S'nin ısı oluşumuna etkisi (Lerch ve Bouge, 1934)

Karışımındaki çimentoyu oluşturan anabileşenlerin katılım miktarı toplam ısı oluşumunu etkilemektedir. Bu yüzden ısı gelişimini kontrol etmek amacıyla karışım çeşitlendirilmiştir. C_3A ve C_3S miktarı hidrasyon ısının yüksek veya düşük olmasında etkilidir (Neville, 1981).

Tablo 2.15 Çimento için bileşenlerinin kompozisyonların sınırları (Neville, 1981)

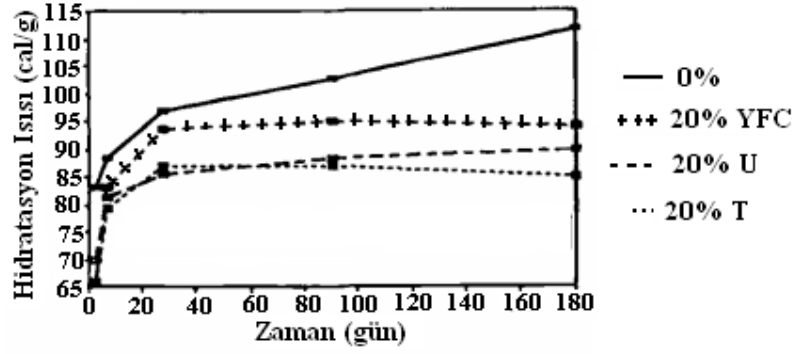
Anabileşenler	Çimento Tipi				
	1	2	3	4	5
C_3S max.				35	
C_2S min.				40	
C_3A max.		8	15	7	5



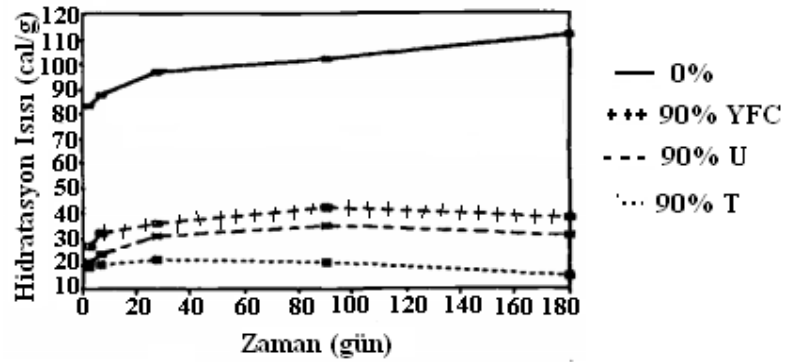
Şekil 2.30 Farklı çimento tiplerinin hidrasyon ısı gelişimi (Neville, 1981)

2.5.7. Farklı Miktarlardaki Puzolanların Hidrasyon Isısına Etkisi

Yapılan çalışmada değişik miktarlarda kullanılan katkıların hidrasyon ısına etkisi araştırılmıştır. P: Doğal Puzolan; F: Uçucu kül; S: Yüksek fırın cürufu olarak adlandırılan mineral katkı olarak kullanımı kütlece % 0, 10, 20, 30, 50, 70, 90'dır. Test süreleri 3, 7, 28, 90, 180 gündür.



Şekil 2.31 %20 katkı ilavesinin hidrasyon ısısına etkisi (Rahhal ve Batic, 1994)



Şekil 2.32 %90 katkı ilavesinin hidrasyon ısısına etkisi (Rahhal ve Batic, 1994)

Kontrol çimentosu ve katkılı çimentoların hidrasyon ısısı gelişiminin kıyaslanması yukarıdaki şekillerde gösterilmiştir. Katkılı çimentoların hidrasyon ısıları kontrol çimentosununkinden daha düşüktür. Pozolanlar çimentoda %10, 20, 30, 50 oranında yer aldığı anda hidrasyon ısısı 90 güne kadar artmakta, %70, 90 oranda yer aldığı anda hidrasyon ısısı üretimi azalmaktadır. Uçucu kül 90 güne kadar hidrasyon ısısını arttırmakta daha sonra azaltmaktadır. Genellikle, cürufu çimentolarda hidrasyon ısısı değeri yaşla birlikte artmaktadır. Katkıların yeralma yüzdeleri arttıkça aynı yaşlarda hidrasyon ısısı azalmaktadır. Her katkının bir optimum yeralma yüzdesi vardır. Bu da dayanımı arttırmakta, hidrasyon ısısını düşürmektedir. Katkının %50'den fazla miktarda yeralması ile ısısının azalmasının sebebi hangi mineral katkının katkı olarak kullanıldığına bağlıdır (Rahhal ve Batic, 1994).

2.6. ÇİMENTOLARIN PRİZ SÜRELERİ

Çimentonun su ile birleşmesiyle çimento hamurunun katılaşarak plastik özeliğini kaybetmesi arasında geçen süreye priz alma süresi denmektedir. Priz başlama süresi hamurun katılaşmaya başladığı an, priz sona erme süresi ise hamurun sertleşmeye başladığı andır. Üretilen çimento tipine göre priz başlama süreleri değişmektedir (Erdoğan, 2007).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Normal PÇ'nin hidrasyon ısısı beton sıcaklığını arttırmaktadır. Bu da beton sertleştikten sonra soğumayla birlikte çatlaklara sebep olur. Bu ısyı azaltmak için çeşitli alternatifler düşünülmüştür. Literatürdeki çalışmalar genel olarak değerlendirildiğinde çimentoda optimum (%15-20) katkı kullanılması toplam hidrasyon ısını düşürmüştür. Çimentonun hidrasyon ısılarının ölçülmesi için çimentonun toz halde çözünme ısıları belirlenir. Hidrate çimentonun hidrasyon ısısı ise çimentonun çözünme ısısından yararlanılarak bulunur.

Bu çalışmada çimentoya belli oranda mineral katkı eklemenin yararı, katkıların, farklı tipte çimentoların ve çimento inceliğinin çözünme ısısına etkisi, priz süreleri ile çözünme ısısı arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çözünme ısısının belirlenmesinde ASTM C186 - 05, TS 687 (1994) standartları esas alınmıştır. Deneylerde kullanılan çimento numuneleri aynı karışım oranlarıyla kullanılmıştır. Hidrasyon ısısı ölçüm aygıtı bir kalorimetredir. Priz süreleri Vicat cihazı ile belirlenir.

3.1. KULLANILAN MALZEMELER VE ÖZELİKLERİ

3.1.1. Çimentolar

Özel üretim klinker ile alçıtaşının değirmende birlikte öğütülmesi ile elde edilen, C₃A oranının max. %5 olan ve C₄AF + 2C₃A miktarının en fazla %25 olan 28 günlük min. basınç dayanımı 32,5 MPa olan yüksek erken dayanımlı (32,5 R) SDÇ çimentosu ile genel kullanım amaçlı, 28 günlük min. basınç dayanımı 42,5 MPa olan yüksek erken

dayanımlı (42,5 R) CEM I çimentoları kullanılmıştır. SDÇ 32,5 R için 3180, 4000, 5500 cm^2/g , CEM I 42,5 R için 4000, 4630, 5550 cm^2/g incelik değerleri kullanılmıştır. Çimentoların içeriği aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.1 S ve C çimentolarının kimyasal kompozisyonu, (%)

	SDÇ 32,5R	SDÇ 32,5R	SDÇ 32,5R	CEM I 42,5R	CEM I 42,5R	CEM I 42,5R
CaO	64.56	64.70	65.19	64.02	64.20	64.43
SiO ₂	20.48	20.51	20.83	20.61	20.66	20.82
Al ₂ O ₃	3.91	3.92	3.95	4.40	4.41	4.45
Fe ₂ O ₃	4.05	4.11	4.11	3.51	3.53	3.54
MgO	1.05	1.05	1.07	1.06	1.06	1.06
K ₂ O	0.74	0.72	0.68	0.88	0.87	0.84
Na ₂ O	0.22	0.22	0.21	0.17	0.17	0.16
SO ₃	2.73	2.61	2.26	2.89	2.80	2.52
Cl ⁻	0.0323	0.0308	0.0296	0.0398	0.0394	0.0373
C ₃ S	62.72	63.13	63.09	56.91	57.21	57.12
C ₂ S	11.40	11.17	12.13	16.14	16.07	16.59
C ₃ A	3.52	3.42	3.53	5.72	5.71	5.80
C ₄ AF	12.31	12.52	12.50	10.68	10.75	10.76
Blaine (cm^2/g)	3180	4000	5500	4000	4630	5550

3.1.2. Puzolanlar

Tras, cüruf, uçucu kül, silis dumanı ve buğday sapı külü olmak üzere 5 çeşit puzolanın çözünme ısısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Puzolanların içeriği aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Puzolanların kimyasal kompozisyonu, (%)

	Tras	Cüruf	Uçucu Kül	Silis Dumanı	Buğday Sapı Külü
SiO ₂	52.92	39.69	46.51	83.84	54.24
Al ₂ O ₃	16.87	10.14	10.72	0.46	4.55
Fe ₂ O ₃	7.81	2.31	9.62	1.32	1.05
CaO	13.10	34.97	20.57	1.35	12.54
MgO	2.04	5.86	3.02	4.84	2.39
SO ₃	0.26	0.32	0.46	1.30	1.49
Blaine (cm ² /g)	5940	550	4040	6300	5520

3.1.3. Puzolan Karışımları ve Kodları

Deneylerde farklı Blaine değerlerine sahip SDÇ 32,5 R ve CEM I 42,5 R çimentolarının tras, cüruf, uçucu kül, silis dumanı, uçucu kül ve buğday sapı külü katkıları ile kombinasyonları oluşturulmuştur. Çimento içerisinde %20 oranda puzolan ikame edilmiştir. Kontrol çimentoları baz alınarak sıcaklık artış değerleri kullanılıp çözünme ısıları bulunmuştur. Çimento puzolan kombinasyonları sonucu oluşturulan karışımların kodları aşağıda verilmiştir.

S: Sülfata dayanıklı çimentolar (Rakamın solunda bulunur)

C: CEM I çimentosu (Rakamın solunda bulunur)

Sayı: Harften sonraki sayı, Blaine değerini gösterir.

3, 4, 5: 3180, 4000, 5500 cm²/g

4a: 4630 cm²/g

5a: 5550 cm²/g

K: Kontrol, T: Tras, C: Cüruf (rakamın sağında bulunur), U: Uçucu Kül, S: Silis Dumanı (rakamın sağında bulunur), B: Buğday Sapı Külü (Buğday Külü)

Tablo 3.3 Çimento kodları

Çimento-Puzolan Kombinasyonu	Kod No	Çimento-Puzolan Kombinasyonu	Kod No
SDÇ 3180 Kontrol	S3K	CEM I 4000 Kontrol	C4K
SDÇ 3180 Tras	S3T	CEM I 4000 Tras	C4T
SDÇ 3180 Cüruf	S3C	CEM I 4000 Cüruf	C4C
SDÇ 3180 Uçucu Kül	S3U	CEM I 4000 Uçucu Kül	C4U
SDÇ 3180 Silis Dumanı	S3S	CEM I 4000 Silis Dumanı	C4S
SDÇ 3180 Buğday Külü	S3B	CEM I 4000 Buğday Külü	C4B
SDÇ 4000 Kontrol	S4K	CEM I 4630 Kontrol	C4aK
SDÇ 4000 Tras	S4T	CEM I 4630 Tras	C4aT
SDÇ 4000 Cüruf	S4C	CEM I 4630 Cüruf	C4aC
SDÇ 4000 Uçucu Kül	S4U	CEM I 4630 Uçucu Kül	C4aU
SDÇ 4000 Silis Dumanı	S4S	CEM I 4630 Silis Dumanı	C4aS
SDÇ 4000 Buğday Külü	S4B	CEM I 4630 Buğday Külü	C4aB
SDÇ 5500 Kontrol	S5K	CEM I 5550 Kontrol	C5aK
SDÇ 5500 Tras	S5T	CEM I 5550 Tras	C5aT
SDÇ 5500 Cüruf	S5C	CEM I 5550 Cüruf	C5aC
SDÇ 5500 Uçucu Kül	S5U	CEM I 5550 Uçucu Kül	C5aU
SDÇ 5500 Silis Dumanı	S5S	CEM I 5550 Silis Dumanı	C5aS
SDÇ 5500 Buğday Külü	S5B	CEM I 5550 Buğday Külü	C5aB

3.1.4. Çözeltilerin Hazırlanması

Kalorimetre çalışması yapılırken reaksiyon ısılarının doğru belirlenebilmesi için incelenen reaksiyonun hızlı, tamamlanan olması gerekmektedir. Bunun için çimento karışımı su yerine asit içerisine dökülmektedir. Kalorimetre cihazının elemanlarından cam karıştırıcı, termos ve Beckman termometresinin çözelti içerisinde kalan kısmı asitlerden zarar görmemesi için parafin ile kaplanmıştır.

Hidroflorik asit küçük film şeridi plastik kaplara 8 ml ölçülerek konulmuştur. Hidroflorik asit ile çalışılırken bu asit cama zarar verdiğinden dolayı plastik kap, plastik ölçek ve plastik huni kullanılmıştır.

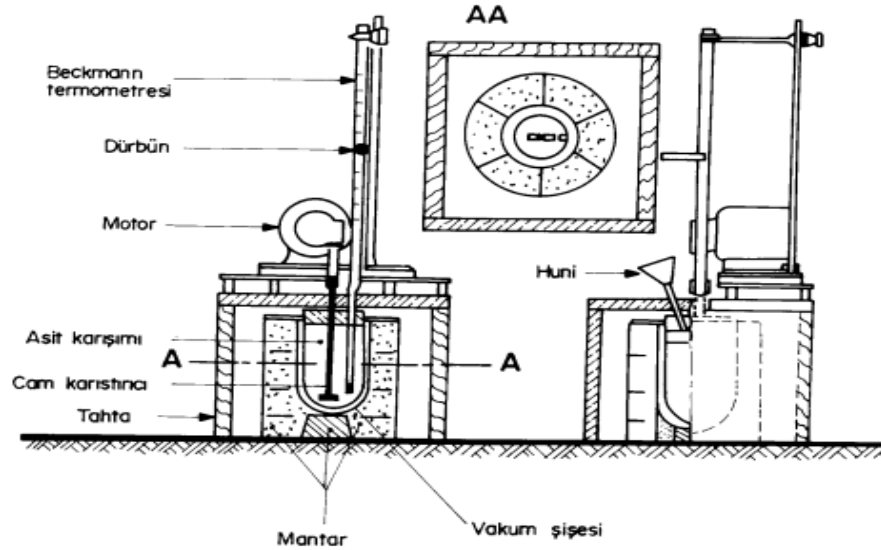
Normalite (N), bir litre çözeltide çözünmüş halde bulunan maddenin eşdeğer gram sayısıdır. 127 ml derişik nitrik asit ($d=1.39$ g/ml, %65) su ile tamamlanır (TS 687; ASTM C186-05).

Alınan N konsantrasyonlu nitrik asit ($d=1.33$ g/ml, %50), TS 687 ve ASTM C186-05'te belirtilen şekilde aşağıdaki işlemler yapılarak 2N'ye ayarlanmıştır. 1 lt.lik 2N nitrik asit karışımı hazırlamak için 190 ml nitrik asite 810 ml su ilave edilmiştir. Bunu yaparken ilk önce suyu koyduktan sonra asidin ilave edilmesine dikkat edilmiştir.

3.2. KULLANILAN ARAÇ VE GEREÇLER

3.2.1 Kalorimetre

Isı cismin sıcaklığını artırmak için verilen enerjidir, kalorimetre ile ölçülür. Ölçü birimi kalori (cal) yada joule (J)'dur. 1 kalori 1 gr suyun sıcaklığını 1 °C artırmak için verilen ısı miktarıdır. Isı madde miktarına bağlıdır, sıcaklık değildir.

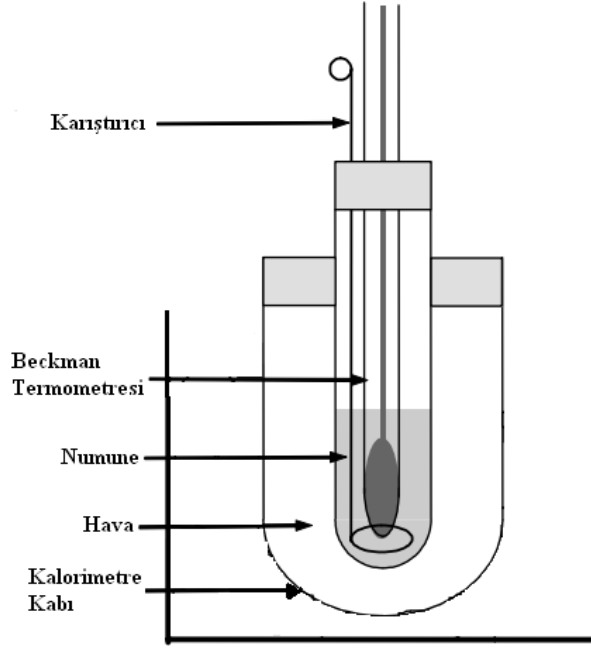


Şekil 3.1 Hidratasyon ısısı tayin cihazı (TS 654)

Kalorimetreyi oluşturan asıl elemalar • Karıştırıcı

• Termos

• Beckman termometresi'dir.



Şekil 3.2 Kalorimetre elemanları

3.2.2. Karıştırıcı

Karıştırıcının çözeltiyi sabit hızla karıştırdığından emin olunmalıdır. Cam karıştırıcının termometreye, kapak mantarına ve kalorimetre kabına değmemesi sağlanmıştır.

3.2.3. Termos

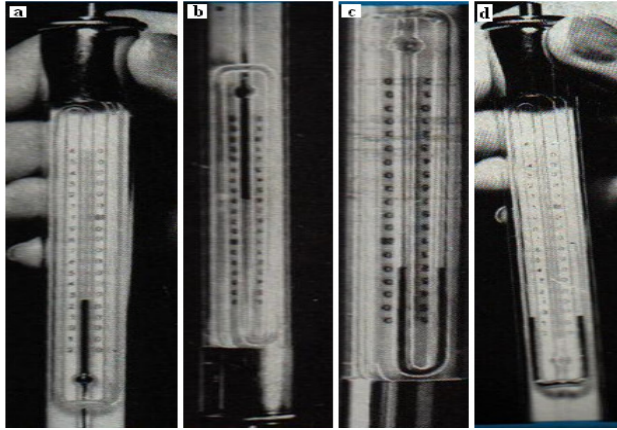
Bir maddenin aldığı ısıyı ölçmek için ısı alış verişi yapan maddeler ortamdaki yalıtılmalıdır. Bu yalıtımı sağlayan ve ısınin ölçülmesinde kullanılan araçlara termos denir. Bu kap kalorimetre kabı olarak da adlandırılır. Bu kabın tüm yüzeyi ışıma yolu ile ısı kaybını önlemesinden dolayı parlaktır. Kap yalıtkan maddeden yapılmış bir kapak ile kapatılır. Kapak üzerinde iki delik vardır. Termometre ve karıştırıcı bu delikten geçerek sıvı içine konur. Karıştırıcı ile sıvı karıştırılır ve ısınin sıvının her tarafına eşit olarak dağılmasını sağlar. Termometre de bu arada sıcaklığı ölçer.

3.2.4. Beckman Termometresi ve Ayarı

Sıcaklık ölçümü termometre ile yapılır. Termometre deneylerin özelliğine göre farklılıklar gösterir. Bu çalışmada Beckman termometresi kullanılmıştır.

Bu termometreyi, Alman kimyacı Ernest Otto Beckmann icat etmiştir. Beckman termometresi, normal termometrelere göre daha büyüktür. Uzunluğu yaklaşık 40-50 cm dir. Sıcaklık aralığı, ince boruda 5-6°C (bazı mikro tiplerinde 3°C) sıcaklık duyarlılığı ise 0.01'dir. Termometrenin yukarısında ikinci bir hazne S şeklinde kıvrılmıştır. Termometrenin kalibrasyonu laboratuvar sıcaklığına göre yapılır.

Ortam sıcaklığının değişmesi, termometrenin düşey konumunun bozulması ve yapılan deneyler sonucunda termometrenin ayarı bozulur. Termometrenin kalibrasyon aşamaları şunlardır. Oda sıcaklığı 20°C'ye klimatize edilir. Öncelikle yukarıdaki haznenin üstünde tüm civa, termometreye biraz eğim verilerek haznede toplanması sağlanır.



Şekil 3.3 Beckman termometresi kalibrasyonu

Termometre düşey düz konumda tutulduğunda bir miktar civa, yukarıdaki hazneden kılcal boru vasıtasıyla aşağıdaki hazneye akmaya başlar (Şekil a). Bir miktar civa akıttıktan sonra termometreye eğim verilerek, fazla civa haznenin yanındaki yan kollara geçirilir, tekrardan düşey düz konuma getirilerek kollardaki civa seviyesi eşitlenir. Ve aşağıdaki hazneden (sıcaklık artışının okunduğu yerden) okuma yapılır. Eğer 0-0.2°C arasında ise kalibrasyonun tamamlandığı düşünülür. Eğer 5°C'ye kadar herhangi bir değer okunuyorsa, bu sefer aşağıdaki haznede civa miktarı fazla demektir ve bir miktar civanın yukarıdaki hazneye geri gönderilmesi gerekiyor demektir. Bu sefer termometre ters çevrilir ve bir miktar civanın yukarıdaki haznede toplanmasına izin verilir (Şekil b). Göreceli olarak gerekli miktarda civanın toplandığı düşünüldüğü anda tekrar

termometre eski düz konuma getirilir, cıvanın haznedan ayrılması için küçük darbeler uygulanır (Şekil c). Yukarıdaki haznede toplanan cıva yan kollara iletilir (Şekil d).

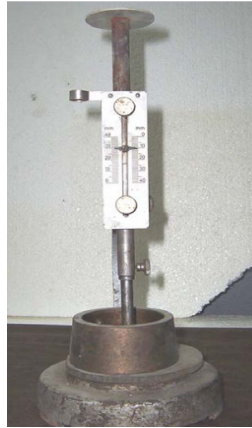
3.2.5. Vicat Cihazı

Priz süresi tayininde beton için hazırlanmış su ve çimentonun hidratasyonu sonucu ne kadar zamanda mukavemetini almaya başladığını ve ne kadar zamanda tamamladıklarını tespit etmek için Vicat cihazı ile yapılır. Vicat cihazının aparatları Vicat iğnesi ve halkasıdır.



Şekil 3.4 Vicat cihazı (iğneli)

Çimentonun priz süresi tayinine geçmeden çimentonun ne miktarda su ile karışacağını tespit etmek için normal kıvam deneyi yapılmaktadır. Bu deney için Vicat cihazına sonda takılmaktadır. Bu cihazın aparatları Vicat halkası, sondası ve cam plakadır. Sonda, uzunluğu $50(\pm 1)$ mm, çapı 10 mm.dir. Vicat cihazında hareketli parçaların toplam kütlesi (300 ± 1) gram olmalıdır. Bu ağırlığı ayarlamak için milin üst kısmında bulunan ağırlık tablasına gereken ağırlık konur.



Şekil 3.5 Vicat cihazı (sondalı)

3.3. YAPILAN DENEYLER

3.3.1. Normal Kıvam Tayini

Deneyde 500 gram çimento ve çimento miktarının %25-30'u kadar su kullanılmıştır. İlk önce 125 gram su eklenmiştir. Su 5-10 sn arasında ilave edilmiştir. İlavenin tamamlandığı andan sonraki ölçümler için sıfır zamanı olarak kaydedilmiştir. Çimento hamurunun yoğrulmasına su ile çimentoyu karıştırıldığı andan itibaren 3 dk devam edilmiştir.

Deney için Vicat cihazına takılan sonda taban plakası üzerine indirilip, taksimatlı göstergeden sıfır okunacak şekilde ayarlanmıştır. Pasta seviyesi ayarlandıktan sonra Vicat kalıbı ve taban plakası Vicat cihazında sondanın tam altına yerleştirilir. Vicat halkası içerisine hamur yerleştirilip, üzeri düzgün bir spatula ile düzeltilmiştir. Sondanın ucu halkanın ortasında pastanın üst yüzeyine değecek kadar indirilip, serbest bırakılmıştır. Normal kıvamlı hamur için kullanılan su yeterli ise sonda 0.5 dk içinde cam levhaya 5-7 mm kalıncaya kadar iner. Eğer sonda 7 mm nin üzerinde kalıyorsa su eklemek gerekir, 5 mm nin altına iniyorsa su miktarını azaltmak gerekmektedir.

3.3.2. Çimentonun Priz Süreleri Tayini

Normal kıvam tayini için uygulanan adımlar burada da uygulanmıştır, farklı olarak sonda yerine iğne kullanılmıştır. Hareket eden parçalar bırakılır ve iğnenin düşey olarak pasta içine girmesi sağlanmıştır. İğnenin serbest bırakılmasından 30 sn sonra taksimatlı göstergeden okunmuştur. Bu işlem 10 dk.lık zaman aralıklarıyla tekrarlanmıştır. İğne her seferinde hamurun değişik alanlarına batırılmıştır. Sıfır olarak kabul edilen başlangıç zamanından itibaren iğne ile taban plakası arasındaki mesafe $4 (\pm 1)$ mm oluncaya kadar geçen süre en yakın 5 dakikaya yuvarlatılarak priz başlangıç süresi olarak kaydedilmiştir. İğnenin ilk 0,05 mm kadar battığı an ile sıfır olarak kabul edilen zaman, en yakın 15 dakikaya yuvarlatılarak priz sonu süresi olarak kaydedilmiştir.

3.3.3. Hidratasyon Isısı Deneyinin Yapılışı

3.3.3.1. Kalorimetre Kabının Isı Kapasitesi Tayini

Asit çözeltisi balon jodede hazırlanmış olan 2N nitrik asitten 126 gr, hidroflorik asitten 8 ml termos içine konmuştur. Kalorimetre kabının üzerindeki mantar kapaklardan Beckman termometresi ve huni geçirilmiştir. Huninin alt ucunun kapaktan yaklaşık 60

mm aşağıda, asit çözeltisinden 10 mm yukarıda kaldığı ve Beckman termometresinin alt ucunun sıvıya 30 mm battığı kontrol edilmiştir. Karıştırıcı çalıştırılmadan 30 dk beklenmiştir. Bu süre sonunda kronometre açılıp, 20 dk karıştırıldıktan sonra 20. dk nin sonunda Beckman termometresinden okuma yapılmıştır (θ_0). Çinko oksit 0.1 mg hassasiyetli tartı ile 7 gr tartılmıştır. Kronometre durdurulmadan, okuma yaptıktan hemen sonra, 1 dk içerisinde çinko oksit huniden çözelti içerisine boşaltılmıştır. Bu sürenin uzamamasına dikkat edilmiştir. Hunide kalan bir miktar toz çinko oksit bir fırça yardımı ile çözeltinin içine fırçalanmıştır. Çinko oksitin asitlerle yaptığı reaksiyon sonucu ısı açığa çıkmaktadır. 20 dk boyunca birer dakika ara ile sıcaklık artışı okunmuştur. Çinko oksit çözelti içine konduktan sonraki 20. dk (θ_{20}) ve 40. dk'daki (θ_{40}) okuma kaydedilir. Çinko oksitin sıcaklık yükselmesi sonucu elde edilen veriler formülde yerlerine konarak kalorimetrenin ısı sığası bulunmuştur. Açığa çıkan ısı miktarının kalorimetre kabında oluşturduğu sıcaklık yükselişi ölçülmesi ile kalorimetre cihazının bir nevi kalibrasyonu yapılmaktadır. Bulunan değerler aşağıdaki formülde yerine konmuştur.

$$R_0 = \theta_{20} - \theta_0 \quad (3.1)$$

R_0 : Gözlenen sıcaklık yükselişi, ($^{\circ}\text{C}$)

θ_0 : Numune kalorimetre kabına konulduğu andaki sıcaklık, ($^{\circ}\text{C}$)

θ_{20} : Numune konulduktan sonra 20. dk.'de okunan sıcaklık, ($^{\circ}\text{C}$)

$$R^{\circ} = R_0 - (\theta_{40} - \theta_{20}) \quad (3.2)$$

θ_{40} : Numune konulduktan sonra 40. dk.'de okunan sıcaklık, ($^{\circ}\text{C}$)

R° : Düzeltilmiş sıcaklık yükselişi, ($^{\circ}\text{C}$)

$$C_c = m \times [256,1 + 0,1 \times (30 - t) + 0,12 \times (T^{\circ} - t)] / R^{\circ} \quad (3.3)$$

C_c : Kalorimetre kabının ısı kapasitesi, ($\text{Cal}/^{\circ}\text{C}$)

m : Çinko oksit kütesi, g

t : Kalorimetre kabının son sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)

T° : Çinko oksitin kalorimetre kabına konulurken sıcaklığı (oda sıcaklığı), ($^{\circ}\text{C}$)

3.3.3.2. Kızdırılmış Çimento Kütlesi Tayini

Çimentolar 0.001g hassasiyetli terazide 3 g. tartılıp çimento tipine göre numaralanmış krozelere konmuştur. 900°C sıcaklıktaki fırında 1.5 saat bekletilmiştir. Fırınlanmış çimentoların, tabanında nem çekici bir madde serili olması dolayısıyla nem oranı çok düşük olan ve ağzı sıkı kapatabilen özel bir kap olan desikatör içinde muhafaza edilerek oda sıcaklığına gelmesi beklenmiştir.

Çimento içerisindeki CO₂ ve nem uzaklaştırılıp, tekrardan tartılmıştır. Kızdırılmadan önceki kütle (m₂), kızdırılmış numune kütlesi (m₁) ve kalorimetre kabına konmuş olan numune kütlesi (m) arasında aşağıdaki formül uygulanmıştır.

$$m_K = (m_1 / m_2) \times m \quad (3.4)$$

3.3.3.3. Kuru Çimentoların Çözünme Isısı Tayini

Kontrol çimentosu olarak adlandırılan incelikleri ve cinsleri farkı çimentolar 0.1 mg hassasiyetle 3 g tartıldıktan sonra kalorimetre kabının ısı kapasitesi bulunurken yapılan işlemlerin aynıları yapılmıştır. Bulunan değerler aşağıdaki formülde yerine konmuştur.

Katkılı çimento elde etmek için %20 oranında puzolan katkısı ilave edilmiştir. Yani 2.4 g çimentoya 0.6 g katkı ikamesi ile karışımlar hazırlanmıştır. Bulunan değerler aşağıdaki formülde yerine konarak çözünme ısı (H₁) bulunmuştur.

$$H_1 = R^\circ \times C_c / m_K - 0.2 \times (T^\circ - t) \quad (3.5)$$

H₁ = Kuru çimentonun asitte çözünme ısı, cal/g

R° : Düzeltilmiş sıcaklık yükselişi, (°C)

C_c : Kalorimetre kabının ısı kapasitesi, (cal/°C)

t : Kalorimetre kabının son sıcaklığı, (°C)

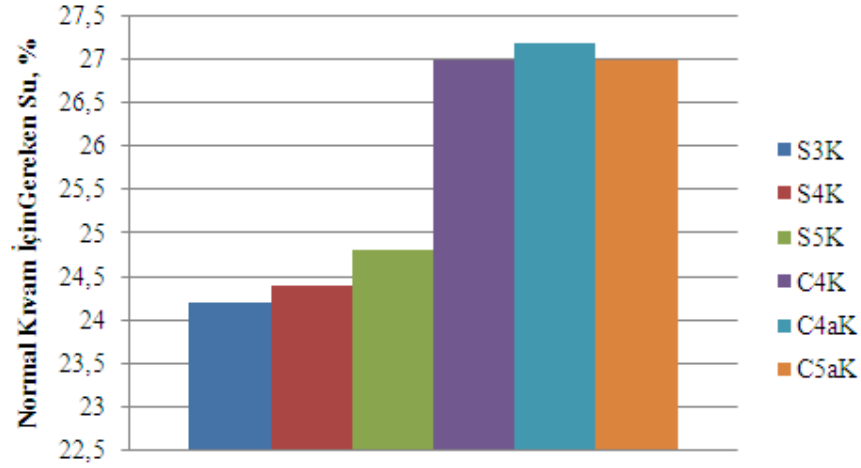
T° : Çimento numunelerinin kalorimetre kabına konulurken sıcaklığı (oda sıcaklığı), (°C)

m_K : Numunenin kızdırılmış haldeki kütlesi, g

4. BULGULAR

4.1. NORMAL KIVAM TAYİNİ DENEY SONUÇLARI

Normal kıvam için gerekli su miktarının belirlenmesinde C çimento hamuruna kıvama gelmesi için eklenen su S'ye eklenenden daha fazladır. Normal kıvam priz süresi ile ilgili, priz süresi de incelik ve kimyasal kompozisyonla ilgili olduğu düşünülürse; burada iki grup çimentonun incelikleri hemen hemen aynı (S, 3180-4000-5500; C, 4000-4630-5550 cm^2/g) olduğu için su gereksinimi çimentoların kimyasal yapılarındaki farklılıklarla açıklanabilir.



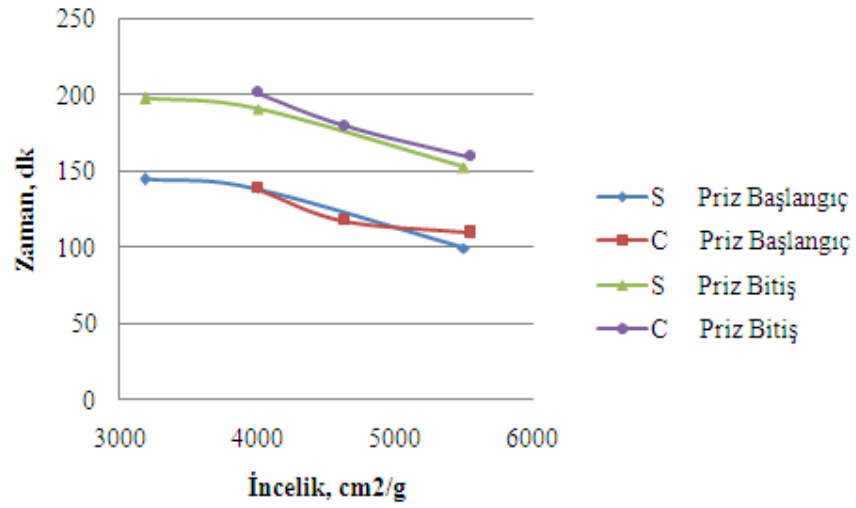
Şekil 4.1 Çimento inceliği-normal kıvam için gereken % su

4.2. ÇİMENTONUN PRİZ SÜRELERİ DENEY SONUÇLARI

Bu deney sonucuna göre inceliğin priz süreleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çimentonun inceliği arttıkça priz başlama süresi kısalmış, çimento hamuru daha erken sertleşmeye başlar. Çünkü çimento taneleri küçüldükçe partiküllerin kapsadığı toplam alan artar, reaksiyon miktarı ve reaksiyona girme hızı artar, daha çok ve hızlı reaksiyon ürünleri oluşur ve erken dayanım kazanır. C çimentoları S'lere göre prize daha erken başlamakta, priz alma süreleri daha uzun olmaktadır. Bunun nedeninin C'lerin S'lere göre daha fazla miktarda C_3A içermesi olduğuna bağlanabilir. C5aK çimentosunun kimyasal kompozisyonuna bakıldığında en fazla miktarda C_3A içerdiğinden prize diğerlerinden daha erken başladığı görülmüştür.

Tablo 4.1 Priz sürelerinin incelik ile ilişkisi

Çimento Türü	Normal Kıvam İçin Gerekli Su(%)	Priz Süresi (dk)		Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Özgül Yüzey (cm ² /gr)
		Başlangıç	Bitiş		
S3K	24.2	145	198	3.16	3180
S4K	24.4	139	191	3.16	4000
S5K	24.8	100	153	3.16	5500
C4K	27.0	139	202	3.14	4000
C4aK	27.2	118	180	3.14	4630
C5aK	27.0	110	160	3.14	5550



Şekil 4.2 İnceliğin priz başlama-bitiş süreleri üzerindeki etkisi

4.3. ÇİMENTOLARIN ÇÖZÜNME ISISI DENEY SONUÇLARI

Tablo 4.2 Katkısız ve katkılı S çimentolarının çözünme ısıları değerleri

Tip	θ_0 (°C)	θ_{20} (°C)	θ_{40} (°C)	R_0 (°C)	R° (°C)	m_K (g)	T° (°C)	t (°C)	C_c (cal/°C)	H_1 (cal/g)
S3K	1.190	5.190	5.080	4.000	4.110	2.962	18.2	22.2	434.284	603.402
S3T	1.240	5.108	5.005	3.868	3.971	2.958	17.4	21.3	434.284	583.783
S3C	0.850	4.816	4.685	3.966	4.097	2.955	18.0	21.9	434.284	602.912
S3U	0.472	4.395	4.335	3.873	3.933	2.838	18.0	21.9	434.284	602.464
S3S	1.035	4.873	4.790	3.838	3.921	2.969	18.8	22.6	434.284	574.303
S3B	0.650	4.175	4.112	3.525	3.588	2.862	19.0	22.5	434.284	545.153
S4K	0.860	4.845	4.685	3.985	4.145	2.961	20.6	24.6	434.284	608.736
S4T	0.310	4.160	4.050	3.850	3.960	2.954	20.7	24.5	434.284	582.951
S4C	0.940	4.770	4.620	3.830	3.980	2.948	20.4	24.2	434.284	587.079
S4U	1.130	4.879	4.550	3.749	4.078	2.949	20.6	24.3	434.284	601.296
S4S	0.515	4.400	4.280	3.885	4.005	2.951	20.6	24.5	434.284	590.173
S4B	0.735	4.221	4.160	3.486	3.547	2.795	17.0	20.5	434.284	551.826
S5K	0.800	4.750	4.635	3.950	4.065	2.894	20.6	24.5	434.284	610.798
S5T	0.685	4.620	4.510	3.935	4.045	2.955	21.0	24.9	434.284	595.264
S5C	0.630	4.595	4.470	3.965	4.090	2.946	21.0	24.9	434.284	603.719
S5U	0.590	4.355	4.318	3.765	3.802	2.739	20.8	24.6	434.284	603.581
S5S	0.580	4.510	4.380	3.930	4.060	2.932	20.6	24.5	434.284	602.148
S5B	0.730	4.320	4.170	3.590	3.740	2.907	20.7	24.3	434.284	559.446

Tablo 4.3 Katkısız katkılı ve C çimentolarının çözünme ısıları değerleri

Tip	θ_0 (°C)	θ_{20} (°C)	θ_{40} (°C)	R_0 (°C)	R° (°C)	m_K (g)	T° (°C)	t (°C)	C_c (cal/°C)	H_1 (cal/g)
C4K	0.810	4.841	4.810	4.031	4.062	2.925	19.3	23.3	434.284	603.904
C4T	1.270	5.185	5.120	3.915	3.980	2.954	19.0	22.9	434.284	585.905
C4C	1.050	5.011	4.880	3.961	3.092	2.960	18.6	22.6	434.284	601.160
C4U	1.270	5.308	5.240	4.038	4.106	2.972	18.5	22.5	434.284	600.797
C4S	0.870	4.888	4.820	4.010	4.070	2.959	19.0	23.4	434.284	598.144
C4B	0.932	4.685	4.590	3.753	3.848	2.911	20.0	23.7	434.284	574.823
C4aK	0.510	4.531	4.462	4.021	4.090	2.926	20.1	24.1	434.284	607.851
C4aT	0.690	4.498	4.395	3.808	3.911	2.890	19.5	23.3	434.284	588.472
C4aC	0.920	4.830	4.710	3.910	4.030	2.963	19.6	23.4	434.284	591.455
C4aU	0.822	4.835	4.753	4.013	4.095	2.961	20.0	24.1	434.284	601.408
C4aS	0.755	4.700	4.595	3.945	4.050	2.944	19.7	23.6	434.284	600.260
C4aB	1.055	4.770	4.660	3.715	3.825	2.882	20.0	23.7	434.284	577.126
C5aK	1.025	5.040	4.900	4.015	4.155	2.961	20.3	24.3	434.284	610.208
C5aT	1.132	5.020	4.930	3.888	3.978	3.937	18.0	21.9	434.284	588.990
C5aC	0.965	.910	4.780	3.945	4.075	2.916	19.0	22.9	434.284	607.684
C5aU	1.035	4.898	4.740	3.863	4.021	2.912	19.5	23.4	434.284	600.448
C5aS	0.835	4.780	4.670	3.945	4.055	2.934	19.0	22.9	434.284	601.000
C5aB	1.210	4.828	4.720	3.618	3.726	2.769	19.7	23.3	434.284	585.101

4.3.1. Kalorimetre Kabının Isı Kapasitesi Deney Sonuçları

θ_0 , 1.01°C; θ_{20} , 5.039 °C; θ_{40} , 4.935°C ölçülmüştür. Değerler sırasıyla denklem (3.1), (3.2) ve (3.3)'de yerine konduğunda kalorimetre kabının ısı kapasitesi bulunur.

$$R_0 = 5.039 - 1.01$$

$$R_0 = 4.029 \text{ °C}$$

$$R^\circ = 4.029 - (4.935 - 5.039)$$

$$R^\circ = 4.133 \text{ °C}$$

$$C_c = 7 \times [256.1 + 0.1 \times (30 - 22.03) + 0.12 \times (18 - 22.03)] / 4,133$$

$$C_c = 434.284 \text{ cal/°C}$$

4.3.2. Kızdırılmış Çimento Kütlesi Deney Sonuçları

Tablo 4.4 S çimentolarının kızdırılmış çimento kütlesi değerleri, g

	S3K	S3T	S3C	S3U	S3S	S3B	S4K	S4T	S4C	S4U	S4S	S4B	S5K	S5T	S5C	S5U	S5S	S5B
m ₁	3.009	2.981	2.947	2.865	2.936	2.892	2.952	3.004	2.945	2.770	2.959	2.928	2.874	2.986	2.955	2.780	2.985	2.914
m ₂	3.067	3.030	3.009	3.033	3.002	3.054	3.006	3.063	3.037	3.053	3.019	3.048	3.001	3.052	3.030	3.128	3.056	3.020
m	3.019	3.007	3.017	3.056	3.036	3.023	3.015	3.012	3.040	3.001	3.011	3.004	3.022	3.020	3.021	3.064	3.002	3.013
m _K	2.962	2.958	2.955	2.838	2.969	2.862	2.961	2.954	2.948	2.583	2.951	2.795	2.894	2.955	2.946	2.723	2.932	2.907

Tablo 4.5 C çimentolarının kızdırılmış çimento kütlesi değerleri, g

	C4K	C4T	C4C	C4U	C4S	C4B	C4aK	C4aT	C4aC	C4aU	C4aS	C4aB	C5aK	C5aT	C5aC	C5aU	C5aS	C5aB
m ₁	2.949	2.945	2.949	2.934	2.944	2.921	2.954	2.967	2.971	2.946	2.939	2.903	2.976	2.948	2.927	2.906	2.916	2.754
m ₂	3.018	3.015	3.002	3.002	3.024	3.030	3.032	3.105	3.061	3.002	3.017	3.034	3.043	3.012	3.048	3.013	3.014	3.001
m	3.007	3.033	3.024	3.049	3.039	3.020	3.003	3.024	3.052	3.066	3.022	3.012	3.028	3.001	3.037	3.019	3.033	3.017
m _K	2.938	2.963	2.970	2.980	2.959	2.911	2.926	2.890	2.963	2.961	2.944	2.882	2.961	2.937	2.916	2.912	2.934	2.769

4.3.3. Kuru Çimentonun Çözünme Isısı Deney Sonuçları

Kalorimetre kabının ısı kapasitesi tayininde yapılan işlemlerin aynısı yapılmaktadır. Tek fark olarak asit çözeltisine çinko oksit yerine 3'er gram tartılan kontrol ve puzolan kombinasyonlu çimentolar aktarılmaktadır. Dolayısıyla θ_0 , θ_{20} , θ_{40} R_0 , R , t , T° çimento çözeltiye aktarıldığı andaki koşullara göre değişmektedir. Bu işlem herbir çimento için ayrı ayrı yapılmaktadır. Deneylerde 6 tanesi kontrol çimentosu olmak üzere 36 tane puzolan çimento karşımının ısısı tayin edilmiştir. Bunlardan birinin örneği açıklanmış, diğerleri Tablo 4.2'de gösterilmiştir. Örnek olarak aşağıda S3K çimentosunun çözünme ısısı hesabı verilmiştir. Değerler denklem (3.1), (3.2), (3.4) ve (3.5)'te yerine konduğunda çimentonun çözünme ısısı bulunmaktadır.

$$R_0 = 5.19 - 1.19$$

$$R_0 = 4.00^\circ\text{C}$$

$$R^\circ = 4.00 - (5.08 - 5.19)$$

$$R^\circ = 4.11^\circ\text{C}$$

$$m_K = (3.009 / 3.067) \times 3.019$$

$$m_K = 2.962 \text{ g}$$

$$T^\circ = 18.2^\circ\text{C}$$

$$t = 18.2 + 4.00$$

$$t = 22.2^\circ\text{C}$$

$$H_1 = (4.11 \times 434.284) / 2.962 - 0.2 \times (18.2 - 22.2)$$

$$H_1 = 603.402 \text{ cal/g}$$

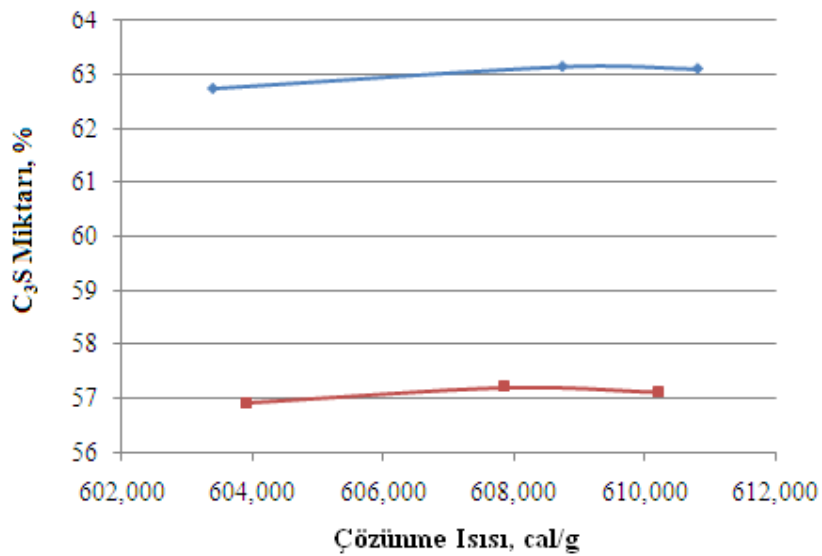
4.4. ÇİMENTOLARDA ÇÖZÜNME ISISI DENEY SONUÇLARININ ÇİMENTO ÖZELLİKLERİYLE DEĞERLENDİRİLMESİ

4.4.1. Çözünme Isısının Anabileşenler ile İlişkisi

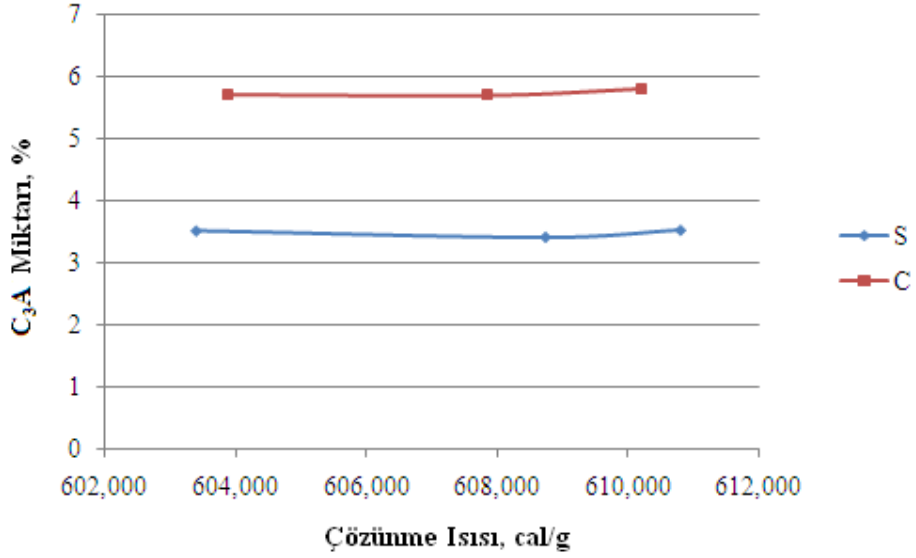
Çimento kompozisyonunda hidratasyon ısını en çok etkileyen anabileşenlerden C_3S ve C_3A yüzdesi arttıkça çözünme ısının arttığı görülmüştür. S çimentolarında C_3S miktarı, C çimentolarında ise C_3A miktarı fazla olduğundan çözünme ısıları hemen hemen birbirine yakındır. Lerch ve Bouge (1934) ve Berhane (1983) yaptıkları çalışmalarda C_3A ve C_3S yüzdesi arttıkça hidratasyon ısının arttığını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada da bu sonuçlarla benzerlik görülmüştür.

Tablo 4.6 Çimentonun anabileşenlerinin çözünme ısıları değerleri

Çimento Tipi	C_3S (%)	C_2S (%)	C_3A (%)	C_4AF (%)	Çözünme Isısı (cal/g)
S3K	62.72	11.40	3.52	12.31	603.402
S4K	63.13	11.17	3.42	12.52	608.736
S5K	63.09	12.13	3.53	12.50	610.798
C4K	56.91	16.14	5.72	10.68	603.904
C4aK	57.21	16.07	5.71	10.75	607.851
C5aK	57.12	16.59	5.80	10.76	610.208



Şekil 4.3 C_3S 'nin çözünme ısıları üzerindeki etkisi



Şekil 4.4 C₃A'nın çözünme ısısı üzerindeki etkisi

4.4.2. Çözünme Isısının Katkı İle İlişkisi

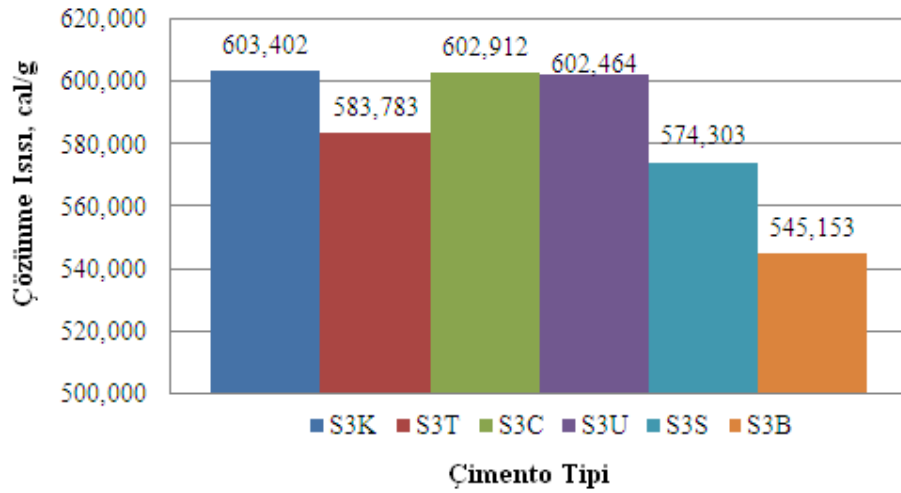
Katkılı çimentoların çözünme ısısı kontrol çimentoları ile kıyaslandığında, katkıların çözünme ısısının daha düşük olduğu görülmüştür. Tras, cüruf, uçucu kül, silis dumanı, ve buğday sapı külü katkıları arasında çözünme ısısı en düşük olanının pozolanik aktivitesi yüksek olan buğday sapı külü olduğu görülmüştür. Buğday sapsı yüksek sıcaklıklarda yakılarak elde edilen küllerdir. Buğday sapsı külü S çimentosu ile kullanıldığında çözünme ısısı C çimentosuna göre daha düşüktür. Literatür taramasında Durum ve diğ. (2009) ve Douglas ve diğ. (1990) yaptığı çalışmalar incelendiğinde cüruf fabrikada öğütölmüş olup genellikle 3200-5500 cm²/g incelikte kullanılmıştır. Ancak bu çalışmada kullanılan cürufun labaratuarda havanda dövölerek öğütöldüğünden 550 cm²/g incelikte kullanılmıştır. Cürufun inceliğı diğerkatkılara göre daha düşük olduğu için çözünme ısısında fazla bir düşüşe neden olmamıştır. Uçucu külle yapılan çalışmalarda çözünme ısısını düşürdüğü görülmüştür. Ancak bu çalışmada çözünme ısısını çok az miktarda düşürmüştür. Nedeninin bu çalışmada kullanılan U, CaO > %10 olduğundan C sınıfı olup, kendi başına bağlayıcılık özelliğı göstermesinden dolayı sıcaklık oluşumuna katkıda bulunduğı düşünölmektedir.

Katkılı çimentonun performansının sadece katkının bir fonksiyonu olmadığı, hangi çimento tipiyle katkı yapıldığının da önemli olduğu görülmüştür.

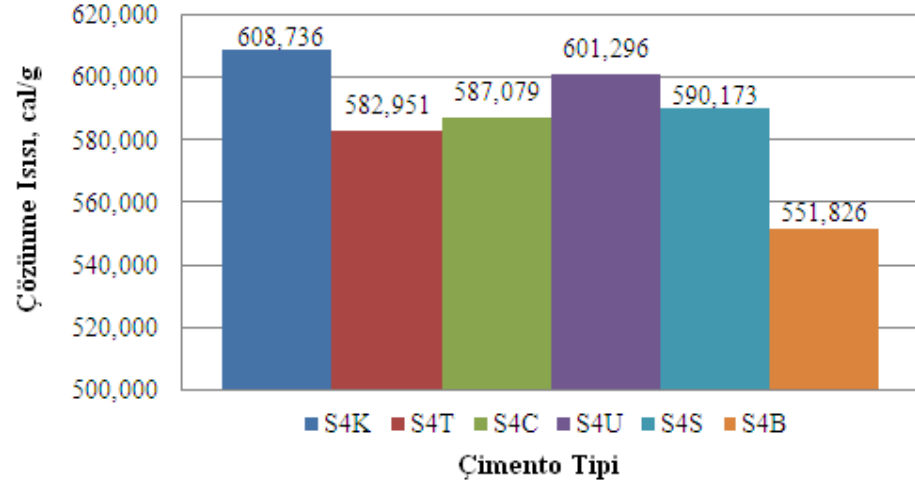
Malthora (1987) yaptığı çalışmalarda silis dumanının C_3S 'nin hidratasyonunu hızlandırdığını belirtmiştir. İlk zamanlarda reaksiyon hızları artıp daha fazla reaksiyon ürünü ve buna bağlı olarak daha fazla çözünme ısısı oluşturması gerekmektedir. S çimentosunda C çimentosundan daha fazla miktarda C_3S bulunmasına rağmen dumanı S çimentolarında daha yüksek çözünme ısısı oluşturmuştur. Bunun böyle olması çözünme ısısının sadece C_3S 'ye bağlı olmamasına C_3S ve C_3A her ikisine birden bağlı olmasına bağlanabilir.

Tablo 4.7 Katkısız ve katkılı S çimentolarının çözünme ısısı değerleri

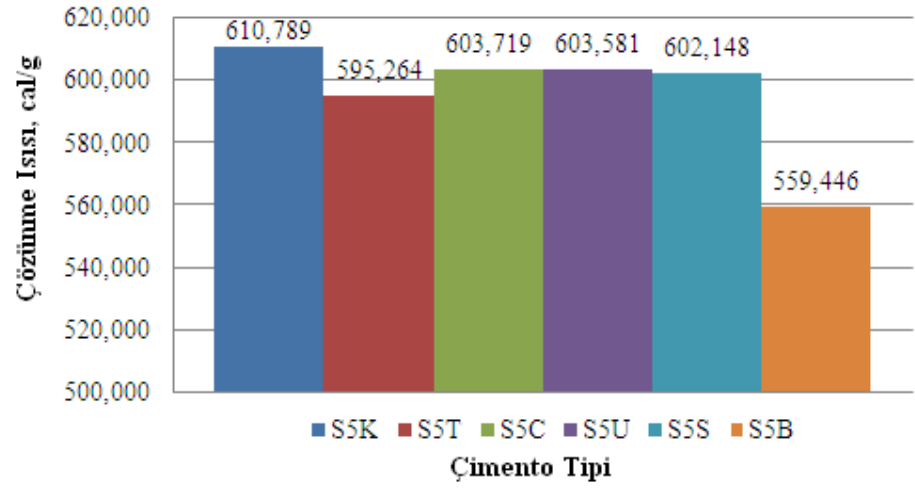
Çimento Tipi	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	Çözünme Isısı (cal/g)
S3K	603.402	S4K	608.736	S5K	610.789
S3T	583.783	S4T	582.951	S5T	595.264
S3C	602.912	S4C	587.079	S5C	603.719
S3U	602.464	S4U	601.296	S5U	603.581
S3S	574.303	S4S	590.173	S5S	602.148
S3B	545.153	S4B	551.826	S5B	559.446



Şekil 4.5 S3 çimentolarında katkının çözünme ısısına etkisi



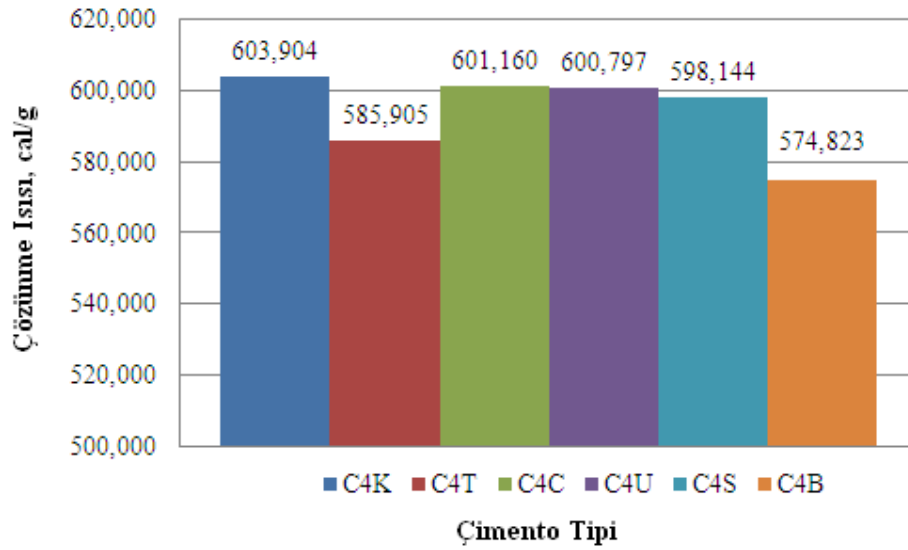
Şekil 4.6 S4 çimentolarında katkıının çözünme ısısına etkisi



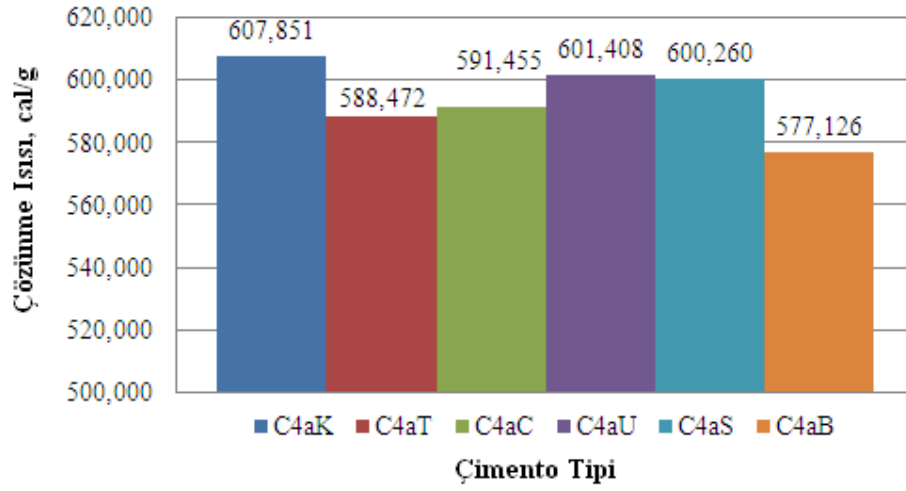
Şekil 4.7 S5 çimentolarında katkıının çözünme ısısına etkisi

Tablo 4.8 Katkısız ve katkılı C çimentolarının çözünme ısıları değerleri

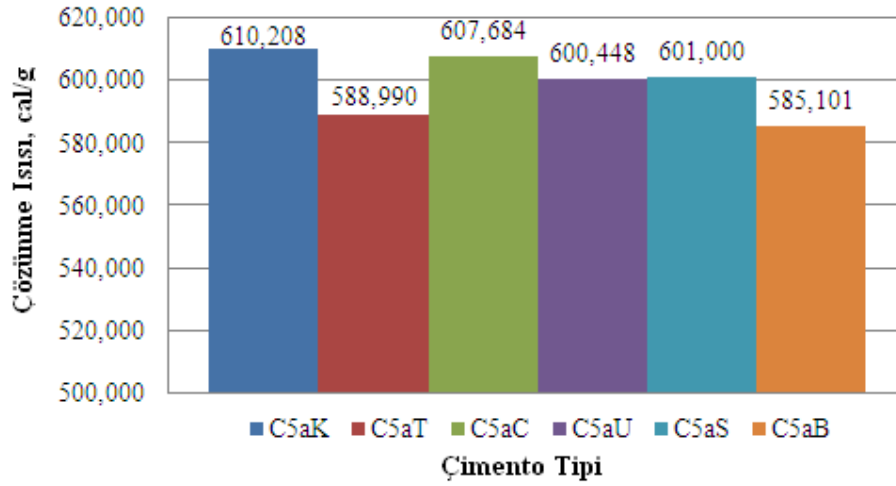
Çimento Tipi	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	Çözünme Isısı (cal/g)
C4K	603.904	C4aK	607.851	C5aK	610.208
C4T	585.905	C4aT	588.472	C5aT	588.990
C4C	601.160	C4aC	591.455	C5aC	607.684
C4U	600.797	C4aU	601.408	C5aU	600.448
C4S	598.144	C4aS	600.260	C5aS	601.000
C4B	574.823	C4aB	577.126	C5aB	585.101



Şekil 4.8 C4 çimentolarında katkının çözünme ısısına etkisi



Şekil 4.9 C4a çimentolarında katkının çözünme ısıasına etkisi



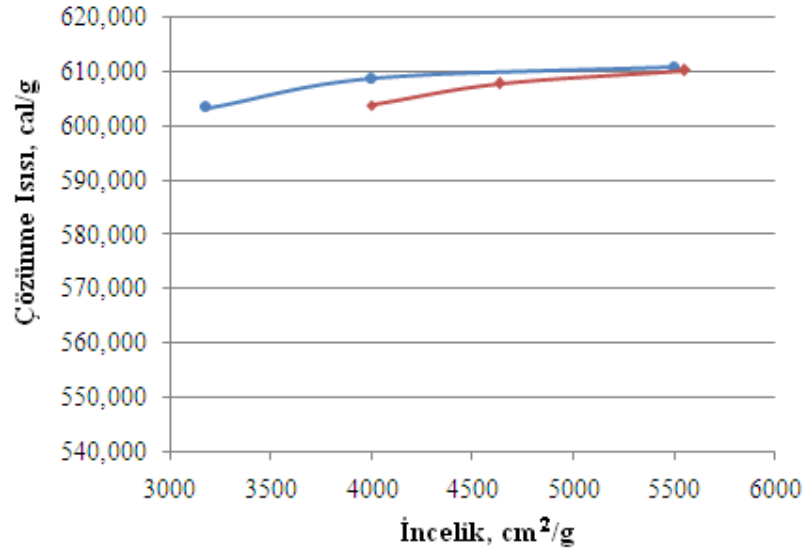
Şekil 4.10 C5a çimentolarında katkının çözünme ısıasına etkisi

4.4.3. Çözünme Isısının İncelik ile İlişkisi

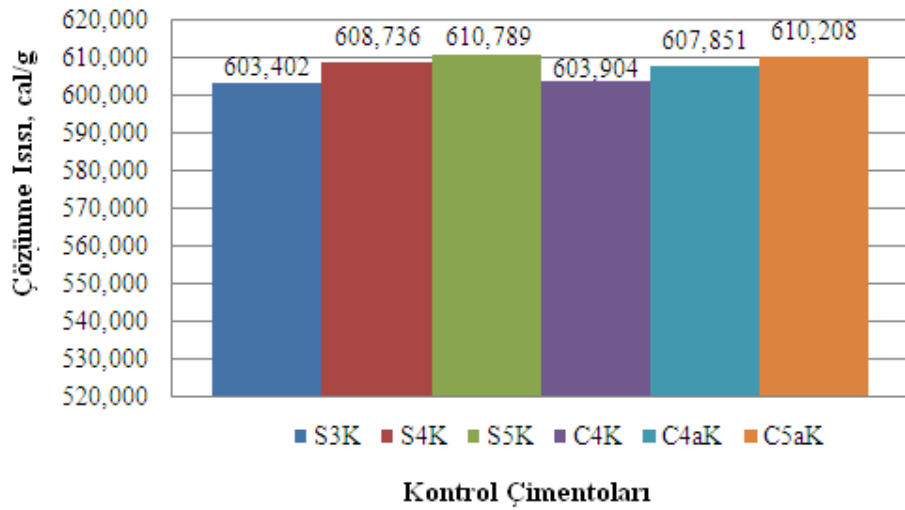
Çimentonun inceliği arttıkça kontrol çimentolarında, silis dumanlı ve buğday sapı külü çimentolarda çözünme ısıasının arttığı gözlemlenmiştir. Diğerlerinde ise incelik arttıkça genellikle çözünme ısıısı artmıştır. Bu artış S3-S5 ve C4-C5a çimentoları kıyaslandığında daha net görülmektedir.

Tablo 4.9 Kontrol çimentolarının incelik ve çözünme ısıları değerleri

Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)
S3K	3180	603.402	C4K	4000	603.904
S4K	4000	608.736	C4aK	4630	607.851
S5K	5500	610.798	C5aK	5550	610.208



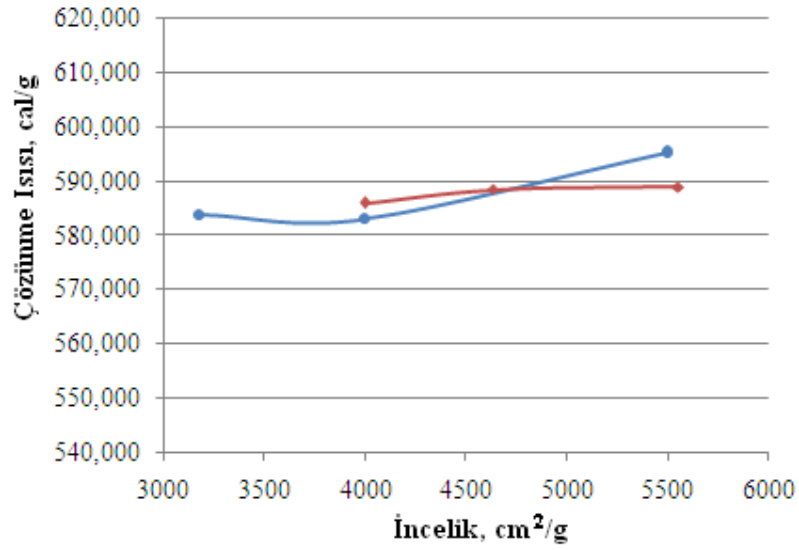
Şekil 4.11 Kontrol çimentolarında inceliğin çözünme ısılarına etkisi



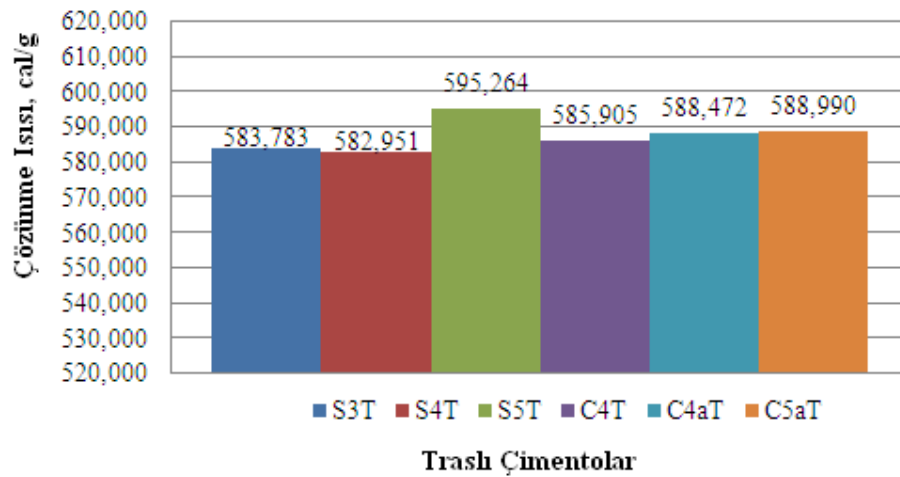
Şekil 4.12 Kontrol çimentolarında incelik-çözünme ısıları

Tablo 4.10 Tras katkılı çimentoların incelik ve çözünme ısıları değerleri

Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)
S3T	3180	583.783	C4T	4000	585.905
S4T	4000	582.951	C4aT	4630	588.472
S5T	5500	595.264	C5aT	5550	588.990



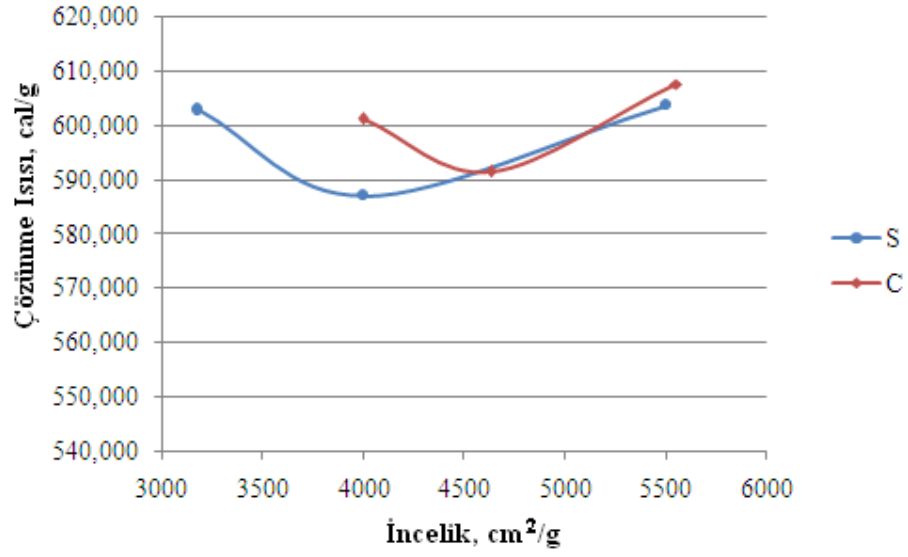
Şekil 4.13 Tras katkılı çimentolarda çözünme ısılarına etkisi



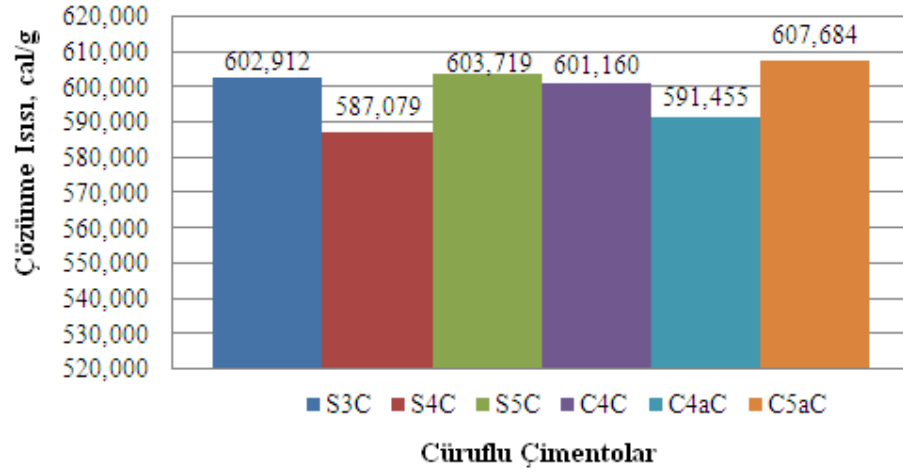
Şekil 4.14 Tras katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısıları

Tablo 4.11 Cüruf katkılı çimentonlarda incelik ve çözünme ısıları değerleri

Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)
S3C	3180	602.912	C4C	4000	601.160
S4C	4000	587.079	C4aC	4630	591.455
S5C	5500	603.719	C5aC	5550	607.684



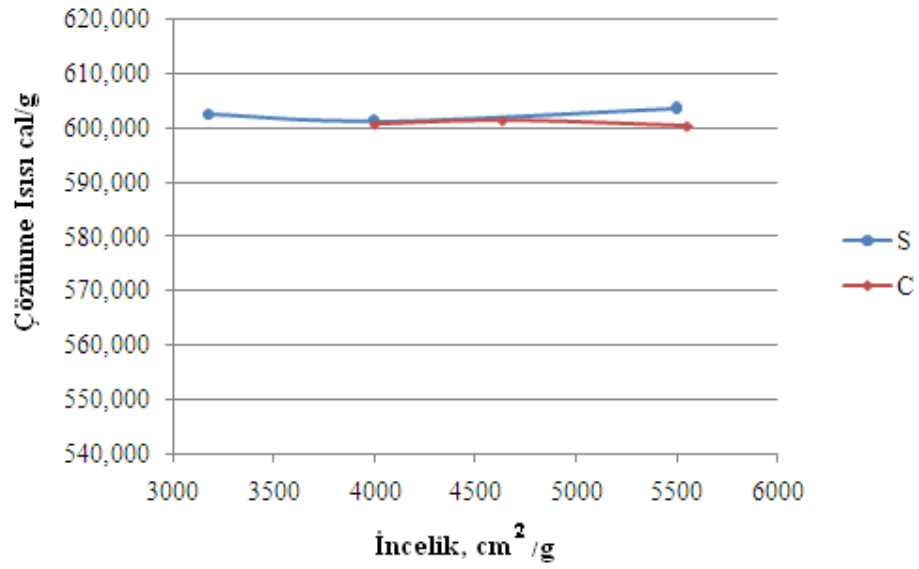
Şekil 4.15 Cüruf katkılı çimentonlarda çözünme ısılarına etkisi



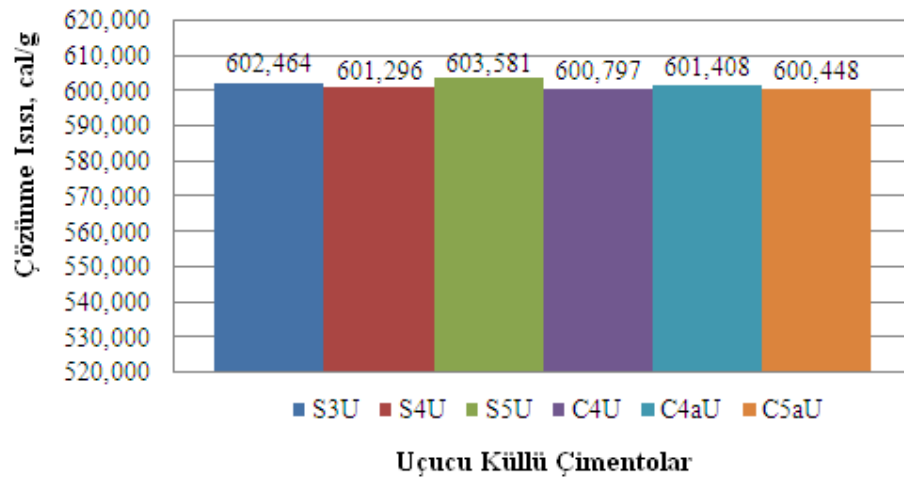
Şekil 4.16 Cüruf katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısıları

Tablo 4.12 Uçucu kül katkılı çimentolarda incelik ve çözünme ısısı değerleri

Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)
S3U	3180	602.464	C4U	4000	600.797
S4U	4000	601.296	C4aU	4630	601.408
S5U	5500	603.581	C5aU	5550	600.448



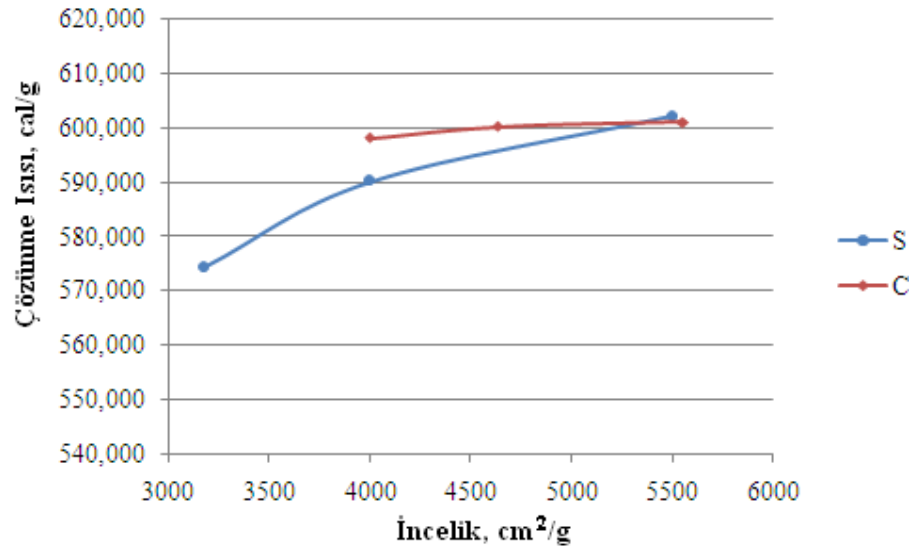
Şekil 4.17 Uçucu kül katkılı çimentonlarda çözünme ısısına etkisi



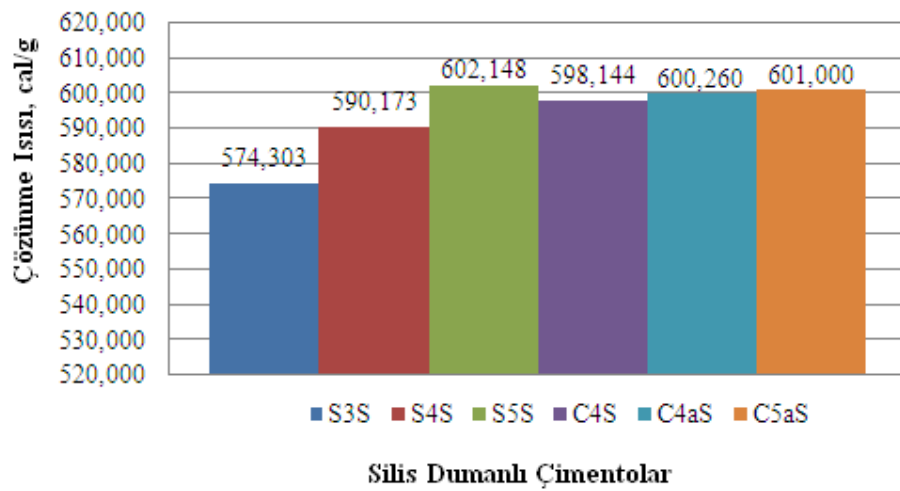
Şekil 4.18 Uçucu kül katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısısı

Tablo 4.13 Silis dumanı katkılı çimentolarda incelik ve çözünme ısıları değerleri

Çimento Tipi	İncelik (cm^2/gr)	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	İncelik (cm^2/gr)	Çözünme Isısı (cal/g)
S3S	3180	574.303	C4S	4000	598.144
S4S	4000	590.173	C4aS	4630	600.260
S5S	5500	602.148	C5aS	5550	601.000



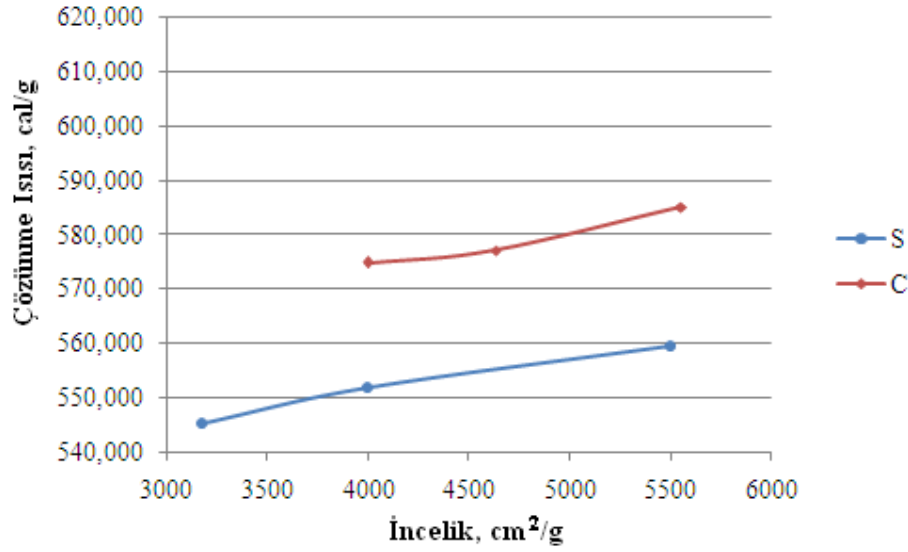
Şekil 4.19 Silis dumanı katkılı çimentonlarda çözünme ısılarına etkisi



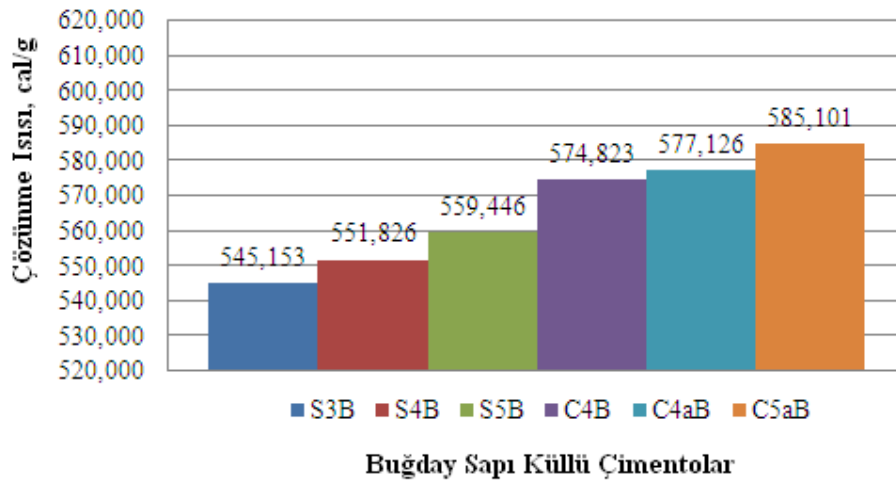
Şekil 4.20 Silis dumanı katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısıları

Tablo 4.14 Buğday küllü katkılı çimentolarda incelik ve çözünme ısıları değerleri

Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)	Çimento Tipi	İncelik (cm ² /gr)	Çözünme Isısı (cal/g)
S3B	3180	545.153	C4B	4000	574.823
S4B	4000	551.826	C4aB	4630	577.126
S5B	5500	559.446	C5aB	5550	585.101



Şekil 4.21 Buğday küllü katkılı çimentonlarda çözünme ısılarına etkisi



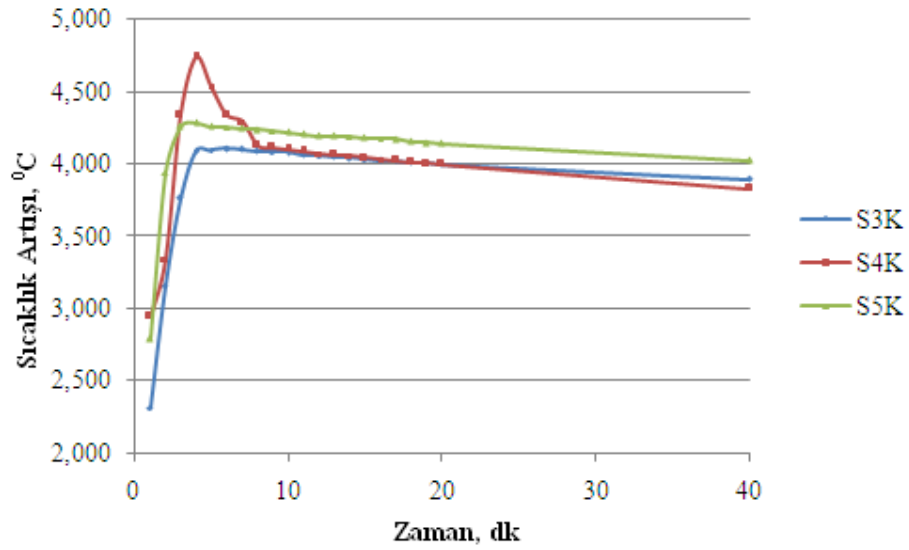
Şekil 4.22 Buğday küllü katkılı çimentolarda incelik-çözünme ısıları

4.4.4. Çözünme Isısında Sıcaklık Değişimi

Farklı tipteki çimentoların aynı miktar puzolan ikamesi ile hidratasyon sonucu oluşan sıcaklığın zamanla artışı aşağıda gösterilmiştir. 4-6 dk arasında kontrol S çimentoları, C çimentolarından daha yüksek bir pik değere ulaşmasına rağmen 40 dk sonundaki sıcaklık artışı her iki tip çimentoda hemen hemen aynıdır. Katkı ilaveli farklı incelikteki S ve C çimentolarının sıcaklık artışının incelikten daha çok çimentonun kimyasal kompozisyonunun ve katkının etkisinde olduğu görülmüştür. Aynı incelikte ve aynı gruptaki katkılı çimentolarda uçucu kül ve buğday sapı külü katkılı olanların sıcaklık artışları genellikle diğerlerine göre daha düşüktür.

Tablo 4.15 Kontrol S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

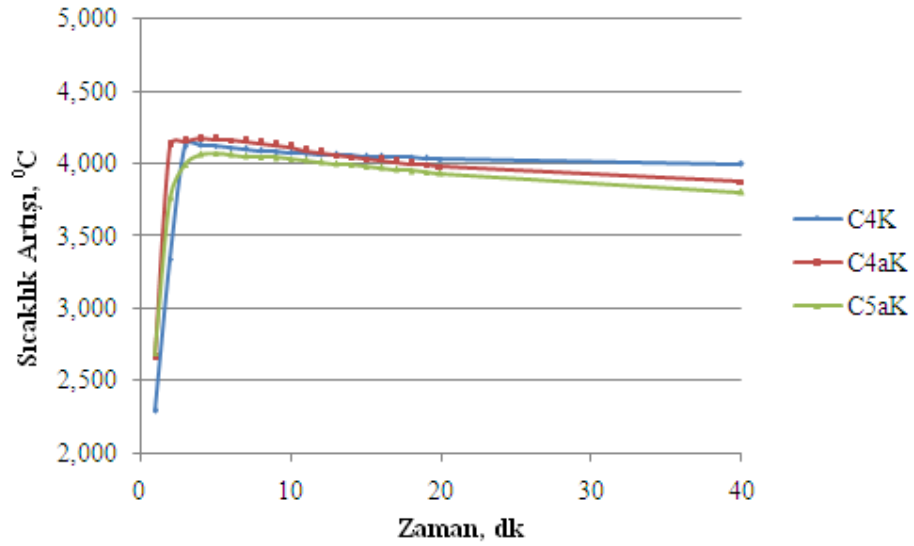
S3K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2,310	3,160	3,760	4,090	4,095	4,105	4,100	4,090	4,083	4,080	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4,060	4,055	4,050	4,040	4,030	4,022	4,020	4,010	4,005	4,000	3,890
S4K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2,940	3,340	4,340	4,740	4,540	4,340	4,290	4,130	4,115	4,100	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4,090	4,070	4,060	4,055	4,040	4,030	4,020	4,010	4,002	3,995	3,825
S5K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2,790	3,940	4,260	4,285	4,260	4,250	4,245	4,235	4,225	4,215	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4,205	4,195	4,190	4,185	4,180	4,175	4,170	4,150	4,145	4,140	4,025



Şekil 4.23 Kontrol S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.16 KontrolC çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

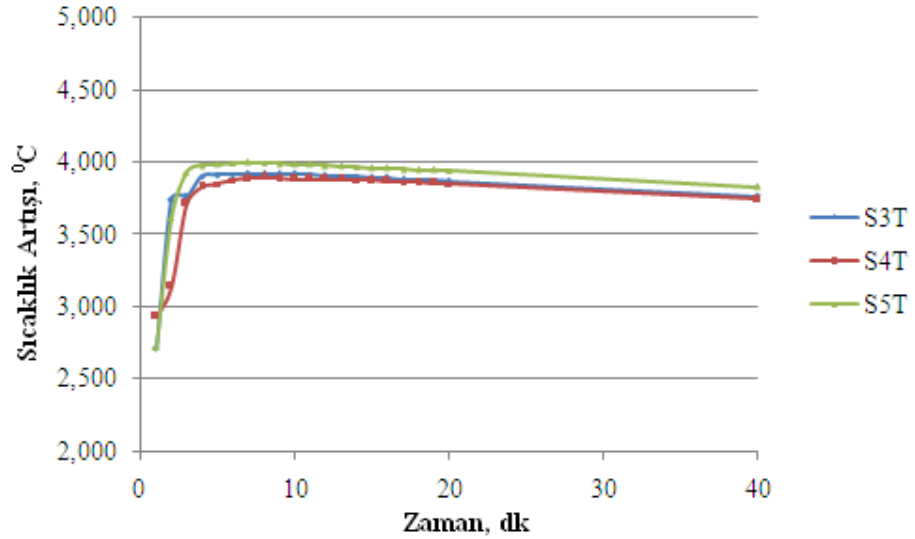
C4K	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.290	3.340	4.120	4.125	4.122	4.110	4.100	4.090	4.080	4.075	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4.070	4.065	4.060	4.055	4.052	4.048	4.044	4.040	4.035	4.031	4.000
C4aK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.660	4.130	4.130	4.150	4.170	4.165	4.162	4.155	4.140	4.125	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4.112	4.090	4.075	4.055	4.045	4.030	4.020	4.010	4.000	3.990	3.875
C5aK	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.690	3.760	3.990	4.060	4.070	4.065	4.050	4.045	4.040	4.030	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4.020	4.010	4.000	3.990	3.980	3.970	3.960	3.950	3.940	3.930	3.800



Şekil 4.24 Kontrol C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.17 Tras katkılı S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

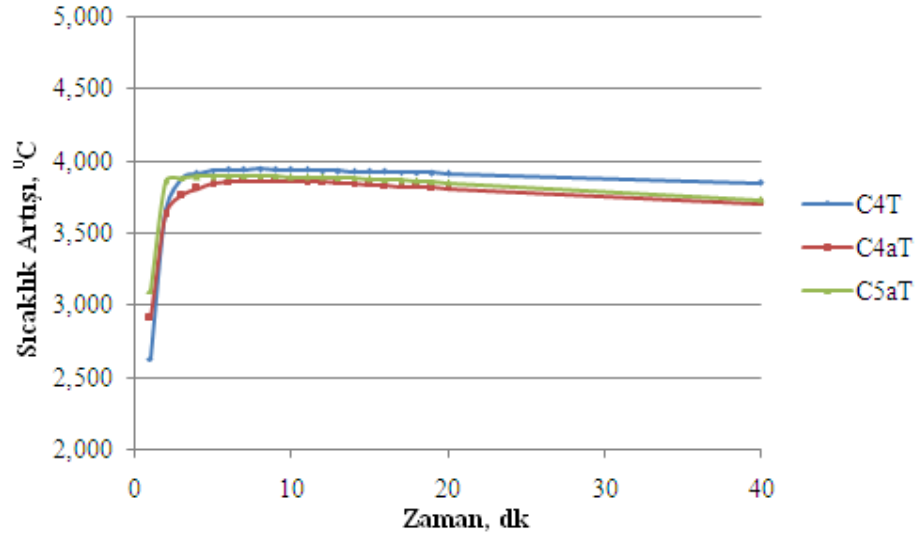
S3T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.710	3.740	3.760	3.900	3.910	3.912	3.918	3.920	3.920	3.918	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.910	3.905	3.900	3.898	3.892	3.890	3.880	3.872	3.870	3.868	3.765
S4T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.930	3.140	3.710	3.830	3.850	3.875	3.885	3.890	3.885	3.882	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.880	3.880	3.877	3.875	3.870	3.865	3.861	3.858	3.855	3.850	3.740
S5T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.715	3.615	3.925	3.975	3.985	3.990	3.995	3.990	3.989	3.987	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.985	3.975	3.970	3.965	3.960	3.955	3.950	3.947	3.945	3.940	3.825



Şekil 4.25 Tras katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.18 Tras katkılı C çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

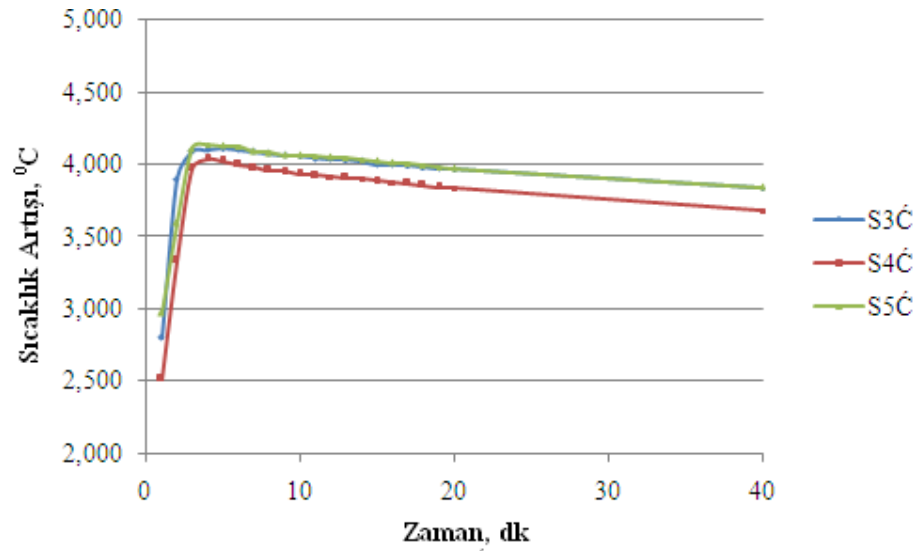
C4T	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.630	3.660	3.880	3.910	3.935	3.940	3.942	3.944	3.942	3.940	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.938	3.935	3.930	3.928	3.926	3.925	3.922	3.920	3.918	3.915	3.850
C4aT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.910	3.630	3.760	3.810	3.840	3.855	3.860	3.863	3.860	3.858	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.855	3.852	3.850	3.842	3.838	3.830	3.825	3.820	3.813	3.808	3.705
C5aT	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	3.650	3.860	3.880	3.891	3.892	3.893	3.894	3.895	3.894	3.890	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.888	3.886	3.882	3.880	3.875	3.870	3.870	3.860	3.855	3.850	3.730



Şekil 4.26 Tras katkılı C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.19 Cüruf katkılı S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

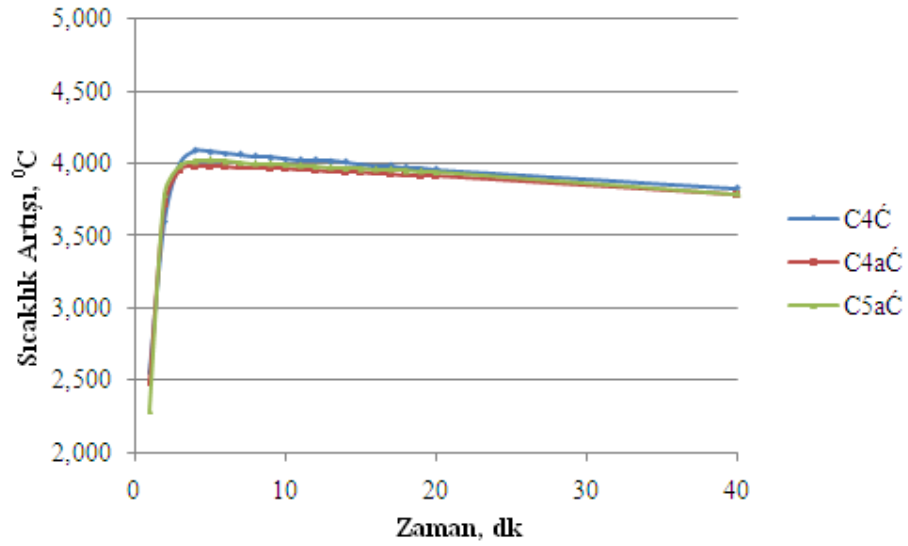
S3C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.800	3.900	4.090	4.100	4.110	4.100	4.090	4.075	4.065	4.055	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4.040	4.033	4.030	4.020	4.000	3.995	3.990	3.980	3.968	3.966	3.835
S4C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.510	3.330	3.970	4.035	4.025	4.000	3.975	3.960	3.950	3.930	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.922	3.915	3.905	3.900	3.885	3.875	3.865	3.855	3.840	3.835	3.680
S5C	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.970	3.590	4.110	4.135	4.125	4.120	4.090	4.080	4.065	4.060	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4.055	4.050	4.045	4.030	4.020	4.010	4.005	3.990	3.980	3.970	3.840



Şekil 4.27 Cüruf katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.20 Cüruf katkılı C çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

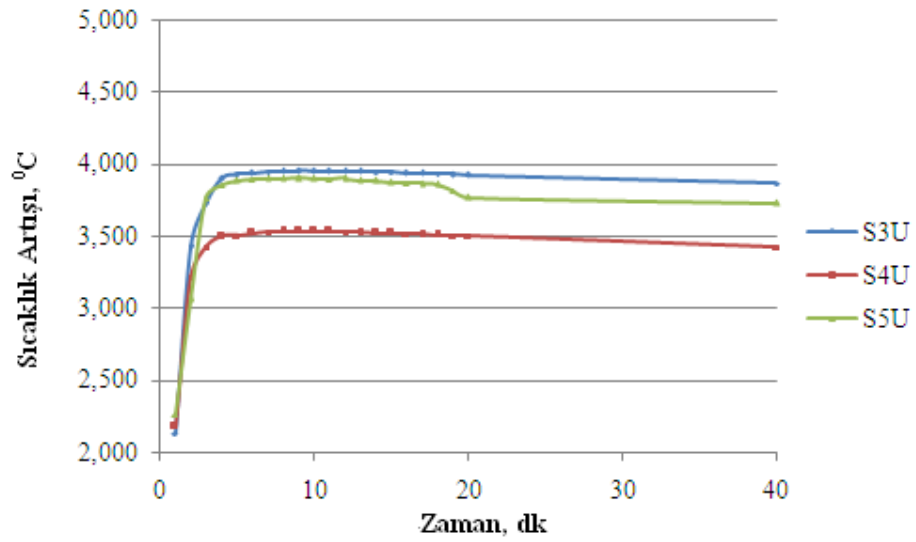
C4Ć	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.550	3.600	4.000	4.088	4.080	4.070	4.065	4.050	4.040	4.030	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4.025	4.020	4.015	4.010	3.990	3.980	3.982	3.970	3.965	3.960	3.830
C4aĆ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.480	3.710	3.950	3.980	3.978	3.975	3.970	3.968	3.965	3.961	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.955	3.950	3.945	3.940	3.935	3.930	3.923	3.920	3.915	3.910	3.780
C5aĆ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.285	3.785	3.985	4.015	4.025	4.015	4.005	4.000	3.995	3.990	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.985	3.980	3.968	3.965	3.963	3.958	3.955	3.950	3.945	3.940	3.790



Şekil 4.28 Cüruf katkılı C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.21 Uçucu kül katkılı S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

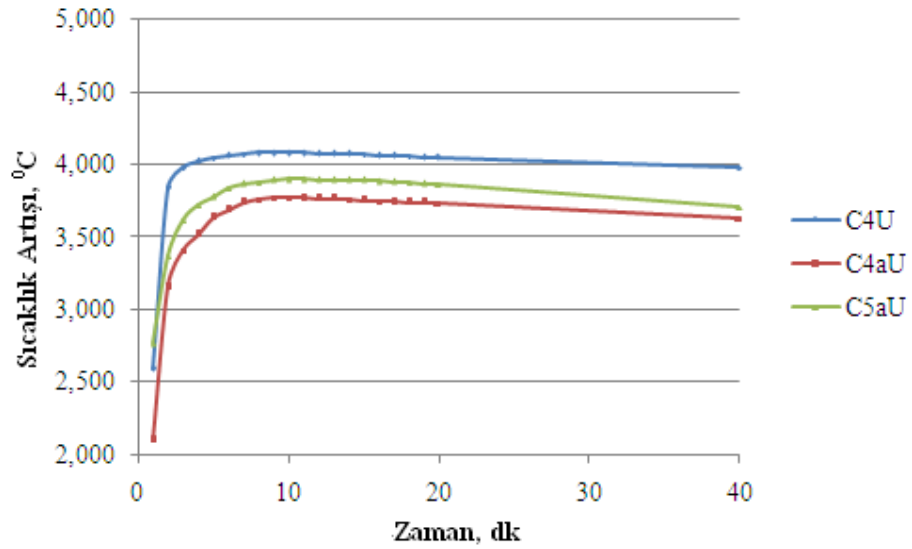
S3U	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2,128	3,428	3,728	3,900	3,928	3,938	3,943	3,948	3,951	3,950	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3,949	3,947	3,945	3,943	3,941	3,938	3,933	3,930	3,926	3,923	3,863
S4U	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.170	3.210	3.420	3.495	3.500	3.520	3.525	3.530	3.530	3.530	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.528	3.525	3.521	3.520	3.515	3.511	3.508	3.505	3.500	3.498	3.420
S5U	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.260	3.060	3.760	3.850	3.880	3.890	3.895	3.898	3.900	3.895	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.892	3.990	3.885	3.880	3.870	3.865	3.860	3.855	3.810	3.765	3.728



Şekil 4.29 Uçucu kül katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.22 Uçucu kül katkılı C çimentolarında sıcaklık artışı değerleri, °C

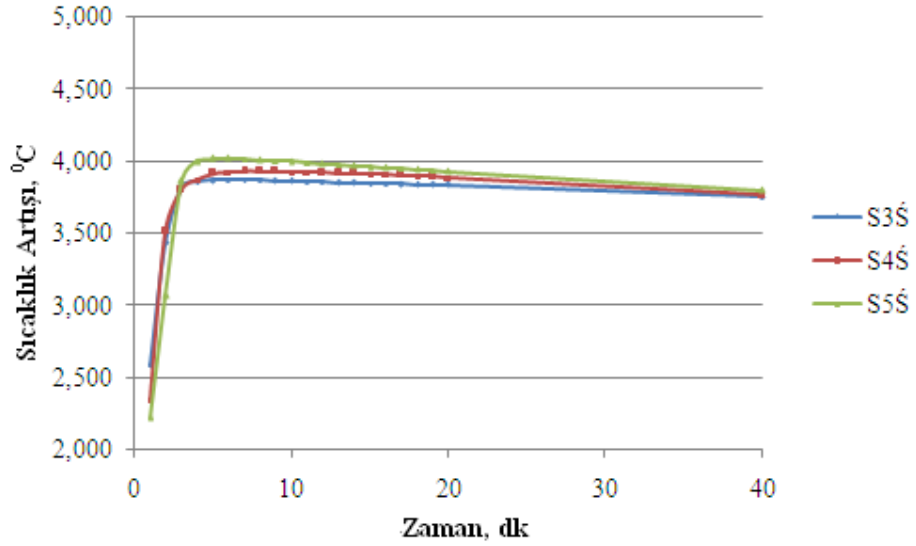
C4U	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.590	3.840	3.980	4.025	4.045	4.060	4.070	4.080	4.080	4.080	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4.079	4.078	4.075	4.072	4.070	4.065	4.060	4.055	4.051	4.048	3.980
C4aU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.095	3.155	3.405	3.515	3.635	3.685	3.735	3.755	3.770	3.768	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.766	3.764	3.763	3.755	3.750	3.746	3.740	3.737	3.735	3.730	3.625
C5aU	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.765	3.365	3.615	3.720	3.775	3.835	3.865	3.875	3.890	3.897	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.897	3.895	3.893	3.892	3.890	3.885	3.880	3.875	3.867	3.863	3.705



Şekil 4.30 Uçucu kül katkılı C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.23 Silis dumanı katkılı S çimentolarında sıcaklık artışı değerleri, °C

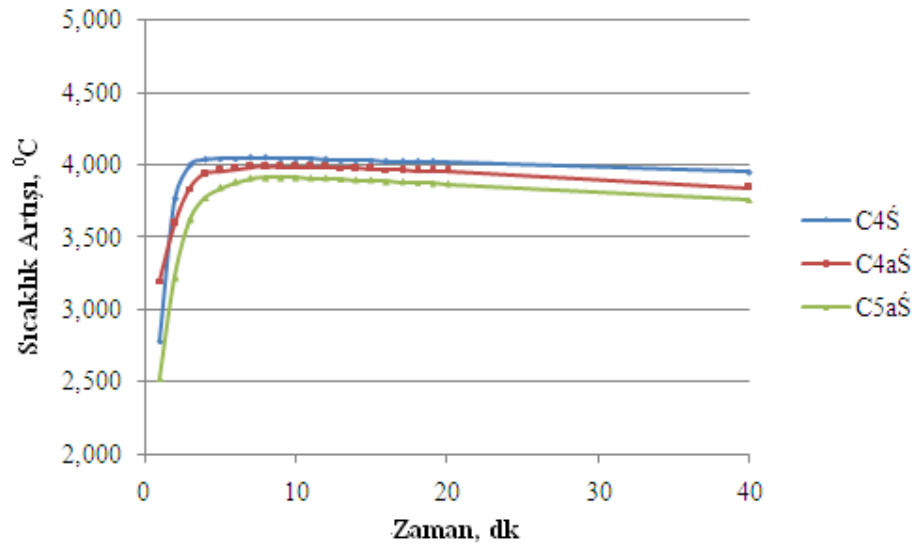
S3Ş	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2,584	3,434	3,824	3,860	3,870	3,875	3,875	3,874	3,867	3,863	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3,860	3,858	3,855	3,850	3,847	3,845	3,843	3,841	3,840	3,838	3,755
S4Ş	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.345	3.515	3.805	3.875	3.920	3.925	3.933	3.933	3.930	3.927	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.925	3.922	3.920	3.915	3.914	3.910	3.905	3.900	3.895	3.885	3.765
S5Ş	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.220	3.070	3.870	4.000	4.020	4.022	4.015	4.010	4.005	4.000	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.990	3.982	3.978	3.970	3.960	3.955	3.950	3.945	3.940	3.930	3.800



Şekil 4.31 Silis dumanı katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.24 Silis dumanı katkılı C çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

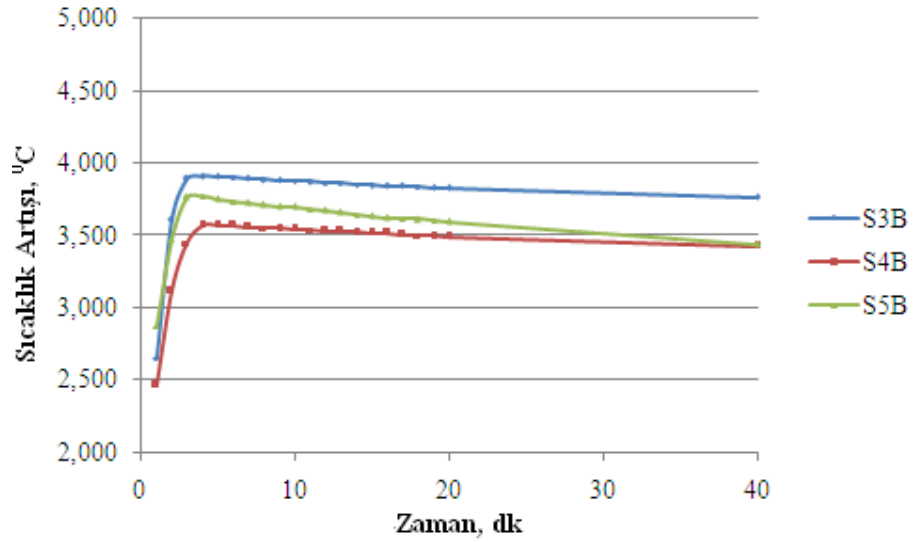
C4Ş	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.780	3.760	4.000	4.035	4.042	4.045	4.047	4.049	4.045	4.042	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	4.040	4.038	4.032	4.030	4.028	4.025	4.023	4.021	4.020	4.018	3.950
C4aŞ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	3.195	3.595	3.835	3.935	3.955	3.970	3.985	3.987	3.987	3.986	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.985	3.982	3.980	3.975	3.970	3.965	3.963	3.960	3.958	3.955	3.840
C5aŞ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.520	3.220	3.620	3.770	3.840	3.880	3.905	3.910	3.911	3.910	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.908	3.905	3.900	3.895	3.890	3.885	3.880	3.875	3.870	3.865	3.755



Şekil 4.32 Silis dumanı katkılı C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.25 Buğday külü katkılı S çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

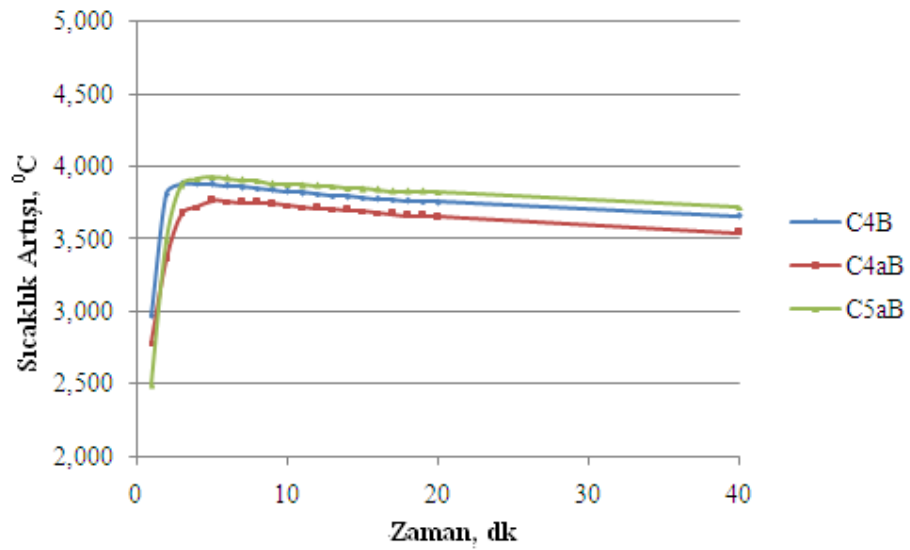
S3B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2,650	3,610	3,890	3,910	3,905	3,900	3,890	3,883	3,880	3,875	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3,870	3,863	3,860	3,850	3,845	3,842	3,840	3,834	3,830	3,825	3,762
S4B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.465	3.115	3.445	3.565	3.570	3.565	3.555	3.550	3.546	3.543	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.535	3.530	3.525	3.520	3.515	3.512	3.512	3.495	3.493	3.486	3.425
S5B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.870	3.470	3.760	3.770	3.750	3.730	3.725	3.710	3.700	3.695	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.680	3.670	3.655	3.640	3.630	3.620	3.615	3.610	3.600	3.590	3.440



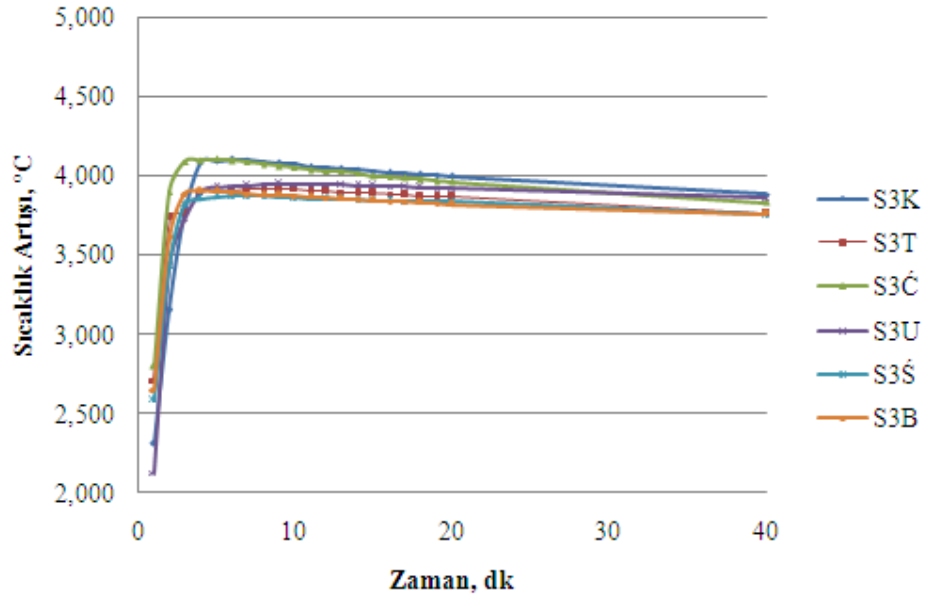
Şekil 4.33 Buğday külü katkılı S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

Tablo 4.26 Buğday küllü katkılı C çimentolarının sıcaklık artışı değerleri, °C

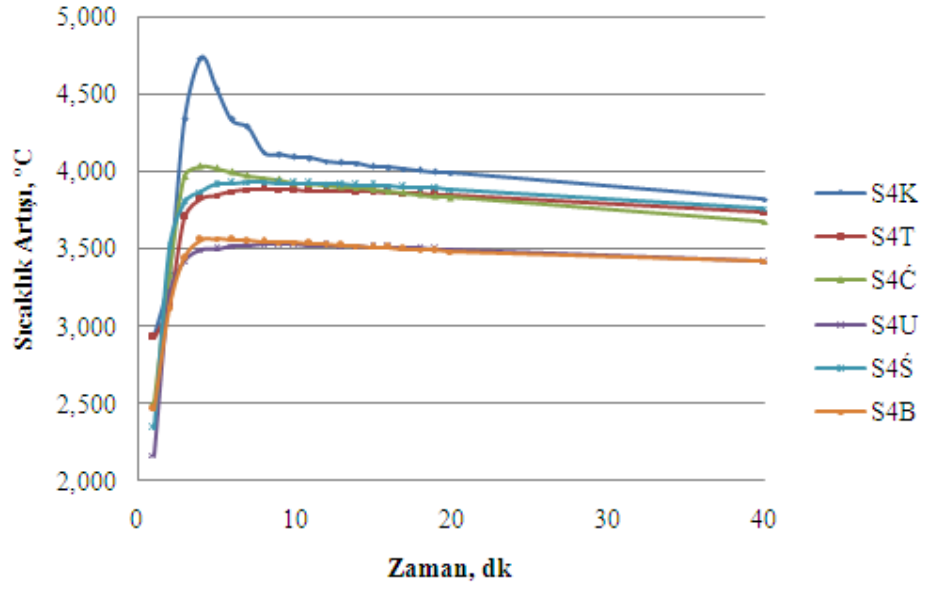
C4B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.968	3.808	3.878	3.880	3.878	3.868	3.858	3.848	3.838	3.828	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.819	3.810	3.798	3.793	3.783	3.776	3.768	3.765	3.758	3.753	3.658
C4aB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.780	3.360	3.670	3.720	3.760	3.755	3.752	3.750	3.740	3.730	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.720	3.710	3.705	3.700	3.690	3.680	3.670	3.660	3.655	3.650	3.540
C5aB	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
	2.490	3.490	3.870	3.915	3.925	3.920	3.905	3.900	3.880	3.875	
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	40
	3.870	3.865	3.860	3.850	3.845	3.840	3.830	3.827	3.825	3.823	3.720



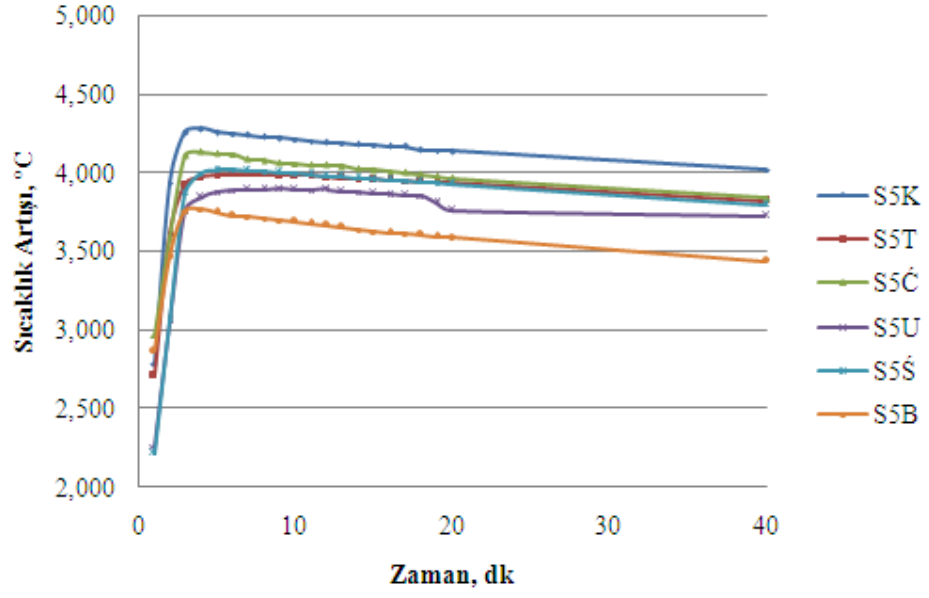
Şekil 4.34 Buğday küllü katkılı C çimentoların sıcaklık artışına etkisi



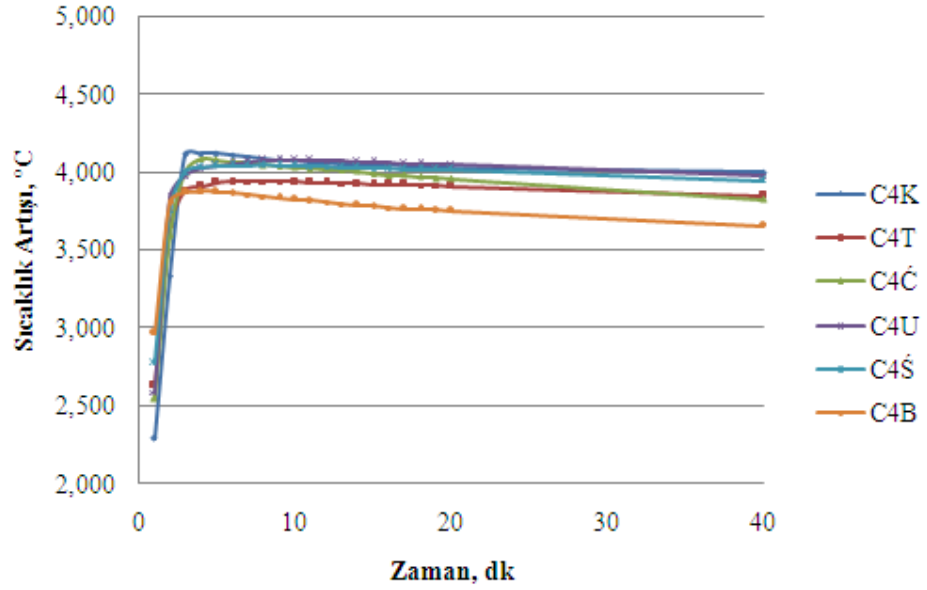
Şekil 4.35 3000 cm²/g inceliğe sahip S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi



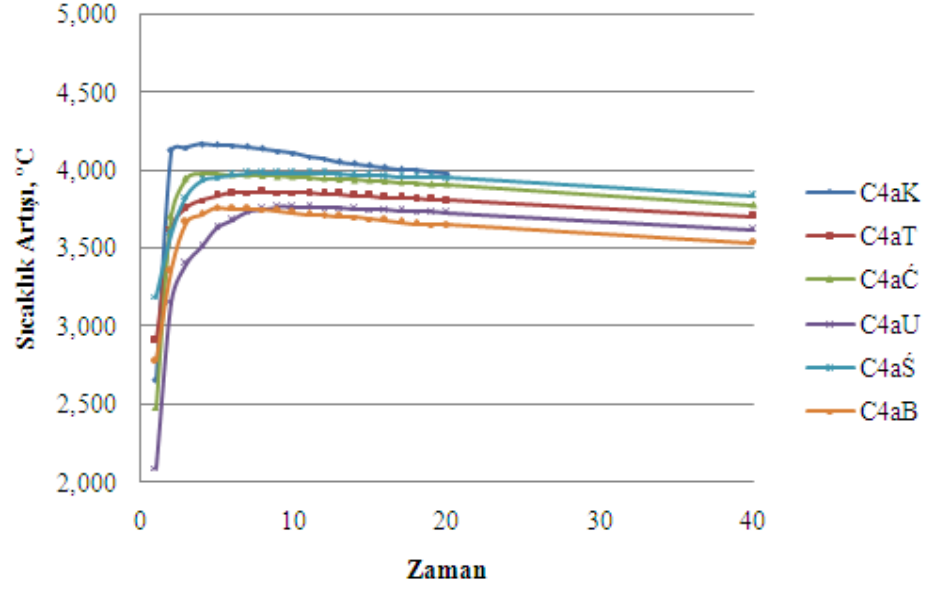
Şekil 4.36 4000 cm²/g inceliğe sahip S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi



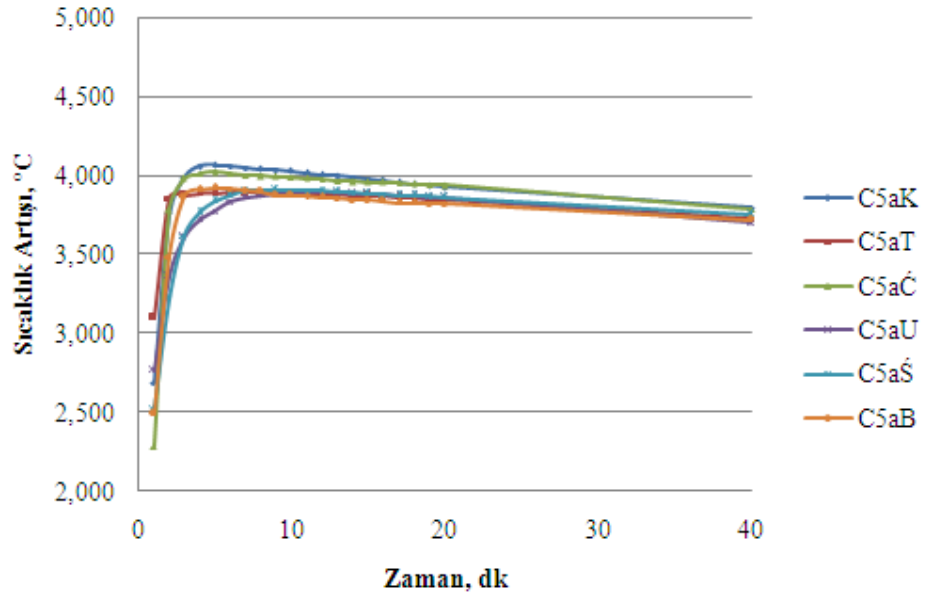
Şekil 4.37 5500 cm²/g inceliğe sahip S çimentolarının sıcaklık artışına etkisi



Şekil 4.38 4000 cm²/g inceliğe sahip C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi



Şekil 4.39 4630 cm² /g inceliğe sahip C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi



Şekil 4.40 5550 cm²/g incelikteki C çimentolarının sıcaklık artışına etkisi

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çözünme ısısı çimento içeriğine göre değerlendirildiğinde, çözünme ısısının sadece C_3A veya C_3S 'ye bağlı olmadığı ikisine bir bağlı olduğu görülmüştür. Anabileşenler arasında ısıya etki eden bileşenlerden C_3S ve C_3A miktarları çimento kompozisyonunda arttıkça çözünme ısısı da miktarla orantılı olarak artmaktadır. S çimentolarında C_3S miktarı, C çimentolarında ise C_3A miktarı fazla olduğundan çözünme ısıları hem hemen hemen birbirine yakındır.

Çözünme ısısı katkıya göre değerlendirildiğinde, kontrol çimentolarında hidrasyon esnasında açığa çıkan ısıнын katkılarına göre daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Deneylerde kullanılan katkılardan tras, cüruf, uçucu kül, silis dumanı ve buğday sapı külü arasında pozolanik aktivitesi yüksek olan buğday sapı külünün çözünme ısısını en çok düşüren pozolan olduğu saptanmıştır.

Trasın, buğday sapı külünden sonra çözünme ısısının düşmesinde etkili olduğu görülmüştür.

Uçucu külün çözünme ısısını çok da düşürmediği gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin kireç içeriği yüksek olan C sınıfı külün kendi başına bağlayıcılık özelliğinden dolayı çözünme ısısına katkıda bulunduğu düşünülmektedir.

Cüruf hızlı soğutulma ile elde edilmiş kimyasal kompozisyonunun çimentoya benzer olmasından dolayı çimento yerine kullanıldığı, çözünme ısısını düşürdüğü bilinmektedir. Ancak bu çalışmada cürufun inceliği düşük olduğundan ısıнын düşmesinde çok etkili olmadığı görülmüştür.

Kullanılan katkıların çimentonun çözünme ısısı ve/veya hidrasyon ısısını etkileyen tek özellik olmadığı farklı kompozisyonlara ve inceliğe sahip hangi tip çimento ile katkı yapıldığının önemli olduğu anlaşılmıştır.

Çözünme ısısı incelik ile değerlendirildiğinde, çimentonun inceliği arttıkça kontrol çimentolarında, silis dumanlı ve buğday sapı külü çimentolarda çözünme ısısının arttığı gözlemlenmiştir. Diğerlerinde ise incelik arttıkça genellikle çözünme ısısı artmıştır. Bu artış S3-S5 ve C4-C5a çimentoları kıyaslandığında daha net görülmektedir.

Çözünme ısısındaki sıcaklık artışı değerlendirildiğinde, aynı incelikte ve aynı gruptaki katkılı çimentolarda uçucu kül ve buğday sapı külü katkılı olanların sıcaklık artışları genellikle diğerlerine göre daha düşüktür.

Bu çalışmada puzolanlar çimentoya %20 oranında ikame edilmiş ve çözünme ısısının değişimi değerlendirilmiştir. Puzolanların çimentodaki katkı yüzdeleri değiştirilerek ve çimento bileşimlerinin ($\%C_3A$ ve C_3S miktarları) arasındaki fark fazla alınarak yapılacak olan çalışmalarda çözünme ısısı ve/veya hidrasyon ısısındaki değişimler de araştırılabilir.

KAYNAKLAR

AKMAN, M.S. ve AKÇAY, B., 2005, Kimyasal beton katkılarının gelişimi ve çimentolarla uyumu, *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*, 24-25 Mart 2005, Ankara, 15-32.

AKMAN, M.S., SARGIN, M., ARIÖĞLU E., Yeni malzemeler-yeni kullanım alanları, *Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongresi*, Genel Rapor, İMO İzmir.

ARUNTA, H.Y., 2006, Uçucu küllerin inşaat sektöründe kullanım potansiyeli, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Der.*, 21 (1), 193-203.

ASTM C186-05, Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement, Vol. 04.01, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

ASTM C311, Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use a Mineral Admixture in Portland Cement-Concrete, Annual Book for ASTM.

ASTM C618-78, Specification for Fly Ash & Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete, American Society For Testing and Materials, USA, 1978.

ATİS, C.D., 2002, Heat evaluation of high-volume fly ash concrete, *Cement and Concrete Research*, 32, 751-756.

ATİS, C.D., TARTICI, H., SEVİM, U.K., ÖZCAN, F., AKÇAGÖZOĞLU, K., YÜZGEÇ, C., 2002, Afşin-Elbistan uçucu külünün beton katkısı olarak kullanılabilirliği, 5. *Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi*, ACE 2002, İTÜ, İstanbul, Türkiye, 161-168.

BENSTED, J., 1981, *Hydration of Portland Cement, Advances in Cement Technology*, Pergamon Press, New York, pp. 307-347.

BERHANE, Z., 1983, Heat of hydration of cement pastes at different temperatures, *Original Research Article Cement and Concrete Research*, Vol. 13, Issue 1, 114-118.

BİNİCİ, H., GÖRÜR, E.B., DURGUN, M.Y., Afşin-Elbistan uçucu külünün tekstil fabrikaları atık küllerinin betonda puzolanik katkı olarak kullanılması, *KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(1), 10-19.

BLANKS, R.F. ve KENNEDY, H.L., 1955, Technology of cement and concrete, Vol. 1, USA.

CABRERA, J.G. ve PLOWMAN, C., 1984, Mechanism and kinetics of hydration of C₃A and C₄AF extracted from cement, *Cem., Concr. Res.*, 14, 238-248.

CATTANEO, A. ve FRIGIONE, G., 1983, Performance of blast-furnace slag cement, *Journal of Cement, Concrete and Aggregates (CCA)*, Vol. 5, Issue 1.

ÇAVDAR, A. ve YETGİN, Ş., Tane inceliğinin traslı çimento özelliklerine etkisi, *Türkiye İnşaat Mühendisliği XVII.Teknik Kongre ve Sergisi*, 15-17 Nisan 2004, İstanbul, 451-459.

DAUGHERTY, K.E. ve FUNNEL, J.E., 1983, The incorporation of low levels of by-products in Portland cement and the effects on cement quality, *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol. 5, No. 1, 14-20.

DAVIS, R.E., CARLSON, R.W., KELLY, J.W., DAVIS, H.E., 1937, Properties of cement and concretes containing fly ash, *ACI J.*, 33 (3), 577-612.

DE SCHUTTER, G., 1999, Hydration and temperature development of concrete made with blast furnace slag, *Cement and Concrete Research*, 29 (1).

DEMİR, A., 2005, Silis dumanı içeren betonların hızlandırılmış kür ile dayanım tahmini, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

DEMİR, İ., June 2009, Aynı oranlarda ikame edilen silis dumanı ve uçucu külün betonun mekanik özelliklerine etkisi, *Int. J. Eng. Research & Development*, Vol.1, No.2.

DEVECİ, A.H., YILMAZ, A.O., KESİMAL, A. VE YILMAZ, E., 2004, Taşhane (Terme) andezitik tüflerinin çimento üretiminde katkı maddesi olarak kullanılabilirliğinin araştırılması, 5 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 13-14 Mayıs 2004, İzmir, Türkiye, 48-55.

DORUM, A., KOÇAK, Y., YILMAZ, B., UÇAR A., 2009, Yüksek fırın cürufunun çimento yüzey özelliklerine ve hidratasyona etkileri, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 19 (8), 47-58.

DOUGLAS, E, ELOLA, A., MALHOTRA, V.M., 1990, Characterization of ground granulated blast-furnace slags and fly ashes and their hydration in Portland cement blends, *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol. 12, No. 2, 38-46.

ERDOĞAN, T.Y., 1993, Atık hammaddelerin inşaat endüstrisinde kullanılması, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu, *Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu Bildiriler El Kitabı*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Ankara.

ERDOĞAN, T.Y., Mart 2007, *Beton*, ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş., Özkan Matbaacılık Gaz. San.ve Tic Şti., Ankara, 975-7064-67-X.

ERDOĞAN, T.S. ve ERDOĞAN, Y.T., 2007, Bağlayıcı Malzemelerin ve Betonun Onbin Yıllık Tarihi, Çimentonun Tarihi Gelişimi, ODTÜ Yayıncılık.

ERDOĞAN, T.S. ve ERDOĞAN, Y.T., Puzolanik Mineral Katkılar ve Tarihi Geçmişleri, 2. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu*.

ERDOĞDU, K., TOKYAY, M., TÜRKER, P., Nisan 2007, *Traslar ve Trashi Çimentolar*, TÇMB/AR-GE/Y99-2, 7.Baskı, Dumat Ofset Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti., Ankara, 975-8136-13-5.

FUKUHARA, M, GOTO, S, ASAGA, K, DAIMON, M, and KONDO, R., 1981, Mechanisms and kinetics of C4AF hydration with gypsum, *Cement and Concrete Research*, Vol. 11, 407-414.

GEBHARDT, R.F., 1993, Why performance standards for hydraulic cement, *Cement, Concrete and Aggregates*, 2 (15), 119-123.

GRZYMEK, J. ve diğ., Hydration of cements with pozzolanic additions, *Proceedings of 7th International Congress on the Chemistry of Cement*, 1980, Paris, 66-71-10.

GÜNDEŞLİ, U., 2008, *Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

HELMUTH, R. 1983, Some questions concerning ASTM standards and methods of testing fly ash for use with Portland Cement, *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol. 5, No. 2, 103-110.

HUANG, C. ve FELDMAN, R.F., 1985, Hydration reactios in Portland cement-silica fume blends, *Cement and Concrete Research*, Vol. 15, No. 4, 585-592.

KAMINSKI, M., ZIELENKIEWICZ, W., 1982, The heats of hydration of cement constituents, *Original Research Article Cement and Concrete Research*, Vol. 12, Issue 5, 549-558.

KASAP, Ö. ve TOKYAY, M., 2004, Betonun eşdeğer yaşının çimento hidratasyon ısıyla tahmini için bir yöntem, *İMO Teknik Dergi*, 3215-3227.

KHAYAT, K.H. ve AITCIN, P.C., 1992, Silica fume in concrete: an overview. Fly ash, silica fume, slag and natural pozzolans in concrete, *Proceedings Fourth International Conference*, ACI-SP-132, İstanbul, Turkey, 835-872.

KILINÇKALE, F.M., 1999, Çeşitli puzolanların puzolonik aktivitesi ve bu puzolanlarla üretilen harçların dayanımı, *İMO Teknik Dergi*, Cilt 10, Sayı 2.

KILINÇKALE, F.M. ve UYAN, M., 1996, Tras çimentolu harçların dayanım ve dayanıklılığına sülfatlı çözeltilerin etkisi, *İMO Teknik Dergi*, 1231-1242.

KISHI, T.ve MAEKAWA, K., 1995, Thermal and mechanical modeling of young concrete based on hydration process of multi-component cement minerals, *Proceedings of the International RILEM Symposium on Thermal Cracking in Concrete at Early Ages*, , London, 11-18.

KOCATAŞKIN, F., 1959, *Beton Teknolojisi*, İTÜ Kütüphanesi, sayı:400, 58-60.

KOKUBU, M., 1969, Fly ash and fly ash cement, *Proceedings of the Fifth International Symposium on the Chemistry of Cement*, 1968, Cement Association of Japan, Tokyo, Part IV, 75-105.

LIWU, M. ve MIN, D., Thermal behavior of cement matrix with high-volume mineral admixtures at early hydration age, *Cement and Concrete Research*, 36 (2006) 1992-1998.

LANGAN, B. W., WENG, K., WARD, M.A., 2002, Effect of silica fume and fly ash on heat of hydration of Portland cement, *Cement and Concrete Research*, 32 (7), 1045-1051.

LEA, F.M., 1970, *The Chemistry of Cement and Concrete*, 3rd Edi., Edward Arnold, 970.

LERCH, W. ve BOUGE, R.H., 1934, Heat of hydration of Portland cement pastes, *J. Nat. Bur. Stand.*, 12, No. 5, 645-64.

LIVESEY, P., DONNELLY, A., TOMLINSON, C., 1991, Measurement of the heat of hydration of cement, *Original Research Article Cement and Concrete Composites*, Vol. 13, Issue 3, 177-185.

MALHOTRA, V.M. ve RAMEZANIANPOUR, A.A., 1994, *Fly Ash in Concrete*, 2nd ed., CANMET, Canada.

MANMOHAN, D. ve MEHTA, P.K., 1981, Influence of pozzolanic, slag, and chemical admixtures on pore size distribution and permeability of hardened cement pastes, *Cement, Concrete. and Aggregates*, Vol. 3, No. 1, 63-67.

MASSAZZA, F., 1993, Pozzolanic cements, *Cement and Concrete Composites*, Volume 15, Issue 4, 185-214.

MASSAZZA, F., 1999, Pozzolanas and durability of concrete, Çimento ve Beton Dünyası, *Journal of TÇMB*, Ankara

MINDESS, S. and YOUNG, J.F., 1981, *Concrete*, Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 0-13-167106-5.

MOSTAFA, N.Y. ve BROWN, P.W., 2005, Heat of hydration of high reactive pozzolans in blended cements: isothermal conduction calorimetry., *Thermochimica Acta*, 435, 162-167.

NEVILLE, A.M., 1981, *Properties of Concrete*, 3rd Edi., Pitman Books Limited, Great Britain, Longman Scientific&Technical, 0-582-40626-9.

NEVILLE, A.M., 1987, *Properties of Concrete*, Pitman Publishing, pp.77-81.

ÖZTURAN, T., 1993, Betonda Uçucu Kül, Silis Dumanı, Cüruf ve Doğal Puzolanların Kullanımı Konferansının Değerlendirilmesi, Endüstriyel Katı Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, *Bildiriler Kitabı*, 18-19 Kasım 1993, 57-78.

PANE, I. ve HANSEN, W., 2005, Investigation of blended cement hydration by isothermal calorimetry and thermal analysis, *Cement and Concrete Research*, 35, 1155-1164.

PEKMEZCİ, B.Y., 2006, Yüksek performanslı çimentolu ürünlerin otojen rötre özellikleri, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü.

POOLE, T., 2007, Revision of test methods and specifications for controlling heat of hydration in hydraulic cement, SN3007, *Portland Cement Association*, Skokie, Illinois, USA, 42.

POSTACIOĞLU, B., 1986, *Bağlayıcı Maddeler*, Teknik Kitaplar Yayınevi, İstanbul, 5-38.

RAHHAL, V.E.ve BATIC, O.R., 1994, Mineral admixtures contribution to the development of heat of hydration and strength, *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol. 16, No. 2, 150-158.

SAĞLIK, A., SÜMER, O., TUNÇ, E., KOCABEYLER, M.F., ÇELİK, R.S., 2009, Borlu aktif belit (BAB) çimentosu ve DSİ projelerinde uygulanabilirliği, *DSİ Teknik Bülten*, Sayı 105, 1-46.

SAKAI, E., MIYAHARA, S., OHSAWA, S., LEE, S.H., DAIMONA, M., 2005, Hydration of fly ash cement, *Cement and Concrete Research*, 35, 1135-1140.

SANCHEZ DE ROJAZ, M.I., LUXAN, M.P., FRIAS, M., GARCIA, N. 1993, The influence of different additions on Portland cement hydration heat, Original Research Article Cement and Concrete Research, Vol. 23, Issue 1, 46-54.

SHANNAG, M.J. ve YEĞİNOBALI, A., 1995, Properties of pastes, mortars and concretes containing natural puzzolan, *Cement and Concrete Research*, 25.

SNELSON, D.G., WILD, S., O'FARRELL, M., 2008, Heat of hydration of Portland cement-metakaolin-fly ash, *Cement and Concrete Research*, 38, 832-840.

SWAMY, R.N., 1986, *Cement Replacement Materials*, Blackie & Son Ltd., Londra.

TARTICI, H., 2008, *Beton hidratasyon ısısı basınç ve çekme dayanımı ve boşluk oranını etkileyen bazı faktörlerin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi.

TAYLOR, H.F.W., 1997, *Cement Chemistry*, 2nd Edition, Thomas Telford, London.

TOKYAY, M. ve ERDOĞDU, K., 2007, *Cüruflar ve Cüruflu Çimentolar*, TÇMB/AR-GE/Y97-2, 7. Baskı, Dumat Ofset Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti., Ankara, 975-8136-03-08.

TOKYAY, M. ve KASAP, Ö., 2004, Beton eşdeğer yaşının çimento hidratasyon ısısıyla tahmini için bir yöntem, *İMO Teknik Dergi*, Yazı No: 215, 3215-3227.

TS EN 197-1, *Genel Çimentolar-Bileşim Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*, Genel Çimentolar-Bölüm 1, 2002.

TS 687, *Çimento Kimyasal Analiz Metotları*, Çimento Hidratasyon Isısı Tayin-Bölüm 3, 1994.

TS 13353, *Borlu Aktif Belit (BAB) Çimentosu-Tarifler, Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*, 2008

TÜRKER, P., ERDOĞAN, B., KATNAŞ, F., YEĞİNOBALI, A., 2004, *Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri*, TÇMB/AR-GE/Y03.03, Dumat Ofset Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti., Ankara, 975-8136-18-6.

ULUSOY, A., 2008, Uçucu kül-tekstil fabrikası atık külü ve bazaltik pomzanın tuğla üretiminde katkı olarak kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi.

ÜN, H., 2007, *Yapı malzemesi ders notları*, Pamukkale Üniversitesi, 114-17.

WALLER, V., DE LARRARD, F., AND ROUSSEL, P., 1996, Modelling the temperature rise in massive HPC structures, *4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete*, RILEM S.A.R.L., Paris, 415-421.

WHITE, M.A., 2006, Concrete, *Journal of Chemical Education*, Vol. 83, No. 10, 1425-1427

YEĞİNOBALI, A., 2002, *Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı*, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. Ankara, 64.

YEĞİNOBALI, A., 2004, Çimento ve çimento esaslı malzemenin geleceği, <http://www.ymkurultay.org/pdf/YMK-01.pdf>, [28 Ocak 2004].

YEĞİNOBALI, A., 2007, *Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı*, TÇMB/AR-GE/Y01.01, 5.Baskı, Dumat Ofset Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti., Ankara, 975-8136-14.

YEĞİNOBALI, A., 2008, *Çimento Yeni Bir Çağın Malzemesi*, Dumat Ofset Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti., Ankara, 975-8136-17-8.

YEĞİNOBALI, A. ve ERTÜN, T., 2007, *Çimentoda Yeni Standardlar ve Mineral Katkılar*, TÇMB/AR-GE/Y04.01, Dumat Ofset Matbaacılık San. Tic. Ltd. Şti., Ankara, 975-8136-23.

YETGİN, Ş. ve ÇAVDAR, A., 2005, Doğal puzolan katkı oranının çimentonun dayanım, işlenebilirlik, katılaşma ve hacim genleşmesi özelliklerine etkisi, *Science and Eng. J. of Fırat Univ.*, 17(4), 687-692.

ZHANG, Y., SUN, W., LIN, S., 2002, Study of the Heat of hydration of binder paste in high performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 32 (9), 1483-1488.

ÖZGEÇMİŞ

Özlem Akyazı 1985 yılında Balıkesir’de doğdu. İlköğretimini Atatürk İlköğretim Okulu’nda, ortaöğretim ve liseyi Sırrı Yırcalı Anadolu Lisesi’nde Balıkesir’de tamamladı. Lisans öğrenimine 2003 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi’nde başladı. 2008 yılında lisans öğrenimini tamamladıktan sonra, 2009 yılında İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı.

