

Farklı Çimentolar ile Üretilen Betonlarda Olgunluk Kavramı

İlker Bekir Topçu, Cenk Karakurt

Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 26480 Eskişehir, Türkiye

ÖZET: Olgunluk kavramı temel olarak betonun dayanım kazanmasında rol oynayan birleşik faktörlerden ısı zaman ilişkisinin belirlenmesine dayanan bir yöntemdir. Bu yöntem inşaat sırasında yerine yerleştirilmiş betonun gelecekteki dayanımı hakkında güvenilir bir yaklaşım yapabilmemizi sağlamaktadır. Betonun sertleşme durumunu belirleyen bir faktör olarak olgunluk derecesi, beton dayanımının tahmininde hasarsız denetleme yöntemi olarak kullanılmaktadır. Kalıp sökümünün uygun olup olmadığının yeterliliği, bilimsel ve pratik olmak üzere iki kısma ayrılmaktadır. Bilimsel göstergelerin en önemlisi hidrasyon derecesi, pratik göstergelerin en önemlisi ise dayanımın değişik yöntemlerle belirlenmesidir. Makalede yapılan deneysel çalışmalar ASTM C1074 standardı dikkate alınarak yapılmış ve değerlendirmeye tabi tutulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Olgunluk; Sıcaklık; Aktivasyon enerjisi; Basınç dayanımı.

ABSTRACT: The maturity method is a technique to account the combined effects of time and temperature on the strength development of concrete. The method provides a relatively simple approach for making reliable estimates of in-place strength during construction. Maturity degree, which is a factor of, become hardness of concrete; can be used as a nondestructive method to estimate concrete strength. The adequate of demolding concrete is suitable or not, there has two different indicators like scientific and practical indicators. The most important one of scientific indicator is hydration degree otherwise the most important one of practical indicator is to estimate the strength of concrete with various methods. In this paper the experimental studies have made and analysed with ASTM C 1074 standard properties.

Keywords: Maturity; Temperature; Activation energy; Compressive strength.

Giriş

Olgunluk yönteminin temeli betonda çimentonun hidrasyonu için gerekli olan nem koşullarının sağlandığı kür ortamında ölçülen sıcaklık geçmişine dayanmaktadır. Burada sıcaklık geçmişi olgunluk indeksi olarak adlandırılan niceliğin hesabı için kullanılmaktadır. Yeni dökülen beton, ısı açığa çıkaran kimyasal reaksiyonlar sonucunda dayanım kazanır. Olgunluk yöntemi, dayanım gelişiminde sıcaklık ve zaman etkilerini hesaba katan bir yöntemdir. Olgunluk yöntemini kullanabilmek için yapıda kullanılacak betonun dayanım-olgunluk ilişkisi bilinmelidir. Yerine dökülen betonun sıcaklık geçmişi sürekli gözlemlenerek olgunluk hesaplanabilir. Yerinde olgunluk ve dayanım-

olgunluk ilişkisini bilmekle yapı yerindeki dayanım tahmin edilebilir. Aynı beton numuneleri farklı iyileştirici koşullar altında bekletilirse, beton ve numunelerin termik geçmişi için dayanım-olgunluk ilişkileriyle dayanım tahminleri yapılabilir. Beton dayanımının hesaplanması ile kalıp alma süresi hakkında gerçekçi bilgiler elde edilebilmektedir. Yapıdaki beton dayanımı gerçeğe en yakın şekilde alınacak karot numuneleri sayesinde belirlenebilir. Ancak erken yaşta sahip betondan karot numunesi almak çok zordur. Bu nedenle kalıp sökme süresini belirlemek amacıyla çeşitli hasarsız yöntemler kullanılarak betonun dayanımı hakkında fikir edinilir (Topçu, 2002 a ve b).

Betonun dayanım kazanmasını etkileyen faktörler arasında süre ve sıcaklık önemli bir yer tutmaktadır. Bu faktörlerin dışında su-çimento oranı, çimento türü ve dozajı, dış ortam nemi gibi faktörler de dikkate alınmalıdır. Olgunluk derecesi beton dayanımının tahmininde hasarsız bir denetleme yöntemidir. Burada öncelikle erken yaş, sonraki yaş, iç sıcaklık, çevre sıcaklığı kavramlarının anlaşılması gerekmektedir. Erken yaş dökümü izleyen ilk 7 saattir. Erken yaşta çimentonun hidrasyonu nedeniyle hidrasyon ısısı oluşur. Olgunluk üzerinde hidrasyon ısısı iç sıcaklığı artırdığı için etkili olmaktadır. Sonraki yaşlarda çevre koşulları olgunluk üzerinde daha etkilidir.

Olgunluk yöntemiyle beton dayanımının belirlenmesi çalışmaları 20. yüzyılın başlarına kadar uzanmaktadır. Pek çok araştırmacı bu yöntemi tanımlamaya ve kullanmaya çalışmıştır. Bu araştırmacılardan Mc Daniel 1915 yılında yaptığı bir çalışmada -3, 1.5, 22 ve 33 °C'de 2 gün sakladığı numuneleri dondurmuş daha sonra 3, 7, 10, 14 ve 28. günlerde dondan çözülmüş olarak deneye tabi tutmuştur. Mc Intosh elektrik akımı ile betonu ısıtmak problemini ele aldığı ilk defa "Basic Age" sözcüğü kullanılmıştır. Bu esas yaş kavramında başlangıç sıcaklığı yaklaşık 30 °F (0 °C) olarak gösterilmekte ve esas yaş (°F × saat) olarak ifade edilmektedir (Mc Intosh, 1949). Nurse düşük basınçta betonun buhar küre problemi için aşağıdaki formüldeki gibi zaman×sıcaklık çarpımını kullanmış ve 3 günlük basınç dayanımı ile bu çarpım arasında matematiksel bağıntının varlığını belirlemiştir (Carino, 2001).

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

Bu formülde; M olgunluk indeksi, (°C-saat yada °C-gün), T Δt zaman aralığındaki ortalama beton sıcaklığı (°C), T_0 başlangıç sıcaklığı (-10°C olarak alınır), t geçen zaman (gün yada saat), ve Δt zaman aralığı (gün yada saat) olarak tanımlanmıştır (Saul, 1951). Burada (1) numaralı denklem ile hesaplanan indeks olgunluk olarak adlandırılmış, bununla beraber günümüzde terminolojik olarak sıcaklık-zaman faktörü olarak da anılmaktadır (ASTM C 1074). Bu denklemin sunumundan çok geçmeden bu doğrusal yaklaşımın betonun kür sıcaklığının geniş bir aralıkta değişime uğradığında uygun olmayacağı görüldü.

Betonun kaydedilen sıcaklık geçmişinden olgunluk indeksini hesaplamak amacıyla 1977 yılında Hansen ve Pedersen yeni bir fonksiyon önermişler ve sıcaklığın kimyasal reaksiyona olan etkisinin açıklanması amacıyla kullanılan Arrhenius denklemini temel almışlardır. Bu yeni fonksiyon sayesinde betonun eşdeğer yaşının bulunması sağlanmıştır. Bu formülde; t_e ilgili sıcaklıktaki eşdeğer yaş, E gözle görülür aktivasyon enerjisi (J/mol), R genel gaz sabiti (8.314 J/mol-K), T Δt zaman

aralığındaki Kelvin cinsinden ortalama kesin beton sıcaklığı ve T_r Kelvin cinsinden mutlak sıcaklık olarak tanımlanmıştır.

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

Bu fonksiyonun sunumuyla Nurse-Saul fonksiyonunun başlıca sınırlaması ortadan kalkmıştır, çünkü bu fonksiyon birincil dayanım gelişimi ile kür sıcaklığı arasında doğrusal olmayan bir ilişkinin kurulabilmesine olanak vermektedir. Sıcaklık bağılılığı burada belirli aktivasyon enerjisi E ile ifade edilmiştir (Carino, 2001). Karşılaştırmalı çalışmalar sonucunda bu yeni olgunluk fonksiyonunun Nurse-Saul fonksiyonundan daha üstün olduğunu göstermiştir. Yeni önerilen (2) numaralı fonksiyon sayesinde farklı başlangıç sıcaklıklarında dayanım-olgunluk ilişkisiyle ilgili çelişkiler çoğunlukla ortadan kalkmıştır. Bununla birlikte yeni fonksiyon erken yaştaki beton sıcaklığının ileri yaşlardaki beton dayanımına olan etkilerinin hesabına olanak verememiştir.

Olgunluk Kavramı

Yeni dökülen bir beton ısı açığa çıkaran kimyasal reaksiyonlar sonucu dayanım kazanır. Beton ısısının artışı, reaksiyon hızını artırır. Çimento cinsi, miktarı, inceliği hidrasyon reaksiyonunu etkiler. Yerleşmiş betonun sıcaklık geçmişi sürekli olarak gözlemlenir ve bu verilerden olgunluk hesaplanır. Yerinde olgunluk ve dayanım-olgunluk ilişkisini bilmekle yapıda kullanılan betonun dayanımı tahmin edilebilir. Olgunluğu otomatik olarak hesaplayan aletlerde bulunmaktadır. Ancak bu aletler kullanılırken, alet tarafından kullanılan olgunluk fonksiyonu yapıda kullanılan betona uygun olmayabileceği için dikkatli olunmalıdır. Konuyla ilgili olarak ASTM C 1074’de olgunluk yönteminin kullanma teknikleri verilmekte, betonun kaydedilen sıcaklık geçmişinden sıcaklık-zaman faktörlerinin yada eşdeğer dönemin nasıl hesaplanacağı belirtilmektedir (Akman, 2001).

Olgunluk yöntemi daha çok inşaat sırasında betonun dayanım kazanmasının gözlenmesi amacıyla kullanılır. Bu yüzden ileri yaşlar için kesin bir dayanım modeli oluşturulması gerekli değildir. Doğrusal hiperbolik model 28 günlük eşdeğer yaşa kadar dayanım verilerinin analizi ve sabit oran ile kür sıcaklığında meydana gelecek değişimin belirlenmesi için uygundur. Knudsen (1980) hidrasyonun % 85’inin gerçekleştiği dereceye kadar doğrusal hiperbolik modelin uygun olacağını önermektedir. Dayanım-olgunluk ilişkisiyle ilgili olan en popüler denklemlerden birisi de Plowman (1956) tarafından önerilen aşağıdaki logaritmik denklemdir (Akman, 2001).

$$S = a + b \log(M) \quad (3)$$

Bu denklemde, a $M=1$ olan olgunluk indeksi için dayanım; b doğrunun eğimini ve M olgunluk indeksini ifade etmektedir. (3) numaralı denklem basit olması nedeniyle oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Olgunluk indeksi eksenini logaritmik ölçekte alındığında çizilen grafik yatık ve düzgün bir doğru olmaktadır. Bu eğri bize dayanımın olgunluk indeksindeki artışa paralel olarak artacağını önceden göstermektedir, burada herhangi bir sınır dayanım yoktur. Gerçekten de doğrunun eğimi olan b olgunluk indeksindeki her on katlık artış için olan dayanım artışını ifade etmektedir.

Deneysel Çalışma

Bu araştırmada temel deneysel çalışmalar ASTM C 1074 standardına uygun olarak yapılmıştır. Çalışmada iki farklı cins çimento için sabit karışım oranında ve sabit su-çimento oranındaki olgunluk-dayanım ilişkileri incelenmiştir. Deney için hazırlanacak beton karışımında çimento olarak PKÇ/B 32.5R ve PÇ 42.5 tipi çimentolar kullanılmış olup numuneler 400 kg/m^3 sabit çimento dozajı ve 0.57 su-çimento oranında üretilmiştir. Numuneler üç farklı kür sıcaklığı, iki farklı çimento, 1, 3, 7 ve 28 günlük dört farklı sürede saklanacağından ve her karakteristik ortam ve karışım koşulu için 3 farklı silindir numune üretileceğinden bu deneyde toplam 72 adet silindir numune üretilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan silindir numuneler ASTM standardı dikkate alınarak hazırlanmış ve saklanmıştır (ASTM C 192). Üretimin ardından $\phi 15 \times 30$ cm boyutlarındaki silindirik kalıplara yerleştirilen betonun içine Maturity Meter M-3056 sıcaklık kayıt cihazının termokopulları kalıbın tam merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiş ve bir gün sonra kalıpları sökülüp kür havuzunda ilgili sıcaklıkta saklanmıştır. Bu çalışmada kullanılan üç farklı ortam sıcaklığından 40 ve 23 °C'lik ortam sıcaklıkları kür havuzunda, 0 °C'lik ortam sıcaklığı ise soğutucu dolap ile sağlanmıştır. Kür ortamından çıkarılan numunelere sırasıyla hasarsız deneylerden rezonans frekansı, ultrases hızı ve basınç dayanımı deneyleri uygulanmış, daha sonra (1) numaralı denklem kullanılarak dayanım olgunluk ilişkisi her koşul için çıkarılarak analiz edilmiştir (Karakurt, 2002).

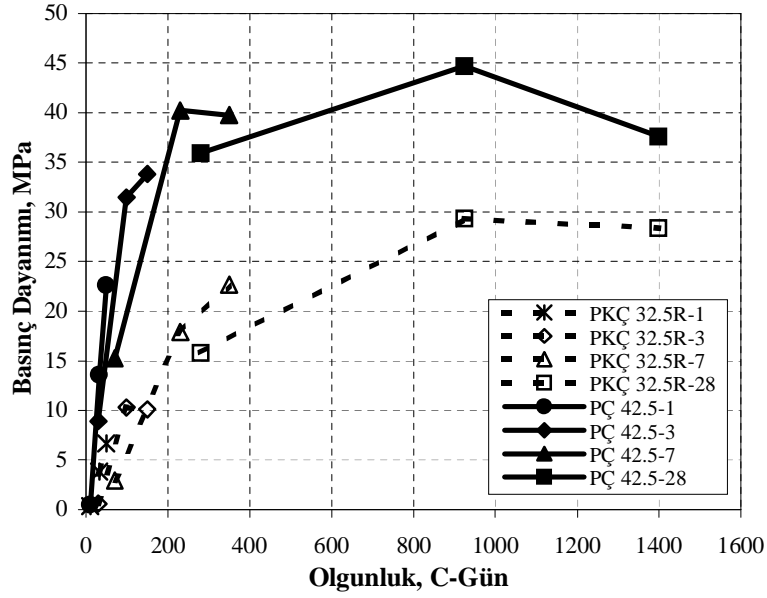
Deney Sonuçlarının Değerlendirilmesi

İki farklı cins çimento ile üretilen toplam 72 adet numune üzerinde laboratuvar koşullarında hasarlı ve hasarsız deneyler uygulanmıştır. Bu deneylerin sonucunda elde edilen dayanım-olgunluk ilişkileri aşağıda çizelge ve şekiller ile ifade edilmiştir.

Nurse-Saul fonksiyonuna göre analiz edilen verilere göre numunelerin basınç dayanımı ile doğrusal olgunluk arasındaki ilişki Şekil 1'de gösterilmiştir. Buradaki şekle göre verilerin regresyon analizi sonunda elde edilen doğrusal denklemin katsayıları ve korelasyon katsayıları Çizelge 1'de özet halinde sunulmuştur. Bu sonuçlara göre her iki çimento cinsinde de ilk gün dayanımlarının doğrusal olarak dayanım kazandığı söylenebilir. Ancak yüksek olgunluk değerlerinde son dayanımlarda azalma gözlenmiştir. Bu azalmanın nedeni ise betonda bozunum etkisi olarak adlandırılan olayın meydana gelmesidir. Olgunluk indeksinin eşit olduğu değerler için erken yaş sıcaklığı yüksek olan beton numunelerde yüksek birincil dayanımlar ve düşük son dönem dayanımları gözlenebilmektedir (Carino, 2001).

Çizelge 1. Doğrusal Basınç Dayanımı-Olgunluk İlişkisi $y=ax+b$

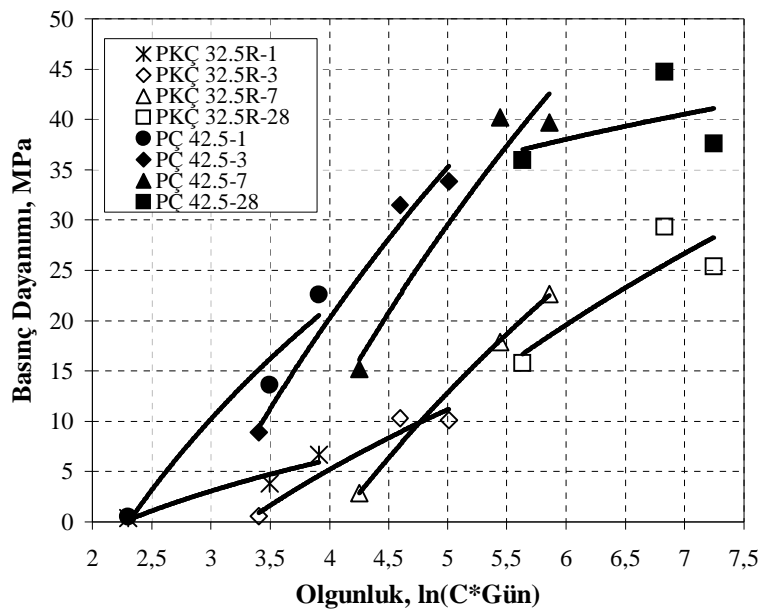
Çimento Cinsi	Gün	a	b	R ²	Çimento Cinsi	Gün	a	b	R ²
PÇ 42.5	1	0.553	-4.91	0.999	PKÇ/B 32.5R	1	0.156	-1.22	0.998
	3	0.215	4.763	0.881		3	0.083	-0.73	0.806
	7	0.091	11.90	0.807		7	0.072	-1.12	0.959
	28	0.002	37	0.068		28	0.012	14.27	0.768



Şekil 1. Dayanım-Olgunluk İlişkisi

Çizelge 2. Basınç Dayanımı-Logaritmik Olgunluk İlişkisi $y=c \ln x+b$

Çimento Cinsi	Gün	c	b	R ²	Çimento Cinsi	Gün	c	b	R ²
PÇ 42.5	1	38.837	-32.43	0.955	PKÇ/B 32.5R	1	10.829	-8.83	0.929
	3	67.225	-72.97	0.984		3	26.671	-31.76	0.946
	7	82.507	-103.3	0.945		7	61.258	-85.76	0.999
	28	16.202	8.99	0.208		28	46.103	-63.02	0.756



Şekil 2. Dayanım-Logaritmik Olgunluk İlişkisi

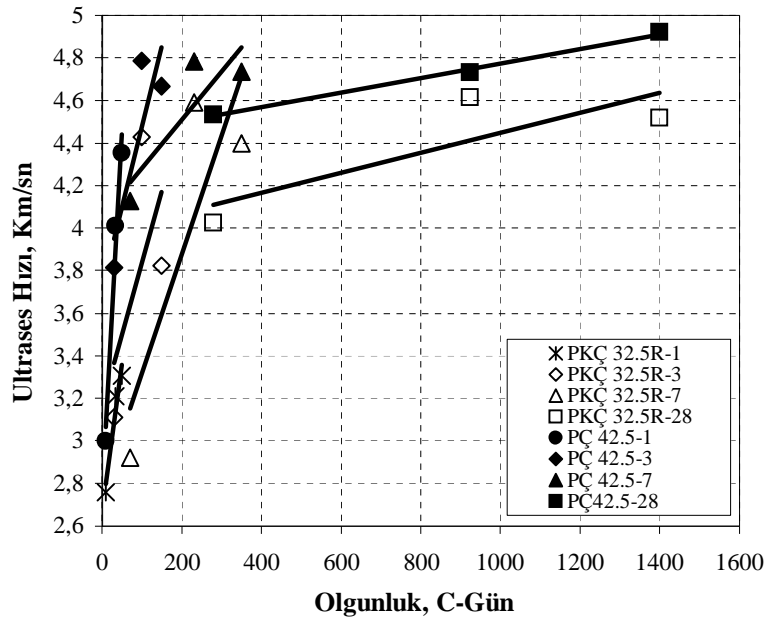
Çizelge 3. Ultrases Hızı-Olgunluk İlişkisi $y=ax+b$

Çimento Cinsi	Gün	a	b	R ²	Çimento Cinsi	Gün	a	b	R ²
PÇ 42.5	1	0.0344	2.721	0.964	PKÇ/B 32.5R	1	0.0141	2.656	0.928
	3	0.0075	3.722	0.728		3	0.0067	3.165	0.373
	7	0.0023	4.054	0.768		7	0.0056	2.762	0.733
	28	0.0003	4.433	0.994		28	0.0005	3.978	0.695

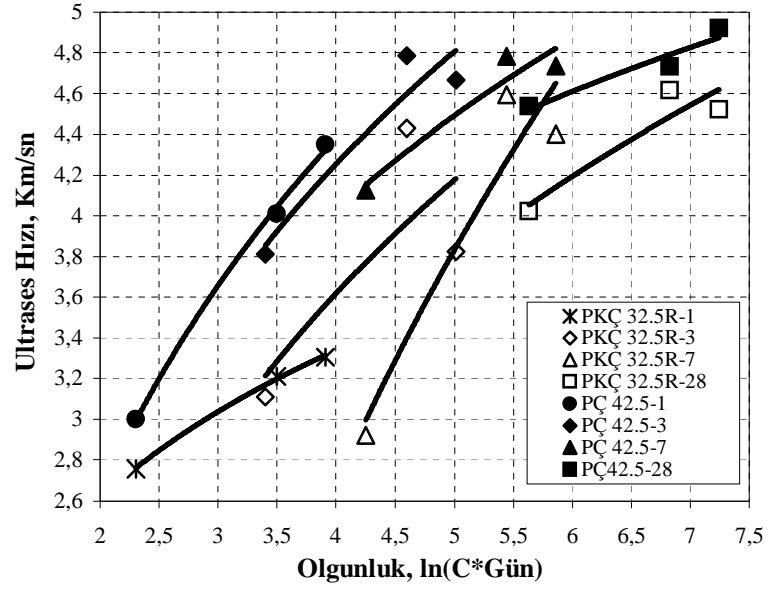
Bir başka deyişle yüksek sıcaklıklarda uzun süre küre tabii tutulmuş betonların ilk dayanımları yüksek ancak son dayanımları düşük çıkmaktadır. Bu davranış biçimi Şekil 1'de grafik halinde gösterilmiştir. Yapılmış olan regrasyon analizinde de 28. günde güvenilirlikten uzaklaşan bir sonuç gözlenmiştir. Basınç dayanımı ile olgunluk arasındaki ilişki şekil 2'deki gibi logaritmik olarak incelendiğinde ise her iki çimento cinsiyle de üretilen beton numunelerinin dayanım gelişiminin daha güvenilir olarak gelişim sergilediği Çizelge 2'deki regrasyon katsayılarından görülmektedir. Zaten bilim adamlarının önerdiği olgunluk fonksiyonları genellikle logaritmik tabanlıdır.

Çizelge 4. Ultrases Hızı-Logaritmik Olgunluk İlişkisi $y=c \ln x+b$

Çimento Cinsi	Gün	c	b	R ²	Çimento Cinsi	Gün	c	b	R ²
PÇ 42.5	1	2.516	0.894	0.998	PKÇ/B 32.5R	1	1.048	1.886	0.998
	3	2.472	0.828	0.897		3	2.504	0.147	0.594
	7	2.079	1.146	0.921		7	5.148	-4.452	0.897
	28	1.404	2.093	0.92		28	2.249	0.165	0.866



Şekil 3. Ultrases Hızı-Logaritmik Olgunluk İlişkisi



Şekil 4. Ultrases Hızı-Olgunluk İlişkisi

Hazırlanmış olan beton numunelerine hasarsız denetleme yöntemlerinden olan ultrases deneyi de uygulanmış olup olgunluk ile ultrases hızı arasındaki ilişki Şekil 3-4 ve Çizelge 3-4'te gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre yapılan regrasyon analizlerinde de logaritmik bir ilişkinin olgunluk ile ultrases hızı arasında yüksek bir güvenlik derecesinde gözlemlendiği görülmektedir.

Sonuç ve Öneriler

Yapılan deneysel çalışmalardan betonun dayanım kazanma hızının ortam sıcaklığı ile doğrudan ilişkili olduğu gözlenmiş olup düşük sıcaklıklara karşılık gelen olgunluk derecelerinde özellikle PKÇ 32.5R tipi çimentonun PÇ 42.5 tipi çimentoya oranla çok daha yavaş dayanım kazandığı gözlenmiştir. Bunun yanında yüksek ilk sıcaklıklarda saklanmış olan beton numunelerinin ise hızlı bir dayanım gelişimi gösterdiği ancak bu betonların son dayanımlarının normal koşullarda saklanan betonlara oranla düşük çıktığı görülmüştür. Olgunluk yöntemi sayesinde aynı karışıma sahip betonun kullanılacağı inşaatlarda yerine yerleşmiş olan betonun hava koşullarına göre nasıl bir dayanım gelişimi sergileyeceği belirlenebilir. Böylece kötü hava koşullarında dökülen betonların kalıp alma süreleri de bu yöntem sayesinde belirlenebilir ve erken kalıp alınması nedeniyle ortaya çıkabilecek tehlikeli yapısal hasarlarında önüne geçilmiş olur. Hasarsız olarak betonun dayanım tahminini yapabilen bu yöntem 28 güne kadar olan betonların dayanımları hakkında bilgi sahibi olmamızı sağlamaktadır. Yapıda yerine yerleşmiş betonu hasarsız bir biçimde denetleme olanağını sağlayan olgunluk yöntemini kullanırken dikkatli olunmalıdır. Günümüzde Maturity Meter olarak adlandırılan olgunluk ölçer cihazlar bulunmaktadır. Bu cihazlar yapıdaki betonun sıcaklık geçmişini kayıt altına alarak bünyesinde bulundurduğu olgunluk fonksiyonu ile dayanım tahmini yapabilmektedir. Ancak bu cihazlar kullanılırken yapıda kullanılmış beton ile cihazın kullandığı olgunluk fonksiyonu arasındaki karakteristik uyumun bulunmasına dikkat edilmelidir.

Referanslar

Akman A., 2001, "Farklı Çimentolu Harçlarda Olgunluk Kavramı ve Kalıp Sökme Sürelerinin Belirlenmesi", *YL Tezi*, Osmangazi Üniv., Fen Bilimleri Ens., Eskişehir.

ASTM C 1074, 1987, "Standart Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", *ASTM Standards*, V. 04. 02, ASTM, Philadelphia.

ASTM C 192, 1990, "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory", *ASTM Standards*, V. 15. 09, ASTM, Philadelphia.

Carino, N.J., 1991, "The Maturity Method", *In Handbook of Nondestructive Testing of Concrete*, Eds. V.M. Malhotra and N.J. Carino, Boca Raton, FL, pp. 101-146.

Carino, N. J. and Tank R.C., 1992, "Maturity Functions for Concretes Made with Various Cements and Admixtures", *ACI Materials Journal*, V. 89, No. 2, pp. 188-196.

Carino, N.J. and Lew, H.S., 2001, "The Maturity Method: From Theory To Application", *Reprinted from the Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition, Washington D.C.*, ASCE, Reston, Virginia, 19 p.

Hudson, S.B. and Steel, G.W., "Developments in the Prediction of Potential Strength from Results of Early Tests", *Trans. Res. Rec. 558, Trans. Res. Board*, pp. 1-12.

Karakurt, C., 2002, "Farklı Çimentolu Betonlarda Olgunluk Kavramı", *YL Tezi*, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

Knudsen, T., 1980, "On Particle Size Distribution in Cement Hydration", *Proceedings, Seventh International Congress on the Chemistry of Cement*, Editions Septima, Paris, Vol. II, I-170-175.

Lew, H.S. and Reichard T.W., 1978, "Mechanical Properties of Concrete at Early Ages", *ACI Materials Journal*, Vol. 75, No. 10, pp. 533-542.

Mc Intosh, J.D., 1949, "Electrical Curing of Concrete", *Magazine of Concrete Research*, No. 2, pp. 79-88.

Saul, A.G.A, 1951, "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure", *Magazine of Concrete Research*, Vol. 2, No. 6, pp. 127-140.

Tank, R.C. and Carino, N.J., 1991, "Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete", *ACI Materials of Journal*, Vol. 88, No. 1, pp. 74-83.

Topçu, İ. B. ve Akman, A., 2002, "Betonda Olgunluk Kavramı ve Kalıp Sökme Süreleri", *İMO Eskişehir Bülteni*, Yıl. 6, Sayı. 14, ss. 28-39.

Topçu, İ. B., 2002, "Maturity in Fresh Concrete and Determination of Stripping Time for Different Cement Mortars", 17th International Congress of the Precast Concrete Industry (BIBM 2002), İstanbul.