



Erciyes University Journal of the Institute of Science and Technology
Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi
 ISSN 1012-2354

Cilt (Volume) 27, Sayı (Issue) 4, Ekim/October-2011
<http://fbc.erciyes.edu.tr/>



Çimento harçlarında ikame malzemesi olarak zeolit ve silis dumani kullanımı

*Cahit BİLİM

*Mersin Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 33343, Mersin, Türkiye

Keywords
 Çimento,
 Zeolit,
 Silis dumani,
 Harç,
 Mekanik özellikler

ÖZET

Çalışmada, ikame malzemesi olarak zeolit+silis dumani içeren çimento harçlarının, fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmış, elde edilen sonuçlar, kontrol harcınıki ile kıyaslanmıştır. Kum ve su miktarlarının sabit tutulduğu deneylerde %10 oranında silis dumani sabit kalmak kaydıyla ağırlıkça %0, %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında değişen zeolit yer değişimleri ile üçlü harç karışımları elde edilmiştir. Karışımların, su ihtiyacı, priz süresi, hacim genişmesi, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, su emme, porozite, kuru birim ağırlık, aşınma direnci ve karbonatlaşma derinliği ölçülmüştür. Yürütülen deneyler kapsamında elde edilen bulgular, çimento yerine ikame edilen zeolit ve silis dumanının, harcın özelliklerini iyileştirerek kontrol harcına göre daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

Use of zeolite and silica fume as replacement materials in cement mortars

Anahtar Kelimeler
 Cement,
 Zeolite,
 Silica fume,
 Mortar,
 Mechanical properties

ABSTRACT

In this study, the properties of the cement mortars containing zeolite + silica fume as Portland cement replacement materials were investigated, and the results obtained were compared with the control mortar. In the experiments, sand and water quantities were kept constant. Zeolite was used at 0%, 5%, 10%, 15%, 20% and 30% replacement by weight of cement in the mortars while 10% of silica fume was added into the mixtures. Water demand, setting times, soundness, compressive and flexural strength, water absorption, porosity, dry unit weight, abrasion resistance and carbonation depth of the mortars was determined. The findings obtained showed that zeolite and silica fume used as replacement materials for cement improved the properties of the cement mortar, exhibiting a better performance than the control mortar according to the tests performed.

1. Giriş

Dünya nüfusunda meydana gelen artış, ihtiyaç duyulan su, yiyecek, yerleşim alanı ve enerji gibi temel gereksinimler üzerindeki sıkıntıyı da beraberinde getirmektedir. Yükselen enerji talebinin karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynakları yerine artan oranda fosil yakıtlarının kullanılması, CO₂ emisyonunun artmasında büyük rol oynamaktadır. Kyoto protokolünün esasını teşkil eden CO₂ emisyonunun azaltılmasına yönelik çevresel düzenlemelerin yanı sıra, düşük maliyet, insan sağlığının korunması, doğal kaynakların dikkatli ve etkin kullanımı gibi faktörler, inşaat sektöründe alternatif malzemelerin değerlendirilmesini zorunlu kılmaktadır. Çimento ile belli oranlarda ikame edilerek kullanılan doğal ya da yapay puzolanlar, maliyeti düşürmede ve CO₂ emisyonunu azaltmada yararlı olmaktadır. Hidratasyon sonucu ortaya çıkan Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek ilave bağlayıcı bileşenler meydana getiren puzolanlar, geçirimsizliğin artırılmasında ve betonun kimyasal ortamdaki direncinin iyileştirilmesinde oldukça yarar sağlamaktadır [1,2]. Katkılı çimentolarda kullanılan puzolanik malzemelerde olduğu gibi, silis ve alümin içeren [3,4] bir başka malzeme de doğal zeolitlerdir. Zeolitler, kristal yapıları ve kimyasal özellikleri nedeniyle, günümüz endüstriyel hammaddeleri arasında önemli bir yerde bulunmaktadır. Sahip oldukları fiziksel yapıları ve kimyasal özelliklerinden dolayı, kirlilik kontrolü, enerji verimliliği, madencilik, tarım ve hayvancılık gibi birçok endüstri kolunda kullanılan doğal zeolitlerin [5] klinoptilolit, çabasite, analsim, eriyonit, ferrierit, hoylandit, laumontit, mordenit ve fillipsit gibi birçok türü mevcut olup, bunlar içerisinde en çok aranan özellikleri taşıyan türü klinoptilolittir. Klinoptilolit, dünyada yaygın bir şekilde bulunması, geniş uygulama alanına sahip olması, ekonomik olarak işletilebilirliği, homojenliği gibi yönleri ile doğal zeolitlerin en önemli mineral grubu arasındadır.

Doğal zeolit katkısı içeren betonlar üzerinde yapılan araştırmalar, sahip olduğu yüksek puzolanik aktiveden dolayı, zeolit beton özelliklerini iyileştirdiğini ve yüksek performanslı beton üretiminde kullanılabilmesini ortaya koymaktadır [6-8]. Beton içerisinde doğal zeolit kullanımı, erken yaşlarda daha az mukavemet kaybına neden olmakta ve bağlayıcı madde hamurunun porozitesini azaltarak mukavemet gelişimine katkıda bulunmaktadır [4]. Doğal zeolitlerin yüksek gözenekliliğe ve düşük ağırlığa sahip olması, hafif yapı taşı olarak yapı endüstrisinde kullanımlarını mümkün kılmaktadır [9]. Portland çimentosu klinkeri ile karşılaştırıldığında daha yumuşak bir malzeme olan zeolit betonun sahip olduğu boşluklu yapı, öğütme işleminin daha kolay olmasını ve kısılmasını sağlamaktadır [7]. Ancak, yapılarında doğal olarak bulunan bu gözeneklerden dolayı karışım içerisinde ihtiyaç duyulan su miktarı fazlaştığından, aynı kıvamda çimento hamuru üretebilmek için süper plastikleştirici kimyasal katkı kullanımına gereksinim duyulmaktadır [10,11]. Doğal zeolitler, alkali-agrega reaksiyonu ve sülfat atağı sonucunda ortaya çıkacak zararlı hacim genleşmelerini önleyerek beton durabilitesine katkıda bulunmaktadır [7,12,13].

Beton içerisinde mineral katkı maddesi olarak kullanılan malzemelerden birisi de, silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen silis dumanıdır. Çok ince taneli olması ve bol miktarda amorf silis içermesi sebebiyle, oldukça aktif bir puzolan kabul edilen silis

dumanının çimento veya beton içerisine katılması, bağlayıcı madde hamurunun dayanım ve dayanıklılık karakteristiklerinde bir artış meydana getirmektedir. Yürütülen araştırmalar, silis dumanının beton permeabilitesini azalttığını ve mikro yapıyı iyileştirerek mukavemete yardımcı olduğunu göstermektedir [14,15]. Ancak, beton içerisine silis dumanı katılması, işlenebilirliği düşürdüğü için, sabit bir çökme değeri elde edebilmek için daha fazla süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımına gerek duyulmaktadır [16].

Oldukça zengin doğal zeolit rezervlerine sahip olan Türkiye’de, üretim ve tüketimleri çok düşük seviyede kalan doğal zeolitlerin, silis dumanıyla beraber, büyük hacimlerdeki malzemelerin değerlendirilmesinde elverişli bir alan kabul edilen inşaat sektöründe kullanılması, bu konularda endüstriye ışık tutacak teknik verilerin sağlanmasına bağlıdır. Silis dumanının, bir doğal zeolit türü olan klinoptilolit ile beraber mineral katkı maddesi olarak kullanılmasının ekolojik ve ekonomik açıdan sağlayacağı yararlar göz önüne alınarak, literatürdeki mevcut bilgi seviyesine katkı sağlamak amacıyla yürütülen bu çalışmada, zeolit + silis dumanı içeren harçların fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri araştırılmıştır.

2. Gereç ve yöntem

2.1. Kullanılan malzemeler

2.1.1. Çimento

Çalışmada, kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiş olan TS EN 197-1 [17] ile uyumlu CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 3.12 g/cm³ ve özgül yüzeyi 3200 cm²/g olan çimentonun, başlangıç ve bitiş priz süreleri sırasıyla, 190 ve 225 dakikadır.

Tablo 1. Kullanılan çimento, zeolit ve silis dumanının kimyasal özellikleri

Kimyasal Kompozisyon (%)	Çimento	Zeolit	Silis dumanı
SiO ₂	18.69	63.01	92.63
Al ₂ O ₃	5.61	10.72	0.23
Fe ₂ O ₃	2.52	2.68	0.13
CaO	62.68	3.87	0.95
MgO	2.63	1.07	0.43
Na ₂ O	0.13	0.23	0.27
K ₂ O	0.77	3.80	1.20
SO ₃	2.73	0.22	0.46
Kızdırma kaybı	2.88	14.00	3.40
Serbest CaO	0.93	-	-
Çözünmeyen	0.96	-	-
Cl ⁻	0.012	-	-

2.1.2. Doğal zeolit

Çalışmada, mineral katkı maddesi olarak Gördes bölgesinde faaliyet gösteren Enli Madencilik San. ve Tic. A.Ş.’den temin edilen klinoptilolit türdeki öğütülmüş doğal zeolit

kullanılmıştır. Özgül ağırlığı 2.17 g/cm^3 , Blaine özgül yüzey değeri ise $9660 \text{ cm}^2/\text{g}$ olan zeolit kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiştir.

2.1.3. Silis dumanı

Çalışmada, kullanılan bir diğer mineral katkı maddesi de silis dumanıdır. Uzay Boya tarafından ithal edilen ve kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de verilmiş olan silis dumanının özgül ağırlığı, 2.21 g/cm^3 tür.

2.1.4. Kum

Harç karışımlarının hazırlanmasında TS EN 196-1 [18] ile uyumlu CEN standart kumu kullanılmıştır.

2.1.5. Su

Karışım suyu olarak şehir şebekesinden alınan içilebilir musluk suyundan yararlanılmıştır.

2.1.6. Akışkanlaştırıcı

Zeolit ve silis dumanı katkısının harç kıvamında meydana getireceği olumsuz etkiyi telafi etmek ve işlenebilirliği sabit tutabilmek amacıyla karışımlara, yayılmalarının kontrol harcının göstermiş olduğu yayılma değerine $\pm\%10$ aralığında yakın olmasını sağlayacak kadar melamin esaslı hiperakışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmıştır. TS EN 1015-3 [19]’e uygun olarak yürütülen yayılma tablası ölçümlerinden elde edilen değerler ve akışkan dozajları, karışım notasyonları ile birlikte Tablo 2’te verilmiştir. Tablo 2’de yer alan ZSDÇ terimi, zeolit + silis dumanı + çimento için kullanılan kısaltmalardır.

Tablo 2. Kullanılan akışkan dozajları ve yayılma miktarları

Karışım	Çimento (%)	Zeolit (%)	Silis dumanı (%)	Kimyasal katkı dozajı (%)	Yayılma (%)
Kontrol	100	-	-	-	55
ZSDÇ5	85	5	10	1.8	48
ZSDÇ10	80	10	10	2.7	55
ZSDÇ15	75	15	10	4.0	50
ZSDÇ20	70	20	10	6.5	50
ZSDÇ30	60	30	10	10.5	45

2.2. Deneysel çalışma

Deneysel çalışmada %10 oranında silis dumanı sabit kalmak kaydıyla ağırlıkça %, %5, %10, %15, %20 ve %30 oranlarında değişen zeolit yer değişimlerini ihtiva eden üçlü harç karışımları elde edilmiştir. Harçlar için kum/bağlayıcı oranı 3.0 ve su/bağlayıcı oranı 0.5 seçilmiştir. Bağlayıcı madde hamurlarının normal kıvam suyu ve priz süresi ölçümleri, otomatik vikat cihazı kullanılarak tespit edilmiş olup, hacim genleşmeleri ise Le chatelier aleti yardımıyla belirlenmiştir. Söz konusu bu ölçümler, TS EN 196-3 [20]’e göre yapılmıştır.

TS EN 196-1 [18]’e uygun olarak hazırlanan harç karışımlarının her birinden, $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ boyutlarında prizmalar ile $70.7 \times 70.7 \times 70.7 \text{ mm}$ boyutlarında küp numuneler üretilmiştir. 24 saat sonunda kalıplarından çıkartılan numuneler, iki farklı küre tabii tutulmuştur; Karbonatlaşma

ölçümlerinde kullanılacak prizma numuneler, sıcaklığı $21 \pm 1^\circ\text{C}$ olan %50 bağıl nemli kür odasına yerleştirilirken, çalışma kapsamındaki diğer deneylerde kullanılacak numuneler ise test günlerine kadar $21 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki su içerisinde bekletilmiştir.

Harç karışımlarının 2, 7, 28, 56 ve 90 gün sonundaki eğilme ve basınç mukavemetleri $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ boyutlarındaki prizmatik numuneler üzerinde TS EN 1015-11 [21]’e göre belirlenmiştir. Eğilme testleri için her bir karışımın 3 adet prizmatik numune kullanılmış, basınç testlerinde ise eğilme testlerinden geriye kalan kırılmış durumdaki 6 adet yarım parça deneye tabii tutulmuştur.

Harç numunelerin 28 günlük kür sonundaki su emme oranı, porozite (boşluk oranı) ve kuru birim ağırlık değerleri, TS 3624 [22]’e uygun olarak, 70.7 mm kenar uzunluğuna sahip küp numuneler üzerinden elde edilmiş ve sonuçlar, 3 adet numunenin ortalaması alınarak ifade edilmiştir.

Harç karışımlarının 28 gün sonundaki sürtünme yolu ile aşınma kayıpları, TS 2824 EN 1338 [23]’e uygun olarak, Bohme yüzey aşınması deneyleri ile belirlenmiştir. Testler, $70.7 \times 70.7 \times 70.7 \text{ mm}$ boyutlarındaki küp numuneler üzerinde yürütülmüş ve her bir karışımın 3 adet küp numune kullanılmıştır. Deneyde, başlangıç hacimleri bulunarak Bohme cihazının döner diski üzerine yerleştirilen numunelere 294 N’luk aşındırma kuvveti uygulanmıştır. Cihazın çalıştırılmasıyla birlikte sürtünme yolu üzerine dökülen 20 g korundum (Al_2O_3) tozunun aşındırıcı etkisine maruz bırakılan numuneler, her biri 22 devirden meydana gelen toplam 16 periyotluk aşınma testine tabii tutulmuş ve numunelerin, deney sonundaki hacimsel aşınma kayıpları belirlenmiştir.

Harç karışımlarının 2, 7, 28, 56 ve 90 gün sonundaki karbonatlaşma derinliği ölçümlerinde, $21 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %50 bağıl nem altında kür edilen $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$ boyutlarındaki prizmatik numuneler kullanılmıştır. Her bir karışımın 3 adet numunenin kullanıldığı deneylerde, orta kısımlarından enine olarak düzgün bir şekilde kesilen prizmatik numunelere hemen ardından %1’lik fenolfitalein çözeltisinin spreyi sıkılmış ve renk değişimi göstermeyen kısımların yüzeyden olan derinlikleri ölçülmüştür.

3. Bulgular ve tartışma

3.1. Fiziksel özellikler

Bağlayıcı madde hamurlarına ait hacim genleşmesi, normal kıvam suyu miktarı, başlangıç ve bitiş priz süreleri Tablo 3’de sunulmuştur.

Tablo 3. Karışımların su ihtiyacı, priz süresi ve hacim genleşmesi

Karışımlar	Su ihtiyacı (%)	Priz süresi (dk)		Hacim genleşmesi (mm)
		Başlangıç	Son	
Kontrol	32.1	177	220	1
ZSDÇ5	40.4	178	226	2
ZSDÇ10	43.5	200	255	2
ZSDÇ15	46.5	232	283	3
ZSDÇ20	49.2	267	319	3

ZSDÇ30	53.9	290	383	4
--------	------	-----	-----	---

Tablo 3'den görüldüğü gibi, sabit silis dumanı için, karışım içerisinde zeolit ikame oranının yükselmesi, ZSDÇ karışımlarının su ihtiyacını arttırmış, zeolit ikame oranı %30 olduğunda, ihtiyaç duyulan su hacmindeki artış %53.9'a ulaşmıştır. Karışımların gereksinim duydukları su miktarları, kimyasal yapı, özgül yüzey ve porozite gibi bazı faktörlere bağlı olduğundan [24], zeolit ve silis dumanının sahip olduğu bir hayli yüksek özgül yüzey ve gözenek yapısı, su miktarında görülen bu artışın esas kaynağını oluşturmaktadır. Diğer taraftan, puzolanik katkılar, kullanıldıkları karışımlardaki priz sürelerini arttırmaktadır [25,26]. Mineral katkı oranının artması, karışım içerisindeki hem alçıtaşı miktarını hem de C₃A muhtevasını düşürür. C₃A bileşeninin su içerisinde çözünmesi yavaşladığı takdirde, suyun difüzyonu ve Ca²⁺ iyonlarının çözülebilir duruma geçişi de yavaşlayacağından [24,27], bu durum priz sürelerinin uzamasına yol açar. Ayrıca, karışımlardan elde edilen hacim genişlemesi değerlerine bakıldığında ise elde edilen değerlerin, TS EN 197-1 [17]'de verilen sınır değerden düşük olduğu görülmüştür.

3.2. Basınç mukavemeti

ZSDÇ harçlarına ait basınç mukavemeti değerleri Tablo 4'te sunulmuştur. Beklendiği üzere, harç karışımlarının basınç mukavemeti tüm ikame oranları için geçen zamanla birlikte artış göstermiştir. Kontrol harcının basınç mukavemeti, 2 günde 21.85 MPa, 7 günde 32.37 MPa, 28 günde 43.90 MPa, 56 günde 50.00 MPa ve 90 günde 51.20 MPa olmuştur. ZSDÇ harçlarının basınç mukavemetleri ise, 2 günde 10.27 MPa ila 22.36 MPa, 7 günde 25.91 MPa ila 42.82 MPa, 28 günde 44.88 MPa ila 62.02 MPa, 56 günde 52.03 MPa ila 67.56 MPa ve 90 gün sonunda ise 54.66 MPa ila 71.28 MPa arasında değişmiştir. ZSDÇ5 ve ZSDÇ10 harçlarından 2 gün sonunda elde edilen basınç dayanımı, kontrol karışımına eşdeğer olurken, ZSDÇ15 karışımından itibaren dayanımlarda düşüşler meydana geldiği gözlenmiştir. ZSDÇ5 ve ZSDÇ10 harçlarının kontrol karışımına kıyasla gösterdiği 2 günlük bu yüksek erken mukavemetin, zeolit ve silis dumanının sahip olduğu yüksek özgül yüzey değeri ile ilişkili olduğu ve %15 yer değişim seviyesinden itibaren ortaya çıkan bu düşüşlerin ise ortamda yeterli miktarda Ca(OH)₂ bulunmamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. 7.günde, %20'ye kadar yapılan zeolit yer değişimi, ZSDÇ harçlarının basınç dayanımlarını kontrol karışımına kıyasla arttırırken, %30 zeolit içeren harcın basınç dayanımı ise kontrol karışımından biraz daha düşük olmuştur. Diğer taraftan, kür süresinin artması ile birlikte, zeolit+silis dumanı içeren harçların performansında dikkat çekici bir artış meydana gelmiş ve gelişen puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak ZSDÇ harçlarının 28, 56 ve 90 gün sonundaki basınç dayanımları, tüm yer değişim seviyeleri için kontrol karışımından daha yüksek olmuştur. Meydana gelen puzolanik reaksiyonlar neticesinde, kapiler boşlukların azalması ve hamur-agrega ara yüzeyinin iyileşmesi, ZSDÇ harçlarının dayanımlarında görülen bu gelişmenin sebebi olarak düşünülmektedir.

Tablo 4. Harçların basınç mukavemeti

Karışım	Basınç mukavemeti (MPa)				
	2	7	28	56	90
Kontrol	21.85	32.37	43.90	50.00	51.20
ZSDÇ5	22.36	42.17	58.97	61.23	65.70

ZSDÇ10	20.73	42.82	62.02	67.56	71.28
ZSDÇ15	17.02	39.59	58.51	66.41	70.25
ZSDÇ20	14.75	34.74	54.25	58.94	60.89
ZSDÇ30	10.27	25.91	44.88	52.03	54.66

3.3. Eğilme mukavemeti

ZSDÇ harçlarının 2, 7, 28, 56 ve 90 gün sonundaki eğilme mukavemeti, Tablo 5'te sunulmuştur. Tablo 5'ten, eğilme mukavemeti test sonuçlarının, genel olarak basınç mukavemeti testinden elde edilenlerle benzerlik gösterdiği görülmektedir. Kontrol harcının eğilme mukavemeti, 2 günde 4.01 MPa, 7 günde 5.98 MPa, 28 günde 7.15 MPa, 56 günde 7.31 MPa ve 90 günde 8.91 MPa olmuştur. ZSDÇ harçlarının eğilme mukavemetleri ise, 2 günde 2.06 MPa ila 4.03 MPa, 7 günde 4.51 MPa ila 7.03 MPa, 28 günde 7.27 MPa ila 9.14 MPa, 56 günde 8.06 MPa ila 11.36 MPa ve 90 gün sonunda ise 9.38 MPa ila 12.31 MPa arasında değişmiştir. Bu sonuçlara göre, 2 günlük yaşta ZSDÇ5 ve ZSDÇ10 harçlardan elde edilen eğilme dayanımları, kontrol karışımına yakın olup, %15 ikame oranından itibaren eğilme dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. Ancak, artan kür süresi ve gelişen puzolanik reaksiyonlar neticesinde, harçların eğilme dayanımları da artmaya başlamış ve özellikle 28. günden itibaren, ZSDÇ içeren harçlar tüm ikame oranları için, kontrol karışımından daha yüksek eğilme dayanımları sergilemişlerdir.

Tablo 5. Harçların eğilme mukavemeti

Karışım	Eğilme mukavemeti (MPa)				
	2	7	28	56	90
Kontrol	4.01	5.98	7.15	7.31	8.91
ZSDÇ5	4.03	6.33	9.14	10.21	11.37
ZSDÇ10	3.51	7.03	9.02	10.59	11.48
ZSDÇ15	3.03	6.68	8.44	11.36	12.31
ZSDÇ20	2.67	4.69	8.09	9.67	10.11
ZSDÇ30	2.06	4.51	7.27	8.06	9.38

3.4. Su emme, porozite ve kuru birim ağırlık

ZSDÇ harç numunelerinin 28 günlük kür sonundaki su emme oranı, porozite ve kuru birim ağırlık değerleri, Tablo 6'da sunulmuştur.

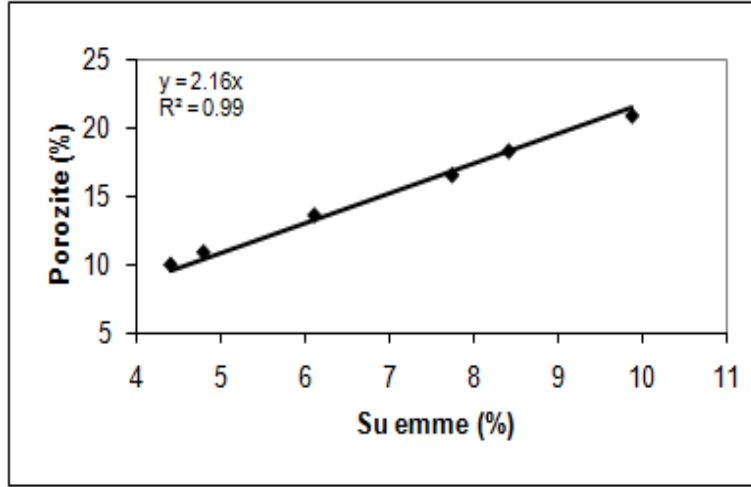
Tablo 6. Harçların su emme, porozite ve kuru birim ağırlık değerleri

Karışım	Su emme (%)	Porozite (%)	Kuru Birim Ağırlık (kg/m ³)
Kontrol	8.42	18.30	2167
ZSDÇ5	4.42	9.92	2137
ZSDÇ10	4.81	10.83	2093
ZSDÇ15	6.12	13.57	2087
ZSDÇ20	7.75	16.53	2039
ZSDÇ30	9.88	20.91	1982

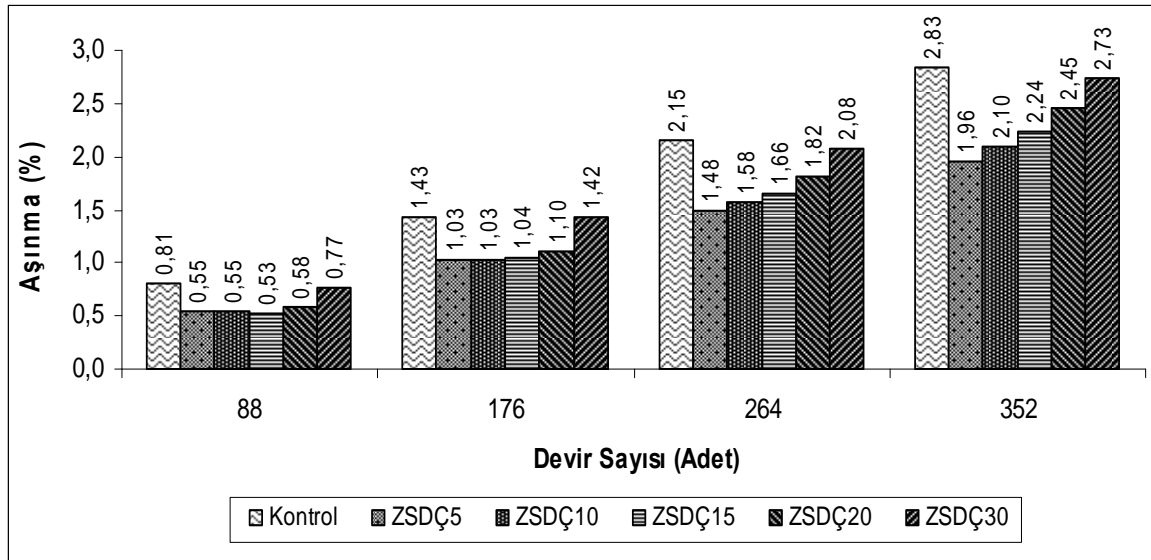
Tablo 6'daki sonuçlar, 1982 kg/m³ ve 2167 kg/m³ arasında değişen kuru birim ağırlıkların zeolit ve silis dumanı içeriğine bağlı olarak azaldığını ve dolayısıyla, ZSDÇ harçlarından elde edilen kuru birim ağırlıkların, kontrol harcından daha düşük olduğunu göstermektedir. Zeolit ve silis dumanının, çimentoya göre daha yüksek gözenek yapısına ve düşük özgül ağırlığa sahip olması, kuru birim ağırlıklarda meydana gelen bu azalmaların sebebi olarak görülmektedir. Tablo 6'da verilen diğer bulgulara göre, ZSDÇ harçlarının su emme oranları,

%4.42 ila %9.88 arasında değişmiş, porozite değerleri ise %9.92 ila %20.91 aralığında yer almıştır. Bu sonuçlardan, ZSDÇ harçlarının 28 günlük su emme oranı ve porozite değerlerinde yükselen zeolit ikame oranı ile birlikte bir artış meydana geldiği görülmektedir. Bu durum, ZSDÇ karışımlarındaki mineral katkıların puzolanik reaksiyonu için ortamda yeterli miktarda $\text{Ca}(\text{OH})_2$ bulunmayışından kaynaklanmaktadır. Puzolan miktarı arttığında, sertleşmiş çimento hamuru içerisindeki $\text{Ca}(\text{OH})_2$ miktarı azalmakta ve

mevcut $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in önemli bir miktarı, puzolanik reaksiyon tarafından tüketilmektedir [28]. Buna rağmen, ZSDÇ karışımlarından elde edilen su emme ve porozite değerleri, ZSDÇ30 karışımı hariç, kontrol karışımına kıyasla daha düşük olmuştur. Bu durumun temel sebebi, zeolit ve silis dumanının birlikte bağlayıcı madde hamurunda meydana getirdiği daha yoğun hamur yapısıdır.



Şekil 1. Porozite ve su emme arasındaki ilişki



Şekil 2. Zeolit ve silis dumanı içeren harçların aşınma kayıpları

Çalışma kapsamında, harçların, 28 günlük porozite ve su emme değerleri arasındaki ilişkiyi değerlendirmek amacıyla bir lineer regresyon analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen ve korelasyon katsayısı 0.99 olarak bulunan bu güçlü ve doğrusal ilişki, Şekil 1'de gösterilmiştir.

Şekilden de görüldüğü üzere, korundum tozunun aşındırıcı etkisine daha fazla maruz kalmalarından dolayı, numunelerin kayıp miktarları artan devir sayısı ile birlikte artış göstermiştir. Şekil 2'ye göre, 352 devirlik deney süresi sonunda, kontrol

karışımının aşınma miktarı %2.83 olurken, ZSDÇ harçlarının aşınma kayıpları ise, %1.96 ile %2.73 arasında değişmiştir. Ulaşılan bulgular, ZSDÇ harçlarından 28 gün sonunda elde edilen aşınma kayıplarının, zeolit muhtevası ile birlikte arttığını, buna rağmen elde edilen kayıp miktarlarının kontrol karışımına kıyasla daha düşük olduğunu göstermiştir. Puzolanik reaksiyonlar neticesinde iyileşen hamur yapısı ve agrega-hamur ara yüzeyi, zeolit ve silis dumanı kullanımıyla, aşınma direncinde sağlanan bu gelişmenin sebebi olarak düşünülmektedir.

3.6. Karbonatlaşma

Karbonatlaşma, çimentonun hidratasyonu sonucunda ortaya çıkan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in, havadaki CO_2 'i ile birleşmesi neticesinde meydana gelen ve yer aldığı bölgedeki betonun alkalinitesinin düşmesine neden olarak, çeliğin korozyona maruz kalmasına sebebiyet veren bir durabilite problemidir.

Bu durabilite probleminin önlenmesinde mineral katkıların rolünü araştırmak ve dolayısıyla da, zeolit ve silis dumanı katkısının, çimento harçlarının karbonatlaşma direncine olan etkisini gözlemek amacıyla, $21 \pm 1^\circ\text{C}$ sıcaklık ve %50 bağıl nem altında kür edilen $40 \times 40 \times 160$ mm boyutlarındaki prizmatik numunelerin %1'lik fenelfitalein çözeltisi kullanmak suretiyle ölçülen karbonatlaşma derinlikleri, zamana bağlı olarak Tablo 7'de sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar, CO_2 'in tedricen yüzeyden iç kısımlara doğru ilerlemesine bağlı olarak, kür yaşı ile birlikte karbonatlaşma değerlerinde bir artış meydana geldiğini göstermektedir. Tablo 7'den görüldüğü üzere, ZSDÇ karışımlarının 2 ve 7 günlük erken yaşlardaki karbonatlaşma değerleri, kontrol karışımına kıyasla daha yüksektir. Bu durum, zeolit ve silis dumanının puzolanik reaksiyonları için gerekli olan ve ortamda henüz yeteri derecede bulunmayan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'in miktarı ile ilişkilendirilebilir. Ancak bu olumsuz durum giderek ortadan kalkmış ve gelişen puzolanik reaksiyonlara bağlı olarak ortaya çıkan daha yoğun hamur yapısından dolayı ZSDÇ harçlarının karbonatlaşma değerleri, özellikle 28. günden sonra bütün ikame oranları için kontrol karışımından daha az olmuştur.

Tablo 7. Harçların karbonatlaşma derinlikleri

Karışım	Karbonatlaşma derinliği (mm)				
	2	7	28	56	90
Kontrol	0.97	1.60	3.68	5.51	6.75
ZSDÇ5	1.13	1.37	2.87	4.48	5.87
ZSDÇ10	1.02	1.23	2.64	4.33	5.68
ZSDÇ15	1.25	1.32	2.23	4.01	5.63
ZSDÇ20	1.51	1.63	2.67	4.65	6.49
ZSDÇ30	1.81	1.96	3.19	5.40	7.12

Sahip olduğu yüksek incelik değerinden dolayı zeolit ve silis dumanı katkılı çimento hamurlarının su ihtiyacı kontrol karışımına göre daha fazla olmuş, karışım içerisinde zeolit içeriğinin artması, kıvam suyu ihtiyacının daha da artmasına yol açmıştır. Karışımların priz süreleri, katkı muhtevası ile birlikte artış göstermiş, hacim genişmesi değerleri ise standartta verilen limit değerden daha düşük olmuştur. Kontrol harcının gösterdiğine yakın bir yayılma değeri elde edebilmek açısından karışım içerisine dahil edilen hiperakışkanlaştırıcı kimyasal katkı miktarı, zeolit ve silis dumanı içeriği ile birlikte önemli derecede artış göstermiştir. Zeolit + silis dumanı içeren harçların erken yaşlardaki dayanımları, yer değişim seviyesindeki artışa bağlı olarak düşüş göstermesine karşılık, ilerleyen dönemlerde kontrol harcına kıyasla daha yüksek olmuştur. Zeolit + silis dumanı içeren harçların kuru birim ağırlıkları, sahip oldukları düşük özgül ağırlık nedeniyle, kontrol harcına kıyasla daha az olmuştur. Ancak, harçların porozite ve su emme değerleri ise, ikame oranındaki artışla birlikte yükseliş göstermiştir. Harç içerisinde zeolit ve silis dumanının kullanılmasıyla birlikte aşınmaya karşı bir direncin meydana geldiği ve ZSDÇ harçlarından elde edilen aşınma kayıplarının, kontrol harcından daha düşük olduğu

görülmüştür. 90 günlük deney süresi sonunda, zeolit + silis dumanı içeren harçların karbonatlaşma derinliği değerleri ise, kontrol harcından daha düşük olmuştur.

KAYNAKLAR

- Rodríguez-Camacho, R.E., Uribe-Afif, R., Importance of using the natural pozzolans on concrete durability, *Cement and Concrete Research*, 32, 1851-1858, 2002.
- Papadakis, V.G., Tsimas, S., Supplementary cementing materials in concrete: Part I: Efficiency and design, *Cement and Concrete Research*, 32, 1525-1532, 2002.
- Lea, F.M., *The chemistry of cement and concrete*. Edward Arnold, Ltd., ISBN 071-312-277-3, London, England, 1970.
- Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C., Lin, Z.S., A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes, *Construction and Building Materials*, 13, 427-432, 1999.
- Kurudirek, M., Özdemir, Y., Türkmen, İ., Levet, A., A study of chemical composition and radiation attenuation properties in clinoptilolite-rich natural zeolite from Turkey, *Radiation Physics and Chemistry*, 79, 1120-1126, 2010.
- Feng, N.Q., Li, G.Z., Zang, X.W., High-strength and flowing concrete with a zeolitic mineral admixture, *Cement and Concrete Aggregates*, 12, 61-69, 1990.
- Canpolat, F., Yılmaz, K., Köse, M.M., Sümer, M., Yurdusev, M.A., Use of zeolite, coal bottom ash and fly ash as replacement materials in cement production, *Cement and Concrete Research*, 34, 731-735, 2004.
- Perraki, T., Kakali, G., Kontoleon, F., The effect of natural zeolites on the early hydration of portland cement, *Microporous and Mesoporous Materials*, 61, 205-212, 2003.
- Sarıkaya, H., Zeolit katkılı betonların fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- Fragoulis, D., Chaniotakis, E., Stamatakis, M.G., Zeolitic tuffs of Kimolos Island, Aegean Sea, Greece and their industrial potential, *Cement and Concrete Research*, 27, 889-905, 1997.
- Quanlin, N., Naiqian, F., Effect of modified zeolite on the expansion of alkaline silica reaction, *Cement and Concrete Research*, 35, 1784-1788, 2005.
- Janotka, I., Števíla, L., Effect of bentonite and zeolite on durability of cement suspension under sulfate attack, *ACI Materials Journal*, 96, 710-715, 1998.
- Uzal, B., Bektaş, F., Turanlı, L., Öğütülmüş doğal zeolit alkalı-silika reaksiyonu ve sülfat etkisi ile genişmesinin incelenmesi, 5. Ulusal Beton Kongresi, İstanbul, 403-409, 1-3 Ekim 2003.
- Toutanji, A.H., Bayasi, Z., Effect of curing procedures on properties of silica fume concrete, *Cement and Concrete Research*, 29, 497-501, 1999.
- Yajun, J., Cahyadi, J.H., Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cements pastes, *Cement and Concrete Research*, 33, 1543-1548, 2003.
- Mazloom, M., Ramezani-pour, A.A., Brooks, J.J., Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26, 347-357, 2004.

17. TS EN 197-1, Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
18. TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: Dayanım tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
19. TS EN 1015-3, Kâgir Harcı Deney Metotları - Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayılma tablası ile). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
20. TS EN 196-3, Çimento - Deney Metotları - Bölüm 3: Priz süresi ve genleşme tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2002.
21. TS EN 1015-11, Kâgir Harcı Deney Metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2000.
22. TS 3624, Sertleşmiş betonda özgül ağırlık, su emme ve boşluk oranı tayin metodu. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 1981.
23. Standartları Enstitüsü, Ankara, 2005.
24. Yılmaz, B., Uçar, A., Öteyaka, B., Uz, V., Properties of zeolitic tuff (clinoptilolite) blended portland cement, *Building and Environment*, 42, 3808–3815, 2007.
25. Neville, A.M., *Properties of concrete*, Prentice Hall, London, England, 2000.
26. Yazıcı, H., Yüksek hacimde C sınıfı uçucu kül içeren betonların mekanik özellikleri ve sülfürik asit dayanıklılığı, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11, 443-448, 2005.
27. Sidheswaran, P., Bhat A.N., Impact of zeolitic water content on exchange of calcium ions, *Thermochimica Acta*, 298, 55-58, 1997.
28. Turanlı, L., Uzal, B., Bektaş, F., Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements, *Cement and Concrete Research*, 35, 1106-1111, 2005.