

PUZOLAN KATKILI ÇİMENTOLARIN BETON OLGUNLUĞUNA ETKİSİ

Arın YILMAZ

Balıkesir Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Çağış Kampusu/Balıkesir

Geliş Tarihi : 04.03.2004

ÖZET

Olgunluk kavramı, betonda sıcaklık ve zamanın ortak etkisini ele alarak betonun dayanımını tahmin eden bir yöntemdir. Olgunluk kavramına göre, aynı olgunluk değerine sahip beton numuneleri, hangi sıcaklık ve zamanın ortak etkisine sahip olursa olsun, aynı dayanıma sahiptirler. Geçmiş 50 yıl içinde birçok olgunluk fonksiyonu önerilmiştir. Bu fonksiyonların geçerliliği yalnızca genel Portland çimentoları içindir. Bu çalışmada, kabul görmüş olgunluk fonksiyonlarının puzolan katkılı çimentolar için uygunluğu araştırılmış ve yeni bir olgunluk-dayanım ilişkisi geliştirilmiştir. Bu amaçla, dört tip puzolan ve bir adet Portland çimentosu seçilmiştir. Katkılı çimentolar, % 5, % 20 ve % 40 oranlarında çimento ile ağırlıkça yer değiştirerek oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler : Olgunluk, Çimento tipi, Basınç dayanımı, Harç

EFFECT OF PORTLAND-POZZOLAN CEMENTS ON CONCRETE MATURITY

ABSTRACT

The maturity concept expressed by the combined effect of time and temperature on the concrete is a useful technique for prediction of the strength gain of concrete. According to maturity concept, samples of the same concrete at same maturity whatever combination of temperature and time, have approximately the same strength. Many maturity functions have been proposed for the last 50 years. The validity of these functions are only for ordinary Portland cements. In this study, the suitability of traditional maturity functions for different types of Portland-pozzolan cements were investigated and a new maturity-strength relationship was tried to be established. For this purpose, four different pozzolans and one Portland cement was selected. Portland-pozzolan cements were prepared by using three different replacement amounts of % 5, % 20 and 40 % by weight of cement.

Key Words : Maturity, Cement type, Compressive strength, Mortar

1. GİRİŞ

Beton olgunluğu, dayanım kazanma süresince sıcaklık ve zamanın ortak etkisini ele alan bir kavram olarak, 1950'li yılların başlarında ortaya atılmıştır (Saul, 1951; Plowman, 1956; Kee, 1971). Bu yöntemde, betonun dayanım kazanma sürecindeki sıcaklık değişimi olgunluk fonksiyonu yardımı ile sayısal bir indekse çevrilir. Olgunluk

indeksi erken yaşlarda betonun dayanımı hakkında fikir sahibi olmayı sağlamaktadır.

Yeni dökülen betonda, çimentonun hidrasyonu sırasında ısı açığa çıkar. Beton ısısının artışı reaksiyon hızını artırır ve zamanla beton dayanım kazanır. Betonun dayanım kazanmasını etkileyen faktörler arasında zaman ve sıcaklık dışında su-çimento oranı, çimento türü, çimento miktarı ve dış etkiler dikkate alınmalıdır. Yerleştirilmiş betonun

sıcaklık değişimi sürekli ölçülerek olgunluk hesaplanır. Olgunluk-dayanım ilişkisinin bilinmesi yapının yerinde dayanımını tahmin etmek için önemlidir.

Betonarme yapılarda yapım sırasında hasarlar oluşmaktadır. Bu hasarların bir çoğu betonun yeterli dayanıma ulaşmadan kalıpların sökülmesinden veya uygulanan yapım yüklerinden ileri gelmektedir. Yapıda en gerçekçi deney yöntemi karot numunelerinin alınmasıdır, fakat bu yöntem erken yaşlarda imkansızdır. Bu yüzden beton dayanımını doğru tahmin etmek için tahribatsız deney yöntemlerine başvurmak gerekmektedir. Yerinde olgunluk ve olgunluk-dayanım ilişkisini bilmekle yapıda kullanılan betonun dayanımı tahmin edilebilir. Betonun olgunluğunu bulan cihazlar mevcuttur. Fakat, cihaz tarafından kullanılan olgunluk fonksiyonunun her tip beton için uygun olup olmadığı araştırılmalıdır. ASTM C 1074'te olgunluk kavramının nasıl hesaplanacağı belirtilmektedir (Anon., 1993).

İlk olgunluk fonksiyonu, farklı yüksek sıcaklıklarda bakımı yapılan betonun dayanım gelişimi üzerindeki zaman ve sıcaklığın etkisi göz önüne alınarak Nurse-Saul tarafından önerilmiştir (Saul, 1951):

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

Burada;

- M : Olgunluk indeksi (°C -gün veya °C -saat),
 T : Δt zaman aralığında ortalama beton sıcaklığı (°C),
 T₀ : Temel alınan sıcaklık (°C),
 Δt : Beton sıcaklığının T °C'de kaldığı süre (gün veya saat),
 t : zaman (gün veya saat) olarak ifade edilir.

Temel alınan sıcaklık betonun dayanım kazanmasının durduğu varsayılan sıcaklıktır. Gelenekselleşmiş T₀ değeri -10 °C olarak kabul görmektedir (Bergstrom, 1953). Temel alınan sıcaklık değerini, betonun oluşturan malzemelerin çeşitliliğinden dolayı genellemek doğru değildir. ASTM C 1074'te temel alınan sıcaklığının deneysel olarak nasıl hesaplandığı belirtilmiştir. 1951 yılında "olgunluk kuralı" olarak bilinen önerme Saul tarafından yapılmıştır (Saul, 1951):

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, 1951).

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 (Bergstrom, 1953).

Malhotra (1971), 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.

Freiesleben and Pedersen (1977) 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.

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

Burada; t_e: Referans sıcaklıktaki eşdeğer yaş, T: Δt zaman aralığında ortalama beton sıcaklığı (°K), E: Görünür aktivasyon enerjisi (J/mol), R: Evrensel gaz sabiti (8.314 J/mol-°K), T_r: Referans sıcaklığı (°K), olarak ifade edilir.

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 ise önemli bir dezavantaj ortaya çıkarmaktadır.

Kjellsen and Detwiler (1993), uygun aktivasyon enerjisi kullanarak, erken yaşlarda dayanımın doğru olarak tahmin edileceğini belirtmişlerdir. Fakat, 28 günlük dayanımın % 40'na karşılık gelen olgunluk değeri için denklem (2)'nin doğru sonuçlar vermediğini göstermişlerdir.

Jonasson (1985), Arrhenius olgunluk fonksiyonunu kullanarak 28 günlük basınç dayanımının yarısına

kadar olan değerler için sıcaklığın etkisini araştırmıştır. Çalışmasında, 20-50 °C'de bakımı yapılmış, su-çimento oranı 0.77 ve 0.56 olan beton numuneleri kullanmıştır. Sonuç olarak, yüksek bakım sıcaklıklarında olgunluk yönteminin, sıcaklığın etkisini olduğundan daha fazla gösterdiğini bulmuştur.

Olgunluk-dayanım arasında birçok fonksiyon önerilmiştir. Bunlardan en popüler olanı 1956 yılında Plowman tarafından önerilen yarı logaritmik bir fonksiyondur (Plowman, 1956).

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

Burada;

S : Dayanım,
M : Olgunluk indeksi,
a, b : Regrasyon katsayıları olarak ifade edilmektedir. Kullanımı oldukça basit olan bu denklemde herhangi bir sınır dayanım değeri yoktur.

Daha sonra Carino, hiperbolik bir fonksiyon önermiştir (Carino, 1984). Bu fonksiyon, denklem (3)'e göre uygulama açısından daha karmaşık olmasına rağmen daha güvenilir sonuçlar vermektedir.

$$S = S_U = \frac{k_T (t - t_0)}{1 + k_T (t - t_0)} \quad (4)$$

Bu denklemde, S: Dayanım, S_U: Sınır Dayanım, k_T: Hız sabiti, t₀: Betonun dayanım kazanmaya başladığı andaki zaman olarak ifade edilmektedir.

Ülkemizde, olgunluk yöntemi ile ilgili çalışmalara son yıllarda hız verilmiştir. Çeşitli türdeki çimentolarla üretilen betonların basınç dayanımlarının tahmini için, ASTM C 1074'te verilen olgunluk fonksiyonlarının uygunluğu araştırılmıştır. Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu ve eşdeğer yaş fonksiyonu, "Portland çimentolarında olduğu gibi Portland kompoze çimentosu, sülfata dayanıklı çimento ve cürüflü çimentolarda da dayanım tahmini için kullanılabilir" sonucuna varılmıştır (Kasap ve Tokyay, 2002).

Topçu ve Karakurt (2002) yaptığı çalışmaların sonucunda; Nurse- Saul olgunluk yöntemi sayesinde aynı karışıma sahip betonun kullanılacağı inşaatlarda yerine yerleşmiş olan betonun koşullarına göre nasıl bir dayanım gelişimi sergileyeceğini göstermişlerdir.

Çalışma için, tek tip Portland çimentosu ve katkı çimento üretimi için, tras, kalker ve Soma B ve

Tunçbilek uçucu külleri kullanılmıştır. Belirtilen katkıların, ağırlıkça % 5, % 20 ve % 40 oranında Portland çimentosu ile yer değiştirilmesiyle 12 adet katkı çimento oluşturulmuştur. Böylece, toplam 13 adet çimento numunesi üzerinde olgunluk-dayanım ilişkileri incelenmiştir. TS 24'e göre üretilen harç numuneleri 5 °C, 20 °C ve 40 °C'de bakımı yapılmış ve 2, 7, 14, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları bulunmuştur. Daha önce önerilen denklemlerin uygunluğu araştırılmıştır. Ayrıca, yeni hız sabiti ve olgunluk fonksiyonu önerilmiştir.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2. 1. Materyal

Portland çimentosu, PÇ 42.5 olarak Balıkesir Set Çimento Fabrikası silolarından alınmış ve uygun koşullarda paketlenmiştir.

Tras ve kalker; Balıkesir Set Çimento Fabrikasının hammadde stoklarından alınmış ve laboratuvar koşullarında gerekli işlemlerden geçirilmiştir. İlk olarak alınan malzemeler 1 gün süre ile 105 °C'de etüvde bekletilmiştir. Daha sonra çeneli kırıcı yardımı ile 200 mµ elekten geçecek tane boyutuna gelinceye kadar öğütülmüştür. Elekten geçen malzeme 2 kg kapasiteli laboratuvar tipi bilyeli değirmende öğütülmüştür. Belirli zaman aralıklarında, değirmenden numune alınarak otomatik Blaine cihazı yardımıyla özgül yüzey değerlerine bakılmıştır. Öğütülen malzemeler laboratuvar koşullarında paketlenmiştir.

2. 2. Yöntem

Soma B ve Tunçbilek uçucu küllü ilgili termik santrallerden temin edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal analizleri Balıkesir Set Çimento Fabrikasının Laboratuvarlarında yapılmıştır. Kimyasal analizler için XRF yöntemi kullanılmıştır. Kimyasal analiz sonuçları Tablo 1'de belirtilmiştir.

Her bir numune için, tane büyüklüğü dağılımı 200 mµ , 90 mµ ve 40 mµ elekler için 10 g malzeme tartılarak Alpin Cihazı kullanılarak bulunmuştur. Ayrıca, malzemelerin özgül ağırlıkları (g/cm³) ve özgül yüzey alanları (cm²/g) bulunmuştur. Bu değerler Tablo 2'de verilmiştir.

Elde edilen çimentolar kullanılarak, TS 24'e göre hazırlanan harç numunelerinin 5 °C, 20 °C ve 40 °C'de bakımı yapılmıştır. Daha sonra, 2, 7, 14, 28 ve 90 gün sonunda basınç dayanımı testleri uygulanmıştır.

Tablo 1. Malzemelerin Kimyasal Analiz Sonuçları

%	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	K.Kayıbı	S.CaO
PÇ 42.5	20.04	61.62	5.81	3.62	1.43	2.87	0.94	0.18	2.6	1.41
KALKER	0.65	54.53	0.15	0.07	1.4	0.01	0.01	0.1	43.59	-
TRAS	65.67	3.05	12.98	0.75	2.21	-	3.54	1.48	9.92	-
SOMA B	56.29	4.54	28.54	5.42	1.37	0.28	1.74	0.15	1.35	-
TUNÇBİLEK	58.82	2.18	19.65	10.67	3.92	0.48	1.9	-	0.9	-

Tablo 2. Malzemelerin Tane Büyüklüğü Dağılımı, Özgül Ağırlıkları ve Özgül Yüzeyleri

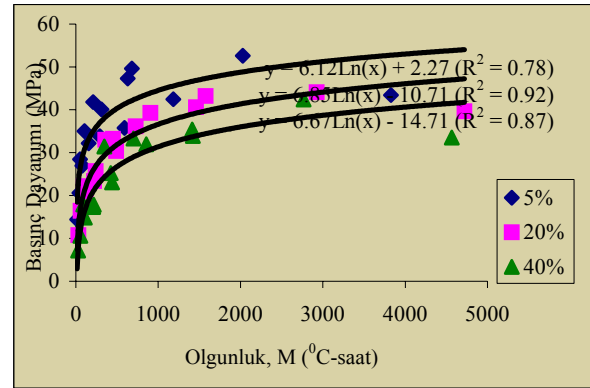
	40 mµ (%)	90 mµ (%)	200 mµ (%)	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Özgül Yüzey (cm ² /g)
PÇ 42.5	13.6	0.9	-	3.17	3516
KALKER	57.1	42.7	26.2	2.78	2863
TRAS	69.6	52.5	28.2	2.30	3016
SOMA B	38.2	14.2	2.4	1.95	3794
TUNÇBİLEK	76	1	0.1	2.08	3812

3. DENEY SONUÇLARININ İRDELENMESİ

ilişkinini gösteren fonksiyon ve R² değerleri Tablo 3'te verilmiştir.

3. 1. Matematiksel Modelin Karşılaştırılması

Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu ve eşdeğer yaş fonksiyonu için gerekli olan T₀ (temel alınan sıcaklık) ve E (aktivasyon enerjisi) değerleri ASTM C 1074'te belirlenen yöntemlerle bulunmuştur. Her tip çimento için hesaplanan T₀ ve E değerleri kullanılarak olgunluk ve eşdeğer yaş fonksiyonları elde edilmiştir. Nurse-Saul fonksiyonunun uygunluğu her tip çimento için ayrı ayrı incelenmiştir. Şekil 1'de Soma B uçucu kül ile üretilen harçların olgunluk dayanım ilişkisinin katkı oranına göre değişimi gösterilmiştir. Diğer çimentolar içinde benzer grafikleri elde etmek mümkündür. Her bir çimento için olgunluk-dayanım

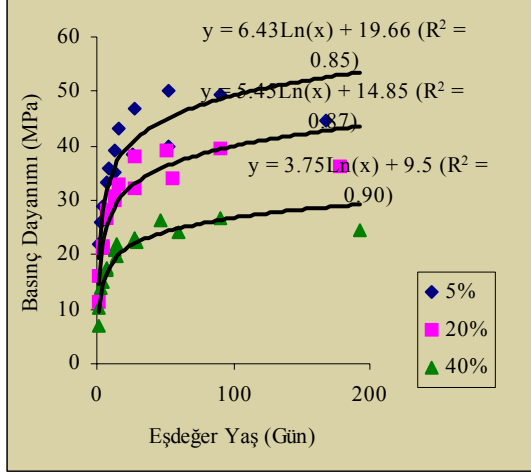


Şekil 1. Soma B uçucu kül katkıları ile üretilen harçların olgunluk-dayanım ilişkisi

Tablo 3. Olgunluk-Dayanım ve Eşdeğer Yaş-Dayanım Arasındaki Fonksiyonlar

		Nurse-Saul Fonksiyonu	R ²	Eşdeğer Yaş Fonksiyonu	R ²
SOMA	% 5	S = 6.12 ln(M) + 2.27	0.78	S = 6.42 ln(M) + 19.37	0.80
	% 20	S = 6.85 ln(M) - 10.71	0.92	S = 6.86 ln(M) + 12.58	0.91
	% 40	S = 6.67 ln(M) - 14.71	0.87	S = 6.71 ln(M) + 7.49	0.86
TUNÇBİLEK	%5	S = 7.05 ln(M) - 3.24	0.90	S = 7.16 ln(M) - 18.59	0.90
	% 20	S = 8.57 ln(M) - 19.21	0.94	S = 8.56 ln(M) - 11.98	0.93
	% 40	S = 8.49 ln(M) - 30.97	0.76	S = 8.49 ln(M) - 5.93	0.75
TRAS	% 5	S = 5.97 ln(M) + 2.18	0.79	S = 6.14 ln(M) + 19.35	0.79
	% 20	S = 6.13 ln(M) - 8.38	0.95	S = 6.19 ln(M) + 12.18	0.94
	% 40	S = 4.24 ln(M) - 11.13	0.83	S = 4.23 ln(M) + 5.31	0.83
KALKER	% 5	S = 6.38 ln(M) - 1.28	0.84	S = 6.43 ln(M) + 19.66	0.84
	% 20	S = 5.36 ln(M) - 1.89	0.87	S = 5.45 ln(M) + 14.85	0.87
	% 40	S = 3.62 ln(M) - 1.007	0.89	S = 3.75 ln(M) + 9.5	0.90
PÇ 42.5		S = 5.84 ln(M) + 7.07	0.74	S = 6.21 ln(M) + 22.58	0.76

Benzer şekilde, eşdeğer yaş fonksiyonunun katkı çimentolar için uygunluğu araştırılmıştır. Şekil 2’de kalker katkıli harçların eşdeğer yaş-dayanım ilişkisi gösterilmiştir. Diğer çimentolara ait fonksiyonlar ve R^2 değerleri ayrıca Tablo 3’te verilmiştir.



Şekil 2. Kalker katkıli çimentolarla üretilen harçların eşdeğer yaş-dayanım ilişkisi

Genel olarak bakıldığında mevcut fonksiyonların üretilen katkıli çimentolar için uygun olduğu sonucuna varılabilir. Fakat, mevcut yöntemlerden Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu ve eşdeğer yaş fonksiyonlarında kullanılan T_0 ve E değerlerinin bulunması için her bir numune için hesaplamaların yapılması gerekmektedir. Bu fonksiyonları tüm çimentolar için genellemek doğru değildir. Bu fonksiyonlarda katkı miktarı ve çeşidi göz önüne alınmamaktadır. Ayrıca bu fonksiyonlar normal Portland çimentosu ile üretilen numuneler için önerilmiştir. Bu yüzden kullanılan katkı miktarına ve sıcaklığa bağlı olarak yeni bir hız sabiti fonksiyonu önerilmiştir. Bu fonksiyon önerilirken doğrusal, hiperbolik ve üslü fonksiyonlar için regresyon analizleri yapılmıştır. En yüksek R^2 değerine sahip hız sabiti fonksiyonu Denklem (5) olarak önerilmiştir.

$$k(T) = 0.188e^{0.0414(1-\alpha)T} \quad (R^2=0.88) \quad (5)$$

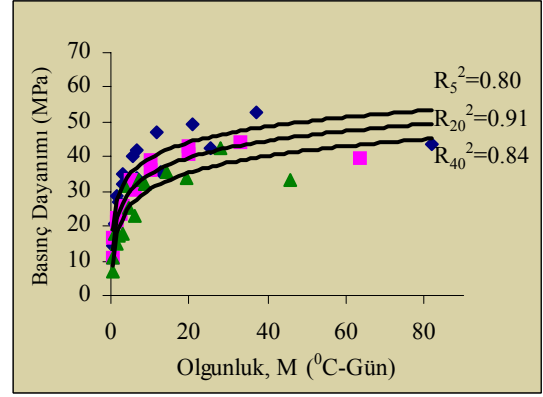
Burada,

α : Katkı oranı,

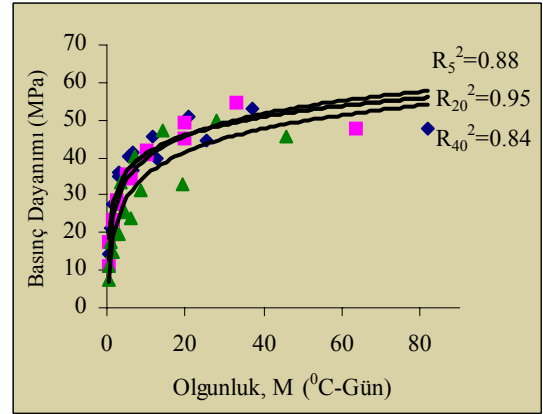
T: Betonun bakım sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) olarak alınmıştır. Hız sabiti fonksiyonu ile zaman değerinin çarpımı numunenin olgunluk değerini vermektedir.

$$M = k(T) \Delta t \quad (6)$$

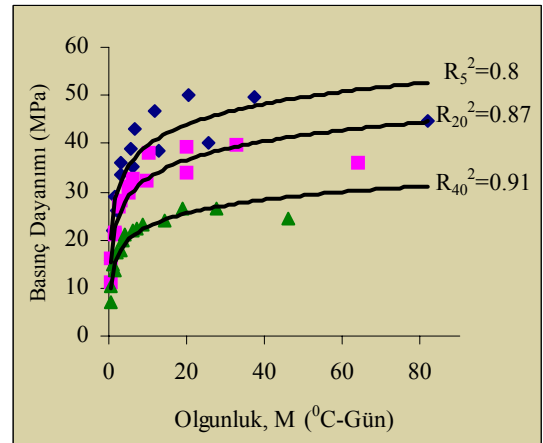
Denklem (6) kullanılarak, her bir mineral katkı numune için olgunluk-dayanım ilişkisi grafiklerde gösterilmiştir (Şekil 3). Şekiller incelendiğinde, mevcut yöntemlere göre benzer fonksiyon ve R^2 değerlerinin elde edildiği görülmektedir.



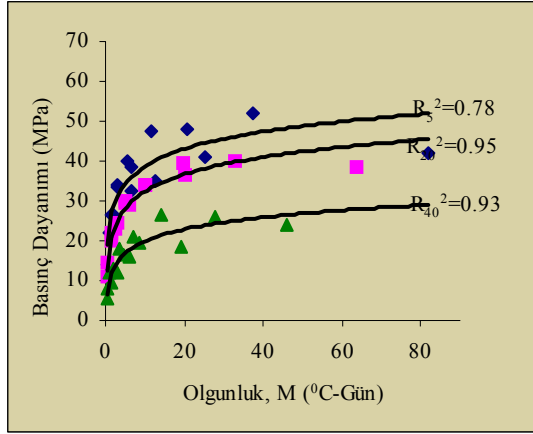
(a) Soma B uçucu külü



(b) Tunçbilek uçucu külü



(c) Kalker



(d) Tras

Şekil 3. Katkılı çimentoların denklem 6'ya göre bulunan olgunluk-dayanım ilişkisi

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada elde edilen verilerin ışığı altında aşağıdaki sonuçlara varmak mümkündür.

1. Korelasyon katsayılarına bakıldığında Nurse-Saul olgunluk fonksiyonu ve eşdeğer yaş fonksiyonunun Portland çimentolarında kullanıldığı haliyle diğer çimentolar için kullanılması uygundur.
2. Fonksiyonlarda kullanılan temel alınan sıcaklık T_0 ve E değerleri her tip çimento için ayrı ayrı bulunmalıdır. Sabit değerlerin kullanılması yanlış sonuçların ortaya çıkmasına sebep olabilir. Bu değerlerin hassas bir şekilde bulunması betonun erken yaşlarda dayanımını doğru tahmin etmede önemlidir.
3. Denklem 5 kullanılarak hesaplanan olgunluk değerlerinin, dayanımla ilişkisi mevcut yöntemlerle benzer davranışı göstermektedir.
4. Kullanım açısından Denklem 5 ve 6'nın, Nurse-Saul olgunluk ve eşdeğer yaş fonksiyonlarına göre daha basit olup, erken yaşlarda betonun dayanımını tahmin etmede daha çabuk sonuca götürebilmektedir.

Yapılan çalışmanın sonucunda şu öneriler konunun daha iyi anlaşılmasını sağlayacaktır.

1. Çalışmada kullanılan mineral katkı tipleri ve normal Portland çimentosunun çeşidi arttırılmalı ve çimentonun inceliğinin ve kimyasal kompozisyonunun etkisi incelenmelidir.

2. Günümüzde Maturity metre olarak bilinen olgunluk ölçerlerin, bünyesinde bulunan olgunluk fonksiyonunu kullanarak dayanım tahmini yapılmaktadır. Kullanılan malzeme ile bu fonksiyon farklılık göstermektedir. Bu nedenle cihazın sonuçlarına güvenilmemelidir.

5. KAYNAKLAR

Anonymous, 1993. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, (ASTM C 1074-87) 1993: Annual Book of ASTM Standards, V.04.02, s: 541-547.

Bergstrom, S.G. 1953. Curing Temperature Age and Strength of Concrete, Magazine of Concrete Research (London) V.5 (No.4), s:61-66.

Carino, N. J. 1984. Maturity Method: Theory and Application, Journal of Cement, Concrete and Aggregates, ASTM, V. 6 (No.2), s: 61-73.

Freiesleben, H. P., and Pedersen, J. 1977. Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete, Nordisk Betong, V. 21, s: 19-34.

Jonasson, J. E. 1985. Early Strength Growth in Concrete-Preliminary Test Results Concerning Hardening at Elevated Temperatures, The 3rd RILEM Symposium on Winter Concreting, Espoo Finland, s: 249-254.

Kasap, Ö. ve Tokyay, M. 2002. Çimento Tipinin Betonun Olgunluğu Üzerine Etkisi, TÇMB, Çimento ve Beton Dünyası, Sayı 40, s: 58-70.

Kee, C. F. 1971. Relation Between Strength and Maturity of Concrete, ACI Journal, Proceedings V.68 (No.3), s: 196-203.

Kjellsen O. K. and Detwiler R. J. 1993. Later-Age Strength Prediction by a Modified Maturity Model, ACI Materials Journal, V. 90, No.3, s: 220-227.

Malhotra, V. M. 1971. Maturity Concept and the Estimation of Concrete Strength, Information Circular IC 277, Department of Energy, Mines and Resources (Canada), Mines Branch.

Plowman, J. M. 1956. Maturity and the Strength of Concrete, Magazine of Concrete Research (London) V. 8 (No.22), s:13-22.

Saul, A. G. A. 1951. Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure, Magazine of Concrete Research (London) V. 2 (No. 6), s:127-140.

Topçu, İ. B. ve Karakurt, C. 2002. Farklı Çimentolar ile Üretilen Betonlarda Olgunluk Kavramı, ECAS 2002 Uluslararası Yapı ve Deprem Mühendisliği Sempozyumu, ODTÜ., Ankara, Türkiye, S : 477-484.
