

## Betonun Eşdeğer Yaşının Çimento Hidratasyon Isısıyla Tahmini İçin Bir Yöntem

Özlem KASAP\*

Mustafa TOKYAY\*\*

### ÖZ

Betonun maruz kaldığı sıcaklık geçmişinden yola çıkarak basınç dayanımını tahmin etmeye “olgunluk metodu” denilmektedir. Bugüne kadar çeşitli araştırmacılar tarafından önerilen olgunluk fonksiyonları arasında en çok kabul gören eşdeğer yaş fonksiyonunun anahtar parametresi zahiri aktivasyon enerjisidir. Bu metodu uygulayabilmek için zahiri aktivasyon enerjisi değerinin güvenilir, doğru ve pratik bir şekilde belirlenmesi gerekmektedir. Bu araştırmada, zahiri aktivasyon enerjisinin kalorimetrik yöntemle saptanan hidratasyon ısısı değerleri kullanılarak elde edilen hidratasyon derecesi ve hidratasyon hızı arasındaki ilişkiden bulunması amaçlanmıştır. Bu amaçla dört farklı çimento kullanılmış ve elde edilen deneysel sonuçlarla çimentoların zahiri aktivasyon enerjilerinin hesaplanması için bir model önerilmiştir.

### ABSTRACT

#### A Method for Determining the Equivalent Age of Concrete from Heat of Hydration of Cement

Prediction of compressive strength of concrete from its temperature history is known as “maturity method”. The key parameter of equivalent age function, which is the most acceptable equation among the proposed maturity functions, is the apparent activation energy. In order to apply this method, apparent activation energy value should be determined reliably, accurately and practically. In this investigation, it is aimed to determine the apparent activation energy from the relation between degree of hydration and rate of hydration, which was obtained by using the heat of hydration values determined by calorimetric method. For this purpose, four different cements were used and with the experimental results obtained a model for calculating the apparent activation energy of cements was proposed.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 14.11.2002 günü ulaşmıştır.
- 30 Haziran 2004 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., Ankara – kaozlem@metu.edu.tr

\*\* Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Müh. Böl., Ankara – mtokyay@metu.edu.tr

## 1. GİRİŞ VE GEÇMİŞ ARAŞTIRMALARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bir inşaatın en hızlı şekilde tamamlanabilmesi, kalıp sökme, öngerme gibi kritik işlemlerin güvenli ve ekonomik olarak planlanabilmesi ve uygulanabilmesi için betonun dayanım gelişiminin doğru olarak tahmin edilmesi gerekmektedir.

Betonun dayanımını maruz kaldığı sıcaklık ve zamana bağlayan matematiksel fonksiyonlarla mekanik testlere büyük ölçüde gerek kalmadan tahmin etmek mümkündür. Konuyla ilgili olarak 1987 yılında ASTM tarafından “Standard Practice for Estimating Concrete Strength By Maturity Method, ASTM C1074” yayınlanmıştır [1].

Betonda olgunluk kavramı ilk olarak 1940’ların sonu 1950’lerin başlarında yapılan betonun buhar bakımı çalışmalarıyla ortaya çıkmıştır[2,3,4]. 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[3,4]:

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

Burada,

M: olgunluk indeksi (°C.gün)

T:  $\Delta t$  zaman aralığındaki ortalama sıcaklık (°C)

T<sub>0</sub>: baz sıcaklık (°C)

t: zaman (gün)

$\Delta t$ : zaman aralığı (gün)

Nurse-Saul fonksiyonu kolaylığından ötürü çok yaygın olarak kullanılsa da bir takım eksik yönleri bulunmaktadır. 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 yansıtmayacağı öne sürülmüştür[5]. Alexander ve Taplin yaptıkları çalışmaların sonucunda Nurse-Saul fonksiyonunun düşük olgunluk değerlerinde sıcaklığın dayanım üzerindeki etkisini olduğundan az, yüksek olgunluk değerlerinde ise olduğundan fazla gösterdiğini saptamışlardır[6].

Daha sonra, kimyasal reaksiyonların hızına sıcaklığın etkisini tanımlamakta kullanılan Arrhenius denklemine dayanarak yeni bir olgunluk fonksiyonu önerilmiştir[7]:

$$t_e = \sum_0^t e^{-\frac{E}{R} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t \quad (2)$$

t<sub>e</sub>: referans sıcaklıktaki eşdeğer yaş (gün)

E: zahiri aktivasyon enerjisi (J/mol)

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

T:  $\Delta t$  zaman aralığında betonun ortalama sıcaklığı (°K)

T<sub>r</sub>: referans sıcaklık (°K)

Arrhenius denklemine dayanan eşdeğer yaş fonksiyonu, betonun sıcaklık karşısındaki davranışını Nurse-Saul olgunluk fonksiyonundan daha iyi tanımlamaktadır[8].

Eşdeğer yaş, referans sıcaklıkta bakımı yapılmış betonun gerçek sıcaklık koşullarında bakımı yapılan beton ile aynı olgunluk ve dayanım değerlerine sahip olması için gereken süredir[9]. Referans sıcaklık Kuzey Amerika'daki uygulamalarda genellikle 23°C olarak kullanılırken, Avrupa'daki uygulamalarda 20°C olarak kullanılmaktadır[8]. Betonun yaşını eşdeğer yaşa çevirebilmek için çimentonun zahiri aktivasyon enerjisini tahmin etmek gerekmektedir. Eşdeğer yaş fonksiyonunun güvenilirliği aktivasyon enerjisi değerinin güvenilirliğine bağlıdır.

Freisleben-Hansen ve Pedersen aktivasyon enerjisinin tayininde aşağıdaki formülleri kullanmışlardır[7]:

$$T < 20^{\circ}\text{C} \text{ için } E = 33500 + 1470(20 - T) \text{ J/mol} \quad (3.a)$$

$$T \geq 20^{\circ}\text{C} \text{ için } E = 33500 \text{ J/mol} \quad (3.b)$$

Gauthier ve Regourd, aktivasyon enerjisi değerinin normal portland çimentoları için 42-47kJ/mol arasında olduğunu öne sürmüşlerdir. %70 cüruf içeren çimentolarda ise bu değer 56kJ/mol değerine kadar yükselmektedir[10].

Guo ise aktivasyon enerjisi için 30 ile 40kJ/mol arasında bir değer kullanılabileceğini belirtmiştir[11].

## 2. ARAŞTIRMANIN AMACI VE KAPSAMI

Bu araştırmanın amacı farklı çimentolarla üretilmiş olan yaklaşık olarak aynı dayanım sınıfındaki betonların, beton sıcaklıklarının dayanım gelişimine etkilerini nicelik olarak güvenilir biçimde saptayan bir model oluşturmaktır. Bu amaçla çimentoların hidrasyon ısılarıyla tanımlanan hidrasyon dereceleri ile olgunluk arasında ilişki kurulmaya çalışılmıştır.

Araştırmada normal portland çimentosu (PÇ42.5), cürufllu çimento (CÇ42.5), sülfata dayanıklı çimento (SDÇ32.5) ve portland kompoze çimento (PKÇ/B32.5 R) kullanılarak C20, C30, C40 dayanım sınıflarında betonlar üretilmiş; 5, 20 ve 40°C sıcaklıklarda bakımları yapılmış ve 1, 3, 7, 14 ve 28 gün yaşlarındaki basınç dayanımları tespit edilmiştir. Ayrıca her çimentonun belirtilen yaş ve sıcaklıklardaki hidrasyon ısıları kalorimetrik yöntemle bulunmuştur.

## 3. DENEYSEL ÇALIŞMA

### 3.1. Kullanılan Malzemeler

#### 3.1.1. Çimentolar

Araştırmada ülkemizde üretilmekte olan dört farklı çimento, PÇ 42.5 (Normal Portland Çimentosu), PKÇ-B 32.5/R (Portland Kompoze Çimento), SDÇ 32.5 (Sülfata Dayanıklı Çimento), CÇ 42.5 (Cürufllu Çimento) kullanılmıştır. Kullanılan çimentoların kimyasal ve mekanik özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir.

## Betonun Eşdeğer Yaşının Çimento Hidratasyon Isısıyla Tahmini İçin Bir Yöntem

Çizelge 1. Araştırmada kullanılan çimentoların özellikleri

	PC 42.5	SDÇ 32.5	PKÇ 32.5	CÇ 42.5
%	Kimyasal		Kompozisyon	
SiO <sub>2</sub>	19.3	20.9	30.0	23.8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.7	4.5	8.2	10.7
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.4	4.2	2.8	3.3
CaO	63.3	63.2	49.7	53.4
MgO	3.0	1.9	2.7	5.0
SO <sub>3</sub>	3.0	2.7	2.1	2.5
KK	2.7	2.4	3.4	1.4
ÇK	0.4	0.5	19.2	2.7
	Fiziksel ve Mekanik		Özellikler	
Yoğunluk (g/m <sup>3</sup> )	3.01	3.03	2.90	2.97
Blaine İncelik (cm <sup>2</sup> /g)	3015	2808	3633	3970
Basınç Day.(MPa)				
3gün	28.7	13.2	11.2	24.8
7gün	34.6	20.7	18.9	32.1
28gün	49.9	39.9	32.5	51.9

### 3.1.2. Agregalar

Araştırmada 0-7 mm, 5-10 mm, 7-15 mm ve 15-25 mm boyutlarında kırma kireç taşı agrega olarak kullanılmıştır. Kullanılan agregaların su emme kapasiteleri ve özgül ağırlık değerleri Çizelge 2’de görülmektedir. Beton karışımları için söz konusu agregaların uygun kombinasyonları kullanılmıştır.

### 3.2. Beton Karışım Oranları

Her çimento tipinden C20, C30, C40 olmak üzere üç farklı beton sınıfında numuneler hazırlanmıştır. Beton sınıflarının gösterimlerinde kullanılan rakamlar 28 günlük minimum basınç dayanımını MPa cinsinden belirtmektedir. Ancak, kullanılan çimentoların farklılıkları nedeniyle yer yer hedeflenen dayanım değerlerinden farklı dayanımlar elde edilmiştir. Farklı cins çimentolar kullanıldığı için, karışım oranları hesaplanırken çökme değerleri esas alınmıştır ve tüm betonların çökme değerleri 8-10 cm arasında tutulmuştur. Kullanılan betonların karışım oranları ve elde edilen betonların çökme değerleri, hava miktarları ve birim ağırlık değerleri Çizelge 3’de verilmiştir.

### 3.3. Deney Yöntemi

DeneySEL çalışma iki ana kısımdan oluşmuştur. Birinci bölümde çimentoların hidratasyon ısıları, ikinci bölümde ise betonların basınç dayanımları belirlenmiştir.

Çizelge 2. Araştırmada kullanılan agregaların özellikleri

	0-7mm	5-10mm	7-15mm	15-25mm
Özgül Ağırlık				
Kuru	2.71	2.71	2.71	2.69
DYK	2.72	2.72	2.72	2.70
Su emme, %	0.42	0.40	0.48	0.39

### 3.3.1. Çimentoların Hidratasyon Isılarının Belirlenmesi

Her çimento tipi için 5, 20 ve 40°C’de bakımı yapılan çimento hamurlarının 3, 7, 14 ve 28 gün yaşlarındaki hidratasyon ısıları ASTM C186 (Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement)’ya göre belirlenmiştir[12]. Her çimento tipi, her bakım sıcaklığı ve her yaş için üçer numune test edilmiştir.

### 3.3.2. Betonların Basınç Dayanımlarının Belirlenmesi

Hazırlanan 15cm küp numuneler deney yaşına kadar 5, 20 ve 40°C’de sürekli rutubetli bakıma tabi tutulmuşlardır. 1, 3, 7, 14 ve 28 gün yaşlarında numunelere standart basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Her çimento tipi, her bakım sıcaklığı, her dayanım grubu ve her yaş için üçer numune test edilmiştir.

## 4. DENEY SONUÇLARI

Hidratasyon ısıları deney sonuçları Çizelge 4’de, basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 5’de verilmiştir.

## 5. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ

### 5.1. Genel

En genel ifadeyle betonun olgunluk fonksiyonu aşağıdaki şekilde yazılabilir[13]:

$$M(t, T) = \int_0^t K[T(\tau)] d\tau \quad (4)$$

M(t, T): T sıcaklığına maruz kalmış betonun t zamanındaki olgunluğu

K: hidratasyon kinetiğine bağlı bir sabit

T(τ): τ anındaki sıcaklık

Literatürde K sabitinin saptanmasında betonlar için en uygun yöntemin Arrhenius yasası olduğu belirtilmiştir[13].

$$K(T) = A e^{-\frac{E}{RT}} \quad (5)$$

*Betonun Eşdeğer Yaşının Çimento Hidratasyon Isısıyla Tahmini İçin Bir Yöntem*

*Çizelge 3. Kullanılan beton karışım oranları ve bazı özellikleri*

Çimento Tipi	Malzemeler	C20	C30	C40
PÇ42.5	Çimento	280	330	380
	Su	189	209	209
	0-7mm	1120	1060	983
	5-10mm	200	193	185
	7-15mm	163	149	142
	15-25mm	530	501	479
	Hava Miktarı (%)	3.1	2.5	2.1
	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2312.5	2350	2400
	Çökme (cm)	8	9.5	10
CÇ42.5	Çimento	280	330	380
	Su	203	212	228
	0-7mm	1160	1060	983
	5-10mm	200	193	185
	7-15mm	163	149	142
	15-25mm	530	501	479
	Hava Miktarı (%)	2.0	1.8	1.7
	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2350	2362.5	2350
	Çökme (cm)	9	9	10
SDÇ42.5	Çimento	350	400	450
	Su	206	213	211
	0-7mm	1047	987	898
	5-10mm	190	177	169
	7-15mm	146	141	131
	15-25mm	492	474	437
	Hava Miktarı (%)	1.8	1.2	1.8
	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2375	2362.5	2312.5
	Çökme (cm)	8	9	8.5
PKÇ32.5	Çimento	350	400	450
	Su	208	219	225
	0-7mm	1032	971	898
	5-10mm	188	163	163
	7-15mm	144	144	126
	15-25mm	486	486	437
	Hava Miktarı (%)	1.7	1.8	1.4
	Birim Ağırlık (kg/m <sup>3</sup> )	2325	2325	2325
	Çökme (cm)	10	8	10

Çizelge 4. Hidratasyon ısı deney sonuçları

Çimento Tipi	Bakım Sıcaklığı	Hidratasyon Isısı (cal/g)				
		1Gün	3Gün	7Gün	14Gün	28Gün
PÇ42.5	5°C		49.4	58.9	62.9	78.4
	20°C	44.7	67.5	74.9	85.2	92.1
	40°C		78.2	80.8	82.8	95.5
CÇ42.5	5 °C		66.9	73.1	82.3	91.4
	20°C	55.1	77.9	84.4	88.6	95.8
	40°C		78.2	96.9	102.1	107.2
SDÇ32.5	5°C		22.6	48.0	61.1	71.9
	20°C	23.7	43.5	58.9	69.6	78.1
	40°C		58.6	75.1	82.1	87.3
PKÇ32.5	5°C		30.9	39.9	51.6	65.8
	20°C	10.5	37.1	55.6	61.5	73.6
	40°C		43.9	59.2	68.4	84.6

Çizelge 5. Beton basınç dayanımı deney sonuçları

Çimento Tipi	Yaş (gün)	Basınç Dayanımları (MPa)								
		C20			C30			C40		
		5°C	20°C	40°C	5°C	20°C	40°C	5°C	20°C	40°C
PÇ42.5	1	4.0	10.5	15.5	8.4	17.1	21.0	10.4	19.5	23.7
	3	8.1	13.8	18.0	17.1	24.4	25.3	20.8	22.6	27.2
	7	12.6	18.6	20.7	24.7	26.3	27.7	27.3	28.2	32.4
	14	16.7	19.4	22.4	26.1	26.9	29.2	31.9	33.3	35.9
	28	18.1	20.3	23.1	26.8	30.8	32.1	34.2	40.8	43.3
CÇ42.5	1	1.8	6.1	9.2	2.4	8.5	11.8	3.0	10.0	14.1
	3	7.2	11.3	14.6	7.9	13.5	18.4	10.3	17.2	23.1
	7	10.4	16.5	21.1	12.2	19.7	22.6	16.1	22.6	29.5
	14	14.4	22.6	24.4	17.6	25.6	27.1	20.4	30.2	34.7
	28	18.7	25.3	26.2	21.7	29.8	31.7	25.0	35.8	39.7
SDÇ32.5	1	1.8	6.9	13.9	2.0	7.9	14.5	2.5	9.0	13.8
	3	8.1	15.1	20.6	9.0	16.0	19.4	9.3	18.1	24.7
	7	12.9	22.2	28.3	13.0	23.6	26.3	16.1	26.4	34.2
	14	18.3	26.7	30.2	18.7	27.8	33.6	21.4	33.5	35.0
	28	24.2	29.4	34.8	25.8	31.7	39.1	29.0	37.0	38.1
PKÇ32.5	1	1.3	3.8	7.7	2.7	6.6	10.5	2.8	7.3	12.7
	3	4.6	9.2	12.2	7.7	13.2	17.5	7.9	13.8	18.3
	7	8.3	12.1	15.9	12.5	16.9	20.0	13.6	18.2	23.9
	14	13.1	17.6	18.1	16.3	23.2	23.9	18.3	24.7	28.6
	28	18.5	19.9	21.1	24.6	27.1	28.4	27.6	31.9	34.7

### Betonun Eşdeğer Yaşının Çimento Hidratasyon Isısıyla Tahmini İçin Bir Yöntem

Burada E ile ifade edilen zahiri aktivasyon enerjisi, betonun özelliklerinin gelişiminde çimento hidratasyonunun etkisini gösteren terimdir. Hidratasyon hızı bir çimentodan diğerine farklılıklar göstermesine karşın hidratasyon derecesi ile doğrudan ilişkilidir. Çimento ile su arasındaki kimyasal reaksiyonların ne ölçüde tamamlandığını gösteren bir terim olan hidratasyon derecesi betonun mekanik veya fiziksel özelliklerinden yola çıkılarak belirlenebilir:

$$\alpha(t) = \frac{X(t)}{X(\infty)} \quad (6)$$

$\alpha(t)$ : t zamanındaki hidratasyon derecesi

$X(t)$ : bir fiziksel ya da mekanik özelliğin t zamanındaki değeri

$X(\infty)$ : aynı özelliğin maksimum değeri

İki farklı sıcaklıkta bakımı yapılmış aynı çimentonun hidratasyon hızları Denklem 7'deki gibi yazılabilir:

$$(d\alpha_1/dt)_{T_1} = K(T_1)f(\alpha) \quad (7a)$$

$$(d\alpha_2/dt)_{T_2} = K(T_2)f(\alpha) \quad (7b)$$

$(d\alpha/dt)_T$ : T bakım sıcaklığındaki hidratasyon hızı

$f(\alpha)$ : hidratasyon derecesine bağlı bir fonksiyon

Aynı hidratasyon derecesi için  $f(\alpha)$ 'lar eşit olacağından ötürü, farklı sıcaklıklar için hidratasyon hızları oranlandığında aşağıdaki denklem elde edilir.

$$\frac{(d\alpha_1/dt)_{T_1}}{(d\alpha_2/dt)_{T_2}} = \frac{K(T_1)}{K(T_2)} \quad (8)$$

Burada kinetik sabitlerin yerine Arrhenius denklemi koyulursa Denklem 8 aşağıdaki forma dönüşür:

$$\frac{(d\alpha_1/dt)_{T_1}}{(d\alpha_2/dt)_{T_2}} = e^{\frac{E}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)} \quad (9)$$

Bu denklemden zahiri aktivasyon enerjisi elde edilir:

$$E = R\left(\frac{T_1 * T_2}{T_1 - T_2}\right) \left[ \ln \frac{(d\alpha_1/dt)_{T_1}}{(d\alpha_2/dt)_{T_2}} \right] = R\left(\frac{T_1 * T_2}{T_1 - T_2}\right) \left[ \ln \frac{K(T_1)}{K(T_2)} \right] \quad (10)$$



## 5.2. Çimento Hidratasyon Isısı Değerleri Kullanılarak Zahiri Aktivasyon Enerjisinin Hesaplanması

Bir önceki bölümde açıklanan yaklaşım araştırmada kullanılan çimentolar için ayrı ayrı uygulanmış ve aktivasyon enerjisi değerleri belirlenmiştir. Uygulama sırasında hidratasyon derecesini hesaplamak için hidratasyon ısıları değerleri kullanılmıştır. Hidratasyon ısısının maksimum değeri olarak ise 20°C’de bakımı yapılan çimento hamurlarının hesaplanan 90 günlük değerleri alınmıştır. Bilindiği gibi, portland çimentolarının hidratasyon ısılarının %90’ı ilk üç ay içinde açığa çıkmaktadır[14].

Hesaplamalarda kullanılan yöntem şu şekilde özetlenebilir:

1. Çimentoların hidratasyon ısılarının değişik yaş ve sıcaklıklarda ASTM C186’ya göre belirlenmesi
2. Regresyon analizleri yapılarak uygun hidratasyon ısıları-yaş eğrilerinin belirlenmesi
3. Belirlenen bu eğrilerden 20°C sıcaklıkta 90 günlük hidratasyon ısıları değerinin hesaplanması
4. Her yaş ve sıcaklık için H/H<sub>90</sub> oranından hidratasyon derecelerinin bulunması
5. Regresyon analizleri ile her sıcaklık için hidratasyon derecesi-yaş ilişkilerinin belirlenmesi
6. Hidratasyon derecesi-yaş eğrilerinin türevleri alınarak hidratasyon hızı değerlerinin hesaplanması
7. Hidratasyon derecesi-hidratasyon hızı ilişkisinin Arrhenius denklemi olarak ifade edilmesi
8. Denklem K değerlerinin her sıcaklık için belirlenmesi
9. Denklem 10 kullanılarak aktivasyon enerjisinin hesaplanması

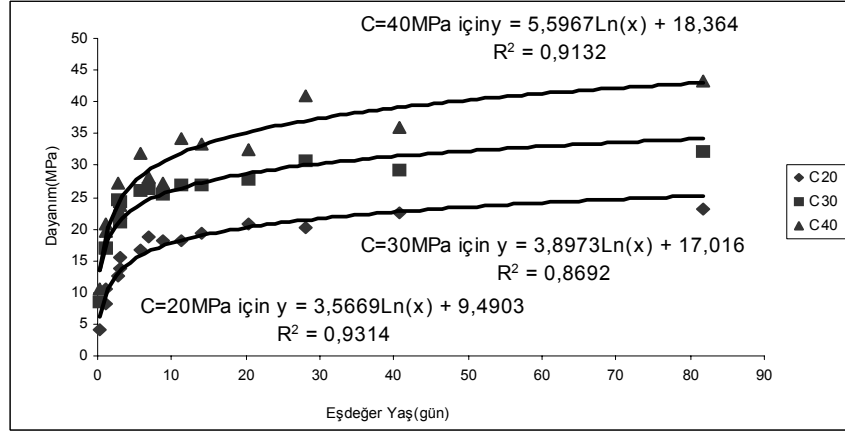
### 5.2.1. Önerilen Yöntemin PÇ42.5 Çimentosuna Uygulanması

Bir önceki bölümde açıklanan yöntem PÇ42.5 çimentosuna 5 ve 20°C bakım sıcaklıkları kullanılarak uygulandığında aktivasyon enerjisi olarak E= 40806.9 J/mol değeri bulunmuştur. Böylece PÇ42.5 çimentosu için eşdeğer yaş denklemi şu şekilde belirlenmiştir:

$$t_e = \sum e^{\frac{-40807}{8.314} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right) \Delta t} \quad (11)$$

Daha sonra belirlenen bu eşdeğer yaş fonksiyonu kullanılarak eşdeğer yaş-dayanım ilişkileri elde edilmiştir (Şekil 1).

## Betonun Eşdeğer Yaşının Çimento Hidratasyon Isısıyla Tahmini İçin Bir Yöntem



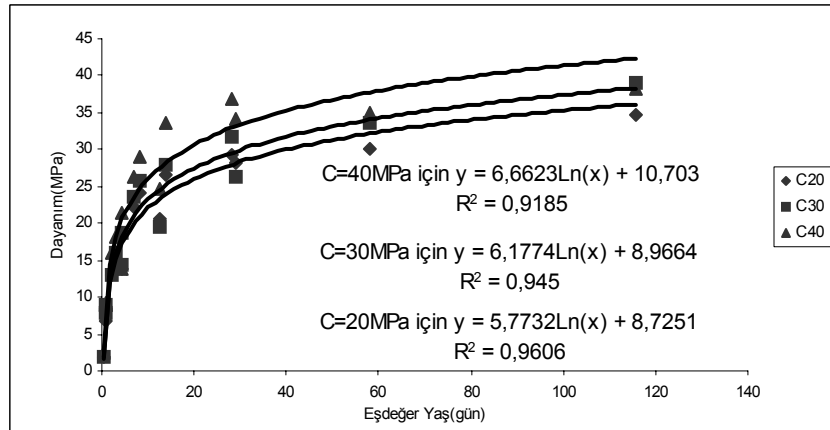
Şekil 1: PC 42.5 çimentosu kullanılarak üretilen C20, C30, C40 betonlarının önerilen yöntemle elde edilen eşdeğer yaş-dayanım ilişkileri

### 5.2.2. Önerilen Yöntemin SDÇ32.5 Çimentosuna Uygulanması

Hidratasyon ısı değeri kullanılarak önerilen yöntem SDÇ32.5 çimentosuna uygulanmış ve aktivasyon enerjisi değeri olarak  $E = 54107.8$  J/mol hesaplanmıştır ve eşdeğer yaş fonksiyonu belirlenmiştir.

$$t_e = \sum e^{\frac{-54108}{8.314} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t \quad (12)$$

Her beton sınıfı için elde edilen eşdeğer yaş-dayanım grafikleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2: SDÇ 32.5 çimentosu kullanılarak üretilen C20, C30, C40 betonlarının önerilen yöntemle elde edilen eşdeğer yaş-dayanım ilişkileri

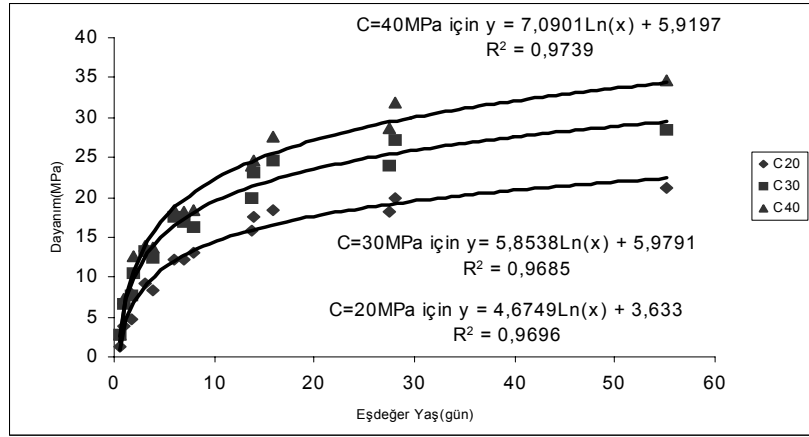
### 5.2.3. Önerilen Yöntemin PKÇ32.5 Çimentosuna Uygulanması

Önerilen yöntemle 5 ve 20°C bakım sıcaklıkları için elde edilen K değerleri Denklem 10'da yerine yerleştirildiğinde, PKÇ32.5 çimentosu için aktivasyon enerjisi E= 8078 J/mol olarak elde edilmiştir. Fakat bu değer herhangi bir çimento için anlamsız bir değerdir. Bu durumda Denklem 10, katkı miktarını göz önünde bulunduracak biçimde aşağıdaki gibi modifiye edilmiştir:

$$E = R \left( \frac{T_1 * T_2}{T_1 - T_2} \right) \left[ \ln \left[ (1-a) \frac{K(T_1)}{K(T_2)} \right] \right] \quad (13)$$

Bu denklemde a katkı miktarını göstermektedir ve kimyasal analizler sonucunda araştırmada kullanılan portland kompoze çimentosu için katkı miktarının %32.48 olduğu saptanmıştır. Gerekli değerler Denklem 13'de yerine konulduğunda E= 25818.4 J/mol olarak hesaplanmıştır. Bu aktivasyon enerjisi değeri kullanılarak eşdeğer yaş fonksiyonu ve eşdeğer yaş-dayanım ilişkileri belirlenmiştir (Şekil 3):

$$t_e = \sum e^{\frac{-25818}{8.314} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t \quad (14)$$



Şekil 3: PKÇ 32.5 çimentosu kullanılarak üretilen C20, C30, C40 betonlarının önerilen yöntemle elde edilen eşdeğer yaş-dayanım ilişkileri

### 5.2.4. Önerilen Yöntemin CÇ42.5 Çimentosuna Uygulanması

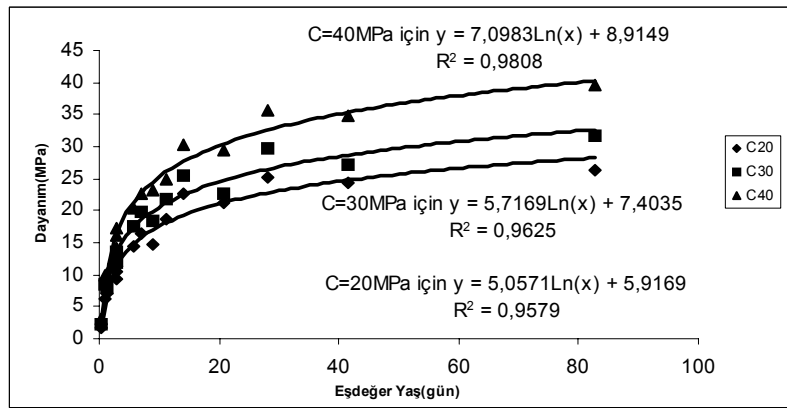
Cürüflü çimentolarda da katkı miktarının göz önünde bulundurulması gerektiğinden CÇ42.5 çimentosuna da Denklem 13 uygulanmıştır. Kullanılan cürüflü çimentonun ortalama olarak %57 katkı içerdiği tespit edilmiştir. Gerekli değerler Denklem 13'de yerine

### Betonun Eşdeğer Yaşının Çimento Hidratasyon Isısıyla Tahmini İçin Bir Yöntem

yerleştirildiğinde  $E = 41344.5$  J/mol olarak hesaplanmıştır. CÇ42.5 çimentosu için eşdeğer yaş denklemi aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

$$t_e = \sum e^{\frac{-41345}{8.314} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \Delta t \quad (15)$$

Araştırmada elde edilen dayanım değerleri ve hesaplanan eşdeğer yaş değerleri arasındaki ilişki Şekil 4’de görülmektedir.



Şekil 4: CÇ 42.5 çimentosu kullanılarak üretilen C20, C30, C40 betonlarının önerilen yöntemle elde edilen eşdeğer yaş-dayanım ilişkileri

## 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Araştırmada kullanılan malzemeler ve yöntemlerle elde edilen verilerin ışığında aşağıdaki sonuçlara varılmış ve önerilerde bulunulmuştur:

### 6.1. Sonuçlar

1. Literatürde belirtilen değerlerle karşılaştırıldığında önerilen yöntemle elde edilen aktivasyon enerjilerinin uygun olduğu görülmüştür.
2. Portland çimentolarının (bu araştırmada PÇ 42.5 ve SDC 32.5) hidratasyon ısılarından görece hidratasyon derecelerinin saptanmasıyla elde edilen aktivasyon enerjisi değerlerinin eşdeğer yaş belirlenmesinde kullanılabilir olduğu saptanmıştır. Denklem 10 portland çimentoları için pratik bir yöntemdir.
3. Önerilen yöntem katkı çimentoları için (bu araştırmada PKÇ 32.5 ve CÇ 42.5), çimentonun içerdiği katkı miktarına bağlı bir katsayı ile modifiye edilerek kullanılabilir.
4. Önerilen yöntem, çimentonun hidratasyon ısı gibi üretilen betonun niteliklerinden bağımsız bir özelliği esas almasına karşın iyi ve güvenilir sonuçlar vermekte ve pratik bir yöntem olarak görülmektedir.

## 6.2. Öneriler

1. Bu araştırmada çimentoların hidrasyon ısıları ASTM C186'ya göre hesaplanmıştır. Sonuçların duyarlılığını ve güvenilirliğini arttırmak bakımından erken yaşlarda hidrasyon ısını sürekli olarak ölçebilen bir kalorimetre cihazı ile benzeri bir araştırma yapılması yararlı olacaktır.
2. Bu çalışmada piyasada mevcut çimentolar kullanılmıştır. Çimento inceliği, kimyasal kompozisyonu, mineral katkı miktarı ve cinsi gibi parametrelerin etkilerinin saptanabilmesi ve Denklem 13'deki modifikasyonun tam olarak belirlenebilmesi için farklı klinker ve farklı cins ve miktarlardaki katkıları kullanarak laboratuvar koşullarında üretilen çimentolar üzerinde deneysel çalışmalar yapılmalıdır.

## Kaynaklar

- [1] American Society for Testing and Materials, "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by Maturity Method", ASTM C1074, Annual Book of Standards
- [2] McIntosh, J. D., "Electrical Curing of Concrete", Magazine of Concrete Research, V.1, No.1, 1949, pp.21-28
- [3] Nurse, R. W., "Steam Curing of Concrete", Magazine of Concrete Research, V.1, No.2, 1949, pp.79-88
- [4] Saul, A. G. A., "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure", Magazine of Concrete Research, V.2, No.6, 1951
- [5] McIntosh, J. D., "The Effects of Low-Temperature Curing on the Compressive Strength of Concrete", RILEM Symposium on Winter Concreting, Copenhagen, Danish Institute for Building Research, 1956, Session B-II
- [6] Alexander, K. M., and Taplin, J. H., "Concrete Strength, Cement Hydration and the Maturity Rule" Australian Journal of Applied Science, V.13, 1962, pp.277-284
- [7] Freisleben Hansen, P., Pedersen E. J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete", Nordisk Betong, V.1, 1977, pp.19-34
- [8] Carino N. J., and Lew, H. S., "The Maturity Method: From Theory to Application", Proc. of 2001 Structures Congress & Exposition, Washington D.C, ASCE, P. C Chang (Ed.), 2001, 19p
- [9] Carino, N. J., "The Maturity Method: Theory and Application", Cement, Concrete and Aggregates, CCAGDP, V.6, No.2, Winter 1984, pp.61-73
- [10] Gauthier, E., and Regourd, M., "The Hardening of Cement in Function of Temperature", Proceedings of the RILEM International Conference on Concrete at Early Ages, V.1, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1982, pp.145-150
- [11] Guo Chengju, "Maturity of Concrete: Method for Predicting Early-Stage Strength", ACI Materials Journal, V.86, No.4, 1989, pp.341-353
- [12] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Heat of Hydration of Hydraulic Cement", ASTM C186, Annual Book of Standards
- [13] Kada-Benameur, H., Wirquin, E., and Duthoit, B., "Determination of Apparent Activation Energy of Concrete by Isothermal Calorimetry", Cement and Concrete Research, V.30, 2000, pp.301-305
- [14] Mehta, P. K., Monterio, P. J. M., Concrete: Microstructure, Properties and Materials, Indian Concrete Institute, Chennai, India, 1997