

## METAKAOLİN KULLANIMININ HARÇLARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ

Şemsi YAZICI, Didem ANUK, Hasan Şahan AREL

Ege Üniversitesi, Müh. Fak., İnşaat Mühendisliği Bölümü, 35100, Bornova –İZMİR

**ÖZET:** Bu çalışmada değişik oranlarda metakaolin içeren çimento harçların basınç ve eğilme dayanımlarına zamanın ve değişik hızlandırılmış kür yöntemlerinin etkisi incelenmiştir. Bu amaçla %5, %10, %15 ve %20 oranlarında metakaolin ağırlıkça çimento ile yer değiştirilerek 5 farklı harç karışımı tasarlanmıştır. Harç karışımlarında agrega/bağlayıcı madde/su oranları ağırlıkça 3/1/0.5 olarak oluşturulmuştur. Karışımlarda kırma kireçtaşı esaslı 0-5 mm boyutlarındaki ince agrega kullanılmıştır. Üretilen harçlardan 40/40/160 mm boyutlu prizmatik örnekler hazırlanmıştır. Hazırlanan örneklerin 1, 3, 7, 28, 56, 90 ve 180 günlük basınç ve eğilme dayanımları standart kür işleminden sonra saptanmıştır. Ayrıca üretilen harçlardan hazırlanan örnekler 35 °C ılık su kürüne, 80 °C de kaynar su kürüne ve otojen küre de tabi tutularak hızlandırılmış dayanımları belirlenmiştir. Çimento yerine metakaolin kullanılan harçlarda en yüksek basınç ve eğilme dayanımları %15 metakaolin kullanılan harçlarda elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda metakaolinin üretilen harçların erken yaşlarda basınç ve eğilme dayanımlarına katkısının da olduğu görülmüştür. Ayrıca hızlandırılmış kür işlemleri ile sadece portland çimentosu içeren kontrol harcının değişik oranlarda metakaolin içeren harçlardan daha etkin olarak erken dayanım kazandığı da anlaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Metakaolin, hızlandırılmış kür, basınç dayanımı, eğilme dayanımı.

### Influences of Metakaolin on the Mechanical Properties of Mortars

**ABSTRACT:** In this study, the effects of different replacement of cement by metakaolin (MK) on compressive and flexural strength and different accelerated curing methods of mortars were investigated. For this purpose, MK replacement 5%, 10%, 15% and 20% by weight of cement, 5 different mortar mixtures were designed. Mortar mixtures, aggregate/binder/water ratio by weight as 3/1/0.5 formed. Size of 0-5 mm limestone used as fine aggregate in mortar mixtures. 40/40/160 mm-sized prismatic specimens were prepared. The prepared samples 1, 3, 7, 28, 56, 90 and 180-day compressive and flexural strengths were determined after the standard cure. In addition, samples of 35 ° C warm water cure, 80 ° C, boiling water cure, and autogenous cure were subjected to accelerated strength determined. Mortar containing 15% MK replacements showed maximum compressive and flexural strength. Based on the results obtained from this study, mortars produced with MK, at an early age was also the contribution of compressive and flexural strength. In addition, with accelerated curing processes containing only portland cement control mortar containing incorporating different proportions of metakaolin also gained early strength is understood as more effective.

**Key Words:** Metakaolin, accelerated curing, compressive strength, flexural strength.

### GİRİŞ

Son yıllarda yüksek mukavemetli ve yüksek performanslı beton ve harçların üretiminde, hafif betonların üretiminde, ferrocement uygulamalarında, cam lifli betonların

üretiminde, tamir harçlarında ve su izolasyonu amaçlı sıvalarda kullanılan puzolanik malzemelerden biri de metakaolindir (Zhang ve Malhotra, 1995, Sabir ve diğ., 2001, Siddique ve Kalus, 2009). Metakaolin, saflaştırılmış kaolin kilinin yaklaşık olarak 650–800 °C arasındaki

sıcaklıklarda kalsine edilmesi sonucunda elde edilen beyaz renkli yapay puzolanik bir üründür. Bu kalsinasyon işlemi sonucunda, metakaolinin bünyesindeki alümin ve silisin kristal yapılarında bozulma olur. Metakaolin, amorf yapılı, yüksek oranda puzolanik özelliğe sahip hale gelir (Sabir ve diğ., 2001, Siddique ve Kalus, 2009).

Metakaolin yüksek oranda  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeren bir malzemedir. Metakaolinin yapısında bulunan silis ve alüminin çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ile reaksiyona girerek yeni kalsiyum silikat hidrat (CSH) yapılar ve alümina içeren fazlar ( $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{C}_2\text{ASH}_8$ ,  $\text{C}_3\text{AH}_6$ ) oluşturur. Bu oluşan ürünler sayesinde üretilen beton veya harçlarda mekanik özelliklerde ve dayanıklılıkta artışlar görülür (Zhang ve Malhotra, 1995, Sabir ve diğ., 2001, Siddique ve Kalus, 2009, Khatib ve Hibbert, 2005).

MK beton üretiminde genel olarak çimento yerine ağırlıkça %10 ile 20 arasındaki değerlerde kullanılmaktadır. Beton veya harçlarda MK kullanımı ile üretilen beton ve harçların basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarını artırdığı, büzülme azalttığı, donma-çözünmeye direnci yükselttiği, geçirgenliği düşürdüğü, kimyasal etkilere karşı dayanıklılığı artırdığı, alkali silis reaksiyonu (ASR) gelişimini azalttığı, daha yoğun bir beton elde edilmesine olanak tanıdığı, değişik araştırmacılarca rapor edilmiştir (Zhang ve Malhotra, 1995, Sabir ve diğ., 2001, Siddique ve Kalus, 2009, Khatib ve Wild, 1998, Khatib ve Clay, 2004, Kim ve diğ., 2007). Ayrıca, yine bazı araştırmacıların, metakaolinin işlenebilmeyi artırdığını, daha düzgün bir yüzey elde edilmesine olanak sağladığını ve çiçeklenmeyi azalttığını da ifade ettikleri görülmektedir (Siddique ve Kalus, 2009, Kim ve diğ., 2007).

Çimento yerine %15 'e kadar değişen oranlarda metakaolin içeren çimento harç ve hamurlarında, puzolanik reaksiyonun 14 güne kadar hızlı bir şekilde geliştiği, bu sayede dayanımın yükseldiği ve çimento hamurundaki boşluk yapısında iyileşmeler görüldüğü belirtilmektedir. 14 günden sonraki kür sürelerinde ise; puzolanik reaksiyonun artış hızının ciddi bir şekilde azaldığı, dolayısıyla basınç dayanımındaki artışın da yavaşladığı

değişik araştırmacılarca ifade edilmiştir (Wild ve diğ. 1996, Khatib ve Wild, 1998, Curcio ve diğ. 1998, Wild ve Khatib, 1997, Poon ve diğ., 2001, Poon ve diğ., 2001, Cassagnabere ve diğ., 2009).

Metakaolinin beton veya harçlarda dayanım ve durabiliteye olumlu katkısında üç mekanizmanın etkisinin olduğu bilinmektedir. Bunlar: çimentonun hidratasyonunu hızlandırması, puzolanik reaksiyon yapması ve filler etkisi ile boşlukları tıkayarak doluluğu artırmasıdır (Sabir ve diğ., 2001, Badogiannis ve diğ., 2004, Khatib ve Hibbert, 2005).

Bu çalışmanın amacı; değişik oranlarda metakaolin kullanımının harçların mekanik özelliklerine kür süresi ve hızlandırılmış kür yöntemlerinin etkisini incelemektir.

## DENEYSEL ÇALIŞMA

### Malzemeler

Bu çalışmada harç üretiminde bağlayıcı olarak CEM I 42.5 R tipi çimento ile metakaolin, karışım suyu olarak şebeke suyu, agrega olarak da 0-5 mm dane dağılımına sahip kireç taşı kökenli kırma agrega kullanılmıştır. Kullanılan çimentonun, metakaolinin ve agreganın bazı özellikleri sırasıyla Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3 'te verilmiştir.

### Harç karışımlarının hazırlanması

Çalışmada 5 farklı içerikte harç karışımı tasarlanmıştır. Harç karışımlarında metakaolin çimento yerine %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında ağırlıkça kullanılmıştır. Üretilen harç karışımlarının kompozisyonu; ağırlık esasına göre ince agrega/bağlayıcı/su oranları sırasıyla 3/1/0.5 olacak şekilde TS EN 196-1 (Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım, 2002) 'e göre belirlenmiştir. Üretilen harçlarda yayılmanın sabit tutulması amacı ile bazı karışımlarda naftalin sülfonat esaslı süper akışkanlaştırıcı katkı maddesi kullanılmıştır. Üretilen harçların karışım kompozisyonu ve isimlendirilmesi Tablo 4 'te sunulmuştur.

Harç üretimi 5 lt kapasiteli harç mikserinde yapılmıştır. Miksere önce agrega ve bağlayıcılar kuru olarak konulmuş yaklaşık olarak 2 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra karışım suyu ve gerekiyorsa akışkanlaştırıcı konulmuş ve ıslak karışım 1.5 dakika karıştırılmıştır.

**Tablo 1.** Çimentonun ve metakaolinin özellikleri.  
*Table 1. Properties of cement and metakaolin.*

	CEM I 42.5R	Metakaolin
Kimyasal özellikler		
Kızdırma Kaybı	3,55	1,24
CaO	62,56	0,29
SiO <sub>2</sub>	19,70	63,53
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,39	32,36
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,64	0,54
MgO	1,42	0,18
SO <sub>3</sub>	3,25	0,01
Na <sub>2</sub> O	0,26	0,33
K <sub>2</sub> O	0,84	1,08
L.S.F	94,74	—
C <sub>3</sub> S	55,64	—
C <sub>2</sub> S	14,81	—
C <sub>3</sub> A	9,82	—
C <sub>4</sub> AF	8,03	—
Hidrolik Modül	2,26	0,01
Silikat Modülü	2,45	1,93
Alümin Modülü	2,04	60,11
Fiziksel özellikler		
32 mikron üstü, %	32,70	35,00
45 mikron üstü, %	19,5	0,2
90 mikron üstü, %	3,2	0
Yoğunluk	3,1	2,55
Blaine, cm <sup>2</sup> /gr	3766	11768
Cl-	0,019	—
Mekanik özellikler		
Basınç dayanımı, MPA		Metakaolinin puzolanik aktivite indeksi
2 Günlük	21,3	
7Günlük	38,5	7 gün için: %62
28 Günlük	50,4	28 gün için: %87

**Tablo 2.** İnce agreganın dane dağılımı.  
*Table 2. Grading of fine aggregate.*

Elek açıklığı, (mm)	Geçen, (%)	Kalan, (%)
8	100	0
4	95	5
2	55	45
1	38	62
0.5	18	68
0.25	8	92
Elek altı	0	100
İncelik modülü	2.72	

**Tablo 3.** İnce agreganın bazı fiziksel özellikleri.*Table 3. Physical properties of fine aggregate.*

Özellikler	İnce Agregası
Birim ağırlık, kg/m <sup>3</sup>	1888
Sıkışık, Gevşek, Özgül Ağırlık;	1689
Kuru,	2.58
Doygun Yüzey Kuru,	2.72
Su emme oranı, %	1.42

**Tablo 4.** Harç karışımları için malzeme miktarları (3 adet 40/40/160mm örnek için).*Table 4. Mix proportions of mortar mixtures (for 3 units 40/40/160mm sample).*

Karışım Adı	Metakaolin Oranı, %	Malzeme Miktarları (g)				
		Agregası	Çimento	Metakaolin	Su	Süper Akışkanlaştırıcı
KH	0	1350	450	0	225	0
MK1	5	1350	427.5	22.5	225	0
MK2	10	1350	405	45	225	0
MK3	15	1350	382.5	67.5	225	2.5
MK4	20	1350	360	90	225	4.5

### Örneklerin hazırlanması ve kürü

Çalışmada, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri için 40/40/160 mm boyutlarında prizmatik örnekler hazırlanmıştır. Harç karışımları kalıplara iki tabaka halinde doldurulmuş ve sarsma tablasında sıkıştırılmıştır. Daha sonra örnekler standart kür (20±2 °C deki su içerisinde kür), ılık su kürü, kaynar su kürü ve otojen kür olmak üzere 1 normal 3 'te hızlandırılmış kür işlemine ayrı ayrı tabi tutulmuştur. Standart su kürüne tabi tutulan örnekler dökümden bir gün sonra kalıplarından çıkarılmış ve test günlerine kadar 20±2 °C deki kirece doymuş su içerisinde kür edilmiştir. Hızlandırılmış kür işlemleri ASTM C 684-99(2003) (Standard Test Method for Making, Accelerated Curing, and Testing Concrete Compression Test Specimens) standardına uygun olarak yapılmıştır. Ilık su kürüne tabi tutulan örnekler döküm işleminden yaklaşık olarak 30 dakika sonra poşetlenmiş ve 35 °C deki

su içerisine konularak 23.5 saat süre ile tutulmuştur. Kaynar su küründe ise; döküm işleminden 23 saat ± 30 dakika sonra poşetlenmiş örnekler 80±5 °C deki kaynar su içerisine konularak 3.5 saat süre ile bekletilmiştir. Otojen kür işlemine tabi tutulan örnekler ise, döküm işleminden 30 dakika sonra poşetlenip strafordan yapılmış kutular içerisinde 48 saat süre ile bekletilmiştir.

### Uygulanan Deneyler

Hazırlanan harçlar üzerinde; ortadan yüklemeli eğilme ve eğilme sonrası tek eksenli basınç deneyleri yapılmıştır. Eğilme ve tek eksenli basınç deneyleri TS EN 196-1 standardına uygun gerçekleştirilmiştir. Basınç ve eğilme deneylerinde yükleme hızı 5 KN/sn olan 100 KN kapasiteli pres kullanılmıştır.

## DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada öngörülen deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

### Eğilme deneyi sonuçları

Çalışmada üretilen harçlardan hazırlanan 40/40/160 mm prizmatik örnekler üzerinde standart ve hızlandırılmış kür sonrasında yapılan eğilme deneyleri sonuçları grafik olarak Şekil 1 'de verilmiştir. Ayrıca üretilen harçların kontrol harcına kıyasla eğilme dayanımı değişim oranları da Tablo 5 'te verilmiştir. Tablo 5 ve Şekil 1 'deki grafiklerde verilen sonuçlar 6 örneğin ortalamasıdır.

### Standart su kürü uygulanan harçlarda:

Tablo 5 ve Şekil 1 'deki sonuçlar incelendiğinde, üretilen harçların 1 günlük eğilme dayanımları 3.1 ile 3.8 MPa arasında değiştiği görülmektedir. En yüksek eğilme dayanımı 3.8 MPa ile kontrol harcında (KH,) en düşük eğilme dayanımı ise 3.1 MPa olarak MK4 harcında elde edilmiştir. 1 günlük periyotta metakaolin kullanım oranı arttıkça üretilen harçların eğilme dayanımlarının azaldığı anlaşılmaktadır. Bu azalmalar, %5 ve %10 metakaolin oranlarında kullanılan MK1 ve MK2 harçlarında %8, %15 metakaolin kullanılan MK3 harcında %16 ve %20 metakaolin kullanılan MK4 harcında ise %18 mertebesinde gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar 1 günlük periyotta metakaolin

kullanımının eğilme dayanımına olumlu katkısının olmadığını göstermektedir.

3 günlük periyotta en yüksek eğilme dayanımı değeri MK3 harcında (7.2 MPa), en düşük eğilme dayanımı değeri ise KH ve MK1 harcında (6.7 MPa) elde edilmiştir. 3 günlük kür süresi sonunda; MK içeren harçların eğilme dayanımları kontrol harcının eğilme dayanımından %7 ye varan oranlarda daha yüksek değerler almıştır. En yüksek artış %10 metakaolin içeren MK3 harcında oluşmuştur.

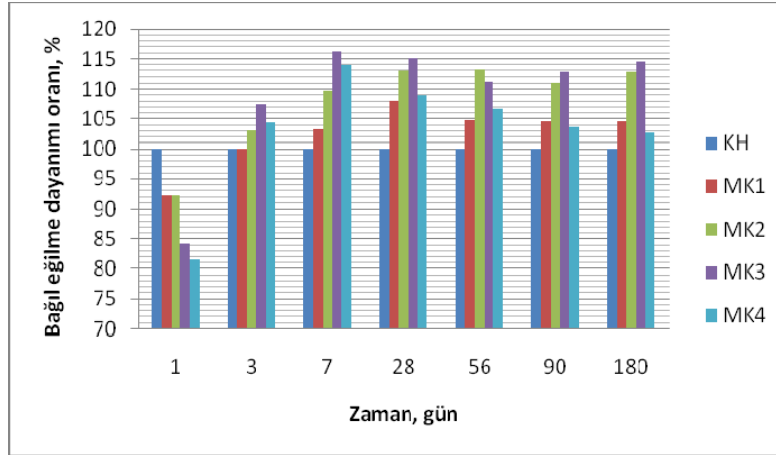
7 gün ve sonrasındaki yaşlarda; %5-%20 metakaolin içeren harçların tamamının eğilme dayanımlarının kontrol harcının üzerinde çıktığı görülmektedir. 7 gün ve sonrasındaki kür sürelerinde en yüksek eğilme dayanımı değerleri genellikle %10 ve %15 metakaolin içeren harçlarda elde edilmiştir. Metakaolin kullanımı ile eğilme dayanımlarının özellikle 28 güne kadar etkili bir şekilde artışı, 28 günden sonra ise eğilme dayanımı kazanım hızının düşme eğilimine girdiği görülmektedir. 180 günlük kür süresi sonunda kontrol harcına kıyasla metakaolin içeren harçların %3 ile %13 arasında değişen oranlarda daha yüksek eğilme dayanımına sahip oldukları görülmüştür. 180 günlük kür sonunda en yüksek eğilme dayanımı 12.6 MPa olarak MK3 harcında elde edilmiş durumdadır. Tüm bu sonuçlara göre %5-%20 arasında çimento yerine metakaolin kullanımının harçlarda 1 günden sonraki kür sürelerinde eğilme dayanımına olumlu katkı yaptığını göstermektedir.

Tablo 5. Standart küre tabi tutulan harçların eğilme dayanımları.

Table 5. Flexural strength of mortars subjected to the standard cure.

Harç adı	*Eğilme dayanımı, MPA						
	1 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün	56 Gün	90 Gün	180 Gün
KH	3,8	6,7	9,3	10,0	10,6	10,9	11,0
MK1	3,5	6,7	9,6	10,8	11,1	11,4	11,5
MK2	3,5	6,9	10,2	11,3	12,0	12,1	12,4
MK3	3,2	7,2	10,8	11,5	11,8	12,3	12,6
MK4	3,1	7,0	10,6	10,9	11,3	11,3	11,3

\*Sonuçlar 6 örneğin ortalamasıdır.



Şekil 1. Harçların bağıl eğilme dayanımı oranları.

Figure 1. Relative flexural strength ratios of mortars.

Tablo 6. Hızlandırılmış kür tabii tutulan harçların eğilme dayanımları.

Table 6. Flexural strength of mortars subjected to the accelerated curing.

Harç Adı	*Eğilme Dayanımı, (MPa)			
	28 günlük standart kür	Ilık su kürü	Kaynar su	Otojen kür
KH	10,0	5,0	5,4	7,1
MK1	10,8	4,2	4,9	6,5
MK2	11,3	5,3	6,0	6,9
MK3	9,7	5,3	5,5	5,7
MK4	9,3	4,0	4,4	5,7

\*Sonuçlar 6 örneğin ortalamasıdır.

#### **Hızlandırılmış kür uygulanan harçlarda:**

Üretilen harçlar üzerinde yapılan hızlandırılmış kür işlemleri sonucunda elde edilmiş olan eğilme dayanımı sonuçları Tablo 6 'da verilmiştir. Ayrıca üretilen harçların 28 günlük standart eğilme dayanımına kıyasla hızlandırılmış kür ile elde edilmiş olan dayanım kazanım oranları da grafik olarak Şekil 2 'de sunulmuştur.

Tablo 6 'daki sonuçlar incelendiğinde; hızlandırılmış kür uygulaması ile metakaolin içeren harçlar içerisinde en yüksek eğilme dayanımları %10 metakaolin içeren MK2 harçlarında, en düşük eğilme dayanımları ise %20 metakaolin içeren MK4 harçlarında elde edilmiştir. Ilık su küründe; en yüksek eğilme dayanımı 5.3 MPa seviyesinde MK2 ve MK3 harçlarında, sıcak su küründe ise; 6 MPa seviyesinde MK2 harcında ve otojen kür de ise; 7.1 MPa seviyesinde KH 'da elde edildiği

görülmektedir. Ilık ve kaynar su kürlerinde; %10 ve %15 oranlarında metakaolin içeren MK2 ve MK3 harçlarının KH 'dan daha yüksek erken eğilme dayanımı kazanmış olduğu, otojen kürde ise; tüm metakaolin içeren harçların KH 'dan daha düşük eğilme dayanımına sahip oldukları saptanmıştır.

Hızlandırılmış kür yöntemleri içerisinde üretilen harçlarda en yüksek eğilme dayanımları otojen kür işlemi sonunda elde edilmiştir. En düşük eğilme dayanımları ise ılık su küründe oluşmuştur. Bu sonuçlar otojen kürün kısa periyotta çimento ve metakaolin hidrasyonunun ılık ve kaynar suya kıyasla daha hızlı geliştiğini göstermektedir.

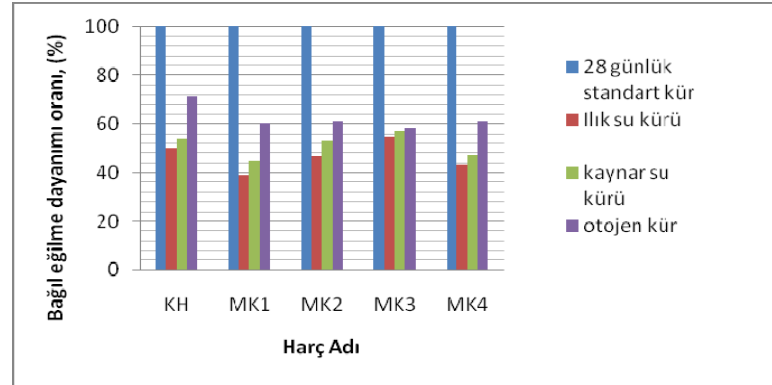
Şekil 2 'deki grafik incelendiğinde, kontrol harcına 28 günlük standart dayanımının %50 'si ılık su kürü ile, %54 'ü kaynar su kürü ile, %71 'i otojen kür ile kazandırılmıştır. %5-20 arasındaki oranlarda metakaolin içeren harçlarda ise; en

yüksek dayanım kazanımı MK3 harcında, ılık su kürü için %55, sıcak su kürü için %56, otojen kür için ise %58 'i mertebesinde elde edilmiştir.

### Tek eksenli basınç deneyi sonuçları

Üretilen harçlardan hazırlanan 40/40/160 mm prizmatik örnekler üzerinde standart ve

hızlandırılmış kür sonrasında yapılan tek eksenli basınç deneyleri sonuçları Tablo 7 'de verilmiştir. Ayrıca üretilen harçların kontrol harcına kıyasla basınç dayanımı değişim oranları da Şekil 3 'te sunulmuştur. Tablo ve grafiklerde verilen basınç dayanımı sonuçları 12 örneğin ortalamasıdır.



Şekil 2. Hızlandırılmış küre tabi tutulmuş harçların bağıl eğilme dayanım oranları.

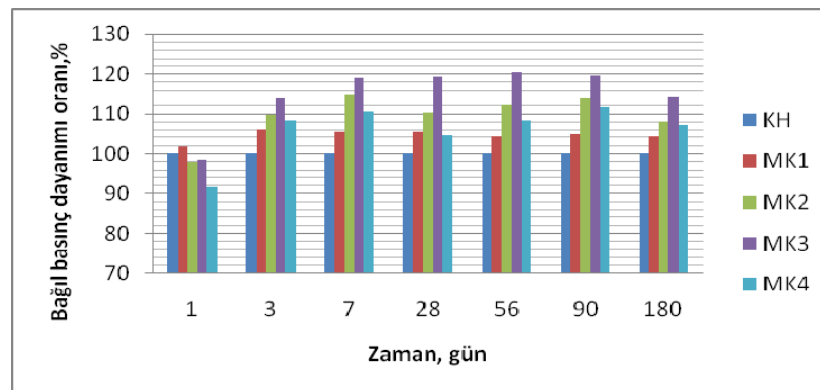
Figure 2. Relative flexural strength ratios of mortars subjected accelerated curing.

Tablo 7. Standart küre tabi tutulan harçların basınç dayanımları

Table 7. Compressive strength of mortars subjected to the standard curing.

Harç adı	*Basınç dayanımı, MPa						
	1 Gün	3 Gün	7 Gün	28 Gün	56 Gün	90 Gün	180 Gün
KH	18,2	36,0	41,4	47,3	48,2	48,7	51,7
MK1	18,5	38,0	43,7	49,9	50,3	51,2	53,9
MK2	17,8	39,0	47,6	52,2	54,1	55,5	55,9
MK3	17,9	41,0	49,3	56,5	58,1	58,3	59,1
MK4	16,7	39,0	45,8	49,6	52,2	54,4	55,4

\*Sonuçlar 12 örneğin ortalamasıdır.



Şekil 3. Harçların bağıl basınç dayanımı oranları.

Figure 3. Relative compressive strength ratios of mortars.

### **Standart su kürü uygulanan harçlarda:**

Tablo 7 'deki sonuçlar incelendiğinde, KH ile %5, %10 ve %15 oranlarında MK içeren harçların 1 günlük basınç dayanımlarının 18 MPa civarında benzer seviyede olduğu görülmektedir. 1 günlük kür süresi sonunda en düşük basınç dayanımı %20 oranında metakaolin içeren MK4 harcında elde edilmiştir. MK4 harcının 1 günlük basınç dayanımı KH 'nın basınç dayanımının sadece %8 altındadır. 3 ve daha sonraki kür sürelerinde ise %5, %10, %15 ve %20 metakaolin içeren harçların tamamı KH 'dan daha yüksek basınç dayanımlarına sahip oldukları belirlenmiştir. En yüksek basınç dayanımı değerleri 1 günden sonraki yaşlar için %15 oranında metakaolin içeren MK3 harcında elde edilmiştir.

Tablo 7 ve Şekil 3 'teki sonuçlar incelendiğinde metakaolin içeren harçların erken yaşlarda (1, 3 ve 7 günlük kısa periyotta) basınç dayanımlarının kontrol harcından daha yüksek oranda arttığı görülmüştür. Metakaolin içeren harçların 1 günlük dayanım kazanma oranları %92 ile %102 arasında, 3 günlük periyotta ise %106 ile %119 arasında, 7 günlük periyotta ise %106 ile %119 arasında elde edilmiştir. Tüm bu sonuçlar, genel olarak puzolan içeren harç ve betonların erken yaşlarda dayanım kazanmalarının düşük olduğu bilinmesine rağmen, metakaolinin erken yaşlarda da basınç dayanımı kazanımına olumlu katkısının olduğunu göstermektedir. Yine aynı tablodaki sonuçlar incelendiğinde; metakaolin içeren harçlarda dayanım artışlarının 90 güne kadar

sürdüğü, 180 günde ise bir miktar azaldığı görülmüştür. Yine bu sonuçlar metakaolinin ileriki yaşlarda beton ve harç dayanımına katkı sağladığını göstermektedir.

### **Hızlandırılmış kür uygulanan harçlarda:**

Üretilen harçlar üzerinde yapılan hızlandırılmış kür işlemleri sonucunda elde edilmiş olan basınç dayanımı sonuçları Tablo 8 'de verilmiştir. Ayrıca üretilen harçların 28 günlük standart basınç dayanımına kıyasla hızlandırılmış kür ile elde edilmiş olan dayanım kazanım oranları da grafik olarak Şekil 4 'te sunulmuştur.

Tablo 8 'deki sonuçlar incelendiğinde; hızlandırılmış kür uygulaması ile üretilen harçlarda en yüksek basınç dayanımı MK2 (%10 metakaolin içeren) harcında, en düşük dayanım ise MK4 (%20 metakaolin içeren) harcında elde edilmiştir. Hızlandırılmış kür işlemleri içerisinde en yüksek dayanımların otojen kür işlemi ile en düşük dayanımların ise ılık su kürü ile kazandırıldığı anlaşılmaktadır. En yüksek basınç dayanımları, ılık su küründe 29.3 MPa seviyesinde MK1 harcında, kaynar su küründe ise 30.6 MPa ile kaynar su küründe MK2 harcında, otojen kürde ise 32.4 MPa seviyesinde KH da elde edilmiştir.

Metakaolin içeren harçlar içerisinde hızlandırılmış kür uygulamaları ile en yüksek basınç dayanımlarının genel olarak %5 ve %10 metakaolin kullanılan MK1 ve MK2 harçlarında olduğu görülmüştür.

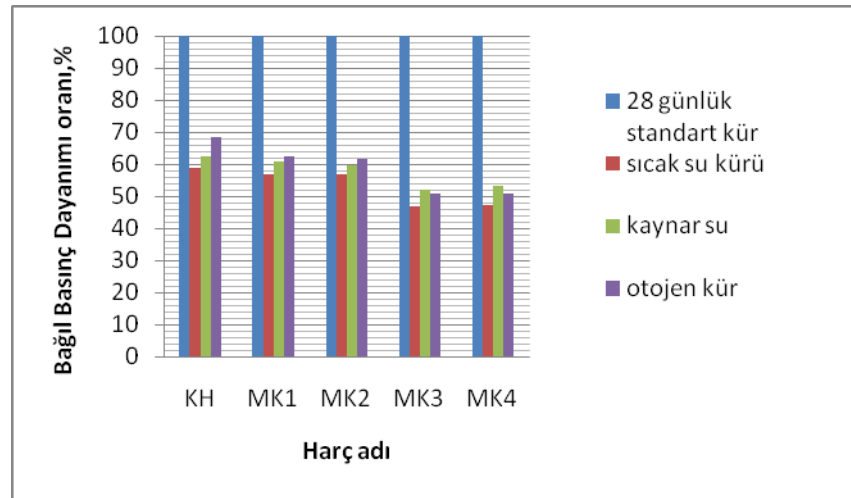
**Tablo 8.** Hızlandırılmış küre tabi tutulan harçların basınç dayanımları.

*Table 8. Compressive strength of mortars subjected to accelerated curing.*

Harç Adı	*Basınç Dayanımı (MPa)			
	28 günlük standart kür	Ilık su kürü	Kaynar su	Otojen kür
KH	47,3	29,1	29,7	32,4
MK1	49,9	29,3	29,9	31,1
MK2	52,2	26,6	30,6	32,2
MK3	56,5	25,6	29,9	28,7
MK4	49,6	21,4	27,0	25,2

\*Sonuçlar 12 örneğin ortalamasıdır.





**Şekil 4.** Hızlandırılmış küre tabii tutulmuş harçların bağıl basınç dayanım oranları  
**Figure 4.** Relative compressive strength ratios of mortars subjected accelerated curing.

Şekil 4 'teki grafik incelendiğinde, kontrol harcına 28 günlük standart dayanımının %59'u ılık su kürü ile, %62 'si kaynar su kürü ile, %68 'i otojen kür ile kazandırılmıştır. %5-20 arasındaki oranlarda metakaolin içeren harçlarda ise; en yüksek dayanım kazanımı MK1 harcında, ılık su kürü için %57, sıcak su kürü için %61, otojen kür için ise %62 mertebesinde elde edilmiştir. Metakaolin oranı yükseldikçe hızlandırılmış kür ile kazanılan dayanım oranlarında azalma görülmüştür. Ayrıca hızlandırılmış kür işlemleri ile sadece CEM I içeren KH 'nın değişik oranlarda metakaolin içeren harçlardan daha etkin olarak erken dayanım kazandığı da anlaşılmıştır.

Metakaolinin harçların erken ve ileriki yaşlardaki basınç ve eğilme dayanımına katkı yapmasının sebebi aşağıdaki şekilde açıklanabilmektedir. Portland çimentosunun bir kısmı yerine metakaolin kullanıldığında, beton veya harcın dayanımına metakaolin 3 farklı özelliği sayesinde katkı sağlamaktadır. Bu etkiler: Portland çimentosunun hidrasyonunu hızlandırması, puzolanik reaksiyon yapması ve inceliği nedeniyle boşlukları doldurmasıdır (Sabir ve diğ., 2001, Badogiannis ve diğ., 2004, Khatib ve Hibbert, 2005). Metakaolinin yapısında bulunan silis ve alüminin  $CaOH_2$  ile reaksiyona girerek, çimentoda hidrasyon sonucu oluşan CSH jellerine ilave CSH jelleri ile  $C_4AH_{13}$ ,  $C_2ASH_8$ ,  $C_3AH_6$  fazları da üretmekte ve bunun sonucunda dayanım artışları oluşmaktadır (Zhang ve Malhotra, 1995, Sabir ve

diğ., 2001, Siddique ve Kalus, 2009, Khatib ve Hibbert, 2005). Ayrıca çok ince taneli olan metakaolin tanecikleri, harçta oluşan boşlukları tıkayarak kompaziteyi artırmaktadır. Yine çok ince taneli metakaolin çimento hamurunun boşluk yapısında olumlu yönde iyileşme sağlamaktadır (Wild ve diğ., 1996, Khatib ve Wild, 1998, Curcio ve diğ., 1998, Wild ve Khatib, 1997, Poon ve diğ., 2001). Tüm bu etkiler sonucunda üretilen harç ve betonun mekanik özelliklerinde bu çalışmada olduğu gibi olumlu artışlar elde edilmektedir.

Daha önceden yapılan bazı çalışmalarda metakaolin özellikle ilk 14 gün içerisinde üretilen harç veya betonda daha etkili bir şekilde mekanik özelliklerde artışlara sebep olduğu rapor edilmiştir (Wild ve diğ., 1996, Khatib ve Wild, 1998, Curcio ve diğ., 1998, Wild ve Khatib, 1997, Poon ve diğ., 2001, Poon ve diğ., 2006, Cassagnabere ve diğ., 2009). Bu çalışmada da metakaolinin benzer olarak erken yaşlarda mekanik özellikleri geliştirdiği bulguları desteklenmiştir. Hatta metakaolinin %15 'lik kullanımında mekanik özelliklerde 90 güne kadar etkili artış sağladığı da görülmüştür.

Hızlandırılmış kür işlemleri içerisinde en yüksek dayanımların otojen kürde elde edilmiş olmasının nedeni aşağıdaki şekilde açıklanabilir. Çimentonun hidrasyonu aşamasında su ile birleşen karma oksitlerin kimyasal reaksiyonu sonucunda ısı açığa çıkmaktadır. Açığa çıkan ısının miktarı özellikle çimento içerisinde bulunan  $C_3A$  ve  $C_3S$  oranlarına bağlı olarak

artmaktadır (Neville, 1981, Erdoğan, 2003, Kim ve diğ., 2007) Hidratasyon ısısındaki artış beton sıcaklığını da artırmaktadır. Kontrollü bir şekilde ısı ve nem kaybı olmadan kür edilen örneklerde, hidratasyon olayı normalden daha hızlı gerçekleşmekte ve bunun sonucunda da CSH jelleri daha erken oluşmaktadır. Normal koşullarda her 100 kg/m<sup>3</sup> çimento kullanımının beton sıcaklığını 10-15 °C yükselttiği düşünülürse, otojen kürde 48 saat süre ile kür edilen örneklerin diğer kür yöntemlerine göre daha yüksek dayanıma sahip olacakları açıktır (Erdoğan, 2003).

Otojen kürde metakaolin içermeyen kontrol harcının metakaolin içeren harçlardan daha yüksek oranda erken dayanım kazanmasının nedeni ise şu şekilde açıklanabilir. Çalışmada kullanılan çimentonun inceliğinin yüksek olması ve sıcaklığında etkisi, çimento partiküllerinin metakaoline kıyasla erken yaşlarda (ilk 48 saatte) daha hızlı hidrate olmalarına sebep olmaktadır. Bunun sonucunda da, daha fazla çimento içeren kontrol harcı daha az çimento içeren harçlardan daha yüksek dayanım kazanmış durumdadır.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

20 °C de suda kür edilen %5- %20 oranlarında çimento yerine metakaolin içeren harçların 1 günlük basınç ve eğilme dayanımları

kontrol harcının basınç ve eğilme dayanımının gerisinde kalmıştır.

20 °C de suda kür edilen %5-%20 oranlarında çimento yerine metakaolin kullanılan harçların 3 günle 180 gün arasındaki kür sürelerinde basınç ve eğilme dayanımlarının kontrol harcının basınç ve eğilme dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür.

20 °C de suda kür edilen metakaolin içeren harçlarda en yüksek basınç ve eğilme dayanımları genel olarak %15 metakaolin içeren harçlarda elde edilmiştir, Bu harçların 180 günlük kür sonundaki basınç ve eğilme dayanımları kontrol harcından sırasıyla %14 ve %15 daha yüksek elde edilmiştir.

20 °C de suda kür edilen metakaolin içeren harçların erken dayanımları (1 günlük dayanımlar hariç) metakaolin kullanımı ile olumlu etkilenmiştir.

20 °C de suda kür edilen metakaolin içeren harçlarda basınçta 56 güne kadar, eğilmede ise 28 güne kadar dayanım kazanım hızları artmış daha sonraki günlerde ise dayanım kazanım hızları düşüş göstermiştir.

Hızlandırılmış kür uygulamaları ile %10 metakaolin içeren harçlarda en yüksek basınç ve eğilme dayanımı kazanımı oluşmuştur.

Otojen kürün diğer hızlandırılmış kür uygulamalarına nazaran dayanım kazanımına daha yüksek katkısı olduğu görülmüştür.

## KAYNAKLAR

- Badogiannis, E., Papadakis, V.G., Chaniotakis, E., Tsvilis, S., 2004 "Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value", *Cement & Concrete Research*, Vol. 34, pp.1035-1041.
- Cassagnabere, F., Escadeillas, G., Mouret, M., 2009, "Study of the reactivity of cement/metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete", *Construction and Building Materials*, 23, 775-784.
- Curcio, F., DeAngelis, B.A., Pagliolico, S., 1998, "Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars", *Cement & Concrete Research*, 28, 803-809.
- Erdoğan, Y.T., 2003, "Beton", METU pres Publishing Company, Ankara, 741 p.
- Khatib, J.M. and Wild, S., 1998 "Sulfate resistance of metakaolin mortar", *Cement & Concrete Research*, 28, 120-132.
- Khatib, J.M., Clay, R.M., 2004, "Absorption characteristics of metakaolin concrete", *Cement & Concrete Research*, 4, 19-29.
- Khatib, J.M., Hibbert, J.J., 2005, "Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin", *Construction and building materials*, 19, 460-472.

- Kim, H.S., Lee, S.H., Moon, H.Y., 2007, "Strength properties and durability aspect of high strength concrete using Korean metakaolin", *Construction and building materials*, 21, 1229-1237.
- Neville, A. M., 1981, "Properties of Concrete" Longman Scientific and Technical, England.
- Poon, C.S., Kou, S.C, Lam, L., 2006, "Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete", *Construction and building materials*, 20, 858-865.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Wong, Y.L., Wong, R., 2001, "Rate of pozzolanic reaction of metakaolin in high-performance cement pastes", *Cement & Concrete Research*, Vol. 31, pp.1301-1306.
- Sabir, B.B., Wild, S., Bai, J., 2001, "Metakaolin and calcsined clays as pozzolans for concrete: a review", *Cement & Concrete Composites*, Vol. 23, pp.441-454.
- Siddique, R., Kalus, J., 2009, "Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review", *Applied Clay Science*, 43, 392-400.
- Wild, S. and Khatib, J.M., 1997, "Portlandite consumption in metakaolin cement pastes and mortars", *Cement & Concrete Research*, Vol. 27, No, 1, pp.137-146.
- Wild, S., Khatib, J.M. and Jones, A., 1996, "Relative strength pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised MK", *Cement & Concrete Research*, 26, 1537-1544.
- Zhang, M.H. and Malhotra, V.M., 1995, "Characteristics of a thermally activated alumino-silicate pozzolanic material and its use in concrete", *Cement & Concrete Research*, 25, 1713-1725.

