

Farklı Sınıf Çimento Harcı Üretiminde Metakaolin Katkısı Kullanımının Araştırılması

Gökhan Görhan ve Gökhan Kürklü

Afyon Kocatepe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar

ggorhan@aku.edu.tr

Özet— Bu çalışmada, metakaolin ikameli ve farklı dayanım sınıfına ait portland çimentolu harçların fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Harç örneklerinin üretiminde; CEM II/B-M 32.5 R (A çimentosu) ve CEM I 42.5 R (B çimentosu) olmak üzere iki farklı portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ikame edilecek olan metakaolin ise, laboratuvar şartlarında ve kaolin kilinin beş farklı sıcaklıkta (600, 700, 800, 900 ve 1000 °C) sinterlenmesi sonucunda elde edilmiştir. Sinterlenen metakaolin örneklerine 7 günlük pozolanik aktivite deneyleri yapılmış ve en yüksek pozolanik aktivite indeksi, 900 °C’de sinterlenen örneklerde elde edilmiştir. Ardından hazırlanan karışımlarda çimento, 900 °C’de sinterlenen metakaolin malzemesi % 10 ve % 20 oranlarında ikame edilmiş ve referans çimento harçları ile kıyaslanmıştır. Harç üretiminde standart kum kullanılmış olup örnekler, TS EN 196-1 nolu standarda göre ve 40 x 40 x 160 mm’lik metal harç kalıplarına vibrasyon yöntemiyle yerleştirilmiştir. Daha sonra örneklere 7 ve 28 günlük su kürü uygulanmıştır. Kür işlemi tamamlanan örneklere; su emme, porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk gibi fiziksel testler ile eğilme dayanımı ve basınç dayanımı gibi mekanik testler yapılmıştır. Bununla birlikte örneklerin ultrases değerleri de belirlenerek çimento harcı üretiminde kullanılan metakaolin katkısının örnekler üzerinde meydana getirdiği değişiklikler araştırılmıştır. Sonuç olarak, A çimentosu ile % 20 MK ve B çimentosu ile % 10 MK malzemelerinin bir arada kullanılması durumunda örneklerden en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler— Çimento, metakaolin, standart kum, sinterleme, kaolin.

Abstract— In this study, it was studied physical and mechanical properties of Portland cement mortars with different strength classes and metakaolin (MK) substituted. Two different Portland cement such as CEM II/B-M 32.5 R (A cement) and CEM I 42.5 R (B cement) is used in the production of mortar samples. Metakaolin which is substituted by cement was obtained as a result with sintering of kaolin clay in five different temperatures (600, 700, 800, 900 ve 1000 °C) in the laboratory conditions. 7-day sintered metakaolin samples were conducted pozzolanic activity test and the highest pozzolanic activity index was obtained in the samples sintered at 900 °C. Then, it was substituted at a rate of 10 % and 20 % metakaolin material sintered 900 °C and it was compared with the reference cement

mortar. Standard sand was used in the production and the samples were placed with vibration method in 40 x 40 x 160 mm metal mould according to TS EN 196-1. Later, 7 and 28 days water cure is applied to samples. Finally, the physical tests such as water absorption, porosity, bulk density and apparent density with the mechanical properties such as flexural strength and compressive strength were determined. However, the ultrasound values were determined from the samples. As a result, the highest compressive strength values were obtained from the samples with 20 % MK together A cement and 10 % MK together B cement.

Index Terms— Cement, metakaolin, standard sand, sintering, kaolin.

I. GİRİŞ

Çimento harcı üretiminde kullanılan pozolanlardan biri de metakaolindir. Metakaolin (MK), kaolin kilinin belirli sıcaklıklarda sinterlenmesi sonucu oluşan yapay bir pozolanıdır. Kaolin, esasen bir kil mineralidir ve sahip olduğu kristal yapısı nedeniyle kaolenit grubu içerisinde yer alır. Kaolin ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$), kil mineralleri sınıflandırmasında bir grup kil minerali ismidir. Bu grupta kaolinit’in dışında; dikit, nakrit ve halloisid gibi mineraller bulunmaktadır. Oluşum itibarıyla, feldspat içeren granitik veya volkanik kayaların feldspatlarının altere olarak kaolinit mineraline dönüşmesi sonucu kaolinler oluşmaktadır. Ana kayaç içindeki alkali ve toprak alkali iyonların, çözünür tuzlar şeklinde ortamdaki uzaklaşması sonucu Al_2O_3 içerikli, sulu ve silikatça zenginleşen kayaç kaoliniti oluşturur [1].

Çimento üretimlerinde MK gibi pozolanlar çok sık kullanılmaktadır. Katkı malzemesi olarak kullanılarak pozolanlar elde edildikleri kaynaklara göre doğal veya yapay pozolan olarak adlandırılırlar. Doğal pozolanlar silisli ve alüminli bileşiklerle zengindir. Pozolanlar için silisli ve alüminli minerallerin türü ve miktarı pozolanik aktivite üzerinde önemli rol oynamaktadır [2]. Pozolanik aktivite, çimentolu üretimlerde kalsiyum hidroksit ve pozolandaki alüminosilikatlar arasındaki reaksiyonun hızı ve kapasitesi olarak tanımlanmaktadır. Bununla birlikte; pozolanın “ $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ ” içeriği, amorf faz durumu ve malzemenin inceliği pozolanik aktiviteyi etkilemektedir [3].

Son yıllarda yüksek dayanımlı betonların ve harçların üretiminde başta olmak üzere birçok farklı uygulamalarda metakaolin kullanılmaktadır. Metakaolin ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$), saflaştırılmış kaolin kilinin 650–800 °C arasındaki sıcaklıklarda sinterlenmesi sonucu elde edilen ve genellikle beyaz renkte olan bir üründür. Kaolin kili 200°C’de ısıtıldığında adsorbe suyunu kaybederken, 500-600°C ısıtmada kimyasal bağ suyunu kaybederek MK’e, 1000 °C ısıtmada ise mullit ve kristobalite dönüşmektedir. Uygulanan bu sinterleme işlemi sonucunda MK bünyesindeki kristal yapılarda bozulma gerçekleşerek amorf yapılı ve yüksek puzolanik özellikli bir yapıya kavuşur. MK yapısında bulunan yüksek oranlı silis ve alümin ile birlikte çimento hidratasyonu sonucu ortaya çıkan $Ca(OH)_2$ ile reaksiyona girerek yeni C-S-H yapıları oluşturur. Bu ürünler sayesinde beton veya harçlarda mekanik özelliklerde artışlar görülür [4, 5].

Literatürde konu ile ilgili yapılmış çalışmalara göre; Caldaron vd. [6] su/bağlayıcı oranı 0.40 olan karışımlarda MK malzemesini % 5 ve % 10 oranlarında kullanmış ve sonuç olarak % 5 MK katkılı örneklerde 78.3 MPa basınç dayanım değerleri elde etmiştir. Curcio vd. [7] yaptıkları çalışmada ise su/bağlayıcı oranı 0.33 olan harçlar üretmiştir. Elde edilen verilere göre erken yaşlarda MK katkılı harçların dayanım kazanma hızının yüksek olduğu belirtilmiştir. MK katkılı harçların erken dayanım kazanmasında Al_{IV} ve Al_V olmak üzere iki farklı Al_2O_3 içeriği olmasına bağlanmış ve alümina içeren fazların oluşumunun (özellikle C_2ASH_8) erken dayanımı arttırdığı belirtilmiştir. Qian ve Li [8], % 0, 5, 10 ve % 15 MK içerikli betonlar hazırlamıştır. Betonlarda kullanılan MK katkı oranlarının artmasıyla çekme ve eğilme dayanımlarının arttığını belirtmiştir. Courard vd. [9] çalışmalarında çimentoya % 5 – 20 aralığında MK katkısı yapmıştır. MK katkılı örneklerin eğilme dayanımlarının 7. günde referans örneklerle benzer değerler verdiği, 14 ve 28 günlük örneklerde ise MK katkılı örneklerin daha yüksek eğilme dayanım değerleri verdiğini belirtmiştir [5].

Yapılan bu çalışmada ise literatürden farklı olarak kaolin kili laboratuvar koşullarında farklı sıcaklıklarda kalsine edilmiştir. Ardından kısa dönem içinde en yüksek reaktiflik gösteren sinterleme sıcaklığı baz alınmış ve elde edilen MK malzemesinin iki tip çimentoya ikame edilmesi durumunda örneklerde meydana getirdiği değişiklikler araştırılmıştır.

II. MATERYAL VE METOT

Kullanılan Malzemeler

Örneklerin üretiminde CEM II/B-M (P-LL) 32.5 R (A çimentosu) ve CEM I 42.5 R (B çimentosu) tipi olmak üzere iki farklı sınıf çimento kullanılmıştır. Çimentoya ikame edilen metakaolin (MK) ise Türkiye’de bulunan özel işletmeli bir seramik fabrikasından elde edilen kaolin kilinin laboratuvar koşullarında sinterlenmesi sonucu elde edilmiştir. Harçların üretiminde çimento ve MK malzemelerine ek olarak TS EN 196-1’e [10] uygun standart kum ve içme suyu kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan malzemelerin literatürde bulunan kimyasal özellikleri ise Tablo 1’de verilmiştir.

TABLO I
KULLANILAN MALZEMELERİN KİMYASAL (XRF) KOMPOZİSYONU

Oksit (%)	Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Mg O	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Ca O	K.K .
CEM II/B-M 32.5 R [7]	19.4	4.85	3.12	1.89	0.29	0.73	2.56	54.22	12.35
CEM I 42.5 R [4]	19.70	5.39	2.64	1.42	0.26	0.84	3.25	62.56	3.55
Kaolin [8]	51.3	32.6	1.1	0.3	0.2	0.3	-	0.1	13.0
Metak aolin [9]	51.8	45.8	0.35	0.03	0.13	0.06	-	0.01	0.91

Kaolin Malzemesine Uygulanan Analizler

Kaolinin içyapısında bulunan fazların tespiti amacıyla Afyon Kocatepe Üniversitesi, Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde XRD analizi, Bruker marka D8 Advance cihazında yapılırken, kaolinin termal davranışlarının belirlenmesi amacıyla da aynı merkezde DTA-TG analizleri yapılmıştır. DTA/TG analizlerinde örnekler hava ortamında ve 5 °C/dak. pişirme hızında deney tabi tutulmuşlardır.

Puzolanik Aktivite Deneyleri

Çimento harcı üretiminde kullanılacak olan metakaolin malzemesinin en iyi puzolanik aktivite göstereceği sinterleme sıcaklığının belirlenmesi amacıyla, kaolin kili ağırlıkça % 20 oranında su ile hobart mikserde karıştırılmış ve 5 cm çapındaki silindir metal kalıp yardımıyla kaolin kili elle şekillendirilmiştir. Şekillendirilen kaolin kili örnekleri 2.5 °C/dk. pişirme hızında 600-700-800-900 ve 1000 °C’de olmak üzere beş farklı sıcaklıkta ve son sıcaklıklarda bir saat süre ile laboratuvar tipi fırında kalsine edilerek metakaoline dönüştürülmüştür. Daha sonra metakaolin malzemeleri yine laboratuvar tipi bilyeli değirmende tane boyutu maksimum 250 µm oluncaya kadar öğütülmüştür.

Puzolanik aktivite deneyleri ile ilgili olarak iki farklı standart bulunmaktadır. Bunlar TS EN 450 [14] ve ASTM C 618’dir [15]. Çalışmamızda literatürde daha yaygın olarak kullanılan standart yönteminin kullanılması düşünülmüş ve deneylerde ASTM C 618 [15] nolu standarda göre örnekler hazırlanmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak Afyon çimento fabrikası tarafından üretilen CEM I 42.5 R tipi çimento, dolgu malzemesi olarak Limak çimento fabrikası tarafından üretilen standart kum (silis kumu) kullanılmıştır. Harçların hazırlanması sırasında beş farklı sıcaklıkta kalsine edilen metakaolin örnekleri ayrı ayrı deneylerde kullanılmış ve en iyi puzolanik aktivite özellikleri gösteren metakaolin örneklerinin belirlenmesine çalışılmıştır. Örneklerin puzolanik aktivitelerinin belirlenmesinde 7 günlük örnekler

kullanılmıştır. Puzolanik aktivite deneylerinde kullanılan malzemeler ve miktarları Tablo 2’de verilmiştir.

TABLO II

KULLANILAN MALZEMELERİN KİMYASAL (XRF) KOMPOZİSYONU

Numune	Çimento (gr)	Kum (gr)	Metakaolin (MK) (gr)	MK sinterleme sıcaklığı (°C)
Referans	500	1375	-	-
600	400	1375	100	600
700	400	1375	100	700
800	400	1375	100	800
900	400	1375	100	900
1000	400	1375	100	1000

Örneklerin Hazırlanması

MK ikameli çimento harç örnekleri TS EN 196-1 [10] nolu standarda göre Tablo 3’de verilen reçeteye göre 40 x 40 x 160 mm’lik metal harç kalıplarına vibrasyon yöntemiyle yerleştirilmiştir. Bir gün sonra kalıplardan alınan harç örneklerine ilgili testlerin yapılacağı günlere kadar 7 ve 28 günlük su kürü uygulanmıştır.

TABLO III
HAZIRLANAN ÖRNEKLER VE KARIŞIM ORANLARI

Harç Grubu	Numune	Çimento (32.5 R) (gr)	Çimento (42.5 R) (gr)	Kum (gr)	Metakaolin (MK) (gr)	Su (gr)	Kür Süresi (gün)
RA7	Referans	450	-	1350	-	225	7
RB7	Referans	-	450	1350	-	225	7
RA28	Referans	450	-	1350	-	225	28
RB28	Referans	-	450	1350	-	225	28
10MKA7	% 10 MK	405	-	1350	45	230	7
20MKA7	% 20 MK	360	-	1350	90	235	7
10MKB7	% 10 MK	-	405	1350	45	230	7
20MKB7	% 20 MK	-	360	1350	90	235	7
10MKA28	% 10 MK	405	-	1350	45	230	28
20MKA28	% 20 MK	360	-	1350	90	235	28
10MKB28	% 10 MK	-	405	1350	45	230	28
20MKB28	% 20 MK	-	360	1350	90	235	28

Uygulanan Testler

Kür işlemi tamamlanan örneklerin fiziksel özellikleri Arşimet prensibine göre belirlenerek; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri belirlenmiştir. Örneklerin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi sırasında; örnekler su tankından alınarak, su içerisinde asılı ağırlıkları (W_2) ve suya doymun yüzey kuru ağırlıkları (W_3) belirlenecektir. Ardından ilgili örnekler etüvde değişmez ağırlığa gelinceye kadar kurutulacaktır (W_1). Bu değerler yardımıyla örneklerin görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri TS EN 772-4’e [16] göre su emme değerleri ise TS EN 771-1’e [17] göre ve aşağıda verilen eşitlikler yardımıyla (Eşitlik 1 – 4) hesaplanmıştır. Daha sonra örneklerin ultrases geçiş süreleri ölçülmüş ve ardından eğilme ve basınç mukavemeti deneyleri TS EN 196-1’e [10] göre yürütülmüştür. Bu standarda göre örnekler, üç noktalı eğilme deneyinde kırılmış ve ikiye ayrılan her parçaya basınç dayanım

testi uygulanmıştır.

$$\text{Görünen porozite (\%)} = \left(\frac{W_3 - W_1}{W_3 - W_2} \right) \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Birim hacim ağırlık (kg/m}^3\text{)} = \left(\frac{W_1}{W_3 - W_2} \right) \quad (2)$$

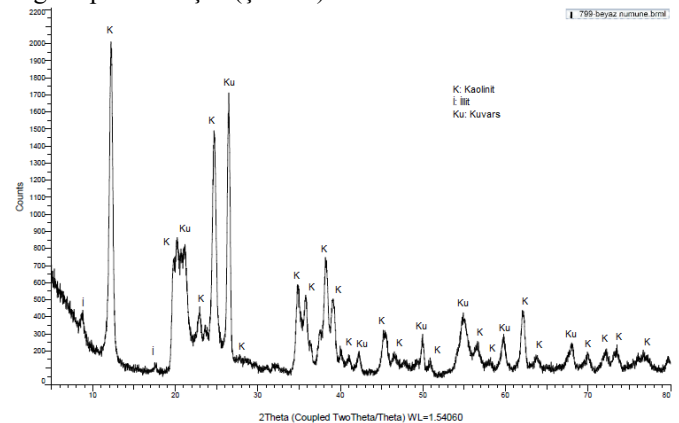
$$\text{Görünür yoğunluk (kg/m}^3\text{)} = \left(\frac{W_1}{W_1 - W_2} \right) \quad (3)$$

$$\text{Su emme (\%)} = \left(\frac{W_3 - W_1}{W_3} \right) \times 100 \quad (4)$$

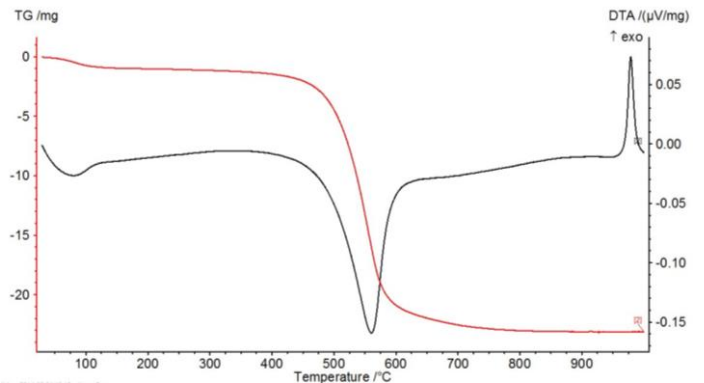
III. BULGULAR VE TARTIŞMA

Kaoline ait XRD ve DTA/TG Analizleri

Kaolin malzemesine ait XRD analizinden elde edilen verilere göre kaolinde; kuvars, kaolinit ve illit gibi minerallerin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Kaolin malzemesine ait XRD grafiği.



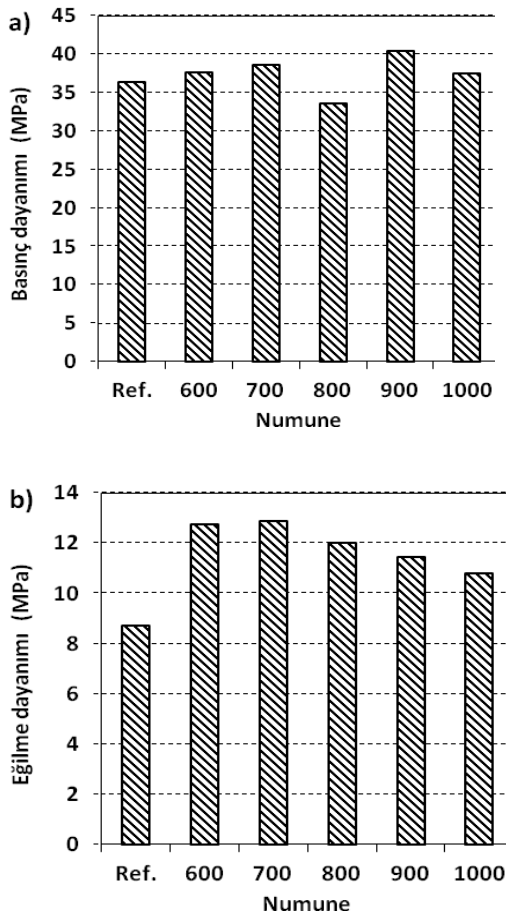
Şekil 2. Kaolin malzemesine ait DTA/TG grafiği.

Kaolin Kaolin malzemesinin termal davranışlarının belirlenebilmesi amacıyla, kaolin örneğine DTA-TG analizleri yapılmıştır. Analizlerden elde edilen veriler Şekil 2’de gösterilmiştir. Verilen grafikte görüldüğü üzere kaolin kili termodinamik olarak 567 °C’de endotermik pik göstererek metakaoline dönüşüm yapmıştır. DTA verilerine göre, 978 °C’de ise ekzotermik pik oluşumu gözlenmiş ve bu sıcaklıktan sonra malzemede kristal yapıların artacağı düşünülmektedir.

TG analiz verileri incelendiğinde ise kaolin kilinin 900 °C'de ki kızdırma kaybı değerinin % 11.52 olduğu belirlenmiştir.

Puzolanik Aktivite Deneyleri

Puzolanik aktivite deneylerinden elde edilen veriler Şekil 3'de gösterilmiştir. En ideal sinterleme sıcaklığının belirlenmesinde basınç dayanım değerleri baz alınmıştır. Bununla birlikte bir başka mekanik özelliklerden olan eğilme dayanımı değerleri de yine Şekil 3 (b)'de gösterilmiştir. Grafiklerde de görüldüğü üzere MK katkılı harç örneklerinin büyük çoğunluğunda (800 °C hariç) referans örnekler göre daha yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. En yüksek basınç dayanım değerleri, 900 °C'de kalsine edilen MK katkılı örneklerde 40.4 MPa (Şekil 3a) olarak elde edilirken, aynı örneklerin eğilme dayanımları 11.5 MPa (Şekil 3b) olarak elde edilmiştir. Dolayısıyla bu aşamadan sonra çimentoya ikame edilecek MK malzemesine uygulanacak olan sinterleme sıcaklığının 900 °C olmasına karar verilmiştir.



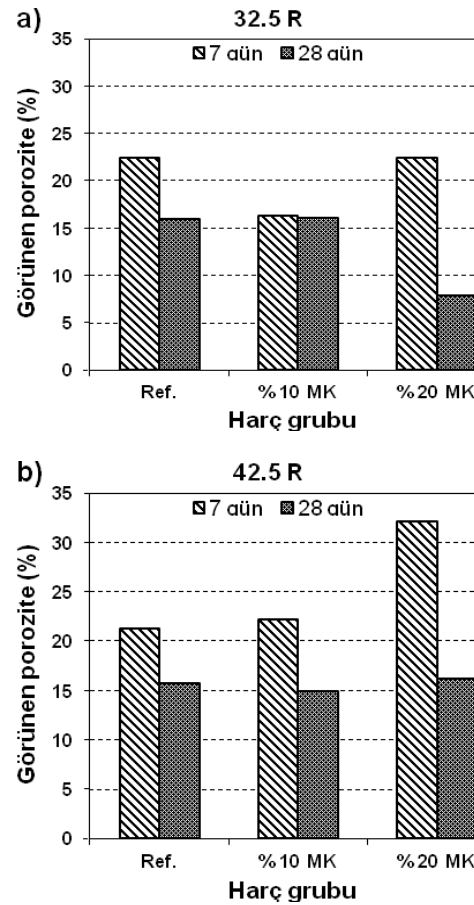
Şekil 3. Puzolanik aktivite deneyinde kullanılan harçların mekanik özellikleri.

Harçların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Çalışmada üretilen harçlardan elde edilen veriler bu bölümde sunulmuştur. Örneklerin fiziksel özelliklerinden olan

görünen porozite oranları Şekil 4'de gösterilmiştir. Görünen porozite oranları incelendiğinde örneklere uygulanan kür süresinin uzaması ile porozite oranlarında düşüşler gerçekleşmiştir. Kür süresinin artması ile birlikte çimento bünyesinde daha fazla C-S-H ürünü oluşması beklendiğinden dolayı harçların porozite oranlarının düşmesi normal karşılanmalıdır. MK ikameli harçlarda, B çimentosu kullanılması durumunda ise daha yüksek porozite oranlarının ortaya çıktığı gözlenmiştir. Referans harçlarında ise B çimentosu kullanılan örneklerde görünen porozite bir miktar azalmıştır (Şekil 4b).

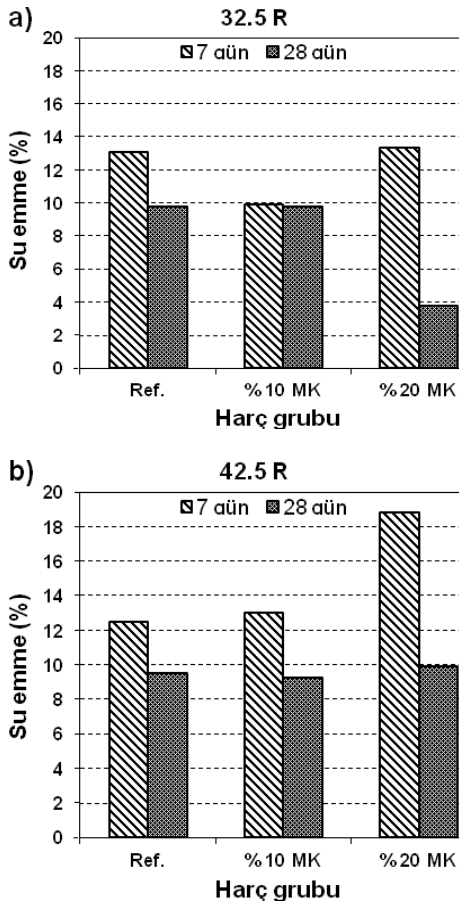
10MKA7 ve 10MKA28 kodlu harçlarda birbirine yakın porozite oranları elde edilirken, diğer tüm örneklerde 28 günlük kür uygulaması harçların porozite değerlerini azaltmıştır (Şekil 4a). Örnek grupları içerisinde 7 gün kür uygulanan MK ikameli harçlarda kür süresinin artması ile porozite oranları artarken; A çimentolu 28 günlük harçlarda MK katkısı arttıkça porozite azalmış, B çimentolu harçlarda ise katkı oranı arttıkça porozite oranları artmıştır. En yüksek porozite oranları % 28.2 ile 20MKB7 örneklerinden elde edilirken, en düşük porozite oranları % 8 ile 20MKA28 örneklerinden elde edilmiştir.



Şekil 4. Harçların görünen porozite oranları.

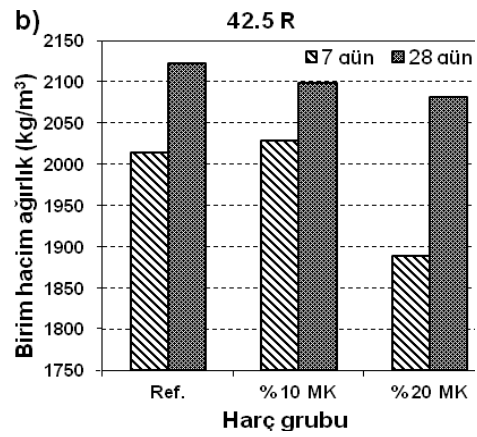
Çimento harçlarının su emme oranları Şekil 5'de

gösterilmiştir. Grafiklerde de görüleceği üzere su emme oranları, görünen porozite oranlarından elde edilen verilerle benzer eğilimler göstermiştir. En fazla su emme oranları % 18.9 ile 20MKB7 örneklerinden elde edilirken, en düşük su emme oranları % 3.8 ile 20MKA28 örneklerinden elde edilmiştir.

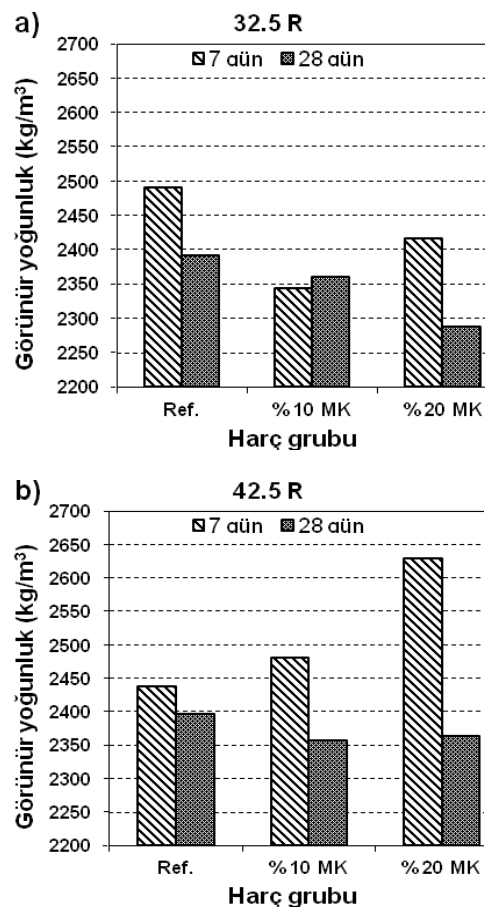


Şekil 5. Harçların görünür su emme oranları

Çimento harçlarının yoğunluk değerleri Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir. Örneklere uygulanan kür süresinin artması ile birlikte bünyede reaksiyon ürünlerinin artmasından dolayı harçların birim hacim ağırlıklarının arttığı belirlenmiştir. A çimentosu ile üretilen harçlardan 2109.4 kg/m³ ile en yüksek birim hacim ağırlıklar RA28 örneklerinden elde edilirken; B çimentosu ile üretilen harçlarda 2119.8 kg/m³ ile en yüksek birim hacim ağırlıklar RB28 örneklerinden elde edilmiştir. MK katkılı örneklerde ise her iki tip çimento sınıfında da % 10 MK katkılı örneklerin daha yüksek yoğunluk değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Harçların birim hacim ağırlık değerleri



Şekil 7. Harçların görünür yoğunluk değerleri.

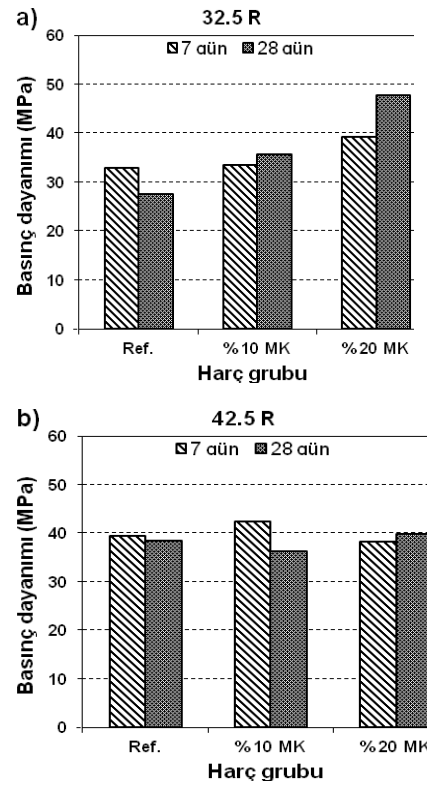
MK katkılı örneklerde kullanılan çimentonun yüksek dayanımlı olması durumunda, örneklerin görünür yoğunlukları daha yüksek seviyelerdedir. Dolayısıyla harç üretiminde B çimentosunun kullanılması durumunda, MK katkılı harçların referans örneklerden daha yüksek görünür yoğunluk değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir (Şekil 7). Harçlara uygulanan kür süresinin artırılması örneklerin görünür porozitesini azaltmış, dolayısıyla porozitesi azalan örneklerin birim hacim ağırlıkları artmıştır. Görünür yoğunluk değerlerinde ise uzayan kür süresi ile birlikte yoğunluk

değerlerinin azaldığı görülmüştür. Örnek bünyesinde porozite oranının azalmasına rağmen görünür yoğunluk değerlerindeki bu düşüşlerin bünyede bulunan MK katkısının yüksek oranda reaksiyonlar gerçekleştiremediği ve bu nedenle yoğunluk değerlerinin daha düşük oranlarda kaldığı tahmin edilmektedir.

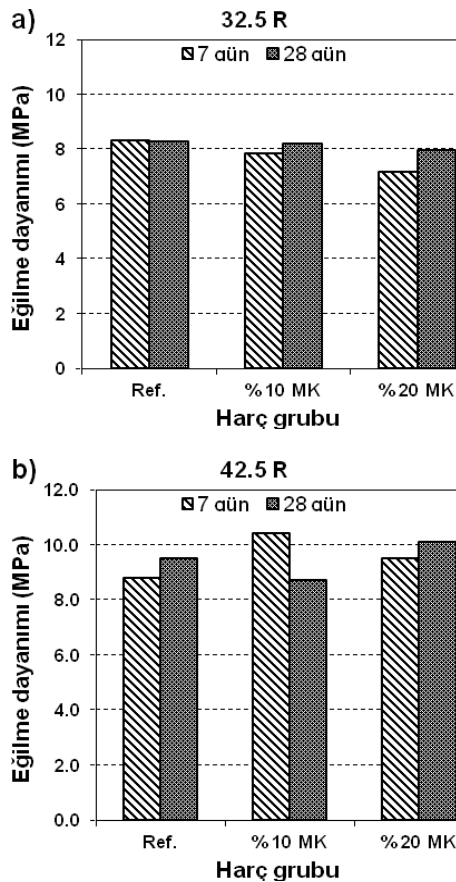
A çimentosunun kullanıldığı harçlarda karışımlara eklenen MK katkısı örneklerin eğilme dayanımlarında düşüşlere neden olmuştur (Şekil 8a). B çimentosunun kullanıldığı örneklerde ise eğilme dayanımı değerlerine MK katkısının etkisi net değildir ve değişkendir (Şekil 8b).

A çimentolu örneklerde, harçların basınç dayanımları MK katkı oranının ve kür süresinin artması ile birlikte artarken, referans örneklerde en düşük basınç dayanım değerleri elde edilmiştir (Şekil 9a). 7 günlük B çimentolu örneklerde % 10 MK katkılı harçlarda, 28 günlük örneklerde ise % 20 MK katkılı örneklerde en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Basınç dayanım değerleri bir arada değerlendirildiğinde; A çimentosu ile % 20 MK ve B çimentosu ile % 10 MK malzemeleri bir arada kullanıldığında en yüksek basınç dayanım değerleri sırasıyla 47.9 MPa ile 20MKA28 ve 42.6 MPa ile 10MKB7 örneklerinden elde edilmiştir (Şekil 9a ve Şekil 9b). Daha önceden yapılan çalışmalarda da çimentoya ağırlıkça % 10 - % 20 oranlarında MK ikamesinin basınç dayanımları arttırdığı [13], bununla birlikte MK ile üretilen harç ve betonlarda özellikle ilk 14 gün içinde mekanik özelliklerin daha etkili bir şekilde artışlar gösterdiği belirtilmiştir [4].

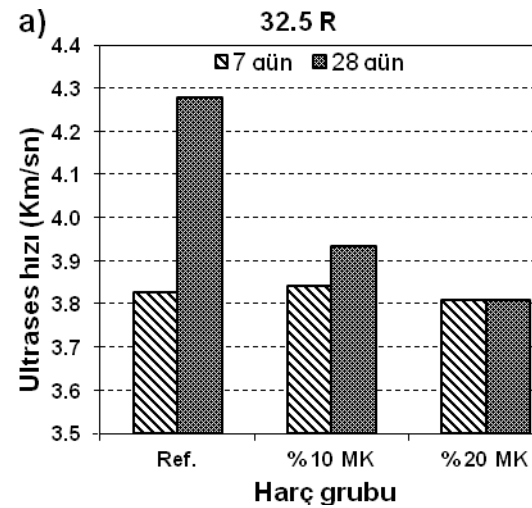
Şekil 8. Harçların eğilme dayanımı değerleri.

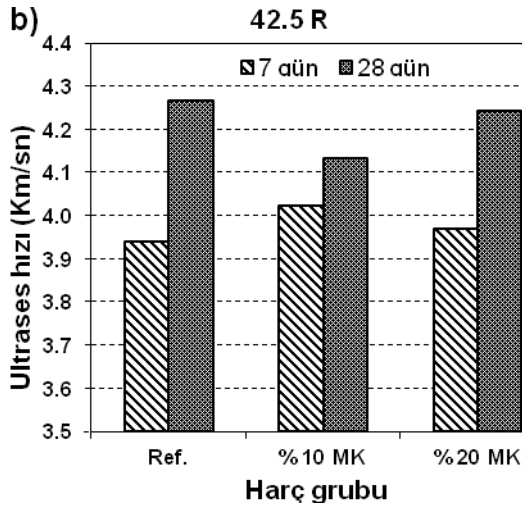


Şekil 9. Harçların basınç dayanım değerleri.



Çimento harçlarında bulunan MK katkısının ultrases değerlerini etkilediği ve B çimentolu örneklerde MK katkısının artması ile birlikte örneklerin ultrases hızı değerlerinin arttığı belirlenmiştir. A çimentolu örneklerde ise MK katkı oranındaki artışların ultrases değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir. 7 günlük örneklerde % 10 MK katkılı harçlarda en yüksek değerler elde edilirken, 28 günlük harçlarda en yüksek değerler referans örneklerden elde edilmiştir (Şekil 10a ve Şekil 10b).





Şekil 10. Harçların ultrases hızı değerleri.

IV. SONUÇLAR

İki farklı çimento sınıfı ve metakaolin ikamesinin çimento harç özelliklerinde meydana getirdiği değişikliklerin araştırıldığı bu çalışmadan elde edilen verilere göre;

- Kaolin kiline uygulanacak ideal sinterleme sıcaklığının 900 °C olduğu ve bu sıcaklıkta sinterlenmiş metakaolin örneklerinin en yüksek basınç dayanım değerlerini verdiği gözlenmiştir.
- 10MKA7 ve 10MKA28 kodlu harçlarda birbirine yakın porozite oranları elde edilirken, diğer tüm örneklerde 28 günlük kür uygulaması ile harçların porozite değerleri azalmıştır.
- MK ikameli harçlarda, B çimentosu kullanılması durumunda daha yüksek porozite oranlarının ortaya çıktığı, referans harçlarında ise B çimentosu kullanılan örneklerde görünen porozitenin bir miktar azaldığı gözlenmiştir. A çimentolu 28 günlük harçlarda MK katkısı arttıkça porozite azalmış, B çimentolu harçlarda ise katkı oranı arttıkça porozite artmıştır.
- Harçların su emme oranları, görünen porozite oranlarından elde edilen verilerle benzer eğilimler göstermiştir.
- Örneklere uygulanan kür süresinin artması ile birlikte bünyede reaksiyon ürünlerinin artmasından dolayı harçların birim hacim ağırlıkları artmıştır.
- MK katkılı örneklerde her iki tip çimento sınıfında da % 10 MK katkılı örneklerin daha yüksek yoğunluk değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir
- MK katkılı örneklerde kullanılan çimentonun yüksek dayanımlı olması durumunda, örneklerin görünür yoğunlarının daha yüksek seviyelerde olduğu ve bu nedenle B çimentosunun kullanılması durumunda, MK katkılı harçların referans örneklerden daha yüksek görünür yoğunluk değerlerine sahip oldukları gözlenmiştir
- Harçlara uygulanan kür süresinin artırılması örneklerin görünen porozitesini azaltmış, dolayısıyla porozitesi

azalan örneklerin birim hacim ağırlıkları artmıştır. Görünür yoğunluk değerlerinde ise uzayan kür süresi ile birlikte yoğunluk değerlerinin azaldığı görülmüştür.

- A çimentosunun kullanıldığı harçlarda MK katkısı eğilme dayanımlarını düşürürken; B çimentosunun kullanıldığı örneklerde eğilme dayanımına MK katkısının etkisi net değildir.
- A çimentosu ile % 20 MK ve B çimentosu ile % 10 MK malzemelerinin bir arada kullanılması durumunda örneklerden en yüksek basınç dayanım değerleri elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmayı maddi olarak destekleyen Afyon Kocatepe Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne (AKÜ BAPK Proje No: 14.HIZ.DES.69) teşekkür eder.

V. KAYNAKLAR

- [1] E. Başpınar, M. Kuşçu, "Karaçayır (Uşak) kaolen yatağı kaolen üretim yöntemi", *SDUGEO E-dergi*, ss. 27- 35, (<http://edergi.sdu.edu.tr/index.php/sdugoe/article/viewFile/3122/2715>), 15.11.2014.
- [2] A.G. Türkmenoğlu, A. Tankut, "Use of tuffs from central Turkey as admixture in pozzolanic cements: Assessment of their petrographical properties", *Cement and Concrete Research*, Vol.32, No.4, pp. 629-637, 2002.
- [3] Ç. Meral, "Use of perlite as a pozzolanic addition in blended cement production", M.E.T.U., Thesis of Master of Science, 2004.
- [4] Ş. Yazıcı, D. Anuk, H. Ş. Arel, "Metakaolin Kullanımının Harçların Mekanik Özellikleri Üzerine Etkisi", *S. Ü. Müh. Fak. Derg.*, Vol.25, No.2, ss. 13-24, 2010.
- [5] B. Akçay, Ö. Peker, C. Şengül, M. A. , Taşdemir, "Metakaolin İçeren Betonun Kırılma Davranışı", *Beton Kongresi*, İstanbul, ss. 424-435, 2013.
- [6] M.A. Caldarone, K.A. Gruber, R.G. Burg, "High reactivity metakaolin (HRM): a new generation mineral admixture for high performance concrete", *Concrete International*, Vol.16, No.11, pp.37-40, 1994.
- [7] F. Curcio, B.A. DeAngelis, S. Pagliolico, "Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars", *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.6, pp. 803-809, 1998.
- [8] X. Qian, Z. Li, "The relationships between stress and strain for high-performance concrete with metakaolin", *Cement and Concrete Research*, Vol.31, pp. 1607-1611, 2001.
- [9] L. Courard, A. Darimont, M. Schouterden, F. Ferauche, X. Willem, R. Degeimbre, "Durability of mortars modified with metakaolin", *Cement and Concrete Research*, Vol.33, No.9, pp. 1473-1479, 2003.
- [10] TS EN 196-1. Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım (Methods of testing cement – Part 1: Determination of strength) TSE, Ankara – Turkey, 2002.
- [11] C. Kılınç, S. Satılmış, T. Akakin, "Farklı Oranlarda Mineral Katkı ve Agreganın Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi", (<http://www.thbb.org/Files/File/501-5101.pdf>), 13.03.2015.
- [12] J.G.S. Jaarsveld, J.S.J. Deventer, G.C. Lukey, "The effect of composition and temperature on the properties of fly ash- and kaolinite-based geopolymers", *Chemical Engineering Journal*, Vol.89. No.1-3, pp. 63-73, 2002.
- [13] E. Güneysi, M. Gesoğlu, K. Mermerdaş, "Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin", *Materials and Structures*, Vol.41, pp. 937-949, 2008.
- [14] TS EN 450. Betonda Kullanılan Uçucu Kül –Tarifler, Özellikler ve Kalite Kontrolü, (Fly ash for concrete – Definitions, requirements and quality control)TSE. Ankara –Turkey, 1988.

- [15] ASTM C 618. Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete. Annual Book of ASTM Standart, No. 04.02, 2000.
- [16] TS EN 772-4. Kagir Birimler, deney metotları – Bölüm 4: Tabii taskâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile bosluksuz ve bosluklu birim hacim kütesinin tayini (Methods of test for masonry units – Part 4: Determination of real and bulk density and of total and open porosity for natural stone masonry units). TSE. Ankara-Turkey, 2000.
- [17] TS EN 771-1. Kagir Birimler, Özellikler- Bölüm 1: Kil kâgir birimler (Tuğlalar) (Specification for masonry units – Part 1: Clay masonry units) TSE. Ankara-Turkey, 2005.
- [18] F. Curcio, B. A. De Angelis, S. Pagliolico, “Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars”, *Cement and Concrete Research*, Vol.28, No.6, pp. 803-809, 1998.