

## Değişik Sıcaklıklarda Kür Edilen Salt Portland Çimentolu, Yüksek Fırın Cürufu veya Uçucu Kül Katkılı Betonlarda Dayanım Gelişimi

Özgür EREN\*  
Zeka YILMAZ\*\*

### ÖZ

Bu makale, yüksek fırın cürufu veya uçucu kül'ün portland çimentosu yerine kısmi ikamesinin, değişik sıcaklıklarda kür edilen betonların dayanımlarına olan etkilerini göstermektedir. Ayrıca, Carino ve Brooks, Al-Kaisi tarafından önerilen basınç dayanımı-zaman-kür sıcaklığı bağıntısındaki katsayıların test edilen betonlar için aldığı değerlerin tayinini göstermektedir. Basınç dayanım sonuçları, hiperbolik dayanım-zaman fonksiyonuna göre  $n$  kuvvet indisi kullanılarak analiz edilmiştir. Regresyon analizleri, değişik  $n$  ve  $t_0$  (son priz süresi) değerleri kullanılarak yapılmıştır.

### ABSTRACT

#### Strength Development of Concretes with Ordinary Portland Cement Partially Replaced by Slag or Fly Ash Cured at Different Temperatures

This paper presents the results of an investigation on the effect of Portland cement replaced by fly ash or granulated blast-furnace slag on the concrete strength at different curing temperatures. Also, it presents the coefficients in the relationship of strength-time-curing temperature for the tested concretes as suggested by Carino and Brooks and Al-Kaisi. Compressive strength results are analysed according to the hyperbolic strength-age function by introducing a power index  $n$ . The regression analysis is done considering different  $n$  and  $t_0$  (final setting time) values.

---

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 30.10.2002 günü ulaşmıştır.
- 31 Aralık 2004 gününe kadar tartışmaya açıktır.

\* Doğu Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazimağusa, Kıbrıs - ozgur.eren@emu.edu.tr

\*\* Doğu Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gazimağusa, Kıbrıs - zeka.yilmaz@emu.edu.tr

## **1. GİRİŞ**

Portland çimentosu ile üretilip 20°C'de kür edilen betonların, 30°C'de kür edilenlere göre, ilk yaşlarda daha fazla dayanım artışı gösterdiği fakat ileriki yaşlarda bu artışın daha az olduğu bulunmuştur [1]. Diğer yandan, uçucu kül betonları, Portland çimentosu betonlarına göre çok farklı davranışlar göstermektedir. Bu fark, uçucu kül betonlarının ısıdan dolayı tüm yaşlarda dayanım kazanabilme özelliğine sahip olmalarıdır. Bu özellik, kütle beton veya yüksek sıcaklıklardaki beton uygulamalarında büyük önem taşımaktadır.

Kobayashi'nin [2] çalışmasında, betonda kullanılan çimentonun %25'i uçucu kül ile ikame edilmiştir. Bunun sebebi, betonun 100-160°C sıcaklığındaki kayaların içerisinde yapılacak olan tünel inşaatında kullanılmasıydı. Uçucu kül, sadece Portland çimentosu kullanımında meydana gelebilecek dayanım kayıplarını önlemek için kullanılmıştır. Uçucu kül düşük sıcaklıklarda dayanım gelişiminde azalma gösterdiğinden, özellikle soğuk havalarda beton kürünün daha önemle yapılmasını gerektirmektedir.

Diğer yandan, cürufun hidratasyonu Portland çimentosuna göre daha yavaş olduğundan, her iki çimento tipinin karışımı dayanım gelişimini geciktirecektir. Geciktirme derecesi, cürufun ve portland çimentosunun kimyasal kompozisyonlarına, cüruf yüzdesine, ortamın nem ve sıcaklığına bağlıdır. Roy ve Idorn'un [3] çalışmasında cüruf-çimento harcının, ilk yaşlardaki dayanım gelişiminin Portland çimentosu harcına göre daha az olduğu bulunmuştur. Hogan ve Meusel [4] ise, cüruf katkılı çimento harcının buhar kürtü uygulandığında dayanım gelişiminde artış olduğunu gözlemlemişlerdir. Wimpenny ve diğerleri [5] 91 gün kür edilmiş cürufli betonların en yüksek basınç dayanımını 20°C'de elde etmişlerdir. Kür sıcaklığının 40°C'ye kadar artırılması basınç dayanımını ileriki yaşlarda düşürmüştür.

Al-Kaisi [6], 20°C'de kür edilen Portland çimentosu ve cürufli beton dayanımlarının 40-60°C'de kür edilen betonlara göre 28 günden sonra daha fazla olduğunu göstermiştir. Pratas [7] ise çalışmasında, biri Portland çimentosu diğeri ise %50 cüruf kullanarak iki karışım denemiştir. Her iki karışımda da aynı su/çimento oranı kullanılmış olup, karışımlar 5, 20 ve 30°C suda kür edilmiştir. Sonuçlar irdelendiğinde, 5°C'de kür edilen cürufli betonun, Portland çimentosu betonuna göre daha düşük dayanım gelişimi gösterdiği fakat 30°C'de bu durumun tam tersi olduğu ortaya çıkmıştır.

## **2. DENEYSEL ÇALIŞMA**

İlk yaşlarda değişik sıcaklıklara maruz kalan Portland çimentolu, uçucu kül ve cürufli betonların basınç dayanım gelişimleri büyük ölçüde kür sıcaklığından etkilenmektedir. Bu yüzden, dayanım-zaman gelişimini tespit ederken bu etkinin dikkate alınması gerekir. Değişik sabit sıcaklıklarda kür edilen betonların basınç dayanım sonuçları, hiperbolik dayanım-zaman fonksiyonu kullanılarak analiz edilmiştir.

Deneysel çalışma boyunca, bağlayıcı malzeme olarak Portland çimentosu, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonları Tablo 1'de verilmiştir. Kullanılan iri agrega kırma olup en büyük tane çapı 10 mm'dir. Aynı kaynaktan alınan ince agreganın en büyük tane çapı 3 mm'dir. Agregaların granülometrisi BS 882'de [8] belirtilen sınırlara uygundur.

Çalışma sırasında beş farklı karışım kullanılmıştır. Birinci karışım kontrol karışımı olarak sadece Portland çimentosu, ikinci ve üçüncüsünde ise sırasıyla %30 ve %50 uçucu kül

ikamesi, dördüncü ve beşinci karışımda ise sırasıyla %30 ve %50 cüruf ikamesi yapılmıştır. Uçucu kül ve cüruf ikameleri eşit ağırlık esasına göre yapılmıştır. Bütün karışımlarda %33 ince agrega ile toplam agrega/bağlayıcı oranı 6, su/bağlayıcı oranı ise 0.55 idi.

Karıştırma işlemi yapılmadan önce, tüm malzemeler 6, 20, 35 ve 80°C'de 24 saat muhafaza edilmişlerdir.

Beton karışımların priz süreleri ASTM C403'e [9] göre bulunmuştur.

Bütün karışımlar için 10 adet numune küp (100x100x100 mm) hazırlanmıştır. Numuneler 24 saat boyunca sabit sıcaklıklardaki kür tanklarında bekletildikten sonra kalıplarından çıkartılıp deney gününe kadar yine kür tanklarında muhafaza edilmişlerdir. Numuneler 6, 20, 35 ve 80°C'de kür edilip 1, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları bulunmuştur. Basınç testleri BS 1881'e [10] uygun olarak yapılmıştır.

Tablo 1 – Bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonları ve incelikleri

Kimyasal Kompozisyon (%)	Bağlayıcı malzeme (% ağırlıkça)		
	PÇ*	Uçucu kül	Cüruf
Oksitler:			
SiO <sub>2</sub>	20.96	50.90	35.32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.04	28.10	12.22
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.29	11.70	1.09
CaO	64.81	1.62	38.75
MgO	2.44	1.54	8.78
MnO	-	-	0.43
TiO <sub>2</sub>	-	1.04	0.64
Sulphide	-	-	0.93
SO <sub>3</sub>	3.00	-	0.20
Na <sub>2</sub> O	0.32	1.36	0.66
K <sub>2</sub> O	0.78	3.78	0.53
Kızdırma kaybı	0.84	1.90	1.27
Bileşenler:			
C <sub>3</sub> S	56.40	-	-
C <sub>2</sub> S	16.90	-	-
C <sub>3</sub> A	7.60	-	-
C <sub>4</sub> AF	10.00	-	-
İncelik:			
Yüzey alanı (m <sup>2</sup> /kg)	359	-	416
> 45 µm	-	7.40	-

\* PÇ: Portland Çimentosu

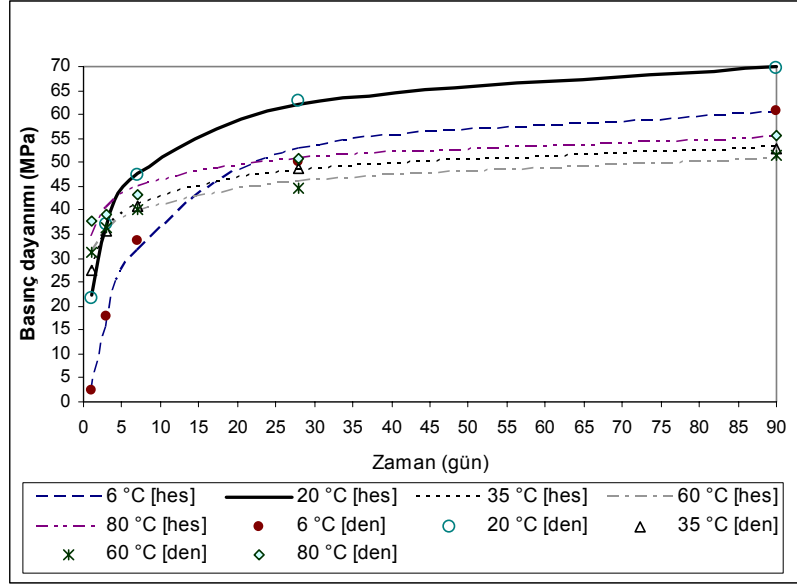
### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Karışımların basınç dayanım değerleri Tablo 2'de, zamana göre gelişimleri ise Şekil 1'den 5'e verilmiştir. Değerler, her yaş için 10 adet numunenin ortalaması alınarak bulunmuştur. Şekillerde görülen eğriler regresyon analizleri sonuçlarına göre çizilmiştir.

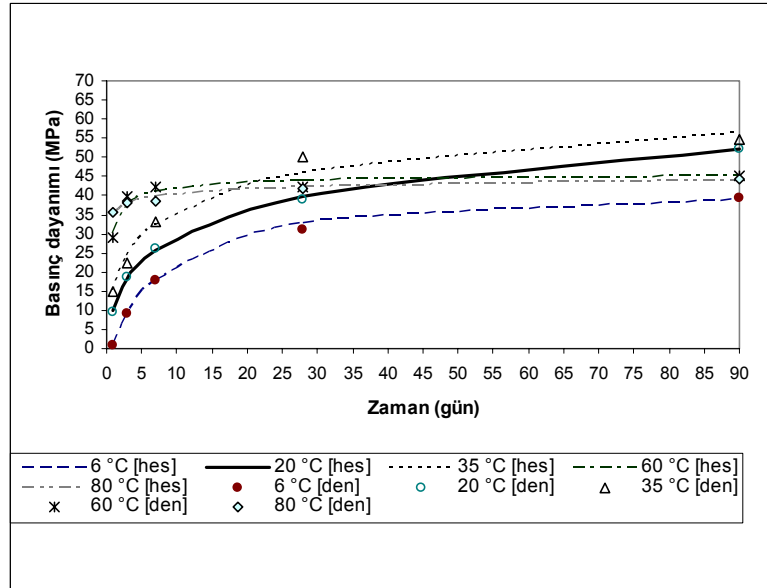
Tablo 2 - Küp basınç dayanımları

		Basınç Dayanımı (MPa)				
Beton Tipi	Zaman (gün)	Kür sıcaklığı (°C)				
		6	20	35	60	80
%100 PÇ	1	2.30	21.76	27.51	31.10	37.80
	3	17.95	36.95	35.60	36.35	39.10
	7	33.65	47.45	41.00	40.15	43.25
	28	50.25	62.77	48.75	44.65	50.80
	90	60.70	69.65	52.85	51.55	55.70
%30 Uçucu kül, %70 PÇ	1	0.97	9.65	15.04	29.15	35.80
	3	9.21	18.79	22.48	39.90	38.25
	7	17.64	26.27	33.10	42.40	38.50
	28	30.95	39.05	50.25	42.40	41.85
	90	39.30	52.20	54.85	45.10	44.25
%50 Uçucu kül, %50 PÇ	1	0.47	5.08	10.65	24.21	31.30
	3	3.93	14.45	16.63	32.35	35.40
	7	9.90	19.61	28.40	35.45	37.75
	28	17.33	33.35	41.00	38.50	37.75
	90	23.90	40.85	46.30	38.80	36.85
%30 Cüruf, %70 PÇ	1	1.78	11.67	16.95	29.10	29.30
	3	12.62	25.26	30.90	37.15	33.95
	7	21.36	34.40	39.10	39.70	36.30
	28	36.55	54.60	48.85	43.80	40.25
	90	52.85	65.40	55.75	49.45	51.80
%50 Cüruf, %50 PÇ	1	1.49	5.80	11.67	27.50	27.75
	3	5.79	17.67	23.64	36.75	31.40
	7	12.34	24.67	36.50	40.35	36.85
	28	24.88	49.15	45.85	45.00	44.30
	90	43.50	63.90	51.75	51.25	51.50

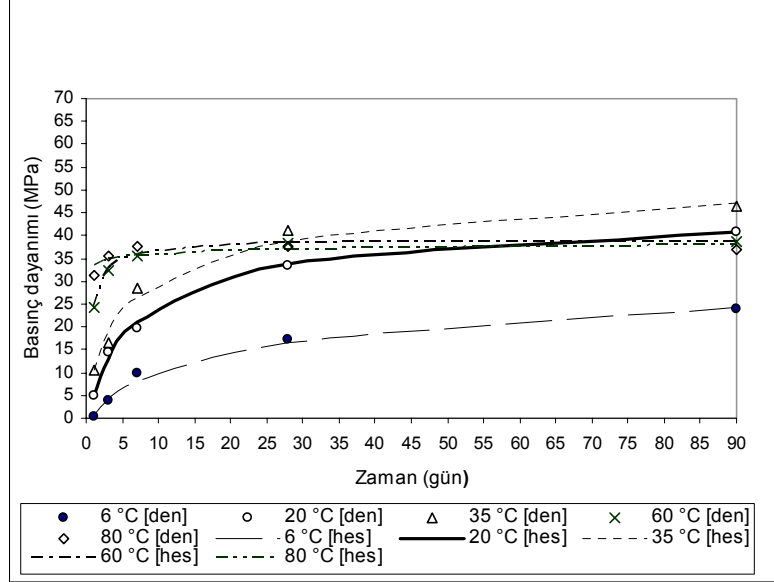
Portland çimentolu beton numuneleri diğer karışımlara göre 6 ve 20°C'de daha fazla dayanım göstermişlerdir. Wainwright ve Tolloczko [10], 20°C sabit kür sıcaklığında %50 ve %70 cüruf ikamesi ile beton numuneleri test etmişlerdir. Her iki çalışma karşılaştırıldığında, cüruf içeren betonların 100% Portland çimentolu betonlara göre ilk yaşlarda daha yavaş dayanım kazandığı ortaya çıkmıştır. Fakat daha ileriki yaşlarda (56 gün), cüruf lu karışımların Portland çimentolu karışımlara yakın bir değer verdiği görülmüştür. Oysa bu çalışmada, 20°C'de kür edilen %50 cüruf lu karışımın 90 güne kadar Portland çimentolu karışımın değerine yakın olmadığı görülmüştür. Bu fark, Wainwright ve Tolloczko'nun [11] daha yüksek miktarda Portland çimentosu (437 kg/m<sup>3</sup>) ve daha düşük su/çimento oranı kullanımı ile açıklanabilir.



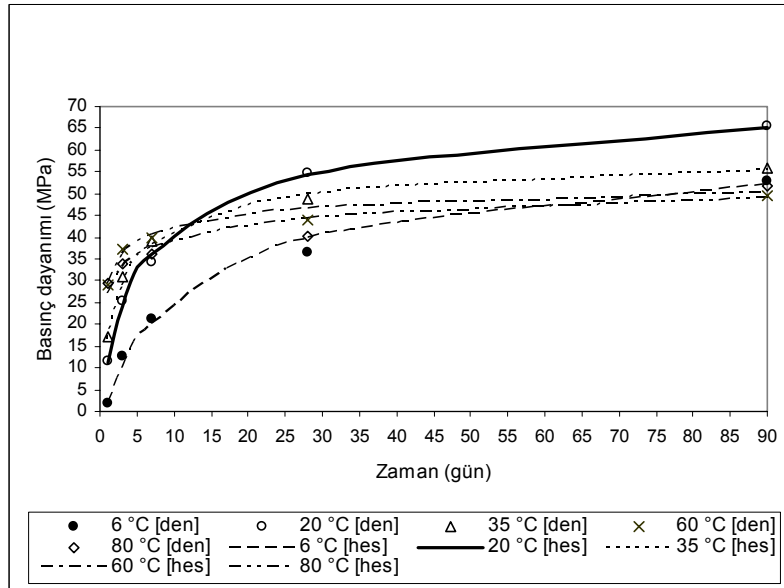
Şekil 1. Portland çimento lu betonların deneysel (den) ve hesaplanmış (hes) basınç dayanımları



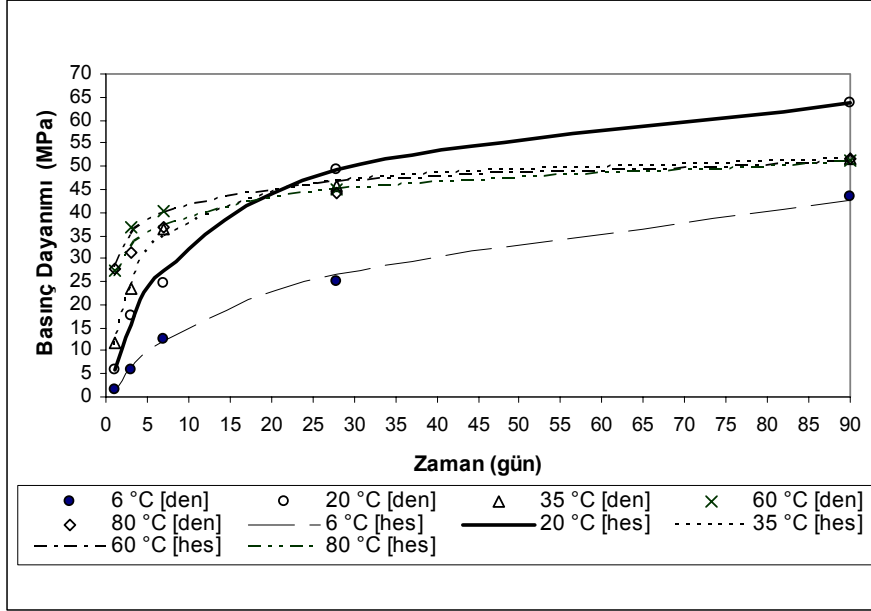
Şekil 2. %30 uçucu küllü betonların deneysel (den) ve hesaplanmış (hes) basınç dayanımları



Şekil 3. %50 uçucu küllü betonların deneysel (den) ve hesaplanmış (hes) basınç dayanımları



Şekil 4. %30 curufllu betonların deneysel (den) ve hesaplanmış (hes) basınç dayanımları



Şekil 5. %50 curuflu betonların deneysel (den) ve hesaplanmış (hes) basınç dayanımlarının

Bu çalışmada kullanılan Portland çimentosu miktarı  $318 \text{ kg/m}^3$  ve su/çimento oranı 0.55 idi.

Al-Kaisi [6] de, Portland çimentolu betonlarda kür sıcaklığının dayanım gelişiminde önemli bir etken olduğunu göstermiştir. Aynı çalışmada,  $20^\circ\text{C}$ 'de 28 gün kür edilen betonların  $40$ - $60^\circ\text{C}$ 'de kür edilen betonlara göre kıyaslandığında daha fazla dayanım kazandıklarını göstermiştir. Aynı sonuç bu çalışmada da Şekil 1'de görülebilir.

#### 4. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

Değişik kür sıcaklıkları uygulandığı zaman, beton basınç dayanımlarının bu sıcaklıklardan büyük ölçüde etkilendiği görülmektedir.

Carino [12], izotermal durumda kür edilen betonlarda sıcaklık ve zamanın dayanım gelişimine etkisini içeren hiperbolik dayanım-zaman fonksiyonunu önermiştir (denklem 1):

$$f_c = \frac{k f_u (t - t_0)}{1 + k (t - t_0)} \quad (1)$$

Burada:

$f_c$  = t zamanındaki dayanım

$t_0$  = dayanım gelişiminin başladığı zaman

$f_u$  = nihai dayanım

$k$  = bağıl dayanım ( $f_c/f_u$ )-zaman eğrisinin ilk eğimidir.

*Değişik Sıcaklıklarda Kür Edilen Salt Portland Çimentolu, Yüksek Fırın Cürufu...*

$k$ ,  $t_0$  ve  $f_u$  ifadeleri sıcaklığın fonksiyonlarıdır. Brooks ve Al-Kaisi [13],  $(t-t_0)$  ifadesinin yüksek sıcaklıklarda (40-60°C) daha iyi uygulanabilmesi için  $n$  kuvvet indisini önermiştir. Bu durumda denklem 1,

$$f_c = \frac{k f_u (t - t_0)^n}{1 + k (t - t_0)^n} \quad (2)$$

olur, veya başka bir şekliyle,

$$\frac{(t - t_0)^n}{f_c} = \frac{1}{k f_u} + \frac{(t - t_0)^n}{f_u} \quad (3)$$

olur.

Denklem (3) kullanılarak, her bir kür sıcaklığı ve değişik  $n$  değerleri için, lineer regresyon ile  $k$  ve  $f_c$  değerleri (Tablo 3) elde edilmiştir.

*Tablo 3 – Dayanım-zaman regresyon analizi sonuçları*

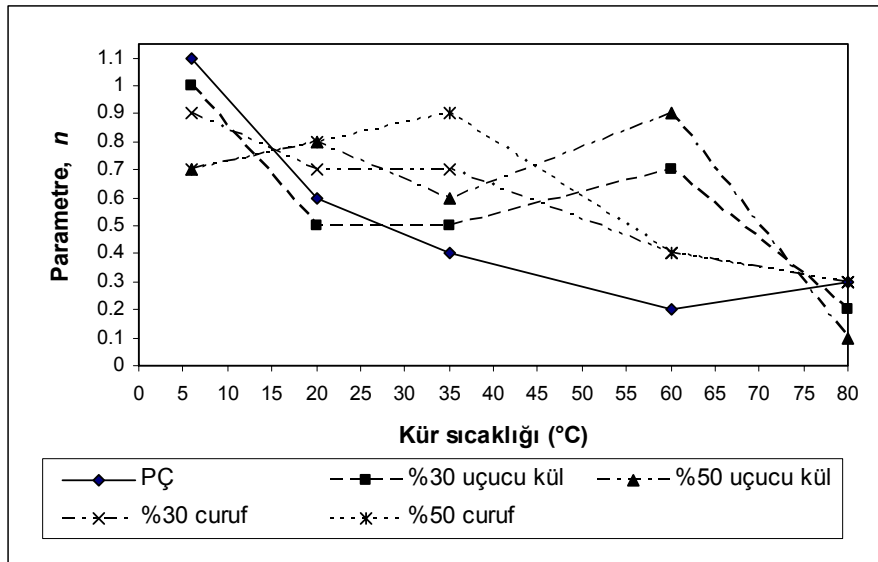
Beton Tipi	Kür sıcaklığı (°C)	Priz süresi (gün)		Nihai dayanım $f_u$ (MPa)	$k$ (1/saat)	$n$	Korelasyon katsayısı $R^2$
		ilk	son ( $t_0$ )				
%100 PÇ	6	0.413	0.667	63.79	0.129	1.1	0.998
	20	0.208	0.292	79.82	0.472	0.6	0.998
	35	0.163	0.208	63.28	0.856	0.4	0.998
	60	0.100	0.117	87.34	0.569	0.2	0.990
	80	0.075	0.092	68.78	1.049	0.3	0.992
%30 Uçucu kül, %70 PÇ	6	0.575	0.821	42.84	0.116	1.0	0.998
	20	0.267	0.354	84.89	0.167	0.5	0.996
	35	0.167	0.208	78.36	0.271	0.5	0.982
	60	0.104	0.125	45.88	2.153	0.7	0.998
	80	0.088	0.104	52.47	2.085	0.2	0.996
%50 Uçucu kül, %50 PÇ	6	0.464	0.908	38.48	0.075	0.7	0.954
	20	0.338	0.438	46.75	0.184	0.8	0.998
	35	0.200	0.250	59.38	0.257	0.6	0.990
	60	0.117	0.138	39.21	1.914	0.9	0.998
	80	0.113	0.125	50.35	1.991	0.1	0.885
%30 Cüruf, %70 PÇ	6	0.463	0.675	62.26	0.091	0.9	0.992
	20	0.258	0.354	77.34	0.233	0.7	0.998
	35	0.138	0.179	60.94	0.442	0.7	0.998
	60	0.083	0.100	58.09	1.060	0.4	0.996
	80	0.075	0.083	67.66	0.693	0.3	0.950
%50 Cüruf, %50 PÇ	6	0.525	0.783	80.39	0.049	0.7	0.958
	20	0.254	0.383	78.86	0.116	0.8	0.996
	35	0.133	0.179	54.49	0.313	0.9	0.998
	60	0.092	0.117	59.63	0.940	0.4	0.998
	80	0.071	0.083	74.52	0.559	0.3	0.992



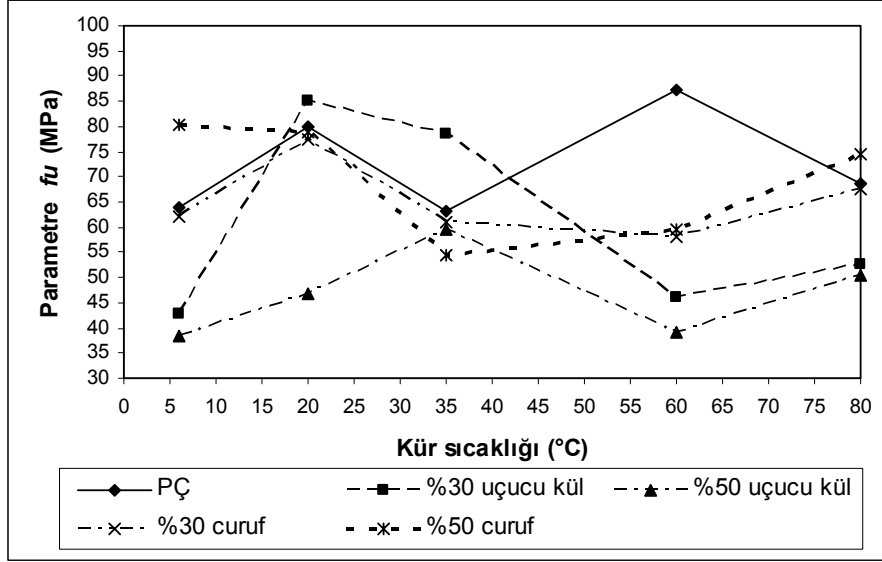
Nihai dayanım ( $f_u$ ) değerlerinin sıcaklıkla ya da cüruf ve uçucu kül ikame miktarıyla uyumlu olmadığı,  $k$  değerinin 60°C sıcaklığa kadar arttığı görülmüştür. 80°C'de  $k$  değeri, %30 uçucu kül, %30 ve %50 curuf içeren betonlar için düşüş göstermiştir. Portland çimentolu ve %50 uçucu kül içeren betonlarda ise bu değer 80°C kür sıcaklığına kadar artmaktadır. Diğer bir parametre olan priz süresi ( $t_0$ ) sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Şekil 6, 7 ve 8, sırasıyla,  $n$ ,  $f_u$  ve  $k$  değerlerinin kür sıcaklığına göre değişimini göstermektedirler.

Değişen sıcaklıklara göre basınç dayanımlarını önceden belirleyebilmek için, sıfır dayanım değeri ilk ve son prizın gerçekleştiği zaman olarak denenmiştir (Tablo 3). Regresyon analizleri, ilk ve son priz sürelerinden başladığı kabul edilen etkili zaman kullanılarak yapılmıştır. Analizlerin sonucunda, son priz süresi tüm sıcaklıklar için en düşük hata payını verdiği için, etkili zaman son priz süresinden başlayarak alınmıştır.

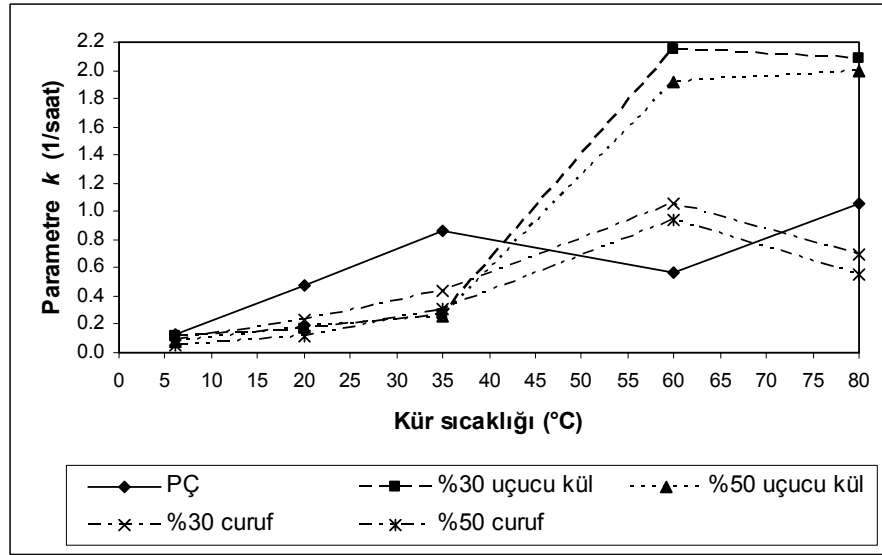
Denklem (3)'e göre regresyon analizi sonuçları Tablo 3'te, hesaplanmış ve deneysel dayanım sonuçları Şekil 1'den 5'e verilmiştir. Şekillerden de görüldüğü gibi, regresyon analizi sonuçları deneysel sonuçlar ile uyumludur.



Şekil 6. Tüm karışımlar için kür sıcaklığının  $n$  parametresine etkisi



Şekil 7. Tüm karışımlar için kür sıcaklığının  $f_u$  parametresine etkisi



Şekil 8. Tüm karışımlar için kür sıcaklığının  $k$  parametresine etkisi

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmanın içerdiği deney şartları göz önünde bulundurularak aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir.

1. Düşük, normal ve yüksek sıcaklıklarda uçucu kül ve cürufllu betonlar Portland çimentolu betonlara göre daha yavaş dayanım gelişimi gösterirler.
2. Portland çimentolu betonlar en yüksek dayanım değerini 7 gün ve sonrasında 20°C kür sıcaklığında göstermiştir.
3. 35°C'de kür edilen uçucu kül betonları, 28 ve 90 gün sonunda diğer sıcaklıklara göre daha yüksek dayanım kazanmışlardır.
4. Cürufllu betonlar 28 gün kür süresinden sonra Portland çimentolu betonlar ile aynı davranışı göstermişlerdir. Aynı zamanda, cürufllu betonlar en yüksek dayanım değerini 20°C kür sıcaklığında kazanmışlardır.
5. Dayanım-zaman ilişkisi, hiperbolik kuvvet fonksiyonu kullanılarak daha iyi tanımlanmıştır. Bu ilişki, sıfır dayanım zamanına ( $t_0$ ) bağlı olup son priz süresinin en uygun parametre olduğu bulunmuştur. Brooks ve Al-Kaisi'nin [13] önerdikleri kuvvet  $n$  indisi yüksek sıcaklıklarda daha iyi sonuç vermiştir. Kuvvet  $n$  indisi bütün karışımlar için sıcaklık arttıkça azalmaktadır. Bu sonuç, Brooks ve Al-Kaisi'nin [13] bulgularına uymaktadır.

## SEMBOLLER

- n: kuvvet indisi  
f: dayanım  
t: zaman  
k: bağıl dayanım-zaman eğrisinin ilk eğimi

## Kaynaklar

- [1] Neville, A.M., Properties of Concrete, 3rd edition, New York, Wiley and Sons, 1990.
- [2] Kobayashi, M., Utilization of fly ash and its problems in use in Japan, Japan-U.S. Science Seminar, San Francisco, September 10-13, 61-69,1979.
- [3] Roy, D.M., and Idorn, G.M., Hydration, structure, and properties of blast - furnace slag cement, mortars, and concrete, ACI Journal, 79, 444-457, 1982.
- [4] Hogan, F.J., and Meusel, J.W., The evaluation of durability and strength development of a ground granulated blast-furnace slag, Cement, Concrete, and Aggregates **3**, 1, 41-52, 1981.
- [5] Wimpenny, D.E., Ellis, C. Reeves, C.M., and Higgins, D.D., 'The development of strength and elastic properties in slag cement concretes under low temperature curing conditions' Proc. of Third CANMET/ACI International conference on fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete, Trondheim, Norway, June 18-23, 1989, (editor, V.M. Malhotra, ACI special publ., SP-114, 1989) 1283-1306.
- [6] Al-Kaisi, A.F., Early Age Strength and Creep of Slag Cement Concretes, PhD thesis, Department of Civil Engineering, The University of Leeds, August, 1989.

*Değişik Sıcaklıklarda Kür Edilen Salt Portland Çimentolu, Yüksek Fırın Cürufu...*

- [7] Pratas, J.D., Early age strength development of slag cement concretes, MSc. Dissertation, University of Leeds, 1978.
- [8] British Standards Institution: BSI London. BS 882: 1983.
- [9] American Standards for Testing of Materials, vol. 04.02, Concrete and Aggregates, 1994.
- [10] British Standards Institution : BSI London. BS 1881: Part 116, 1983.
- [11] Wainwright, P.J., and Tolloczko, J.J.A., The early and later age properties of temperature cycled slag/OPC concretes, Second International conference on the use of fly ash, silica fume, slag, and natural pozzolans in concrete, April, Madrid, CANMET, Ottawa, 1293-1321, 1986.
- [12] Carino, N.J., Maturity functions for concrete, Proc. of International conference on concrete at early ages, RILEM, Paris, vol.1, 123-128, 1982.
- [13] Brooks, J.J., and Al-Kaisi, A.F., Early strength development of Portland and slag cement concretes cured at elevated temperatures, ACI Materials Journal, **87**, 5, Sept – Oct, 503-507, 1990.