

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**SERTLEŞMEKTE OLAN BETONUN GÖRÜNEN
AKTİVASYON
ENERJİSİNİ BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Ali Sami GÜNEŞ**

Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Programı : YAPI MÜHENDİSLİĞİ

OCAK 2008

**SERTLEŞMEKTE OLAN BETONUN GÖRÜNEN
AKTİVASYON
ENERJİSİNİ BELİRLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İnş. Müh. Ali Sami GÜNEŞ
(501061011)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 24 Aralık 2007
Tezin Savunulduğu Tarih : 28 Ocak 2008**

**Tez Danışmanı : Doç.Dr. Yılmaz AKKAYA
Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Mehmet Ali TAŞDEMİR (İ.T.Ü.)
Prof.Dr. Fevziye AKÖZ (Y.T.Ü.)**

OCAK 2008

ÖNSÖZ

Bu tezi yöneten ve çalışmalarım sırasında değerli bilgi ve yardımları ile yanımda olan sayın hocam Doç. Dr. Yılmaz Akkaya' ya,
Deneysel çalışmalarımda verdikleri destek ve yardımlar için İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemesi Marmaray Laboratuvarı çalışanlarından Mehmet Ali Küçük' e,
Namık Özkan' a ve tüm laboratuvar çalışanlarına,
Gösterdikleri ilgi ve destekleri için aileme,

Ocak, 2008

teşekkür ederim.
Ali Sami GÜNEŞ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	ii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xii
1.GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI VE GENEL BİLGİLER	4
2.1. Erken Yaş Betonu Üzerindeki Isı Etkileri	4
2.1.1. Dayanım-Isı Çıkışı İlişkisi	5
2.1.2. Boyut Etkisi	6
2.1.3.Ortam Sıcaklığının Etkisi	7
2.2. Olgunluk ve Eşdeğer Yaş Kavramı	8
2.3. Arrhenius Kanunu ve Görünen Aktivasyon Enerjisi Kavramı	12
2.4. Görünen Aktivasyon Enerjisine Etki Eden Faktörler	13
2.4.1.Beton Karışım Özelliklerinin Etkisi	13
2.4.2. Gelişim Derecesi Etkisi	14
2.4.3.Isı Etkisi	14
2.5. Görünen Aktivasyon Enerjisi Değerlerinin Belirlenme Yöntemleri	15
2.5.1.Deneysel Yöntemler	16
2.5.1.1. Hız Yöntemi	16
2.5.1.2. Süperpozisyon Yöntemi	18
2.5.1.3. Türetilmiş Hız Yöntemi	20
2.5.2. Yaklaşık Yöntemler	21
2.5.2.1. Matematiksel Yöntemler	21
2.5.2. Kimyasal Yöntemler	22
2.6. Görünen Aktivasyon Enerjisi’ nin Belirlenmesinde Kullanılan Deney Yöntemleri	23
2.6.1.Mekanik Deneyler	23
2.6.2. Kalorimetrik Deneyler	23
2.6.2.1. Yarı Adyabatik Deneyler	24
2.6.2.2. Adyabatik Deneyler	25
2.6.3. İzotermal Deneyler	26
3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR	27
3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması	27
3.1.1. Agregalar	27
3.1.2. Çimento	31
3.1.3. Su	32
3.1.4. Katkı maddeleri	32

3.1.4.1. Yeni İkinci Nesil Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkısı	33
3.1.4.2. Hava Sürükleyici Beton Katkısı	33
3.2. Beton Karışımları	34
3.3. Üretimde İzlenen Sıra	35
3.4. Numune Boyutları ve Şekilleri	36
3.5. Numune Kodlarının Belirlenmesi	36
3.6. Taze Beton Deneyleri	37
3.7. Kalorimetrik Deneyler	37
3.8. Mekanik Deneyler	37
4.DENEY SONUÇLARI	38
4.1. Deney Sonuçları	38
4.1.1. Taze Beton Deneyi Sonuçları	38
4.1.1.1. Çökme Deneyi	38
4.1.1.2. Birim Ağırlık Deneyi	38
4.1.1.3. Hava İçeriği Deneyi	38
4.1.2. Kalorimetrik Deney Sonuçları	39
4.1.2.1. Yarı Adyabatik Deneyler	39
4.1.3. Mekanik Deney Sonuçları	41
4.1.3.1. Silindir Basınç Deneyleri	41
4.2. Aktivasyon Enerjisi Değerlerinin Hesaplanması	41
4.2.1. Kalorimetrik Deneyler Kullanılarak Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması	41
4.2.2. Mekanik Deneyler Kullanılarak Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması	45
4.2.3. Yaklaşık Yöntemler Kullanılarak Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması	47
5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ	48
5.1. 1. Karışıma Uygulanan Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	48
5.1.1. Kalorimetrik Deneyler	48
5.1.2. Yaklaşık Yöntemler	49
5.2. 2. Karışıma Uygulanan Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi	50
5.2.1. Kalorimetrik Deneyler	50
5.2.2. Mekanik Deneyler	51
5.2.3. Yaklaşık Yöntemler	52
5.3. Aktivasyon Enerjisi Değerlerinin Genel Olarak İrdelenmesi	52
5.4. 1. ve 2. Karışıma Uygulanan Deneylerinden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması	56
6.GENEL SONUÇLAR	58
6.1.Genel Sonuçlar	58
6.2.İleri Çalışmalar	59
KAYNAKLAR	60
EKLER	63
ÖZGEÇMİŞ	85

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1 : Karışımlarda Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri.....	28
Tablo 3.2 : Karışımlarda Kullanılan Agregaların Elek Analizi Sonuçları.....	29
Tablo 3.3 : Karışımlarda Kullanılan Çimentoların Kimyasal Özellikleri.....	31
Tablo 3.4 : Karışımlarda Kullanılan Çimentoların Fiziksel Özellikleri.....	32
Tablo 3.5 : Kullanılan Süperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri.....	33
Tablo 3.6 : Kullanılan Hava Sürükleyici Beton Katkısının Teknik Özellikleri.....	34
Tablo 3.7 : 1 m ³ Teorik Beton Bileşimi ve Özellikleri.....	35
Tablo 3.8 : Üretilen Beton Numunelerinin Kodları.....	36
Tablo 4.1 : Taze Beton Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar.....	39
Tablo 4.2 : Silindir Basınç Deneylerinde Kullanılan Süreler ve Basınç Dayanımları.....	41
Tablo 4.3 : Hız Yöntemi Kullanılarak Hesaplanan Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-1).....	42
Tablo 4.4 : Hız Yöntemi Kullanılarak Hesaplanan Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2).....	43
Tablo 4.5 : Türetilmiş Hız Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-1, K-2).....	44
Tablo 4.6 : Hız Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2).....	45
Tablo 4.7 :Türetilmiş Hız Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2).....	46
Tablo 4.8 : FHP Yönteminden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri.....	47
Tablo B.1 : K-1-10 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları.....	74
Tablo B.2 : K-1-15 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları.....	75
Tablo B.3 : K-1-20 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları.....	76
Tablo B.4 : K-1-25 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları.....	76
Tablo B.5 : K-1-35 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları	77
Tablo B.6 : K-2-10 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları.....	78
Tablo B.7 : K-2-15 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları.....	79
Tablo B.8 : K-2-20 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları.....	80

Tablo B.9 : K-2-25 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları.....	80
Tablo B.10 : K-2-35 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları.....	81
Tablo C.1 : K-2-10 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları.....	82
Tablo C.2 : K-2-15 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları.....	82
Tablo C.3 : K-2-20 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları.....	83
Tablo C.4 : K-2-25 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları.....	83
Tablo C.5 : K-2-35 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları.....	84

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 : Erken Yaşlardaki Beton Dayanımı ve Isı Çıkışı İlişkisi.....	6
Şekil 2.2 : Beton Boyutlarının Isı Artışı Üzerindeki Etkileri.....	7
Şekil 2.3 : Kür Sıcaklığının Beton Basınç Dayanımı Üzerine Etkisi.....	8
Şekil 2.4 : Betonun Olgunluk İndeksi-Dayanım İlişkisine Sıcaklığın Etkisi.....	9
Şekil 2.5 : Beton Dayanımının Belirlenmesinde Olgunluk ve Eşdeğer Yaş Metotlarının Kullanılması.....	12
Şekil 2.6 : Ea Değerlerinin Hidratasyon Isısı İle Değişimi.....	14
Şekil 2.7 : Ea' nin Gelişim Derecesi ve Sıcaklığa Olan Bağlılığının Şematik Olarak Gösterimi.....	15
Şekil 2.8 : Hız Yöntemi.....	18
Şekil 2.9 : Süperpozisyon Yöntemi.....	19
Şekil 2.10 : Türetilmiş Hız Yöntemi.....	20
Şekil 3.1 : Agregaların Granülometri Eğrileri.....	29
Şekil 3.2 : Karışım Granülometrisi ve Referans Eğrileri (K-1).....	30
Şekil 3.3 : Karışım Granülometrisi ve Referans Eğrileri (K-2).....	30
Şekil 4.1 : Yarı Adyabatik Deney Düzeneginin Şematik Olarak Gösterimi.....	40
Şekil 4.2 : Hidratasyon Derecelerinin Zamana Bağlı Olarak Gelişimi.....	42
Şekil 4.3 : Türetilmiş Hız Yönteminin Uygulanması (Kalorimetrik Deneyler)	44
Şekil 4.4 : Basınç Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Değişimleri (K-2)	45
Şekil 4.5 : Türetilmiş Hız Yönteminin Uygulanması (Mekanik Deneyler).....	46
Şekil 5.1 : Aktivasyon Enerjilerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi (K-1)	48
Şekil 5.2 : Yaklaşık Yöntemlerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-1)	49
Şekil 5.3 : Kalorimetrik Deneylerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjilerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi (K-2).....	50
Şekil 5.4 : Mekanik Deneylerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjilerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi (K-2).....	51
Şekil 5.5 : Yaklaşık Yöntemlerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2).....	52
Şekil 5.6 : Farklı Yöntemlerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-1).....	53
Şekil 5.7 : Farklı Yöntemlerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2).....	54
Şekil 5.8 : Aktivasyon Enerjilerinin Hidratasyon Derecelerine Bağlı Olarak Değişimi.....	55

Şekil 5.9	: Aktivasyon Enerjilerinin Hidratasyon Isılarına Bağlı Olarak Değişimi.....	55
Şekil 5.10	: 1. ve 2. Karışıma Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması.....	56
Şekil 5.11	: 1. ve 2. Karışıma Uygulanan Yaklaşık Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması	57
Şekil A.1	: K-1-10 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	64
Şekil A.2	: K-1-10 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	64
Şekil A.3	: K-1-15 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	65
Şekil A.4	: K-1-15 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	65
Şekil A.5	: K-1-20 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	66
Şekil A.6	: K-1-20 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	66
Şekil A.7	: K-1-25 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	67
Şekil A.8	: K-1-25 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	67
Şekil A.9	: K-1-35 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	68
Şekil A.10	: K-1-35 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	68
Şekil A.11	: K-2-10 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	69
Şekil A.12	: K-2-10 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	69
Şekil A.13	: K-2-15 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	70
Şekil A.14	: K-2-15 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	70
Şekil A.15	: K-2-20 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	71
Şekil A.16	: K-2-20 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	71
Şekil A.17	: K-2-25 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	72
Şekil A.18	: K-2-25 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	72
Şekil A.19	: K-2-35 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrileri.....	73
Şekil A.20	: K-2-35 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrileri.....	73

SEMBOL LİSTESİ

M	: Olgunluk İndeksi
T	: ΔT Zaman Aralığındaki Ortalama Sıcaklık
T_0	: Temel Alınan Sıcaklık
t	: Zaman
Δt	: Zaman Aralığı
t_e	: Referans Sıcaklıktaki Eşdeğer Yaş
R	: Evrensel Gaz Sabiti
T_r	: Referans Sıcaklık
K	: Hidratasyon Kinetiğine Bağlı Bir Sabit
H	: Isı Geçmişi
A	: Orantısallık Sabiti
E_a	: Görünen Aktivasyon Enerjisi.
α	: Gelişim Derecesi
$H(t)$	: 0-t Aralığındaki Hidratasyon Isısı
H_s	: Toplam Hidratasyon Isısı
$Sc(t)$	: 0-t Aralığındaki Basınç Dayanımı
Sc_s	: 28 Günlük Basınç Dayanımı
f	: Gelişim Derecesi α 'nın Fonksiyonu
f_E	: E_a Düzeltme Faktörü.
C	: Numunenin Özgül Isısı
θ	: Numunenin Sıcaklığı
P	: Isı Kaybı
a, b	: Kalorimetrenin Isı Kaybı Katsayıları
T_c	: Kontrol Isısı
m_v	: Suyun Ağırlığı
c_w	: Suyun Özgül Isısı
θ	: Suyun Sıcaklığı
f_w	: Ortam Sıcaklığı
m_c	: Çimentonun Kütlesi
Q	: Kümülatif Hidratasyon Isısı

SERTLEŞMEKTE OLAN BETONUN GÖRÜNEN AKTİVASYON ENERJİSİNİN BELİRLENMESİ

ÖZET

Hidratasyon süreci başladığı andan itibaren, betonun bünyesinde gerçekleşen ekzotermik reaksiyonların doğal bir sonucu olan ısı çıkışı gözlenir. Hidratasyon ısısı çıkışına paralel olarak dayanım kazanma miktarında değişim çevrenin ısısal koşullarına da bağlı bir biçimde gelişmektedir. Genel anlamda 4 evrede özetlenen betonun dayanım kazanma sürecinin erken yaş evresi, ısısal hesaplamaların doğru ve güvenilir bir biçimde yapılabilmesi için, yeterli imkan vermektedir.

Betonarme inşaatlarda, kalıp sökümü, öngerme gibi kritik işlemlerin güvenli ve ekonomik bir biçimde planlanabilmesi ve uygulanabilmesi, buna bağlı olarak tamamlanma süresinin kısaltılabilmesi için hidratasyon süreci başlamış olan betonun erken yaşlarındaki ısı artışının ve buna bağlı olarak gerçekleşen dayanım gelişiminin doğru olarak tahmin edilmesi gerekir

Betonun, erken yaşlarından itibaren sahip olduğu sıcaklık geçmişinden yola çıkarak zamana ve ortam ısisına da bağlı olarak mekanik özelliklerinin doğru bir biçimde tahmin edilmesi “olgunluk metodu” olarak adlandırılmaktadır. Olgunluk metodlarının kullanılması suretiyle elde edilen eşdeğer yaş değerlerinin doğru bir biçimde belirlenmesinde, görünen aktivasyon enerjisi hesaplamalarına ihtiyaç duyulmaktadır.

Çeşitli yöntemlerle hesaplanan görünen aktivasyon enerjisi değerlerinin gerçeğe en uygun bir biçimde belirlenebilmesi, kullanılan yöntemlerdeki hassaslığa ve deneysel ölçümlerin güvenilirliğine bağlıdır. Betonun, görünen aktivasyon enerjisinin hesaplanması için kullanılan başlıca yöntemler, kalorimetrik, mekanik ve yaklaşık yöntemlerdir. Kolaylığından ötürü mekanik yöntemler sıkça kullanılsa da, ısı gelişimi, en doğru biçimde ancak kalorimetrik yöntemlerle hesaplanabilir.

Bu tez çalışması kapsamında üretilen 2 karışımdan, 5 farkı sıcaklık değeri için (10°C , 15°C , 20°C , 25°C , 35°C) toplam 30 adet karışım üretilmiştir. Bu karışımların hepsinde, su/çimento oranı 0,42 olarak alınmıştır. Vibrasyon süreleri 9sn olarak uygulanmıştır. Ayrıca, karışımda süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı malzemesi kullanılmıştır. Üretilen beton numunelerin, kalorimetrik ve mekanik deneyler yardımıyla erken yaş evreleri boyunca basınç dayanımı ve ısı gelişimleri incelenmiş ve elde edilen veriler sonucunda görünen aktivasyon enerjisi hesaplamaları yapılmıştır.

Deneylerde kullanılan betonların görünen aktivasyon enerjisi değerler aralıkları 1. karışım için (K-1), 20°C ’nin altında $34300\text{--}42100\text{ J/mol}$, 20°C ’nin üstünde 26440J/mol , 2. karışım için (K-2), 20°C ’nin altında $37380\text{--}43760\text{ J/mol}$, 20°C ’nin

üstünde 31000 J/mol olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların literatürde belirtilen değerlere uygun olduğu görülmüştür.

DETERMINATION OF APPARENT ACTIVATION ENERGY OF HARDENING CONCRETE

SUMMARY

From the moment hydration process starts, heat output, which is a natural effect of exothermic reactions inside the concrete is observed. The change of resistance acquisition amount, parallel to hydration heat output, develops depending on the heat conditions of the environment. The early age step of concrete's resistance acquisition progress, generally summarized in four steps, gives appropriate possibility to calculate heat in an accurate and certain way.

In reinforced concrete structures, planning and usage of critical processes like form stripping and pre-tension and according to that to shorten the completion of the construction, it is necessary to predict in a right way the heat rise of concrete of which hydration process has started in its early steps and thus occurring resistance development.

In addition to depending on time and environment heat also by evaluating its heat progress from the early ages; the correct estimation of concrete's mechanical properties is called "maturity method". Apparent activation energy calculations are needed to determine equivalent moist accounts in a right way by using maturity method. Determining in the most realistic way of apparent activation energy accounts; calculated in various techniques, depends on sensitivity of used methods and reliability of experimental measurements.

The most common techniques used to calculate the apparent activation energy of the concrete are colorimetric and mechanical methods. Even though mechanical methods are often used because of their easiness; heat process can only be calculated with colorimetric methods in the most accurate way.

30 sums of mixture are propagated from 2 mixtures produced in the scope of that thesis study for 5 different heat accounts (10°C , 15°C , 20°C , 25°C , 35°C). In all of these mixtures; water/concrete rate is 0,42. Vibration durations are 9 seconds. Also inside the mixture, superplasticiser and air-entraining additive materials are used. Data gathered from hardening concrete and colorimetric and mechanical experiments are analysed then results are evaluated. At the end of applied experimental studies; apparent activation energy values of the concrete mixtures are determined.

The apparent activation energy account gaps in concretes used in experiments were calculated for the 1st Mixture (K-1), below 20°C as 34300–42100 J/mol and above

20 ° C as 26440 J/mol, for the 2nd Mixture (K-2) below 20 ° C as 37380–43760 J/mol and above 20 ° C as 31000 J/mol.

It has been seen that the acquired results are appropriate to the literature.

1. GİRİŞ

Beton, çimento, su, agrega ve kimyasal ve/veya mineral katkı maddelerinin homojen olarak karıştırılmasından oluşan, başlangıçta plastik kıvamda olup, priz öncesi şekil verilebilen, zamanla katılaşp sertleşerek mukavemet kazanan bir yapı malzemesidir.

Çoğu zaman şantiyelerde ve arazi koşullarında büyük miktarlarda üretilen betonun, karışımının kontrolü son derece güçtür, bu nedenle daha homojen üretim yöntemleri tercih edilmektedir. Amaç, mümkün olduğu kadar boşluksuz, ısı değişimlerine ve dış etkenlere karşı dayanıklı, ayrıca servis ömrü yüksek betonlar elde etmektir. Ne var ki, en iyi koşullarda üretilen betonlarda bile, malzeme, işçilik ve bakım hatalarından kaynaklanan kusurlar ve beton içerisinde, çeşitli ısısal değişimlerden, termik etkilerden oluşan çatlaklar meydana gelmektedir.

Standartlara uygun bir beton elde edebilmek için, beton karışımına giren çimento, agrega, su ve çeşitli katkı oranlarını iyi ayarlamak, üniform hale gelinceye kadar karıştırmak ve standartlara uygun bir biçimde kalıplara yerleştirmek gerekir. Ancak, bunlar yeterli olmaz, bunların ötesinde erken yaş evrelerinde belirli bir süre uygun bakım sıcaklıklarında kür uygulanması gerekir.

Betonarme inşaatlarda, kalıp sökümü, öngerme gibi kritik işlemlerin güvenli ve ekonomik bir biçimde planlanabilmesi ve uygulanabilmesi, buna bağlı olarak tamamlanma süresinin kısaltılabilmesi için hidrasyon süreci başlamış olan betonun erken yaşlarındaki ısı artışının ve buna bağlı olarak gerçekleşen dayanım gelişiminin doğru olarak tahmin edilmesi gerekir [1].

Betonun dayanım gelişimini, maruz kaldığı sıcaklık ve zamana bağlayan matematiksel fonksiyonlarla, mekanik ve kalorimetrik deneyler vasıtasıyla doğru bir biçimde tahmin etmek mümkündür. Bu yöntem; “olgunluk metodu” olarak adlandırılmaktadır. Bir diğer ifadeyle olgunluk, betonda sıcaklık ve zamanın ortak etkisini ele alarak betonun dayanımını tahmin eden bir yöntemdir [1].

Betonda olgunluk kavramı ilk olarak 1940'ların sonu 1950'lerin başlarında yapılan betonun buhar bakımı çalışmalarıyla ortaya çıkmıştır [1–4]. Farklı yüksek sıcaklıklarda yapılan bakım sırasında bakım süresi ve bakım sıcaklığının, betonun dayanım gelişimi üzerindeki ortak etkisinin saptanması gereksinimi, olgunluk konusundaki, çok bilinen, Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunun ortaya çıkmasına neden olmuştur [1]. Nurse- Saul olgunluk fonksiyonu, betonun dayanım gelişiminin pratik bir biçimde tahmin edilebilmesine imkan sağlamaktadır.

Kolaylığından ve hızlı sonuç verebilme özelliğinden dolayı, Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu çok yaygın olarak kullanılsa da birtakım eksik yönleri de içerisinde barındırmaktadır. Erken yaşlarda düşük sıcaklıklara maruz kalan betonlar, yüksek sıcaklıklara maruz kalan betonlara göre düşük erken dayanım ve yüksek geç dayanım değerleri gösterdiği için Nurse-Saul denkleminin, sıcaklığın beton üzerindeki etkilerini tam olarak yansıtamayacağı öne sürülmüştür [1]. Alexander ve Taplin, yaptıkları çalışmaların sonucunda Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunun düşük olgunluk değerlerinde sıcaklığın dayanım üzerindeki etkisini olduğundan az, yüksek olgunluk değerlerinde ise olduğundan fazla gösterdiğini saptamışlardır [1,5].

Daha sonraki çalışmalarda Freisleben Hansen ve Pedersen tarafından, kimyasal reaksiyonların hızına sıcaklığın etkisini tanımlamakta kullanılan Arrhenius denkleminin dayanarak yeni bir olgunluk fonksiyonu ve olgunluk kavramı ile ilgili daha gerçekçi yaklaşımlar önerilmiştir [1,6].

Arrhenius denkleminin dayanan eşdeğer yaş fonksiyonu, betonun sıcaklık ile olan etkileşimini, Nurse-Saul olgunluk fonksiyonlarına göre daha gerçekçi olarak tanımlamaktadır. Bu özelliğinden dolayı daha yaygın bir biçimde kullanılmaktadır [7].

Olgunluk fonksiyonlarında tanımlanan eşdeğer yaş, referans sıcaklıkta bakımı yapılmış betonun gerçek sıcaklık koşullarında bakımı yapılan beton ile aynı olgunluk ve dayanım değerine sahip olması için gereken süre olarak adlandırılmaktadır [1,7]. Referans sıcaklık değerleri, bölgesel olarak değişiklik göstermektedir. Kuzey Amerika'daki uygulamalarda genellikle 23 °C olarak kullanılırken, Avrupa'daki uygulamalarda 20 °C olarak kullanılmaktadır [1,7].

Bugüne kadar çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen olgunluk fonksiyonları arasında en çok kabul gören eşdeğer yaş fonksiyonunun anahtar parametresi, görünen

aktivasyon enerjisidir [1]. Betonun yaşının, eşdeğer yaşa çevrilebilmesi için çimentonun görünen aktivasyon enerjisi değerlerinin erken yaşlarda doğru olarak tahmin edilmesi gerekmektedir.

Bu tez çalışması kapsamında, 2 karışımdan, 5 farkı sıcaklık değeri için (10°C , 15°C , 20°C , 25°C , 35°C) toplam 30 adet karışım üretilmiştir. Bu karışımların hepsinde, su/çimento oranı 0,42 olarak alınmıştır. Vibrasyon süreleri 9 sn olarak uygulanmıştır. Ayrıca, karışımda süperakışkanlaştırıcı ve hava sürükleyici katkı malzemesi kullanılmıştır. İlk karışımdan üretilen beton numunelere, kalorimetrik deneyler uygulanmış ve yaş evreleri boyunca ısı gelişimleri incelenmiştir. İkinci karışımdan üretilen numunelere kalorimetrik ve mekanik deneyler birlikte uygulanmıştır. Deneylerinden elde edilen veriler incelenmiş ve betonların farklı sıcaklık değerleri için aktivasyon enerjileri bulunmuştur.

Deneylerde kullanılan betonların görünen aktivasyon enerjisi değerler aralıkları, 1. karışım için (K-1), 20°C 'nin altında 34300–42100 j/mol, 20°C 'nin üstünde 26440 j/mol, 2. karışım için (K-2), 20°C 'nin altında 37380–43760 j/mol, 20°C 'nin üstünde 31000 j/mol olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların literatürde belirtilen değerlere uygun olduğu görülmüştür.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMASI ve GENEL BİLGİLER

Beton; çimento, su, agrega ve gerekiyorsa kimyasal katkıların belirli esaslara göre bir araya gelmesiyle meydana gelen kompozit bir yapı malzemesidir. Bünyesinde bulunan çimentonun su ile reaksiyonu sonucunda ısı açığa çıkmakta ve buna bağlı olarak dayanım kazanma süreci de başlamaktadır.

Betonun ileriki yaşlarındaki mekanik ve fiziksel özelliklerinin doğru bir biçimde tahmin edilebilmesi, erken yaşlarındaki ısı ile olan etkileşimini temsil edecek doğru modellerin yapılmasına bağlıdır.

2.1. Erken Yaşlarda Beton Üzerindeki Isı Etkileri

Betonun erken yaşlarında ısıya olan duyarlılığı ileriki yaşlarına oranla daha belirgindir. Betonun yerleştirilme evresinden itibaren gözlenmeye başlanan ısı artışının temel sebebi, bünyesinde bulunan çimentonun su ile reaksiyona girmesidir.

Çimentoyu oluşturan klinker bileşikleri kimyasal potansiyel olarak aktif durumdadır. Bunlar, su ile reaksiyona girerek çözünür. Daha sonra çözeltide hidroliz reaksiyonları meydana gelir. Çimento ve su arasında meydana gelen reaksiyonlara “hidratasyon reaksiyonları” denir [8].

Oldukça iri taneciklerden oluşan çimento, su içinde yavaş bir biçimde çözünür. Çözünme, katı partikül yüzeylerinde gerçekleşir. Çözünen bileşikler hemen hidrate hale gelerek, partikül yüzeylerini jel halinde kaplar. Böylece henüz reaksiyona girmemiş olan klinker bileşiklerinin su ile teması önlenmiş olur.

Diğer taraftan çözeltiye geçmiş olan klinker bileşikleri de, çözelti içinde doymuş hale gelerek çözünme hızının yavaşlamasına yol açar [8].

Hidratasyon süreci ekzotermik bir süreçtir. Bu süreç içerisinde gerçekleşen çimento özelliklerine bağlı olan etkiler, hidratasyon hızının ve buna bağlı olarak ısı çıkışının zamanla azalmasına neden olur.

Betondaki ısı artışı ve bünyeyi terk etme hızı, kütle betonlarında boyut etkisi ve ortam sıcaklığına, betonarme elemanlarda ise donatı miktarı, agrega granülometrisi,

çimento özgül yüzeyi, kalıp işçiliğinin kalınlığı ve türüne bağlı olan pek çok sebeple ilişkilidir [9].

2.1.1. Dayanım-Isı Çıkışı İlişkisi

Hidratasyon süreci başladığı andan itibaren, ekzotermik reaksiyonların sonucu olan ısı çıkış süreci de başlar. 1 gr çimento, su ile reaksiyona girdiğinde yaklaşık olarak 0,5 kJ civarında ısı açığa çıkarır. Bu ısı çıkışının büyük bir kısmı beton döküldükten sonraki ilk günlerde gerçekleşir [8].

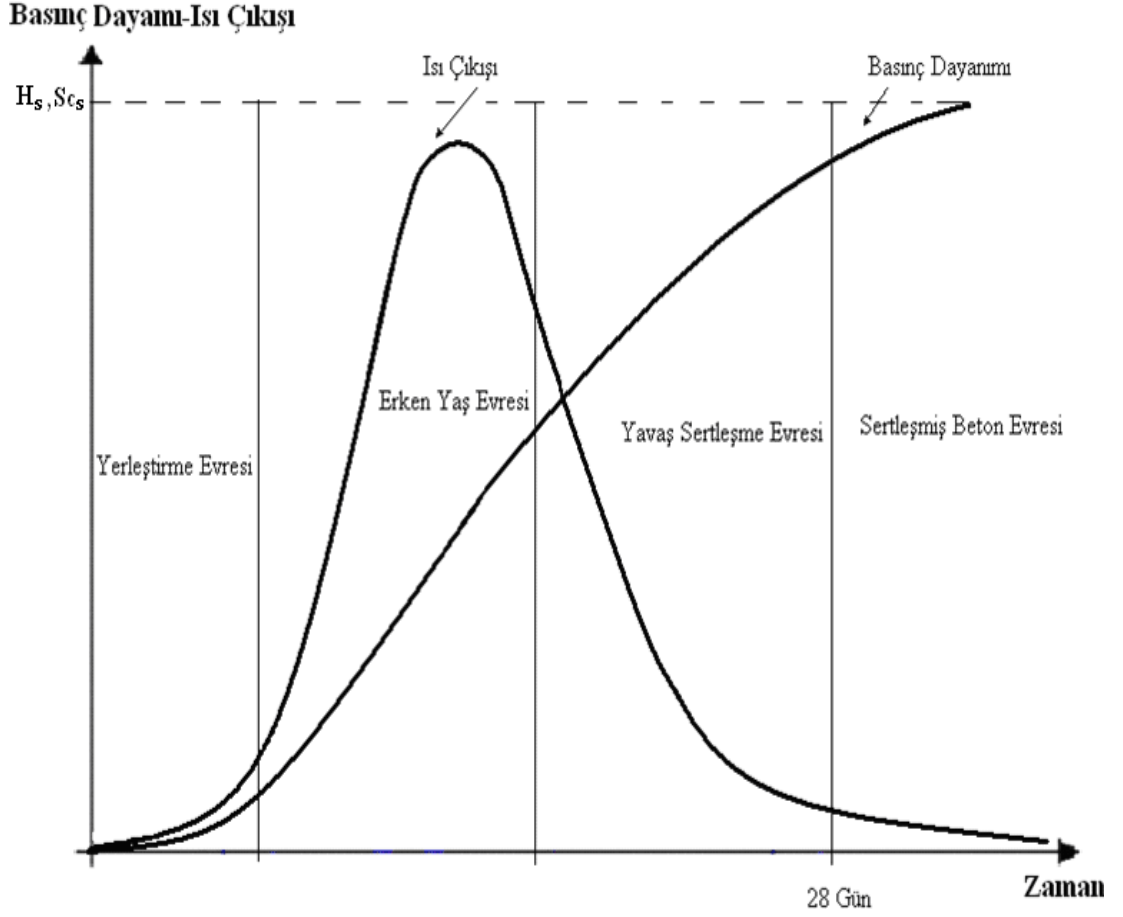
Çimento hidratasyon ısısının, başlıca çimento cinsi ve inceliğine bağlı olmakla birlikte, beton dökümünden sonraki 1–3 gün içerisinde % 50 si, 7 gün içerisinde % 75'i ve 28 gün içerisinde % 90 ı açığa çıkar. Ancak hidratasyon ısısının tamamının açığa çıkması için yılların geçmesi gerekir [8].

Hidratasyon ısısı çıkışına paralel olarak dayanım kazanma miktarında değişim gözlenir. Genel olarak betonun dayanım kazanma süreci 4 evrede özetlenebilir.

Bu evreler;

- 1) Yerleştirilme evresi
- 2) Erken Yaş evresi
- 3) Yavaş Sertleşme evresi
- 4) Sertleşmiş Beton evresi'dir [9].

Beton gelişimindeki evrelerin zaman aralıkları açısından ifadesinde kesin ayrımlar bulunmamaktadır. Temelde çimentonun kimyasal kompozisyonu, mineral katkı miktarları, inceliği ve fiziksel özellikleri gibi kinetiklerine bağlı olarak beton türleri açısından farklılıklar gösterir. Şekil 2.1' de 4 temel gelişim evresindeki ısı çıkışı ve buna bağlı olarak artan beton dayanım gelişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.1: Erken Yaşlardaki Beton Dayanımı ve Isı Çıkışı İlişkisi [9].

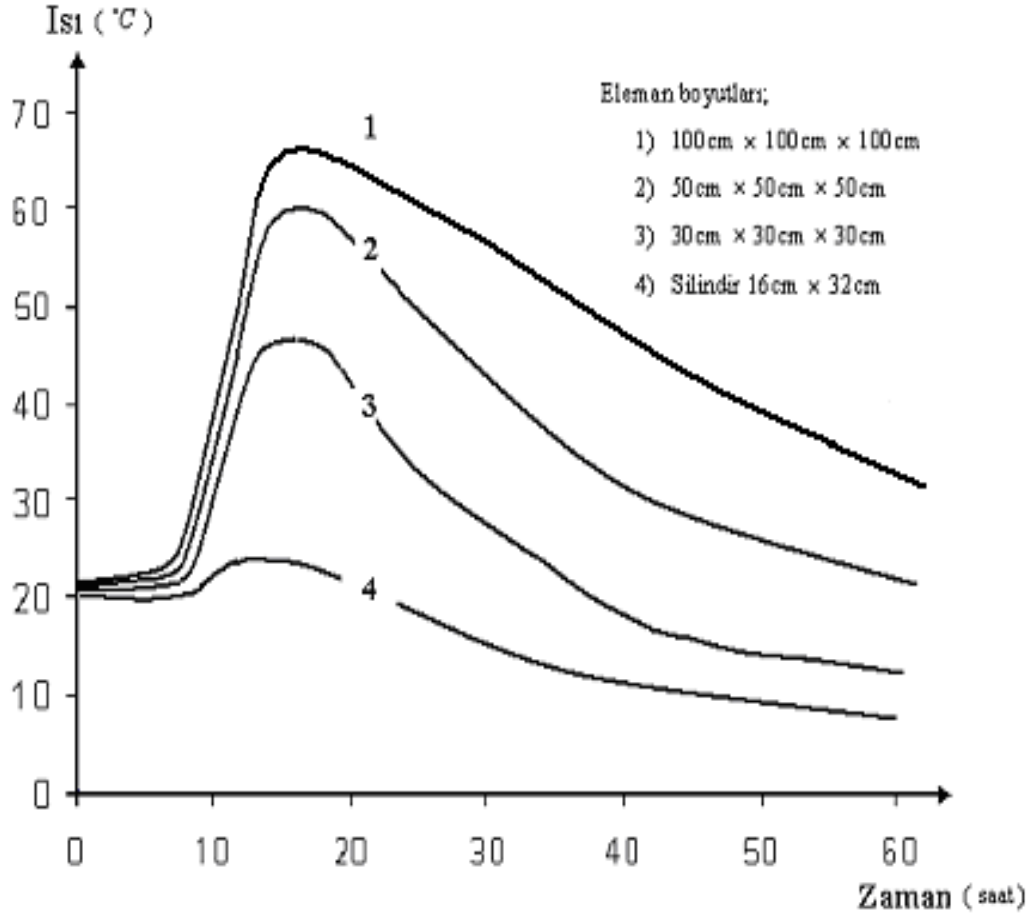
Şekil 2.1 de görüldüğü gibi, yerleştirme evresindeki ısı çıkış miktarı ihmal edilebilecek bir düzeydedir ($Q \leq 10 \text{ j/gr}$). Erken yaş evresinde ise ısı çıkışı en üst seviyesine ulaşmakta ve pik noktasından itibaren düşmeye başlamaktadır. Erken yaş evresinin sonuna doğru gözlenen bu düşüş, yavaş sertleşme ve sertleşmiş beton evresinde de devam etmektedir.

Isı çıkışı erken yaş evresinde en üst seviyeye ulaştığından dolayı, çimentonun ısı duyarlılığı ile ilgili özelliklerinin belirlenmesinde bu evre temel alınmaktadır.

2.1.2. Boyut Etkisi

Betonun homojen bir yapıya sahip olmayışı, ısı iletim katsayısının da düşük olmasına sebep olmaktadır. Bu sebeple hidrasyon reaksiyonu sürecinde açığa çıkan ısı, kısa süre içerisinde dışarı atılamaz ve beton içerisinde sıcaklık artışı meydana getirir. Bunun doğal bir sonucu olarak beton yapısında termal genleşmeler hatta çatlamalar oluşabilir [8].

Zamana ve çimento kinetiklerine bağlı olan ısı artış miktarı, hacim artışı ile birlikte yükselmektedir. Bunun temel sebepleri, kullanılan çimento miktarının artışı, betonun iç bölgelerindeki ısıнын kapiler boşlukları ve mikro çatlakları geçerek dış ortama ulaşamayışıdır. Şekil 2.2’ de beton boyutlarının ısı artışı üzerindeki etkileri verilmiştir.



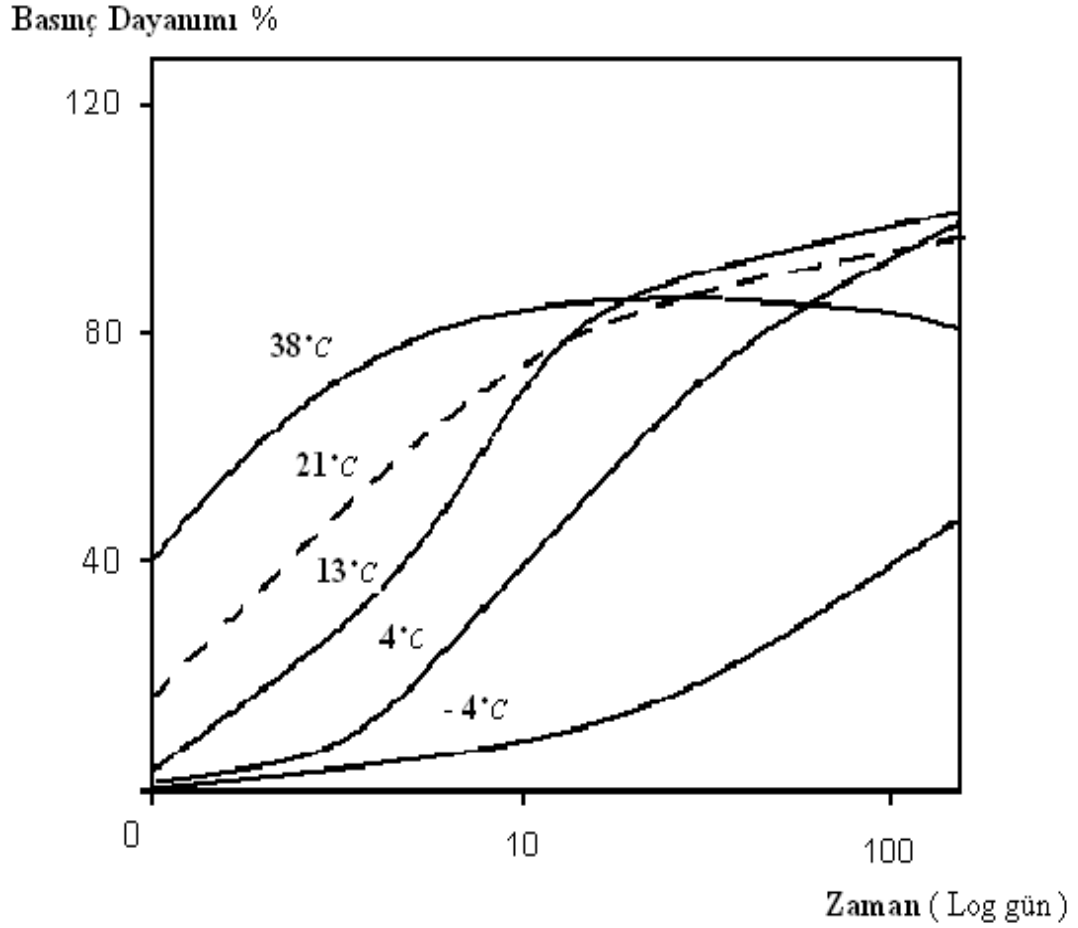
Şekil 2.2: Beton Boyutlarının Isı Artışı Üzerindeki Etkileri [9].

2.1.3. Kür Sıcaklığının Etkisi

Kür sıcaklığı, erken yaş betonunun dayanım gelişimi üzerinde etkili olan en önemli faktörlerden biridir. Ortam sıcaklığının artışı, bütün kimyasal reaksiyonlarda olduğu gibi hidratasyon reaksiyonundaki hızı da artırır.

Bu genel kurala bağlı olarak sıcaklığın artması ile beton dayanım gelişimi de hızlanır. Buna karşılık, ortam sıcaklığında meydana gelen düşüşler, dayanım

gelişimini büyük ölçüde yavaşlatır. Kür sıcaklığındaki değişimin beton dayanımında meydana getirdiği sapmalar Şekil 2.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Kür Sıcaklığının Beton Basınç Dayanımı Üzerine Etkisi [9].

Şekilde; 4° C’ den 46° C ’ye kadar değişik sıcaklıklarda küre tabi tutulan betonların, 28 günlük standart dayanımın yüzdesi olarak dayanım değerleri görülmektedir. Kür sıcaklığının artışı erken yaşlarda beton dayanımını arttırmaktadır. Ancak; yüksek sıcaklıklarda kür edilen numunelerin, erken yaş evresinden sonraki zamanlarda dayanım artış hızı azalmaktadır.

2.2. Olgunluk ve Eşdeğer Yaş Kavramı

Çimento içerikli sistemlerin, hidratasyon sürecindeki, kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerindeki gelişimin pratik yollarla tahmini için “olgunluk ve eşdeğer yaş” yöntemleri geliştirilmiştir.

Bu yöntemler, dayanım gelişiminin zamana ve ısıya bağlı özelliklerini açıklamaktadır. Olgunluk kavramı; Nurse–Saul tarafından şu şekilde açıklanmıştır [4,29]:

“Aynı olgunluk ve karışım oranlarındaki betonlar, yaklaşık olarak aynı dayanıma sahiptirler. Olgunluk, zaman ve ısı bileşenlerine bağlıdır.”

Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunu [4]:

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (2.1)$$

Burada,

M : olgunluk indeksi ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{gün}$)

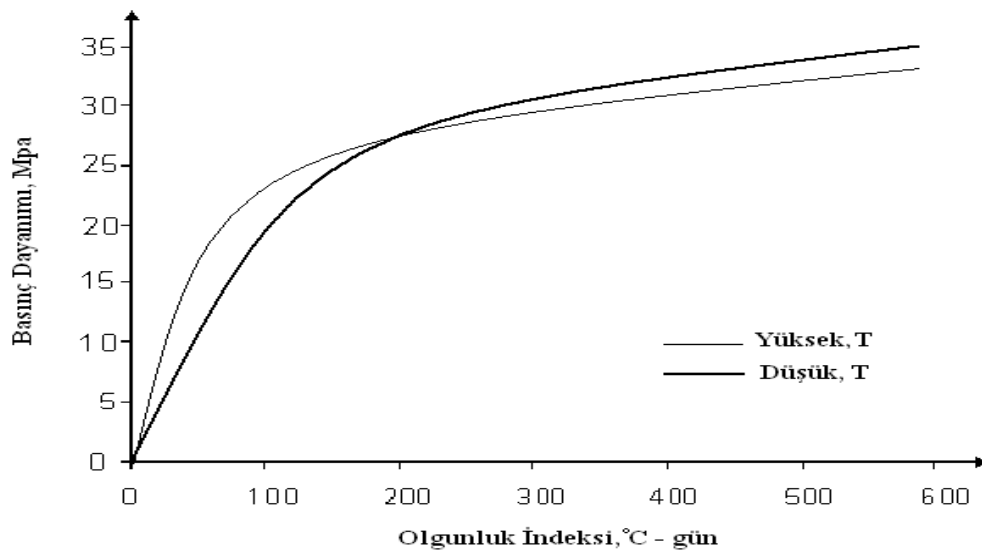
T : Δt zaman aralığındaki ortalama sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 : temel alınan sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)

t : zaman (gün)

Δt : zaman aralığı (gün)

Aynı olgunluk indeksi için erken yaşlarda yüksek sıcaklığa sahip beton numunelerinin ilk dayanımlarının yüksek, geç yaşlarda ise düşük olduğu, Şekil 2.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Betonun Olgunluk İndeksi-Dayanım İlişkisine Sıcaklığın Etkisi [7,25].

Sonraki dönemlerde yapılan çalışmalarda, kimyasal reaksiyonların hızına sıcaklığın etkisini tanımlamakta kullanılan Arrhenius denkleminde dayanarak yeni bir olgunluk fonksiyonu önerilmiştir [6,28,29]

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \Delta t} \quad (2.2)$$

t_e : referans sıcaklıktaki eşdeğer yaş (gün)

E : Görünen aktivasyon enerjisi (J / mol)

R : evrensel gaz sabiti (8.314 J / mol-°K)

T : Δt zaman aralığındaki betonun ortalama sıcaklığı (°K)

T_r : referans sıcaklık (°K)

Betonun olgunluk fonksiyonu, Nurse-Saul ve Arrhenius yaklaşımları göz önünde bulundurularak aşağıdaki gibi yazılabilir [9]:

$$M (t, H (T)) = \int_{t_0}^t K (T (\tau)) dt \quad (2.3)$$

$M (t, H (T))$: T sıcaklığına maruz kalmış betonun t zaman sonundaki olgunluğu H

$K (T)$: Hidratasyon kinetiğine bağlı bir sabit,

$T (\tau)$: τ zamandaki sıcaklık, K

$H (T)$: Isı geçmişi

Eşdeğer yaş kavramı; daha sonra yapılan çalışmalar sonucunda şu şekilde ifade edilmiştir [7]:

“Eşdeğer yaş, referans sıcaklıkta bakımı yapılmış betonun, gerçek sıcaklık koşullarında bakımı yapılan beton ile aynı dayanım değerlerine sahip olması için gereken süredir.”

Referans sıcaklık Kuzey Amerika’ daki uygulamalarda genellikle 23° C olarak kullanılırken, Avrupa’ daki uygulamalarda 20 ° C olarak kullanılmaktadır [7].

Eşdeğer yaş kavramı, olgunluk fonksiyonlarına bağlı olarak aşağıdaki gibi formüle edilebilir [10];

$$M(t, H(T)) = \int_{t_0}^t K(T(\tau)) dt = \int_0^{t_{eq}} K(T_{ref}) d\tau = M(t_{eq}, T_{ref})$$

$$= K(T_{ref}) t_{eq} \quad (2.4)$$

$M(t_{eq}, T_{ref})$: Referans sıcaklıktaki betonun t_{eq} zamandaki olgunluğu,

t_{eq} : Referans sıcaklıktaki eşdeğer yaş,

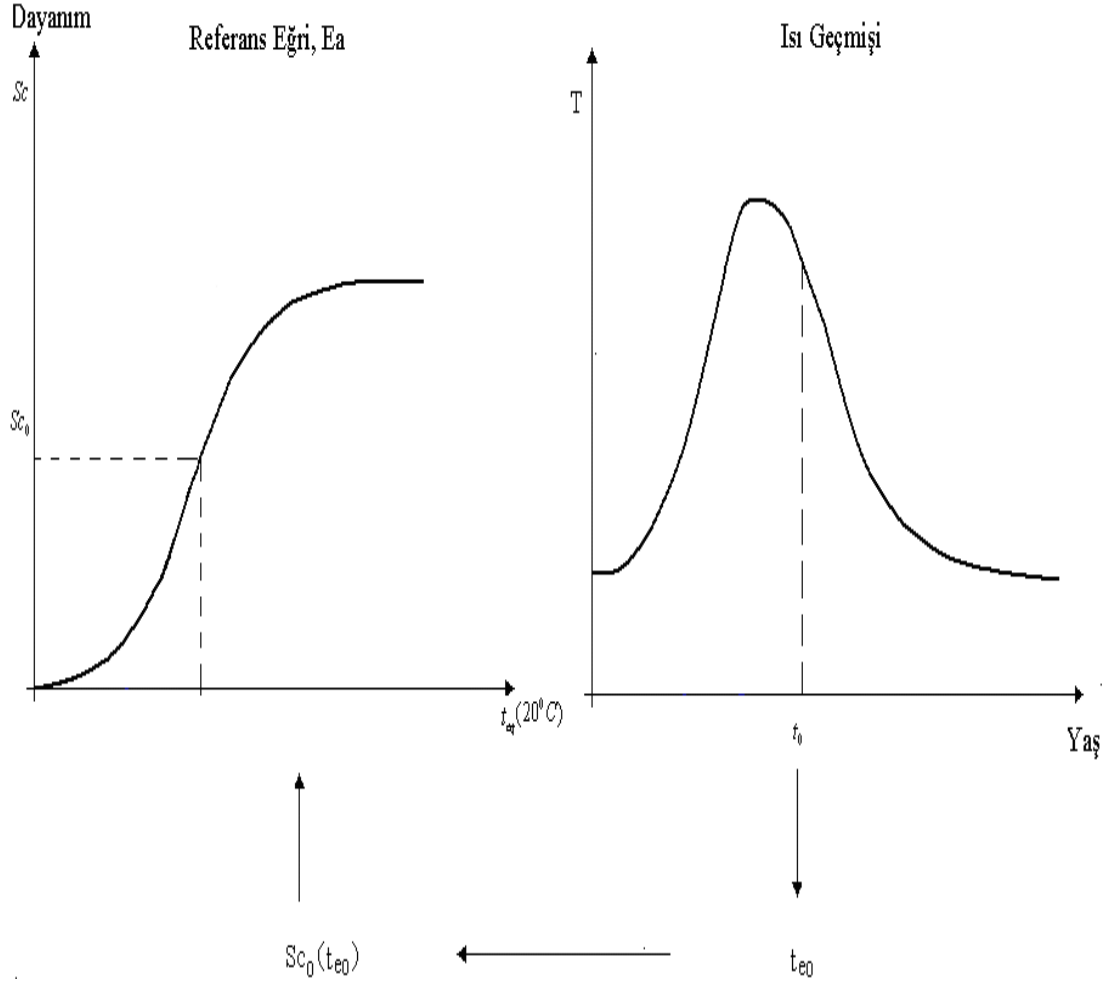
$$t_{eq} = \int_0^t \frac{K(T(\tau))}{K(T_{ref})} dt = \int_0^t \exp \left(-\frac{Ea}{R} \left[-\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \right) dt \quad (2.5)$$

Basınç dayanımı, hidratasyon ısısı gibi fiziksel ve mekanik özelliklerin gelişimi, olgunluk ve ya da eşdeğer yaş ile ilişkilendirilebilir [9].

Bu yöntemlere bağlı olarak beton dayanımının tahmini iki aşamada gerçekleşir;

- 1) Eşdeğer yaş-dayanım ilişkisi, betonun ısı geçmişinden faydalanılarak kurulur.
- 2) Yerleştirilmiş olan betonun dayanımı, daha önce çizilmiş olan olgunluk-dayanım eğrisinden hareketle belirlenir.

Olgunluk ve eşdeğer yaş metotlarının kullanımı Şekil 2. 5' de özetlenmiştir.



Şekil 2.5: Beton Dayanımının Belirlenmesinde Olgunluk ve Eşdeğer Yaş Metotlarının Kullanılması.

2.3. Arrhenius Kanunu ve Görünen Aktivasyon Enerjisi Kavramı

Arrhenius Kanunu, hidratasyon süreci ile beton özelliklerinin gelişimini, farklı sıcaklık değerleri için açıklar [6,9,11]. Bu kanundaki değişkenler, belli bir sıcaklık derecesi için oranlar açısından incelenir.

Bu kanunda tanımlanan değişkenler, kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri temsil etmekle birlikte, evrensel gaz sabitini de dikkate almaktadır.

Arrhenius Kanunu aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$K (T) = A \exp \left(- \frac{Ea}{RT} \right) \quad (2.6)$$

$K (T)$: Hidratasyon kinetiğine bağlı bir sabit, (Söz konusu süre için kimyasal, fiziksel ve mekanik özellikleri ifade eder.)

A : Orantısallık sabiti, 1/s ,

R : Evrensel gaz sabiti, 8.314 J/mol K ,

Ea : Görünen aktivasyon enerjisi.

Ea ile gösterilen, görünen aktivasyon enerjisi, betonun özelliklerinin gelişiminde çimento hidratasyonunun etkisini gösteren terimdir. Hidratasyon hızı bir çimentodan diğerine farklılıklar göstermesine karşın, hidratasyon derecesi ile doğrudan ilişkilidir [10,31].

Arrhenius Kanunu, temelde deneysel gözlemlere dayanarak ve kimyasal reaksiyon değişkelerini basite indirgeyerek, reaksiyon sürecini tanımlar. Çimento hidratasyonu aynı anda gerçekleşen, pek çok ani ve birbirine bağımlı kimyasal tepkimelerden oluştuğu için, Arrhenius Kanunu ile tanımlanan aktivasyon enerjisi belirleme yöntemi sadece bir yaklaşım olarak kabul edilebilir. Bu nedenle görünendir [9].

2.4. Görünen Aktivasyon Enerjisine Etki Eden Faktörler

Görünen Aktivasyon Enerjisi, beton karışımının ısı ile olan etkileşimini, ısı duyarlılığını ifade eder. Bu nedenle Ea yüksek olan beton karışımı, ısısal değişimlere daha fazla duyarlılık gösterir. Beton karışımının tamamını karakterize eden Ea, çimento hidratasyonunun değişkenlerine bağlıdır. Bu değişkenler başlıca, çimentonun kimyasal kompozisyonu, mineral katkı miktarları, inceliği ve fiziksel özellikleridir. Bununla birlikte kullanılan kimyasal katkıların türü, miktar ve özellikleri de betonun görünen aktivasyon enerjisi değerlerini etkiler [6,9,11,12].

2.4.1. Beton Karışım Özelliklerinin Etkisi

Görünen Aktivasyon Enerjisi, beton karışımında, çimento türü, su / çimento oranı, mineral içeriği, incelik ve özgül yüzey gibi pek çok parametreye bağlıdır. Hidratasyon sürecindeki beton gelişimini izleyebilmek için çimento bileşenleri göz önünde tutulmalıdır.

Çimento ana bileşenleri olan C_3A , C_3S , C_2S , C_4AF , SO_3 ve MgO 'in görünen aktivasyon enerjisi değerlerinin belirlenmesinde ve dayanım gelişiminin doğru olarak saptanmasında dikkate alınması gerekmektedir [12].

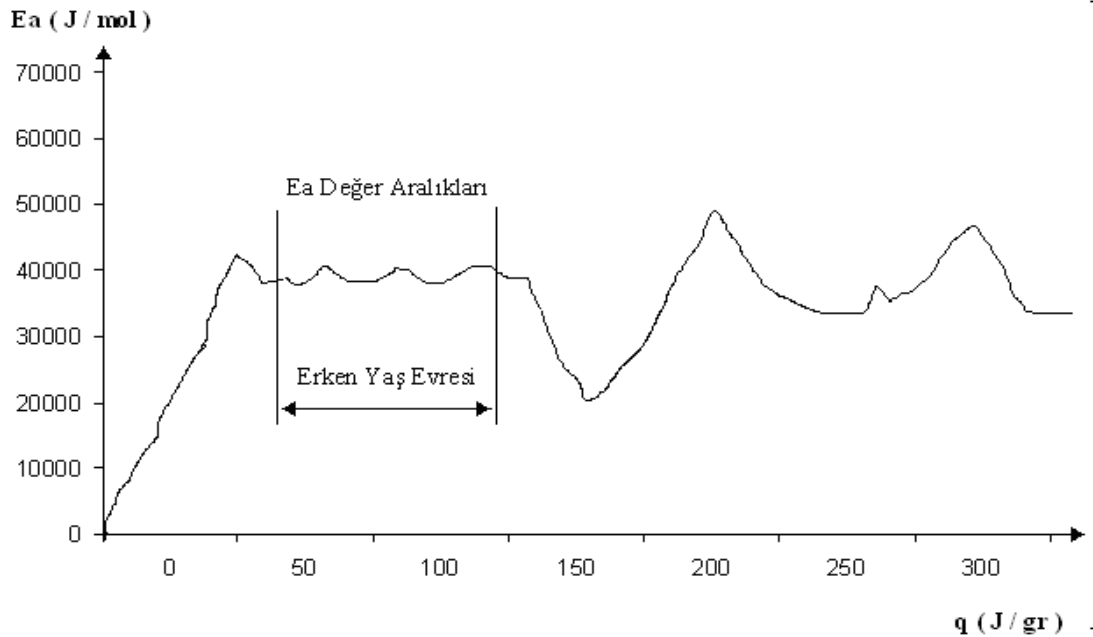
C_3A ve çimento özgül yüzeyi, erken yaşlarda yüksek dayanım kazanımında etkilidir. C_4AF içeriğinin, E_a belirlenmesinde dikkate alınması yanıltıcı olabilmektedir. Bununla birlikte, beton içinde katkı olarak kullanılan yüksek fırın curufu miktarının artışı, E_a 'ni arttırmakta, uçucu kül miktarının azalışı ise, E_a değerlerini düşürmektedir [12,13].

2.4.2. Gelişim Derecesi Etkisi

Gelişim; çimento hidratasyonuna bağlı olarak, beton basınç, çekme, burulma dayanımı, elastite modülü gibi mekanik özelliklerdeki değişim sürecidir.

Genellikle erken yaşlarda, 0,1–0,3–0,5'lik gelişim derecelerinde, görünen aktivasyon enerjisi değerleri sabit kalmakta, ileriki yaşlarda ise önemli bir düşüş göstermektedir. Bu sebeple, E_a değerinin belirlenmesi ile ilgili yapılan deneylerde, sabit gelişim derecesi aralıklarında hesaplamalar yapılmaktadır [9].

E_a değeri, ancak erken yaşlarda gerçeğe en uygun değerleri vermektedir. Erken yaş süreci yerleştirilme anından itibaren 24–48 saat arasındaki evredir. E_a değerleri 0,5–1'lik gelişim dereceleri aralıklarında kullanılması gerektiği takdirde, uygun modellemeler yapılmalıdır. E_a 'nin hidratasyon ısısı ile değişimi Şekil 2.6' da verilmiştir [9,10,15].

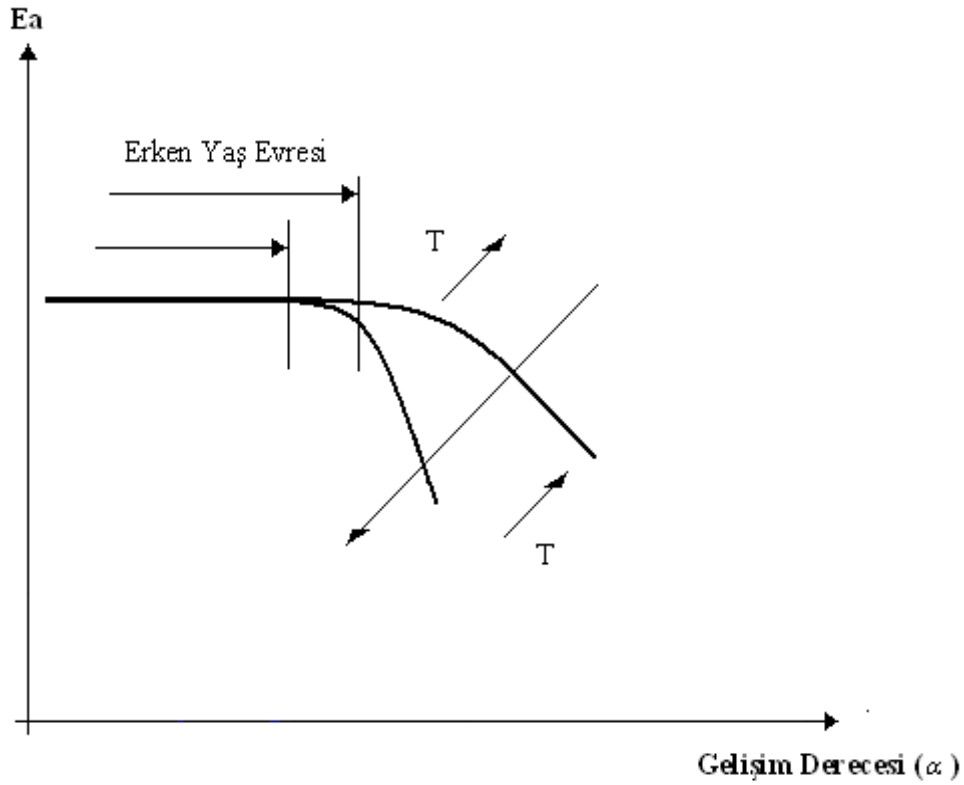


Şekil 2.6: E_a Değerlerinin Hidratasyon Isısı İle Değişimi.

2.4.3. Isı Etkisi

Termodinamik açıdan tam doğru olmasa da, çoğu araştırmacı, E_a 'nin direkt olarak ısıya olan bağımlılığına dikkat çekmiş ve belirlenme sürecinde çeşitli modellemeler yapmıştır [6,14].

Basit bir yaklaşım olarak, CALİBE, E_a 'nin ısıya bağlı olmadığı varsayımına dayanarak, hesaplar yapmıştır. Bununla birlikte, E_a belirlenirken, kür koşullarının beton dayanımı üzerindeki etkileri göz önünde tutularak çalışmalara devam edilmiştir. E_a 'nin gelişim derecesi ve sıcaklığa olan bağıllığı Şekil 2.7' de özetlenmiştir [9].



Şekil 2.7: E_a 'nin Gelişim Derecesi ve Sıcaklığa Olan Bağıllığının Şematik Olarak Gösterimi.

2.5. Görünen Aktivasyon Enerjisi' nin Belirlenmesinde Kullanılan Yöntemler

Önceki kısımlarda da belirtildiği gibi, çimento içeren sistemlerin, gerçekçi bir biçimde ısısının, mekanik özelliklerinin ve büzülme limitlerinin doğru bir biçimde belirlenebilmesi, görünen aktivasyon enerjisi değerlerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesine bağlıdır.

Betonun, görünen aktivasyon enerjisi' nin belirlenmesinde, maruz kaldığı sıcaklık, zaman ve karışım özellikleri dikkate alınarak, çeşitli yöntemler öne sürülmüştür.

Değişik zamanlarda yapılan farklı çalışmalar göz önünde tutularak, Ea' nin belirlenmesinde kullanılan yöntemler, en geniş anlamda 2 başlık altında incelenebilir. Bunlar deneysel ve yaklaşık yöntemlerdir [1,7,9,11,12].

Deneysel Yöntemler

- Hız Yöntemi
- Türetilmiş Hız Yöntemi
- Süperpozisyon Yöntemi

Yaklaşık Yöntemler

- Matematiksel Yöntemler
- Kimyasal Yöntemler

2.5.1. Deneysel Yöntemler

Mekanik veya kalorimetrik deney sonuçlarından yararlanılarak, gerçekçi bir biçimde, Ea' nin belirlenmesinde kullanılan yöntemlerdir. Temelde Hız ve Süperpozisyon yöntemlerine bağlı kalınarak değişik yöntemler de geliştirilmiştir [9]. Bu bölümdeki yöntemlerde kullanılan sonuçlar, gelişim derecesi açısından incelenecektir. Ayrıca, ısıнын, betonun son basınç dayanım değeri ve hidratasyon ısısı üzerinde önemli bir etkisi olmadığı farzedilerek, gelişim derecesi, direkt olarak basınç dayanımı ya da hidratasyon ısısı yerine kullanılacaktır.

2.5.1.1 Hız Yöntemi

Hız yöntemi, temel anlamda hidratasyon oranlarına ve gelişim derecelerine dayanmakta, kalorimetrik ve mekanik deney sonuçlarının analizlerinde sıklıkla kullanılmaktadır [1,9,12].

Hidratasyon oranı, termodinamik yaklaşıma göre aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{d\alpha}{dt} = f(\alpha) \exp\left(-\frac{Ea}{RT}\right) \quad (2.7)$$

$f(\alpha)$: Gelişim derecesi α 'nın fonksiyonu

Aynı α_0 gelişim derecesi için iki farklı sıcaklıkta yapılan deney sonuçları için, Arrhenius Kanunu aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_1(\alpha_0) = f(\alpha_0) \exp\left[-\frac{Ea}{RT_1(\alpha_0)}\right] \quad (2.8)$$

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_2(\alpha_0) = f(\alpha_0) \exp\left[-\frac{Ea}{RT_2(\alpha_0)}\right] \quad (2.9)$$

$T_1(\alpha_0), T_2(\alpha_0)$: Her iki durum için $\alpha = \alpha_0$ gelişim derecesindeki ısılar. (K°)

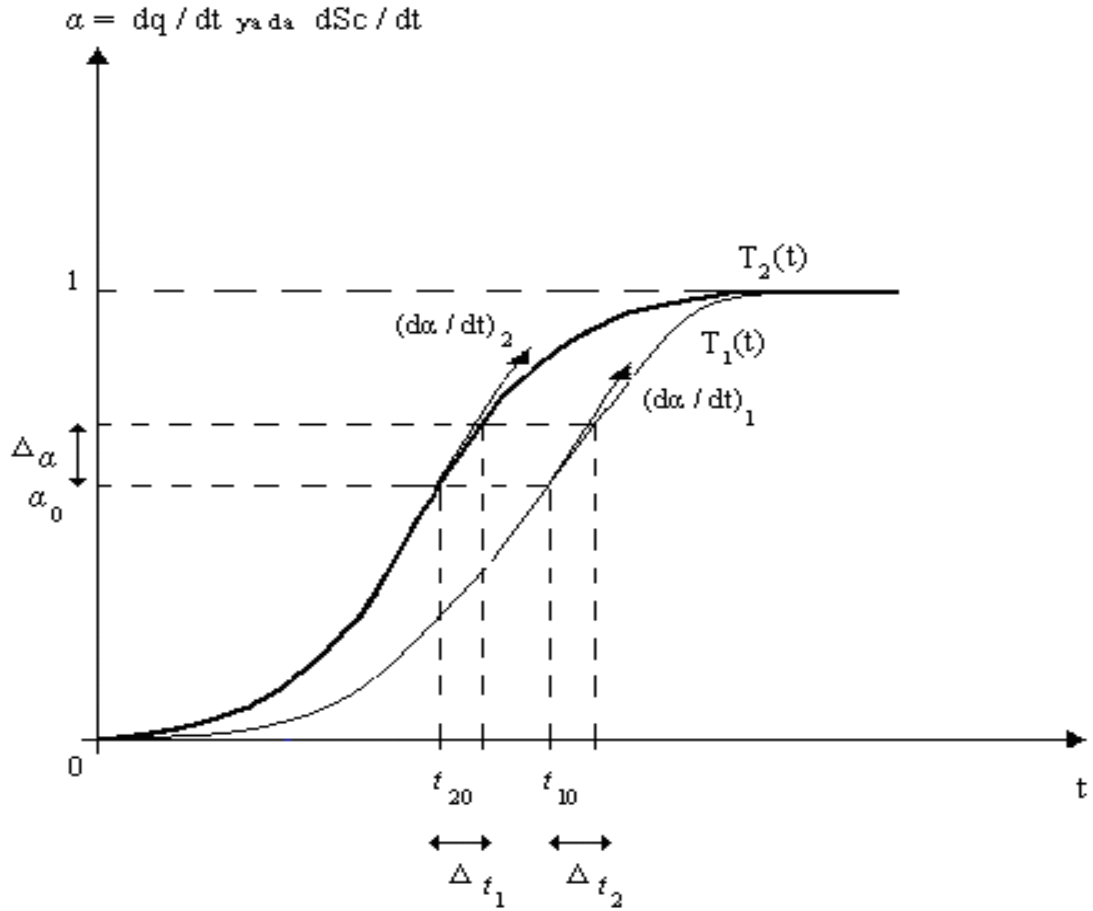
Ea' nin ısıya bağlı olmadığı farzedilerek, hidratasyon dereceleri arasında aşağıdaki ilişki kurulabilir:

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_1(\alpha_0) = \left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_2(\alpha_0) \exp\left[-\frac{Ea}{R} \left[\frac{1}{T_1(\alpha_0)} - \frac{1}{T_2(\alpha_0)}\right]\right] \quad (2.10)$$

$$\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_i = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t_i}$$

$$Ea(\alpha_0) = -\frac{R}{\frac{1}{T_1(\alpha_0)} - \frac{1}{T_2(\alpha_0)}} \ln \frac{\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_1(\alpha_0)}{\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_2(\alpha_0)} \quad (2.11)$$

Denklem 2. 9' da belirtilen ilişki, Şekil 2. 8' de gösterilmektedir.



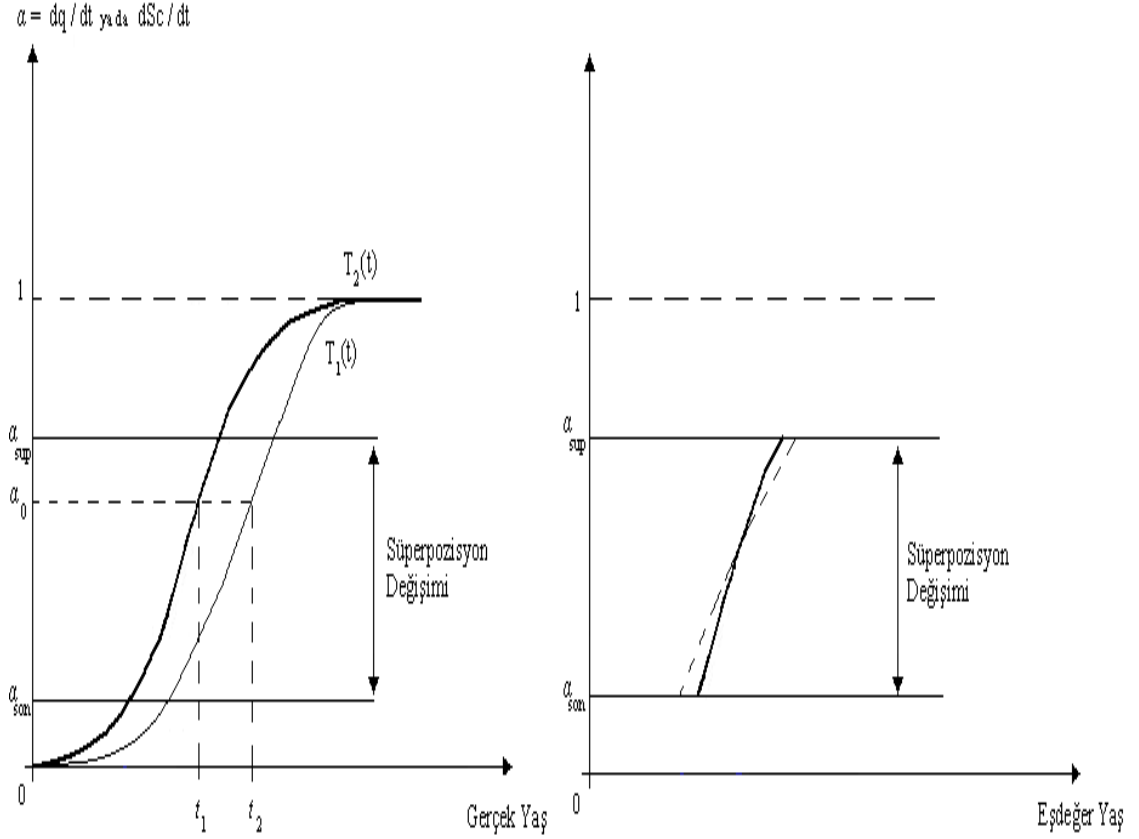
Şekil 2.8: Hız Yöntemi [9].

DeneySEL verilerin analizi ile E_a , gelişim derecesinin bir fonksiyonu olarak belirlenir. Genellikle erken yaşlarda, E_a , 0,1–0,3–0,5’ lik gelişim derecelerinde sabit kalmaktadır. İleriki yaşlarda ise, E_a ’ si önemli bir düşüş göstermektedir [12,13].

Bu düşüş bazı çimento tiplerinde, ana bileşenleri ve özgül yüzeylerine göre, yüksek sıcaklıklarda daha da belirgin olmaktadır.

2.5.1.2. Süperpozisyon Yöntemi

Mekanik ya da kalorimetrik deneylerden elde edilen sonuçların analizinde kullanılan Süperpozisyon yönteminde, E_a belirlenmesinde iki farklı kür sıcaklığı temel alınır [9]. Eşdeğer yaş değerlerinin bir fonksiyonu olarak, gelişim derecesi değerleri grafikte işaretlenir. E_a , grafikte işaretlenen gelişim derecesi değerlerinin en iyi süperpozisyonu yapılmak suretiyle belirlenir [9,15]. Süperpozisyon yönteminin uygulaması Şekil 2.9’ da özetlenmiştir.



Şekil 2.9: Süperpozisyon Yöntemi [9].

Süperpozisyon yönteminde Ea değerlerinin belirlenmesi aşağıdaki gibi olacaktır:

$$\min_{Ea} \left[\sum_{\alpha_i \in [\alpha_{inf}, \alpha_{sup}]} |t_{eq1i} - t_{eq2i}|^2 \right] \quad (2.12)$$

$$t_{eq} = \int_0^t \exp \left(-\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) d\tau \quad (2.13)$$

$$t_{eq1i} - t_{eq2i} = \int_0^{t_{1i}} \exp \left(-\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_1(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) d\tau - \int_0^{t_{2i}} \exp \left(-\frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T_2(\tau)} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right) d\tau \quad (2.14)$$

Ortalama, Ea değerleri erken yaşlarda, α_{son} ' dan α_{sup} ' a kadarki gelişim dereceleri arasında hesaplanır. Şu da belirtilmelidir ki, yerleştirilme evresi gibi çok düşük gelişim derecelerine karşılık gelen hidrasyon oranları da çok düşük ve dış ortamdaki değişimlere aşırı duyarlı olduğundan, Ea değerlerinin belirlenmesinde doğru sonuçlar alınamamaktadır [9].

2.1.5.3. Türetilmiş Hız Yöntemi

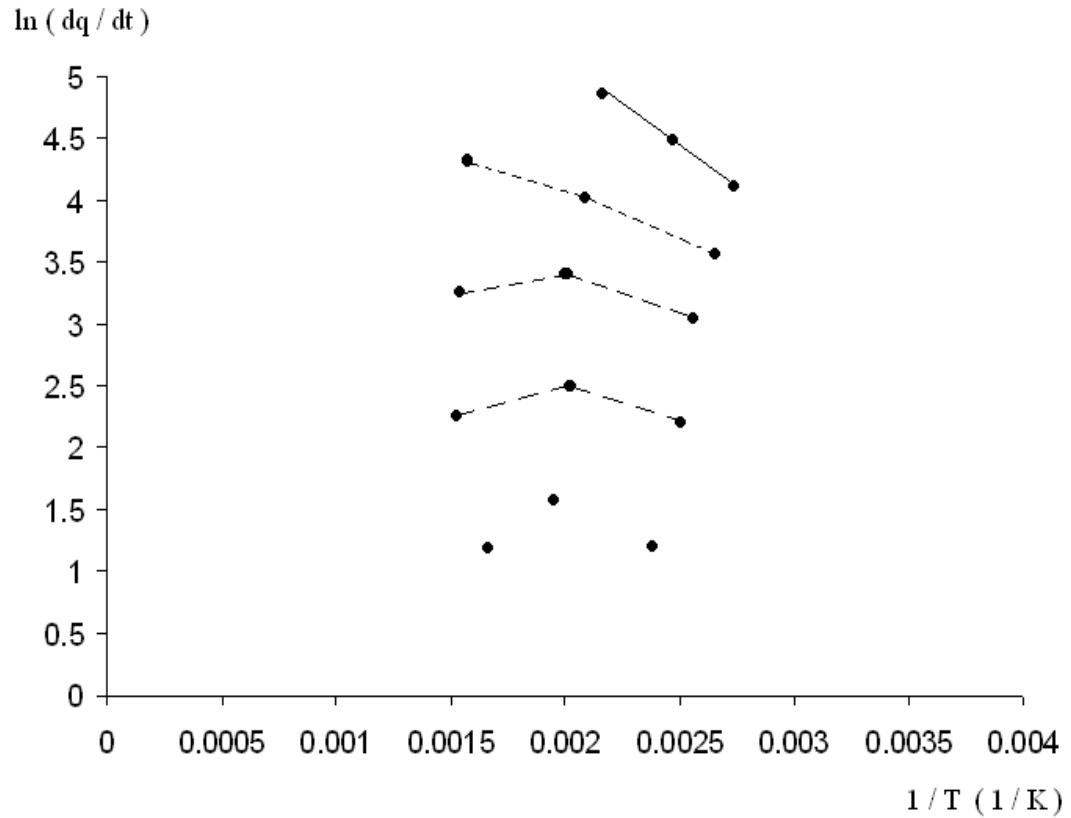
Türetilmiş Hız yöntemi, ana hatları itibariyle, Hız yöntemine benzemektedir. ASTM Standartları tarafından önerilen Ea belirleme yöntemidir [18].

İki veya daha fazla deneyden elde edilen verilerden yararlanılarak Ea belirlenmesinde, Hız yöntemine kıyasla daha pratik bir yaklaşım olarak kabul edilmektedir [9,19].

Bu yöntemde herhangi bir α_0 gelişim derecesi için, $\ln(d\alpha/dt)_i$ değeri, buna karşılık gelen $1/T_i$ değerine göre grafikte bir nokta olarak işaretlenir. Deneylere ait verilerin, grafikte oluşturduğu noktalar arasında, 3 noktayı birleştiren düze en yakın çizginin eğimi, R sabitine bölünmüş aktivasyon enerjisi değerini verir [19].

$$\ln\left(\frac{d\alpha}{dt}\right)_i = \ln(f(\alpha)) - \frac{Ea}{R} \frac{1}{T_i} \quad (2.15)$$

Türetilmiş Hız yöntemi ile Ea hesaplanması, Şekil 2.10' da gösterilmiştir.



Şekil 2.10: Türetilmiş Hız Yöntemi.

ASTM tarafından önerilen, Türetilmiş Hız yöntemi, en yaygın olarak kullanılan E_a hesaplama yöntemidir. 0.4' den küçük gelişim derecelerinde doğru sonuçlar vermekle birlikte, 0.4' den büyük gelişim dereceleri için Arrhenius Kanununun bu yöntemde kullanılması, tartışmalıdır [9].

2.5.2. Yaklaşık Yöntemler

Görünen aktivasyon enerjisi' nin belirlenmesinde kullanılan yaklaşık yöntemler, betonun ısı geçişini ya da kimyasal bileşimini temel almaktadır. Erken yaşlarda, betonunun dayanım gelişimi üzerindeki sıcaklık ve zaman etkisi göz önüne alınarak, önerilen uygunluk fonksiyonlarının uygulanması için başvurulmuş, basit E_a hesaplamalarını içermektedir [12,13,30].

Genel olarak yaklaşık yöntemler, matematiksel ve kimyasal yöntemler olmak üzere 2 başlık altında incelenir.

2.5.2.1. Matematiksel Yöntemler

Matematiksel yöntemlerde, görünen aktivasyon enerjisi, ısıнын bir fonksiyonu olarak hesap edilmektedir. Ancak, sadece ısı değişimine göre hesaplamalar yapıldığından, çimento tipi, kimyası ve beton karışım özellikleri dikkate alınmamaktadır. Bu nedenle elde edilen E_a değerleri gerçeği yansıtmamaktadır [28].

Freisleben Hansen ve Pedersen, E_a tayininde, $t_e < 100$ h ve $-10^\circ\text{C} < T_c < 80^\circ\text{C}$ için aşağıdaki formülleri önermişlerdir [6]:

$$T_c \geq 20^\circ\text{C} \text{ için } E_a(T_c) = 33500 \text{ J/mol} \quad (2.16.a)$$

$$T_c < 20^\circ\text{C} \text{ için } E_a(T_c) = 33500 + 1470 (20 - T_c) \text{ J/mol} \quad (2.16.b)$$

Jonasson, Groth ve Hedlung, Standart İsveç Çimentoları üzerinde yaptıkları deneyler neticesinde aşağıdaki formülleri önermişlerdir [20,21,25]:

$$E_a(T_c) = 44600 \left(\frac{30}{10 + T_c} \right)^{0.45} \text{ (kJ / mol)} \quad (2.17)$$

20 °C ° deki T_c (beton ısısı) için FHP' a göre bulunan E_a değerlerinden % 32 daha yüksek E_a değerleri elde edilmiştir. Bu formülasyon, beton ısısının bir fonksiyonu olduğu için, T_c ' nin artışı ile birlikte E_a değerlerinde düşme gözlenir.

Gauthier ve Regourd, E_a değerlerinin normal portland çimentoları için 42–47 kJ / mol arasında olduğunu öne sürmüşlerdir. % 70 curuf içeren çimentolarda ise bu değer, 56 kJ / mol değerine kadar yükselmektedir [22].

Guo, E_a için 30 ile 40 kJ / mol arasında bir değer kullanılabileceğini öne sürmüştür [23].

Bu yaklaşımlara ek olarak, Carino, E_a ' nin 41–47 kJ / mol arasında değiştiğini ve çimento tipine bağlı olarak farklılıklar gösterdiğini belirtmiştir [7,33].

ASTM' de ise katkısız Tip 1 çimento kullanıldığı takdirde, 40–45 kJ / mol arasında değişen E_a değerlerinin kullanılabileceğini önermektedir [24].

2.5.2. Kimyasal Yöntemler

Betonun karışım özellikleri ve çimento bileşenleri dikkate alınarak, E_a belirlenmesinde kullanılan kimyasal yöntemler, matematiksel yöntemlere nazaran daha gerçekçi sonuçlar vermektedir. Bunun sebebi, matematiksel yöntemlerde olduğu gibi, tüm çimento tipleri için, sabit E_a değerleri değil, çimento ve beton karışım özelliklerine göre değişen E_a değerleri önermesidir.

Schindler, Lerch ve Ford' un çimento bileşiminin hidrasyon üzerindeki etkilerini temel alan çalışmalarından yararlanarak aşağıdaki formülleri önermiştir [12,17]:

$$E = 22100. [PC_3A]^{0.3} . [PC_4AF]^{0.25} . Blaine^{0.35} \quad (2.18.a)$$

$$f_E = 1 - 1.05. PFA. \left[1 - \frac{PFACAO}{0.4} \right] + 0.4. P_{SLAG} \quad (2.18.b)$$

$$E_a = E \times f_E \quad (2.18.c)$$

PC_3A : C_3A ' nın ağırlığının tüm çimento ağırlığına oranı.

PC_4AF : C_4AF ' nın ağırlığının tüm çimento ağırlığına oranı.

$Blaine$: Çimentonun özgül yüzeyinin alanı (m^2 / kg)

PFA : Uçucu kül kütle oranı.

$PFACaO$: Uçucu küldeki CaO içeriğinin kütle oranı.

f_E :Ea düzeltme faktörü.

Kimyasal yöntemler kullanılmak suretiyle Ea belirlenmesinde, ısı değişimleri dikkate alınmamaktadır.

2.6. Görünen Aktivasyon Enerjisi' nin Belirlenmesinde Kullanılan Deney Yöntemleri

Daha önceki kısımlarda da belirtildiği gibi, erken yaşlarda, basınç dayanımı, kendiliğinden oluşan büzülme, termal genleşmeler ve çatlamlar gibi beton durabilitesini etkileyen faktörlerin doğru olarak tahmin edilmesi, Ea değerlerinin gerçekçi bir biçimde belirlenmesine bağlıdır.

Ea 'nin belirlenmesinde iki farklı deney metodu kullanılmaktadır [9].

Bunlar mekanik ve kalorimetrik deneylerdir. Ea değerlerinin doğru tahmininde mekanik ve kalorimetrik deney sonuçları karşılaştırılmaktadır.

2.6.1.Mekanik Deneyler

Uygulamada, kolaylığından dolayı sıkça başvurulmuş mekanik deney yöntemlerinden biri, eksenel basınç deneyidir.

Aynı karışıma sahip küp veya silindirik numunelerden oluşan iki seri, iki farklı kür koşullarında saklanmaktadır. Kür sıcaklığı, karışımın tamamlanmasından itibaren, hızlı bir biçimde uygulanmaktadır. Genellikle ilk seri numuneler, yaklaşık 20 °C' de, ikinci seri ise yaklaşık 10 °C' lik bir fark oluşturacak şekilde kür koşullarında saklanır. Kür koşullarına bağlı olarak belirlenen sayıda ve olgunluktaki numuneler üzerinde yapılan mekanik deneyler neticesinde, betonun Ea' si belirlenir [9].

2.6.2. Kalorimetrik Deneyler

Hidratasyon sürecinin takibinde ve Ea belirlenmesinde, kalorimetrik deneylerden elde edilen sonuçların mekanik deneylerden elde edilenlere kıyasla daha gerçekçi olduğu literatürde belirtilmiştir. Bununla birlikte, kalorimetrik deneylerle bulunan Ea' nin geçerliliği, aynı karışıma sahip ve aynı kür koşullarında saklanan betonlar üzerinde yapılacak çok sayıda mekanik testlerle de doğrulanmalıdır [9,10,14].

İzotermal, adyabatik ve yarı adyabatik olarak adlandırılan değişik tipteki kalorimetreler, farklı kür koşullarının sağlanması için kullanılmaktadır.

Kalorimetrik deneylerin asıl faydası, daha güvenilir ısı ölçümleri sağlamasıdır. Kullanılacak kalorimetreler, saha betonlarının gerçek ısısal özelliklerini yansıtacak nitelikte seçilirler. Örnek olarak; ince elemanlar için izotermal kalorimetreler, orta ve büyük boyutlu elemanlar için de adyabatik ve yarı adyabatik kalorimetreler kullanılmaktadır [9,27].

2.6.2.1. Yarı Adyabatik Deneyler

Yarı adyabatik deneylerde, kullanılacak olan numuneler ısı kayıplarından izole edilmektedir. Betondaki çimentonun hidratasyonu sonucunda, açığa çıkan ısı miktarlarının ortalaması alınarak belli zaman aralıkları için kayıt edilmektedir.

Deney süresince kullanılan araçların ısı karakteristikleri, ısı kayıplarının tahminine olanak verecek şekilde belirlenir [9,27].

Yarı adyabatik deneylerde, hidratasyon reaksiyonu sonucu açığa çıkan ısı aşağıda belirtilen formülle bulunur:

$$q(t_0) = \frac{1}{m_c} \left[\int_0^{t_0} C \frac{d\theta}{dt} dt + P(t_0) \right] = \frac{C}{m_c} (\theta(t_0) - \theta_0) + \frac{1}{m_c} P(t_0) \quad (2.19.a)$$

$q(t_0)$: t yaştaki hidratasyon ısısı (J / g)

C : Numunenin özgül ısısı (J / g ° C)

$\theta_0, \theta(t_0)$: Numunenin başlangıçtaki sıcaklığı ve t_0 yaşındaki sıcaklığı (° C)

$$P(t_0) = \int_0^{t_0} (a\theta(t) + b\theta^2(t)) dt \quad (2.19.b)$$

$$\theta(t) = T_e(t) - T_c(t) \quad (2.19.c)$$

$P(t_0)$: t_0 yaştaki ısı kaybı (J)

a, b : Kalorimetrenin ısı kaybı katsayıları (J / ° C h ve J / ° C h²)

T_e : Numunenin ısısı (° C)

T_c : Kontrol ısısı (° C)

Yarı adyabatik kalorimetrelerin ısı kaybı katsayıları, 20 ° C deki bir ortamda bulunan kalorimetreye yerleştirilen 40 ° C deki suyun oda sıcaklığına kadar ısı kaybetme süreci temel alınarak aşağıda belirtilen formül yardımıyla bulunur [27]:

$$a_t = \frac{m_v \cdot c_w \cdot (\theta_0 - \theta_t)}{\sum_{n=1}^N \frac{f_{w,n} + f_{w,n-1}}{2} \cdot \Delta t_n} \quad (2.19.d)$$

m_v : Suyun ağırlığı

c_w : Suyun özgül ısısı (J / g ° C)

θ_0, θ_t : Suyun başlangıçtaki sıcaklığı ve t_0 yaşındaki sıcaklığı (° C)

$f_{w,n}, f_{w,n-1}$: Başlangıçtaki ve t anındaki ortam sıcaklığı (° C)

Δt_n : Zaman değişimi

Yarı adyabatik deneyler kullanılarak, Ea belirlenmesinde aşağıdaki hususlar göz önünde tutulmalıdır.

- Kalorimetre ve numune arasında ısısal bir denge sağlanabilmesi için, dış ortamın ısısı, önceden belirlenmiş olan numunenin başlangıç ısısına ayarlanmalıdır. Isısal kayıpların doğru tahmini için de, bu hususa dikkat edilmelidir.
- Kür ısısı 50 ° C ' yi aşmamalıdır.
- Isı alıcılarının ölçümlerdeki duyarlılığı, ± 1 ° C mertebesinde olmalıdır [9].

2.6.2.2. Adyabatik Deneyler

Yarı adyabatik deneylerden farklı olarak, adyabatik deneylerde ısı kaybı yoktur. Çimentonun hidratasyonundan kaynaklanan tüm ısı çıkışları, ortamın ısısını yükseltir. Deney süresince numunenin ortalama ısısı kaydedilir ve hidratasyon ısısı aşağıda belirtilen şekilde hesaplanır [9,27].

$$q(t_0) = \frac{1}{m_c} \int_0^{t_0} C \frac{dT}{dt} dt = \frac{C}{m_c} (T(t_0) - T_0) \quad (2.20)$$

Bununla birlikte, numune ilk olarak adyabatik ortama yerleştirildiği zaman, oluşacak ısı kayıplarına meydan vermemek için, adyabatik ortamın ısısı, numunenin başlangıç ısısına ayarlanmış olması gerekir [9,27].

2.6.3. İzotermal Deneyler

Ea belirlenmesinde kullanılan izotermal kalorimetrelerde, adyabatik ortamdan farklı olarak, ısı artışı gözlemez ve hidratasyon ısısının akışı hesaplanabilir [9,27].

Hidratasyon ısısı, ısı akışının integrasyonu ile aşağıdaki formül kullanılarak bulunur:

$$q(t_0) = \frac{1}{m_c} \int_0^t \frac{dQ}{dt} dt \quad (2.21)$$

m_c : Çimentonun kütlesi

Q : t yaştaki hidratasyon ısısı

$\frac{dQ}{dt}$: Isı akışı

$q(t_0)$: t_0 yaştaki çimentonun gram başına hidratasyon ısısı.

İzotermal deneylerde ısı akışı, özel alıcılar vasıtasıyla kaydedilir. Ea' nin bağlı olduğu ısı, test süresince sabit kalır. Bu durum, gerçeğe daha uygun ölçüm yapılabilme olanağı verir [9].

3.DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Tez çalışması kapsamında İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarları'nda üretilen beton numuneler kullanılmıştır. Su/çimento oranı, 0,42 olan 2 karışımdan toplam 30 adet karışım üretilmiştir. Kimyasal katkı olarak hava sürükleyici beton katkısı, üretimlerde akışkanlığı sağlamak için de süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Bu bölümde, üretimde kullanılan malzemeler, bu malzemelerin özellikleri ve yapılan taze beton, kalorimetrik ve mekanik beton deneyleri ile bu deneylerden elde edilen sonuçlar verilmektedir.

3.1. Kullanılan Malzemelerin Tanımlanması

3.1.1. Agregalar

Deneylerde kullanılan agregalar, mineral kökenlidir. Beton hacminin yaklaşık olarak %60 - %80' i, ağırlığının da %80' i agregalardan oluşur. Betonun maliyeti, serleşmiş ve taze durumdaki özellikleri ve karışım oranları agrega miktar ve özelliklerinden etkilenir.

Betonda kullanılan agregalar doğal kum ve çakıl karışımlarında meydana gelebileceği gibi, yapay kırmataş malzemelerinden de oluşabilir. Yapay kırmataşlar, büyük taş kütlelerinin konkasörler vasıtasıyla kırılması ile elde edilir. Bu şekilde oluşan köşeli ve pürüzlü malzemeler mıcır olarak adlandırılmaktadır. Doğal agregalar ise, dere yataklarından, taş ocaklarından, deniz ve nehir tabanlarından elde edilir.

Beton üretiminde kullanılan agregaların boyut ve şekilleri, betonun işlenebilirliği ve mukavemeti üzerinde belirleyici rol oynamaktadır Ayrıca, beton yapısına giren agregaların sertliği, sağlamlığı ve temizliği de betonun mekanik özelliklerini etkilemektedir.

Agrega içinde organik maddeler, turba, humus, kömür ve linyit parçaları gibi yabancı maddeler bulunmamalıdır. Sülfat ve klor iyonları içeren agregalar, istenmeyen ve önlenemeyen kimyasal reaksiyonlara sebep olabilir. Bununla birlikte, denizden elde

edilen agregaların içerisinde bulunan organik artıklar, deniz canlılarına ait kabuklar, betonun donma-çözünme direncini olumsuz etkiler. Benzer şekilde, yapısında aktif silisyum bulunduran kayalardan elde edilen agregalar ise betonda alkali-agrega reaksiyonlarına neden olabilmektedir. Alkali-agrega reaksiyonları sonucunda betonda çatlamlar oluşmakta ve betonun hizmet ömrü azalmaktadır.

Deneylerde kullanılacak olan agregaların öncelikle, elek analizleri yapılır ve elekten yüzdece geçen miktarlara göre granülometri eğrisi çizilir. İncelemede, belirli tane boyutundaki kümelerin yüzde olarak, yığın içerisinde hangi oranda bulundukları belirlenir.

Agregaların granülometrik yapısı, üretilecek betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etki eder. Betonun bünyesinde, iri taneler arasında kalan boşluğun ince tanelerle doldurulması gerekmektedir. Kullanılan ince tanelerin artması, su tüketiminin de artmasına dolayısıyla su/çimento oranının yükselmesine sebep olmaktadır.

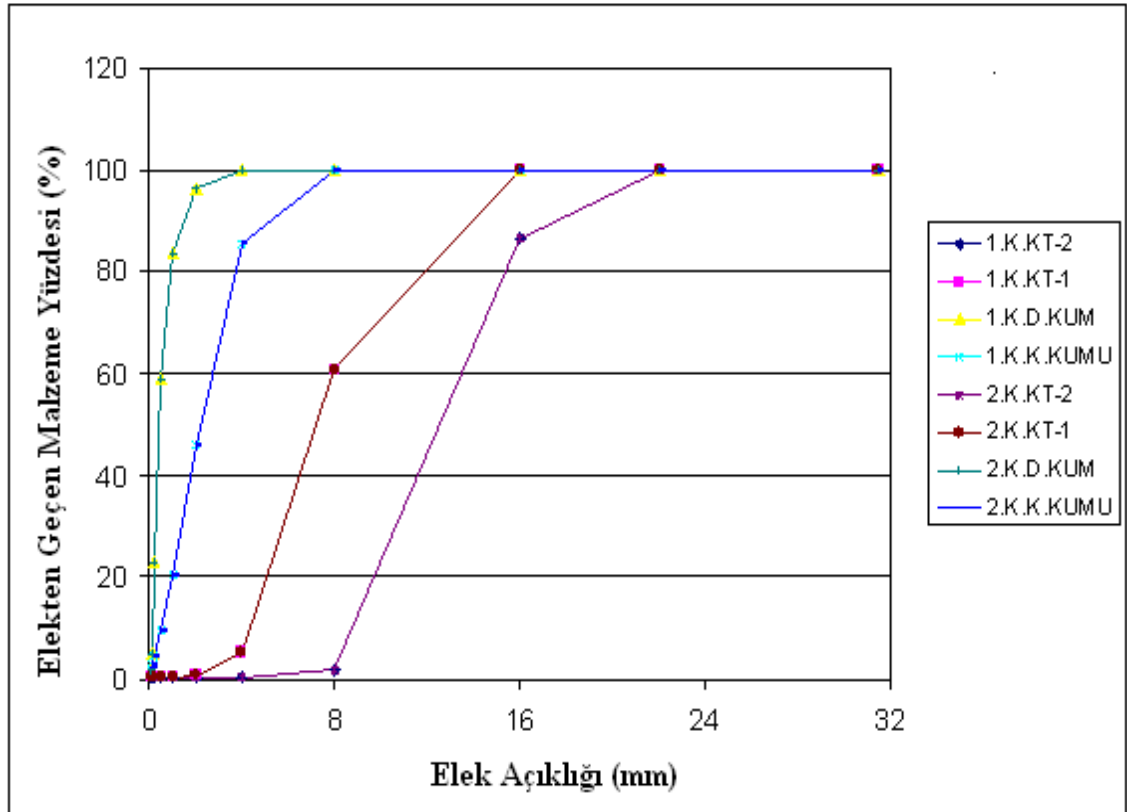
Deneylerde, her iki karışım için de iki adet kırmataş, bir adet kırmataş kumu ve bir adet doğal kum kullanılmıştır. Kullanılan agregaların, özgül ağırlık değerleri ve su emme kapasiteleri Tablo 3.1’ de verilmiştir. Agregaların elek analizi sonuçları Tablo 3.2’ de, granülometri eğrileri ise Şekil 3.1’ de gösterilmiştir

Tablo 3.1: Karışımlarda Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri.

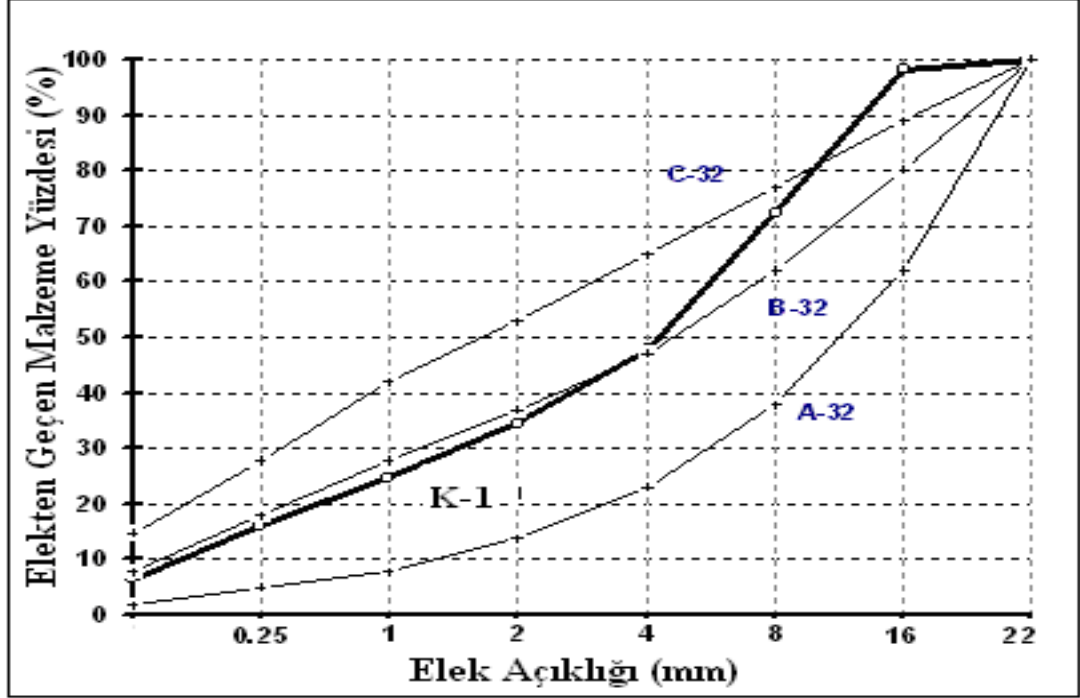
Karışım	Agrega Türü	Özgül Ağırlık (gr/cm^3)	Su Emme (%)
K-1	Kırmataş 2	2,72	0,3
	Kırmataş 1	2,72	0,4
	Doğal Kum	2,59	1,2
	Kırmataş Kumu	2,68	0,8
K-2	Kırmataş 2	2,71	0,4
	Kırmataş 1	2,71	0,4
	Doğal Kum	2,59	1,1
	Kırmataş Kumu	2,70	1,0

Tablo 3.2: Karışımlarda Kullanılan Agregaların Elek Analizi Sonuçları.

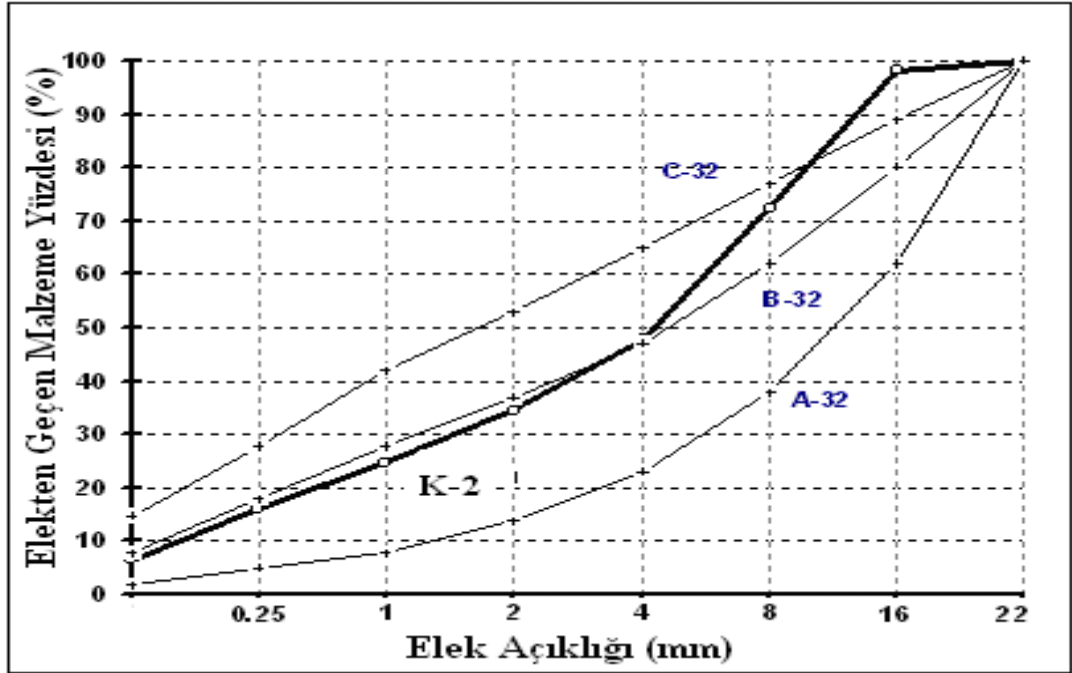
Elek No. (mm)	Elekten Geçen (%)								Karışım	
	K-1				K-2					
	KT-2	KT-1	D.K.	K.K	KT-2	KT-1	D.K.	K.K.	K-1	K-2
31,5	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
22	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
16	86,5	100	100	100	86,5	100	100	100	98,2	97,9
8	1,9	60,6	100	100	1,9	60,6	100	100	72,6	72
4	0,4	5,3	99,8	85,3	0,4	5,3	99,8	85,3	47,9	49,2
2	0,4	0,7	96,5	45,8	0,4	0,7	96,5	45,8	34,6	36,7
1	0,4	0,5	83,6	20,3	0,4	0,5	83,6	20,3	24,6	26,8
0,5	0,4	0,5	59,1	9,5	0,4	0,5	59,1	9,5	16,1	17,8
0,25	0,3	0,5	22,9	4,5	0,3	0,5	22,9	4,5	6,6	7,2
0,125	0,3	0,5	4,8	2,8	0,3	0,5	4,8	2,8	-	-
0,063	0,3	0,5	1,8	2,1	0,3	0,5	1,8	2,1	-	-

**Şekil 3.1:** Agregaların Granülometri Eğrileri.

Agrega karışımları, TS 706' da belirtilen A32 ve C32 referans eğrileri arasında kalacak şekilde belirlenmiştir. Agreg a karışımlarının granölometri eğrileri, 1. ve 2. Karışımlar için sırasıyla Şekil 3.2 ve Şekil 3.3' de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Karışım Granölometrisi ve Referans Eğrileri (K-1).



Şekil 3.3: Karışım Granölometrisi ve Referans Eğrileri (K-2).

3.1.2. Çimento

1. Karışımda kullanılan çimento, PÇ 42,5 olup Set Ambarlı Çimento Fabrikasında üretilmiştir. 2. Karışımda ise Oyak PÇ 42,5 çimentosu kullanılmaktadır. Çimentoların kimyasal ve fiziksel özellikleri sırasıyla Tablo 3.3 ve Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.3: Karışımlarda Kullanılan Çimentoların Kimyasal Özellikleri.

Özellik	PÇ 42,5 K-1	PÇ 42,5 K-2
Toplam Katkı (%)	< 0,01	< 2,26
Çözünmeyen Kalıntı (%)	< 0,17	< 0,3
Al ₂ O ₃ (%)	3,96	4,36
Fe ₂ O ₃ (%)	5,46	5,75
CaO (%)	63,01	62,65
MgO (%)	1,01	1,18
SO ₃ (%)	2,19	2,22
KO	0,38	0,38
Kızdırma Kaybı (%)	0,8	1,62
Serbest CaO (%)	0,41	1,00
Klörür (%)	0,0023	0,0074
Toplam SiO ₂ (%)	22,96	21,42
C ₃ A(%)	1,26	1,83
C ₃ S(%)	47,55	54,69
C ₂ S (%)	29,97	20,16
C ₄ AF (%)	16,62	17,50
7 Günlük Hidratasyon Isısı (cal/g)	70,2	71,5
7 Günlük Hidratasyon Isısı (joule/g)	293,8	299,3
2 Günlük Basınç Dayanımı (N/ mm ²)	12,8	18,4
7 Günlük Basınç Dayanımı (N/ mm ²)	20,4	31,1

Tablo 3.4: Karışımlarda Kullanılan Çimentoların Fiziksel Özellikleri.

Özellik	PÇ 42,5 K-1	PÇ 42,5 K-2
Özgül Ağırlık (g/ cm ³)	3,25	3,21
Blaine (cm ² /g)	3280	3830
Priz başı (dk)	380	215
Priz sonu (dk)	430	265
Le Chatelier (mm)	0	1,0

3.1.3. Su

Üretim sürecinde kullanılacak olan suyun özellikleri, betonun kimyasal, fiziksel ve mekanik özelliklerini önemli derecede etkilemektedir. Karma suyuunda bulunacak olan çeşitli iyonlar, eriyikler ve istenmeyen maddeler, beton işlenebilirliğini, çimentonun priz başlangıç ve sonu sürelerini ve betonun durabilitesini olumsuz yönde etkiler. Benzer şekilde, kullanılan suyun donatı korozyonuna da yol açabileceği dikkate alınmalıdır.

Betonun karma suyu ile ilgili olarak TS 500 ve TS 1247 standartlarında birtakım açıklamalar mevcuttur. Belirtilen standartlarda betonarme betonunda kullanılacak karma suyunun pH değerinin %7 yi aşmaması gerektiği ifade edilmektedir. Bununla birlikte, organik ve inorganik maddelerin varlığı, priz süresini etkilemektedir.

Betonun mekanik özelliklerini etkileyen bir diğer parametre ise, karma suyunun miktarı ve su/çimento oranıdır. Genellikle 0,3 – 0,6 arasında değişen su/çimento oranı, agregaların nem içeriğine göre tespit edilmelidir. Yüksek mukavemetli beton üretimlerinde su/çimento oranının olabildiğince düşük tutulması istenmektedir [26].

3.1.4. Katkı Maddeleri

Betonun çeşitli özelliklerini iyileştirmek ya da yeni özellikler kazanmasını sağlamak amacıyla katkı maddeleri kullanılır. TS 3452 ve TS 3456’ da tanımlanan katkı maddeleri, çimento ağırlığının %5 ‘ini aşmayacak bir oranda toz halde ya da sıvı halde beton karışımına katılır.

Hidratasyonda kullanılan karma suyu miktarının azaltılması, dolayısıyla su/çimento oranının düşürülmesi amacıyla kullanılabilen katkı maddeleri, sarf edilen çimento miktarının azaltılmasına da imkan vermektedir. Bununla birlikte, beton içerisine kontrollü hava sürükleyerek donma çözünme direncini arttıran, kür süresini azaltan, terlemeyi ve çatlak oluşumunu en alt düzeye indiren katkı maddeleri de mevcuttur.

3.1.4.1. Yeni İkinci Nesil Süperakışkanlaştırıcı Beton Katkısı

Deneylerde kullanılacak olan beton numunelerinin üretimi aşamasında, Basf firmasından sağlanan yeni ikinci nesil bir süperakışkanlaştırıcı olan Glenium Sky 506 kullanılmıştır. Yüksek oranda su azaltan, betonun kıvam kaybını önleyen yüksek kalitede beton yapım olanağı veren bir kimyasal katkı maddesidir [34].

Beton üretiminde, bağlayıcılar ve agrega homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırıldıktan sonra, karışımda belirlenen suyu %90' ı ilave edilmiştir. Kalan suyla beraber, süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi de ilave edilip kısa bir süre daha karıştırılmıştır. Tablo 3.5' de kullanılan süperakışkanlaştırıcıya ait teknik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.5: Kullanılan Süperakışkanlaştırıcının Teknik Özellikleri [34].

Malzemenin Yapısı	Polikarboksilik Eter Esaslı
Renk	Kahverengi
Yoğunluk	1,05 – 1,09 g/cm ³
Klor İçeriği % (EN 480–10)	<0,1
Alkali İçeriği % (EN 480–12)	<3

3.1.4.2. Hava Sürükleyici Beton Katkısı

Beton üretimleri sırasında, Basf firması tarafından üretilen yağ alkolü ve amonyum tuzu esaslı bir hava sürükleyici beton katkısı olan Micro Air 200 kullanılmıştır. Beton içerisine kontrollü hava sürükleyerek kalıcı ve optimum aralıklarla hava kabarcıkları oluşturan ve betonun donma-çözünme döngüsüne karşı dayanıklılığını arttıran, hava sürükleyici beton katkı maddesidir [35].

Beton üretimi esnasında bağlayıcılar ve agrega homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırıldıktan sonra, karışımda belirlenen suyu %70' i ilave edilmiştir. Kalan

suyla beraber, hava sürükleyici katkı maddesi de ilave edilip kısa bir süre daha karıştırılmıştır. Tablo 3.6’ da kullanılan hava sürükleyici beton katkısına ait teknik özellikler verilmiştir.

Tablo 3.6: Kullanılan Hava Sürükleyici Beton Katkısının Teknik Özellikleri [35].

Malzemenin Yapısı	Yağ Alkolü ve Amonyum Tuzu Esaslı
Renk	Amber
Yoğunluk	1,00 – 1,02 g/cm ³
Klor İçeriği % (EN 480–10)	<0,1
Alkali İçeriği % (EN 480–12)	<10

3.2. Beton Karışımları

Bu çalışma kapsamında 2 farklı beton karışımı üretilmiştir. Bu karışımlardan 10 adedi kalorimetrik, 20 adedi mekanik deneylerde kullanılmak üzere toplam 30 adet beton üretimi yapılmıştır. Tüm bileşimlerde su/çimento oranı 0,42 değerinde sabit tutulmuş, aynı miktarda mineral katkıları kullanılmıştır. Taze beton deneyleri kapsamında, çökme, özgül ağırlık ve hava miktarları hesaplanmıştır. Beton karışım hesaplamaları TS 802’ de belirtilen esaslara göre yapılmıştır. Tablo 3.7’ de her iki karışım için 1m³ teorik bileşim değerleri verilmiştir.

Tablo 3.7: 1 m³ Teorik Beton Bileşimi ve Özellikleri.

Bileşen	K-1		K-2	
	Ağırlık (kg)	Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)	Ağırlık (kg)	Özgöl Ağırlık (gr/cm ³)
Çimento	280	3,21	275	3,16
Su	103	1,00	102	1,00
KT-1	704	2,60	631	2,57
KT-2	249	2,68	278	2,64
D. Kum	427	2,72	475	2,72
K.T Kumu	523	2,72	476	2,72
Uçucu Kül	50	2,14	50	2,12
Mikro Silika	15	1,39	15	1,39
Akışkanlaştırıcı K.	5,642	1,1	6,05	1,2
Hava Sürükleyici K.	1,207	1,02	0,578	1,01

3.3. Üretimde İzlenen Sıra

- Çimento, agregalar ve uçucu külün kuru karıştırılması,
- Karma suyunun bir kısmının eklenmesi,
- Su ile karıştırılan silis dumanının eklenmesi,
- Karışım suyunun bir kısmının eklenmesi,
- Hava Sürükleyici katkının eklenmesi,
- Süperakışkanlaştırıcı katkının eklenmesi,
- Karışım suyunun kalanının eklenmesi,
- Gerçek birim ağırlık deneyi,
- Çökme deneyi,
- Hava içeriği deneyi,
- Betonun kalıplara yerleştirilmesi ve vibrasyonu.

Kalorimetrik deneyler için 10 ° C, 15 ° C, 20 ° C, 25 ° C, 35 ° C olmak üzere 5 farklı sıcaklıkta hazırlanan numuneler, üretimin sonunda yarı adyabatik kalorimetrelere yerleştirildi ve ısı alıcılarının beton yüzeyi ile temas etmesi sağlandı. Bilgisayara bağlanan alıcılar vasıtasıyla numunelerin erken yaşlarındaki ısı ve buna bağlı olarak dayanım gelişiminin gerçekleşme biçimi izlendi.

Mekanik deneylerde kullanılacak numuneler, farklı sıcaklıklar için hazırlanmış kür havuzlarına alınarak, erken yaşlardaki basınç dayanımı gelişiminin izlenmesi amacıyla belirli zaman aralıkları sonunda silindir basınç deneylerine tabi tutuldu.

3.4. Numune Boyutları ve Şekilleri

Bu çalışma kapsamında, 80 adet, $d = 150\text{mm}$, $h = 300\text{mm}$ ’ lik silindir numune üretilmiştir. Üretilen silindir numunelerden 20 adedi kalorimetrik deneylerde, 60 adedi silindir basınç deneylerinde kullanılmıştır.

3.5. Numune Kodlarının Belirlenmesi

Numune kodları belirlenirken, dökülen betonların yerleştirildikleri andaki sıcaklıkları ve karışım numaraları esas alındı. İlk rakam, karışım numarasını, ikinci rakam ise yerleştirildiği anki sıcaklığını göstermektedir. Örneğin; K-1-20 kodu, 20°C ’ deki 1 karışımını ifade etmektedir. Numune kodları, yerleştirildikleri andaki sıcaklıkları ve özgül ağırlıkları Tablo 3.8’ de gösterilmiştir.

Tablo 3.8: Üretilen Beton Numunelerinin Kodları.

Karışım	Beton Sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	Özgül Ağırlık (kg/m^3)
K-1-10	10	2291
K-1-15	15	2351
K-1-20	20	2353
K-1-25	25	2372
K-1-35	35	2373
K-2-10	10	2293
K-2-15	15	2308
K-2-20	20	2321
K-2-25	25	2323
K-2-35	35	2373

3.6. Taze Beton Deneyleri

Sertleşmekte olan betonun, görünen aktivasyon enerjisinin ölçülmesi öncesinde, taze beton deneyleriyle numunelerin, hedeflenen özellikleri taşıyıp taşımadıkları belirlenmiştir. Bu kapsamda çökme, hava içeriği ve birim ağırlık deneyleri her iki karışım için de ayrı ayrı yapılmıştır.

3.7. Kalorimetrik Deneyler

Yarı adiyabatik kalorimetrelere yerleştirilen, iki karışıma ait taze beton numunelerin, yerleştirildikleri andaki beton sıcaklıkları temel alınarak, ısı gelişimlerinin takip süreleri sonucunda elde edilen hidrasyon dereceleri kullanılarak aktivasyon enerjisi hesapları yapılmıştır.

3.8. Mekanik Deneyler

Aktivasyon enerjisi hesaplamalarında, mekanik deney olarak silindir basınç deneylerinden elde edilen sonuçlar kullanılmıştır. Silindir basınç deneyleri, 2. karışımdan elde edilen beton numunelerine uygulanmıştır.

4. DENEY SONUÇLARI

4.1. Deney Sonuçları

4.1.1. Taze Beton Deneyi Sonuçları

4.1.1.1. Çökme Deneyi

Çökme deneyi, TS EN 12350–2 ‘ye göre yapılmaktadır. Üst çapı 10cm, alt çapı 20cm ve yüksekliği 30 cm olan Abrams konisi kullanılır. Karılmış olan taze beton, üç tabaka halinde koninin içerisine yerleştirilir. Her bir tabaka, çapı 16mm olan özel deney çubuğu ile 25’ er kez şişlenerek betonun sıkışması sağlanır. Koni doldurulduğu zaman üzeri mala ile düzeltilir. Bu işlemden sonra, koni yavaşça çekilerek içerisindeki taze betonun kendi ağırlığı ile çökmesi sağlanır. Taze betonun ilk yüksekliği ile koni çekildikten sonraki yüksekliği arasındaki fark mm cinsinden ölçülmek suretiyle çökme değeri belirlenir. Çökme deneyine ait sonuçlar, Tablo 4.1’ de verilmiştir.

4.1.1.2. Birim Ağırlık Deneyi

Üretilmiş olan beton, kalıplara yerleştirilmeden önce, hacmi bilinen silindir şeklinde bir kap içerisine yerleştirilmiş ve birim hacim ağırlıkları bulunmuştur. Bu işlemden sonra beton, kalıplara yerleştirilmiş ve vibrasyon uygulanmıştır. Bu şekilde taze beton ve vibrasyondan sonra elde edilen taze beton birim ağırlıkları hesaplanmıştır. Hesaplanan birim ağırlık değerleri, Tablo 4.1’ de gösterilmiştir.

4.1.1.3. Hava İçeriği Deneyi

Hava içeriği deneyi, TS EN 12350–7’ de kabul edilen su sütunu metoduna göre yapılmaktadır. Su sızdırmaz kap içerisine sıkıştırılarak yerleştirilmiş, belirli hacimdeki taze beton üzerine, önceden belirlenmiş yüksekliğe kadar su ilave edilir ve su üzerine önceden belirlenmiş hava basıncı uygulanır. Taze beton numunesi içerisinde bulunan hava hacminde, sıkışma nedeniyle meydana gelen azalma, beton içerisindeki hava yüzdesine göre kalibre edilmiş su sütununun, seviyesindeki düşme

miktarı gözlenerek ölçülür. Hava içeriği deneyine ait sonuçlar, Tablo 4.1’ de verilmiştir.

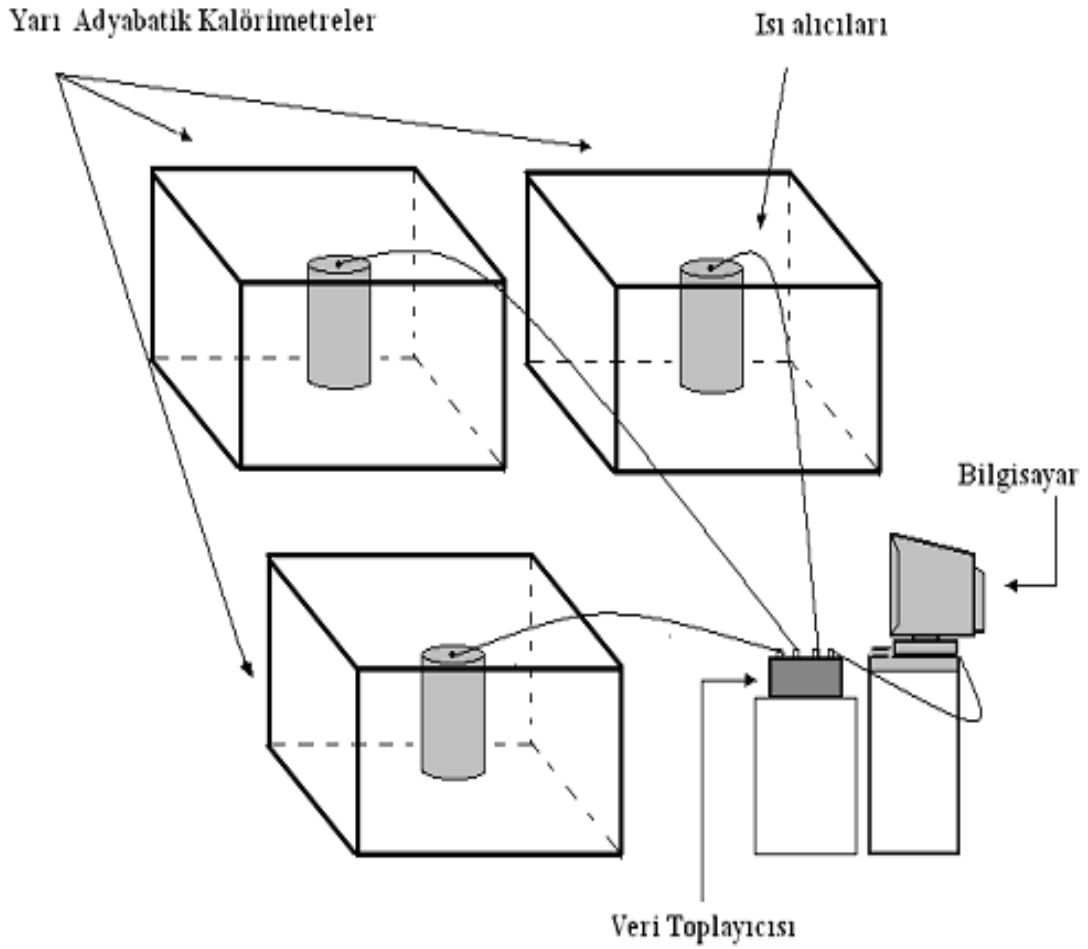
Tablo 4.1: Taze Beton Deneylerinden Elde Edilen Sonuçlar.

Numune Kodu	Beton Sıcaklığı (° C)	Çökme (cm)	Taze Birim Ağırlık (kg/m ³)	Hava İçeriği (%)
K-1-10	10	19	2291	5,7
K-1-15	15	19	2351	4,4
K-1-20	20	19	2353	3,9
K-1-25	25	19	2372	3,4
K-1-35	35	19	2373	3,4
K-2-10	10	19	2293	5,4
K-2-15	15	19	2308	4,6
K-2-20	20	19	2321	4,3
K-2-25	25	19	2323	4,2
K-2-35	35	19	2373	4,2

4.1.2. Kalorimetrik Deney Sonuçları

4.1.2.1. Yarı Adyabatik Deneyler

Sertleşmekte olan betonun ısı gelişiminin takip edilmesi amacıyla kullanılan 3 yarı adyabatik kalorimetre, NT BUILD 388’ e göre imal edilmiştir. Tümüyle ısı kayıplarından izole edilmiş ve sıcaklığı 20 ° C’ de sabitlenmiş bir odaya yerleştirilen yarı adyabatik deney düzeneğinin şematik olarak gösterimi, Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1: Yarı Adyabatik Deney Düzeninin Şematik Olarak Gösterimi.

İmal edilen kalorimetrelere, 20°C ' lik sabit oda sıcaklığında yerleştirilen, içinde 40°C sıcaklığında su bulunan standart silindir numuneler kullanılarak her bir kalorimetre için ısı kaybı katsayısı 2.6.2' de belirtildiği şekilde hesaplanmıştır. Yarı adyabatik kalorimetrelerin ısı kaybı katsayıları, $0,3528 \text{ kJ/h/}^{\circ}\text{C}$ olarak ölçülmüştür.

Taze beton numuneler, kalıplara döküldükten sonra, kalorimetrelere yerleştirilmiştir. Betondaki çimentonun hidratasyonu sonucunda, artan sıcaklıklar 10 ve 30dk' lık zaman dilimleri sonunda, numune sıcaklıkları 20°C ' ye gelene kadar, alıcılar tarafından toplanmış ve veri toplayıcısına iletilmiştir. Bir bilgisayara bağlanmış olan veri toplayıcısı, alıcılardan topladığı verileri bilgisayara iletmıştır.

Hesaplanan ısı kaybı katsayıları ve sıcaklık artışları, kalorimetrelere yerleştirilen 5 farklı sıcaklıktaki beton numunesinin sertleşme evresindeki hidratasyon ısılarının belirlenmesinde kullanılmıştır. Yarı adyabatik kalorimetrelere yerleştirilen betonların

erken yaş evresi boyunca hidrasyon ısılarının değişimi, 2.6.2’ de belirtilen yöntemin bir uygulaması olan DTİ,2003 programı kullanılarak belirlenmiştir [36].

4.1.3. Mekanik Deney Sonuçları

4.1.3.1. Silindir Basınç Deneyleri

Basınç deneylerinde, ölçüleri $\Phi = 150$ ve $h = 300\text{mm}$ ’ lik silindir numuneler üzerinde 2000 kN kapasiteli yükleme makinesi kullanılarak yapılmıştır. 5 farklı sıcaklıkta dökülen betonların priz alma süreleri belirlenmiştir. Beton sıcaklığına ayarlanmış kür havuzlarında bekletilen numunelere, ilk deney süresi priz süresinin 2 katı olmak üzere sonraki her deney süresi, bir öncekinin 2 katı olacak şekilde erken yaş evresi boyunca silindir basınç deneyleri uygulanmıştır. Tablo 4.2’ de priz süreleri, deney süreleri ve ortalama silindir basınç dayanımları verilmiştir.

Tablo 4.2: Silindir Basınç Deneylerinde Kullanılan Süreler ve Basınç Dayanımları

Numune Kodu	Priz Süresi (saat)	Deney Süresi (saat)				Basınç Dayanımı (Ortalama)(MPa)			
K-2-10	7,5	15	30	45	60	1,2	8,5	13,5	19,7
K-2-15	7	14	29	43	57	1,7	13,0	18,8	23,3
K-2-20	6,5	13	26	39	52	2,5	16	21	25
K-2-25	6	12	24	36	49	3,1	18,9	24,1	29,2
K-2-35	5	10	20	30	40	5,2	20,2	24,4	28,0

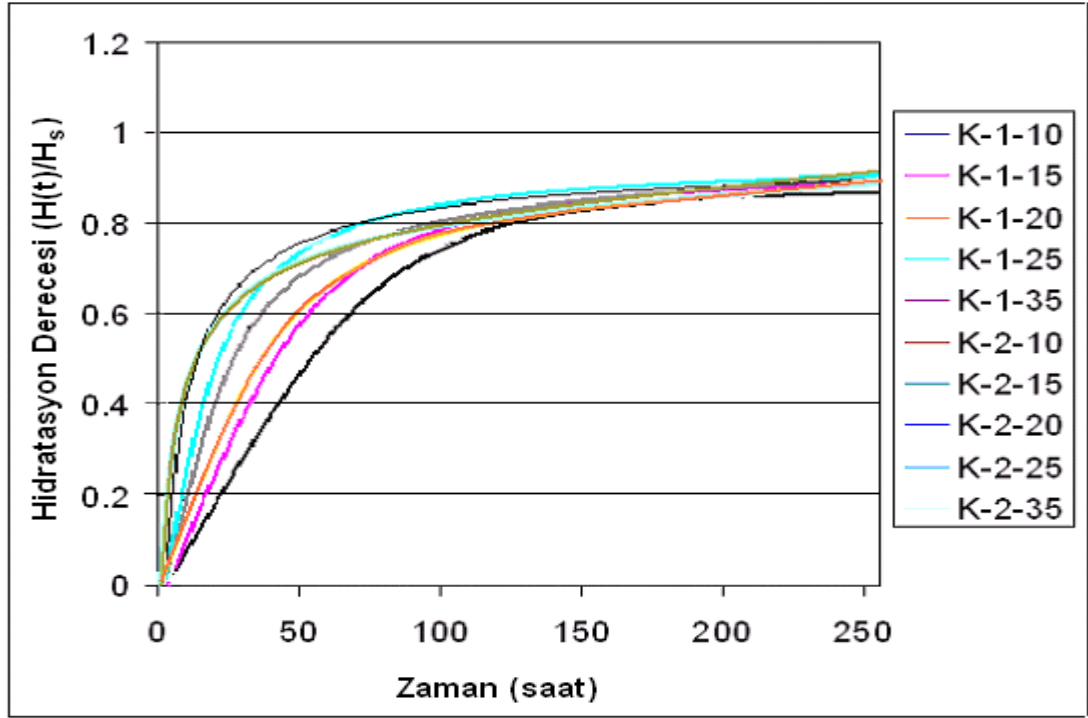
Silindir basınç deneylerinde kullanılan numunelerin basınç dayanımı değerleri ve priz süreleri EK C’ de ayrıntılı olarak verilmektedir.

4.2. Aktivasyon Enerjisi Değerlerinin Hesaplanması

4.2.1. Kalorimetrik Deneyler Kullanılarak Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Hidrasyon derecesi-zaman eğrileri üzerinden, erken yaş evresinde, yaklaşık olarak 0,1-0,5’ lik hidrasyon derecesi aralığındaki kısımların eğimleri bulunmuştur

Hidratasyon derecelerinin zamana bağılı olarak gelişimleri Şekil 4.2’ de verilmektedir.



Şekil 4.2: Hidratasyon Derecelerinin Zamana Bağlı Olarak Gelişimi

Hidratasyon derecesi-zaman eğrileri üzerinden bulunan bu eğimler kullanılarak, her iki karışım için de Hız ve Türetilmiş Hız yöntemleriyle betonların aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Hız yöntemi kullanılarak hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri K-1 için Tablo 4.3’ de, K-2 için Tablo 4.4’ de, verilmiştir

Tablo 4.3: Hız Yöntemi Kullanılarak Hesaplanan Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-1)

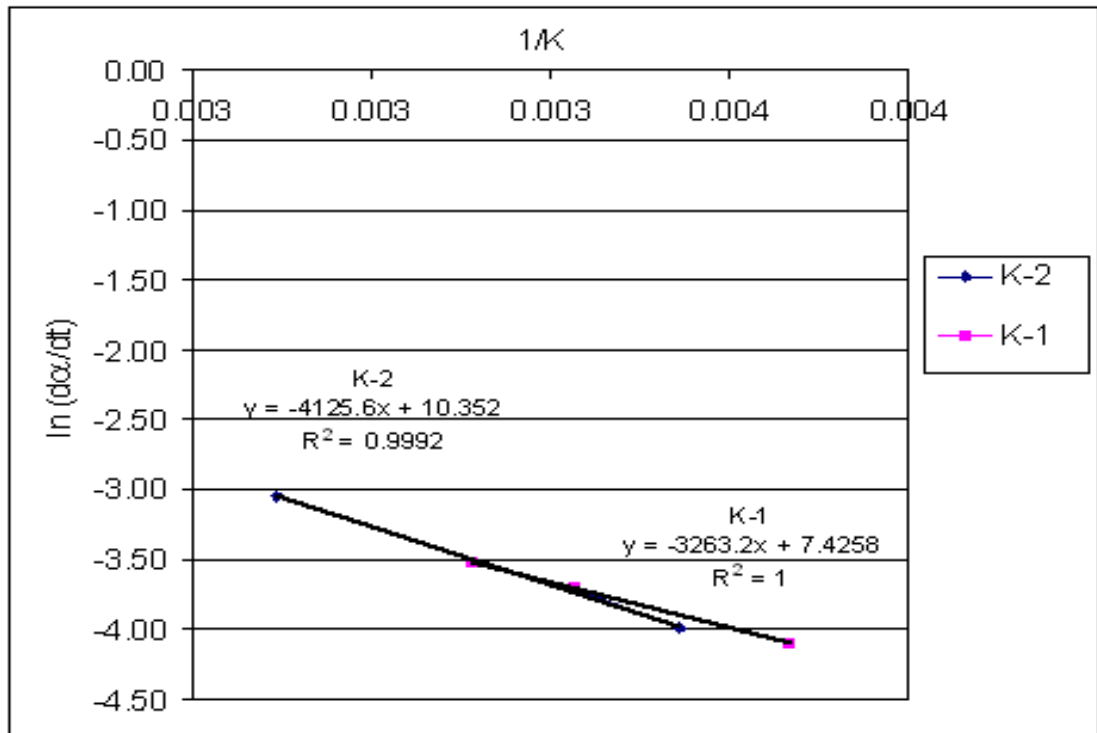
Numune Kodu	$\frac{d\alpha}{dt}$	Ea Hız (j/mol)	Ea $T \geq 20^{\circ}C$ (j/mol)	Ea $T = 15^{\circ}C$ (j/mol)	Ea $T = 10^{\circ}C$ (j/mol)
K-1-10	0,0165	27252.41	26440	34300	42100
K-1-15	0,0182	41708.47			
K-1-20	0,0245	-			
K-1-25	0,0294	26470.49			
K-1-35	0,0395	26415.80			

Tablo 4.4: Hız Yöntemi Kullanılarak Hesaplanan Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2)

Numune Kodu	$\frac{d\alpha}{dt}$	Ea Hız (j/mol)	Ea $T \geq 20^\circ \text{C}$ (j/mol)	Ea $T = 15^\circ \text{C}$ (j/mol)	Ea $T = 10^\circ \text{C}$ (j/mol)
K-2-10	0,0132	42353.71	31000	37380	43760
K-2-15	0,0186	38084.17			
K-2-20	0,0244	-			
K-2-25	0,0298	29026.29			
K-2-35	0,0475	33110.23			

Kalorimetrik deneylerden elde edilen hidrasyon derecelerinin ve ısılarının zamana bağlı olarak gelişimlerinin şematik olarak gösterimi, EK A' da, tablo biçiminde gösterimi ise EK B' de ayrıntılı olarak verilmektedir.

Türetilmiş Hız yöntemi uygulamasında, 2.1.5.3' de açıklandığı gibi, her bir beton sıcaklığı için, $\ln(d\alpha/dt)_i$ değeri, buna karşılık gelen $1/T_i$ değerine göre grafikte bir nokta olarak işaretlenmiştir. Deneylere ait verilerin, grafikte oluşturduğu noktalar arasında, 3 noktayı birleştiren düz çizginin eğimi hesaplanmıştır. Bulunan eğim değeri, k sabitine bölünmüş aktivasyon enerjisi değeri, denklem 2.15' de ifade edildiği şekilde hesaplanmıştır. ASTM tarafından önerilen bu yöntem, farklı sıcaklıklarda kür edilmiş betonlar için, diğer deneysel yöntemlerden farklı olarak ortalama bir aktivasyon enerjisi değeri vermektedir. Türetilmiş Hız yönteminin uygulanması Şekil 4.3' de gösterilmiştir.



Şekil 4.3: Türetilmiş Hız Yönteminin Uygulanması (Kolorimetrik Deneyler)

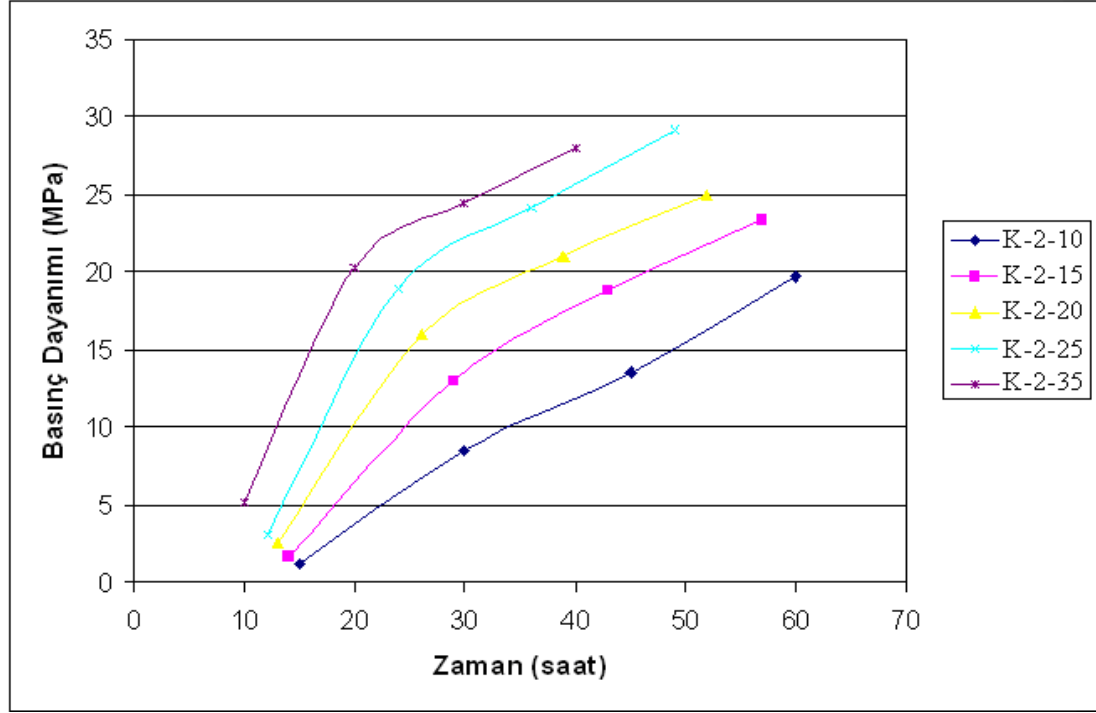
Hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri, Tablo 4.5’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.5: Türetilmiş Hız Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K–1, K–2)

Numune Kodu	$\frac{d\alpha}{dt}$	$\ln \left[\frac{d\alpha}{dt} \right]$	R^2	r	m	Ea (j/mol)
K–1–10	0,0165	-4.10439	0,999	0,999	-3263,2	27130
K–1–15	0,0182	-4.00633				
K–1–20	0,0245	-3.71317				
K–1–25	0,0294	-3.52337				
K–1–35	0,0395	-3.23145				
K–2–10	0,0132	-4.32754	1,000	1,000	-4125,6	34300
K–2–15	0,0186	-3.98459				
K–2–20	0,0244	-3.71317				
K–2–25	0,0298	-3.51325				
K–2–35	0,0475	-3.04703				

4.2.2. Mekanik Deneyler Kullanılarak Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Silindir basınç deneylerinden elde edilen basınç dayanımı-zaman eğrileri üzerinden, doğrusal olan kısımların eğimleri bulunmuş ve bu eğimler kullanılarak, Hız ve Türetilmiş Hız yöntemleriyle aktivasyon enerjileri hesaplanmıştır. Basınç dayanımlarının zamana bağlı olarak değişimleri Şekil 4.4' de verilmektedir.



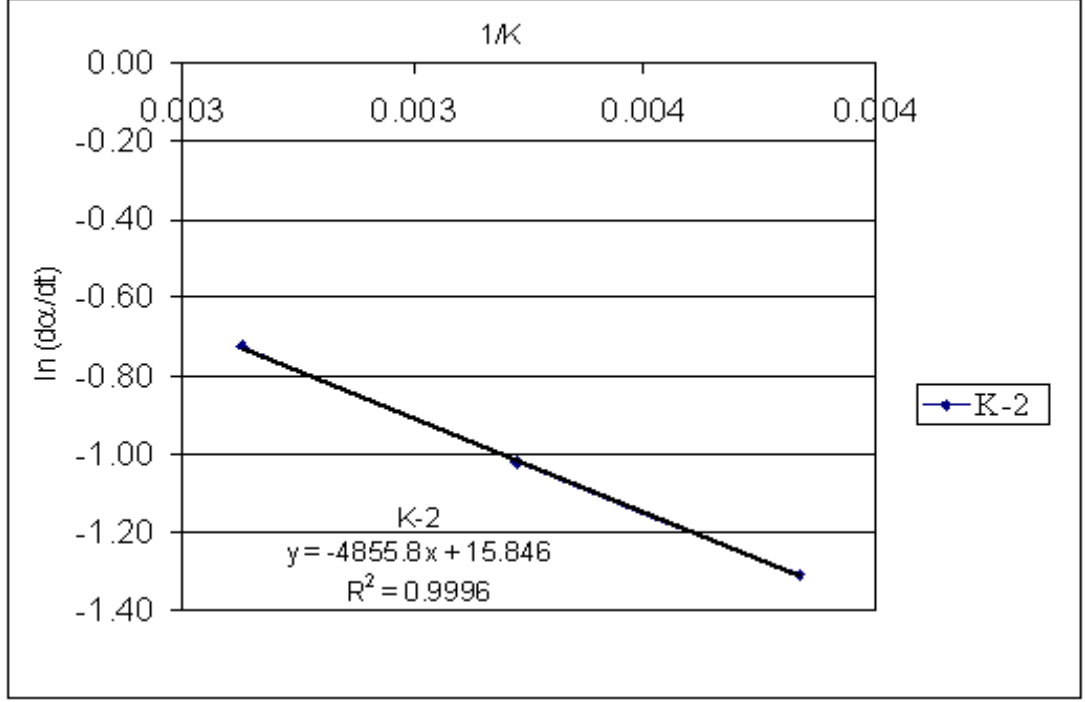
Şekil 4.4: Basınç Dayanımlarının Zamana Bağlı Olarak Değişimleri (K-2)

Hız yöntemi kullanılarak hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri Tablo 4.6' da verilmiştir.

Tablo 4.6: Hız Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2)

Numune Kodu	$\frac{d\alpha}{dt}$	Ea Hız (j/mol)	Ea $T \geq 20^\circ \text{C}$ (j/mol)	Ea $T = 15^\circ \text{C}$ (j/mol)	Ea $T = 10^\circ \text{C}$ (j/mol)
K-2-10	0,27	40379.34	35140	39800	44430
K-2-15	0,36	41819.78			
K-2-20	0,485	-			
K-2-25	0,67	46913.69			
K-2-35	0,74	23366.97			

Farklı beton sıcaklıklarında elde edilen basınç dayanımı-zaman eğrilerinden hesaplanan eğimler kullanılarak Türetilmiş Hız yöntemine göre aktivasyon enerjisi değeri hesaplanmıştır. Türetilmiş Hız yönteminin uygulanması Şekil 4.5’ de verilmiştir



Şekil 4.5: Türetilmiş Hız Yönteminin Uygulanması (Mekanik Deneyler)

Türetilmiş Hız yöntemi kullanılarak hesaplanan aktivasyon enerjisi değeri, Tablo 4.7’ de gösterilmiştir

Tablo 4.7: Türetilmiş Hız Yöntemi Kullanılarak Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2)

Numune Kodu	$\frac{d\alpha}{dt}$	$\ln \left[\frac{d\alpha}{dt} \right]$	R^2	r	m	Ea (j/mol)
K-2-10	0.27	-1.30933	0,999	0,999	4855,8	40370
K-2-15	0.36	-1.02165				
K-2-20	0.485	-0.72361				
K-2-25	0.67	-0.40048				
K-2-35	0.74	-0.30111				

4.2.3. Yaklaşık Yöntemler Kullanılarak Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Betonun ısı geçmişini ve kimyasal bileşimini temel alarak, 2.5.2’ de belirtildiği şekilde matematiksel ve kimyasal yöntemler kullanılmıştır. Freisleben Hansen ve Pedersen(FHP) tarafından önerilen beton sıcaklıklarına bağlı olarak bulunan aktivasyon enerjisi değerleri Tablo 4.8’ de gösterilmiştir.

Tablo 4.8: FHP Yönteminden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri

T_c	Ea	Ea $T_c < 20\text{ C}^\circ$
10	48200	0,0336
15	40850	0,0356
20	33500	0,0450
25	33500	0,0594
35	33500	0,0687

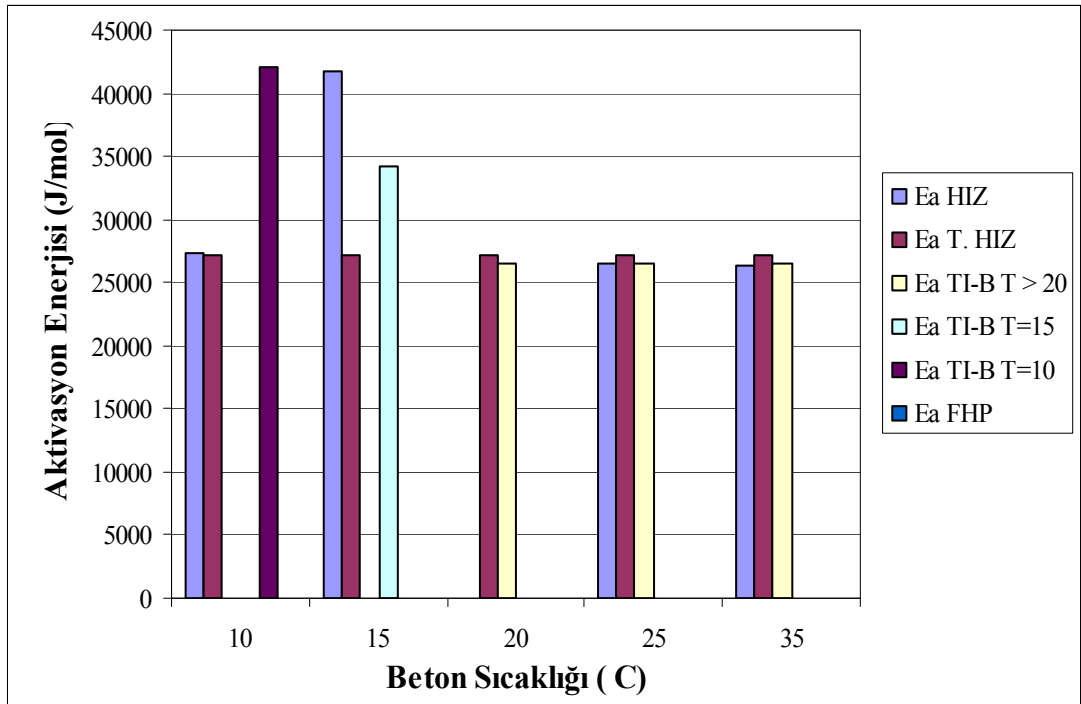
Betonun karışım özellikleri ve çimento bileşenleri dikkate alınarak yapılan, kimyasal bir aktivasyon enerjisi hesap yöntemi olan, Schindler, Lerch ve Ford(SLF)’ un çimento bileşiminin hidrasyon üzerindeki etkilerini temel alan hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Denklem 2.18a, 2.18b ve 2.18c kullanılarak yapılan hesap sonucunda K-1 için aktivasyon enerjisi, 24658,04 J/mol, K-2 için 33925,43 J/mol olarak bulunmuştur.

5. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ VE DEĞERLENDİRİLMESİ

5.1. 1. Karışıma Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

5.1.1. Kalorimetrik Deneyler

Şekil 5.1’ de Hız ve Türetilmiş Hız yöntemleri kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin beton sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi görülmektedir. Yarı adyabatik kalorimetrelere 10 ve 15 °C’ de yerleştirilen numunelerin aktivasyon enerjisi değerlerinin, 25 ve 35 °C’ de yerleştirilen numunelerin aktivasyon enerjisi değerlerinden fazla olduğu görülmüştür. Benzer şekilde, beton sıcaklığındaki artışın, aktivasyon enerjisi değerlerinin düşmesine sebep olduğu görülmektedir.



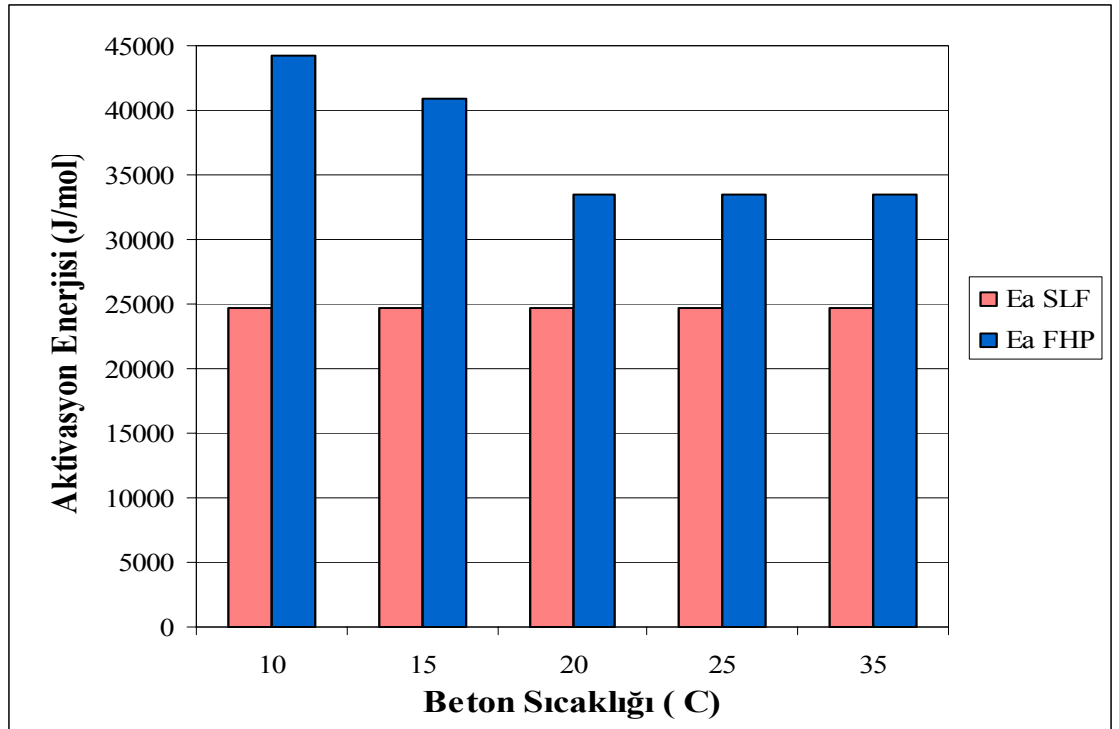
Şekil 5.1: Aktivasyon Enerjilerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi (K-1)

Türetilmiş Hız yöntemi, farklı beton sıcaklıklarındaki hidrasyon süreci için ortalama bir aktivasyon enerjisi değeri vermektedir. Bu yöntemle elde edilen

aktivasyon enerjisi değerinin, 25 ve 35 °C’ deki betonların Hız yönteminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerine yakın olduğu görölmüştür. Bu yakınlık 20 °C’ nin altındaki betonların aktivasyon enerjileri için de geçerlidir. TI-B 102’ de Hız yöntemi için belirtilen düzeltme kıstaslarının uygulanması sonucu elde edilen 20 °C’ nin üstündeki betonların ortalama aktivasyon enerjilerinin 20 °C’ nin altındakilere nazaran daha düşük çıktığı görölmüştür. 15 °C’ deki betonların aktivasyon enerjileri ise genel olarak diğer betonların aktivasyon enerjilerinden yüksektir.

5.1.2 Yaklaşık Yöntemler

Şekil 5.2’ de Freisleben Hansen ve Pedersen(FHP) tarafından önerilen, beton sıcaklıklarını temel alan matematiksel bir yöntemden ve Schindler, Lerch ve Ford tarafından önerilen kimyasal bir aktivasyon enerjisi belirleme yönteminden elde edilen değerler görölmektedir. FHP yöntemine göre 10 ve 15 °C’ de yerleştirilen numunelerin aktivasyon enerjisi değerlerinin, 25, 30 ve 35 °C’ de yerleştirilen numunelerin aktivasyon enerjisi değerlerinden fazla olduğu görölmüştür. Schindler, Lerch ve Ford’ un çimento bileşimini dikkate alarak yaptıkları aktivasyon enerjisi hesaplamaları, ortalama bir aktivasyon enerjisi değeri vermektedir.

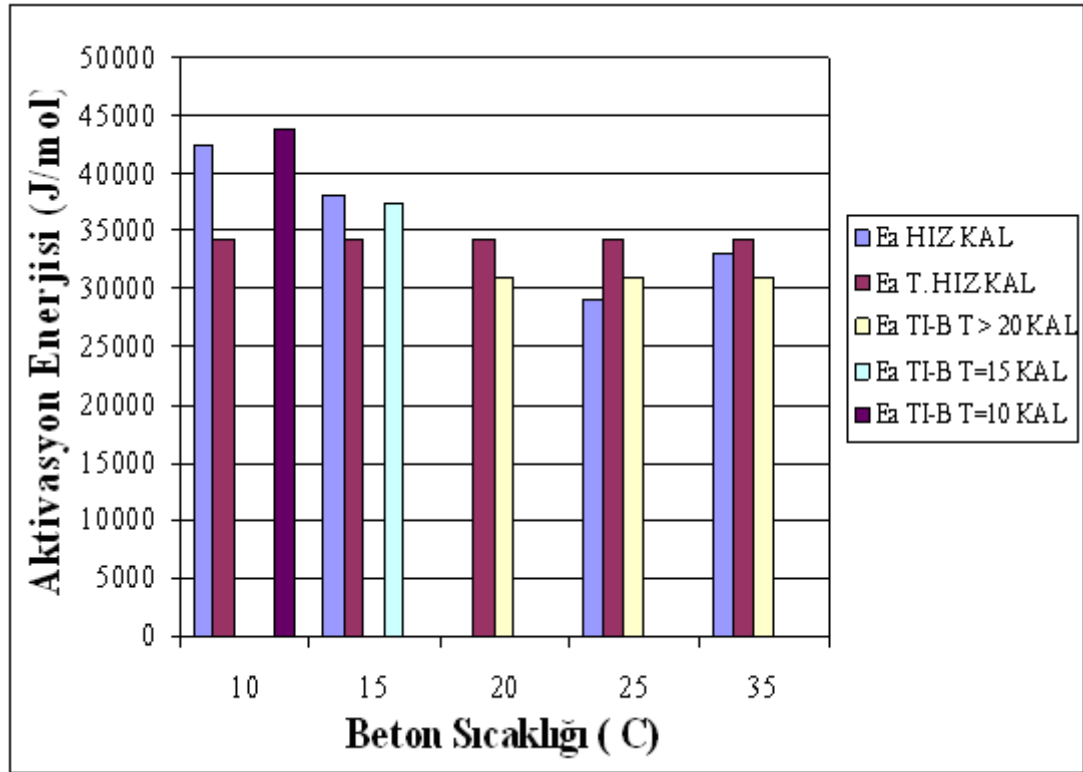


Şekil 5.2: Yaklaşık Yöntemlerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri
(K-1)

5.2. 2. Karışıma Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

5.2.1. Kalorimetrik Deneyler

Şekil 5.3’ de Hız ve Türetilmiş Hız yöntemleri kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin farklı beton sıcaklıklarındaki değişimi görülmektedir. Yarı adyabatik kalorimetrelere 10 ve 15 °C’ de yerleştirilen numunelerin aktivasyon enerjisi değerlerinin, 25 ve 35 °C’ de yerleştirilen numunelerin aktivasyon enerjisi değerlerinden yüksek olduğu görülmüştür. 25 °C’ de yerleştirilen numunelerin ise aktivasyon enerjisi değeri düşüktür. Türetilmiş Hız yönteminden elde edilen değerler, tüm beton sıcaklıkları için Hız yönteminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri ile uyum içerisindedir.

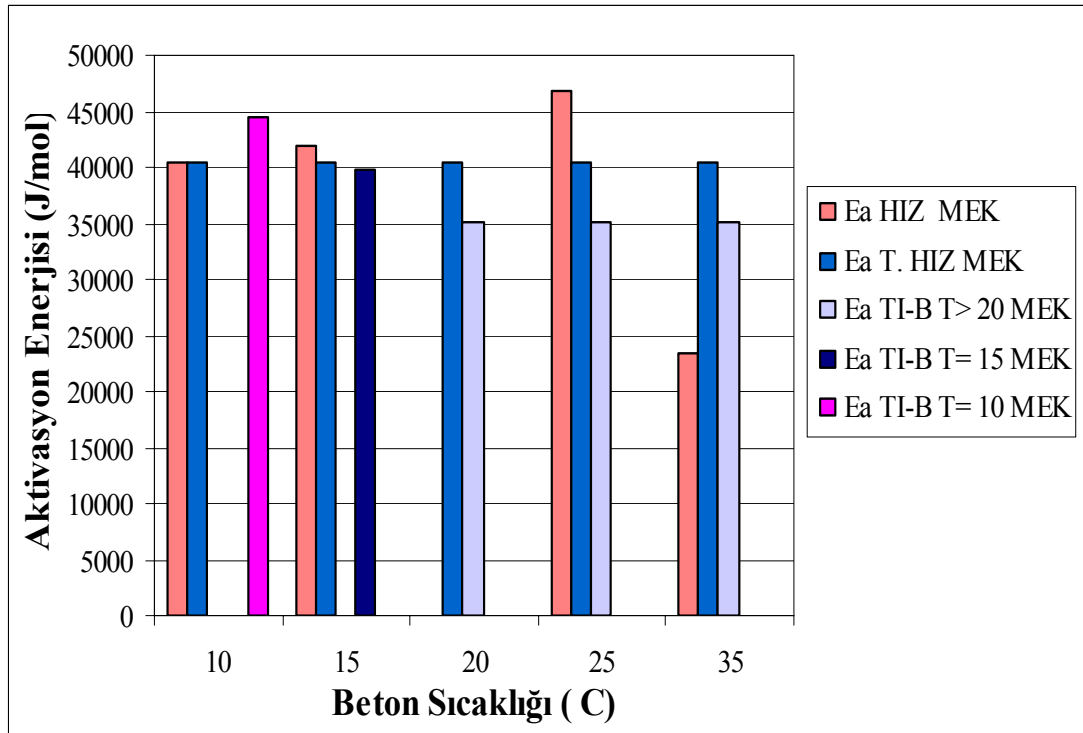


Şekil 5.3: Kalorimetrik Deneylerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjilerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi (K-2)

10 °C’ deki betonların aktivasyon enerjisi değerlerinin ise diğer sıcaklıklardaki betonların her iki yönetime göre hesaplanan aktivasyon enerjilerinden yüksek olduğu görülmüştür.

5.2.2 Mekanik Deneyler

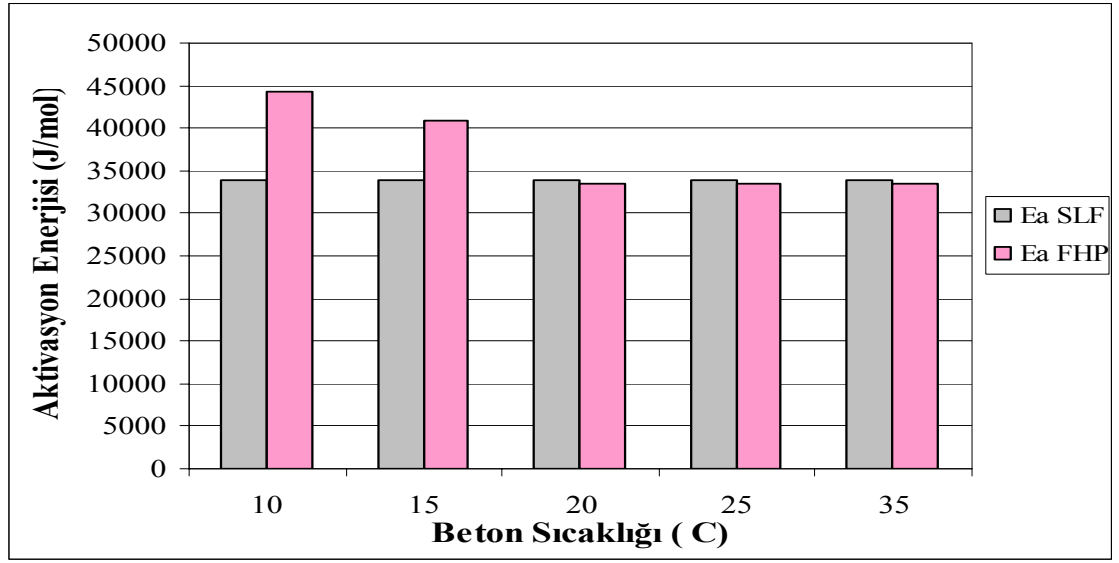
Şekil 5.4’ de silindir basınç deneylerinden elde edilen veriler üzerinden Hız ve Türetilmiş Hız yöntemleri kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin beton sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi görülmektedir. 10 ve 15 °C’ de kür havuzlarında bekletilen numunelerin Hız yönteminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri, 25 °C’ deki numunelerinkinden düşük, 35 °C’ de yerleştirilen numunelerin aktivasyon enerjisi değerlerinden yüksek olduğu görülmüştür. Bununla birlikte 20 °C’ nin üstündeki betonların Türetilmiş Hız yöntemine göre elde edilen aktivasyon enerjisi değerleriyle, TI-B 102’ de Hız yöntemi için belirtilen şekilde elde edilen ortalama aktivasyon enerjisi değerleri arasında düşük farklılıklar oluşmaktadır. Oluşan bu farklılıklar 10 ve 15 °C’ deki betonların aktivasyon enerjileri göz önünde tutulduğunda daha da azalmıştır. Özellikle 15 °C’ deki beton numunelerde bu farklılık en aza inmektedir. Buna karşın, 35 °C’ deki betonların Hız yöntemine göre elde edilen aktivasyon enerjileri, TI-B 102 ve Türetilmiş Hız yöntemleri dikkate alındığında oldukça düşük çıkmaktadır.



Şekil 5.4: Mekanik Deneylerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjilerinin Sıcaklığa Bağlı Değişimi (K-2)

5.2.3 Yaklaşık Yöntemler Kullanılarak Elde Edilen Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil 5.5’ de Freisleben Hansen ve Pedersen(FHP) ve Schindler, Lerch ve Ford(SLF) yöntemlerinden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri görülmektedir. FHP yöntemine göre hesaplanan 25 ve 35 °C’ deki betonların aktivasyon enerjisi değerleri SLF yönteminden elde edilen sonuçlara çok yakın çıkmaktadır. İki yöntem arasında oluşan fark 10 ve 15 °C’ deki beton sıcaklıklarında hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri için artış göstermektedir.

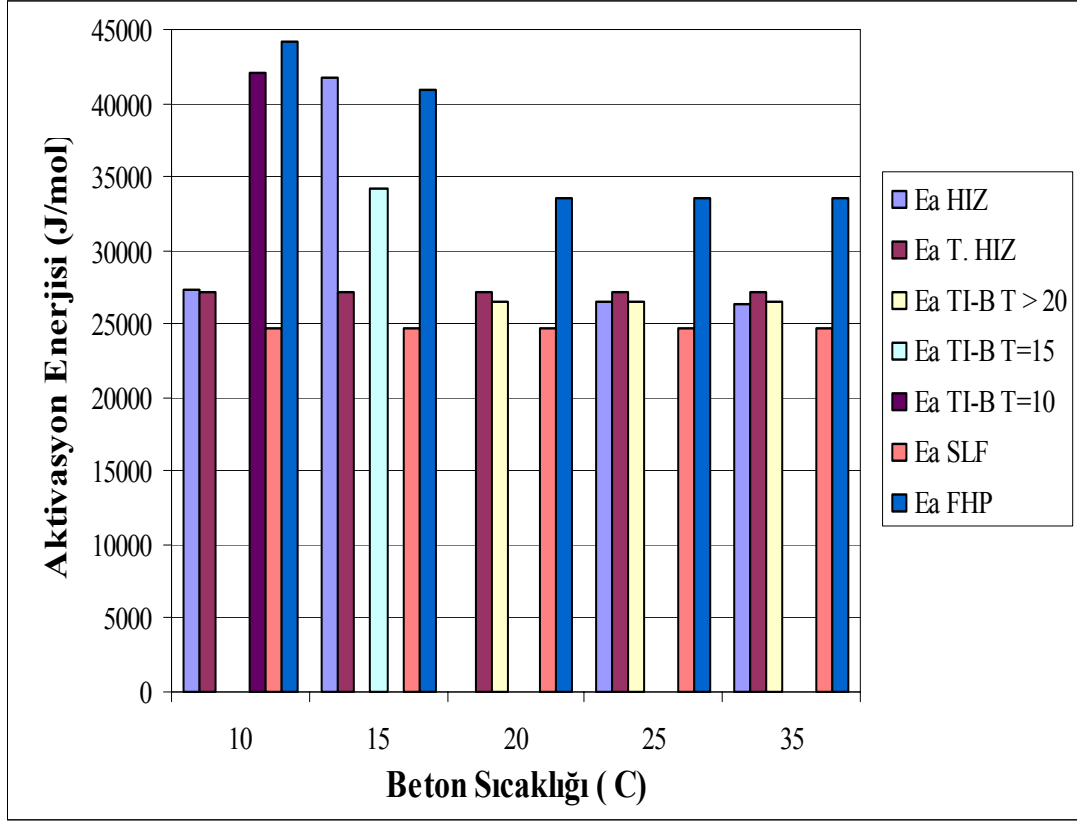


Şekil 5.5: Yaklaşık Yöntemlerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2)

5.3. Aktivasyon Enerjisi Değerlerinin Genel Olarak İrdelenmesi

Şekil 5.6’ da 1. karışım için kalorimetrik ve yaklaşık yöntemlerden elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin beton sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Genel olarak 20 °C’ nin altındaki sıcaklıklarda yerleştirilen betonların aktivasyon enerjileri, 20 °C’ nin üstündekilere oranla daha yüksek olduğu görülmektedir. Ortalama aktivasyon enerjisi değerleri veren Türetilmiş Hız ve Schindler, Lerch ve Ford(SLF) yöntemlerinden elde edilen sonuçlar birbirlerine yakın çıkmaktadır. Benzer şekilde, Hız ve Freisleben Hansen ve Pedersen(FHP) yöntemlerinden elde edilen sonuçlar da birbirleriyle örtüşmektedir. 20 °C’ nin üstündeki sıcaklıklarda bulunan betonlar için kullanılan deneysel ve yaklaşık yöntemlerle hesaplanan aktivasyon enerjileri, 10 ve 15 °C’ deki betonların

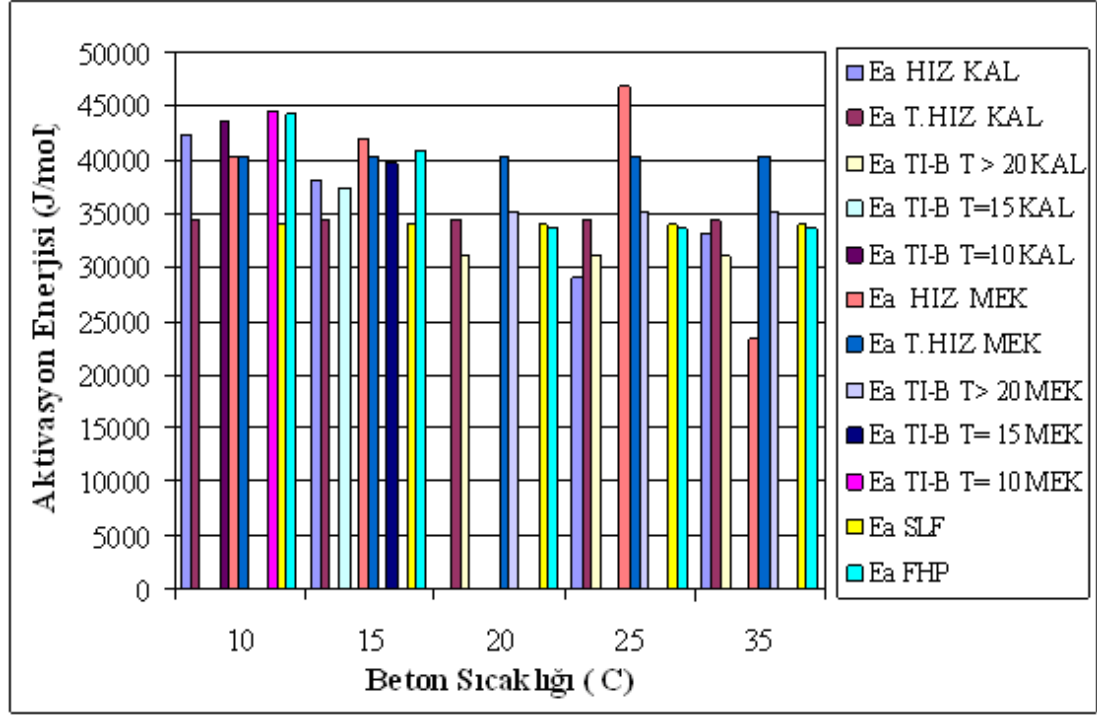
aktivasyon enerjilerine göre daha az farklılıklar göstermektedir. FHP yönteminden elde edilen sonuçlar, diğer deneysel ve yaklaşık yöntemlerle bulunan aktivasyon enerjisi değerlerine göre yüksek değerler vermektedir.



Şekil 5.6: Farklı Yöntemlerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-1)

Şekil 5.7' de 2. karışım için kalorimetrik, mekanik ve yaklaşık yöntemlerden elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin beton sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi verilmektedir. Mekanik deneylerden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri, diğer yöntemlere ve özellikle kalorimetrik deneylerden elde edilen sonuçlara oranla daha yüksek çıkmaktadır. Tüm hesap yöntemlerinde 10 ve 15 °C' de yerleştirilen numunelerin aktivasyon enerjisi değerlerinin, 20 ve 35 °C' de yerleştirilen numunelerin aktivasyon enerjisi değerlerinden fazla olduğu görülmüştür. Bununla birlikte, 25 °C' deki betonların aktivasyon enerjisi değerlerinin diğer beton sıcaklıklarındakilere oranla daha yüksek olduğu gözlenmektedir. Kalorimetrik sonuçlara uygulanan Türetilmiş Hız yönteminden elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri, mekanik Türetilmiş Hız sonuçlarına nazaran, Schindler, Lerch ve Ford(SLF) yöntemleriyle belirlenen aktivasyon enerjisi değerleriyle daha fazla uyum

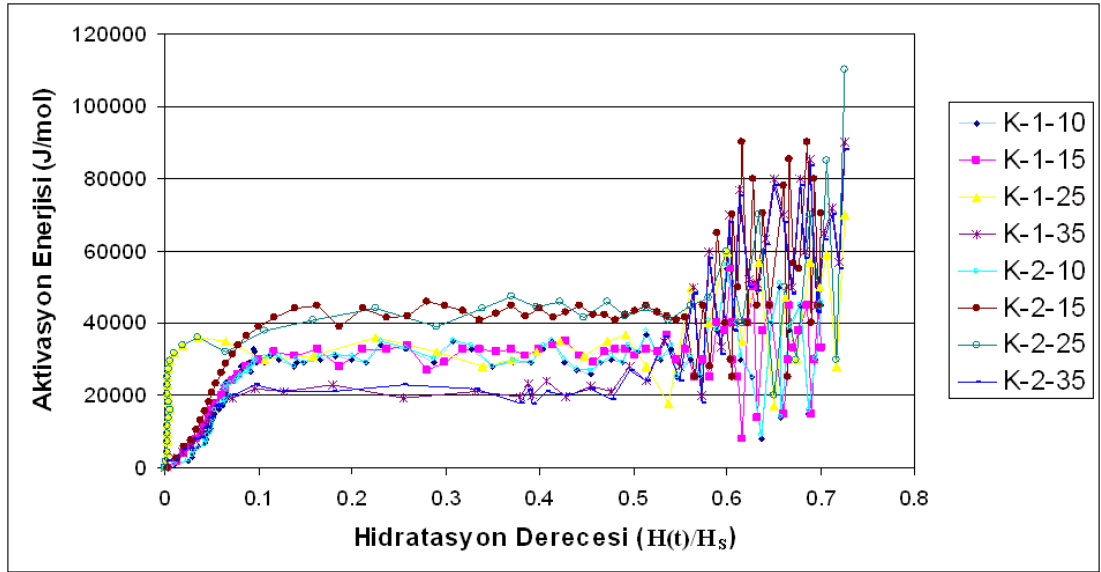
içerisindedir. Benzer şekilde, Mekanik ve kalorimetrik sonuçlara uygulanan Hız ve Freisleben Hansen ve Pedersen(FHP) yöntemlerinden elde edilen aktivasyon enerjileri 15 ve 25 °C’ deki beton sıcaklıklarında, 10 ve 35 °C’ deki sıcaklıklara göre göre daha yakın değerler almaktadır.



Şekil 5.7: Farklı Yöntemlerden Elde Edilen Aktivasyon Enerjisi Değerleri (K-2)

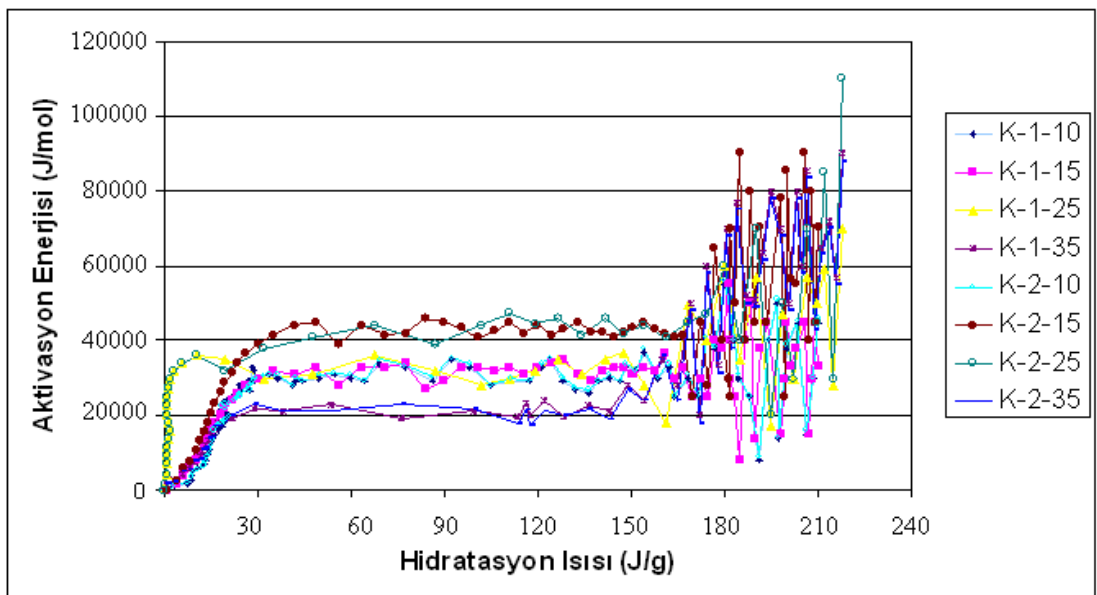
Şekil 5.8’ de her iki karışım için aktivasyon enerjisi değerlerinin farklı beton sıcaklıklarındaki hidratasyon derecelerine bağlı olarak değişimleri verilmektedir. 10 ve 15 °C’ de yerleştirilen numunelere ait hidratasyon derecesi-zaman grafiklerinden elde edilen eğimlerin 25 ve 35 °C’ deki numunelere oranla daha düşük olduğu gözlenmektedir. Hidratasyon derecesi-zaman grafiklerinin eğimlerinde beton sıcaklıklarına bağlı olarak meydana gelen artış, aktivasyon enerjilerinde azalmaya sebep olmaktadır. Yerleştirilme evresinden sonra gelen erken yaş evresi boyunca, yaklaşık olarak 0,1–0,5’ lik gelişim derecelerinde aktivasyon enerjisi değerlerinin sabit olarak kaldığı görülmüştür. 0,5’ lik hidratasyon derecelerinden sonraki gelen kısımlarda, aktivasyon enerjilerinin kararsız bir biçimde değiştiği belirlenmiştir. Özellikle 0,5’ lik hidratasyon derecelerinden sonra aktivasyon enerjilerinde, çok yüksek iniş-çıkışlar meydana gelmiştir. 25 ve 35 °C’ deki numunelerin aktivasyon enerjilerinde 10 ve 15 °C’ deki numunelere kıyasla daha büyük miktarlarda iniş-çıkış

gözlenmiştir. Bununla birlikte, sıcaklığın artışı 0,5' lik hidrasyon derecelerinden sonraki evrelerde aktivasyon enerjisi değerlerini arttırmaktadır.



Şekil 5.8: Aktivasyon Enerjilerinin Hidrasyon Derecelerine Bağlı Olarak Değişimi

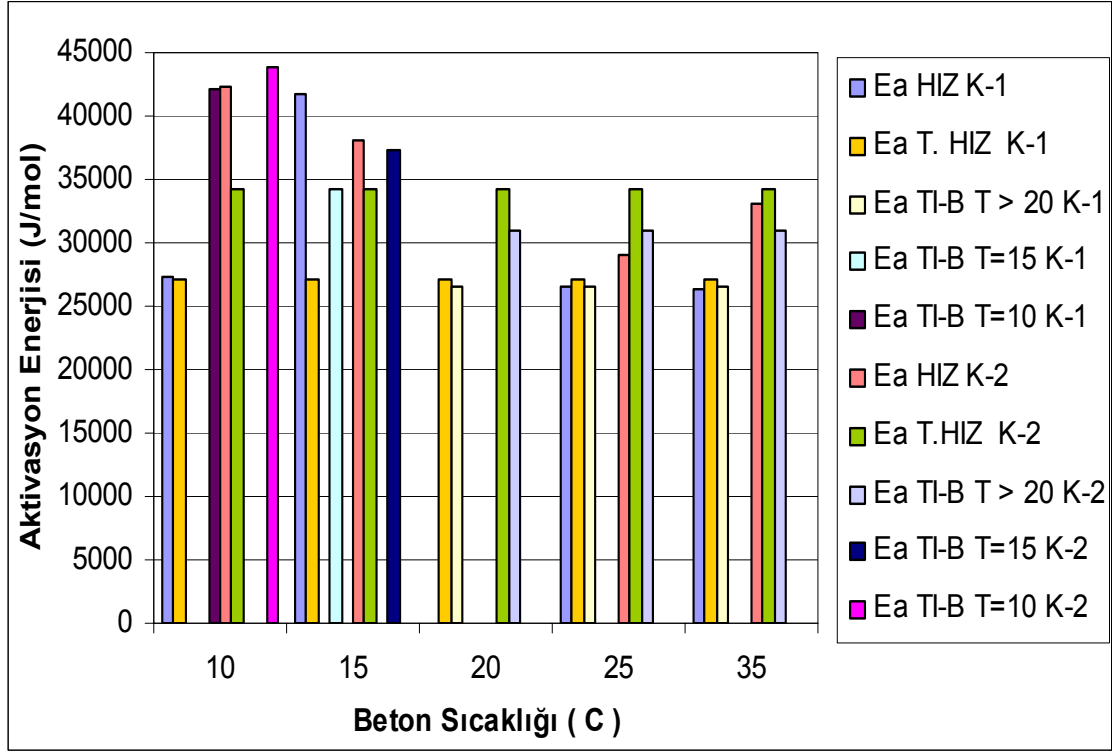
Şekil 5.9' da her iki karışım için farklı beton sıcaklıklarında, aktivasyon enerjisi değerlerine bağlı olarak değişen hidrasyon ısı miktarları gözlenmektedir. 0,1 -0,5' lik gelişim derecelerine karşılık gelen hidrasyon ısıları, yaklaşık olarak 25 -150 J/gr' lık bir ısı aralığında değişmektedir. Bu evrede aktivasyon enerjisi değerlerinin sabit olarak kaldığı belirlenmiştir. 150 -210 J/gr' lık ısı aralığında ise, aktivasyon enerjilerinin büyük miktarlarda iniş-çıkış gösterdiği görülmektedir.



Şekil 5.9: Aktivasyon Enerjilerinin Hidrasyon Isılarına Bağlı Olarak Değişimi

5.4. 1. ve 2. Karışıma Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

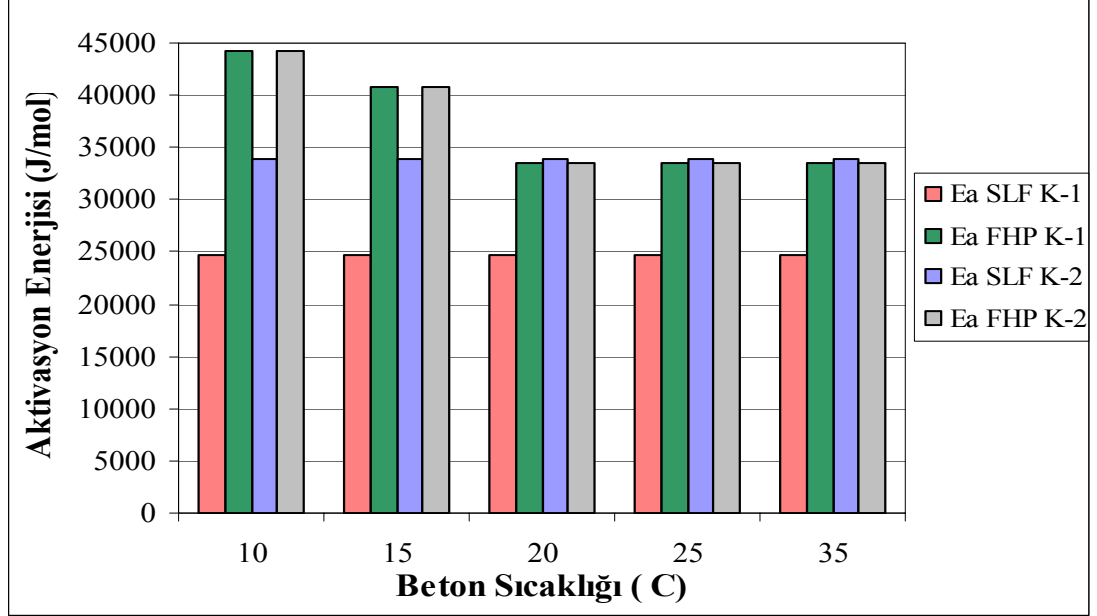
Şekil 5.10’ da her iki karışım için Hız ve Türetilmiş Hız yöntemleri kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin beton sıcaklıklarına bağlı olarak değişimi görülmektedir.



Şekil 5.10: 1. ve 2. Karışıma Uygulanan Deneylerden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

Genel olarak her iki karışım da, 20°C’ nin altındaki beton sıcaklıklarında elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin 20°C’ nin üstündekilere nazaran daha yüksek çıktığı görülmektedir. K-1 karışımı dikkate alındığında, 20°C’ nin üstündeki sıcaklıklar için elde edilen Hız, Türetilmiş Hız ve TI-B sonuçlarının K-2 karışımından aynı sıcaklık değerleri için elde edilen sonuçlardan daha fazla uyum içerisinde olduğu gözlenmiştir. Buna karşın, K-2 karışımı için 20°C’ nin üstündeki sıcaklıklarda Hız ve TI-B sonuçlarının, K-1 ile karşılaştırıldığında, daha uyumlu olduğu görülmektedir. K-2 karışımının aktivasyon enerjisi değerleri, 5 farklı sıcaklık ve tüm aktivasyon enerjisi hesaplama yöntemleri dikkate alındığında K-1 karışımına ait değerlerden fazla çıkmaktadır.

Şekil 5.11’ de her iki karışım için SLF ve FHP yöntemleri kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin farklı beton sıcaklıklarındaki değişimleri görülmektedir.



Şekil 5.11: 1. ve 2. Karışıma Uygulanan Yaklaşık Yöntemlerden Elde Edilen Sonuçların Karşılaştırılması

K-1 ve K-2 karışımında FHP yöntemine göre hesaplanan, 20°C’ nin üstündeki sıcaklıklar için elde edilen aktivasyon enerjisi değerleri ile K-2 karışımında SLF yönteminden elde edilen sonuçların uyum içerisinde olduğu görülmektedir. Bu uyum, 20°C’ nin altındaki sıcaklıklarda ise, FHP yöntemi açısından devam etmektedir. Genel olarak, K-2 karışımı için SLF yöntemi kullanılarak hesaplanan aktivasyon enerjisi değerleri, K-1 karışımının aktivasyon enerjisi değerlerinden yüksek çıkmaktadır.

6. GENEL SONUÇLAR VE İLERİ ÇALIŞMALAR İÇİN ÖNERİLER

6.1. Genel Sonuçlar

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmektedir.

- Deneylerde kullanılan betonların görünen aktivasyon enerjisi değerler aralıkları 1. karışım için (K-1), 20° C' nin altında 34300–42100 j/mol, 20° C' nin üstünde 26440 j/mol, 2. karışım için (K-2), 20° C' nin altında 37380–43760 j/mol, 20° C' nin üstünde 31000 j/mol olarak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçların literatürde belirtilen değerlere uygun olduğu görülmüştür.
- Her iki karışım için de hidrasyon derecesi-zaman eğrileri üzerinden, yaklaşık olarak doğrusallığın başladığı bölgeden 0,5' lik gelişim derecesine kadar olan kısımların eğimlerinin artan beton sıcaklığı ile birlikte artışa geçtiği görülmüştür.
- Betonların görünen aktivasyon enerjisi değerlerinin, erken yaş evresinde 0,1–0,5' lik hidrasyon dereceleri aralığında yaklaşık olarak sabit olduğu, 0,5' lik hidrasyon derecesi aşıldıktan sonra kararsız bir biçimde iniş-çıkış gösterdiği görülmektedir.
- 0,1–0,5' lik gelişim derecelerine karşılık gelen hidrasyon ısıları, yaklaşık olarak 25–150 J/gr' lık bir ısı aralığında değişmektedir. Bu evrede aktivasyon enerjisi değerlerinin sabit olarak kaldığı belirlenmiştir. 150–210 J/gr' lık ısı aralığında ise, aktivasyon enerjilerinin büyük miktarlarda iniş-çıkış gösterdiği görülmektedir.
- Yaklaşık aktivasyon enerjisi belirleme yöntemleri olan FHP ve SLF yöntemlerinden elde edilen sonuçlarda gözlenen farklılıkların, betonlarda kullanılan çimento kompozisyonuna bağlı olarak değiştiği gözlenmiştir.
- Her iki beton için Hız ve Türetilmiş Hız yöntemleri kullanılarak hesaplanan aktivasyon enerjisi değerlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Bu

yakınlığın özellikle 2. karışımdan elde edilen sonuçlar açısından daha belirgin olduğu anlaşılmıştır.

- 2. karışımda, mekanik yöntemler kullanılarak elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin, kaörimetrik yöntemlerden elde edilen sonuçlara nazaran daha yüksek çıktığı görülmüştür.

6.2. İleri Çalışmalar

Bu çalışmada aktivasyon enerjisinin kalorimetrik yöntemlerle hesaplanması aşamasında yarı adyabatik kalorimetreler kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların doğruluğunu arttırmak için betonun erken yaşlarındaki ısı gelişiminin daha etkili bir biçimde takip edilebilmesine olanak sağlayan adyabatik kalorimetrelerin kullanılması hesaplamalardaki kesinliği arttıracaktır.

Karışım ve su/çimento oranlarının sabit tutulduğu, farklı kaynaklardan elde edilen çimento ve agrega kullanılarak hazırlanan 2 karışımın aktivasyon enerjileri arasındaki farklılıklar büyük ölçüde kullanılan çimento türüne bağlıdır. Bu nedenle betonların görünen aktivasyon enerjilerinin hesaplanması sürecinde yapılan deneylerde kullanılan çimentoların çeşidi arttırılmalıdır.

Yapılan taze beton deneyleri sonucunda, 20° C' nin altında hazırlanan numunelerdeki sürüklenmiş hava miktarının 20° C' nin üstündekilere nazaran fazla çıktığı görülmektedir. Buna göre farklı kimyasal katkılardan kaynaklanabilecek değişimlerin gözlenebilmesi için kimyasal katkı türlerinin arttırılması gerekmektedir.

Görünen aktivasyon enerjisi hesaplamalarında hızlı sonuç verme özelliğinden dolayı başvurulmuş bir kimyasal yöntem olan Schindler, Lerch ve Ford yönteminden elde edilen değerlerin deneysel çalışmalarla elde edilen aktivasyon enerjisi değerleriyle sürekli olarak karşılaştırılması gerekmektedir.

KAYNAKLAR

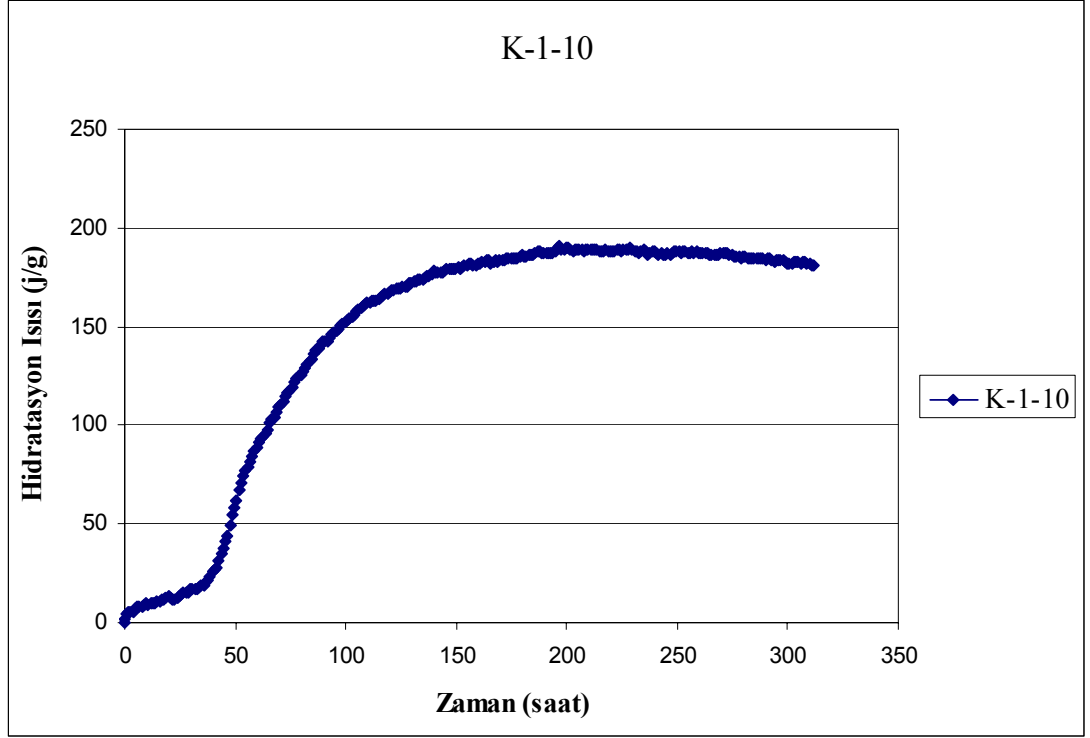
- [1] **Kasap, Ö. ve Tokyay, M.**, 2004. Betonun Eşdeğer Yaşının Çimento Hidratasyon Isısıyla Tahmini İçin Bir Yöntem, *İMO Teknik Dergi*, **215**, pp.3215-3227.,
- [2] **McIntosh, J. D.**, 1949. Electrical Curing of Concrete, *Magazine of Concrete Research*, **V.1**, No.1, pp.21-28.
- [3] **Nurse, R. W.**, 1949. Steam Curing of Concrete, *Magazine of Concrete Research*, **V.1**, No.2, pp.79-88.
- [4] **Saul, A.**, 1951. Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure, *Magazine of Concrete Research*, **V.2**, No.6, pp.127-140.
- [5] **Alexander, K. M. and Taplin, J. H.**, 1962. Concrete Strength, Cement Hydration and the Maturity Rule, *Australian Journal of Applied Science*, **V.13**, pp.277-284
- [6] **Freisleben Hansen, P. and Pedersen E. J.**, 1977. Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete, *Nordisk Betong*, **V.1**, pp.19-34.
- [7] **Carino, N.J.**, 2001. The Maturity Method: Theory and Application, *Cement, Concrete and Aggregates*, CCAGDP, **V.6**, No.2, pp.61-73.
- [8] **Yalçın, H. ve Gürü, M.**, 2006. Çimento ve Beton, Palme Yayıncılık, Ankara.
- [9] **Bentur, A.**, 2002. Early age cracking in cementitious systems : report of RILEM Technical Committee 181-EAS, Early Age Shrinkage Induced Stresses and Cracking in Cementitious Systems, RILEM Publications, Bagneux, France.
- [10] **Duthoit, B., Kada-Benameur, H., Wirquin, E.**, 2002. Determination of the apparent activation energy of concrete by isothermalcalorimetry, *Cement and Concrete Research*, **30**, pp.301-305.
- [11] **Chanvillard, G. and D'Aloia, L.**, 1997. Concrete Strength Estimartion at Early Ages: Modification the Method of Equivalent Age, *ACI Materials Journal*, **94-V6**, pp.520-530.

- [12] **Schindler, A., Juenger, G., Folliard, J., Riding, A., Poole, J.,** 2007. Methods for Calculating Activation Energy for Portland Cement, *ACI Materials Journal*, **104-M11**, pp.303-311.
- [13] **Schindler, A. and Folliard, K. J.,** 2005. Heat of Hydration Models of Cementitious Materials, *ACI Materials Journal*, **102-V1**, pp.24-33.
- [14] **Duthoit, B., Broda, M., Wirquin, E.,** 2002. Determination of the apparent activation energy of one concrete calorimetric mechanical means Influence of a superplasticizer, *Cement and Concrete Research*, **32**, pp.1207-1213.
- [15] **Chanvillard, G. and D'Aloia, L.,** 2002. Determining the “apparent” activation energy of concrete E_a - numerical simulations of heat of hydration of cement, *Cement and Concrete Research*, **32**, pp.1277-1299.
- [16] **Gani, M.S.J.,** 1997. Cement and Concrete , Chapman & Hall, London.
- [17] **Schindler, A.,** 2004. Effect of Temperature on Hydration of Cementitious Materials, *ACI Materials Journal*, **101-M09**, pp.72-290.
- [18] **ASTM C 1074-87,** 2002. Standart Practice for Estimating Concrete Strength by Maturity Method, *Annual Book of ASTM Standarts*, West Conshohocken.
- [19] **Kjellsen, K.O., Detwiler, R.J.,** 1992. Reaction Kinetics of Portland Cement Mortars Hydrated at Different Temperatures, *Cement and Concrete Research*, **22**, pp.112-120.
- [20] **Jonasson, J.E.,** 1985. Early Strength Growth in Concrete-Preliminary Test Results Concerning Hardening at Elevated Temperatures, The 3. RILEM Symposium on Winter Concreting, Espoo, Finland, pp.249-254.
- [21] **Yılmaz, A.,** 2004. Puzolan Katkılı Çimentoların Beton Olgunluğuna Etkisi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, **10-3**, 381-387.
- [22] **Gauthier, E. and Regourd, M.,** 1992. The Hardening of Cement in Function of Temperature, *Proceedings of the RILEM International Conference on Concrete at Early Ages*, **V.1**, pp.145-150.
- [23] **Guo Chengju,** 1989. Maturity of Concrete: Method for Predicting Early Stage Strength, *ACI Materials Journal*, **86-V4**, pp.341-353.
- [24] **ASTM C 186,** 1998. Heat of Hydration of Hydraulic Cement, *Annual Book of ASTM Standarts*, West Conshohocken.

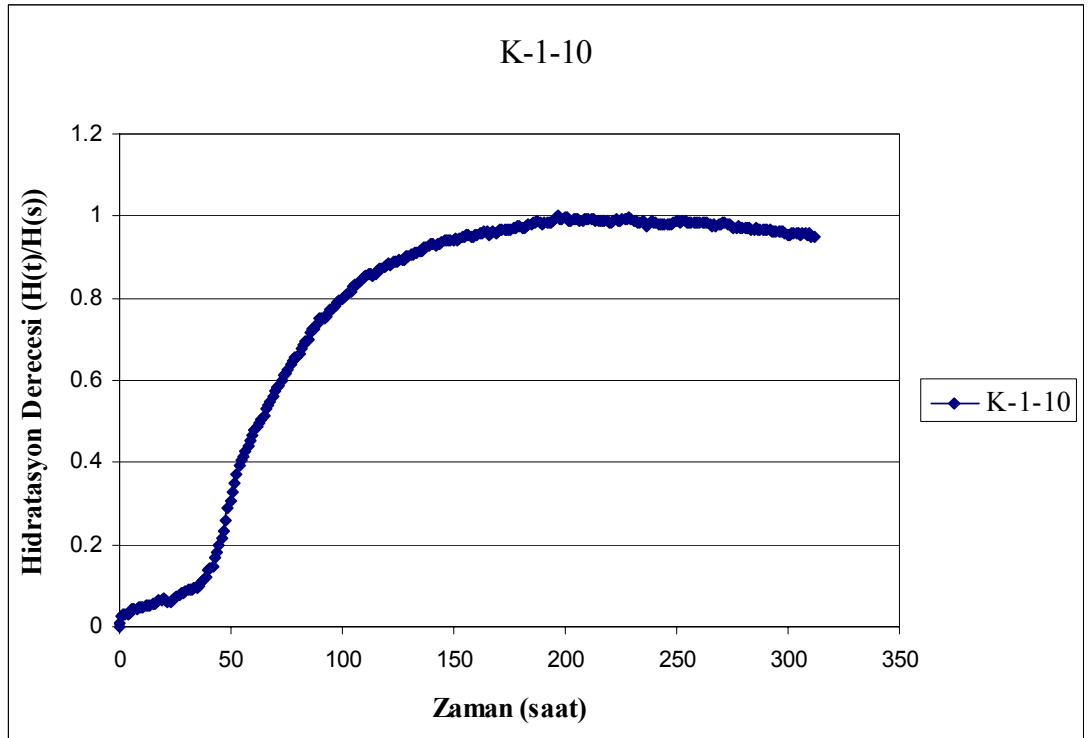
- [25] **Yılmaz, A.**, 2005.Çeşitli Çimentolarla Üretilen Harçlar İçin Olgunluk Fonksiyonlarının Geçerliliğinin Araştırılması, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, **7-1**,pp.31-41.
- [26] **Postacıoğlu, B.**, 1987. Beton, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.
- [27] **NT BUILD 388**, 1992. Nordtest Method, Nordtest, Finland.
- [28] **McIntosh, J. D.**, 1956. The Effects of Low-Temperature Curing on the Compressive Strength of Concrete, *Danish Institute for Building Research*, Session B- II.
- [29] **Topçu, İ. B. ve Karakurt, C.**, 2002. Farklı Çimentolar ile Üretilen Betonlarda Olgunluk Kavramı, *ECAS 2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu*, ODTÜ., Ankara, S: 477-484.
- [30] **Goodrum, P., Wood, C., King, M.**, 2004. The Use of the Concrete Maturity Method In the Construction of Industrial Facilities: A Case Study, University of Kentucky.
- [31] **Tank, R. C. and Carino, N. J.**, 1991. Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete, *ACI Materials Journal*, **1-V102**, pp.74-83.
- [32] **TI-B 103 (94)**, 1996. Activation Energy for the Maturity Method, *Danish Technological Institute*, Denmark.
- [33] **Pane, İ. and Hansen, W.**, 2002. Concrete Hydration and Mechanical Properties under Nonisothermal Conditions, *ACI Materials Journal*, **1-V04**, pp.534-542.
- [34] <http://www.basf-yks.com.tr/DCCTurkey/Tr/Products/katksistemleri/betonkatklar/gleniumsky506/>
- [35] <http://www.basf-yks.com.tr/DCCTurkey/Tr/Products/katksistemleri/betonkatklar/microair200/>
- [36] **DTI, 2003**. Adiabatic Heat Calculation Sheet Ver. 1.0, Danish Technological Institute, Denmark.

EKLER

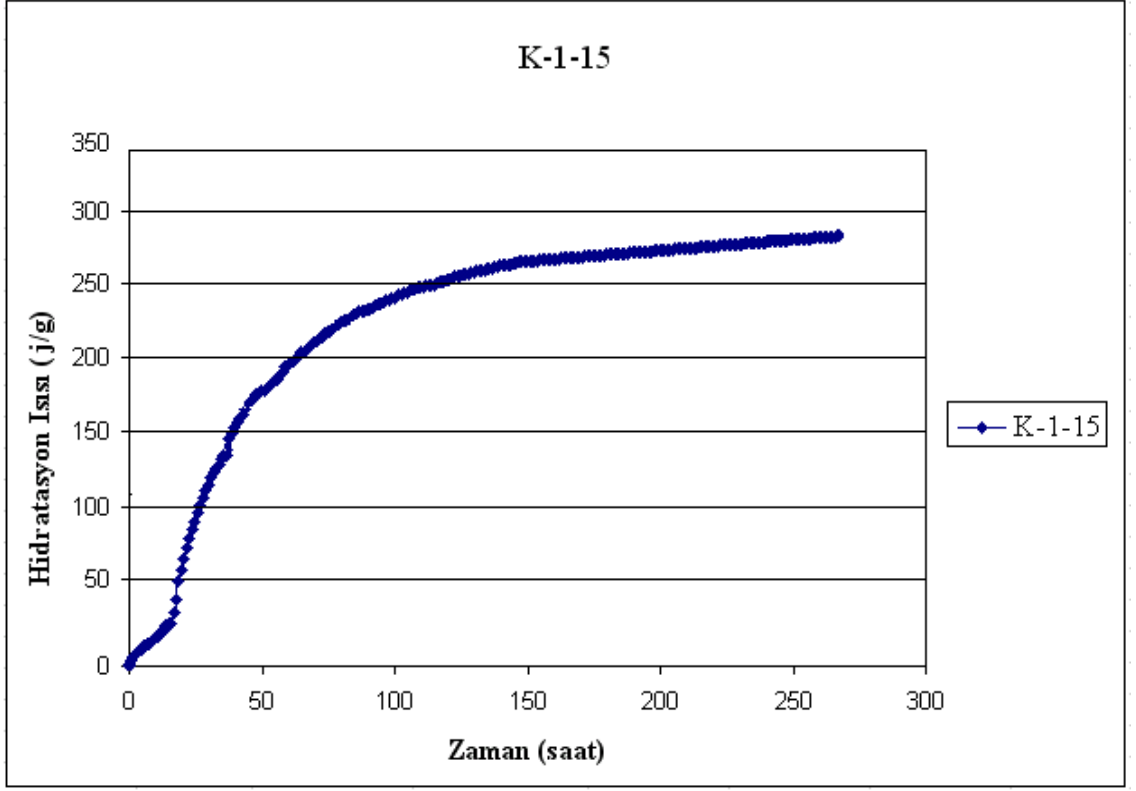
EK A: Kalorimerik Deneylerden Elde Edilen Hidratasyon Isısı-Zaman ve Hidratasyon Derecesi-Zaman Grafikleri



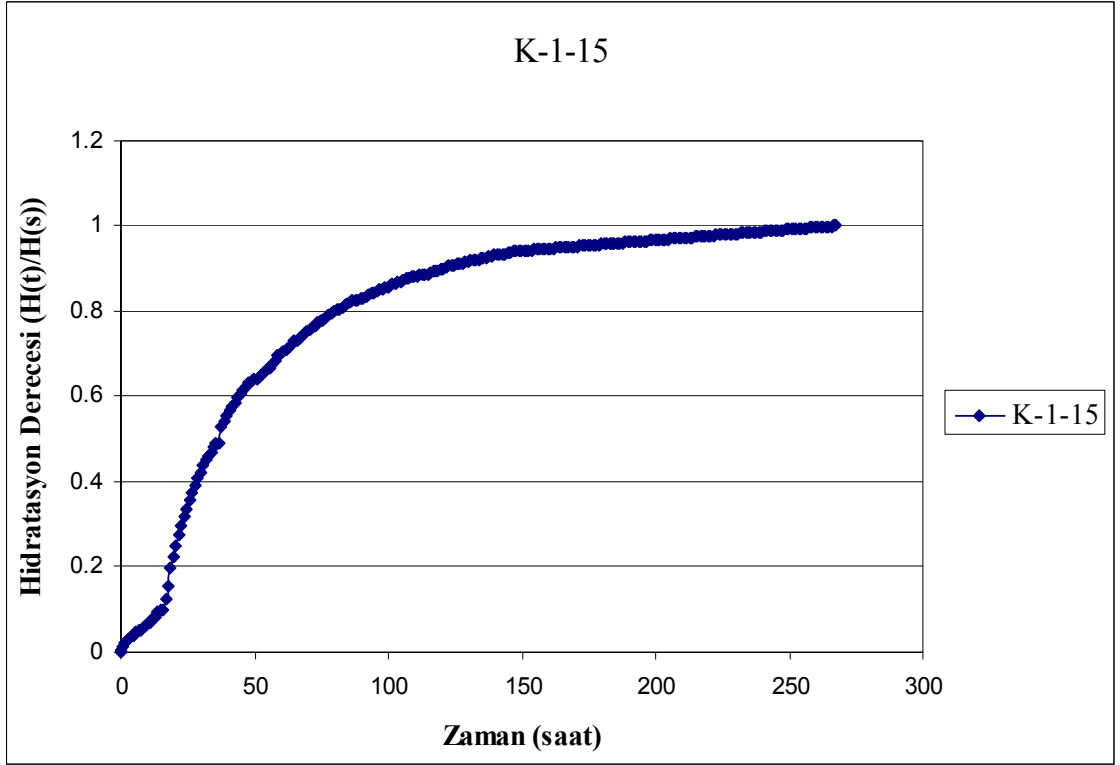
Şekil A.1: K-1-10 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



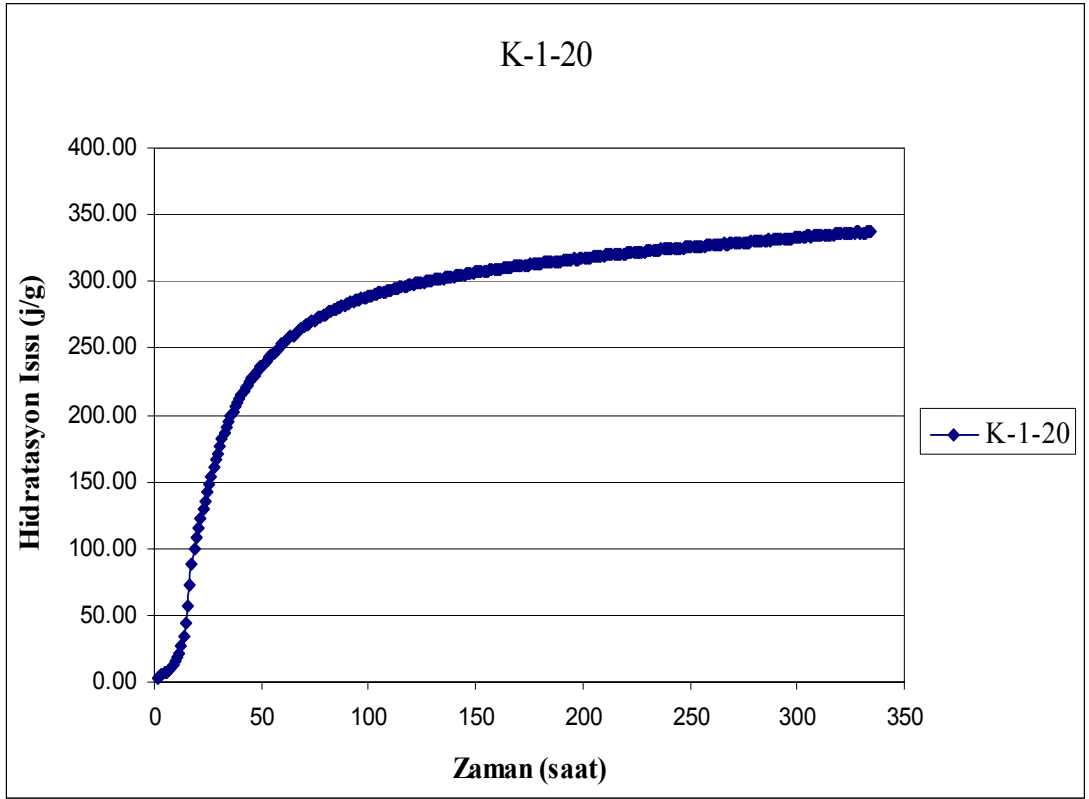
Şekil A.2: K-1-10 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.



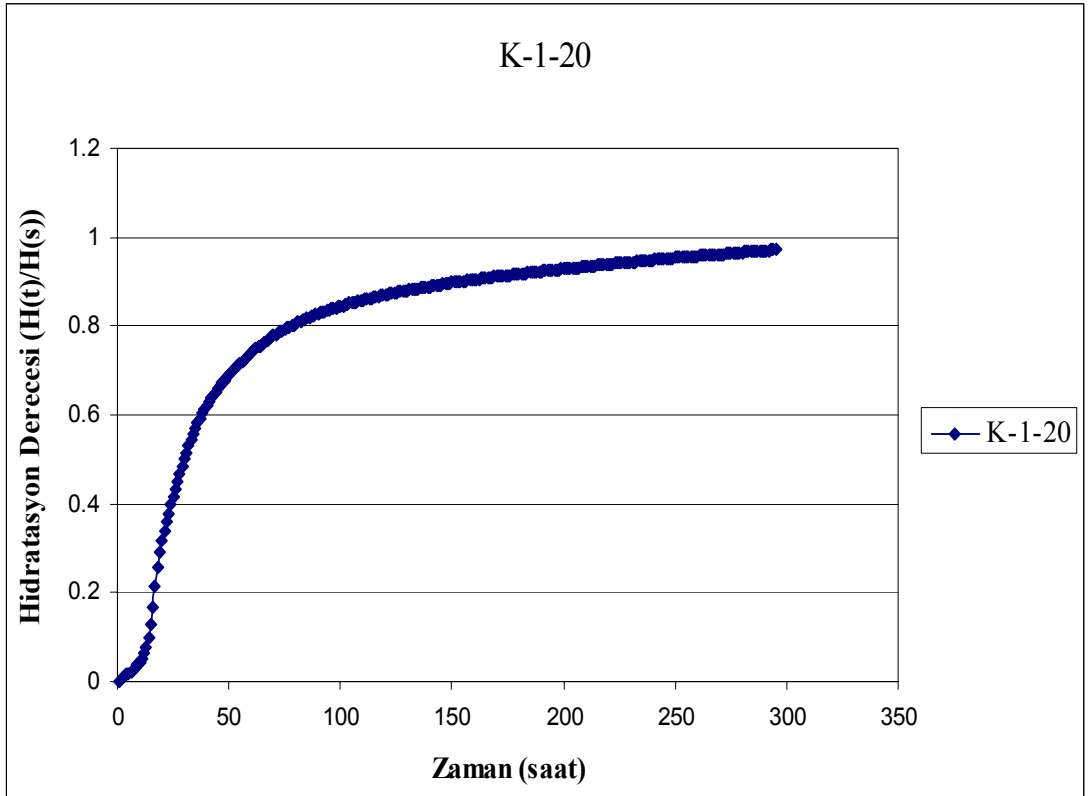
Şekil A.3: K-1-15 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



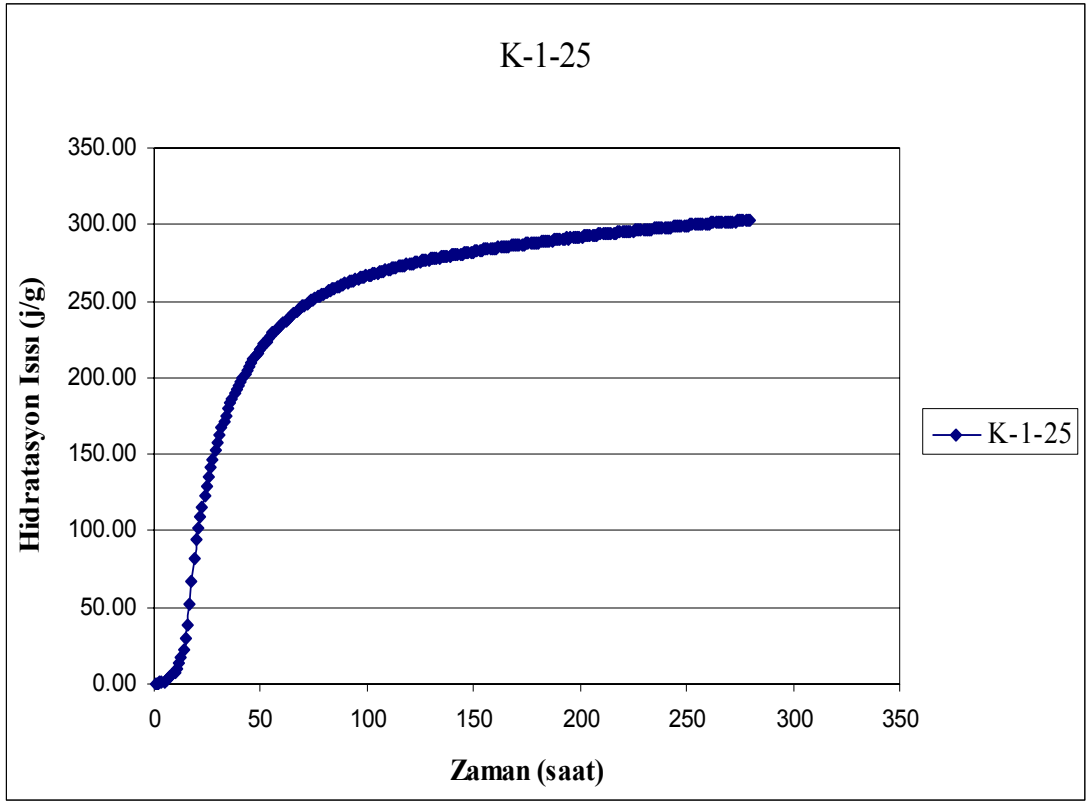
Şekil A.4: K-1-15 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.



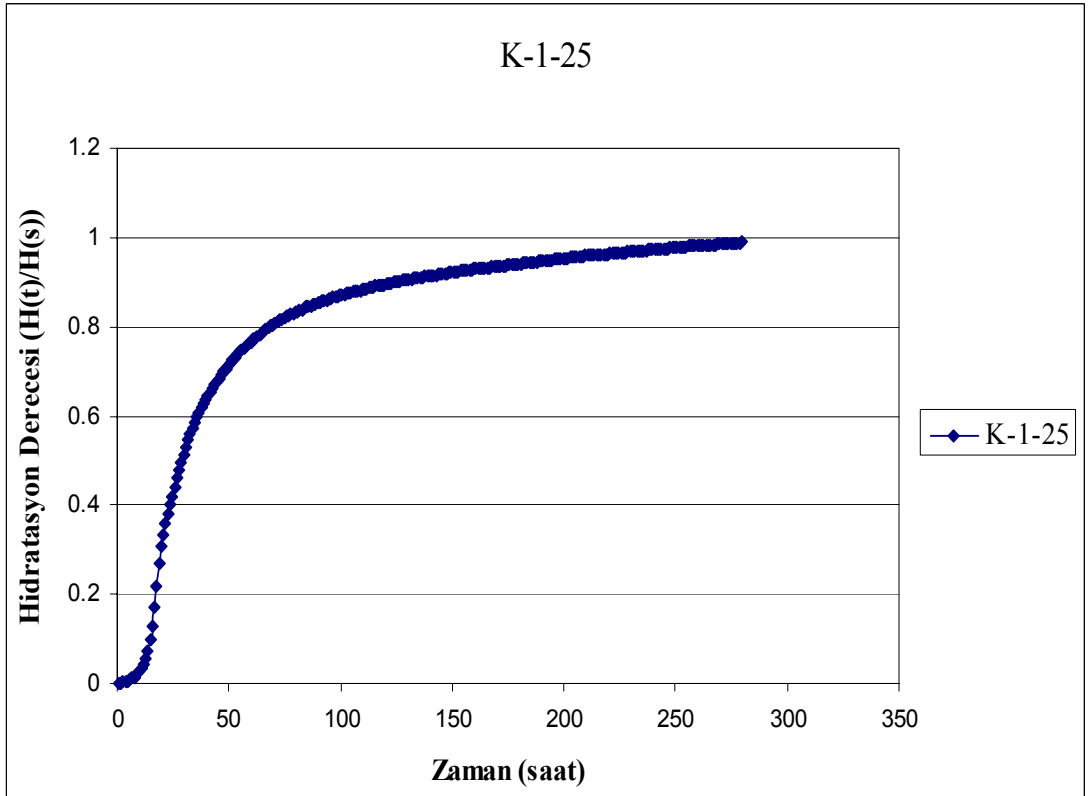
Şekil A.5: K-1-20 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



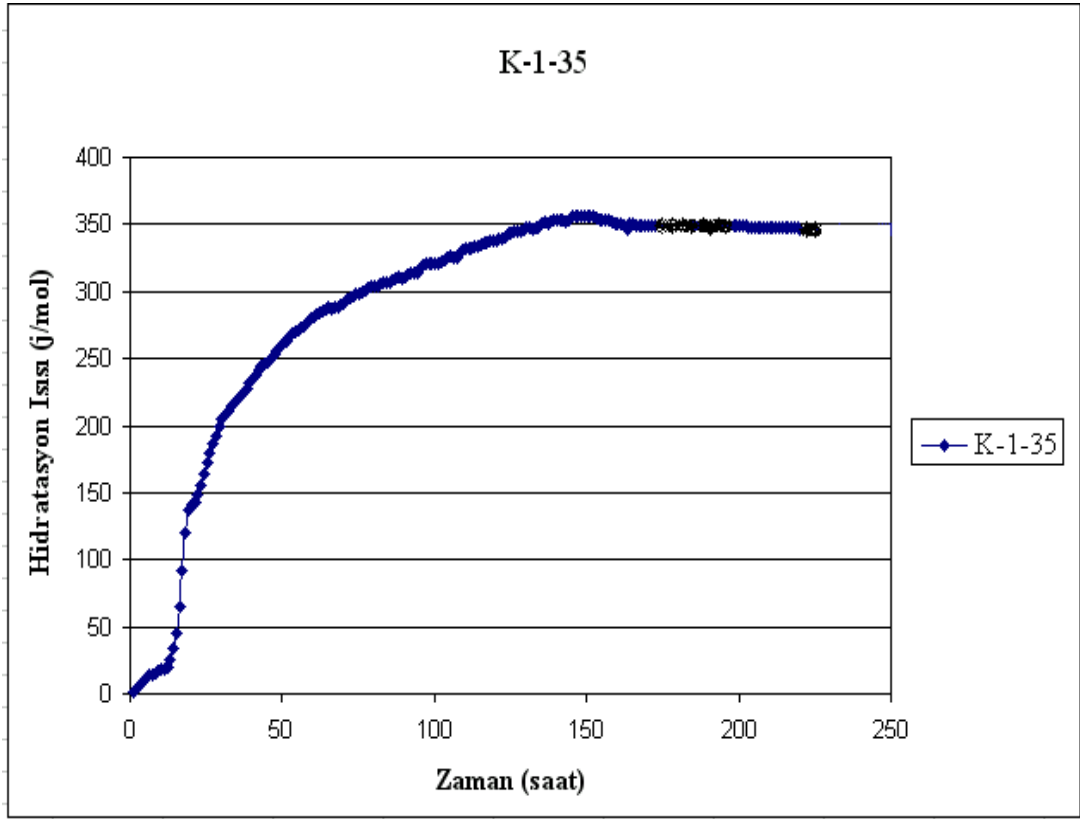
Şekil A.6: K-1-20 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.



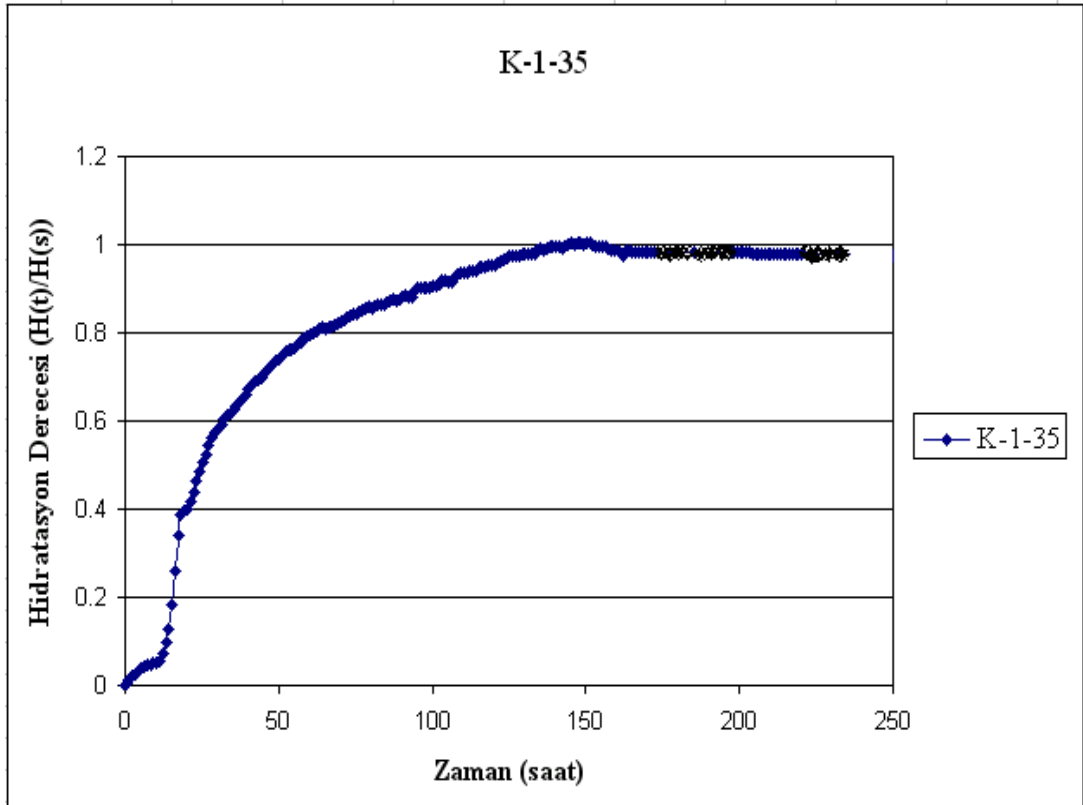
Şekil A.7: K-1-25 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



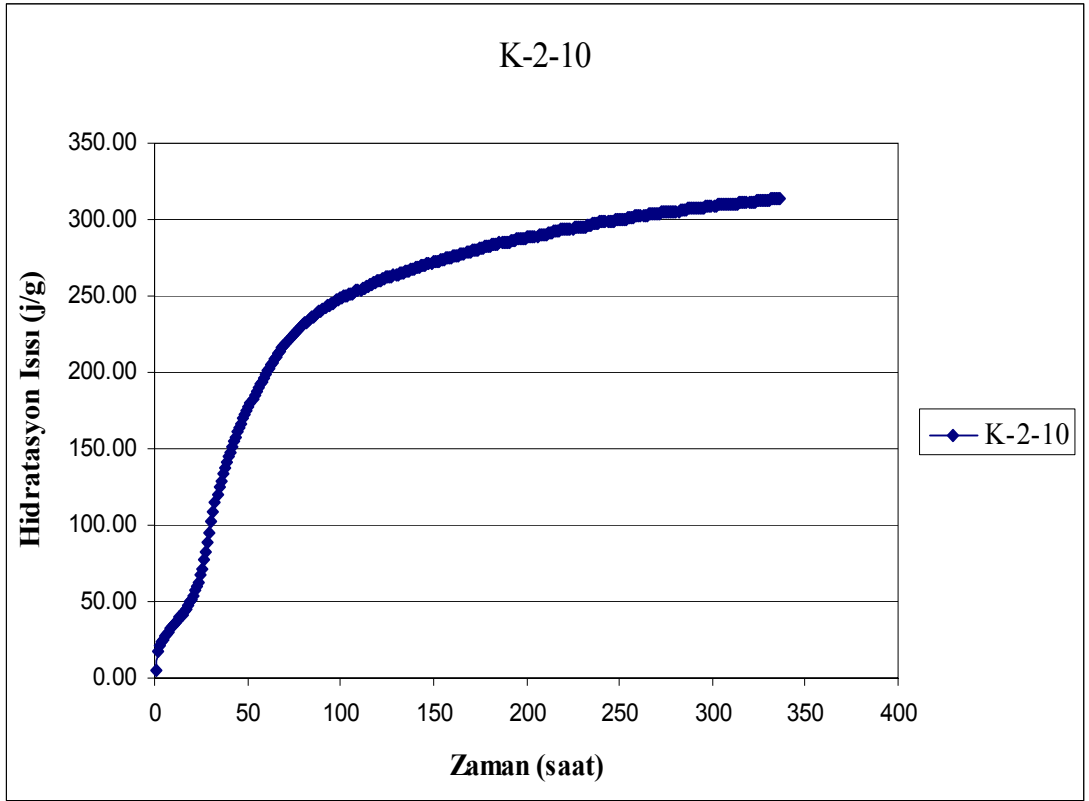
Şekil A.8: K-1-25 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.



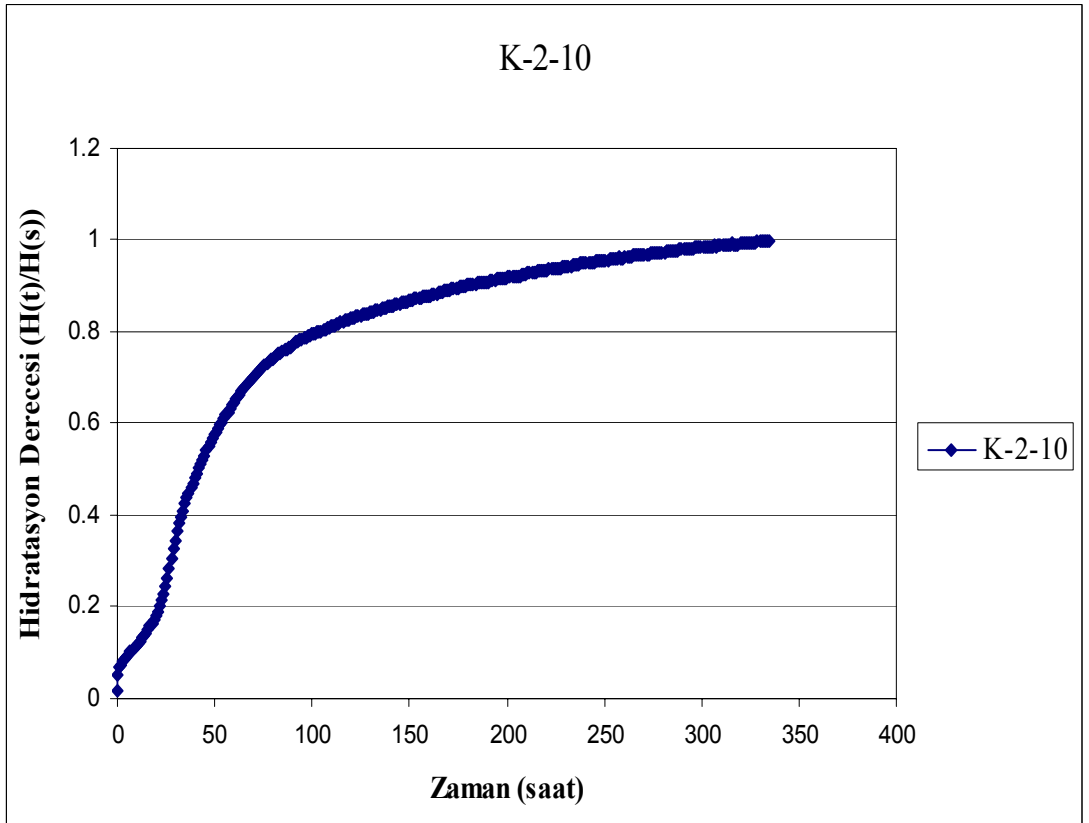
Şekil A.9: K-1-35 Numunelerinin Hidrasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



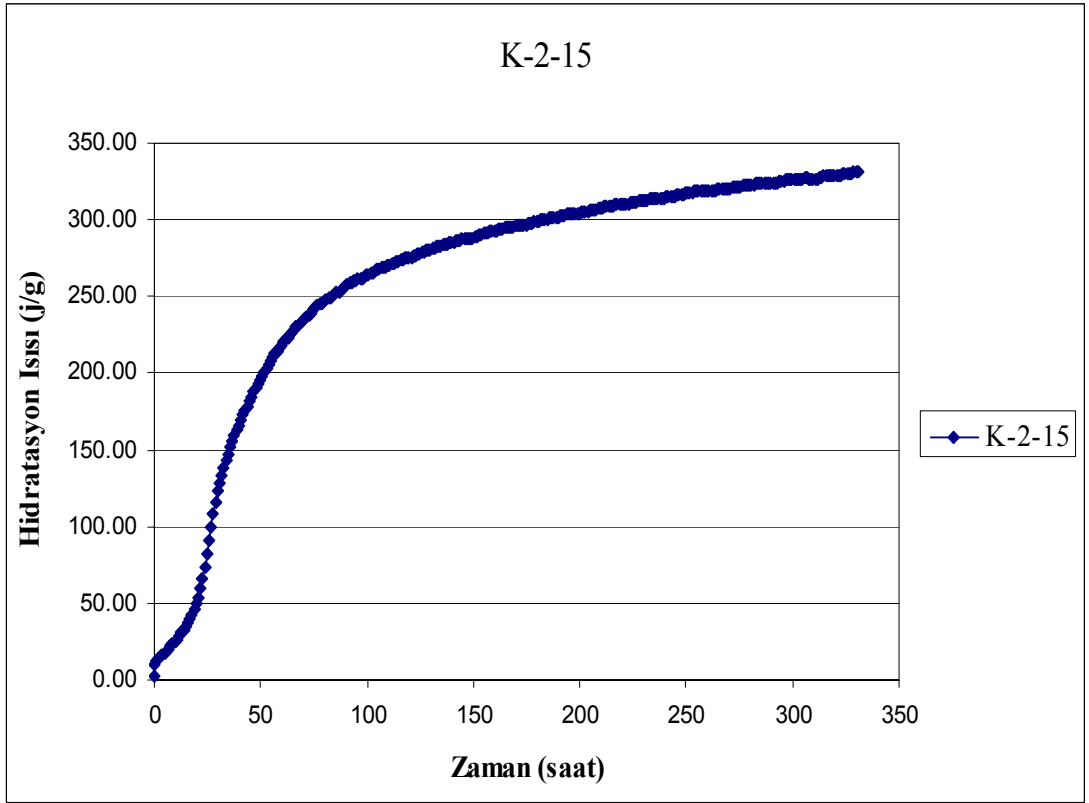
Şekil A.10: K-1-35 Numunelerinin Hidrasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.



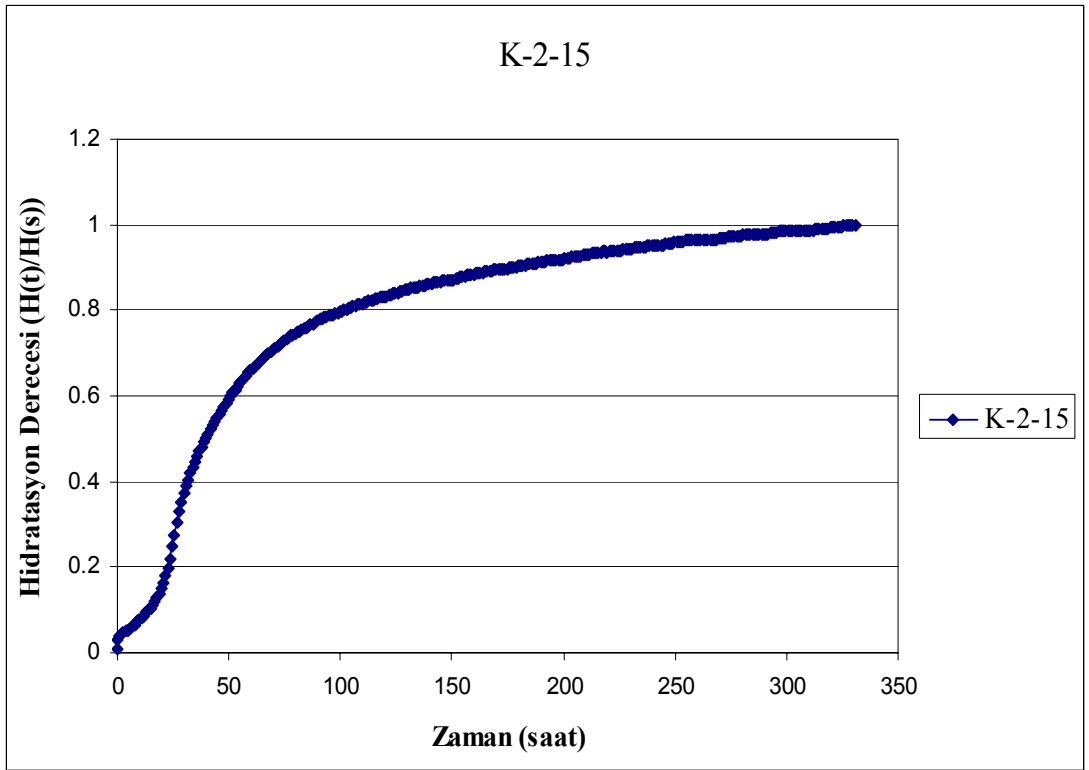
Şekil A.11: K-2-10 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



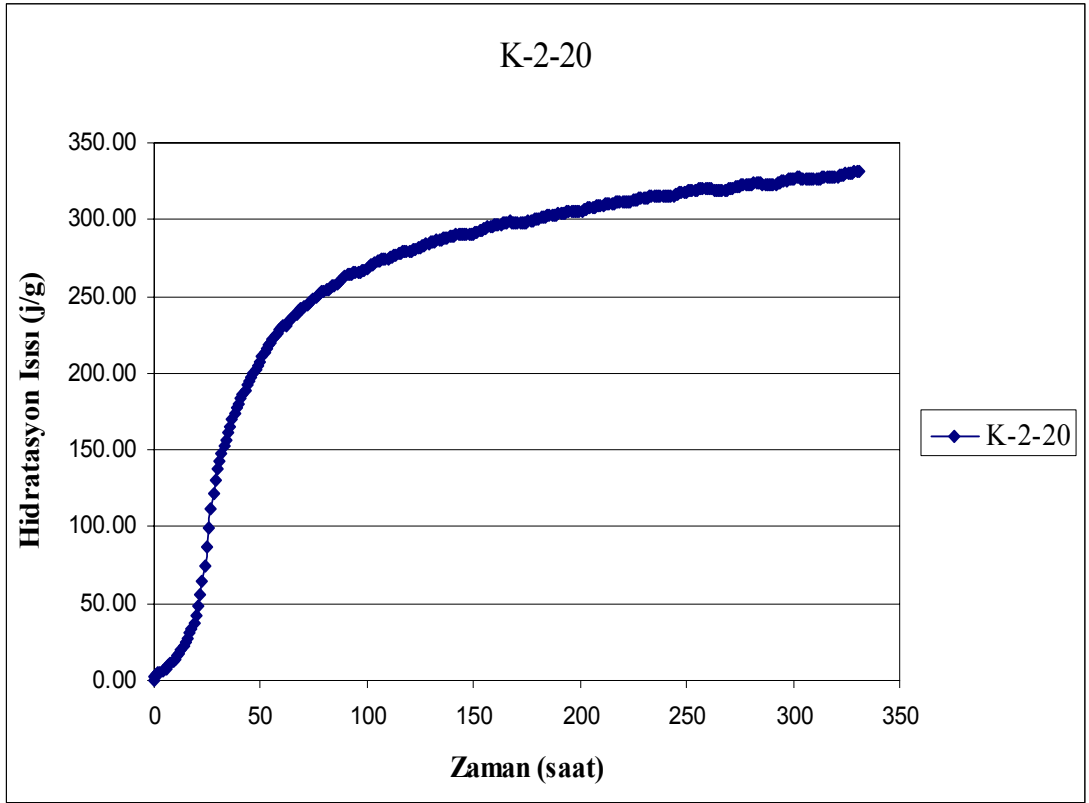
Şekil A.12: K-2-10 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.



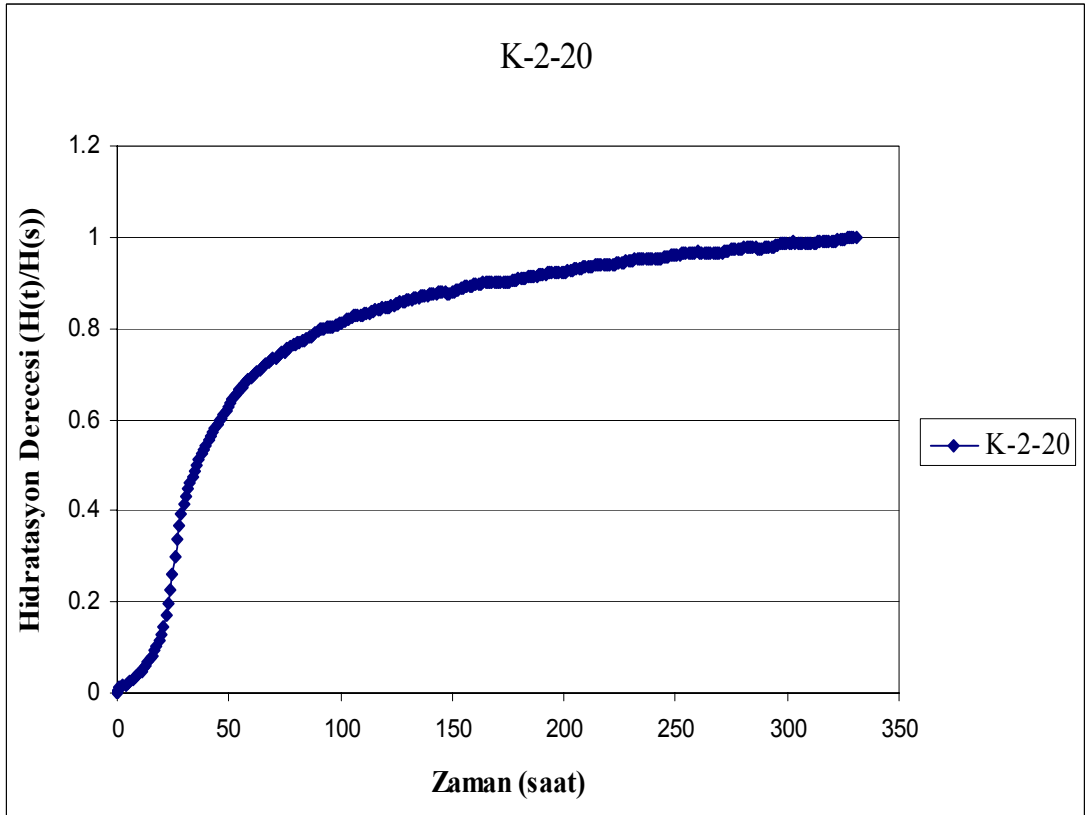
Şekil A.13: K-2-15 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



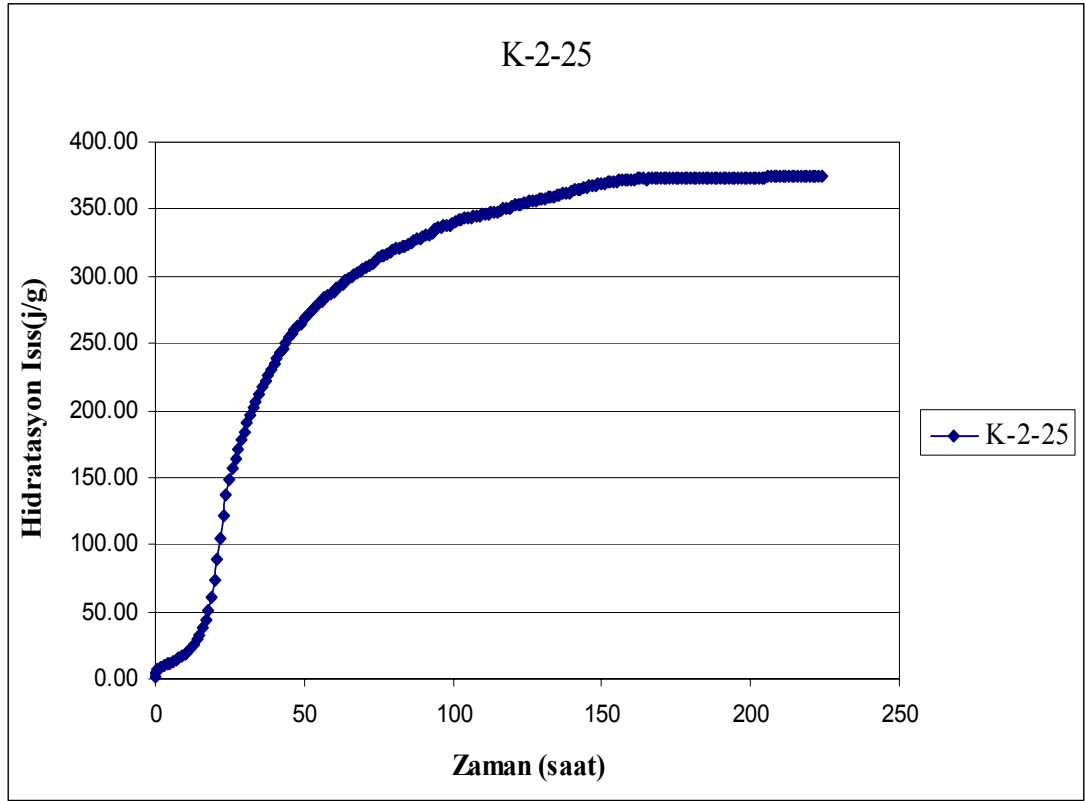
Şekil A.14: K-2-15 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.



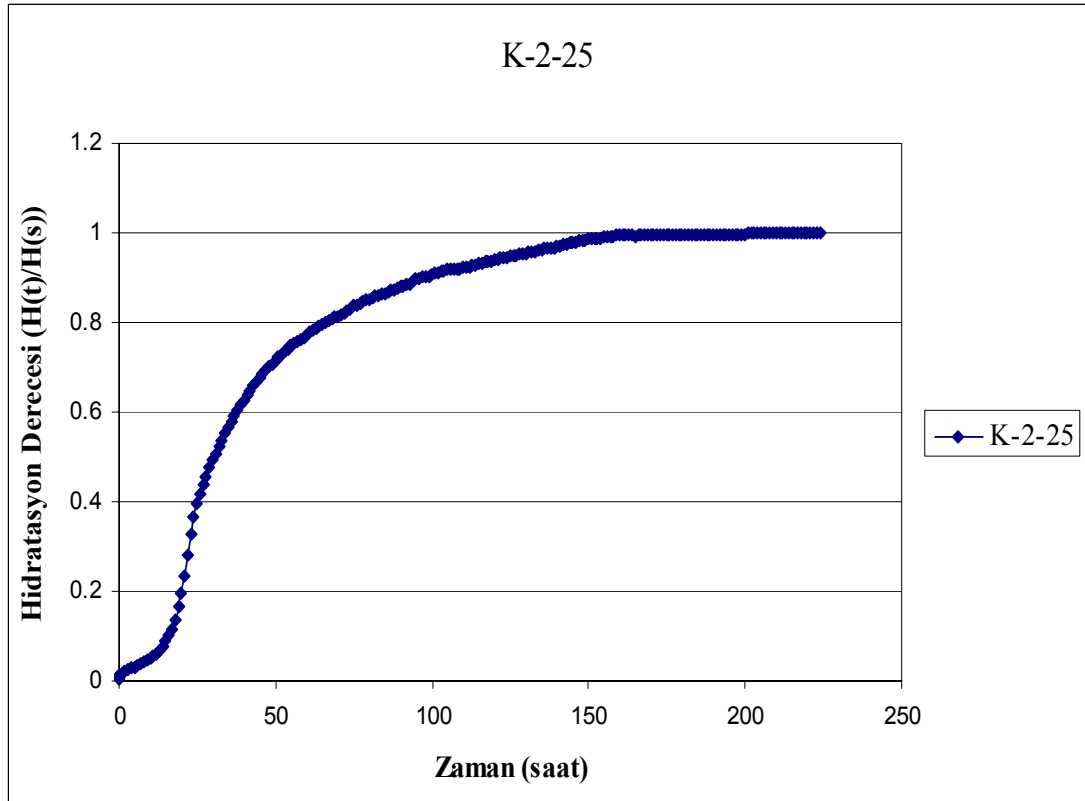
Şekil A.15: K-2-20 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



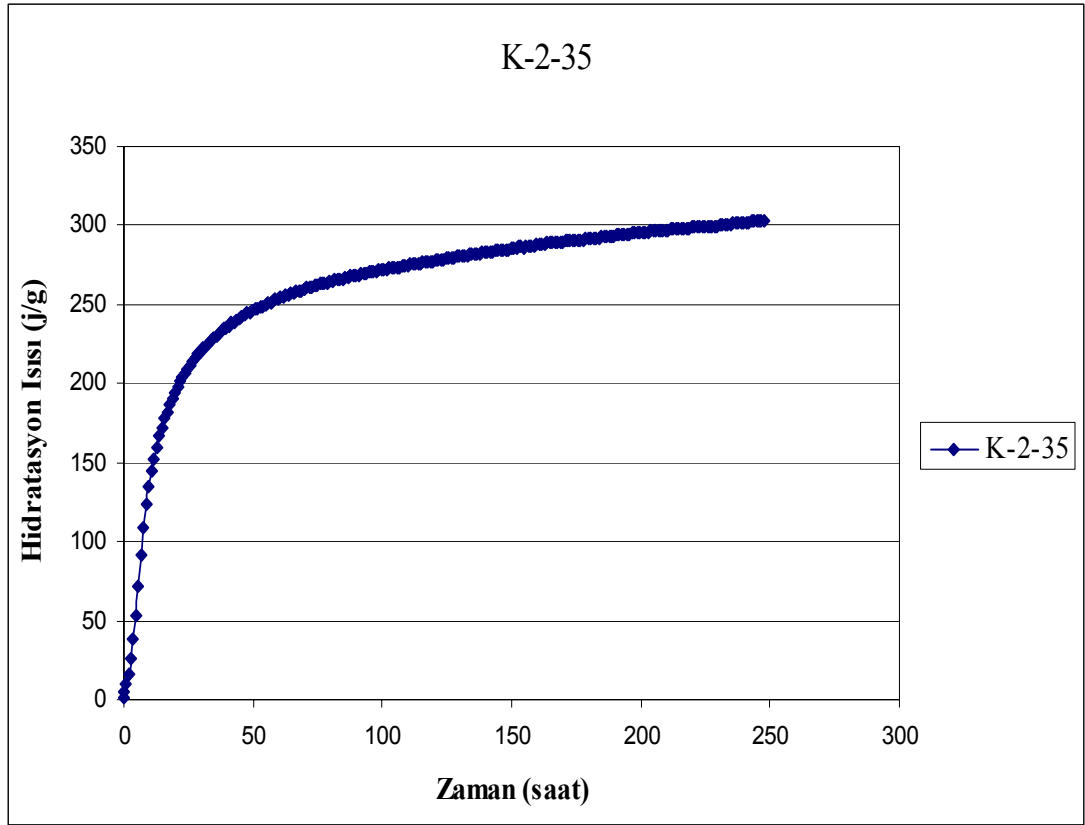
Şekil A.16: K-2-20 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.



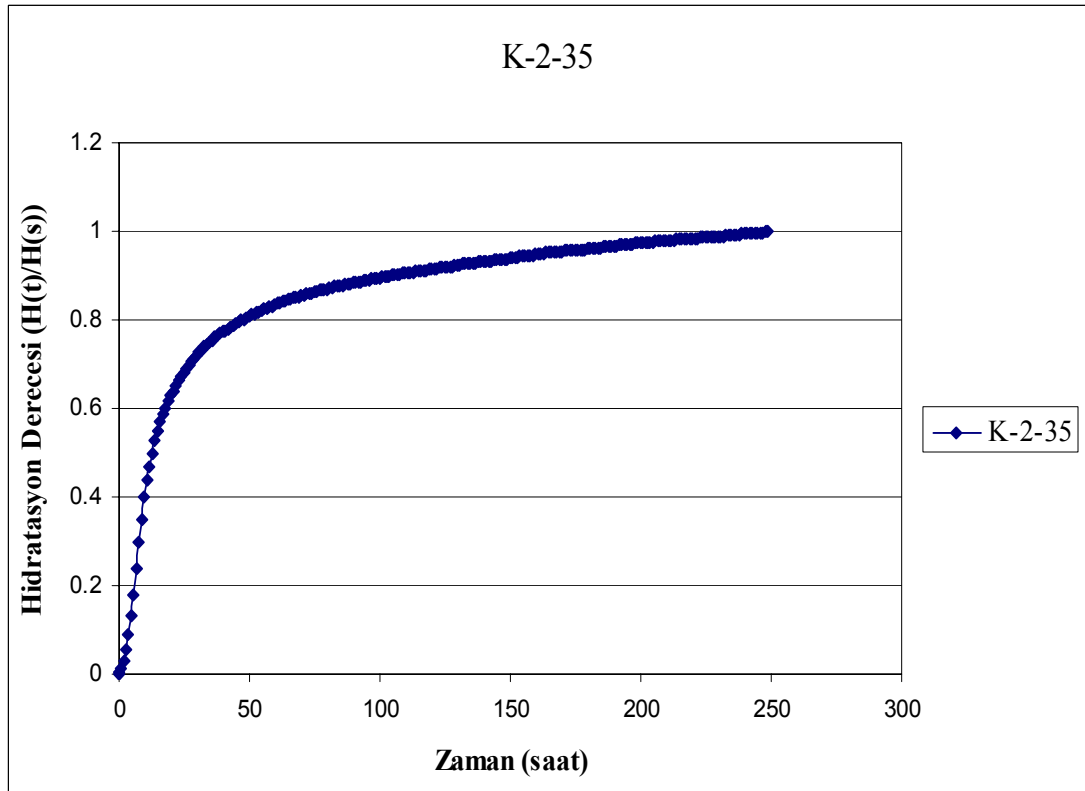
Şekil A.17: K-2-25 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



Şekil A.18: K-2-25 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.



Şekil A.19: K-2-35 Numunelerinin Hidratasyon Isısı-Zaman Eğrisi.



Şekil A.20: K-2-35 Numunelerinin Hidratasyon Derecesi-Zaman Eğrisi.

EK B: Kalorimerik Deneylere Ait Hidratasyon Isısı ve Derecesi Sonuçları

Tablo B.1: K-1-10 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
20.31	0.11	15.5
21.50	0.11	16
23.15	0.12	16.5
26.12	0.14	17
26.91	0.14	17.5
28.17	0.15	18
31.68	0.17	18.5
34.82	0.18	19
38.00	0.20	19.5
40.81	0.21	20
44.11	0.23	20.5
49.18	0.26	21
54.75	0.29	21.5
58.69	0.31	22
62.26	0.33	22.5
66.76	0.35	23
70.88	0.37	23.5
74.62	0.39	24
77.10	0.40	24.5
78.76	0.41	25
81.32	0.43	25.5
83.93	0.44	26
86.56	0.45	26.5
88.77	0.47	27
91.01	0.48	27.5
93.27	0.49	28
94.26	0.49	28.5
96.14	0.50	29

Tablo B.2: K-1-15 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
39.35	0.10	15.68
46.78	0.13	16.68
54.77	0.16	17.68
62.87	0.19	18.68
71.52	0.21	19.68
79.64	0.24	20.68
87.07	0.26	21.68
94.21	0.28	22.68
100.96	0.30	23.68
107.07	0.32	24.68
113.27	0.34	25.68
119.11	0.35	26.68
124.50	0.37	27.68
129.86	0.39	28.68
134.86	0.40	29.68
139.59	0.41	30.68
144.30	0.43	31.68
149.19	0.46	32.68
153.93	0.47	33.68
158.03	0.48	34.68
161.82	0.49	35.68
165.51	0.49	36.68
168.99	0.50	37.68

Tablo B.3: K-1-20 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
33.94	0.10	13.68
43.73	0.13	14.68
57.01	0.17	15.68
73.02	0.21	16.68
88.31	0.26	17.68
99.99	0.29	18.68
108.37	0.32	19.68
115.50	0.34	20.68
122.35	0.36	21.68
129.06	0.38	22.68
135.58	0.40	23.68
142.10	0.42	24.68
148.45	0.43	25.68
154.40	0.45	26.68
160.19	0.47	27.68
165.89	0.49	28.68

Tablo B.4: K-1-25 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
29.60	0.10	14.68
39.06	0.13	15.68
51.84	0.17	16.68
67.36	0.22	17.68
82.42	0.27	18.68
93.78	0.31	19.68
102.15	0.33	20.68
109.27	0.36	21.68
115.85	0.38	22.68
122.39	0.40	23.68
128.88	0.42	24.68

Tablo B.5: K-1-35 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
34.24	0.10	14.25
45.80	0.14	15.25
64.71	0.19	16.25
92.44	0.28	17.25
120.57	0.36	18.25
137.44	0.41	19.25
140.65	0.42	20.25
142.06	0.42	21.25
147.72	0.44	22.25
155.34	0.46	23.25
164.49	0.49	24.25

Tablo B.6: K-2-10 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
35.21	0.11	10.73
36.52	0.12	11.73
38.03	0.12	12.73
39.87	0.13	13.73
41.73	0.13	14.73
43.38	0.14	15.73
45.19	0.14	16.73
47.11	0.15	17.73
49.38	0.16	18.73
51.62	0.16	19.73
54.09	0.17	20.73
56.93	0.18	21.73
59.61	0.19	22.73
62.90	0.20	23.73
66.91	0.21	24.73
71.54	0.23	25.73
76.97	0.24	26.73
82.80	0.26	27.73
88.89	0.28	28.73
95.60	0.30	29.73
102.29	0.33	30.73
108.56	0.35	31.73
114.45	0.36	32.73
119.83	0.38	33.73
124.68	0.40	34.73
129.07	0.41	35.73
133.23	0.42	36.73
137.21	0.44	37.73
140.86	0.45	38.73
144.49	0.46	39.73
147.86	0.47	40.73
151.19	0.48	41.73
154.56	0.49	42.73
157.63	0.50	43.73

Tablo B.7: K-2-15 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
37.06	0.11	17.70
39.67	0.12	18.70
42.42	0.13	19.70
45.64	0.14	20.70
49.55	0.15	21.70
53.87	0.16	22.70
59.19	0.18	23.70
65.55	0.20	24.70
73.04	0.22	25.70
81.59	0.25	26.70
90.71	0.27	27.70
100.02	0.30	28.70
108.79	0.33	29.70
116.39	0.35	30.70
123.04	0.37	31.70
128.82	0.39	32.70
133.87	0.40	33.70
138.59	0.42	34.70
143.14	0.43	35.70
147.54	0.45	36.70
151.71	0.46	37.70
155.61	0.47	38.70
159.42	0.48	39.70
162.92	0.49	40.70

Tablo B.8: K-2-20 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
30.52	0.09	18.73
33.78	0.10	19.73
37.75	0.11	20.73
42.72	0.13	21.73
48.66	0.15	22.73
55.99	0.17	23.73
64.68	0.20	24.73
75.00	0.23	25.73
86.62	0.26	26.73
99.00	0.30	27.73
111.47	0.34	28.73
122.23	0.37	29.73
130.67	0.39	30.73
137.61	0.42	31.73
143.20	0.43	32.73
147.81	0.45	33.73

Tablo B.9: K-2-25 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
37.56	0.10	17.87
43.21	0.11	18.87
51.12	0.13	19.87
61.39	0.16	20.87
73.80	0.19	21.87
88.42	0.23	22.87
105.11	0.28	23.87
122.01	0.32	24.87
136.45	0.36	25.87
147.82	0.39	26.87
156.73	0.41	27.87

Tablo B.10: K-2-35 Numunelerine Ait Hidratasyon Isısı ve Hidratasyon Derecesi Sonuçları

Q (J/g)	$\frac{d\alpha}{dt}$	t (saat)
25.49532	0.089	3.703333
38.22093	0.13	4.703333
53.67371	0.18	5.703333
71.53395	0.24	6.703333
91.13617	0.3	7.703333
109.0345	0.35	8.703333
123.1439	0.4	9.703333
134.6373	0.44	10.70333
144.3995	0.47	11.70333
152.6375	0.5	12.70333

EK C: Silindir Basınç Dayanımları**Tablo C.1: K-2-10 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları**

Numune	Priz Süresi (saat)	Geçen Süre (saat)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (Ortalama)(MPa)
K-2-10	11	22	1,2	1,20
			1,15	
			1,25	
		45	8,40	8,40
			8,40	
			8,40	
		67	13,30	13,50
			13,40	
			13,80	
		89	19,95	19,70
			19,50	
			19,65	

Tablo C.2: K-2-15 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları

Numune	Priz Süresi (saat)	Geçen Süre (saat)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (Ortalama)(MPa)
K-2-15	7	14	1,52	1,70
			1,65	
			1,93	
		29	12,98	13,0
			13,05	
			12,97	
		43	18,80	18,80
			18,90	
			18,70	
		57	23,35	23,30
			23,25	
			23,30	

Tablo C.3: K-2-20 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları

Numune	Priz Süresi (saat)	Geçen Süre (saat)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (Ortalama)(MPa)
K-2-20	6,5	13	2,40	2,50
			2,65	
			2,45	
		26	15,80	16,0
			16,10	
			16,10	
		39	20,75	21,0
			20,85	
			21,40	
		52	25,20	25,0
			24,90	
			24,90	

Tablo C.4: K-2-25 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları

Numune	Priz Süresi (saat)	Geçen Süre (saat)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (Ortalama)(MPa)
K-2-25	6	12	3,05	3,10
			3,15	
			3,10	
		24	19,00	18,90
			18,90	
			18,80	
		36	24,25	24,10
			24,05	
			24,00	
		49	29,15	29,20
			29,30	
			29,15	

Tablo C.5: K-2-35 Numunelerine Ait Silindir Basınç Dayanımları

Numune	Priz Süresi (saat)	Geçen Süre (saat)	Basınç Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (Ortalama)(MPa)
K-2-35	5	10	5,10	5,20
			5,15	
			5,35	
		20	20,10	20,20
			20,25	
			20,25	
		30	24,40	24,40
			24,30	
			24,50	
		40	27,95	28,00
			27,95	
			28,10	

ÖZGEÇMİŞ

Ali Sami Güneş, 1983 yılında Ankara' nın Aydınlıkevler ilçesinde doğdu. İlkokul eğitimini, Yüce-tepe İlköğretim Okulu' nda, ortaokul ve lise eğitimlerini, Ankara Gazi Anadolu Lisesi' nde tamamladı. 2001 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 2006 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Yapı Malzemeleri Anabilim Dalı'nda lisansüstü eğitime başladı. Halen lisansüstü eğitime devam etmektedir.