

T.C.
ERCIYES ÜNİVERSİTESİ
BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJELERİ
KOORDİNASYON BİRİMİ

METAKAOLİN VE SİLİS DUMANI İÇEREN HARÇLARIN
AŞINMA DİRENCİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Proje No:

FBA-09-810

BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ

SONUÇ RAPORU

Proje Yürütücüsü:

Yrd. Doç. Dr. Okan KARAHAN

İnşaat Mühendisliği Bölümü

Araştırmacı

Prof. Dr. Cengiz Duran ATİŞ

Uzman Dr. Kamuran ARI

İnşaat Mühendisliği Bölümü

FBA-09-810 nolu Proje Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi

Tarafından Desteklenmiştir.

Kasım 2011

KAYSERİ

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
İÇİNDEKİLER	3
ÖZET	4
ABSTRACT	4
1. GİRİŞ	5
2. MATERYAL VE METOT	8
2.1. Malzemeler	8
2.1.1. Çimento	8
2.1.2. Metakaolin	9
2.1.3. Silis Dumanı	9
2.1.4. Standart Kum	10
2.1.5. Su	10
2.2. Deneysel Çalışmalar	10
2.2.1. Karışım Oranları	10
2.2.2. Numunelerin Hazırlanması	11
2.2.3. Basınç Dayanımı Deneyi	13
2.2.4. Böhme Yatay Aşınma Deneyi	13
3. BULGULAR	15
3.1. Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları	15
3.2. Aşınma Deneyi Sonuçları	17
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	19
5. KAYNAKLAR	20

METAKAOLİN VE SİLİS DUMANI İÇEREN HARÇLARIN AŞINMA DİRENCİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

ÖZET

Bu çalışmada, metakaolin ve silis dumanı içeren harçların aşınma özellikleri araştırılmıştır. Tüm karışımlar için kum-bağlayıcı ve su-bağlayıcı malzeme oranları sırasıyla 3,0 ve 0,5 seçilmiştir. Harçların üretiminde, CEN referans kumu, metakaolin, silis dumanı ve hazır su kullanılmıştır. Metakaolin ve silis dumanının çimento yerine ikame oranları %5, %10, %15, %20 ve %25 olmuştur. Harç numuneleri üzerinde basınç dayanımı ve aşınma direnci deneyleri gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı ve aşınma deneyleri için 71 mm'lik kübik numuneler üretilmiştir. Numuneler üzerindeki deneyler 28. günde yapılmıştır. Silis dumanı katkısının harçların basınç dayanımını ve aşınma direncini metakaolin katkısına göre daha olumlu etkilediği gözlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Metakaolin, Silis Dumanı, Harç, Aşınma

COMPARISON OF ABRASION RESISTANCE OF MORTAR CONTAINING METAKAOLIN AND SILICA FUME

ABSTRACT

In this study, abrasion properties of mortars containing metakaolin and silica fume were investigated. The sand-binder and water-binder materials ratios were 3,0 and 0,50 for all mixtures, respectively. CEN reference sand, metakaolin, silica fume and spring water were used for mortar production. Metakaolin and silica fume replacement ratios were 5%, 10%, 15%, 20% and 25%. Tests were performed for mortar properties of compressive strength and abrasion resistance. Cubic specimens with 71-mm side were produced for the measurements of compressive strength and abrasion resistance of mortar. The testing measurement on mortars was determined at 28 days. It has been observed that silica fume affected the compressive strength and abrasion resistance positively than metakaolin.

Keywords: Metakaolin, Silica Fume, Mortar, Abrasion

1. GİRİŞ

Yüksek performanslı betonlar son zamanlarda önemli aşamalar kaydetmiştir. Yüksek performanslı beton uygulamaları da daha fazla yaygınlaşmıştır. Yüksek performanslı betonlarda mineral katkıları kullanılmaktadır. Mineral katkıları artık betonun bir bileşeni olmuştur. Günümüzde yaygınlıkla kullanılan uçucu kül ve silis dumanı gibi mineral katkıları birer endüstriyel yan üründür. Özellikle silis dumanı kullanımı yüksek performanslı betonlarda kaçınılmaz olmuştur. Metakaolin ise mineral katkı olarak üretilen, harç ve betonun özelliklerini iyileştirilen bir üründür. Metakaolin de silis dumanı gibi kütlece %5 - %15 arasında çimento ile yer değiştirilmesi ile daha yüksek dayanım ve dayanıklılık özellikleri nedeniyle beton üretiminde kullanımı yaygınlaşmaktadır.

Metakaolin saflaştırılmış kaolin kilinden elde edilir. Kaolin kiline kaolinit mineral adı verilir ve genel bileşimi $Al_2Si_2O_5(OH)_4$ şeklindedir. Beyaz renkli ve amorf yapıdadır. 100-200°C civarında kil mineralleri emilen suları kaybeder. Kaolin kilinin dehidrolize olarak suyunu kaybettiği sıcaklık ise 500-800°C civarındadır. Dehidrolizasyon sonrası sıcaklıkta kaolinit kristal yapıda iki boyutlu şeklini korur bu ürüne metakaolin denir. Metakaolin üretiminde ana unsur daha yüksek sıcaklığa maruz bırakılmamasıdır yoksa reaktif özelliğini kaybeder [1,2].

Silis dumanı, silisyum metali veya ferrosilisyum (FeSi) alaşımlarının üretimi sırasında kullanılan elektrik ark fırınlarında yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ve odun parçacıkları ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli tozudur. Fırınların düşük sıcaklıktaki üst bölümlerinde SiO gazı hava ile temas ederek hızla okside olur ve amorf SiO_2 olarak yoğunlaşarak silis dumanı bileşiminin hemen hemen tamamını oluşturur. Alaşımdaki silisyum içeriğine bağlı olarak silis dumanındaki SiO_2 miktarı da artar. Bu miktar silisyum metalinde %98'e ulaşır [3].

Betonda kullanılan mineral katkı maddeleri, portland çimentosuna benzer minerolojik ve kimyasal bileşimler ile fiziksel özelliklere sahip olmalarına rağmen büyük çoğunluğunun kendi başlarına bağlayıcılık yetenekleri yoktur. Bu maddeler puzolanik aktiviteleri nedeniyle hidrasyon ürünlerinin oluşumunda etkinlik göstererek bağlayıcı hamur yapısını değiştirirler. Böylece betonun çeşitli özellikleri iyileştirilirken, puzolanik aktivitesi yüksek olan mineral katkı maddeleri, boşluk yapısını iyileştirerek daha yoğun bir bağlayıcı hamurun oluşmasını,

agrega-hamur ara yüzeyindeki aderansın artmasını sağlamakta ve yüksek mukavemetlere erişilmesi mümkün olabilmektedir [4,5].

Tosun ve ark. [2] çalışmalarında çimento yerine %5, 10, 15 ve 20 oranlarında metakaolin ve silis dumanı kullanımının harç özelliklerinin basınç ve eğilme dayanımları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. 2, 7 ve 28 günlük dayanım değerlerini belirlemişlerdir. Ayrıca, kılcal boşluk yapıları üzerindeki etkilerini görmek açısından metakaolin ve silis dumanı içeren örneklerin kapiler ve toplam su emme miktarlarını tespit etmişlerdir. Metakaolin ve silis dumanı kullanımının harçların kıvamı için gerekli su ihtiyacını arttırdığını bildirmişlerdir. Metakaolinin harçların mekanik özelliklerini olumlu etkilediğini, silis dumanının ise iri tanecikli olduğundan dolayı mekanik performanslarının düşük olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca, metakaolin katkılı harçların su emme ve kılcal boşluk oranlarının oldukça düşük seviyelerde iken silis dumanı katkılı harçların su emme değerlerinin yüksek olduğunu bildirmişlerdir.

Güneyisi ve ark. [6] çalışmalarında %10 ve %20 oranında çimento ile yer değiştirilerek kullanılan metakaolin katkılı betonların sülfat dayanıklılık özellikleri üzerine su-bağlayıcı oranı 0,35 ve 0,55 olan, başlangıç kürünün ve başlangıç kürü sonrası farklı ortam koşullarının etkisi karşılaştırmalı olarak incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre, beton üretiminde metakaolin kullanımının betonun sülfat direncini önemli ölçüde arttırdığını bildirmişlerdir. Ayrıca, özellikle suda kür edilmiş metakaolin katkılı betonlarda metakaolin katkısının %20'ye ulaştığı betonların performanslarında önemli düzeyde iyileştiğini tespit etmişlerdir.

Badogiannis ve ark. [7] Yunan kaolin kilinden elde edilen metakaolini, ticari metakaolin ile kıyaslayarak beton özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Üretilen metakaolinin ticari metakaolin kadar, dayanım gelişimi ve dayanıklılıkla ilgili olarak mükemmel performans göstererek benzer davrandığını bildirmişlerdir. Metakaolinin özellikle 28 ve 90 günlük beton dayanımlarında çok pozitif etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, metakaolinin klor ve gaz geçirimsizliği, kılcallık ve gözenek büyüklüklerinde önemli azalmalar gösterdiğini bildirmişlerdir.

Batis ve ark. [8] zayıf Yunan kaolin metakaolin ve ticari metakaolinin çimento harçlarının korozyon direncini araştırmışlardır. Metakaolini çimento ya da kum ile %10, %20 ve %30

oranlarında yer değiştirerek kullanmışlardır. Dayanım gelişimi ve korozyon direnci ile ilgili olarak üretilen metakaolinin ticari metakaoline benzer davrandığını bildirmişlerdir. Metakaolinin basınç dayanımını geliştirdiğini ve ağırlıkça %10 oranında ilavesinin basınç dayanımı açısından optimum olduğu bildirmişlerdir. Metakaolin kullanımının, ya kum yerine ağırlıkça %20 ya da çimento yerine %10 yer değiştirmenin harç numunelerinin korozyon davranışını geliştirdiğini belirtmişlerdir. Daha yüksek oranlarda metakaolinin korozyon direncini azalttığını ifade etmişlerdir.

Ding ve Li [9] beton özellikleri üzerine metakaolin ve silis dumanının etkilerini araştırmışlardır. Metakaolin ve silis dumanının betonda slump, basınç dayanımı, rötire ve klor yayılmasını test etmişlerdir. Metakaolin ve silis dumanı %0, %5, %10 ve %15 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek su/bağlayıcı oranı 0,35 olan yedi farklı beton dökmüşlerdir. Metakaolin ile modifiye edilen betonların silis dumanı ile modifiye edilenlere göre daha iyi bir işlenebilirlik gösterdiğini belirtmişlerdir. Metakaolin ve silis dumanı miktarı arttıkça dayanımlarında tüm yaşlarda arttığını bildirmişlerdir. Her iki mineral katkısında kuruma rötresini ve klor yayılımını azalttığını belirtmişlerdir.

Calderone ve ark. [10] yeni generasyonun mineral katkısı, yüksek aktiviteli metakaolin olarak adlandırdıkları araştırmalarının sonucunda metakaolinin optimum kullanım oranını %5- %10 olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca, hava miktarını etkilemediğini, daha az akışkanlaştırıcı kullanıldığını, yüzeyin daha iyi bitirilebildiğini, renginin kararmadığını, çiçeklenmenin daha iyi kontrol edildiğini ve alkali etkilerinin azaldığını bildirmişlerdir.

Bonakdar ve ark. [11] yüksek reaktiviteli metakaolin içeren yüksek performanslı betonların özelliklerini araştırmışlardır. Yüksek reaktiviteli metakaolinin, silis dumanı için yüksek dayanımlı/performanslı betonlar için yararlı bir alternatif olarak teklif edilebileceğini belirtmiştir. Karşılaştırmalı bir çalışma için metakaolin ve silis dumanının %5, %10 ve %15 oranlarında çimento ile yer değiştirilmiştir. Hem metakaolin hem de silis dumanlı betonların mekanik özelliklerinin hemen hemen aynı gelişim gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Bununla birlikte metakaolinin işlenebilirlik ve durabilite açısından daha iyi bir performans gösterdiğini bildirmişlerdir.

Qian ve Li [12] metakaolinin katkılı betonlar üzerinde yaptıkları çalışmada, %15'e kadar metakaolin katkısının betonların çökme değerini azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca metakaolin katkısının basınç dayanımlarını ise arttırdığını bildirmişlerdir.

Literatürde metakaolin veya silis dumanı katkılı yüksek performanslı beton ve harçların dayanım ve geçirimsizlik özellikleri üzerinde çalışmalar yapıldığı ancak aşınma direnci üzerindeki etkilerinin pek araştırılmadığı görülmüştür. Metakaolin veya silis dumanı ile üretilmiş olan harçların basınç dayanımları ve aşınma direnci özellikleri araştırılmıştır. Ayrıca metakaolin ile silis dumanı katkılı harçların dayanım ve aşınma özellikleri karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT

2.1. Malzemeler

2.1.1. Çimento

Cimpor Yibitaş çimento fabrikasında üretilen TS EN 197-1 [13] ile uyumlu CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Cimpor Yibitaş Nevşehir çimento fabrikasından temin edilen bu çimentoya ait kimyasal özellikler Tablo 1.'de, fiziksel özellikler ise Tablo 2.'de verilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellikler	(%)
SiO ₂	18,87
Al ₂ O ₃	5,62
Fe ₂ O ₃	2,54
CaO	62,78
MgO	2,63
SO ₃	2,82
Kızdırma Kaybı	2,88
sCaO	0,90
Çözünmeyen Kalıntı	0,94
Klorür	0,013

Tablo 2. Çimentonun fiziksel özellikleri

Fiziksel Özellikler	Değerler
Priz Başlangıcı, dk	195
Priz Sonu, dk	230
Hacim Genleşmesi, mm	1,0
45 mikron elek analizi, %	9,6
Özgül ağırlık, gr/cm ³	3,13
Özgül Yüzey, cm ² /g	3191

2.1.2. Metakaolin

Çalışmada OTS İnşaat Ltd. Şti.'inden temin edilen Powerpozz marka metakaolin kullanılmıştır. Metakaolin'in kimyasal özellikleri Tablo 3.'de verilmiştir. Metakaolin'in özgül ağırlığı 2,41 gr/cm³ tür.

Tablo 3. Metakaolin'in kimyasal kompozisyonu (%)

Oksit	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	KK
Metakaolin	52,68	43,11	1,38	0,30	0,30	0,0006	0,30	0,62	1,40

2.1.3. Silis Dumanı

Bu çalışmada kullanılan silis dumanı Uzay Boya tarafından ithal edilmiş olup, analiz değerleri Tablo 4.'de verilmektedir. Silis dumanının özgül ağırlığı 2.21 gr/cm³ dür.

Tablo 4. Silis Dumanı'nın kimyasal kompozisyonu

Bileşen	Değer (%)
SiO ₂	92,63
Al ₂ O ₃	0,23
Fe ₂ O ₃	0,13
CaO	0,95
MgO	0,43
SO ₃	0,46
K ₂ O	1,20
Na ₂ O	0,27
Cl	0,06
Kızdırma Kaybı	3,40

2.1.4. Standart Kum

Set Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş. Trakya Çimento Fabrikası tarafından üretilen, TSE EN 196-1'e [14] uygun maksimum agrega boyutu 2 mm olan Rilem Cembureau Standart kumu kullanılmıştır. Deneyde kullandığımız standart kumun elek analizi sonucunda belirlenen tane büyüklüğü dağılımı ve TS EN 196-1'deki [14] sınır değerleri Tablo 5.'de verilmiştir.

Tablo 5. Standart kumun granülometrisi ve standart sınır değerleri

Özellik	Tane Büyüklüğü (mm)					
	0.08	0.16	0.5	1.0	1.6	2.0
Kalan (%)	99	83	62	38	10	0
Sınır (%)	99 ± 1	87 ± 5	67 ± 5	33 ± 5	7 ± 5	0

2.1.5. Su

Deneylerde hazır şişe suyu kullanılmıştır. Bu suya ait üzerinde belirtilen kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 6.'da verilmektedir.

Tablo 6. Suyun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Alüminyum	0	Oksitlenebilirlik	0,6 mg/L
Amonyum	0	Sülfat	3,4 mg/L
Klorür	0	Sodyum	1,4 mg/L
T.Demir	0	Tat	Uygun
Mangan	0	Bulanıklık	Uygun
İletkenlik (20°C' de)	56µs/cm	Renk	Uygun
pH	7,5	Koku	Uygun

2.2. Deneysel Çalışmalar

2.2.1. Karışım Oranları

Bu çalışmada üretilen harç karışımların kum/bağlayıcı oranı 3 olup, su/bağlayıcı oranı 0,5 seçilmiştir. Standart kum poşetler halinde ve ağırlığı 1350±5 gr dır. Metakaolin ve silis dumanı, çimento ile ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında ikame edilerek harç karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlardan elde edilen harç numuneler, sıcaklığı 21±1°C olan kür havuzunda 28 gün boyunca kür edilmiştir. Harç karışım oranları Tablo 7.'de verilmiştir.

Tablo 7. Harç karışım oranları

Karışım No	Çimento (gr)	Metakaolin (gr)	Silis Dumanı (gr)	Kum (gr)	S/B Oranı	Su (gr)
PÇ	450,0	-	-	1350	0,5	225
M-05	427,5	22,5	-	1350	0,5	225
M-10	405,0	45,0	-	1350	0,5	225
M-15	382,5	67,5	-	1350	0,5	225
M-20	360,0	90,0	-	1350	0,5	225
M-25	337,5	112,5	-	1350	0,5	225
S-05	427,5	-	22,5	1350	0,5	225
S-10	405,0	-	45,0	1350	0,5	225
S-15	382,5	-	67,5	1350	0,5	225
S-20	360,0	-	90,0	1350	0,5	225
S-25	337,5	-	112,5	1350	0,5	225

2.2.2. Numunelerin Hazırlanması

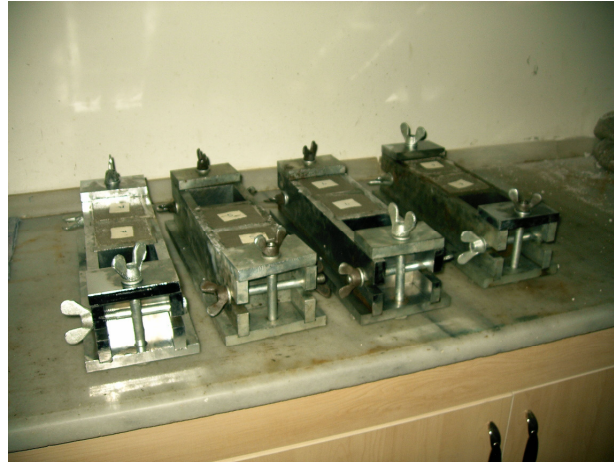
Hazırlanan harç malzemeleri Hobart mikserinde karıştırılarak hazırlanmıştır. Hobart mikseri TS EN-196-1 [14] standardına uygun yaklaşık 80 kg ağırlığında ve 140 ve 285 dev/dakika ile çalışmaktadır. Elektronik beyin vasıtasıyla tam otomatik programlar ile veya elle çalışabilmektedir. Opsiyonel olarak otomatik kum boşaltma aparatı bulunmaktadır. Hobart mikserinin görünümü Şekil 1.'de gösterilmiştir.



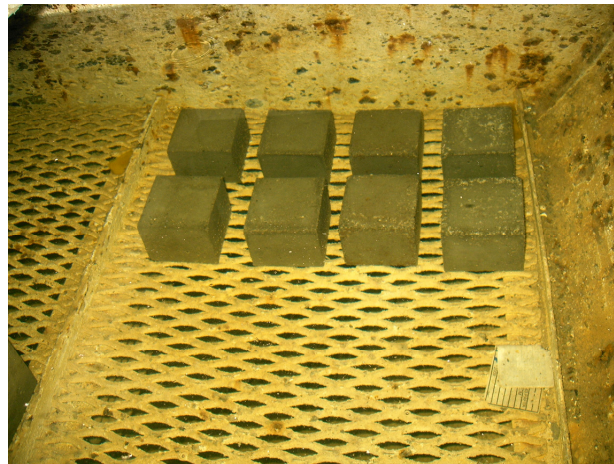
Şekil 1. Hobart mikserinin görünümü

TS EN 196-1'e [14] göre Hobart mikseri otomatik ayarda çalıştırılmıştır; yavaş ayarda 30 saniye karıştırılan harç ikinci adımda 30. saniyeden itibaren mikser karıştırmaya devam ederken deney kumu yavaşça karışıma boşaltılır ve 30 saniye yine yavaş olarak mikser karıştırmaya devam eder. Sonra üçüncü adımda mikser birden hızlanır ve 30 saniye hızlı

olarak harcı karıştırır. Dördüncü adımda mikser hızlı olarak 30 saniye karıştırdıktan sonra durur ve 15 saniye karışım dinlenir. Daha sonra mikser 60 saniye hızlı ayar da harcı karıştırmıştır. Mikser durduktan hemen sonra taze harç mikserden alınmış ve numune kalıplarına eşit dağılım sağlanacak şekilde yerleştirilmiştir. Uygun bir kaşıkla karıştırma kabından doğrudan bir veya bir kaç defada, iki tabaka halinde kalıbın her bölmesine doldurulmuştur ve düşme tablasıyla 1 dakika içinde 60 kez düşürülmek suretiyle tam sıkıştırma yapılmış ve harç numunelerinin üzerleri mala ile düzeltilmiştir. Harçlardan 71×71×71 mm'lik kübik numuneler hazırlanmıştır. Kalıba dökülen harç numuneler tanımlamak amacıyla etiketlenmiştir. Numuneler 24 saat sonra kalıplardan çıkartılarak 21±1°C de ki su içerisinde 28 gün boyunca kür edilmeye bırakılmıştır. Üretilen numuneler Şekil 2'de ve kür havuzunda kür edilen numunelerin görünümü Şekil 3.'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Üretilen numunelerin kalıptaki görünümü



Şekil 3. Kür havuzundaki numunelerin görünümü

2.2.3. Basınç Dayanımı Deneyi

Basınç dayanımı deneyleri, 71×71×71 mm'lik küp numuneler üzerinde yapılmıştır. Basınç dayanımı deneyleri Şekil 4.'de görülen ve projeden alınan universal test basma ve çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımları aşağıdaki eşitlikle hesaplanır.

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Burada;

f_c : Basınç dayanımı, MPa (N/mm²),

F: Kırılma anında ulaşılan en büyük yük, N,

A_c : Numunenin, üzerine basınç yükünün uygulandığı en kesit alanı, mm²



Şekil 4. Universal test cihazının görünümü

2.2.4. Böhme Yatay Aşınma Deneyi

Harç numunelerinin aşınma direnci, böhme aşındırma cihazı üzerinde 71×71×71 mm boyutlarında küp numunelere sürtünme yolu ile aşınma deneyi TS 2824 EN 1338'e [15] uygun olarak yapılmıştır. Yatay Böhme aşınma deneyine ait aşındırma cihazının görünümü Şekil 5.'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Böhme yatay aşınma cihazının görünümü

Böhme aşındırma aleti, 71×71×71 mm boyutlarında hazırlanmış olan küp numunelerin aşınma direncinin belirlenmesi için kullanılır. Alet aşınmanın gerçekleştiği disk ve kontrol paneli olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Aşındırıcı diskin çapı 750 mm olup yatay olarak yerleştirilmiştir. Disk, numuneye yük kolu yardımı ile 294 N'luk aşındırma kuvveti uygulanarak döndürülür. Yük uygulandığı zaman hızı 30±1 mm/s olacak şekilde ve disk 22 dönüşten sonra dönüşünü otomatik olarak durduran bir sayaçla teçhiz edilmiştir.

Küp numuneler aşındırma diskinin üzerine, standart aşındırıcı serpilene gelecek şekilde yerleştirilir. Aşındırıcı malzeme olarak korundum tozu adı verilen standart malzeme kullanılmaktadır. Her numune üzerine toplam 16 periyot 352 devir uygulanır. Aşınma kaybı hacim azalması cinsinden aşağıdaki eşitlikle hesaplanır [15].

$$\Delta V = \frac{\Delta m}{\rho r}$$

Burada;

ΔV : 16 çevrimden sonra hacim kaybı, mm³

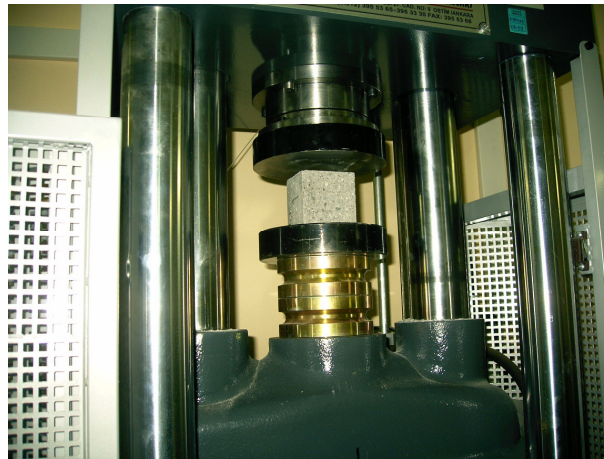
Δm : 16 çevrimden sonra kütle kaybı, g

ρr : Numunenin yoğunluğu, g/mm³

3. BULGULAR

3.1. Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları

Deney numunelerinin boyutları ölçüldükten sonra numuneler deney makinasına yerleştirilmiştir. Deney makinesi yükleme başlıklarının yüzeyleri silinerek temizlenmiş ve numunenin başlıklarla temas edecek yüzeylerinde bulunan herhangi gevşek taneler alınmıştır. Deney numunesi ve deney makinasının yükleme başlığı arasına, aralık ayarlama blokları ilâve plâkalardan başka yerleştirme parçası kullanılmıştır. Küp numuneler, yük uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak konumda yerleştirilmiştir. Ayrıca numuneler, makinanın alt yükleme başlığı üzerine merkezlenerek yerleştirilmesine özen gösterilmiştir. Yük numuneye, darbe tesiri olmaksızın seçilen yükleme hızında en büyük yüke ulaşılmıncaya kadar sabit bir hızda uygulanmıştır. Basınç dayanımı deneyi Şekil 6.'da gösterilmiştir.



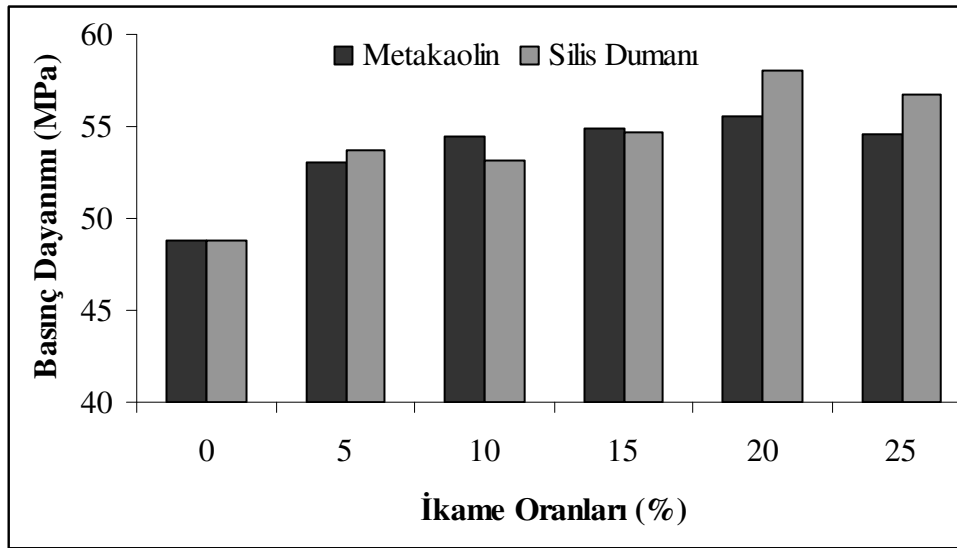
Şekil 6. Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı tayini deneyleri, 28 günlük harç numuneleri üzerinde 71×71×71 mm boyutlarında üretilen küp numunelere yukarıda bahsedilen deney ile basınç yüklenerek yapılmıştır. Çalışma kapsamında %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında metakaolin ve silis dumanı çimento ile ağırlıkça yer değiştirilmesi ile ikame edilen harçların ve %100 çimentolu kontrol numune üzerinde yapılan basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Karışımlara ait basınç dayanımı sonuçları

Karışım No	Basınç Dayanımı (MPa)	Karışım No	Basınç Dayanımı (MPa)
PÇ	48,8	PÇ	48,8
M-05	53,0	S-05	53,7
M-10	54,5	S-10	53,2
M-15	54,9	S-15	54,7
M-20	55,5	S-20	58,0
M-25	54,6	S-25	56,7

Portland çimentosu ile üretilen kontrol harcın 28 günlük basınç dayanımı 48,8 MPa iken metakaolin ve silis dumanı katkısı ile harçların basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür. Şekil 7.'de metakaolin ve silis dumanı katkılı harçların basınç dayanımlarının ikame oranları ile değişimi gösterilmiştir.



Şekil 7. Basınç dayanımlarının ikame oranları ile değişimi

Metakaolin'in % 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında ağırlıkça çimento ile yer değiştirmesiyle basınç dayanımlarında kontrol numuneye göre sırasıyla % 9, 12, 13, 14 ve 12 oranlarında artış görülmüştür. Metakaolin ikamesinin basınç dayanımına olan etkisi incelendiğinde %10 ile %25 arasındaki çimento ile yer değiştirmesinin dayanım üzerinde fazla bir etkisinin olmadığı görülmüştür.

Silis dumanının % 5, 10, 15, 20 ve 25 oranlarında ağırlıkça çimento ile yer değiştirmesiyle ise basınç dayanımlarında kontrol numuneye göre sırasıyla % 10, 9, 12, 19 ve 16 oranlarında artış

görülmüştür. Silis dumanı %15'e kadarki ikamesinin basınç dayanımlarına kontrol numuneye kıyasla yaklaşık %10 civarında basınç dayanımı artışı sağladığı görülmüştür. %20 silis dumanı ikamesi ile basınç dayanımındaki artış ise % 19 kadar çıkmıştır.

3.2 Aşınma Deneyi Sonuçları

Aşınma kaybı, numunenin kütlece ağırlık kaybına dayanarak hacmindeki azalma olarak tayin edilmiştir. Küp numuneler deneye başlamadan etüvde kurutulmuştur. Daha sonra numune boyutları ile aşınma deneyinden önceki ağırlıkları Şekil 8.'de görüldüğü gibi ölçülmüştür. Numunenin aşındırılacak yüzeyi döner disk üzerine yapışacak şekilde cihaz üzerindeki yerine yerleştirilmiştir. Baskı pistonu yükleme koluna asılan ağırlık vasıtası ile numune üzerine bastırılmıştır.



Şekil 8. Numune ağırlıklarının ve boyutlarının ölçülmesi

Sürtünme yolu üzerine standart aşındırıcı malzeme olarak 20 gr suni korundum tozu yayıldıktan sonra cihaz çalıştırılmıştır. Bu durumda disk numuneye 294 N'luk aşındırma kuvveti uygulamaktadır. Disk 22 devirden sonra yani 1 periyot sonunda otomatik olarak durur. Numune saat yönünde 90° döndürülür ve ize yeni aşındırıcı konulurarak deneye devam edilir. Her defasında disk ve temas yüzeyi temizlenir. Bu şekilde ikinci, üçüncü ve dördüncü yüzeyleri de aşındırılır ve toplam 88 devir yani 4 periyot sonunda birinci aşama tamamlanır. Her periyot sonunda fırça ile temizlenen numuneler dikkatlice ölçülmüş ve tartılmıştır. Aşınma deneyi sonundaki sürtünme sonrası numunelerin ortalama ağırlık kayıplarına dayanarak hacim kayıpları belirlenmiştir. Aşınma deneyi sonucunda hesaplanan aşınma değerleri Tablo 9'da verilmiştir.

Tablo 9. Karışımlara ait aşınma sonuçları

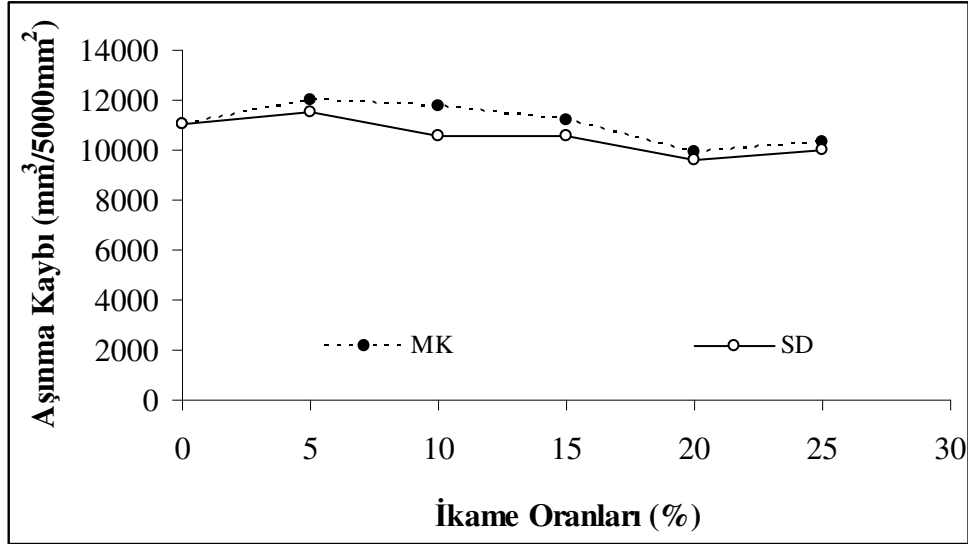
Numune No	Δm 16 çevrimden sonra kütle kaybı (g)	ρ_R Numunenin yoğunluğu (g/mm ³)	ΔV 16 çevrimden sonra hacim kaybı (mm ³)	Aşınma Kaybı (mm ³ /5000 mm ²)
PÇ	23,0	0,00206	11181	11020
M-05	25,8	0,00210	12283	12020
M-10	24,8	0,00210	11784	11733
M-15	24,1	0,00213	11291	11239
M-20	22,0	0,00217	10142	9929
M-25	22,8	0,00216	10519	10302
S-05	24,3	0,00207	11747	11536
S-10	22,9	0,00213	10748	10565
S-15	22,8	0,00215	10609	10551
S-20	20,8	0,00215	9691	9599
S-25	22,0	0,00216	10199	9995

Portland çimentolu kontrol harcının aşınma kaybı ortalama 11.000 mm³/5000mm² dir. Metakaolin'in çimento ile %5, %10 ve %15 oranlarında ağırlıkça yer değiştirilmesi ile kontrol harcına göre aşınma kayıplarının biraz arttığı veya yakın olduğu görülmüştür. Metakaolin katkısının %15 ikame oranlarına kadar aşınma direncine katkısı görülmemiştir. %20 ve %25 metakaolin ikame oranlarında harcın aşınma kaybı değerleri yaklaşık 10.000 mm³/5000mm² civarındadır hesaplanmıştır. %20 ve %25 metakaolin ikamesi kontrol harcına göre aşınma direncini arttırdığı görülmüştür. En fazla aşınma direnci ise %20 metakaolin ikame oranında elde edilmiştir.

Silis dumanı'nın çimento ile %5 oranlarında ağırlıkça yer değiştirilmesi ile kontrol harcına göre aşınma kayıplarının benzer olduğu görülmüştür. Silis dumanı katkısının %5 ikame oranlarında aşınma direncine katkısı görülmemiştir. %10, %15, %20 ve %25 silis dumanı ikame oranlarında ise harçların aşınma kaybı değerleri yaklaşık 10.000 mm³/5000mm² civarındadır hesaplanmıştır. %10 ile %25 silis dumanı ikamesinin aşınma dayanıklılığına olan katkıları benzer olduğu görülmüştür. En fazla aşınma direnci ise %20 silis dumanı ikame oranında elde edilmiştir.

Metakaolin ve silis dumanı katkılı harçların aşınma kaybı değerleri Şekil 9.'da karşılaştırılmıştır. Silis dumanı katkılı harçların aşınma kaybı değerlerinin metakaolin katkılı harçların aşınma kayıplarına göre biraz daha az olduğu görülmüştür. Silis dumanı katkılı harçlar metakaolin katkılı harçlara göre aşınma direnci daha fazla olmuştur. En az aşınma

kaybı her iki mineral katkı olan metakaolin ve silis dumanı için %20 ikame oranında elde edilmiştir. Genellikle basınç dayanımları yüksek malzemelerin aşınma kayıplarının da daha az olacağı beklenilmektedir. Burada da silis dumanı katkılı harçların basınç dayanımları metakaolin katkılı harçlara göre biraz yüksek olduğu ve beklenildiği gibi silis dumanı katkılı harçların aşınma kayıplarının metakaolin katkılı harçlara kıyasla daha az olduğu görülmüştür.



Şekil 9. Aşınma kaybı ile ikame oranları arasındaki ilişki

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Metakaloin ve silis dumanının çimento ile %5 - %25 arasındaki oranlarda ağırlıkça yer değiştirilmesi ile kontrol harcına göre basınç dayanımlarının arttığı görülmüştür.
- Metakaolin'in %5 oranında çimento ile ağırlıkça yer değiştirmesi ile basınç dayanımında kontrol harç numunesine göre %9'luk bir dayanım artışı olmuştur. Metakaolinin %10 ile %25 arasında ikame oranlarında ise harçların basınç dayanımları birbirine yakın ve yine kontrol harcına göre ortalama %13 civarında basınç dayanımında bir artış olmuştur.
- Silis dumanının %5 ile %15 ikame oranları arasındaki basınç dayanımları kontrol numuneye kıyasla yaklaşık %10 civarında basınç dayanımlarında bir artışı sağladığı görülmüştür. %20 silis dumanı ikamesi ile harç basınç dayanımındaki artış ise %19'a kadar çıkmıştır.

- Metakaolin katkısının %15 ikame oranına kadar aşınma direncine katkısı görülmemiştir. %20 ve %25 oranlarında metakaolin ikamesinin kontrol harcına göre aşınma direncini arttırdığı görülmüştür.
- Silis dumanı katkısının %5 ikame oranında aşınma direncine katkısı görülmemiştir. %10 ile %25 silis dumanı ikame oranlarının aşınma direncine olan katkılarının benzer olduğu görülmüştür.
- Silis dumanı katkılı harçların aşınma kaybı değerlerinin metakaolin katkılı harçların aşınma kayıplarına göre biraz daha az olduğu görülmüştür. Silis dumanı katkılı harçlar metakaolin katkılı harçlara göre aşınma direnci daha fazla olmuştur. En fazla aşınma direnci metakaolin ve silis dumanı için %20 ikame oranlarında gerçekleşmiştir.

5. KAYNAKLAR

- [1] OTS İnşaat Ltd. Şti., (2008), Yüksek Aktiviteli Metakaolin, Broşür, <http://otsinsaat.com/metakaolin.html>
- [2] Tosun K., Felekoğlu B., Baradan B. (2007). Effects of metakaolin and silica fume on mechanical and physical effects of cement mortars. 3rd International Symposium on Sustainability in Cement and Concrete, TCMA, İstanbul, Turkey, 83-94.
- [3] Yeğınobalı A., (2002), Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. Ankara, 64s.
- [4] Özturan T., (1991), Beton Üretiminde Uçucu Kül Kullanımının İrdelenmesi. Türkiye İnşaat Mühendisliği XI. Teknik Kongresi Bildiriler Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, s: 149-158, İstanbul.
- [5] Özcan F., (2005), Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve Hızlandırılmış Kür İle Dayanım Tahmini, Çukurova Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, s:173.
- [6] Güneyisi E., Gesoğlu M., Mermerdaş K. (2007). Metakaolin Katkılı Betonların Sülfat Dayanıklılığının İncelenmesi, 7.Ulusal Beton Kongresi, İTÜ Süleyman Demirel Kültür Merkezi, İstanbul, 259-269.
- [7] Badogiannis E, Tsivilis S, Papadakis V, Chaniotakis E. The effect of metakaolin on concrete properties. In: Dhir RK, Hewlett PC, Cetenyi LJ, editors. Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction. Dundee, UK; 2002. p. 81–9

- [8] Batis G., Pantazopoulou P., Tsivilis S., Badogiannis E. The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars. *Cement and Concrete Composites* 27:125-130:2005.
- [9] Ding J-T., Li Z., Effects of Metakaolin and Silica Fume on Properties of Concrete, *ACI Materials Journal*, 99(4):393-398:2002.
- [10] Caldorone, M.A., Gruber, K.A., Burg R.G., High-eactivity metakaolin: a new generation mineral admixture, *Concrete International*, November, 37-40:1994.
- [11] Bonakdar A., Bakhshi M., Ghalibafian M. Properties of High-Performance Concrete Containing High Reactivity Metakaolin, SP-228-21 American Concrete Institute
- [12] Qian X., Li Z., The relation between stree and strain for high-performance concrete with metakaolin. *Cement and Concrete Research*, 31:1607-1611:2001.
- [13] TS EN 197-1, Çimento – Bölüm 1: Genel Çimentolar – Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Mart 2002, Ankara, Türkiye
- [14] TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları – Bölüm 1: Dayanım, Türk Standardları Enstitüsü, Mart 2002, Ankara, Türkiye
- [15] TS 2824 EN 1338, Zemin Döşemesi için Beton Kaplama Blokları - gerekli şartlar ve deney metotları (TSE, 2005).