



Mineral katkı kullanımının hava sürükleyici katkıli çimentolu harçların taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi

Effect of utilization of mineral admixture on the fresh and hardened properties of air-entrained cement mortars

Ece GÜLERYÜZ¹, Süleyman ÖZEN², Ali MARDANI-AGHABAGLOU^{3*}

^{1,3}İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
ecegeven@gmail.com, ali.mardani16@gmail.com

²İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bursa Teknik Üniversitesi, Bursa, Türkiye.
suleyman.ozen@btu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 15.05.2019
Kabul Tarihi/Accepted: 21.02.2020

Düzeltilme Tarihi/Revision: 29.01.2020

doi: 10.5505/pajes.2020.85353
Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada, silis dumanı ve uçucu kül kullanımının hava sürükleyici katkıli tekli, ikili ve üçlü çimentolu sistemleri içeren harç karışımlarının taze ve bazı sertleşmiş hal özelliklerine etkisi karşılaştırılmalı olarak incelenmiştir. Bu kapsamda tek tip CEM I 42.5R tipi çimento, tek tip polikarboksilat esaslı su azaltıcı katkı, tek tip hava sürükleyici katkı, silis dumanı ve uçucu kül kullanarak farklı kombinasyonlara sahip harç karışımları hazırlanmıştır. Mineral katkı içermeyen kontrol karışımına ilaveten, üç seri daha harç karışımı hazırlanmıştır. Birinci ve ikinci seride uçucu kül ve silis dumanı sırasıyla, %30 ve %10 oranında çimento ile yer değiştirmiştir. Üçüncü seride ise, çimento ağırlığının %30 ve %10'u oranında, hem uçucu kül hem de silis dumanı kullanılmıştır. Çalışmada tüm harç karışımlarında su/çimento oranı, kum/bağlayıcı oranı ve yayılma değerleri sırasıyla, 0.485, 2.75, 270±20 mm olarak sabit tutulmuştur. Harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri, 90 günlük su emme değerleri, 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve 0, 50, 100, 150, 200 donma-çözülme çevrimi sonrası basınç dayanım değerleri elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, hava sürükleyici katkıli çimento harçlarında mineral katkı kullanımı karışımların taze hal özelliklerini olumlu yönde etkilemiştir. Mineral katkı içeren karışımlar erken yaşlarda kontrol karışımına kıyasla daha düşük dayanım gösterirken, 90 günün sonunda kontrol karışımından daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahip olmuşlardır. Mineral katkı kullanımı ile harç karışımlarının 90 günlük su emme değerleri, kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Donma-çözülme çevrimleri bakımından en başarılı karışımın hem uçucu kül hem de silis dumanı içeren, üçlü bağlayıcı sisteme sahip olan K-UK-SD-HSK karışımı olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Mineral katkılar, Hava sürükleyici katkı, Donma-çözülme.

Abstract

In this study, the effect of silica fume and fly ash on the fresh and some hardened state properties of mortar mixtures containing plain, binary and ternary cementitious systems and air entraining admixture (AEA) were investigated comparatively. Within this regard, different mortar admixture combinations were prepared by using a CEM I 42.5R type cement, a type of polycarboxylate-ether based water reducing admixture, air entraining admixture, silica fume and fly ash. In addition to the control mixture containing no mineral admixture, three series of mortar mixtures were prepared. In the first and second series, silica fume and fly ash were replaced by 30% and 10% of cement, respectively. In the third series, both silica fume and fly ash were used as 30% and 10% of cement weight. Within all mortar mixtures, water/cement ratio, sand/binder ratio and flow values were kept constant as 0.485, 2.75, 270±20 mm, respectively. Time-dependent flow values, 90-day water absorption values, 3, 7, 28 and 90-day compressive strengths and compressive strengths values after 0, 50, 100, 150, 200 freeze-thaw cycle of mortar mixtures were measured. According to the results, the use of mineral additives in cement mortars containing air-entraining admixture had a positively effect on the fresh state properties of the mixtures. While mixtures containing mineral admixture exhibited lower strengths at early ages compared to the control mixture, they had higher compressive strength values than the control mixture at the end of 90 days. The 90-day water absorption values of the mortar mixtures were observed to be less with the use of mineral admixture compared to that of control mixtures. In terms of freeze-thaw cycles, the most successful mixture was determined to be K-UK-SD-HSK mixture having ternary cementitious system and containing both fly ash and silica fume.

Keywords: Mineral admixtures, Air entraining admixture, Freeze-thaw.

1 Giriş

Kompozit bir malzeme olan betonun, yararlı mühendislik özelliklerini sürdürebilmesinin dayanım ve dayanıklılığına bağlı olduğu bilinmektedir [1]. Yapıların uzun ömürlü olmasını sağlamak için doğru taşıyıcı sistem seçimi, projelendirilmesi ve imâl edilmesinin yanı sıra kalıcılığını arttıracak önlemler alınmalı, yapının en az bakım gerektirecek şekilde inşası gerçekleştirilmelidir [2].

Beton durabilitesine karşı en büyük tehditlerden biri donma-çözülme olayıdır. Beton ve çimento hamuru içerisindeki kapiler boşluklarda bulunan su düşük sıcaklıklarda %9 oranında

genleşerek buz kütesine dönüşür. Genleşen su, beton bünyesinde içsel gerilmelere yol açar ve çatlaklara sebep olur [3],[4].

Betonun donma-çözülme etkisine karşı direnci geçirimsizliği ve boşluk yapısı ile yakından ilişkilidir. Dayanıklı beton yapım kurallarına uyulması (düşük s/ç oranı, iyi sıkıştırma ve etkin kür) ve kimyasal katkılar ile hava sürüklenmesi alınacak başlıca önlemlerdir [5]. Hava sürükleyici katkı (HSK) kullanılarak betonun donma-çözülme dayanıklılığı artırılabilir. Bu katkı maddeleriyle beton içinde homojen dağılmış, boyutları 10 µm' den birkaç mm' ye ulaşabilen, birbirlerinden bağımsız küresel hava boşlukları oluşturulur. Bu boşluklar hem betonun kılcal

*Yazışılan yazar/Corresponding author

yolla su emmesini engeller hem de donan suyun oluşturduğu buz kütesinin, dışarıya çıkmaya zorladığı henüz donmamış olan suların boşluk içine doğru ilerlemesini sağlayarak, suyun boşluk çeperlerine basınç uygulamasını önler [6],[7].

Donma-çözülme olayına karşı alınabilecek önlemlerden biri beton üretiminde mineral katkı kullanımınıdır. Çimentolu sistemlerde bağlayıcı olarak kullanılan ve puzolanik özelliğe sahip olan mineral katkıların başında uçucu kül (UK), silis dumanı (SD), metakaolin (MK) ve yüksek fırın cürufu (YFC) gelmektedir. Mineral katkılar fiziko-kimyasal etkileri sayesinde çimentolu sistemlerin davranışlarını etkilemektedir. Kimyasal olarak, puzolanik reaksiyon sonucu kalsiyum hidroksitleri (CH) daha güçlü bir yapıya sahip olan ve çimentolu sistemlere bağlayıcılık özelliği kazandıran kalsiyum silika hidratlara (CSH) dönüştürmektedir. Fiziksel olarak ise, çok ince taneli olmaları sebebiyle karışım içerisindeki boşlukları tıkayarak geçirimsizliği azalttığı ve dayanıklılığı arttırdığı bilinmektedir [8]. Konu ile ilgili yapılan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir. Farklı oranlarda silis dumanının CEM II/A-M 32.5 tipi çimento ile ikame edilmesinin beton karışımlarının mekanik davranışlarına etkisi Topçu ve ark. [9] tarafından incelenmiştir. Bu amaçla ağırlıkça, %5, %10 ve %15 oranlarında çimento silis dumanı ile yer değiştirmiştir. Sonuçlara göre, silis dumanı ikame oranı artışı ile beton karışımlarının mekanik özellikleri olumlu etkilenmiştir. Ancak belirli bir işlenebilirliği sağlamak için katkı gereksinimi artmıştır. Yazarlar, silis dumanı kullanımı ile mekanik özelliklerin olumlu etkilenmesini, kalsiyum hidroksitlerin (CH) kalsiyum silika hidratlara (CSH) dönüşmesi, gözeneklerin azalmasıyla daha boşluksuz bir yapı elde edilmesi ve daha güçlü bir agrega hamur ara yüzeyi oluşumuyla açıklanmıştır.

Aitcin ve Laplante [10] tarafından yapılan bir çalışmada, beton karışımlara toplam bağlayıcının %5'i ve daha az silis dumanı ilavesinin beton karışımlarının su ihtiyacına bir etkisi olmadığı, ancak bu oranın üstünde silis dumanı kullanımıyla beton karışımlarının su ihtiyacının arttığı bildirilmiştir. Diğer bir çalışmada, uçucu külün farklı oranlarda çimento yerine kullanılmasının beton karışımlarının mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Hazırlanan beton karışımlarında çimento dozajı 350 kg/m³ olarak belirlenmiş ve çimento ağırlığının %0, %5, %10, %20, %30 ve %40'ı oranlarında uçucu kül ikamesiyle farklı seriler elde edilmiştir. Çalışmada küp ve silindirik basınç dayanımı, elastisite modülü tayini ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre, çimento yerine %20 oranında uçucu kül ikamesinin betonun mekanik özelliklerine etkisinin iyi olduğu ve %30 oranına kadar da kullanılabilir olduğu yazarlar tarafından belirtilmiştir [11].

Başka bir çalışmada, uçucu külün %10, %20, %30 oranlarında çimento yerine kullanılmasının beton karışımlarının 7, 28 ve 56 günlük basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve 60 günlük permeabilite özellikleri üzerine etkisi Güçlüer ve Ünal [12] tarafından incelenmiştir. Tüm beton karışımlarında su/çimento oranı (s/c) ve çimento dozajı sırası ile 0.5 ve 300 kg/m³ olarak sabit tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre %20 oranına kadar uçucu külün kullanımıyla beton karışımlarının söz konusu özelliklerinde iyileşme gözlemlenmiştir. Bu oranın üstünde uçucu külün ikamesiyle ultrases geçiş hızı ve geçirgenlik özellikleri olumlu etkilenirken, basınç dayanımları olumsuz etkilenmiştir. Söz konusu basınç dayanımlarındaki olumsuz etki, 56 günlük örneklerde de gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar Delikurt ve Sevim [13] tarafından da elde edilmiştir. Ataş [14] tarafından yapılan bir çalışmada, üç farklı türde HSK'nın, dört farklı oranda çimento harcında kullanılmasıyla

hazırlanan numuneler, donma-çözülme döngüsüne maruz bırakıldıktan sonra eğilme, basınç ve ultrases deneylerine tabii tutulmuştur. Karışımların s/c oranı 0.45 olarak sabit tutulmuştur. Kontrol karışımı ile yapılan kıyaslamalar sonucu HSK'nın betonun donma çözülme direncini arttırırken mekanik özelliklerini de düşürebildiği gözlemlenmiştir. Numuneler 40 günlük kür sürelerinin sonunda 5 farklı donma-çözülme döngüsüne maruz bırakılmıştır. Her serinin 0, 7, 14, 28 ve 56 çevrim sonunda basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Donma çözülme direnci açısından en az dayanım kaybı, HSK3 katkısı kullanılarak hazırlanan karışımda tespit edilmiştir. Kontrol numunesinin basınç dayanım değeri, 56 döngü sonunda %8.92 oranında düşerken HSK3 numunesi %6.14 oranında bir düşüş göstermiştir.

Başka bir çalışmada, uçucu kül ve silis dumanının farklı oranlarda çimento yerine kullanılmasıyla elde edilen ikili ve üçlü bağlayıcı sisteme sahip karışımların, donma-çözülme direnci tespit edilmiştir. Çalışmada s/c oranı 0.42 olan 14 farklı beton karışımı, 300 donma-çözülme çevrimine kadar her 30 çevrimde bir farklı deneye tabii tutulmuştur. Deney sonuçlarına göre, çimento ve uçucu kül kullanımıyla elde edilen ikili bağlayıcı sisteme sahip karışımların durabilite faktörü, hava sürükleyici katkı kullanımından bağımsız olarak, uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı sistemlerin durabilite faktöründen daha düşük çıkmıştır. Çalışmada, %35 oranında uçucu kül kullanılan karışımın durabilite faktörü %59.5 olarak hesaplanırken, söz konusu bu karışımın %5 oranında silis dumanı ilavesiyle durabilite faktörü %80 olarak hesaplanmıştır. Yazarlar, silis dumanı ve uçucu külün birlikte kullanılmasıyla, betonda bulunan büyük gözeneklerin azaldığını ve buna bağlı olarak betonun donma-çözülme direncinin arttığını belirtmişlerdir [15]. Diğer bir çalışmada, HSK içeren beton karışımlarının donma-çözülme deneyi sonrası basınç dayanım kayıpları, HSK içermeyen kontrol karışımının dayanım kayıpları ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada s/c oranı 0.40 olan karışımların 400 donma-çözülme çevrimine kadar her 50 çevrimde bir basınç dayanımları ölçülmüştür. HSK kullanmayan kontrol numunesinin 400 çevrim sonunda basınç dayanımı kaybı %52.6 olarak ölçülürken, HSK kullanılan numunenin basınç dayanım kaybı %44.4 olarak belirlenmiştir. Yazarlar, donma-çözülme olayı neticesinde meydana gelen hasar oluşumunun ana nedenin; suyun donması, genleşmesi ve buna bağlı olarak oluşan içsel gerilmeler olduğunu belirtmişlerdir. İkinci bir neden ise donma-çözülme olayı sırasında ısıl gerilmelerden kaynaklı oluşan çatlaklardır [16].

Literatürden anlaşıldığı gibi konu ile ilgili birçok farklı araştırma yapılmıştır. Bu çalışmada, farklı kombinasyonlarda hava sürükleyici katkı içeren mineral katkı karışımlar hazırlanarak, mineral katkı içermeyen kontrol karışımına göre performansları kıyaslamalı olarak incelenmiştir. Hem taze hal hem de sertleşmiş hal özellikleri açısından istenilen davranışı sergileyen karışımların belirlenmesi hedeflenmiştir. Ayrıca çalışmada silis dumanı, uçucu kül ve su azaltıcı katkının hava sürükleyici katkı ile uyumu, söz konusu katkının harç karışımlarının taze ve sertleşmiş hal davranışlarına etkisi araştırılmıştır. Tüm harç karışımlarında istenilen yayılma değerini sağlamak için tek tip polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı ve çimento ağırlığının %0.1'i oranında hava sürükleyici katkı kullanılmıştır. Sertleşmiş hal özellikleri olarak harç karışımlarının basınç, su emme ve donma-çözülme deney sonuçları mineral katkı türüne bağlı olarak kıyaslanmıştır.

2 Deneysel çalışma

2.1 Malzemeler

Bu çalışmada, bağlayıcı olarak TS EN 197-1 [17] standardına uygun CEM I 42.5 R tipi portland çimentosu, mineral katkı olarak farklı oranlarda uçucu kül ve silis dumanı çimento yerine kullanılmıştır. Agregata olarak ise TS EN 196-1 [18] standardına uygun standart kum kullanılmıştır. Üretici firma tarafından verilen çimento, uçucu kül ve silis dumanının kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri sırasıyla, Tablo 1 ve 2'de verilmiştir. Kullanılan standart kumun tane büyüklüğü dağılımı Tablo 3'te belirtilmiştir. Agreganın özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi TS EN 1097-6 [19] standardına uygun olarak sırasıyla, 2.72 ve kütlece %0.7 olarak elde edilmiştir. Tüm harç karışımlarının yayılma değeri 270 ± 20 mm olarak sabit tutulmuştur. Belirlenen yayılma değeri, Tablo 4'te özellikleri verilen tek tip polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılarak sağlanmıştır. Çalışmada tüm karışımlarda %0.1 oranında TS EN 934-2 [20] ç.5 tipi hava sürükleyici katkı kullanılmıştır.

Kullanılan katkının üretici firma tarafından verilen özellikleri Tablo 5'te gösterilmiştir.

2.2 Karışım oranları

Bu çalışmada, bağlayıcı miktarının % 0.1'i oranında HSK ve silis dumanı ile uçucu külün farklı oranlarda çimento yerine

kullanımının harç karışımların taze ve bazı sertleşmiş hal özelliklerine etkisi incelenmiştir. Bu sebeple, içeriğinde mineral katkı bulunmayan kontrol karışımına ilaveten, ikili ve üçlü bağlayıcı sisteme sahip üç farklı seri harç karışımları hazırlanmıştır. Tekli bağlayıcı sisteme sahip kontrol karışımında bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanılmıştır. İkili bağlayıcı sisteme sahip serilerde, çimentonun yerine ağırlıkça sırasıyla, %30 ve %10 oranında uçucu kül ve silis dumanı kullanılmıştır. Üçlü bağlayıcı sisteme sahip seride ise, çimento ağırlığının %30'u ve %10'u oranında sırasıyla, uçucu kül ve silis dumanı çimento yerine kullanılmıştır. Karışımların isimlendirilmesi içerdiği mineral katkı türüne göre yapılmıştır. Mineral katkı içermeyen tekli bağlayıcı sisteme sahip kontrol karışımı K-HSK ile adlandırılırken, uçucu kül içeren karışım UK-HSK, silis dumanı içeren karışım SD-HSK olarak adlandırılmıştır. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada bulunduğu üçlü bağlayıcı sisteme sahip karışım K-UK-SD-HSK olarak adlandırılmıştır. Harç karışımları ASTM C109 [21] standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı (s/b) ve kum/bağlayıcı (k/b) oranları ile yayılma değerleri sırasıyla, 0.485, 2.75 ve 270 ± 20 mm olarak sabit tutulmuştur. Daha önce de vurgulandığı gibi istenilen yayılma değeri farklı oranlarda tek tip polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı kullanılarak sağlanmıştır. Karışımlar homojen olarak hobart mikserinde hazırlanmıştır. Karışım oranları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun kimyasal bileşimi, fiziksel ve mekanik özellikleri.

Table 1. Chemical composition, physical and mechanical properties of cement.

Oksit (%)	Çimento	Fiziksel özellikleri	
SiO ₂	18.86	Özgül ağırlık	3.15
Al ₂ O ₃	5.71	Mekanik özellikleri	
Fe ₂ O ₃	3.09	Basınç dayanımı (MPa)	1-günlük 14.7
CaO	62.70		2-günlük 26.80
MgO	1.16		7-günlük 49.80
SO ₃	2.39		28-günlük 58.5
Na ₂ O+0.658 K ₂ O	0.92	İncelik	
Cl ⁻	0.01	Özgül yüzey (Blaine, cm ² /g)	3530
Çözünmeyen kalıntı	0.32	0.045 mm elekten kalıntı (%)	7.6
Kızdırma kaybı	3.20		
Serbest CaO	1.26		

Tablo 2. Uçucu kül ve silis dumanının kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri.

Table 2. Chemical composition and physical properties of fly ash and silica fume.

İçerik	U.K*	S.D**	Fiziksel Özellikleri	
	(%)	(%)	U.K	S.D
SiO ₂	59.22	76.70	Özgül Ağırlık	2.31 2.41
Al ₂ O ₃	22.86	2.22	Blaine yüzeyi (cm ² /g)	4300 35200
Fe ₂ O ₃	6.31	0.84	Puzolanik Aktivite İndeksi	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	88.39	79.76	7 günlük (%)	70.9 96.08
MgO	1.31	12.37	28 günlük (%)	77.7 102.73
Na ₂ O	0.41	1.79	90 günlük (%)	91.2 103.70
K ₂ O	1.51	1.55		
SO ₃	0.17	0.20		
CaO	3.09	0.55		
Serbest CaO	0.00	0.14		

*U.K: Uçucu kül.

**S.D: Silis dumanı

Tablo 3: Standart kumun tane büyüklüğü dağılımı.
Table 3. Particle size distribution of standard sand.

Kare Göz Açıklığı	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

Tablo 4. Polikarboksilat esaslı yüksek oranda su azaltıcı katkı özellikleri.
Table 4. Properties of polycarboxylate based-high range water reducing admixture.

Özellikler	Renk	Bağlı yoğunluk (g/cm ³)	Katı madde miktarı (%)	pH değeri	Klorür içeriği	Alkali miktarı (Na ₂ O)
Analiz Sonuçları	Kahverengi	1.097	36.35	3.82	<0.1	<10

Tablo 5. Hava sürükleyici katkı özellikleri.
Table 5. Properties of air entraining admixture.

Özellikler	Ayrışma	Renk	Bağlı yoğunluk (g/cm ³)	Katı madde miktarı (%)	pH değeri	Klorür içeriği (%)	Alkali miktarı (Na ₂ O)(%)
Analiz Sonuçları	Yok	Kahverengi	1.012	4.28	5.74	<0.1	<10

Tablo 6: Harç karışımlarının üretiminde kullanılan kütlece malzeme miktarları (g) ve yayılma değerleri.
Table 6. Amounts of materials by mass (g) used in the production and slump-flow values of mortar mixtures.

Numune Adı	Çimento	UK	SD	Su	Kum	Su Azaltıcı Katkı	Hava Sür. Katkı	Yayılma Miktarı (mm)
K-HSK	500	0	0	242.5	1375	2.5	0.5	250
UK-HSK	350	150	0	242.5	1375	2.1	0.5	267
SD-HSK	450	0	50	242.5	1375	2.8	0.5	250
K-UK-SD-HSK	300	150	50	242.5	1375	2.9	0.5	260

2.3 Yöntem

Çalışmada taze halde bulunan harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri ASTM C1437 [22] standardına uygun olarak her 20 dakikada bir toplamda dört defa ölçülmüştür. Söz konusu bu karışımların basınç dayanım değerleri ASTM C109 [20] standardına uygun olacak şekilde 3, 7, 28 ve 90 günlük olarak belirlenmiştir. Buna ilaveten harç karışımlarının 90 günlük su emme kapasitesi 50 mm'lik küp numuneler üzerinde ASTM C642-13 [23] standardına göre elde edilmiştir. Bu deneyde 90 gün boyunca suda bekletilen numuneler sudan çıkartılıp yüzeyi havlu ile kurutulup kuru doygun yüzey (saturated surface dry) ağırlığı (b) ölçülmüştür. Daha sonra 105°C bir etüvde değişmeyen ağırlığa kadar kurutulup, ağırlığı (a) ölçülmüştür. Harç karışımlarının su emme kapasitesi Denklem 1'e göre hesaplanmıştır.

$$S.F = \frac{b - a}{a} \times 100 \quad (1)$$

Çalışmada ayrıca, 90 gün kürlenmiş küp numuneler 0, 50, 100, 150 ve 200 donma-çözülme çevrimine maruz bırakıldıktan sonra basınç dayanım değerleri ölçülmüştür. Bu deney için toplamda 50 mm'lik 60 adet küp numune üretilmiştir. Donma-çözülme işlemi ASTM C666 [24] "Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing" standardına uygun olacak şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada havada donma, suda çözülme olarak hızlı yöntem uygulanmıştır. Deneyde donma sıcaklığı, -18 °C ± 2 °C ve çözülme sıcaklığı ise, 5 °C ± 2 °C aralığındadır. Donma süresi (maksimum sıcaklıktan minimum sıcaklığa varma süresi) 200 dakika, minimum sıcaklıktan maksimum ortam sıcaklığına varma süresi ise 60 dakika olarak 9 aşamada programlanmıştır. 260 dakika süren bu işlem bir donma-çözülme çevrimi olarak kabul edilmiştir.

Çalışmada hava sürükleyici katkı içeren 90 gün kürlenmiş küp numunelerin, 200 donma-çözülme çevrimi sonrası çatlak ölçer mikroskobu ile yüzey görüntüleri elde edilmiştir. Bu görüntüler, daha önce gerçekleştirilen bir çalışmada hava sürükleyici katkı içermeyen ancak diğer tüm karışım özellikleri aynı olan numunelerin (K, UK, SD, K-UK-SD), 200 donma-çözülme çevrimi sonrası elde edilmiş olan mikroskobik görüntüleri ile karşılaştırmalı olarak verilmiştir [25].

3 Bulgular ve tartışma

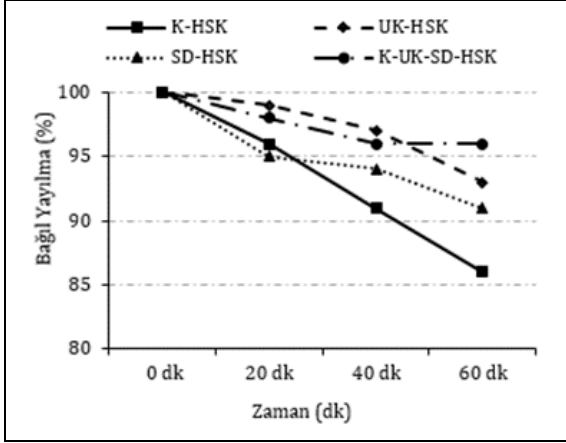
3.1 Zamana bağlı yayılma

Çimento ağırlığının %0.1'i oranında HSK ve uçucu kül ile silis dumanı kullanılarak hazırlanan karışımların 60 dakika boyunca zamana bağlı yayılma değerleri Tablo 7 ve Şekil 1'de verilmiştir. Daha önce de vurgulandığı gibi, tüm harç karışımlarının yayılma değeri 270 ± 20 mm olarak sabit tutulmuş ve 60 dakika boyunca yayılma değerleri ölçülmüştür.

Tablo 7. HSK içeren harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri (mm).

Table 7. Time-dependent slump-flow values of mortar mixtures containing AEA (mm).

Numune/Zaman	0 dk.	20 dk.	40 dk.	60 dk.
K-HSK	250	240	227.5	215
UK-HSK	267.5	265	260	250
SD-HSK	247.5	235	232.5	225
K-UK-SD-HSK	270	265	260	260



Şekil 1. Harç karışımlarının zamana bağlı yayılma değerleri.

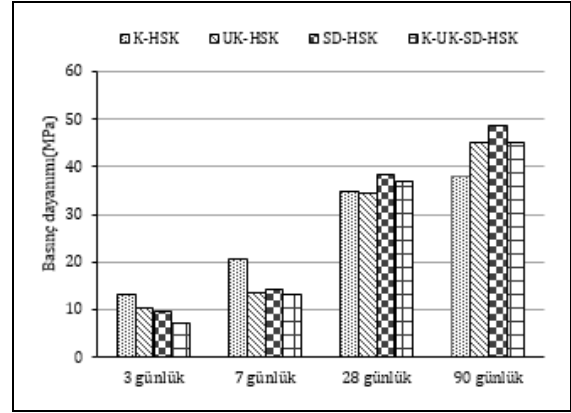
Figure 1. Relative slump-flow values of mortar mixtures.

Beklenildiği gibi kullanılan katkılardan bağımsız olarak harç karışımların yayılma miktarları zamanla azalmıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, 60 dakika sonunda %10 oranında UK ve %30 oranında SD içeren üçlü bağlayıcı sisteme sahip K-UK-SD-HSK karışımı, %4 yayılma kaybı ile en başarılı karışım olmuştur. Kontrol (K-HSK) karışımında yayılma kaybı %14 olarak ölçülürken, %10 oranında SD içeren SD-HSK karışımında %9, %30 oranında UK içeren UK-HSK karışımında ise bu değer %7 olarak hesaplanmıştır. Bilindiği üzere hava sürükleyici katkıları, karışım içerisinde küresel ve birbirine bağlantısı olmayan düzenli küçük boşluklar oluşturan katkılarıdır. Bu küresel ve düzenli boşluklar sayesinde karışımların taze halde işlenebilirliğine olumlu etkisinin olduğu ve kıvam kaybını da olumlu yönde etkilediği bilinmektedir [26]. Silis dumanı içeren karışımlarda Tablo 6'dan da görüldüğü gibi hedef yayılma değerini sağlamak için gerekli katkı miktarı kontrol karışımına göre daha fazla olmuştur. Silis dumanının çimento ve UK'dan daha ince olmasından dolayı söz konusu SD-HSK ve K-UK-SD-HSK karışımlarının katkı ihtiyacını artırdığı düşünülmektedir. UK- HSK karışımında bulunan uçucu külün yapısının küresel olması karışımın işlenebilirliğini olumlu yönde etkilemiş ve hedef yayılma için gerekli katkı miktarı kontrol karışımından daha az olmuştur. Harç karışımlarında SD ve UK mineral katkılarının HSK ile birlikte kullanılması karışımların zamana bağlı yayılma davranışlarını olumlu yönde etkilemiştir.

3.2 Basınç dayanımı

Karışımların 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri Şekil 2'de gösterilmiştir. Her bir karışıma ait olan 50 mm'lik üç adet küp numunenin basınç dayanım değerleri belirlenerek ortalaması alınmıştır. Şekil 2'de görüldüğü gibi 3 ve 7 günlük basınç dayanım değerleri dikkate alındığında, mineral katkı

içeren karışımların basınç dayanım değerleri, kontrol karışımına kıyasla daha düşük çıkmıştır. Ancak, 28 günden sonra mineral katkıların fiziko-kimyasal etkisi ile birlikte dayanım değerlerinde artışlar görülmüştür.



Şekil 2. Numunelerin 3, 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri (MPa).

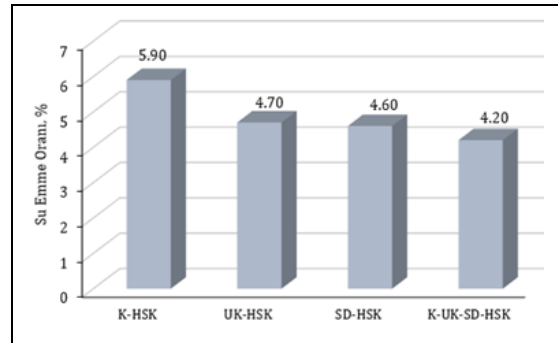
Figure 2. The 3, 7, 28 and 90-day compressive strength values of the specimens (MPa).

Kimyasal etki açısından puzolanik reaksiyon sonucunda kalsiyum hidroksitler (CH) kalsiyum silika hidratlara (C-S-H) dönüşmesiyle matris fazında mevcut boşluklar azalmaktadır. Ayrıca karışımlarda çimento yerine belirli oranlarda inceliği daha düşük olan silis dumanı ve uçucu külün kullanılmasıyla matris fazında fiziksel olarak boşluklar azalmakta ve daha dolu bir yapı oluşması sağlanmaktadır [27].

Mineral katkı içeren karışımların basınç dayanım değerleri, 90 günlük örneklerde kontrol karışımından daha yüksek çıkmıştır. 90 günlük basınç dayanım değerlerine göre, UK-HSK ve K-UK-SD-HSK karışımları birbirine yakın sonuçlar gösterirken, en başarılı karışım basınç dayanımı 48.75 MPa olan ve %10 oranında silis dumanı içeren SD-HSK serisi olmuştur. Silis dumanı yüksek puzolanik aktivite indeksi değerine sahip olduğu için karışımların 90 günlük basınç dayanımını olumlu etkilemiştir. Ancak, bu çalışmada kullanılan uçucu külün puzolanik aktivite indeksi silis dumanına kıyasla daha düşük olduğundan dayanım üzerindeki performansı silis dumanına göre daha düşük olmuştur.

3.3 Su emme

Harç karışımlarının 90 günlük su emme oranı Şekil 3'te verilmiştir.



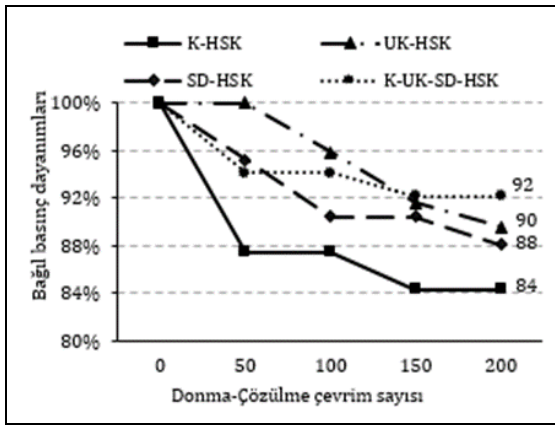
Şekil 3. Numunelerin 90 günlük su emme değerleri (%).

Figure 3. Water absorption values of the 90-day specimens (%).

Söz konusu bu oranlar üç farklı numunenin ortalaması alınarak elde edilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, mineral katkı kullanımıyla birlikte tüm karışımların 90 günlük su emme değerleri kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Hem uçucu kül hem de silis dumanı içeren K-UK-SD-HSK karışımı su emme performansı açısından en başarılı karışım olarak tespit edilmiştir. Söz konusu karışım kontrol (K-HSK) karışımına kıyasla %29 daha geçirimsiz olmuştur. Mineral katkının su emme oranları üzerindeki olumlu etkisinin, mineral katkının fiziko-kimyasal etkisinden kaynaklandığı daha önce de vurgulanmıştır.

3.4 Donma-çözülme

90 gün kür edilmiş küp numunelerin 0, 50, 100, 150 ve 200 donma-çözülme çevrim sonrası bağıl basınç dayanımları Şekil 4'te gösterilmiştir.



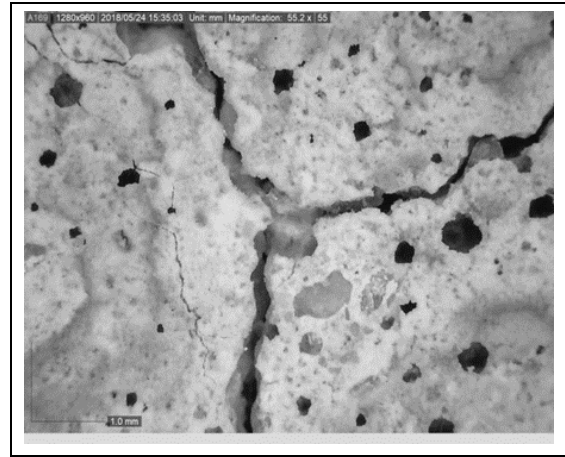
Şekil 4. 90 günlük numunelerin donma-çözülme deneyi sonrası bağıl basınç dayanım değerleri.

Figure 4. Relative compressive strength values of the 90-day specimens after freeze-thaw testing.

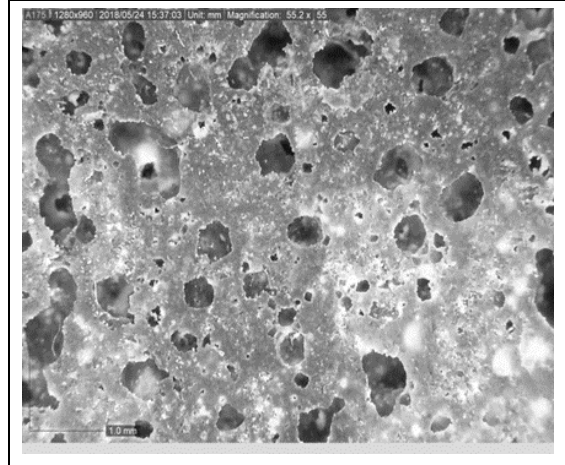
Sonuçlar, standarda uygun olarak gerçekleştirilen üç farklı ölçümün aritmetik ortalaması hesaplanarak şekilde verilmiştir. Beklenildiği gibi donma-çözülme çevrim sayısının artmasıyla birlikte numunelerin basınç dayanım değerleri azalmıştır. Sonuçlardan da anlaşıldığı gibi, 200 çevrim sonunda en fazla basınç dayanım kaybı %16 oranı ile Kontrol (K-HSK) serisinde görülmüştür. Kontrol serisine ait numuneler 50 çevrim sonrasında dahi yüksek oranda basınç dayanım kaybına uğramış ve mineral katkı içeren karışımlara kıyasla donma-çözülme çevrimine karşı yeterli direnç gösterememiştir. Çimento ağırlığının %30'u oranında uçucu kül içeren UK-HSK karışımı ile çimento ağırlığının %10'u oranında silis dumanı içeren SD-HSK karışımının basınç dayanım kaybı sırasıyla %10 ve %12 olarak hesaplanmıştır. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada bulunduğu üçlü bağlayıcı sisteme sahip K-UK-SD-HSK serisi donma-çözülme çevrimlerine karşı en başarılı performansa sahip karışım olarak tespit edilmiştir. Söz konusu karışım 200 çevrim sonunda %8 oranında basınç dayanım kaybına uğramıştır. Bilindiği gibi mineral katkı kullanımı çimentolu sistemlerin davranışını etkilemektedir. Bahsedilen bu etkinin, kullanılan katkıların fiziko-kimyasal özelliklerinden kaynaklandığı daha önce de vurgulanmıştır. Mineral katkıların puzolonik özelliğinin yanı sıra karışımlarda ince malzeme miktarını artırarak boşluk hacmini azalttığı ve buna bağlı olarak karışımların durabilite performanslarını arttırıcı etkisi olduğu görülmüştür [27].

3.5 Mikroskop altında fotoğraflama

200 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış hava sürükleyici katkı içeren ve içermeyen, K ve K-HSK numunelerinin mikroskobik yüzey görüntüsü Şekil 5'te verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, HSK içermeyen K karışımında 200 donma-çözülme çevrim sonrası derin çatlaklar oluşmuştur. Ancak HSK içeren karışımında 200 donma-çözülme çevrim sonrası her hangi bir çatlak oluşumu gözlenmemiştir. HSK kullanımıyla birlikte karışımın homojen yapıda bir boşluk sistemi oluşumu sağlanmış ve donma-çözülme olayı esnasında söz konusu bu homojen yapı, henüz donmamış olan sular için güvenli kaçış noktaları oluşturarak içsel gerilmeyi ve buna bağlı olarak oluşabilecek çatlakları engellemiştir [6],[7].



(a)



(b)

Şekil 5. K numunesi 200 çevrim sonrası mikroskobik görüntüsü. (a): K-HSK numunesi 200 çevrim sonrası mikroskobik görüntüsü. (b): 1280x960 Unit: mm Magnification: 55.2x55.

Figure 5. Microscopic image of K specimen after 200 cycles. (a): Microscopic image of K-HSK specimen after 200 cycles. (b): 1280x960 Unit: mm Magnification: 55.2x55.

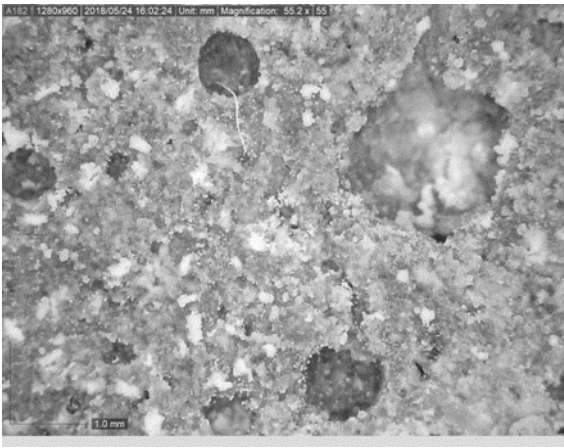
200 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış hava sürükleyici katkı içeren ve içermeyen, UK ve UK-HSK numunelerinin mikroskobik yüzey görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 6'dan da anlaşıldığı gibi, UK-HSK numunesinde oluşan boşluk sistemi, UK numunesine kıyasla oldukça belirgin bir haldedir. Literatürden de bilindiği gibi karışımlarda HSK kullanılarak

sonradan oluşturulan bu düzenli boşluklar, numunelerin donma-çözülme etkisine karşı direncini arttırmaktadır [5].

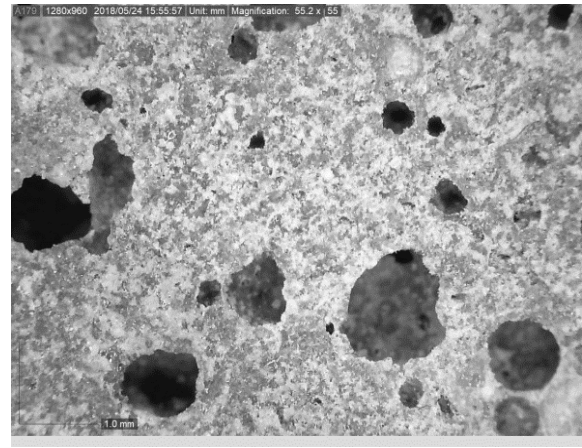
200 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış hava sürükleyici katkı içeren ve içermeyen, SD ve SD-HSK numunelerinin mikroskopik yüzey görüntüsü Şekil 7'de verilmiştir. Silis dumanı da diğer mineral katkıları gibi, puzolanik reaksiyon sonucu kalsiyum hidroksitleri (CH), daha güçlü bir yapıya sahip olan ve çimentolu sistemlere bağlayıcılık özelliği kazandıran kalsiyum silika hidratlara (CSH) dönüştürmektedir. Böylece fiziksel olarak gözeneklerin azalmasıyla birlikte güçlü bir agrega-hamur ara yüzeyi oluşturularak, çimentolu sistemlerin dayanım ve dayanıklılığını arttırmaktadır [8]. Şekil 7(b)'de HSK

etkisiyle birlikte numunede küresel şekilli ve birbirinden bağımsız düzenli hava boşluklarının oluştuğu görülmektedir.

200 donma-çözülme çevrimine maruz kalmış hava sürükleyici katkı içeren ve içermeyen üçlü bağlayıcı sisteme sahip K-UK-SD ve K-UK-SD-HSK numunelerinin mikroskopik yüzey görüntüsü Şekil 8'de verilmiştir. Çimentolu sistemlerde uçucu kül ve silis dumanının birlikte kullanılmasıyla büyük gözeneklerin azaldığı ve dayanıklılığın arttığı bilinmektedir [15]. Kullanılan HSK maddesiyle birlikte numunelerde istenen boşluk oluşumu sağlanmış ve donma-çözülme etkisine karşı direncin artması hedeflenmiştir.



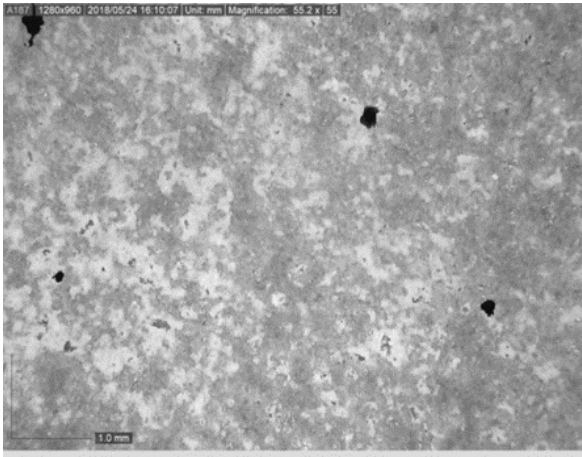
(a)



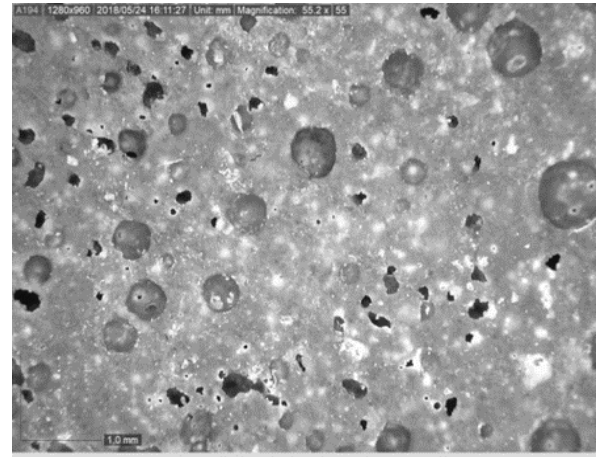
(b)

Şekil 6. UK numunesi 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüsü. (a): UK-HSK numunesi 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüsü (b): 1280x960 Unit: mm Magnification: 55.2x55

Figure 6. Microscopic image of the UK specimen after 200 cycles. (a): Microscopic image of UK-HSK specimen after 200 cycles (b): 1280x960 Unit: mm Magnification: 55.2x55



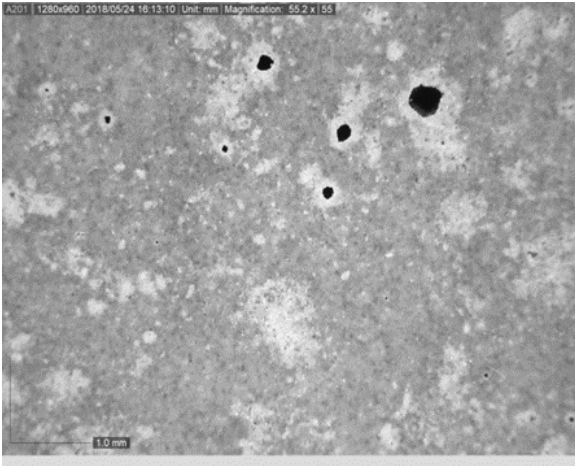
(a)



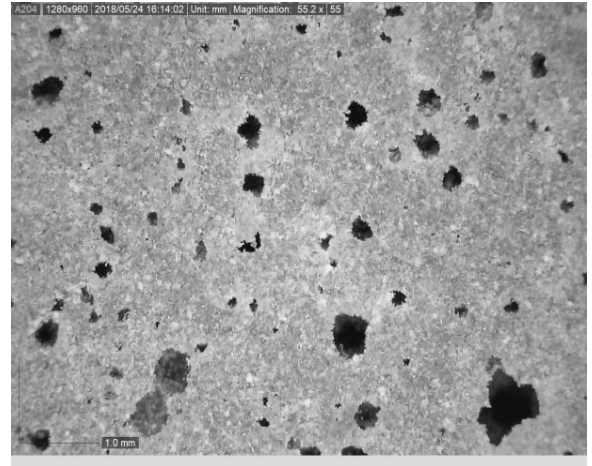
(b)

Şekil 7. SD numunesi 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüsü. (a): SD-HSK numunesi 200 çevrim sonrası mikroskopik görüntüsü (b): 1280x960 Unit: mm Magnification: 55.2x55.

Figure 7. Microscopic image of the SD specimen after 200 cycles. (a): Microscopic image of SD-HSK specimen after 200 cycles (b): 1280x960 Unit: mm Magnification: 55.2x55



(a)



(b)

Şekil 8. K-UK-SD numunesi 200 çevrim sonrası mikroskobik görüntüsü. (a): K-UK-SD-HSK numunesi 200 çevrim sonrası mikroskobik görüntüsü. (b): 1280x960 Unit: mm Magnification: 55.2x55.

Figure 8. Microscopic image of the K-UK-SD specimen after 200 cycles. (a): Microscopic image of K-UK-SD-HSK specimen after 200 cycles (b): 1280x960 Unit: mm Magnification: 55.2x55

4 Sonuçlar

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

Harc karışımlarında silis dumanı ve uçucu külün HSK ile birlikte kullanılması karışımların zamana bağlı yayılma davranışlarını olumlu yönde etkilemiştir. Hava sürükleyici katkı kullanımı ile oluşan küresel ve düzenli boşlukları, karışımların işlenebilirliğini ve kıvam kaybını olumlu yönde etkilediği ifade edilebilir.

Mineral katkı içeren karışımlar erken yaşlarda kontrol karışımına kıyasla daha düşük dayanım gösterirken, 90 günün sonunda kontrol karışımından daha yüksek basınç dayanım değerlerine sahip olmuşlardır. Uçucu küle kıyasla daha yüksek pozolonik aktivite indeksine sahip olan silis dumanının kullanıldığı SD-HSK karışımı basınç dayanımı açısından en üstün performansı gösteren karışım olmuştur.

Mineral katkı tipinden bağımsız olarak, mineral katkılı harc karışımlarının 90 günlük su emme değerleri kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Bu bağlamda en başarılı sonuç, uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD-HSK karışımında gözlemlenmiştir. Söz konusu karışım, kontrol karışımına kıyasla %29 daha düşük su emme özelliği göstermiştir.

Harc karışımlarının donma-çözülme çevrim sayısının artmasıyla birlikte basınç dayanım değerleri azalmıştır. 200 çevrim sonunda en fazla basınç dayanım kaybı %16 oranı ile Kontrol (K-HSK) serisinde görülmüştür. Uçucu kül ve silis dumanının bir arada kullanıldığı üçlü bağlayıcı yapıda olan K-UK-SD-HSK karışımı donma-çözülme çevrimlerine karşı en başarılı performansa sahip karışım olarak tespit edilmiştir. Söz konusu karışım 200 çevrim sonunda %8 oranında basınç dayanım kaybına uğramıştır. Mineral katkıların pozolonik özelliğinin yanı sıra karışımlarda ince malzeme miktarını artırarak boşluk hacmini azalttığı ve buna bağlı olarak karışımların durabilite performanslarını artırdığı görülmüştür.

5 Conclusions

As a result of the experimental studies, the following findings were obtained.

The use of silica fume and fly ash together with AEA in mortar mixtures positively affected the time-dependent slump-flow behavior of the mixtures. It can be stated that the spherical and regular voids formed by the use of air-entraining admixture positively affect workability and loss of consistency of the mixtures.

While the mixtures containing mineral additives showed lower strength compared to the control mixture at early ages, they had higher compressive strength values than the control mixture at the end of 90 days. The SD-HSK mixture, using silica fume, which has a higher pozzolanic activity index compared to fly ash, was the mixture showing the highest performance in terms of compressive strength.

Regardless of the mineral additive type, the 90-day water absorption values of the mineral additive-bearing mortar mixtures were lower compared to the control mixture. In this context, the most successful result was observed in the K-UK-SD-HSK mixture with ternary binder system, in which fly ash and silica fume were used together. The mentioned mixture showed 29% lower water absorption than the control mixture.

As the number of freeze-thaw cycles of mortar mixtures increased, compressive strength values decreased. At the end of 200 cycles, the highest compressive strength loss was determined in the control series (K-HSK) with 16%. The K-UK-SD-HSK mixture with ternary binder system where fly ash and silica fume are used together, was identified as the most successful mixture against freeze-thaw cycles. The mentioned mixture lost 8% compressive strength at the end of 200 cycles. In addition to the pozzolonic properties of mineral additives, it was observed that the void volume reduced by increasing the amount of fine material in the mixtures and consequently the durability performance of the mixtures increased.

6 Teşekkür

Yazarlar kimyasal katkı temini için Polisan Kimya AŞ'ye, çimento temini için Bursa Çimento AŞ ve Bursa Beton AŞ'ye teşekkür ederler. Ayrıca, yapılan çalışma Uludağ Üniversitesi AYP(MH)-2016/16 No.lu BAP Altyapı Projesi ve SLBÇ(MH)-2017/2 No.lu BAP Sektör Odaklı Lisans Bitirme Çalışması Destek Projesi kapsamında desteklenmiştir.

7 Kaynaklar

- [1] Baradan B, Yazıcı H, Ün H. *Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite)*. İzmir, Türkiye, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2002.
- [2] Mather B. "Concrete durability". *Cement and Concrete Composites*, 26(1), 3-4, 2004.
- [3] Baradan B, Türkel S, Yazıcı H, Ün H, Yiğiter H, Felekoğlu B, Tosun K, Aydın S, Yardımcı YM, Topal A, Öztürk AU. *Beton*. İzmir, Türkiye, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 2012.
- [4] Powders TC, Anel Helmuth RA. "Theory of volume changes in hardened portland cement pastes during freezing". *Thirty-Second Annual Meeting of the Highway Research Board*, Washington, USA, 13-16 January 1953.
- [5] Snyder KA. "A numerical test of air void spacing equations". *Advanced Cement Based Materials*, 8, 28-44, 1998.
- [6] Neville AM. *Properties of Concrete*. London, England, John Wiley & Sons Inc., 1997.
- [7] Pigeon M, Pleau, R. *Durability of Concrete In Cold Climates*. London, England, CRC Press, 1995.
- [8] Mehta PK, Monteiro PJM. *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. 3th ed. New York, USA, McGraw- Hill, 2010.
- [9] Topçu İB, Canbaz M. "Silis dumanının betonda mekanik çatlak oluşumlarına etkisi". *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 17-26, 2008.
- [10] Aitcin PC, Laplante P. "Long-Term compressive strength of silica fume concrete". *Journal Materials in Civil Engineering*, 3(3), 164-170, 1990.
- [11] Dinçer R, Çağatay İH. "Uçucu kül katkılı betonların mekanik özellikleri". *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 19(2), 235-246, 2004.
- [12] Güçlüer K, Ünal O. "Uçucu kül içeriğinin beton basınç dayanımı ve geçirimsizliği üzerine etkisinin araştırılması". *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(1), 11-18, 2010.
- [13] Delikurt BC, Sevim UK. "Sugözü uçucu külünün betonun ekanik ve durabilite özelliklerine etkisi". *Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 4(1), 47-58, 2015.
- [14] Ataş Z. Hava Sürükleyici ve Lif Katkısı İçeren Çimento Harçlarının Donma-Çözülme Etkisi Altında Mekanik Davranışlarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Gümüşhane, Türkiye, 2013.
- [15] Shon C, Abdigaliyev A, Bagitova S, Chung C, Kim D. "Determination of air-void system and modified frost resistance number for freeze-thaw resistance evaluation of ternary blended concrete made of ordinary Portland cement/silica fume/class F fly ash". *Cold Regions Science and Technology*, 155, 127-136, 2018.
- [16] Shang H, Song Y, Ou J. "Behavior of air-entrained concrete after freeze-thaw cycles". *Acta Mechanica Solida Sinica*, 22(3), 2009.
- [17] Türk Standartları Enstitüsü. "TS EN 197-1 Çimento-Bölüm 1: Genel çimentolar-Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri". Ankara, Türkiye, 2012.
- [18] Türk Standartları Enstitüsü. "TS EN 196-1 Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini". Ankara, Türkiye, 2016.
- [19] Türk Standartları Enstitüsü. "TS EN 1097-6 Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler - Bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini". Ankara, Türkiye, 2013.
- [20] Türk Standartları Enstitüsü. "TS EN 934-2 Kimyasal katkılar-Beton harç ve şerbeti için-Bölüm 2: Beton katkılar". Ankara, Türkiye, 2002.
- [21] American Society for Testing and Materials. "ASTM C109 Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)". Pennsylvania, USA, 2019.
- [22] American Society for Testing and Materials. "ASTM C1437 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar". Pennsylvania, USA, 2019.
- [23] American Society for Testing and Materials. "ASTM C642 Standard Test Method for Density, Absorption and Voids in Hardened Concrete". Pennsylvania, USA, 2013
- [24] American Society for Testing and Materials. "ASTM C666 Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing". Pennsylvania, USA, 1998
- [25] Mardani-Aghabaglou A, Geven E, Nematzadeh A. "Effect of utilization of different type of mineral admixture on fresh and hardened properties of cementitious systems". *Sakarya University Journal of Science*, 23(2), 213-223, 2019.
- [26] Kosmatka SH, Kerkhoff B, Panarese WC. *Design and Control of Concrete Mixtures*. 14th Ed. Skokie, Illinois, USA, Portland Cement Association, 2002.
- [27] Mardani-Aghabaglou A, Sezer Gİ, 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.