

Farklı puzolanların tekli, ikili ve üçlü çimentolu sistemleri içeren harç karışımlarının dayanımı ve geçirgenlik performansı açısından kıyaslanması

Ali MARDANI-AGHABAGLOU*, Süleyman ÖZEN, Sultan Husein BAYQRA,
Hassane Amidou OUEDRAOGO

Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Nilüfer-Bursa, Türkiye

Geliş Tarihi (Recived Date): 05.10.2017
Kabul Tarihi (Accepted Date): 02.04.2018

Özet

Bu çalışmada silis dumanı ve metakaolin kullanımının tekli, ikili ve üçlü çimentolu sistemleri içeren harç karışımlarının dayanımına, geçirgenlik özelliğine ve ultra ses geçiş hızına etkisi kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Bu amaçla mineral katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten farklı oranlarda silis dumanı ve metakaolin çimento ile yer değiştirerek 3 seri karışım daha yapılmıştır. 1. ve 2. seride çimentonun %7,5'u ile ağırlıkça metakaolin ve silis dumanı yer değiştirmiştir. 3. seride ise çimentonun %7,5'u kadar hem metakaolin hem de silis dumanı kullanılarak toplamda %15 mineral katkı içeren karışım hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda su/çimento oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma değeri sabit tutulmuştur. İstenilen yayılma değerini sağlamak için farklı oranlarda tek tip su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Karışımların zamana bağlı yayılma değerleri, basınç ve eğilme dayanımları, su emme kapasiteleri ve ultra ses geçiş hızları belirlenmiştir. Deney sonuçlarına göre mineral katkı türünden bağımsız olarak mineral katkı kullanımı ile karışımların zamana bağlı yayılma, dayanım, geçirgenlik ve ultra ses geçiş hızı değerleri olumlu etkilenmiştir. Bu etki zamanla daha belirgin hale gelmiştir. İkili çimentolu sisteme sahip metakaolin içeren karışım erken yaşlarda diğer karışımlara göre daha iyi performans göstermiştir. Ancak 28 günden sonra hem metakaolin hem de silis dumanı içeren üçlü çimentolu sisteme sahip karışım en başarılı sonucu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Metakaolin, silis dumanı, harç karışımları, geçirgenlik özellikleri, ultrases geçiş hızı.

* Ali MARDANI-AGHABAGLOU, alimardani@uludag.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0003-0326-5015>
Süleyman ÖZEN, sozen@uludag.edu.tr, <https://orcid.org/0000-0001-5522-427X>
Sultan Husein BAYQRA, sultanhuseinbayqra@yahoo.com, <https://orcid.org/0000-0001-6889-2584>
Hassane Amidou OUEDRAOGO, hassanoued@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0378-3093>

Comparison of different pozzolans from strength and permeability performance of mortar mixtures containing plain, binary and ternary cementitious systems view point

Abstract

In this study, the effect of silica fume and metakaolin on the strength, transport properties and ultrasonic pulse velocity of the mortar mixtures containing plain, binary and ternary cementitious systems were investigated comparatively. For this purpose, in addition to the control mixture containing no mineral admixture, three series of mixtures were produced by replacing silica fume and metakaolin with cement in different ratios. In the first and second series mixture, metakaolin and silica fume were used as 7.5wt% of the cement, respectively. In the third series, a mixture containing 15% of mineral admixture was prepared by replacing both silica fume and metakaolin with 7.5wt% of cement. In the all of mixture, the water/cement ratio, sand/binder ratio and flow values were kept constant. Water reducing admixture was used in different ratio for providing the desired flow values. The time-dependent flow value, compressive and flexural strengths, water absorption capacity and ultrasonic pulse velocity of the mixtures were determined. According to the test results, irrespective of utilization of mineral admixture, the time-dependent flow value, strength, permeability and ultrasonic pulse velocity of the mixtures were positively affected by using admixture. This effect was more pronounced by elapsing time. In the early ages, the metakaolin-bearing mixture with binary cementitious system showed better performance compare to the other mixtures. However, after 28 days, the mixture containing both metakaolin and silica fume with ternary cementitious system showed the most successful results.

Keywords: Metakaolin, silica fume, mortar mixture, transport properties, ultrasonic pulse velocity.

1. Giriş

Bilindiği gibi puzolanlar doğal ve yapay olmak üzere iki farklı tipe ayrılır [1]. Doğal puzolanlar volkanik camlar ve tras gibi volkanik kökenli puzolanlar ve ısıl işlem görmüş killer ve şeyller olmak üzere iki gruba ayrılır [2]. Yapay puzolanlara silis dumanı, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu, metakaolin ve uçucu kül gibi mineraller örnek verilebilir [3,4].

Silis dumanı, silis metal ve ferrosilis alaşım üretiminde yan ürün olarak açığa çıkmaktadır. %80-85 oranında amorf durumunda SiO_2 içermektedir. Bu bağlamda yüksek derecelerde puzolanik özellik göstermekte, çimento ve beton üretiminde kullanımı uygundur [5-8]. Metakaolin ise yüksek sıcaklıklarda ($650-850^\circ\text{C}$ arasında) saf ve rafine edilmiş kaolinit kilin kalsinasyonu sonucu üretilen bir üründür. İnce yapılıdır ve porselen üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Metakaolin de silis dumanında olduğu gibi amorf yapıda silis içermektedir [9]. Puzolanlar çimento hidrasyon reaksiyonları esnasında açığa çıkan CaOH_2 ile hızlı bir şekilde reaksiyona girerek bağlayıcı özelliğe sahip C-S-H jellerini oluşturup mikro yapının gelişmesini sağlamaktadır [10]. Bazı araştırmacılara göre karışımlarda çimentonun metakaolin ile

yer değiştirmesi hem betonun basınç dayanımını hem de durabilite performansını artırmaktadır [11,12]. Özellikle hidrasyonun erken zamanlarında betonun basınç dayanımını 28 günden önce kontrol karışımına göre daha yüksek oranda artırmaktadır [13]. Bu durum metakaolinin inceliğinden kaynaklanmaktadır. Çimento ve puzolan malzemeler inceliğine bağlı olarak büyük ölçüde su ile reaksiyona girmektedir. Malzemelerdeki inceliğin artmasıyla yüzey alanı artmasına bağlı olarak reaksiyon kinetikleride artmaktadır. Puzolanik reaksiyon sonucu oluşan ürünler hamurun daha yoğun olmasını sağlayarak çimento parçacıkları arasındaki boşlukları azaltmaktadır. Böylece erken yaş dayanımlarında gelişmeler meydana gelmektedir [2,14]. Mineral katkıların karışımlarda çimento yerine kullanılmasıyla karışımların maliyeti de azalmaktadır. Ayrıca taze betonda işlenebilirliğe olumlu olarak etkilerken terlemeyi engelleyerek fayda sağlamaktadır [15]. Konu ile ilgili bazı araştırmalar aşağıda özetlenmiştir.

Benzer bir çalışmada, çimento yerine ağırlıkça %10 silis dumanı ve metakaolin kullanımının harç karışımların taze hal, hidrasyon ısısı ve dayanımına etkisi Kadri ve arkadaşları [16] tarafından incelenmiştir. Mineral katkı kullanımı ile harç karışımların hedef yayılma değerini sağlamak için su azaltıcı katkı gereksinimi arttığı ve karışımların hidrasyon ısısının yükseldiği yazarlar tarafından bildirilmiştir.

Başka bir araştırmada Mardani-Aghabaglou ve arkadaşları [9] çimento yerine %10 oranında silis dumanı, %10 oranında metakaolin ve %30 oranında uçucu kül kullanımının harç karışımlarının mekanik ve durabilite özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Ayrıca bazı harç karışımlarda mikro-yapı incelemeleri gerçektelemiştir. Mekanik özelliği ve durabilite performansı açısından yüksekten düşüğe doğru sırasıyla silis dumanı, metakaolin, uçucu kül içeren karışımlar ve kontrol karışımı olmuştur. Silis dumanı ve metakaolin içeren karışımlarda top tipi etrenjit gözlemlenirken uçucu kül ve kontrol karışımında hem top tipi hem de iğnemsiz etrenjit oluşumunun tespit edildiği yazarlar tarafından iddia edilmiştir.

Cüruf, silis dumanı ve metakaolin kullanımının beton karışımlarının boşluk yapısı ve agrega-hamur ara yüzeyi (ITZ) üzerindeki etkisi Duan ve arkadaşları [17] tarafından incelenmiştir. Deney sonuçlarına göre beton karışımlarında mineral katkı kullanımıyla daha dolu bir yapı sağlanmış böylece agrega-hamur ara yüzeyi güçlenmesiyle daha yoğun bir mikro yapı morfolojisi tespit edilmiştir. Bu bağlamda metakaolin içeren karışım en başarılı karışım olmuştur.

Jiang ve arkadaşları [18] %0-14 aralığında 4 farklı oranda çimento yerine metakaolin kullanımının çelik lif içeren ve içermeyen harç karışımların mekanik özellikleri, boşluk yapısı ve hidrasyon ısısına etkisini araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre mineral katkı içermeyen kontrol karışımına kıyasla metakaolin kullanımıyla harç karışımların eğilme dayanımı azalırken %10 oranında metakaolin içeren karışımın basınç dayanımı artmıştır. Karışımlarda hacimce %2 çelik lif kullanımı ile harç karışımlarının basınç ve eğilme dayanımlarında ciddi mertebelerde artışlar olduğu gözlemlenmiştir. Civa porozimetresi deneylerinde ise metakaolin içeren karışımların porozitesi daha az çıkmıştır.

%25, %30 ve %35 olarak yüksek oranda yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve metakaolinin çimentolu sistemlerde bağlayıcı olarak kullanımının karışımların 365 gün boyunca boşluk yapısı ve mekanik özelliklerine etkisi Kuzielová ve arkadaşları [19]

tarafından incelenmiştir. Mineral katkı kullanımıyla kapiler boşluklarda önemli mertebelerde azalmalar ve jel boşluklarında ise artışlar gözlemlenmiştir. Ancak toplam porozite azaldığı için karışımların dayanımlarında artış gözlemlendiği yazarlar tarafından beyan edilmiştir.

Bu çalışmada çimento yerine farklı oranlarda silis dumanı ve metakaolin kullanımının tekli, ikili ve üçlü çimentolu sistemleri içeren harç karışımlarının basınç, eğilme dayanımları, ultra ses geçiş hızı ve geçirgenlik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu amaçla mineral katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten 3 seri karışım daha üretilmiştir. 1. ve 2. seride sırasıyla çimento ağırlığına %7,5 oranında metakaolin ve silis dumanı kullanılmıştır. 3. seride ise çimento ağırlığının %7,5' i kadar hem silis dumanı hem de metakaolin kullanılarak toplamda %15 oranında mineral katkı kullanılmıştır.

2. Materyal metot

2.1. Malzemeler

Bu çalışmada TS EN 197-1 [20] standardına uygun özgül ağırlığı 3,15 olan CEM I 42,5R tipi portland çimentosu kullanılmıştır. Ayrıca bağlayıcı malzeme olarak metakaolin ve silis dumanı farklı oranlarda çimento ile ikame edilerek tekli, ikili ve üçlü çimentolu sistemleri içeren harç karışımlar üretilmiştir. Üretici firma tarafından belirlenen çimentonun, silis dumanının ve metakaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimento, silis dumanı ve metakaolinin fiziksel ve kimyasal özellikleri.

BİLEŞEN	BİRİM	ÇİMENTO	SİLİS DUMANI	METAKAOLİN
SiO ₂	%	18,86	76,70	56,10
Al ₂ O ₃	%	5,71	2,22	40,23
Fe ₂ O ₃	%	3,09	0,84	0,85
CaO	%	62,70	0,55	0,19
MgO	%	1,16	12,37	0,16
SO ₃	%	2,39	0,20	
Na ₂ O	%	0,29	1,79	0,24
K ₂ O	%	0,92	1,55	0,51
Cl	%	0,01	0,03	
Serbest CaO	%	1,26	-	-
Kızdırma Kaybı	%	3,20	2,30	1,10
Aktivite 7 Gün	%	-	96,08	98,03
Aktivite 28 Gün	%	-	102,73	104,5
Aktivite 90 Gün	%	-	103,70	110,21
Özgül Ağırlık		3,15	2,41	2,52
Özgül Yüzey	cm ² /g	3530	35200	146000
45 mµ Bakiye	-		63,20	
1-günlük Basınç dayanımı	MPa	14,7	-	-
2-günlük Basınç dayanımı	MPa	26,80	-	-
7-günlük Basınç dayanımı	MPa	49,80	-	-
28-günlük Basınç dayanımı	MPa	58,5	-	-

Tüm harç karışımlarında agrega olarak TS EN 196-1 [21] standardına uygun Tablo 2’de tane büyüklüğü dağılımı verilen CEN standart kumu kullanılmıştır. Kumun özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi TS EN 1097-6 standardına uygun olarak sırasıyla 2,72 ve kütlece %0,7 olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. Standart kumun tane büyüklüğü dağılımı.

Kare Göz Açıklığı (mm)	Kalan (%)	Yığılımlı Elekte Kalan (%)
2,00	0	0
1,60	4,32	7 ± 5
1,00	33,98	33 ± 5
0,50	67,11	67 ± 5
0,16	86,85	87 ± 5
0,08	99,83	99 ± 5

2.2. Karışım hazırlanması

Tüm harç karışımlarında su/bağlayıcı oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma miktarı sırasıyla 0,485, 2,75 ve 270±10 mm olarak sabit tutulmuştur. Hedeflenen yayılma değerini sağlamak için üretici firma tarafından özellikleri temin edilen ve Tablo 3’te gösterilen tek tip polikarboksilat-eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılmıştır. Çalışmada 4 farklı harç karışımı hazırlanmıştır. ASTM C109 [23] standardına uygun olarak hazırlanan mineral katkı içermeyen kontrol karışımına (K) ilaveten değişik oranlarda çimento yerine mineral katkı kullanılarak 3 farklı mineral katkılı harç karışı üretilmiştir. KM ile isimlendirilen karışımında çimento ağırlığının %7,5’i kadar metakaolin çimento ile ikame edilmiştir. KS olarak isimlendirilen karışımında aynı oranda silis dumanı çimento ile ikame edilmiştir. KMS ile isimlendirilen karışımında ise çimento ağırlığının %7,5 oranında metakaolin ve %7,5 oranında silis dumanı çimento ile ikame edilerek toplamda ağırlıkça %15 oranında mineral katkı kullanılmıştır. Harç karışımlarının üretiminde kullanılan malzeme oranı ve ASTM C1437 [24] standardına göre belirlenen söz konusu karışımların yayılma değerleri Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 3. Su azaltıcı katkının özellikleri.

Tip	Yoğunluk (g/cm ³)	Katı Madde Miktarı (%)	pH Değeri	Klorür İçeriği (%)	Alkali İçeriği (Na ₂ O) (%)
Polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı	1,097	36,35	3,82	<0,1	<10

Tablo 4. Harç karışımlarının üretiminde kullanılan malzeme kütle oranları.

	K	KM	KS	KMS
Çimento, g	1	0,925	0,925	0,85
Metakaolin, g	-	0,075	-	0,075
Silis Dumanı, g	-	-	0,075	0,075
Su, g	0,485	0,485	0,485	0,485
Standart kum, g	2,75	2,75	2,75	2,75
Su azaltıcı katkı, g	0,005	0,006	0,0067	0,006
Yayılma, mm	270	270	280	275

Tablo 4'ten de anlaşıldığı gibi mineral katkı kullanılması ile hedef 270 ± 10 mm yayılmayı sağlayabilmek için katkı gereksinimi artmıştır. Bu etki %7,5 silis dumani içeren karışımda daha belirgin olmuştur. Söz konusu karışımda 270 ± 10 mm hedef yayılmayı sağlamak için kontrol karışımına kıyasla %34 daha fazla su azaltıcı katkı kullanılmıştır.

2.3. Deney yöntemleri

Mineral katkı kullanımının harç karışımların zamana bağlı yayılma değişimine etkisini incelemek amacı ile ASTM C1437 [24] standardına göre gerçekleşen yayılma ölçümü 60 dakika boyunca her 20 dakikada bir tekrarlanmıştır. Üretilen harç karışımlarının ASTM C109 [23] standardına uygun olacak şekilde 50 mm küp numuneler üzerinde 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları, ASTM C597 [25] standardına göre 7 ve 28 günlük ultra ses geçiş hızı değerleri ve ASTM C642 [26] standardı dikkate alınarak 7, 28 ve 90 günlük su emme değerleri belirlenmiştir. Ayrıca karışımların 7 ve 28 günlük orta nokta yüklemeli eğilme dayanımı TS EN 196-1 [21] standardına göre $40\times 40\times 160$ mm' lik prizmatik numuneler üzerinden elde edilmiştir.

3. Deney sonuçları ve değerlendirme

3.1. Zamana bağlı yayılma

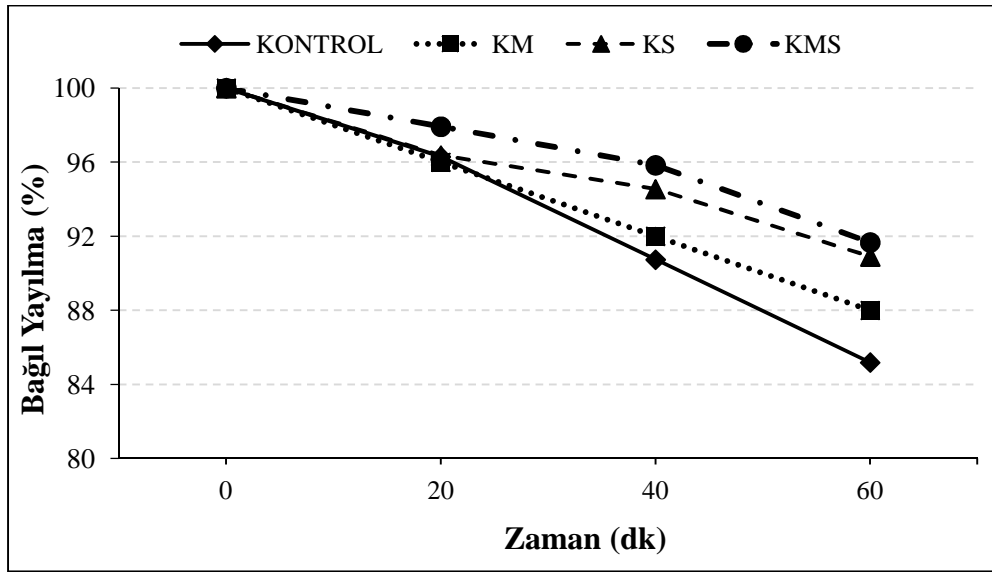
Kontrol ve farklı mineral katkı içeren karışımların zamana bağlı yayılma değerleri ve bağlı yayılma oranları sırasıyla, Tablo 5 ve Şekil 1'de verilmiştir. Beklenildiği gibi harç karışımlarının yayılma değerleri zamanla azalmıştır. Ancak söz konusu azalmanın mineral katkı içeren karışımlarında kontrol karışımına kıyasla daha az olduğu tespit edilmiştir. İlk 20 dakikada KM, KS ve kontrol karışımı benzer davranış göstermiştir. 60 dakika sonunda ise kontrol karışımı %23 oranında yayılma kaybı gösterirken KM, KS ve KMS karışımları sırasıyla %12, %9 ve %8 oranlarında yayılma kaybı davranışı göstermiştir. Yayılma değerini koruması bakımından en iyi performansı KMS karışımı sağlamış ve söz konusu karışım kontrol karışımına göre yaklaşık %8 oranında daha az yayılma kaybı sergilenmiştir.

Bilindiği gibi karışımların kıvam koruma yeteneği kullanılan malzemelerin özelliğinden ve ortam koşullarından doğrudan etkilenmektedir [1]. Bu çalışmada çimento değişik oranlarda mineral katkı ile ikame edilmiştir. Böyle bir durumda 2 etki mekanizması söz konusu olmaktadır. Birinci etki çimento yerine çimentoya kıyasla dökümden hemen sonra 60 dakika kadar kısa bir zaman diliminde daha düşük hidrasyon hızına sahip mineral katkı kullanılması ile karışımın hidrasyon hızının azalmasına ve buna bağlı

olarak da karışımın kıvam koruma yeteneğinin artmasına sebep olmasıdır. İkinci etki ise çimentoya kıyasla aşırı derecede daha ince olan mineral katkı kullanılarak toplam yüzey alanı arttığına karışımın su ihtiyacının artmasına böylece karışımların kıvam koruma yeteneğinin azalmasına sebep olmasıdır. Kontrol ve mineral katkılı karışımlar kıyaslandığında mineral katkılı karışımların kıvam koruma açısından daha başarılı olması bu durumda birinci etkinin daha baskın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Mineral katkılı karışımlar kendi aralarında kıyaslandığında en yüksek inceliğe sahip metakaolin içeren MK karışımında ikinci etkinin baskın olduğu anlaşılmıştır. Üçlü çimentolu sistemi içeren toplamda %15 oranında mineral katkı içeren KMS karışımının kıvam koruma özelliği açısından en başarılı karışım olması diğer katkılı karışımlara kıyasla fazla miktarda mineral katkı içerdiğinden birinci etkinin baskın olduğu ön plana çıkmıştır.

Tablo 5. Harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri.

Zamana Bağlı Yayılma (cm)				
Katkı/Zaman	0 dk	20 dk	40 dk	60 dk
KONTROL	27	26	24,5	23
KM	25	24	23	22
KS	27,5	26,5	26	25
KMS	24	23,5	23	22



Şekil 1. Harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değişimi.

3.2. Basınç ve eğilme dayanımı

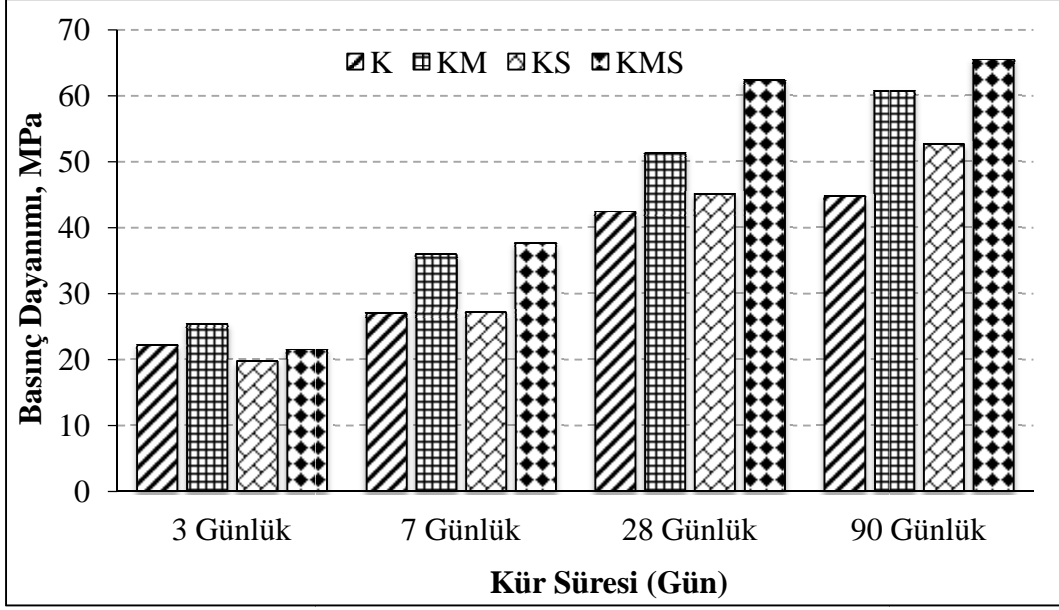
Harç karışımların basınç ve eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla Şekil 2 ve 3'de verilmiştir. Her değer 3 ölçümün ortalaması olarak elde edilmiştir. %7,5 metakaolin içeren KM karışımı başlangıçtan itibaren kontrol karışımına göre daha yüksek basınç dayanımı göstermiştir. Özellikle 3 günden sonraki ölçümlerde KM karışımının basınç dayanımı kontrol karışımına kıyasla yaklaşık %30 daha yüksek olmuştur. %7,5 silis

dumanı içeren KS karışımının 3 günlük dayanımı kontrol karışımına kıyasla daha düşük çıkmıştır. 7 günlük basınç dayanımı sonuçlarına bakıldığında KS ve kontrol karışımı basınç dayanımı açısından hemen hemen aynı davranış göstermiştir. KS karışımının 28 ve 90 günlük basınç dayanımı kontrol karışımına kıyasla, sırasıyla %6 ve %22 daha yüksek olmuştur.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi basınç dayanımı açısından KM karışımı 28 güne kadar KS karışımına daha üstün performans sergilemiştir. Ancak 90 günlük basınç dayanımı incelendiğinde KM ve KS karışımı hemen hemen aynı dayanımı göstermiştir. Bilindiği gibi mineral katkı içeren karışımların 90 günlük basınç dayanımının kontrol karışımına göre yüksek çıkması katkılı karışımlarda puzolanik reaksiyon sonucu bağlayıcı özelliği olmayan CH'ların (CaOH₂) çimentolu sistemlerde bağlayıcılığı sağlayan C-S-H'a dönüşmesi böylece beton numunelerinin boşluk miktarının azalmasından kaynaklanmaktadır [1].

Bilindiği gibi kullanılan mineral katkının inceliği ve içerdiği amorf yapıdaki SiO₂ miktarı puzolanik aktiviteyi etkileyen mineral katkı kaynaklı parametrelerdir [1]. Puzolanın inceliği erken yaş aktivite indeksini, içerdiği reaktif SiO₂ miktarı ise daha ileri yaşlardaki puzolanik aktivite indeksi değerlerini etkilemektedir. Tablo 1'de görüldüğü gibi kullanılan metakaolinin inceliği çok yüksek değer olduğundan başlangıçtan itibaren kontrol karışımına göre dayanımları artmıştır. Bu bağlamda silis dumanının etkisi metakaoline göre daha düşük olmuştur.

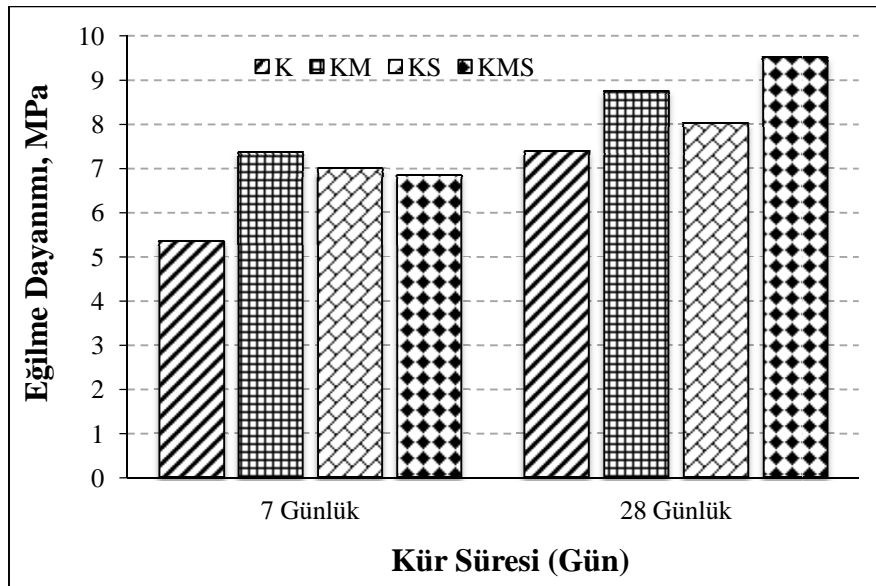
%7,5 oranında hem metakaolin hem de silis dumanı içeren KMS karışımının 3 günlük dayanım açısından kontrol karışımı ile benzer davranış göstermiştir. Ancak KS karışımından daha yüksek ve KM karışımından daha düşük 3 günlük basınç dayanımına sahip olduğu Şekil 1'den de anlaşılmaktadır. 3 günden sonraki yaşlarda KMS karışımı en yüksek basınç dayanımı vermiştir. %7,5 metakaolin ve %7,5 silis dumanı içeren KMS karışımının 3 günlük basınç dayanımının %7,5 KM karışımına göre daha düşük çıkmasının nedeni silis dumanının 3 günlük dayanımlar üzerinde yansıttığı olumsuz etkiden kaynaklanmaktadır. Ancak KMS karışımından toplamda %15 oranında mineral katkı kullanıldığı için puzolanik reaksiyon sonucu CH'ların C-S-H'lara dönüşmesi nedeni ile ileri yaşlarda en yüksek basınç dayanımı göstermiştir. KMS karışımının 90 günlük basınç dayanımı kontrol, KM ve KS karışımına kıyasla sırasıyla %40, %19 ve %20 mertebesinde daha yüksek çıkmıştır. Başka bir deyişle üçlü çimentolu sistem basınç dayanımı açısından en başarılı olmuştur.



Şekil 2. Harç karışımların basınç dayanımları.

Harç karışımların eğilme dayanımları mineral katkı kullanımıyla olumlu yönde etkilenmiştir. Mineral katkılı karışımların 7 günlük eğilme dayanımları hemen hemen aynı olmuştur. Kontrol karışımına kıyasla KM, KS ve KMS karışımlarının 7 günlük eğilme dayanımları sırasıyla %38, %31 ve %28 daha fazla olmuştur.

28 günlük eğilme dayanımları incelendiğinde ise KMS karışımı diğer karışımlara göre en yüksek eğilme dayanımı göstermiştir. Basınç dayanımında da belirtildiği üzere metakaolinin inceliğinin fazla olması ve silis dumanı ile beraber kullanılması karışımlardaki boşluğun daha az olmasını sağladığı düşünülmektedir. Bu durumun dayanımları olumlu etkilediği belirlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarında da olduğu gibi toplamda %15 oranında mineral katkı içeren KMS karışımının diğer karışımlara kıyasla en yüksek eğilme dayanımına sahip olduğu Şekil 3'den anlaşılmaktadır.

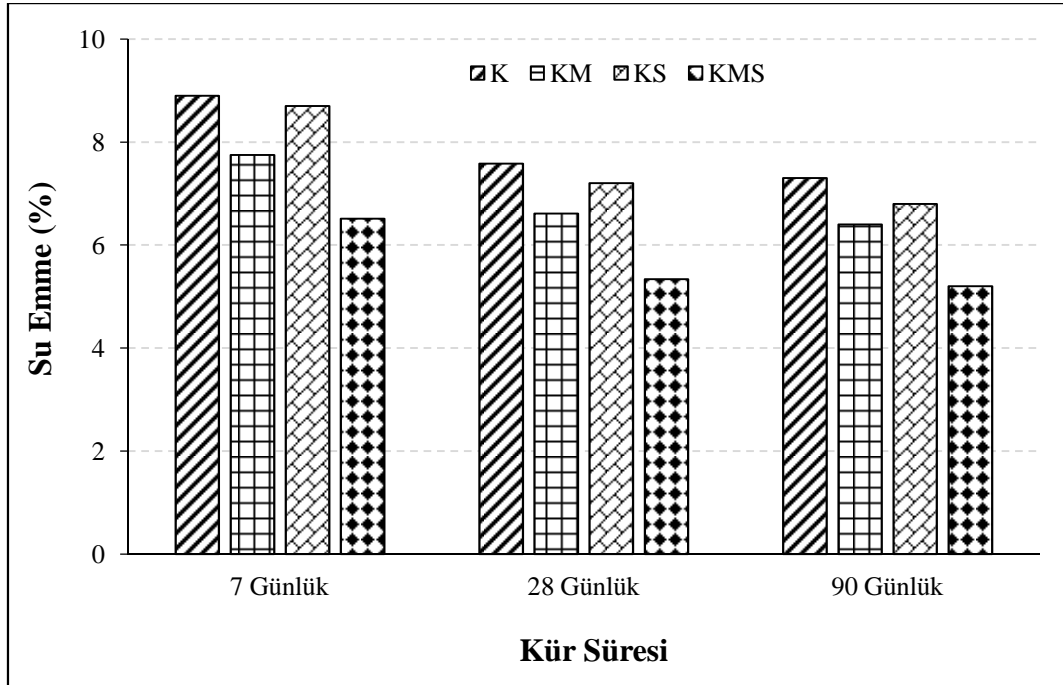


Şekil 3. Harç karışımların eğilme dayanımları.

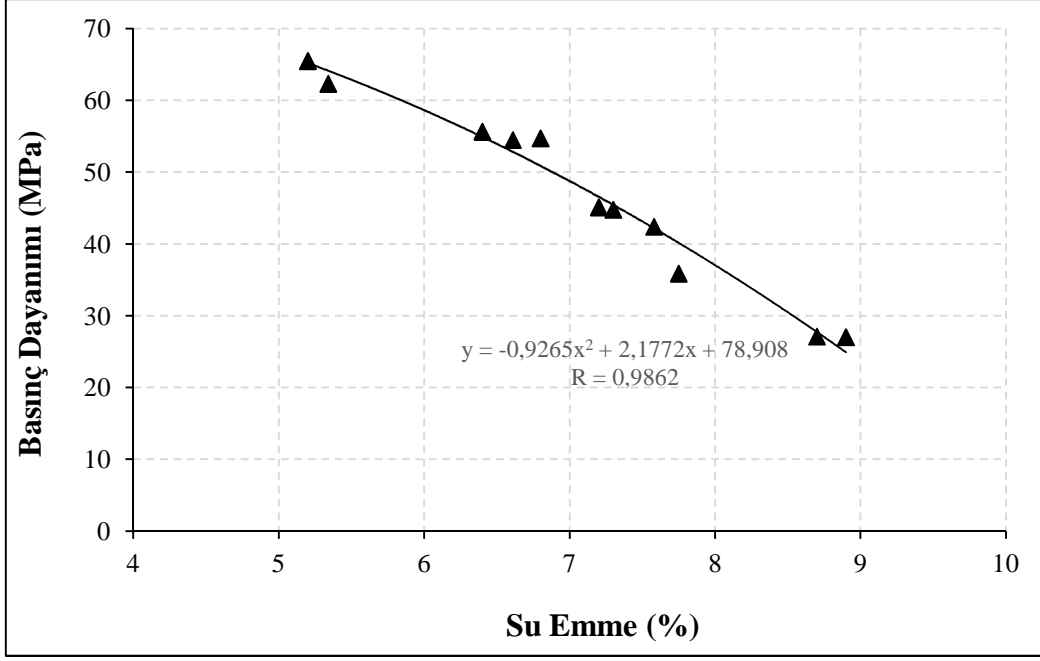
3.3. Su emme kapasitesi

Harç karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük su emme oranları Şekil 4'te gösterilmiştir. Her değer üç ölçümün ortalaması olarak verilmiştir. Mineral katkı kullanımından bağımsız olarak, harç karışımlarının su emme değerinde azalma meydana gelmiştir. Bilindiği gibi bu olay zaman içerisinde gerçekleşen bağlayıcı malzemelerin hidrasyonu ile açıklanabilir.

Mineral katkı kullanımı ile başlangıçtan itibaren harç karışımlarının su emmesi azalmıştır. Bu olay mineral katkıların fiziko-kimyasal etkisi ile iki farklı açıdan açıklanabilir. Kimyasal olarak daha önceden vurgulandığı gibi puzolanik reaksiyon sonucu (CH'ların C-S-H'lara dönüşmesi) matriste mevcut boşluklar azalarak suyun karışıma girmesi zorlaşır. Böylece karışımın geçirgenlik özelliği olumlu etkilenir. Fiziksel olarak da mineral katkı çimentoya göre daha yüksek inceliğe sahip olduğu için çimento yerine kullanıldığı zaman fiziksel olarak boşlukları kapatarak harç karışımının geçirgenliğini iyileştirir. Basınç dayanım başlığı altında da anlatıldığı gibi kullanılan metakaolinin reaktivitesi ve inceliği silis dumanına kıyasla daha fazla olduğundan KM karışımı geçirgenlik açısından KS karışımına kıyasla daha yüksek performans göstermiştir. Bu iki fiziksel ve kimyasal özelliğinin daha baskın olduğu KMS karışımının (daha fazla miktarda mineral katkı içerdiğinden) su emmesi diğer karışımlara kıyasla en düşük olmuştur. Başka bir deyişle üçlü çimentolu sistemi içeren harç karışımı geçirgenlik özelliği açısından en yüksek performansı göstermiştir. Harç karışımlarının basınç dayanımı ve su emme oranı arasındaki ilişki Şekil 5'te verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi harç karışımlarının basınç dayanımı ve su emmesi arasında kuvvetli bir polinomsal ilişki mevcuttur.



Şekil 4. Harç karışımların su emme oranları.



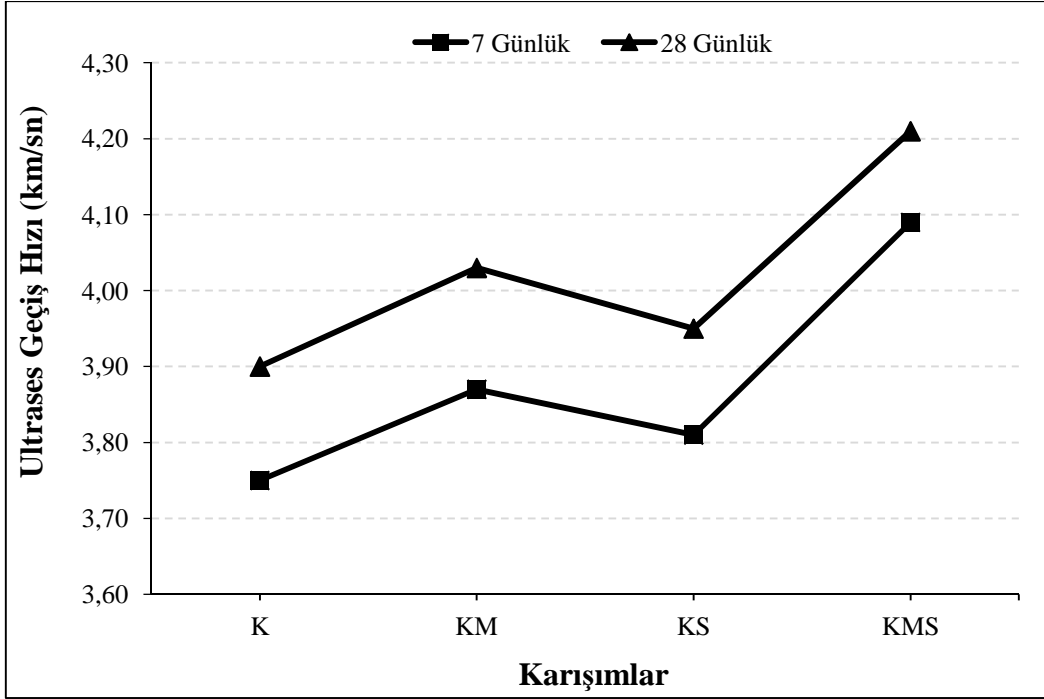
Şekil 5. Harç karışımlarının basınç dayanımı ve su emme kapasitesi arasındaki ilişki.

3.4. Ultra ses geçiş hızları

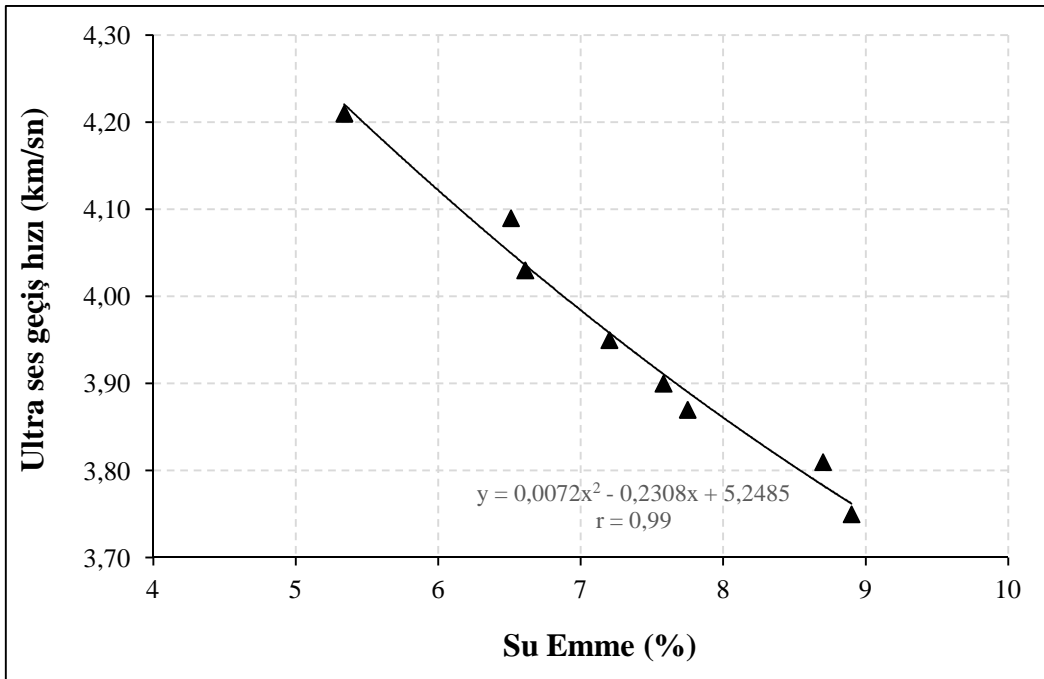
Harç karışımlarının 7 ve 28 günlük ultra ses geçiş hızları Şekil 6'da verilmiştir. Karışımlarda mineral katkının çimento ile ikame edilmesiyle ultra ses geçiş hızlarında artış meydana gelmiştir. Bilindiği gibi karışım oranları, malzeme özellikleri, boşluk yapıları ve agrega-hamur ara yüzeyi özellikleri harç karışımların ultra ses geçiş hızlarını önemli mertebelerde etkilenmektedir [1]. Puzolanik malzemeler inceliğine ve puzolanik aktivitesine bağlı olarak hamurda ve ara yüzeyde boşluk yapısının azalmasını sağlamaktadır [9].

Mineral katkı kullanımından bağımsız olarak karışımların ultra ses geçiş hızı değerleri zamanla artış göstermiştir. Mineral katkı türünden bağımsız olarak mineral katkı kullanımı ile harç karışımlarının ultra ses geçiş hızı mineral katkı içermeyen kontrol karışımına kıyasla artış göstermiştir. Benzer sonuçlar Ali Mardani-Aghabaglou ve arkadaşları [9] tarafından da beyan edilmiştir. Yazarlar söz konusu bu olumlu etkinin mineral katkının fiziko-kimyasal etkisinden kaynaklandığını açıklamıştır. Daha önceden de vurgulandığı gibi mineral katkının aşırı ince olduğu durumlarda fiziksel olarak çimentolu sistemin matrisinde var olan boşlukları kapatarak geçirgenliği azaltır. Ayrıca kimyasal etki olarak da puzolanik reaksiyon sonucu daha dolu bir yapı oluşumuna sebep olur. Bu iki olumlu etki sonuç karışımın geçirgenliğini azalmaktadır. Daha dolu yapıya sahip karışımın ultra ses geçiş hızı da daha yüksek olmaktadır. Diğer özelliklerde de olduğu gibi hem silis dumanı hem de metakaolin içeren üçlü çimentolu sisteme sahip harç karışımı ultra ses geçiş hızı açısından en yüksek değere sahip olmuştur.

Harç karışımlarının ultra ses geçiş hızı ve su emme oranı arasındaki ilişki Şekil 7'de verilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi harç karışımlarının ultra ses geçiş hızı ve su emmesi arasında kuvvetli bir polinomsal ilişki mevcuttur.



Şekil 6. Harç karışımlarının ultra ses geçiş hızları.



Şekil 7. Harç karışımlarının ultra ses geçiş hızı- su emme kapasitesi arasındaki ilişki.

4. Sonuçlar

- Mineral katkı kullanımından bağımsız olarak harç karışımlarının zamanla yayılma değerlerinde azalmalar gözlemlenmiştir. Mineral katkı kullanımı ile karışımların 1 saatlik kıvam koruma yeteneği olumlu olarak etkilenmiştir. Bu bağlamda metakaolin aşırı derecede ince olduğundan diğer mineral katkılı karışımlara göre en

zayıf performansı göstermiştir. Hem silis hem de metakaolin içeren üçlü çimentolu sisteme sahip harç karışımı 1 saatlik kıvam koruma açısından en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir.

- Mineral katkı tipinden bağımsız olarak mineral katkı kullanımı ile harç karışımlarının dayanımları artmıştır. Söz konusu olumlu etki ileri yaşlarda bariz şekilde ortaya çıkmıştır. Metakaolin içeren ikili çimento sistemine sahip harç karışımının dayanımı erken yaşlarda diğer karışımlara kıyasla en yüksek değer olmuştur. Bunun nedeni kullanılan metakaolinin aşırı derecede ince olduğundan ve yüksek dayanım aktivite indeks değerine sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Hem metakaolin hem silis dumanı içeren üçlü çimentolu sisteme sahip harç karışımı 28 günden sonra en yüksek dayanım göstermiştir.
- Harç karışımlarının su emme kapasitesi ve ultra ses geçiş hızı sonuçları mineral katkı kullanımı ile olumlu etkilenmiştir. Bu olumlu etki zamanla daha bariz şekilde ortaya çıkmıştır. Diğer özelliklerde de olduğu gibi hem metakaolin hem de silis dumanı içeren üçlü çimentolu sisteme sahip harç karışımı en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir.

Teşekkür

Yazarlar kimyasal katkı temini için Polisan Kimya A.Ş'ye, çimento ve silis dumanı temini için Bursa Beton A.Ş' ye ve Metakaolin temini için KAOLIN Endüstriyel Mineraller San. ve Tic. A.Ş' ye teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] Mehta, P.K., ve Monteiro, P.J.M., **Concrete: microstructure, properties, and materials**, (3th ed.), NJ: McGraw- Hill., (2006).
- [2] Mindess, S., Young, J.F., ve Darwin, D., **Concrete**, second ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ., (2003).
- [3] Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Tosun Felekoğlu, K., Aydın, S., Yardımcı, M. Y., Topal, A., Öztürk, A.U., **Beton**, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları No: 334, İzmir, (2012).
- [4] Erdoğan, T.Y., **Beton**. ODTÜ yayınları, Ankara, (2003).
- [5] Malhotra, V.M., Ramachandran, V.S., Feldman, R.F., and Aitcin, P.C., **Condensed silica fume in concrete**, Boca Raton, FL: CRC Press, (1987).
- [6] Swamy, R.N., **Cement replacement materials**, Vol. 3, London: Surrey University Press., (1986).
- [7] Inan Sezer, G., Compressive strength and sulfate resistance of limestone and/or silica fume mortars, **Construction and Building Materials**, 26(1), 613–618, (2012).
- [8] Giner, V.T., Ivorra, S., Baeza, F.J., Zornoza, E., ve Ferrer, B., Silica fume admixture effect on the dynamic properties of concrete, **Construction and Building Materials**, 25(8), 3272-3277, (2011).
- [9] Mardani-Aghabaglou, A., Sezer, G. İ., ve Ramyar, K., Comparison of fly ash, silica fume and metakaolin from mechanical properties and durability

- performance of mortar mixtures view point, **Construction and Building Materials**, 70, 17-25, (2014).
- [10] Wild, S., Khatib, J.M., ve Jones, A., Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete, **Cement and Concrete Research**, 26, 10, 1537-1544, (1996).
- [11] Shekarchi, M., Bonakdar, A., Bakhshi, M., Mirdamadi, A., ve Mobasher, B., Transport properties in metakaolin blended concrete, **Construction and Building Materials**, 24(11), 2217-2223, (2010).
- [12] Poon, C.S., Kou, S.C., ve Lam, L., Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakaolin and silica fume concrete, **Construction and Building Materials**, 20(10), 858-865, (2006).
- [13] Curcio, F., DeAngelis, B.A., ve Pagliolico, S., Metakaolin as a pozzolanic microfiller for high-performance mortars, **Cement and Concrete Research**, 28(6), 803-809, (1998).
- [14] Maekawa, K., Chaube, R., ve Kishi, T., **Modeling of concrete performance: hydration, microstructure formation and mass transport**, Taylor & Francis Group, London, (1999).
- [15] Mehta, P.K., ve Aitcin, P.C., Principles underlying production of high-performance concrete, **Cement, Concrete and Aggregates**, 12(2), 70-78, (1990).
- [16] Kadri, E.H., Kenai, S., Ezziane, K., Siddique, R., ve De Schutter, G., Influence of metakaolin and silica fume on the heat of hydration and compressive strength development of mortar, **Applied Clay Science**, 53(4), 704-708, (2011).
- [17] Duan, P., Shui, Z., Chen, W., ve Shen, C., Effects of metakaolin, silica fume and slag on pore structure, interfacial transition zone and compressive strength of concrete, **Construction and Building Materials**, 44, 1-6, (2013).
- [18] Jiang, G., Rong, Z., ve Sun, W., Effects of metakaolin on mechanical properties, pore structure and hydration heat of mortars at 0.17 w/b ratio, **Construction and Building Materials**, 93, 564-572, (2015).
- [19] Kuzielová, E., Žemlička, M., Bartoničková, E., ve Palou, M.T., The correlation between porosity and mechanical properties of multicomponent systems consisting of Portland cement–slag–silica fume–metakaolin, **Construction and Building Materials**, 135, 306-314, (2017).
- [20] TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, **Türk Standartları**, Ankara, (2012).
- [21] TS EN 196-1, Çimento deney metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini, **Türk Standartları**, Ankara, (2016).
- [22] TS EN 1097-6, Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini, **Türk Standartları**, Ankara, (2015).
- [23] ASTM C109, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, USA, (2016).
- [24] ASTM C1437, Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, USA, (2015).
- [25] ASTM C597, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, USA, (2016).
- [26] ASTM C642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, **ASTM International**, West Conshohocken, PA, USA, (2013).