

# MİNERAL KATKILI ÇİMENTOLARLA ÜRETİLEN BETONUN DAYANIMINI TAHMİN ETMEDE OLGUNLUK YÖNTEMİNİN KULLANILMASI

**Hasan ELÇİ ve Arın YILMAZ**

İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Balıkesir Üniversitesi, 10145, Balıkesir  
[helci@balikesir.edu.tr](mailto:helci@balikesir.edu.tr), [ayilmaz@balikesir.edu.tr](mailto:ayilmaz@balikesir.edu.tr)

(Geliş/Received: 22.12.2008 ; Kabul/Accepted: 16.04.2009)

## ÖZET

Sıcaklık ve zamanın ortak etkisi olarak tanımlanan olgunluk kavramı, betonun dayanımını tahmin etmek için yararlı bir tekniktir. Bu kavrama göre, aynı olgunluk düzeyindeki aynı beton örnekleri bu olgunluğa erişmek için sıcaklık-zaman etkisi ne olursa olsun yaklaşık olarak aynı dayanıma sahip olacaklardır. Son 50 yıl içinde birçok olgunluk fonksiyonu önerilmiştir. Bu fonksiyonların geçerliliği yalnızca normal Portland çimentoları içindir. Bu çalışmada, farklı tipteki Portland-puzolan çimentolarının geleneksel olgunluk fonksiyonları üzerindeki etkileri araştırılmış ve yeni olgunluk-dayanım ilişkisi geliştirilmeye çalışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Beton, dayanım, olgunluk.

## USING MATURITY METHOD FOR THE PREDICTION OF THE CONCRETE STRENGTH PRODUCED BY MINERAL ADMIXTURES

### ABSTRACT

The maturity concept, determined by the combined effects of temperature and time, is a useful technique for the prediction of the concrete strength. According to the concept, concrete samples having same maturity level would have approximately same strength values whatever combination of temperature and time to reach the maturity level. Many maturity functions have been proposed in the past 50 years. The validity of these functions are only for the ordinary Portland cements. In this study, the effects of different type of Portland-pozzolan cements on the traditional maturity functions were investigated; and new maturity-strength relationships were tried to be established.

**Keywords:** Concrete, strength, maturity.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Olgunluk kavramı, sıcaklık ve zamanın ortak etkisini içeren ve betonun yerinde dayanımını tahmin etmeyi sağlayan basit bir yöntemdir. Yöntemin esası, betonun dayanım kazanma sürecinde maruz kaldığı sıcaklık geçmişini “olgunluk fonksiyonu” olarak adlandırılan ve betonun dayanım kazanmasının bir göstergesi olarak sayısal bir indekse çevrilmesi olarak tanımlanabilir [1].

Betonun dayanımını tahmin etmek için bu zamana kadar önerilen olgunluk fonksiyonlarının tümü Portland çimentosu ile üretilmiş betonlar için geçerlidir. Gelişen teknoloji ile birlikte, dünyada ve ülkemiz-

deki çimento türleri artış göstermiştir. Artık çimento üretiminde, enerji tasarrufu, atık malzemelerin değerlendirilmesi ve betonun kalitesini geliştirmek için mineral katkıları kullanılmaktadır. Çeşitli tipteki mineral katkı içeren çimentolarla üretilmiş betonların olgunluk-dayanım ilişkileri için önerilen fonksiyonların uygunluğu için çalışmalar yeni yeni yapılmaya başlanmıştır.

#### 1.1. Amaç ve Kapsam (Purpose and Scope)

Bu çalışmada, farklı mineral katkı çimentolarla üretilen beton numuneleri üzerinde araştırma yapılmıştır. Çalışmanın ana amacı, çimento tipi ve bakım sıcaklıklarına bağlı olarak katkı çimentolarla üretilen numu-

nelerin erken yaşlarda dayanımını tahmin etmek için uygun bir fonksiyonun oluşturulmasıdır. Bunun için, standartlarda kabul görmüş olgunluk-dayanım fonksiyonlarının katkılı çimentolar için uygunluğunun ve yeni bir fonksiyonun geliştirilmesi üzerine çalışma yapılmıştır. Ayrıca ASTM standartları kabul görmüş olgunluk fonksiyonlarının mineral katkılı çimentolar için uygunluğu araştırılmıştır.

Çalışmada, Portland Çimentosu (PÇ 42.5), Portland Puzolanik Çimento (PZÇ 32.5) ve Portland Kompoze Çimento (PKÇ 32.5) kullanılmıştır. Çimentoların kullanılabilirliğinin belirlenmesi için gerekli olan fiziksel deneylerden; normal kıvam ve priz süreleri, hacim gelişmesi, tane dağılımı (özgül yüzey) ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Olgunluk-dayanım ilişkisinin belirlenmesi için, üretilen beton numunelerinin, 5 °C, 20 °C ve 40 °C’de bakımı yapıldıktan sonra 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımları elde edilmiştir.

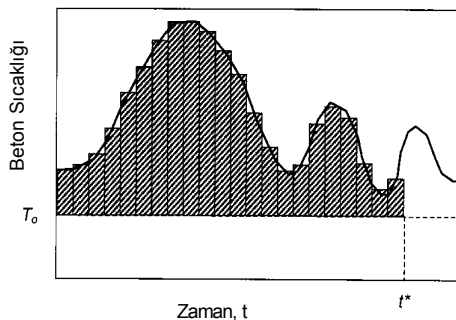
## 1.2. Literatür Özeti (Literature)

Betonda olgunluk kavramı, betonun dayanım kazanma sürecindeki sıcaklık ve zaman etkisinin birlikte ele alındığı bir teknik olarak 1940’ların sonu ile 1950’lerin başında hızlandırılmış bakım yöntemleri ile ilgili çalışmalar sırasında ortaya çıkmıştır [2, 3, 4]. Birçok araştırmacı bu konu ile ilgili çeşitli fonksiyonlar önermiştir.

İlk olgunluk fonksiyonu, farklı yüksek sıcaklıklarda bakımı yapılan betonun dayanım gelişimi üzerindeki zaman ve sıcaklığın etkisi göz önüne alınarak Nurse-Saul tarafından önerilmiştir [2].

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

Nurse-Saul fonksiyonu ile bulunan olgunluk indeksi M, günümüz terminolojisinde sıcaklık-zaman faktörü olarak adlandırılmıştır. Betonun maruz kaldığı sıcaklık değişimi ve sıcaklık-zaman faktörü şematik olarak Şekil 1’de gösterilmiştir [5].



**Şekil 1.** Betonun maruz kaldığı sıcaklık değişimi ve denkleme (1)’e göre hesaplanan sıcaklık-zaman faktörü (Variation of temperature to be exposed to concrete and temperature-time factor according to Equation 1)

Şekil 1’de görüldüğü gibi, herhangi bir yaştaki ( $t^*$ ) betonun sıcaklık-zaman faktörü sıcaklık eğrisi ile temel alınan sıcaklık ( $T_0$ ) arasında kalan alandır. Temel alınan sıcaklık, betonun dayanım kazanmasının durduğu sıcaklık olarak belirtilmiştir. Gelenekselleşmiş  $T_0$  değeri  $-10$  °C olarak kabul görmüştür [6]. Temel alınan sıcaklık değerini, betonu oluşturan malzemelerin çeşitliliğinden dolayı genellemek doğru değildir. ASTM C1074’de temel alınan sıcaklığın bulunmasında izlenecek yol ayrıntılı bir şekilde verilmiştir [7]. 1951 yılında “olgunluk kuralı” olarak bilinen önerme Saul tarafından yapılmıştır [2]. Buna göre; “Aynı bir karışımdan elde edilen ve aynı olgunlukta olan betonlar, bu olgunluğa erişmek için kullanılan sıcaklık-zaman kombinasyonları ne olursa olsun, yaklaşık olarak aynı dayanıma sahiptirler”.

Saul olgunluk fonksiyonu, başlangıçtaki dayanım kazanma hızının sıcaklığın doğrusal bir fonksiyonu olduğu varsayımına dayanmaktadır. Daha sonra, bu doğrusal varsayımın geniş aralıktaki bakım sıcaklıkları için uygun olmadığı saptanmıştır. Bergstrom tarafından yapılan çalışmaların sonucunda Saul olgunluk fonksiyonunun normal bakım sıcaklıkları için uygun olduğu belirtilmiştir [6].

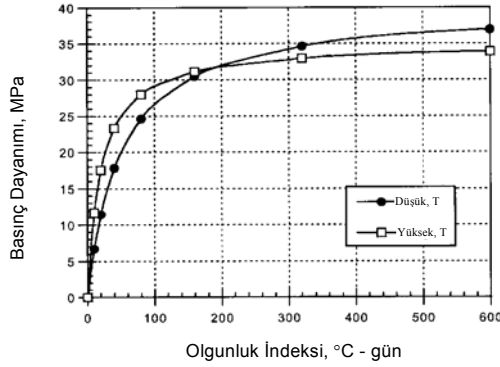
McIntosh, erken yaşlarda düşük bakım sıcaklıklarına maruz betonun yüksek bakım sıcaklıklarına göre, erken yaşlardaki dayanımının düşük ve ileriki yaşlardaki dayanımının yüksek olduğunu belirtmiştir. Yaptığı çalışmaların sonucunda; Saul olgunluk fonksiyonunun betonun dayanım kazanması sırasında sıcaklığın etkisini doğru tahmin edemeyeceğini vurgulamıştır [4].

McIntosh gibi, Alexander ve Taplin de yaptığı çalışmalarla aynı sonuca varmıştır.  $5^\circ\text{C}$ ,  $21^\circ\text{C}$  ve  $42^\circ\text{C}$ ’de bakımı yapılmış çimento hamuru ve beton üzerindeki deneysel çalışmalara göre; olgunluk kuralı ( $T_0 = -10^\circ\text{C}$  alınmıştır), erken olgunluktaki betonun dayanımında sıcaklığın etkisini düşük, ileriki olgunluklarda yüksek olarak hesapladığı sonucuna varmıştır [8].

Malhotra, hızlandırılmış kür ile bakımı yapılan değişik tipteki betonların olgunluk dayanım ilişkisini incelemiştir. Yaptığı çalışmalardan; hızlandırılmış kür deneylerinin olgunluk-dayanım arasındaki ilişkiyi etkilemediği görülmüş, fakat farklı çimentolar ile üretilen betonun aynı olgunluk için farklı dayanım değerleri verdiği ve bu durumun olgunluk kavramının gelişigüzel kullanımına karşı uyarıcı olduğu sonucuna varmıştır [9].

Carino, olgunluk yönteminin uygunluğunu farklı ortam koşulları için araştırmıştır. Hazırladığı üç farklı beton karışımının ilkbahar süresince, arazi ortamında ve laboratuvar koşullarında nemli bir ortamda bakımını gerçekleştirmiştir. Çalışmanın sonucunda, iki karışımın farklı sonuçlar verdiğini bulmuştur. Sıcaklık gelişimi incelendiğinde; arazi ortamındaki beton numunelerin erken yaşlardaki sıcaklıklarının laboratuvar

ortamındakilere göre çok farklı olduğu ortaya çıkmıştır. Aynı olgunluk indeksi için, erken yaşlarda yüksek sıcaklığa sahip beton numunelerinin ilk dayanımları yüksek, geç yaşlarda ise düşük olduğu Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu davranış McIntosh ve Kleiger tarafından da daha önceleri vurgulanmıştır [5, 10, 11].



**Şekil 2.** Erken yaşta betonun olgunluk indeksi-dayanım ilişkisine farklı sıcaklıkların etkisi (Effect of different temperatures on maturity index-strength in early age concrete)

1977 yılında, Freiesleben, Hansen ve Pedersen betonun kaydedilen sıcaklık değişimini kullanarak yeni bir olgunluk indeksi önermiştir. Bu fonksiyon, Arrhenius denklemini temel alan kimyasal reaksiyonların hızına sıcaklığın etkisini tanımlamak için kullanılmıştır. Bu yeni fonksiyon, betonun “eşdeğer yaşının” hesaplanmasına dayanmaktadır [12].

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

Denklem (2) kullanılarak, betonun gerçek yaşı dayanım açısından eşdeğer yaşa çevrilmektedir. Referans sıcaklığı, Avrupa’daki uygulamalarda 20°C, Kuzey Amerika’daki uygulamalarda 23°C olarak alınmaktadır. Eşdeğer yaş fonksiyonunun en önemli üstünlüğü, ilk dayanım gelişimi ile kür sıcaklığı arasında doğrusal olmayan bir ilişkiye izin vermesidir. Eşdeğer yaş hesaplanmasında görünür aktivasyon enerjisinin değeri önemlidir. Bu yöntemin doğruluğu görünür aktivasyon enerjisinin uygunluğuna bağlıdır. Bu durum önemli bir dezavantaj olarak karşımıza çıkmıştır.

Kjellsen ve Detwiler, uygun aktivasyon enerjisi kullanarak, erken yaşlarda dayanımın doğru olarak tahmin edileceğini belirtmişlerdir. Fakat 28 günlük dayanımın %40’ına karşılık gelen olgunluk için denklem (2)’nin doğru sonuçlar vermediğini göstermişlerdir [13].

Jonasson, Arrhenius olgunluk fonksiyonunu kullanarak 28 günlük dayanımın yarısına kadar olan değerler için sıcaklığın etkisini araştırmıştır. Çalışmalarında, 20-50°C’de bakımı yapılmış, su/çimento oranı 0.77 ve

0.56 olan beton numuneleri kullanmıştır. Çalışmalarının sonucunda, yüksek bakım sıcaklıklarında olgunluk yönteminin sıcaklığın etkisini olduğundan daha fazla gösterdiğini bulmuştur [14].

Betonun dayanım kazanma hızı üzerinde sıcaklığın etkisi büyüktür. Yapılan çalışmaların sonucunda, sıcaklığın ve zamanın ortak etkisi ile olgunluk kavramı ortaya çıkmıştır. Genel olarak, yüksek sıcaklıklarda (40°C) erken dayanım yüksek, ileriki yaşlarda düşük, düşük sıcaklıklarda (5°C) erken dayanım düşük, ileriki yaşlarda normal şartlardaki (20°C) değerlerle aynı çıktığı bulunmuştur [15]. Son yıllarda yapılan birçok çalışmaya rağmen, erken ve ileriki yaşlardaki dayanımın tahmini için sorunlar bitmemiştir [16, 17].

Uygun olgunluk fonksiyonu belirlendikten sonra, erken yaşlarda betonun dayanımını tahmin etmek için olgunluk-dayanım ilişkisini tanımlamak gerekmektedir. Bunun için birçok denklem önerilmiş ve uygunluğu araştırılmıştır. Zamana bağlı olarak betonun dayanım gelişimi, sıcaklığın ve geçerli dayanımın fonksiyonu olarak belirtilmiştir [1, 18, 19]. Bernhardt, bu ilkeyle aşağıdaki matematiksel denklemi önermiştir [20].

$$dS/dt = f(S)k(T) \quad (3)$$

Denklem (3)’ün düzenlenmesi ile aşağıdaki ifade elde edilmiştir. Denklem (4)’ün sağ tarafı sıcaklık ve zamanın çarpımıdır ve bildiğimiz olgunluk kavramını vermektedir. Bu denklem, olgunluk yöntemi ile dayanım tahmininde ortaya çıkan fonksiyonlar için temel olmuştur.

$$\int dS/f(S) = \int k(T) dt \quad (4)$$

1956 yılında, Plowman tarafından yarı logaritmik bir fonksiyon önerilmiştir [21].

$$S = a + b \log(M) \quad (5)$$

Çok kullanılan basit bir denklem olmasına rağmen, yüksek ve düşük olgunluk değerleri için doğru sonuçlar vermemiştir. Yüksek olgunluk değeri için dayanım değeri çok yüksek çıkmıştır.

Daha sonra, 1971 yılında Chin tarafından hiperbolik bir fonksiyon önerilmiştir [22].

$$S = \frac{M}{\frac{I}{A} + \frac{M}{S_U}} \quad (6)$$

Denklem (6) Plowman’ın önerdiği denklemin hatalarının üstesinden gelmiştir. Burada, A ve S<sub>U</sub> değerlerinin fiziksel bir anlamı vardır. Daha sonra, Carino ve Lew denklem (6)’yı geliştirip, yeni bir denklem ortaya çıkarmıştır [23].

$$S = \frac{M - M_0}{\frac{I}{A} + \frac{M - M_0}{S_U}} \quad (7)$$

Denklem (7)'ye göre  $M_0$  değeri, başlangıç olgunluk değeri olup ani dayanım kazanımı başlamadan önceki tümevarım zamanı olarak ifade edilmiştir. Carino, dayanım ile hız sabiti arasında hiperbolik bir denklem geliştirmiştir [1].

$$S = S_U \frac{k_T(t - t_0)}{1 + k_T(t - t_0)} \quad (8)$$

Denklem (8)'in bazı çimentolu sistemler için uygun olmadığı bulunmuştur. Bundan dolayı, Knudsen denklem (8)'i geliştirerek yeni bir denklem önermiştir [24].

$$S = S_U \frac{\sqrt{k_T(t - t_0)}}{1 + \sqrt{k_T(t - t_0)}} \quad (9)$$

Knudsen, iki denklem arasındaki farkın çimento taneçiklerinin hidrasyon kinetiğinden ortaya çıktığını belirtmiş ve denklem (8)'i doğrusal hiperbolik, denklem (9)'u ise parabolik hiperbolik olarak adlandırmıştır.

Olgunluk Metodu ile ilgili olarak, yurdumuzda da son yıllarda çeşitli çalışmalar yapılmıştır [25, 26, 27].

## 2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Malzemeler (Materials used in the study)

Portland Çimentosu (PÇ 42.5), Portland Puzolanik Çimento (PZÇ 32.5) ve Portland Kompoze Çimento (PKÇ 32.5) kullanılmıştır. Çimentoların kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de gösterilmiştir.

Her bir çimento numunesinin tane büyüklüğü dağılımı, 200 µm, 90 µm ve 40 µm elekler için bulunmuştur. Tane büyüklüğü dağılımı, özgül ağırlıkları ve özgül yüzey alanları (cm<sup>2</sup>/g) Tablo 2'de gösterilmiştir. Beton üretiminde kullanılan agreganın elek analizi sonuçları Tablo 3'te, deneylerde kullanılan beton numuneler için 1 m<sup>3</sup> betona giren malzeme miktarları Tablo 4'te verilmiştir.

### 2.2. Kimyasal Deneyler (Chemical Experiment)

Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri laboratuvar koşullarında yapılmıştır. Malzemelerin kimyasal analizleri için iki yöntem kullanılmaktadır. Bu yöntemler, X-ışını kırılma yöntemi (XRD) ve X-ışını floresans spektrum (XRF) yöntemidir. Bu çalışmada, XRF yöntemi kullanılmıştır.

**Tablo 1.** Malzemelerin kimyasal analiz sonuçları (Chemical properties of the materials)

| %                              | PÇ 42.5<br>CEM I | PZÇ 32.5<br>CEM IV | PKÇ 32.5<br>CEM II |
|--------------------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 20.04            | 37.90              | 31.26              |
| CaO                            | 61.62            | 40.15              | 47.75              |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.81             | 7.80               | 7.20               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.62             | 6.14               | 2.69               |
| MgO                            | 1.43             | 0.91               | 1.56               |
| SO <sub>3</sub>                | 2.87             | 1.60               | 2.63               |
| K <sub>2</sub> O               | 0.94             | 0.71               | 1.63               |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.18             | 0.15               | 0.66               |
| K.Kayıbı                       | 2.60             | 2.97               | 4.69               |
| Serbest CaO                    | 1.41             | 0.62               | 0.62               |
| TOPLAM                         | 100.52           | 98.95              | 100.69             |

**Tablo 2.** Malzemelerin tane büyüklüğü dağılımı, özgül ağırlıkları ve özgül yüzeyleri (Size fraction, specific gravity and specific surface of the materials)

|          | 40 µm<br>(%) | 90 µm<br>(%) | 200 µm<br>(%) | Özgül<br>ağırlık<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Özgül<br>yüzey<br>(cm <sup>2</sup> /g) |
|----------|--------------|--------------|---------------|--|--|
| PÇ 42.5  | 13.60        | 0.90         | -             | 3.17                                     | 3516                                   |
| PZÇ 32.5 | -            | 1.90         | -             | 2.61                                     | 4044                                   |
| PKÇ 32.5 | 20.13        | 2.76         | -             | 2.80                                     | 4622                                   |

**Tablo 3.** Agreganın elek analizi sonuçları (Grading results for the aggregate)

| Elek Göz<br>Açık.(mm)  | 0.25 | 1  | 2  | 4  | 8  | 16 | 31.5 |
|------------------------|------|----|----|----|----|----|------|
| % Geçen<br>(Ağırlıkça) | 8    | 28 | 37 | 47 | 62 | 80 | 100  |

**Tablo 4.** Beton karışımına giren malzeme miktarları (Mix proportion for concrete)

| Malzeme Adı      | 1 m <sup>3</sup> beton için |                         |
|------------------|-----------------------------|-------------------------|
|                  | Ağırlık (kg)                | Hacim(dm <sup>3</sup> ) |
| Su               | 212.0                       | 212.0                   |
| Çimento          | 424.0                       | 136.8                   |
| Agrega           | 1689.0                      | 637.4                   |
| Akışkanlaştırıcı | 4.2                         | 3.8                     |
| Boşluk           | -----                       | 10.0                    |
| <b>Toplam</b>    | <b>2329.2</b>               | <b>1000.0</b>           |

### 2.3. Fiziksel ve Mekanik Deneyler (Physical and Mechanical Experiments)

Uygulanan fiziksel ve mekanik deneyler, TS EN 196-1'e göre yapılmıştır [28]. TS EN 196-1'de belirtilen priz başlama ve sona erme sürelerinin tayini, hacim genişmesi tayini, tane büyüklüğü tayini, normal kıvam tayini ve eğilmede çekme ve basınç dayanımları deneyleri numuneler üzerinde uygulanmıştır.

### 3. BULGULAR (RESULTS)

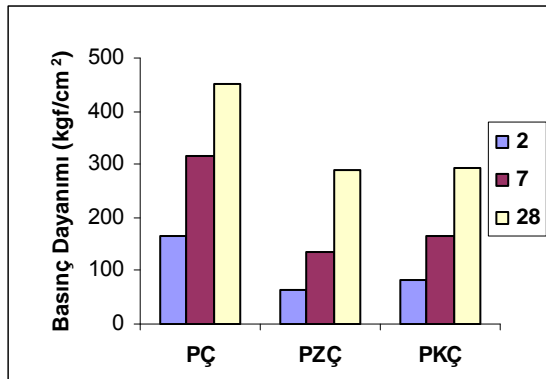
#### 3.1. Basınç Dayanımları (Compressive Strength)

Çimento türüne ve bakım sıcaklığına bağlı olarak basınç dayanımı değerleri incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda bakımı yapılmış (5°C, 20°C ve 40°C) harç numunesi (PÇ 42.5) ve beton numunelerinin (PZÇ 32.5 ve PKÇ 32.5) 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerleri karşılaştırılmıştır. Deneylerden elde edilen basınç dayanımı değerleri Tablo 5'te verilmiştir.

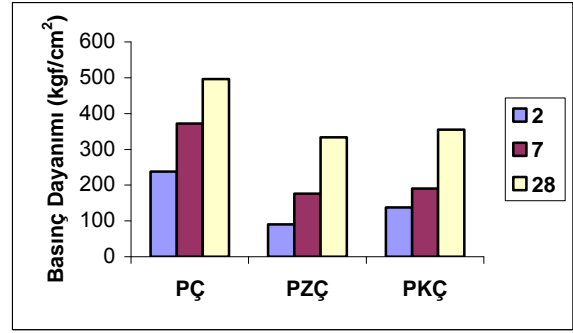
**Tablo 5.** Basınç dayanımı değerleri (kgf/cm<sup>2</sup>) (Compressive strength values (kgf/cm<sup>2</sup>))

| Kür sıcaklığı | Zaman (gün) | CEM I PÇ | CEM IV PZÇ | CEM II PKÇ |
|---------------|-------------|----------|------------|------------|
| 5°C           | 2           | 163.6    | 63.20      | 84.27      |
|               | 7           | 316.7    | 136.56     | 165.30     |
|               | 14          | 379.2    | --         | --         |
|               | 28          | 449.5    | 288.71     | 293.56     |
|               | 90          | 512.4    | --         | --         |
| 20°C          | 2           | 237.6    | 90.44      | 137.96     |
|               | 7           | 372.0    | 176.18     | 190.46     |
|               | 14          | 427.8    | --         | --         |
|               | 28          | 496.5    | 333.30     | 354.74     |
|               | 90          | 563.0    | --         | --         |
| 40°C          | 2           | 301.5    | 149.94     | 165.97     |
|               | 7           | 347.4    | 253.66     | 219.02     |
|               | 14          | 394.6    | --         | --         |
|               | 28          | 405.9    | 426.87     | 398.98     |
|               | 90          | 481.9    | --         | --         |

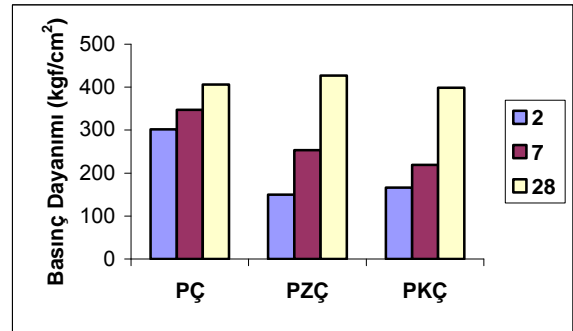
5°C'de bakımı yapılan mineral katkıli çimentolarla üretilen betonların basınç dayanımı değerleri karşılaştırıldığında çok büyük değer farklılıklarına rastlanmamıştır (Şekil 3). 20°C'de bakımı yapılmış Portland Kompoze Çimento ile üretilen betonların basınç dayanımları Portland Puzolanik Çimento ile üretilen betonlara göre daha yüksek çıkmıştır (Şekil 4). Bunun nedenini Portland Kompoze Çimento içerisinde bulunan bir miktar yüksek fırın cürufuna bağlayabiliriz. 40°C'de ise, Portland Puzolanik Çimento ile üretilen betonların nihai dayanımları yüksek çıkmıştır (Şekil 5)



**Şekil 3.** 5°C sıcaklıkta bakımı yapılmış numunelerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı grafikleri (Compressive strength of samples cured in 5°C temperature in 2, 7 and 28 days)



**Şekil 4.** 20°C sıcaklıkta bakımı yapılmış numunelerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı grafikleri (Compressive strength of samples cured in 20°C temperature in 2, 7 and 28 days)



**Şekil 5.** 40°C sıcaklıkta bakımı yapılmış numunelerin 2, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı grafikleri (Compressive strength of samples cured in 40°C temperature in 2, 7 and 28 days)

#### 3.2. ASTM C 1074'de Yer Alan Olgunluk

##### Fonksiyonlarının Uygunluğu (Suitability of maturity functions in ASTM C 1074)

Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu ve eşdeğer yaş fonksiyonu, ASTM C 1074 tarafından kabul görmüş olgunluk fonksiyonlarıdır. Kabul görmüş olgunluk fonksiyonlarının yerine birçok fonksiyon önerilmiş ve uygunluğu araştırılmıştır. Bu çalışmada, olgunluk indeksinin belirlenmesi için mineral katkıli çimentolarla üretilen betonların farklı kür koşullarında bakımı yapıldıktan sonra belirlenen yaşlarda basınç dayanımı değerleri bulunmuştur. Olgunluk değerinin bulunması için gerekli hesap adımları ASTM C 1074'de belirtilmiştir [7].

ASTM C 1074'de, temel alınan sıcaklık ( $T_0$ ) ve aktivasyon enerjisi (E) değerlerinin bulunması için şu yol izlenmektedir. İlk olarak her bir bakım sıcaklığı için, zaman değerlerinin tersine karşılık gelen basınç dayanımı değerlerinin tersi grafik üzerinde nokta şeklinde belirlenir. Daha sonra, bu noktalardan geçen en uygun doğru çizilerek denklemi elde edilir. Doğrunun y eksenini kestiği değer K değeri olarak adlandırılır. Temel alınan sıcaklığı ( $T_0$ ) bulmak için, her bir bakım sıcaklığına karşılık gelen K değerleri grafik üzerinde belirlenir, daha sonra bu noktalardan geçen en uygun doğrunun y eksenini kestiği değer  $T_0$  değerini verir. Aktivasyon enerjisi için, K değerlerinin doğal logarit-

masına karşılık gelen bakım sıcaklığının Kelvin cinsinden tersi değerleri grafik üzerinde belirlendikten sonra, noktalardan geçen en uygun doğrunun eğimi, E/R değerini verir. Buradan aktivasyon enerjisi değeri, gaz sabiti R (8.314 J/mol·°K) değeri kullanılarak bulunmuş olur.

### 3.2.1. Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu (Nurse-Saul maturity function)

Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunun uygunluğu, mineral katkıli çimentolar için ayrı ayrı incelenmiştir. Olgunluk indeksinin (M) hesaplanmasında gerekli olan temel alınan sıcaklık değerleri ( $T_0$ ), ASTM C 1074'e göre bulunmuştur. Elde edilen, temel alınan sıcaklık değerleri ve Nurse-Saul olgunluk fonksiyonları Tablo 6'da gösterilmiştir.

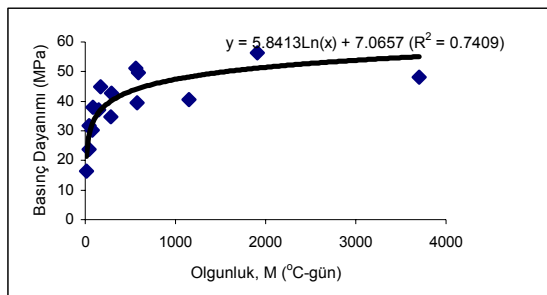
Deneysel verilerin analizleri sonucunda bulunan  $T_0$  değerlerinin, katkıli çimentolar için birbirine yakın çıktığını söyleyebiliriz. Çimento içerisindeki mineral katkı miktarı arttıkça, Portland çimentosuna göre  $T_0$  değerlerinin artması beklenmektedir.

**Tablo 6.** Temel alınan sıcaklık değerleri ve Nurse-Saul olgunluk fonksiyonları (Datum temperature values and Nurse-Saul Maturity Functions)

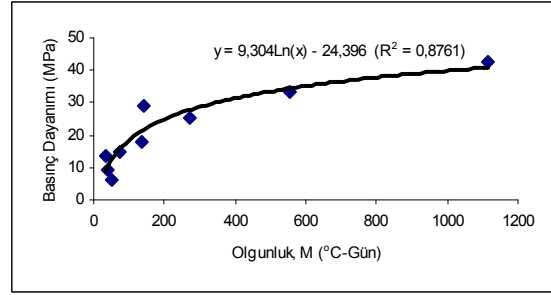
|     | Temel alınan sıcaklık ( $T_0$ ) | Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu |
|-----|---------------------------------|--------------------------------|
| PÇ  | -1.2                            | $M = \sum (T+1.2) \Delta t$    |
| PZÇ | -23.5                           | $M = \sum (T+23.5) \Delta t$   |
| PKÇ | -25.9                           | $M = \sum (T+ 25.9) \Delta t$  |

Tablo 6'da belirtilen Nurse-Saul olgunluk fonksiyonları kullanılarak çimento tipine göre olgunluk-dayanım ilişkileri Şekil 6-Şekil 8'de gösterilmiştir. Her şekil üzerinde dayanım-olgunluk ilişkisini veren denklem ve regresyon katsayısı değerleri bulunmaktadır. Şekiller incelendiğinde,  $R^2$  değerlerinin aslında yüksek olduğu görülmektedir. Fakat Portland çimentosuyla üretilen numuneler için kabul görmüş Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunun bu haliyle mineral katkıli çimentolar için kullanılması uygun olmayacaktır.

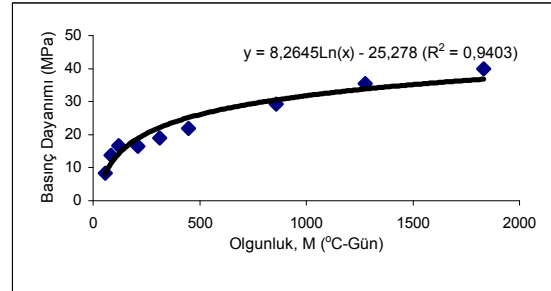
Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunun en büyük dezavantajı olarak bilinen, erken yaştaki farklı sıcaklıkların olgunluk-dayanım ilişkisine etkisi Şekil 2'de gösterilmiştir.



**Şekil 6.** PÇ ile üretilen harçların olgunluk-dayanım ilişkisi (Maturity-strength relationship in Portland cement mortar)



**Şekil 7.** PZÇ ile üretilen betonların olgunluk-dayanım ilişkisi (Maturity-strength relationship in PZÇ)



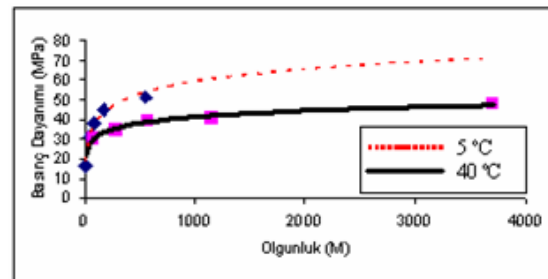
**Şekil 8.** PKÇ ile üretilen betonların olgunluk-dayanım ilişkisi (Maturity-strength relationship in PKÇ)

rilmiştir. Düşük olgunluk değerleri için, düşük sıcaklıkta bakımı yapılmış betonların, yüksek sıcaklıkta bakımı yapılanlara göre düşük, yüksek olgunluk değerleri için ise daha yüksek dayanıma sahip oldukları görülmektedir. Bu çalışmada, 5°C ve 40°C'de bakımı yapılmış çimentoların olgunluk-dayanım ilişkisi Şekil 9-Şekil 11'de gösterilmiştir.

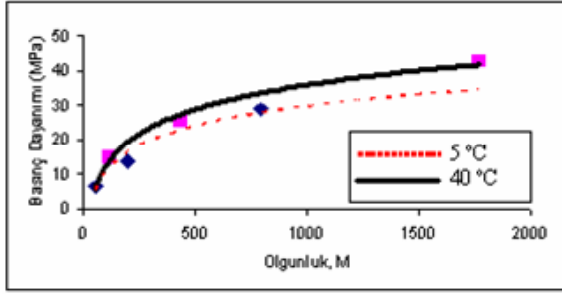
Yukarıda belirtilen Nurse-Saul fonksiyonunun dezavantajı olayına hiçbir grafik üzerinde rastlanılmamıştır. Mineral katkıli çimentolarla üretilen numuneler için, yüksek bakım sıcaklıkları için yüksek, düşük bakım sıcaklıkları için düşük olgunluk-dayanım ilişkisi görülmüştür. Portland çimentosu için yapılan değerlendirmede, literatürlerde belirtilenin aksine, düşük bakım sıcaklıkları için yüksek, yüksek bakım sıcaklıkları için düşük olgunluk-dayanım ilişkisi bulunmuştur.

### 3.2.2. Eşdeğer yaş fonksiyonu (Equivalent Age Function)

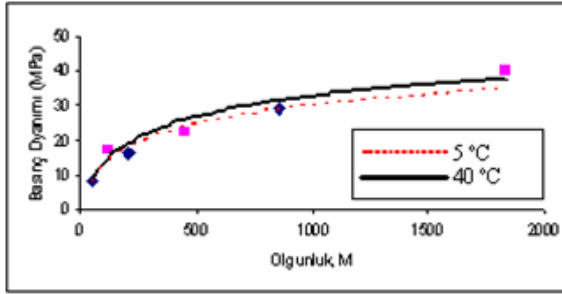
Eşdeğer yaş fonksiyonu Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunun bir varyantıdır.



**Şekil 9.** PÇ ile üretilen harçlarda bakım sıcaklığının olgunluk-dayanım ilişkisine etkisi (The effect of curing temperature on maturity-strength relationship in Portland cement mortar)



**Şekil 10.** PZÇ ile üretilen betonların bakım sıcaklığının olgunluk-dayanım ilişkisine etkisi (The effect of curing temperature on maturity-strength relationship in PZÇ)



**Şekil 11.** PKÇ ile üretilen betonların bakım sıcaklığının olgunluk-dayanım ilişkisine etkisi (The effect of curing temperature on maturity-strength relationship in PKÇ)

yonuna alternatif olarak önerilen ve ASTM standartlarınınca kabul görmüş bir yöntemdir. Bu yöntemin mineral katkıli çimentolar için uygun olup olmadığı araştırılmıştır. Eşdeğer yaşın bulunması için çimentonun aktivasyon enerjisinin doğru hesaplanması gerekmektedir. Aktivasyon enerjisinin nasıl hesaplanacağı ASTM C 1074'de belirtilmiştir [7]. Tüm çimentoların aktivasyon enerjisi değerleri ve eşdeğer yaş fonksiyonları Tablo 7'de belirtilmiştir.

**Tablo 7.** Aktivasyon enerjisi değerleri ve eşdeğer yaş fonksiyonları (Activation energy values and equivalent age functions)

|     | Aktivasyon enerjisi, E (J/mol) | Eşdeğer yaş fonksiyonu  |
|-----|--------------------------------|---|
| PÇ  | 32125.3                        | $t_e = \sum e^{-\frac{32125.3}{8.314} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)} \Delta t$ |
| PZÇ | 16125.0                        | $t_e = \sum e^{-\frac{16125}{8.314} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)} \Delta t$   |
| PKÇ | 17694.7                        | $t_e = \sum e^{-\frac{17694.7}{8.314} \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_R} \right)} \Delta t$ |

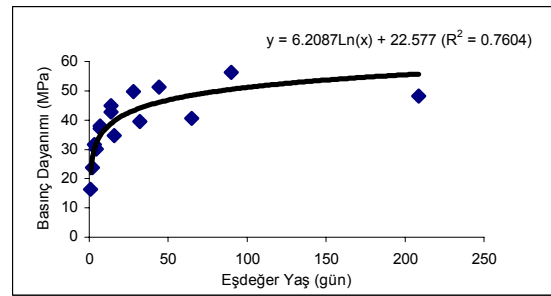
Tablo 7 incelendiğinde, Portland çimentosu için aktivasyon enerjisi değeri, E=32.1 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Bu değer Freiesleben, Hansen ve Pedersen [12] tarafından önerilen 33.5 kJ/mol değerine oldukça yakındır. Fakat, ASTM C 1074'de Tip I normal Portland çimentosu için verilen 40-45 kJ/mol değerinden düşüktür. Tipik bir Portland çimentosunda C<sub>3</sub>S miktarı ~%50, C<sub>3</sub>A miktarı %12 civarındadır. Bilin-

diği gibi C<sub>3</sub>S bileşeni Portland çimentosunda C<sub>3</sub>A'dan sonra en hızlı hidrasyona sahip bileşendir. Bu çalışmada kullanılan Portland çimentosu için, C<sub>3</sub>S= %46.2 ve C<sub>3</sub>A= %9.3 olup standart değerlerden düşüktür. Bundan dolayı aktivasyon enerjisinin yüksek olması beklenmektedir. Fakat tek başına ana bileşenleri ele alarak böyle bir yorum yapmak doğru olmayabilir. Bunun yanında çimentonun inceliği ve içerisindeki alçı miktarı etkin rol oynayabilir. Çimentonun inceliğinin artması aktivasyon enerjisini düşürmektedir.

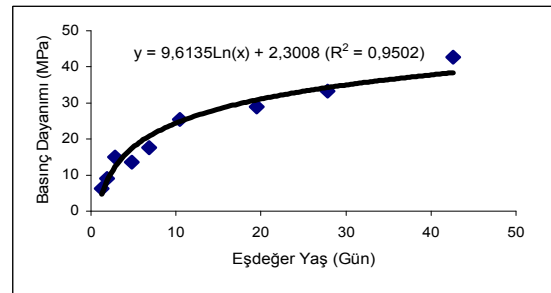
Mineral katkıli çimento için aktivasyon enerjisi değerleri incelendiğinde, beklenen değerlerden düşük olduğu gözlenmiştir. Portland çimentosunun mineral katkı ile yer değiştirilmesiyle elde edilen katkıli çimentolar için aktivasyon enerjisinin yüksek çıkması gerekmektedir. Eldeki verilerin analizleri sonucunda bulunan aktivasyon enerjisi değerlerinin gerçeği yansıtmadığını söyleyebiliriz.

Tablo 7'de belirtilen eşdeğer yaş fonksiyonları kullanılarak katkı tipine göre eşdeğer yaş-dayanım ilişkileri Şekil 12-Şekil 14'te gösterilmiştir. Her şekil üzerinde eşdeğer yaş-dayanım ilişkisini veren denklem ve regresyon katsayısı değerleri bulunmaktadır. Şekiller incelendiğinde, R<sup>2</sup> değerlerinin aslında yüksek olduğu görülmektedir. Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunda olduğu gibi, eşdeğer yaş fonksiyonunun bu haliyle mineral katkıli çimentolar için kullanılması uygun olmayacaktır.

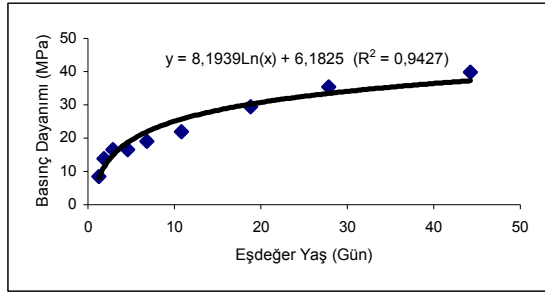
Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu için farklı bakım sıcaklıklarının olgunluk-dayanım ilişkisine etkisi, benzer şekilde, eşdeğer yaş-dayanım için de incelen-



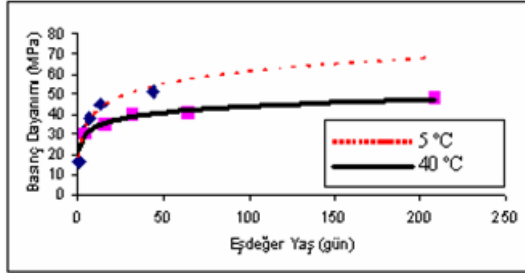
**Şekil 12.** PÇ ile üretilen harçların eşdeğer yaş-dayanım ilişkisi (Equivalent age-strength relationship in Portland cement mortar)



**Şekil 13.** PZÇ ile üretilen betonların eşdeğer yaş-dayanım ilişkisi (Equivalent age-strength relationship in PZÇ)



Şekil 14. PKÇ ile üretilen betonların eşdeğer yaş-dayanım ilişkisi (Equivalent age-strength relationship in PKÇ)



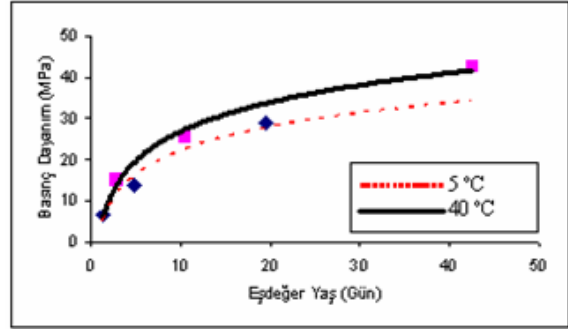
Şekil 15. PÇ ile üretilen harçlarda bakım sıcaklığının eşdeğer yaş-dayanım ilişkisine etkisi (The effect of curing temperature on Equivalent age-strength relationship in Portland cement mortar)

miştir. 5°C ve 40°C'de bakımı yapılmış çimentoların eşdeğer yaş-dayanım ilişkisi Şekil 15-Şekil 17'de gösterilmiştir. Grafikler incelendiğinde, eşdeğer yaş-dayanım ilişkileri olgunluk-dayanım ilişkileri ile benzer davranışı göstermiştir.

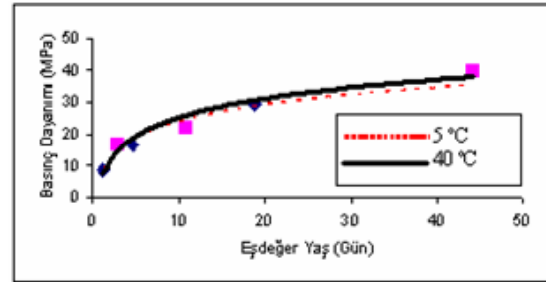
#### 4. TARTIŞMA VE SONUÇ (DISCUSSION AND RESULT)

Çalışmanın sonunda elde edilen verilerin ışığı altında aşağıdaki sonuçlara varmak mümkündür:

1. Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu, hesaplanan temel alınan sıcaklık  $T_0$  değerleri açısından ele alındığında, mineral katkıli çimentolar için uygun sonuçlar vermemiştir. Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunun bu haliyle mineral katkıli çimentolar için kullanılması doğru olmayacaktır.
2. Mineral katkıli çimentolarla üretilen numuneler için, yüksek bakım sıcaklıkları için yüksek, düşük bakım sıcaklıkları için düşük olgunluk-dayanım ilişkisi görülmüştür. Portland çimentosu için yapılan değerlendirmede, literatürlerde belirtilenin aksine, düşük bakım sıcaklıkları için yüksek, yüksek bakım sıcaklıkları için düşük olgunluk-dayanım ilişkisi görülmüştür.
3. Aktivasyon enerjisi değerleri, mineral katkıli çimentolar için katkı oranı arttıkça, artması beklenirken azalmıştır. Aktivasyon enerjisi değerleri Portland çimentosu dışında beklenen düzeyde değildir.
4. Eşdeğer yaş-dayanım ilişkisinde yüksek korelasyon değerleri ( $R^2$ ) elde edilmesine rağmen, aktivasyon enerjisi değerleri gerçeği yansıtmadı-



Şekil 16. PZÇ ile üretilen betonların bakım sıcaklığının eşdeğer yaş-dayanım ilişkisine etkisi (The effect of curing temperature on Equivalent age-strength relationship in PZÇ)



Şekil 17. PKÇ ile üretilen betonların bakım sıcaklığının eşdeğer yaş-dayanım ilişkisine etkisi (The effect of curing temperature on Equivalent age-strength relationship in PKÇ)

ğandan, erken yaşlarda dayanımı tahmin etmede eşdeğer yaş fonksiyonunun bu şekliyle kullanılması uygun olmayacaktır.

5. Eşdeğer yaş fonksiyonu, Nurse-Saul fonksiyonunda olduğu gibi düşük ve yüksek bakım sıcaklıkları için benzer davranışı göstermiştir.

Yapılan çalışmanın sonucunda şu öneriler konunun daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır:

1. Çalışmada kullanılan mineral katkıli çimento çeşidinin artırılması, bakım koşullarının farklı sıcaklık ve nem oranları için de uygulanması, çimentonun inceliğinin ve kimyasal kompozisyonunun olgunluk üzerine etkisinin incelenmesi, önerilen fonksiyonların daha güvenilir sonuçlar verecek şekilde geliştirilmesine yardımcı olacaktır.
2. Günümüzde, maturity-meter olarak bilinen olgunluk ölçerler, bünyesinde bulunan Nurse-Saul olgunluk fonksiyonunu veya eşdeğer yaş fonksiyonunu kullanarak, taze betonun erken yaşlarda dayanımını tahmin etmektedir. Cihazın kabul ettiği temel alınan sıcaklık ( $T_0$ ) veya aktivasyon enerjisi (E) değerleri sabit alınmakta olup gerçekte çimento tipine göre farklılık göstermektedir. Bu nedenle cihazın sonuçlarına güvenilmemesi uygun olacaktır.

#### SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

- A : Olgunluk-dayanım eğrisinin başlangıç eğimi  
a ve b : Regresyon katsayıları



|                |   |
|----------------|---|
| E              | : Görünür aktivasyon enerjisi (J/mol)                     |
| f(S)           | : Dayanım fonksiyonu                                      |
| k(T)           | : Sıcaklık fonksiyonu                                     |
| k <sub>T</sub> | : Hız sabiti  |
| M              | : Olgunluk indeksi (°C-gün veya °C-saat)                  |
| M <sub>0</sub> | : Başlangıç olgunluk değeri                               |
| R              | : Evrensel gaz sabiti (8.314 J/mol-°K)                    |
| S              | : Basınç dayanımı   |
| S <sub>U</sub> | : Olgunluk sonsuza giderken sınır dayanım                 |
| T              | : Δt zaman aralığında ortalama beton sıcaklığı (°C)       |
| T <sub>r</sub> | : Referans sıcaklığı (Kelvin)                             |
| T <sub>0</sub> | : Temel alınan sıcaklık (°C)                              |
| T*             | : Δt zaman aralığında ortalama beton sıcaklığı (Kelvin)   |
| t              | : Zaman (gün veya saat)                                   |
| t <sub>c</sub> | : Referans sıcaklıktaki eşdeğer yaş                       |
| t <sub>0</sub> | : Dayanım kazanmaya başladığı andaki yaş                  |
| Δt             | : Beton sıcaklığının T °C'de kaldığı süre (gün veya saat) |

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu çalışma, Balıkesir Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. 2004/05 kod numaralı "Betona Hasar Vermeden Erken Yaşlarda Dayanımını Tayin Etmede Yeni Bir Yöntem Geliştirilmesi" başlıklı Araştırma Projesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'nin 21.02.2008 tarih ve 2008/65 sayılı toplantısında kabul edilmiştir. Teşekkür ederiz.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Carino, N. J., "Maturity Method: Theory and Application", **Journal of Cement, Concrete and Aggregates**, ASTM, V.6, No.2, Winter, 61-73, 1984.
2. Saul, A.G. A., "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure", **Magazine of Concrete Research**, V.2, No.6, 127-140, 1951.
3. Nurse, R. W., "Steam Curing of Concrete", **Magazine of Concrete Research**, V.1, No.2, 79-88, 1949.
4. McIntosh, J. D., "Electrical Curing of Concrete", **Magazine of Concrete Research**, V.1, No.1, 21-28, 1949.
5. Carino, N. J. and Lew, H. S., **The Maturity Method: From Theory to Application**, Building and Fire Research Laboratory, NIST, 2002.
6. Bergstrom, S. G. "Curing Temperature, Age and Strength of Concrete", **Magazine of Concrete Research**, V.5, No.4, 61-66, 1953.
7. Anonymous, "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", (ASTM C 1074-87), **Annual Book of ASTM Standards**, V.04.02, 541-547, 1993.
8. Alexander, K. M., and Taplin, J. H., "Concrete Strength, Cement Hydration and the Maturity

- Rule", **Australian Journal Applied Science**, V.13, 277-284, 1962.
9. Malhotra, V. M., "Maturity Concept and the Estimation of Concrete Strength", **Information Circular IC 277**, Department of Energy, Mines and Resources (Canada), Mines Branch, 1971.
10. Carino, N. J., Lew, H. S. and Volz, C. K., "Early Age Temperature Effects on Concrete Prediction by the Maturity Method", **ACI Journal**, Proceedings V.80, No.2, 93-101, 1983.
11. Parsons T. J., and Naik, T. R., "Early Age Concrete Strength Determination by Maturity", **Concrete International: Design and Construction**, V.7 No.2, 37-43, 1985.
12. Freiesleben Hansen, P., and Pedersen, J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete", **Nordisk Betong**, V.21, 19-34, 1977.
13. Kjellsen O. K. and Detwiler R. J., "Later-Age Strength Prediction by a Modified Maturity Model", **ACI Material Journal**, V.90, No.3, 220-227, 1993.
14. Jonasson, J.,E., "Early Strength Growth in Concrete-Preliminary Test Results Concerning Hardening at Elevated Temperatures", **The 3<sup>rd</sup> RILEM Symposium on Winter Concreting**, Espoo, Finland, 249-254, 1985.
15. Kim, J. K., Moon, Y. H., and Eo, S. H., "Compressive Strength Development of Concrete with Different Curing Time and Temperature" **Cement and Concrete Research**, V.28, No.12, 1761-1773, 1988.
16. Volz, Charles K.; Tucker, Richard L.; Burns, Ned H.; and Lew, H. S., "Maturity Effects on Concrete Strength", **Cement and Concrete Research**, V.11, No.1, 41-50, 1981.
17. Oluokun, F. A., Burdette, E. G. and Deatherage, J. H., "Early-Age Concrete Strength Prediction by Maturity-Another Look", **ACI Material Journal**, V.87, No.6, 565-572, 1990.
18. Carino, N. J., "Maturity Functions for Concrete", **Proceedings of RILEM International Conference on Concrete at Early Age**, Paris, 123-128, 1982.
19. Jalali, S. "New Developments in Maturity Method for the Prediction of Strength Gain of Concrete", **Proceeding of the XI European Ready Mixed Concrete Congress**, İstanbul-Türkiye, 481-488, June 1995.
20. Bernhardt, C. J., "Hardening of the Concrete at Different Temperatures", **RILEM Symposium on Winter Concreting**, Copenhagen, Danish Institute for Building Research, Session B-II, 1956.
21. Plowman, J. M., "Maturity and the Strength of Concrete" **Magazine of Concrete Research**, V.8, No.22, 13-22, 1956.
22. Kee, C. F., "Relation between Strength and Maturity of Concrete", **ACI Journal**, Proceedings V.68, No.3, 196-203, 1971.

23. Carino, N. J. and Lew, H. S., "Temperature Effects on Strength Maturity Relations of Mortars", **ACI Journal**, Proceedings, V.80, No.2, 177-182, 1983.
24. Knudsen, T., "The Dispersion Model for Hydration of Portland Cement: 1. General Concept", **Cement and Concrete Research**, V.14, 622-630, 1984.
25. Yılmaz, A., **Çimentolu Sistemlerin Olgunluğu**, Doktora Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2004.
26. Topçu, İ. B., Karakurt, C. "Farklı Çimentolar ile Üretilen Betonlarda Olgunluk Kavramı", **ECAS2002, Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu**, Ankara, Türkiye, 477-484, 14 Ekim 2002.
27. Kasap, Ö., Tokyay, M., "Betonun Eşdeğer Yaşının Çimento Hidratasyon Isısıyla Tahini İçin Bir Yöntem", **İMO Teknik Dergi**, Ankara, Türkiye, 3215-3227, 2004.
28. Anonim, **TS24 Türk Standartları** "Çimentoların Fiziki ve Mekanik Deneyleri", 1995.