



**YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO HARÇ ÖZELLİKLERİNE NANO -
SİLİS VE FARKLI PUZOLAN MALZEME KATKISININ ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ahmet Mücahit BOZKURT

DANIŞMAN

Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

Bu tez çalışması 17.FEN.BİL.39 numaralı proje ile BAPK tarafından desteklenmiştir.

AFYON KOCATEPE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO HARÇ ÖZELLİKLERİNE
NANO- SİLİS VE FARKLI PUZOLAN MALZEME KATKISININ
ETKİLERİ**

Ahmet Mücahit BOZKURT

DANIŞMAN

Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Haziran 2019

TEZ ONAY SAYFASI

Ahmet M¼cahit Bozkurt tarafından hazırlanan “Y¼ksek Performanslı Çimento Harç Özelliklerine Nano- Silis ve Farklı Puzolan Malzeme Katkısının Etkileri” adlı tez çalışması lisans¼st¼ eğitim ve öğretim yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca 13/06/2019 tarihinde aşığıdaki j¼ri tarafından oy birliğı ile Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstit¼s¼ İnşaat M¼hendisliğı Anabilim Dalı’nda Y¼KSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Doç.Dr. G¼khan G¼RHAN

Başkan : Prof. Dr. İsmail DEMİR
Afyon Kocatepe Ünv., M¼hendislik Fak.

¼ye : Doç.Dr. G¼khan G¼RHAN
Afyon Kocatepe Ünv., M¼hendislik Fak.

¼ye : Dr. Öğretim Üyesi Abdullah DEMİR
Dumlupınar Üniversitesi, M¼h. Fak.



Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstit¼s¼ Yönetim Kurulu’nun

...../...../..... tarih ve

..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

.....

Prof. Dr. İbrahim EROL

Enstit¼ Müdür¼

BİLİMSEL ETİK BİLDİRİM SAYFASI

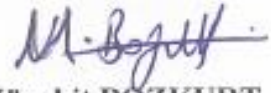
Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- Atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- Ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

13/06/2019


A. Mücahit BOZKURT

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YÜKSEK PERFORMANSLI ÇİMENTO HARÇ ÖZELLİKLERİNE NANO - SİLİS VE FARKLI PUZOLAN MALZEME KATKISININ ETKİLERİ

Ahmet Mücahit BOZKURT

Afyon Kocatepe Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Gökhan GÖRHAN

Bu tez çalışmasında yüksek performanslı çimento harç özelliklerine nano-silis ve üç farklı puzolanik malzeme ikamesinin fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. Öncelikle bağlayıcı olarak %100 çimento oranına sahip referans numuneler üretilmiştir. Harç malzemelerinin hazırlanmasında standart kum ve CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Standart referans üzerinde ağırlıkça % 0.25, % 0.5, % 0.75 ve % 1.00 oranlarında nano-silis ilavesi yapılarak optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmanın sonucunda % 0.50 oranında nano-silis katkısı esas alınmıştır. Ardından harca ikame olarak; uçucu kül (UK), yüksek fırın cürufu (YFC) ve silis dumanı (SD) malzemeleri ayrı ayrı ve % 0-30 oranları arasında ikame edilerek nano-silisli çimento harç numuneleri üretilmiştir. Uçucu kül (UK) Tunçbilek Termik Santrali'nden (Kütahya-Türkiye), yüksek fırın cürufu Bolu Çimento'dan, silis dumanı ise Antalya Eti Elektrometalurji Tesisinden elde edilmiştir. Bununla birlikte karışımlarda kullanılan işlenmiş silika (Pirojen Silika) Wacker™ HDK N20'dir.

Harç numunelerin üretimi laboratuvar tipi çimento mikserde yapılmıştır. Hazırlanan karışımlar 4 x 4 x 16 cm' lik metal kalıplarda vibrasyon tablasıyla şekillendirilmiştir. Hazırlanan numunelerin priz alması için bir gün süre ile bekletilmiştir. Ardından

numunelere 7, 28 ve 90 günlük su kürü uygulanmıştır. İlgili örneklerin; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk değerleri Arşimet prensibi esasına göre belirlenmiştir. Ardından numunelerin basınç ve eğilme dayanım testleri (7, 28 ve 90 günlük) yapılmıştır. Elde edilen verilere göre; kür süresinin artmasıyla birlikte tüm örneklerde porozite ve su emme oranlarının azaldığı görülmüştür. Örneklerin yoğunluk değerleri ise kür süresine bağlı olarak artış göstermiştir.

Sonuç olarak, kür süresinin artması ile birlikte numunelerin dayanımlarında artış olduğu belirlenmiştir. Numunelerin fiziksel sonuçları incelendiğinde nano-silis katkısının değerlerde olumlu etkisi söz konusudur. Örneklerin maksimum basınç değerleri; UK ikameli harçlarda 49.2 MPa, SD ikameli harçlarda 66.5 MPa ve YFC ikameli harçlarda 58.5 MPa olarak bulunmuştur. Referans harçlarla kıyaslandığı takdirde nano-silis ve diğer puzolanik malzemelerin basınç dayanımında olumlu sonuçlar verdiği görülmüştür. Daha iyi kimyasal içeriğe sahip silis dumanı ve daha yüksek oranlarda nano-silis katkısının mekanik ve fiziksel sonuçlarda daha etkili olacağı düşünülmektedir.

2019, x + 59 sayfa

Anahtar Kelimeler: Nano-Silis, Uçucu Kül, Silis Dumanı, Yüksek Fırın Cürufu

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

THE INFLUENCE OF NANO-SILICA AND THE DIFFERENT POZZOLAN MATERIAL ADDITIVE ON PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE CEMENT MORTAR

Ahmet Mucahit BOZKURT

Afyon Kocatepe University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Gökhan GÖRHAN

In this thesis, the effects of nano-silica and three different pozzolanic material substitutes on physical and mechanical properties were investigated. Firstly, reference samples with 100% cement content were produced as binders. Standard sand and CEM I 42.5 R type cement was used in the preparation of mortar materials. Optimization studies were carried out on standard reference samples by adding 0.25%, 0.5%, 0.75% and 1.00% by weight of nano-silica. As a result of the study, 0.50% nano-silica additive was used. Then as a substitute for mortar; the fly ash (FA), blast furnace slag (BFS) and silica fume (SD) materials were substituted separately and between 0-30% and nano-silica cement mortar samples were produced. Fly ash (FA) is obtained from Tuncbilek Power Plant (Kütahya, Turkey), Blast Furnace Slag is obtained from Bolu cement and the silica fume is obtained from the Antalya Eti Electrometallurgy. However, the treated silica (Pyrogen Silica) used in the mixtures is Wacker TM HDK N20.

The mortar samples were produced in laboratory type cement mixer. The prepared mixtures are shaped with vibration table in 4 x 4 x 16 cm metal molds. Prepared samples were allowed to set for one day. Then, the samples were cured with water for 7, 28 and

90 days. Related samples; water absorption, apparent porosity, unit volume weight and apparent density values were determined on the basis of Archimedes principle. After that, compressive and flexural strength tests (7, 28 and 90 days) of the samples were performed. According to the data obtained; It was observed that porosity and water absorption rates decreased in all samples with increasing curing time. The density values of the samples increased depending on the curing time.

As a result, it was determined that the strength of the samples increased with the increase in the curing time. When the physical results of the samples are examined, nano-silica additive has positive effect on the values. Maximum pressure values of samples; It was found to be 49.2 MPa in FA substitution mortar, 66.5 MPa in SD substitute mortar and 58.5 MPa in BFS substitute mortar. In comparison with the reference mortars, it is seen that nano-silica and other filler materials give positive results in compressive strength. It is considered that silica fume with better chemical content and higher nano-silica additive will be more effective in mechanical and physical results.

2019, x+ 59 pages

Keywords: Nano-Silica, Fly Ash, Silica Smoke, Blast Furnace Slag

TEŞEKKÜR

Bu araştırmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı aşamasında yapmış olduğu büyük katkılarından dolayı tez danışmanım Sayın Doç Dr. Gökhan GÖRHAN'a, araştırma ve yazım süresince öneri ve eleştirileriyle yardımlarını gördüğüm hocalarıma ve İnş. Müh. Esma KAVASOĞLU' na teşekkür ederim.

Tezimin gerçekleşmesinde 17.FEN.BİL.39 numaralı proje ile maddi destek sağlayan Afyon Kocatepe Üniversitesi, Bilimsel Araştırmalar Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

Bu araştırma boyunca maddi ve manevi desteklerinden dolayı aileme teşekkür ederim.

Ahmet Mücahit BOZKURT
AFYONKARAHİSAR, 2019

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
RESİMLER DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR BİLGİLERİ	6
2.1 Nano Silis.....	9
2.2 Uçucu Kül	9
2.3 Silis Dumanı.....	13
2.4 Yüksek Fırın Cürufu	15
3. MATERYAL ve METOT	17
3.1 Karışımında Kullanılan Malzemeler	17
3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler.....	17
3.3 Harçların Hazırlanması	18
3.4 Fiziksel ve Mekanik Testler.....	21
3.5 SEM Analizleri	23
4. BULGULAR	24
4.1 Hammadde Analizleri	24
4.2 Harçların Fiziksel Özellikleri.....	27
4.3 Harçların Eğilme ve Basınç Dayanım Özellikleri	36
4.4 Harçların SEM Görüntüleri.....	40
5. TARTIŞMA ve SONUÇ	51
6. KAYNAKLAR.....	53
ÖZGEÇMİŞ.....	59

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

μm	Mikronmetre
CO_2	Karbon Dioksit
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat Derece
MgO	Magnezyum Oksit
MnO	Mangan Oksit
S	Kükürt
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
SiO_2	Silisyum Dioksit
Al_2O_3	Alüminyum Oksit
Fe_2O_3	Demir Oksit
CaO	Kalsiyum Oksit
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Kalsiyum Hidroksit
Na_2O	Sodyum Oksit
Na_2SiO_3	Sodyum Silikat
C_3A	Trikalsiyum Alüminat
TiO_2	Titanyum Oksit
C_3S	Trikalsiyum Silikat

Kısaltmalar

ASR	Alkali Silika Reaksiyonu
KYB	Kendinden Yerleşen Beton
MK	Metakaolin
NS	Nano Silis
SD	Silis Dumanı
UK	Uçucu Kül
YFC	Yüksek Fırın Cürufu

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 4.1 UK'nın XRD difraktogramı.	24
Şekil 4.2 YFC' nin XRD difraktogramı.	25
Şekil 4.3 SD' nin XRD difraktogramı.	26
Şekil 4.4 Çimentoya ait XRD difraktogramı.	27
Şekil 4.5 7 günlük numunelerin görünen porozite değerleri.	28
Şekil 4.6 28 günlük numunelerin görünen porozite değerleri.	28
Şekil 4.7 90 günlük numunelerin görünen porozite değerleri.	29
Şekil 4.8 7 günlük numunelerin su emme değerleri.	30
Şekil 4.9 28 günlük numunelerin su emme değerleri.	30
Şekil 4.10 90 günlük numunelerin su emme değerleri.	31
Şekil 4.11 7 günlük numunelerin birim hacim ağırlıkları.	32
Şekil 4.12 28 günlük numunelerin birim hacim ağırlıkları.	32
Şekil 4.13 90 günlük numunelerin birim hacim ağırlıkları.	33
Şekil 4.14 7 günlük numunelerin görünür yoğunlukları.	34
Şekil 4.15 28 günlük numunelerin görünür yoğunlukları.	35
Şekil 4.16 90 günlük numunelerin görünür yoğunlukları.	35
Şekil 4.17 7 günlük numunelerin eğilme dayanımları.	36
Şekil 4.18 28 günlük numunelerin eğilme dayanımları.	37
Şekil 4.19 90 günlük numunelerin eğilme dayanımları.	37
Şekil 4.20 7 günlük numunelerin basınç dayanımları.	38
Şekil 4.21 28 günlük numunelerin basınç dayanımları.	39
Şekil 4.22 90 günlük numunelerin basınç dayanımları.	39

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 3.1 İşlenmiş Silika Wacker™ HDK N20 karakteristik özellikleri.....	17
Çizelge 3.2 Nano-silisli referans harçların optimizasyon sonuçları (7 günlük).....	19
Çizelge 3.3 Nano-silisli referans harçların optimizasyon sonuçları (28 günlük)	19
Çizelge 3.4 Harç üretiminde kullanılan malzemeler (7,28,90 gün)	21
Çizelge 4.1 Uçucu küle ait lazer tane boyut boyut analiz değerleri.....	24
Çizelge 4.2 UK'nın XRF kimyasal analiz sonuçları.....	24
Çizelge 4.3 YFC malzemesine ait XRF analiz sonuçları.....	25
Çizelge 4.4 SD' nin XRF kimyasal analiz sonuçları.....	25
Çizelge 4.5 Çimento malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları.....	26
Çizelge 4.6 41.5 R tipi çimentoya ait lazer tane boyut analiz değerleri.....	26
Çizelge 4.7 RH90 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	41
Çizelge 4.8 MK190 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	42
Çizelge 4.9 MK290 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	43
Çizelge 4.10 MK390 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	44
Çizelge 4.11 MS190 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	45
Çizelge 4.12 MS290 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	46
Çizelge 4.13 MS390 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	47
Çizelge 4.14 MY190 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	48
Çizelge 4.15 MY290 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	49
Çizelge 4.16 MY390 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.....	50

RESİMLER DİZİNİ

Sayfa

Resim 3.1	Rigaku ZSX Primus, Malvern Mastersizer 2000, Bruker D 8 Advance.....	18
Resim 3.2	Çimento mikseri.....	19
Resim 3.3	Numuneler.	20
Resim 3.4	Eğilme dayanım testi.....	21
Resim 3.5	Basınç dayanım testi.	21
Resim 4.1	RH90 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	40
Resim 4.2	RH90 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	40
Resim 4.3	MK190 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	41
Resim 4.4	MK190 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	41
Resim 4.5	MK290 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	42
Resim 4.6	MK290 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	42
Resim 4.7	MK390 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	43
Resim 4.8	MK390 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	43
Resim 4.9	MS190 kodlu numunenin SEM görüntüsü.	44
Resim 4.10	MS190 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	44
Resim 4.11	MS290 kodlu numunenin SEM görüntüsü.	45
Resim 4.12	MS290 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	45
Resim 4.13	MS390 kodlu numunenin SEM görüntüsü.	46
Resim 4.14	MS390 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	46
Resim 4.15	MY190 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	47
Resim 4.16	MY190 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	47
Resim 4.17	MY290 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	48
Resim 4.18	MY290 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	48
Resim 4.19	MY390 kodlu numunenin SEM görüntüsü.....	49
Resim 4.20	MY390 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.	49

1. GİRİŞ

Beton, mikro gözenekli yapısından dolayı zararlı sıvıların / iyonların dış ortamdan girmesine karşı dayanıklılığı düşük oranlarda olmasına rağmen, en yaygın kullanılan insan yapımı malzemedir. Betonun dayanıklılık sorunları yaşam çizgisi boyunca özellikle üst yapı ve altyapı çalışmalarında vurgulanmıştır (Li 2004). Beton temel olarak çimento endüstrisine dayanır; Son birkaç yılda, dünya genelinde toplam yıllık beton üretimi 2600 milyon tonu aştı (USGS 2010).

Çimento endüstrisi, yüksek karbondioksit (CO_2) emisyon oranına sahip, en çok enerji tüketen sektörlerden biri olarak kabul edilir. Her yıl, küresel insan kaynaklı CO_2 emisyonlarının yaklaşık %5'inden sorumludur; bu emisyonların %50'sine kimyasal üretim prosesleri, %40'ında da yakıt yakılması kaynaklanmaktadır (WBCS 2002). Bu nedenle çevreye verilen zararın en aza indirgenebilmesi için çimento kullanımının azaltılması gerekmektedir. Çimento endüstrisinin sera gazı üzerindeki etkisinin azaltılmasına yönelik olarak, ya çimento üretim sürecinin etkinliğini artırarak ya da sıradan çimentoyu kısmen değiştiren ek bağlayıcı malzemeler kullanarak yoğun araştırmalar yapılmıştır (Deja *et al.* 2010). Uçucu kül, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu, doğal puzolanlar ve silis dumanı gibi çeşitli puzolanik malzemeler araştırılmıştır. Son araştırmalar, yeni teknolojilerin kullanılmasının, puzolanik malzemelerin üretimi için endüstriyel atımlara yol açabileceğini göstermiştir (Damtoft *et al.* 2008). Son zamanlarda puzolanik malzemelerin kullanımında artış olmakla beraber; bu malzemelerin çimento üretimi sonucunda açığa çıkan CO_2 emisyonunda azalma sağlayacağı saptanmaktadır (Kallel *et al.* 2016).

Uçucu kül ülkemizde yılda 15 milyon ton düzeylerinde atılan endüstriyel bir katı atık sınıfında yer alan puzolanik bir malzemedir (Bicer 2018). Termik santrallerde elektrik üretimi sırasında ortaya çıkan ve kömür küllerinin belirli elektrostatik işlemlerle bacalarda depolanmasıyla elde edilen puzolanik bir malzemedir. Bu malzemenin tane boyutları çok düşük değerlerde olmakla birlikte 1-150 μm aralığında değişmektedir. (Saran 2007). Puzolanik malzemeler içerisinde en yaygın olarak kullanılanlarından biridir. Ancak ülkemizde yapılan çalışmalarda uçucu küller çimentoya ikame olarak kullanılmaktadır. Aslına bakılacak olursa katı bir atık olan Uçucu küller beton

teknolojisinde kullanılmakla birlikte depolama ve çevre sağlığı konusunda büyük bir önem arz etmektedir. Bu tür puzolanik atık malzemelerin kullanımı çimento endüstrisine alternatif oluşumu anlamında beton teknolojisinde umut olmuştur. Bu tür alternatif bağlayıcı malzemelerin çimentoya katkı veya ikame olarak kullanılması çimento malzemesinin kullanımında azalma meydana getirecektir. Uçucu küllerin hem taze betonda hem de sertleşmiş betonda olumlu katkılar sağladığı daha önce yapılan deneysel çalışmalarda görölmüştür. Sahip olduğu tane boyutu ile birlikte taze betonda karışımın işlenebilirliği, prizinin almış sertleşmiş betonun ise dayanım ve çevresel faktörlere karşı dayanıklılığı konusunda iyileşmelere sebep olduğu görölmüştür. Ancak betonun dayanımına etkisi konusunda diğer puzolanik malzemeler gibi uçucu kül de uzun süreçlerde puzolanik aktiviteden dolayı artışlar sağlamaktadır, kısa sürede betonda dayanım artışı beklenmemelidir. Bu durum uçucu külün az da olsa içerdiği kireç oranına bağlanabilir.

Silis dumanı, metal endüstrisinde ortaya çıkan bir yan üründür. Elektrik ark fırınlarında kuvarsitin kok kömürü ile tepkimeye girmesi sonucunda elde edilen bir puzolanik malzemedir. Silis dumanı çok ince tane boyutuna sahip bir puzolanik üründür. Silisyum üretimi sırasında ortaya çıkan malzeme, üretilecek malzemenin içeriğine bağlı olarak bileşenlerinde değişiklikler olabilir. Yüzey alanı çok yüksek bir malzeme olan silis dumanı sigara dumanından bile ince tane boyutuna sahiptir. Bu özelliği sayesinde yüksek puzolanik aktiviteye sahiptir. İçeriğinde bulunan kireç ile birlikte betonda kullanıldığında C-S-H silikat hidrateyi açığa çıkarır. Kirecin bağlanması ile birlikte beton karışımında yüksek seviyede kimyasal bir dayanıma ve homojen yoğun bir matrisin oluşumuna etki eder. Beton karışımında oluşan homojen mikro boşluklu yoğun matris betonun geçirimsizliğini azaltır. Bu sayede beton çevresel ve iklimsel zararlara ve iyonlara karşı dayanıklılık kazanmış olur. Elektriksel direncin artmasıyla birlikte beton karışımı içeriğindeki donatının korozyona maruz kalmasını da önlemiş olur. Tane boyutu sebebiyle çimento ile birlikte kullanıldığında beton karışımındaki mikro boşluk yapısını doldurarak adsorbe edilen su miktarında artış meydana gelir. Böylece beton karışımında su ihtiyacı artacaktır. Bu durum beton karışımında katkı maddesi olarak akışkanlaştırıcı kullanılmasıyla giderilebilir. Karışımında silis dumanı kullanılan bir taze betonun çökme değerlerinde %70'e yakın azalma söz konusu olabilir. Karışımında akışkanlaştırıcı katkı

maddesi kullanılması halinde betonda terleme olayı adsorbe edilen sudan dolayı azalacak, agrega ayrışma olayı (segregasyonu) azalacak, kohezyon ve akmaya karşı direnci (viskozite) artacaktır. Silis dumanı taze betonun sertleşme süresinde artış meydana getireceği gibi hidrasyon ısısında da artışa sebep olur. Ancak silis dumanının olumsuz etkilerinden gösterilebilecek bir etkisi karışımda bulunan klorürün ortamdaki PH değerinin düşüreceği için donatının korozyona uğramasını hızlandırabileceği düşünülmektedir (Aköz vd. 1995).

Demirin cevher halindeyken bünyesinde belli seviyede silis, alümin, kükürt, fosfor, mangan gibi yabancı maddeler bulunabilmektedir. Demirin açığa çıkarılması için bu yabancı maddeler ve demir oksit ayrıştırılmakta ve bunun için de çok yüksek sıcaklıklarda elektrikli ark fırınlarında 1600 °C düzeylerinde eriyik hale çevrilmektedir. Bu işlem sırasında kok kömürü kullanılmakta ve cevherle birlikte kalker taşı da bu işleme eklenmektedir. Bu işlem sırasında karbondioksit ve karbon monoksit gazı açığa çıkmaktadır. Tepkime sonucunda demir dışında CaO, SiO₂, Al₂O₃, MgO, MnO, S gibi ürünler meydana gelmektedir. Bu artık malzemelere yüksek fırın cürufu adı verilmektedir. Açığa çıkan artık malzeme olan yüksek fırın cürufu yoğunluk bakımından demirden hafiftir ve bu nedenle fırının üst bölümünde yer alır. Fırından her iki malzeme ayrı ayrı temin edilir. Sıcak biçimde çıkarılan bu malzeme soğutma işlemine göre özellik kazanır. Soğutma işlemleri açısından çok farklı yapısal özgünlüğe sahip olur. Soğutma işleminin metodu, süreci ve hızı malzemenin özelliğini etkilemektedir. Bu işlemin çok yavaş olmasından dolayı kazanmış oldukları kristal yapı nedeniyle, havada soğutulmuş olan cüruflar puzolanik özelliğe sahip değildir. Bu özellikteki ürünler öğütülmesi halinde beton harcında agrega veya dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilir. Su ya da basınçlı buhar yardımıyla soğutma işlemine tabi tutulan yüksek fırın cüruflarında da işlemin yeterince hızlı olmadığından, kristal yapıya sahiptir ve hidrolik bağlayıcılık özellikleri bulunmamaktadır. Bu cürufların da öğütülmesiyle hafif agrega olarak kullanılabilmekte ve bunlar hafif beton harcında değerlendirilebilmektedir. Büyük miktarda silis ve alümin gibi malzemeler içeriğinde bulunduran ve amorf bir faza sahip olan granüle yüksek fırın cürufları da öğütülerek çok ince taneli duruma getirilmeleri halinde, puzolanik özellik göstermektedir. Öğütülmüş granüle yüksek fırın cüruflarının bağlayıcı olarak değerlendirilebileceği çok fazla kullanım koşulu bulunmaktadır (Erdoğan 1995).

Yüksek fırın cürufu beton yapımında kullanılmasının yanı sıra önceleri çimento endüstrisinde de kullanılmıştır. Bununla birlikte çimento klinkeriyle birlikte öğütülerek cürufu çimento üretimi yapılmıştır. Ancak bu tip çimentoların stoklamadaki koşulların sağlanmasında yaşanabilecek problemler, cürufun istenen inceliğe getirilmesindeki sorunlar gibi etmenler cürufun çimento yerine doğrudan beton harcında bağlayıcı olarak kullanılmasını daha uygun konuma getirmektedir (Öner 2001).

Nanoteknolojinin, karışım tasarımını ve ayrıca çimento bazlı malzemelerin performansını ve üretimini önemli ölçüde artırabilecek en umut verici araştırma alanlarından biri olduğuna inanılmaktadır. Deneysel sonuçlar, beton performansının genellikle nano-silika eklenerek geliştirildiğini göstermiştir. İlk başta, nano-silika ilavesi nedeniyle beton performansındaki iyileşmenin dolgu etkisine ve puzolanik reaksiyonuna bağlı olduğuna inanılıyordu. Bununla birlikte, son zamanlarda nano-silis parçacıklarının küçük boyutunun, çimento hidrasyonu ve puzolanik reaksiyon oranını hızlandıran daha büyük bir yüzey alanı sağladığı bildirilmiştir (Belkowitz and Armentrout 2009). Bu nano malzemelerin, titanyum oksit (TiO_2), trikalsiyum silikat (C_3S) gibi ana klinker fazlarının hidrasyon reaksiyonunu hızlandırmasıyla desteklenebilir (Lee *et al.* 2009).

Nano-silika iki ana formda bulunur; sıkıştırılmış kuru taneler ve koloidal süspansiyon şeklindedir. Kuru nano-silika, nano partiküllerin karışım suyunda veya diğer sıvı karışımlarda iyice dağılmasını sağlamak için özel bir hazırlama prosedürü gerektirir. Öte yandan, bir dağıtıcı madde ile stabilize edilmiş bir süspansiyon olarak imal edilen koloidal nano-silika, kullanıma hazır bir nano-silika formudur. Yapılan daha önceki çalışmalarda, kuru taneli nano-silika ile karşılaştırıldığında, harç karışımlarına koloidal nano-silika ilave edildiğinde daha iyi davranış elde edildiğini göstermiştir (Campillo *et al.* 2003).

Harç örneklerinde kullanılan nano-silis son zamanlarda petrokimya ve boya endüstrisinde pirojenik dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır. Yapılan bu çalışmada, hazırlanan harçlara ilave edilen nano-silis ve çimentoya ikame edilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanının harçlarda meydana getirdiği fiziksel ve mekanik değişimler incelenmiştir.

Yapılan bu çalışmada ise uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı ikameli çimento harçları üretiminde karışımlara ilgili örneklerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin geliştirilebilmesi amacıyla nano-silis ilavesi yapılmıştır. Çimento kullanımını azaltmaya yönelik puzolanik malzeme kullanımı ve nano-teknolojinin inşaat sektöründeki kullanılabilirliği araştırılması amaçlanmıştır.



2. LİTERATÜR BİLGİLERİ

En çok kullanılan insan yapımı malzeme olduğu bilinen beton temel olarak çimento endüstrisine dayanır; Son birkaç yılda, dünya genelinde toplam yıllık beton üretimi 2600 milyon tonu aştı. Çimento endüstrisi, yüksek karbondioksit (CO₂) emisyon oranına sahip, en çok enerji tüketen sektörlerden biri olarak kabul edilir. Her yıl, küresel insan kaynaklı CO₂ emisyonlarının yaklaşık %5'inden sorumludur; bu emisyonların %50'sine kimyasal üretim prosesleri, %40'ında da yakıt yakılması kaynaklanmaktadır (Barker *et al.* 2009).

Yüksek Performanslı Beton, son otuz yıldır dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek Performanslı Betonun basınç dayanımı 20 MPa ila 200 MPa arasında değişebilir. Yüksek performanslı betonda işlenebilirlik ve dayanıklılık da hayati bir önem taşımaktadır. Bu nedenle, gereksinimleri karşılamak için malzeme kullanımına özen gösterilmelidir. Ayrıca, çimento ve agrega bileşenlerinin özellikleri, yüksek performanslı betonun özelliklerini etkiler. Agregalar, beton hacminin yaklaşık %70-80'ini oluşturur ve bu nedenle dünya genelinde doğal agrega tüketiminde hızlı bir artış söz konusudur (Chithra *et al.* 2016).

Sanayileşme ve nüfus artışı, bu malzemelerin atılması veya elden çıkarılması üzerine çevre sorunlarına neden olan çok büyük atık malzemelerin ve yan ürünlerin üretimine yol açmıştır. Bu nedenle, atık malzemeleri kullanarak teknik avantajların yanı sıra sürdürülebilir ve daha yeşil bir çevreye neden olan az veya hiç özellik değişikliği olmayan ürünlerle, agregalar için alternatif malzeme bulmak ve kullanmak için acil bir ihtiyaç vardır. Beton karışımlarında ekonomik ve ekolojik bir malzeme yapmak için silis dumanı, uçucu kül, yüksek fırın cürufu, metakaolin ve pirinç kabuğu külü gibi birkaç puzolanik katkı ilave edilir veya bunun yerine çimento kullanılır. Mineral katkılar, ara yüzey arası geçiş bölgesinin güçlendirilmesi nedeniyle Portland çimentosuna ikame maddesi olarak kullanıldığı zaman, betonun işlenebilirliği, mekanik ve dayanıklılık özelliklerinde gelişme gözlemlenebilir. Günümüzde betonda nano malzemelerin kullanımı, özel yüzey alanlarından dolayı taze ve sertleşmiş beton hallerinde daha iyi özellikleri nedeniyle daha fazla önem kazanmaktadır.

2.1 Nano Silis

Nanoteknoloji, Drexler ve ark. ‘Ürün ve yan ürünlerin molekül bazında kontrolüne dayalı madde yapısının kontrolü’ olarak anılacaktır. Nanoteknoloji, bilim ve teknoloji alanlarında en modern yön olarak kabul edilebilir. Nanoteknolojinin pazar potansiyeli ve ekonomik etkisi büyük olduğundan, bu alanda ve uygulamalarında araştırma ihtiyacı son birkaç on yılda önemli ölçüde artmaktadır (Drexler *et al.* 1991).

Uçucu kül, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu, doğal puzolanlar ve silis dumanı gibi çeşitli puzolanlar araştırılmıştır. Son araştırmalar, yeni teknolojilerin kullanılmasının, puzolanik malzemelerin üretimi için endüstriyel atılımlara yol açabileceğini göstermiştir. Nanoteknolojinin, beton karışım tasarımını, çimento bazlı malzemelerin performansını ve üretimini önemli ölçüde artırabilecek en umut verici araştırma alanlarından biri olduğuna inanılmaktadır (Damtoft *et al.* 2008).

Son birkaç yıldır endüstriyel kullanımda polimer kompozitler üzerine yaygın olarak çalışılmış ve uygulanmıştır. Bileşikteki inorganik dolgu maddelerinin büyüklüğü nano haline geldiğinde nano-kompozit denir. Polimer nano kompozitler, polimerler içinde az miktarda nano-dolgu maddesi ilavesi ile malzeme özelliklerinde önemli değişiklik yapılmasından dolayı büyük ilgi görmüştür. Silika nano parçacık, mühendislik kompozitlerinin hazırlanmasında kullanılan nano dolgu maddelerinin bir türüdür; mekanik mukavemeti kuvvetlendirebilir ve çeşitli kristalli polimerlerin kristalleşme hızlarını arttırabilirler (Zou *et al.* 2008).

Kullanılan nano malzemeler; nano-SiO₂, (nano-silika) nano-TiO₂ (nano-titanyum oksit), nano Fe₂O₃ (nano-hematit (demir cevheri)), nano-Al₂O₃ (nano-alüminyum oksit), karbon nanotüpler / elyaflardır. Tüm nano malzemeler arasında, nanosilika, gözenek doldurma etkisinin yanı sıra puzolanik reaktivitesi nedeniyle performansı artırmak için çimento ve betonda en yaygın kullanılan malzemedir.

Nano-silika endüstriyel uygulamalar için ticari kaynaklardan temin edilebilir. Nano-silika genellikle ince, beyaz, kokusuz ve tatsız amorf tozlar şeklinde bulunur ve silikon

tetraklorürün alev pirolizinden üretilir (Barthel *et al.* 1998). Nano-silika parçacıkları hidrofiliktir ve son derece yüksek spesifik yüzey alanlarından dolayı çok yüksek bir yüzey enerjisine sahiptir. Nano-silisin spesifik yüzey alanının 50 ila 400 m²/g arasında olduğu bildirilmiştir (Nordstrom *et al.* 2010).

Temel olarak, nano boyutlu silisin yapısı üç boyutlu bir silikon oksit ağıdır ve silisin yüzeyi silanol grupları ile kaplanmıştır. Silanol gruplarının varlığı, nano-silika parçacıklarının hidrofilik özelliği ile sonuçlanır. Ek olarak, bitişik nano partiküller üzerinde bulunan silanol grupları kolayca hidrojen bağları oluşturabilir. Bu nedenle, hidrofilik nano-silika parçacıkların hidrofobik polimer matrisinde iyi dağılmasını sağlamak zordur. Polimer malzemeler ve silika yüzeyi arasındaki fiziksel özelliklerin farkı genellikle faz ayrılması sorununa neden olabilir. Polimer ve nano-silika arasındaki etkileşimi arttırmak için çeşitli yöntemler kullanılmıştır (Jana and Jain 2001).

Diğer nano partiküllerle karşılaştırıldığında nano-silika, çimento hidratasyon ürünleri ile puzolanik reaksiyonda avantaja sahiptir. Ultra ince partikül ebadı nedeniyle, nano-silika çok erken yaşlarda belirgin bir puzolanik reaksiyona sahip olabilir. Bu nedenle, umut verici nano-silika uygulamalarından biri, uçucu kül, cüruf veya diğer puzolanik malzemelerle harmanlanmış çimentoya ilave edilmesidir (Zhang *et al.* 2012). Daha önceki çalışmalara göre, nano-silika, karışımda homojen bir şekilde dağılmış olması koşuluyla çimento hidratasyonunu ve erken yaş dayanımını belirgin bir şekilde arttırmıştır, aksi takdirde, bu yarar nano partiküllerin topaklaşması ile tehlikeye girebilir (Shaikh *et al.* 2014). Çimento esaslı malzemelerin nano-silika ile dayanıklılık özelliklerine ilişkin çalışmalar, bugüne kadar sınırlı kalmıştır; çünkü önceki araştırmaların çoğu esas olarak dispersiyon sorunu ve taze durum özellikleri üzerindeki etki ile ilgilidir. Yapılan bir çalışma neticesinde; beton karışımına %3.8 nano-silika ekleyerek su penetrasyon derinliğinde yaklaşık %45'lik bir azalma olduğu saptanmıştır (Ji 2005).

İçerisinde nano-silika bulunan beton karışımında daha düzgün ve kompakt bir yapı gözlemlendi ve bu durum nano-silika ilavesi nedeniyle meydana gelen puzolanik reaksiyona bağlandı. Aynı sebepten dolayı, Gaitero ve arkadaşları, %6 nano-silika

katılmış çimento hamurundan kalsiyum sızma oranının gözle görülür derecede azaltılabileceğini bildirmiştir (Gaitero *et al.* 2008).

Kong ve arkadaşlarının yaptığı çalışma nezdinde, ayrıca %1'e kadar nano-silika ekleyerek harç için klorür penetrasyonuna karşı daha yüksek bir direnç sağlamıştır (Kong *et al.* 2012).

Quercia ve arkadaşları hem kolloidal hem de toz formlarda, %3.8 dozda nano-silis içeren kendiliğinden yerleşen betonun (KYB) dayanıklılığı üzerine bir çalışma yürütmüştür. KYB'nin dayanıklılık performanslarının tümü, yapısal yoğunluğunun artırılmasına yardımcı olan nano-silika nedeniyle artırılmıştır, ancak nano-silika dozajının dayanıklılık üzerindeki etkisine ilişkin herhangi bir tartışma yapılmamıştır (Quercia *et al.* 2014).

Nanosilika betonun geçirgenlik özellikleri üzerine yapılan araştırmalarda, su emiliminde, kılcal emiliminde ve su geçirgenliğinde normal betona göre azalma olduğunu göstermiştir. (Najigivi *et al.* 2010).

Yüzey alanı itibariyle oldukça küçük tane boyutuna sahip bir malzeme olan nano-silika petrokimya ve boya endüstrisinde kullanılan bir malzemedir. Betonda erken dayanım artışı ve moleküler boşluğu doldurması sebebiyle betonun fiziksel özelliklerinde olumlu etkisi söz konusudur. Nano-silika ikamesi betonda daha düzgün ve kompakt bir mikro yapı sağladığı daha önceki çalışmalarda gözlenmiştir. Beton için su ve klorür iyonlarına karşı, dayanıklılığı arttıracaktır. Bu durum silika nanopartiküllerinin matris içerisinde düzgün dağılmasıyla açıklanmaktadır. Böylece, su penetrasyon derinliği, klorür geçiş katsayısı ve betona difüzyon katsayısı için azalma gözlemlenebilir. Beton özelliklerini geliştirmek için genellikle %0-6 değişiminde az miktarda nanosilika yeterlidir.

2.2 Uçucu Kül

Kömür tüketiminin bir yan ürünü olan uçucu kül, betondaki çimentoyu kısmen değiştirmek için kullanılan en çok kullanılan pozolanik malzemelerden biri olarak kabul

edilir, çünkü maliyet düşük olmakla birlikte yaygın olarak bulunur. Ayrıca, uçucu kül çimentodan çok daha çevre dostudur (Haque *et al.* 1984). Bu nedenle, ABD Yeşil Bina Konseyi (USGBC), uçucu külü betonda Enerji ve Çevre Tasarımı Liderliği (LEED) programında puan kazanmak için katkıda bulunan bir faktör olarak değerlendirmektedir (USGBC 2007). Türkiye Çimento Üreticileri Birliği 2003 raporuna göre, tüm dünyada meydana gelen Uçucu kül miktarı yaklaşık 600 milyon tondur. Türkiye'de 11 adet termik santral bulunmakta olup halen çalışmaktadır. Afşin-Elbistan, Çatalağzı, Çayırhan, Kangal, Kemerköy, Orhaneli, Seyitömer, Soma, Tunçbilek, Yatağan ve Yeniköy. Türkiye'de 11 santralde yıllık uçucu kül üretimi 20 milyon tondan fazladır (TÇMB 2003).

Ekonomik ve çevresel faydalarına ek olarak, uçucu kül ile harmanlanmış çimento betonun dayanıklılık özelliklerini artırır. Örneğin, Alasali ve Malhotra, ikili bağlayıcıların (sıradan çimento ve uçucu kül) alkali silika reaktivitesine bağlı olarak harç / betondaki genleşmeyi önemli ölçüde azalttığını göstermiştir (Alasali and Malhotra 1991). Bazı kuruluşlar ASR'nin etkisini önlemek / azaltmak için beton karışımları konusundaki spesifikasyonuna minimum miktarda uçucu kül içerir (Malvar *et al.* 2002).

Uçucu kül, katı, oyuk ve çoğunlukla camsı (şekilsiz) küresel şekilli, ince, toz taneciklerden oluşur. Uçucu kül karbonlu köşeli moleküllerden meydana gelir. Uçucu külün özgül ağırlığı çoğunlukla 2.1 ila 3.0, spesifik yüzey alanı 170 ila 1000 m² / kg arasında değişebilir. Uçucu külün rengi, içeriğindeki yanmamış karbona bağlı olarak gri ile siyah kadar arasında değişkenlik gösterebilir. Uçucu külün kimyasal özellikleri üretimi sırasındaki kömürün içeriği, taşıma ve depolama için kullanılan yöntemlerden etkilenir. Uçucu külünün morfolojisi, değişen miktarlarda karbon içeren silika, alümina, demir oksit ve kalsiyumdur (Ahmaruzzaman 2010).

Yapılan çalışmalarda, uçucu külün kullanım oranı, toplam çimento esaslı malzemenin ağırlığının %15-20 arasında bir oranındadır. Genellikle, bu oran betonun işlenebilirliği ve maliyet ekonomisi üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir, ancak sülfat saldırısına, alkali-silika genleşmesine ve termal çatlamaya karşı dayanıklılığı yeterince geliştirmek için yeterli olmayabilir. Bu nedenle çalışmaların genelinde %25-35 oranında daha fazla miktarda uçucu kül kullanılmaktadır. Çimento esaslı malzemenin ağırlığının %40-50'den

fazla uçucu kül içeren beton karışımları, yüksek hacimli uçucu kül betonu olarak tanımlanabilir. Uçucu kül içeren beton ile ilgili temel sorun, özellikle de F Sınıfı uçucu kül ihtiva eden, normal bir betona göre kuvvet gelişiminin yavaş hızda oluşudur. Bu konuda farklı çözümler bulmak için çok sayıda çalışma yapılmıştır, ancak bu aşamaya kadar F sınıfı uçucu kül içeren beton birçok uygulama için uygun değildir. Bu konuda farklı çözümler bulmak için çok sayıda çalışma yapılmıştır, ancak bu aşamaya kadar F sınıfı uçucu külü içeren beton onarımlar ve hızlı inşaat gibi erken dayanım gerektiren birçok uygulama için uygun değildir (Naik *et al.* 1998).

Çimento esaslı malzemenin kütlesine göre %40-50'den fazla uçucu kül içeren beton karışımları, yüksek hacimli uçucu kül betonu olarak tanımlanabilir. Bu betonun özellikleri, geleneksel Portland çimentosu betonu ile karşılaştırıldığında, Mehta tarafından özetlenmiştir. Yüksek nitelikli bir uçucu kül, homojen dağılımına, yüzey özelliklerine ve morfolojisine bağlı olarak beton üretiminde su azaltıcı görevi görebilir. Mehta'ya göre, küçük tane boyutu ve camsı dokulu uçucu küller, karışımda gereken su miktarını azaltmaya yardımcı olur. Ayrıca, uçucu kül ikame edilmiş çimentonun inceliği de göz ardı edilmemelidir. Uçucu külün işlenebilirliğinde etkin bir başka kriter de yanmamış karbon içeriğidir. Uçucu küldeki büyük miktarlarda karbon beton karışımı için zararlıdır, çünkü hücrel karbon parçacıkları su gereksinimini ve belirli bir hava içeriği için katkı maddesi gereksinimini artırma eğilimindedir. Betondaki karışımlarında uçucu küller genellikle viskoziteyi, pompalanabilirliği, sıkıştırılabilirliği iyileştirir. Yüksek hacimli uçucu kül betonu, karıştırma ve yerleştirme hususunda herhangi bir ekstra işlem gerektirmez ve geleneksel araçlar kullanılarak karıştırılabilir, taşınabilir ve yerleştirilebilir. Uçucu kül içeren betonlarda 7 güne kadar erken dayanım istendiğinde karışım içeriğinde yapılan iyileştirmeler ile bu durum gerçekleştirilebilir. Erken yaşta daha yavaş bir kuvvet gelişme oranı nedeniyle inşaat endüstrisi tarafından kolayca kabul edilmez. Yüksek uçucu kül hacimli betonlarda 3-6 ay vadeden sonra, çok daha yüksek elektriksel direnç ve klorür iyonu penetrasyonuna karşı dirençte artış gözlemlenebilir. Yüksek uçucu kül hacimli betonlarda çimento kullanımının azalmasından ve uçucu külün yatırım maliyetinin azlığından dolayı beton maliyeti de düşmektedir. Çok miktarda uçucu külün ekolojik ortamdan uzaklaştırılması ve karbondioksit salınımının azaltılması sayesinde üstün çevre dostu bir beton elde edilebilir. Ayrıca bu beton karışımında donatı

korozyonuna, alkali-silika genleşmesine ve sülfat saldırısına karşı çok yüksek dayanıklılık elde edilebilir (Mehta 1999).

Uçucu kül, daha çok kütle betonlarda ve hidrasyon ısısından dolayı genleşmeyi kontrol etmek için yüksek hacimli dökümlerde ve ayrıca erken yaşlarda çatlamayı azaltmada yardımcı olmuştur. Bu durum yatırım maliyetinde önemli bir düşüşe neden olur. Uçucu kül katkılı beton, çevresel şartlar altında çeliğe çok güçlü ve sağlam bir koruma sağlar. Alkali silika reaktivitesini ve betondaki uçucu küle göre sülfat direncinin karmaşıklığını daha iyi anlamak için çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. F sınıfı uçucu kül ile yüksek mukavemetli ve yüksek performanslı beton da yapılabilir. Uçucu külün betonda kullanılması, küresel moleküllerin varlığı sayesinde geçirgenliğin azalması söz konusudur ve bu nedenle daha yoğun matris ve puzolanik aktivitesi yüksek bir ürün elde edilir. Kütle betonda, çimento yerine kullanılan uçucu kül oranındaki artış, özellikle F sınıfı uçucu kül kullanıldığında, tamamen Portland çimentosundan oluşan beton karışımına kıyasla daha düşük bir hidrasyon ısısına sahip olur. C sınıfı uçucu kül içeren karışımlarda hidrasyon ısısı düşük olmayabilir. C sınıfı uçucu kül ile yapılan betonun aşınma direnci hem uçucu kül olmayan beton hem de F sınıfı uçucu kül içeren betonlardan daha iyidir. Mehta, uçucu kül içeren betonun karışımlarında sülfat etkisinin önemi üzerinde durmuştur. Bu konuda yapılan çalışmada belirtildiği gibi, betonun genleşmesinden ve çatlamasından sorumlu olan maddeler, eteritit ve kalsiyum trisülfo alüminat başta olmak üzere sülfat iyonu tarafından saldıran kalsiyum monosülfo alüminat ve kalsiyum alüminat hidrat gibi alümina içeren hidratlardır. Sülfat iyonları ve kalsiyum hidroksit arasındaki asidik tip etkileşimler de kuvvet ve kütle kaybına neden olur. Uçucu kül içeren betonun özellikleri üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Araştırmalar, Portland çimentosuna ikame olarak kullanılan uçucu külün üretilen karışım nezdinde birçok olumlu etkisi olduğunu göstermiştir. Çimento kullanımındaki azalmaya bağlı olarak Su/Çimento oranından su oranında meydana gelen azalma bahsedilen etkilerden biridir. Uçucu kül, donatı korozyonuna karşı direnci artırır (Özger 2011).

İnşaatın hizmet ömrünü artırmak için sadece betonun dayanımı değil, aynı zamanda dayanıklılığının da önemli olduğu bilinmektedir. Bazı uçucu küller gibi belirli

puzolanların kullanılması, gözenek yapısının daha homojen olması ve çimento hamuru matrisinin kalsiyum hidroksitindeki azalma ile dayanıklılığı artırır. Betonun dayanıklılığının etkileyen en önemli faktörlerden biri, sülfat saldırısına karşı dirençtir. Hem sülfat çözeltisi hem de sülfürik asit çözeltisi betona zararlıdır. Betonun yapısal performansını da etkileyen başka bir husus da büzülmedir, ürünün kimyasal saldırılara karşı direnci azaltan kurutma büzülmesidir. Bu sebeple uçucu külün mukavemet, kuruma büzülmesi ve sülfat etkisine karşı dayanıklılığı önemli bir özelliktir (Özger 2011).

2.3 Silis Dumanı

Silisyum veya demir silisyum alaşımlarının ergime ile elde edilmesi esnasında elde edilen, küresel, amorf ve 1 μm 'den küçüktür. Bünyesinden yüksek miktarda SiO_2 içermesinden dolayı yüksek oranda puzolanik aktiviteye sahip bir yan üründür (Koca 1996).

Silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımların üretimi sırasında meydana çıkan gazın hızlı bir şekilde soğutularak yoğunlaştırılmasıyla elde edilen amorf yapıya sahip çok ince parçacıklardan oluşan malzemeye silis dumanı denilmektedir (Erdoğan 2003).

Yüksek performanslı beton veya erken yaşta yüksek dayanıma sahip olması istenen beton üretiminde süper akışkanlaştırıcılar ile silis dumanı kullanılmaktadır. Bunun nedeni silis dumanının yüksek puzolanik aktive göstermesi ve çimentodan bile daha ince olmasıdır.

Silis dumanı silisyum ve ferrosilisyum üretiminde, elektrik ark fırınlarında yaklaşık 200 °C sıcaklıkta, yüksek saflıktaki kuvarsitin kömür ile indirgenmesi sonucu elde edilen çok ince taneli puzolanik bir malzemedir (ACI Committee 1987). Ortaya çıkan SiO_2 gazı fırının üst bölümlerinde okside olup hızla soğuyarak amorf silis haline gelir ve silis dumanı bileşiminin büyük bölümünü oluşturur. Alaşımdaki silikon miktarı arttıkça, silis dumanındaki SiO_2 miktarı da artmaktadır. Silikon oranı %98'e eriştiğinde ürün ferrosilikondan çok, silikon metal olarak isimlendirilmektedir (Özbek 1998). Standartlarda, silis dumanında en az %80 SiO_2 olması ve kızdırma kaybının en çok %5 olması öngörülmektedir

Baca tozu olarak özel filtrelerde tutulup toplanan silis dumanının çoğunlukla küresel olan tanelerinin ortalama çapları 0,1 µm olarak belirlenmiştir. Bu, çimento inceliğinin 1/100'ü kadardır. Yüksek oranda amorf silis içermesi ve çimento ile uçucu küllerden çok daha ince olması sebebiyle silis dumanı çok aktif bir puzolanik maddedir (Ekinci ve Yeğinobalı 1996).

Toz haldeki silis dumanının kullanım zorluğu ve taşıma masrafının fazla olmasından dolayı, silis dumanı sıkıştırılarak veya sulu formda kullanılmaktadır. Silis dumanını yoğunlaştırmak için silolarda bulunan silis dumanına basınçlı hava üflenmektedir (Taylor 1990).

Beton ve harç üretiminde etkili bir puzolanik malzeme olan silis dumanı ile üretilen betonların düz çimento hamuruna kıyasla daha süreksiz ve su geçirimsiz yapıya sahip olduğu görülmüştür (Bayasi ve Zhou 1993).

Son yıllarda yüksek performanslı beton üretimi üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Beton üretiminde yüksek dayanım sağlayan başlıca puzolanik malzeme silis dumanıdır. Silis dumanının istenilen etkiyi sağlayabilmesi için %85 veya daha fazla oranda SiO₂ içermesi ve çok ince taneli olması gerektiği belirlenmiştir (Yazıcı 1996).

Silis dumanı çok ince taneli olması nedeniyle betonda su ihtiyacını arttırmaktadır. Artan su miktarı basınç dayanımını düşüreceğinden bu su ihtiyacını azaltmak amacıyla su azaltıcı katkıların kullanılması önerilmektedir (Erdoğan 2003).

Yogendran ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, beton üretiminde kullanılan %5 ve daha az miktardaki silis dumanının su ihtiyacı üzerinde bir etkisinin bulunmadığı ve silis dumanı miktarının artması durumunda su ihtiyacının da artacağını elde edilmiştir (Yogendran *et al.* 1987).

Betona ikame edilen silis dumanı basınç dayanımını arttırmaktadır. Silis dumanının çok küçük taneli olması betondaki boşlukların azalmasında etkilidir (Bentur vd. 1993). Ayrıca

puzolanik özelliğe sahip olmasından dolayı silis dumanının agrega ile çimento hamuru arasındaki teması güçlendirmede önemli katkıya sahip olduğu incelemelerle belirlenmiştir (Taşdemir 1996). Silis dumanının boşluk oranını azaltması beraberinde su ihtiyacını da arttırmaktadır. Suyun artması ile birlikte dayanımda azalmalar meydana gelmiştir. Bu sorunu ortadan kaldırmak adına silis dumanının her zaman akışkanlaştırıcılar ile birlikte kullanılması gerekmektedir.

2.4 Yüksek Fırın Cürufu

Yüksek fırın cürufunun hidrolik bağlayıcılık özelliğine sahip olduğu on dokuzuncu yüzyılda bulunmuştur. Bu gelişmenin ardından çimento üretiminde de kullanılmaya başlanmıştır. İlk yüksek fırın cürufu standardı ise 1923 yılında İngiltere’de hazırlanmıştır (Doğan 2008).

YFC demir üretimi esnasında fırınlarda oluşan bir yan üründür. Demir üretiminde uzaklaştırılan silis ve alümin füzyonu neticesinde oluşur. Ergimiş haldeki YFC’ nin kullanılabilmesi için su ile soğutulması gerekmektedir. Soğutulan YFC’ ler küçük parçacıklar haline gelir. Su ile soğutma işlemine Granülasyon yöntemi denilmektedir. Bu yöntemin uygulanma sebebi su ile ani soğutulduğunda amorf ve camsı yapıya sahip olan YFC’ nin reaktif özelliği bu şekilde kazanmasıdır. Kristal yapıdaki bileşenlerin artışıyla dayanımın azaldığı, camsı fazın ise dayanımı olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Sonrasında klinker de uygulanan öğütme çalışmaları YFC içinde uygulanır Soğutma işlemi sonrasında oluşan cüruf tanelerinin 6 mm’den büyük olması durumunda hafif agrega olarak kullanılmaktadır (Song and Saraswathy 2006).

Yüksek fırın cürufunun kimyasal yapısı birçok etkene bağlıdır. Camsı özellik göstermesi istenen cüruflar hızla soğutulur. Yapısındaki silis miktarı bağlayıcılık özelliğini belirlemektedir. Silis oranı düşük olan cüruflarda bağlayıcılık özelliği gösterebilmesi için alkali bir aktivatör kullanılmaktadır. Bu bağlamda en iyi seçenek çimento olacaktır. Havada soğumaya bırakılan YFC’ lerin ise bağlayıcılık özellikleri düşük oranda var olmakla birlikte bağlayıcılık özelliği göstermeyen cüruflarda mevcuttur (Tokyay ve Erdoğan 2003).

Donatı korozyonu konusu üzerinde yapılan çalışmada cürufun korozyona karşı etki gösterebilmesi için %40' dan daha fazla kullanılması gerektiği belirlenmiştir (Mangat and Molloy 1991).

Aldea ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada YFC' nin ağırlıkça ikame oranının %25 seviyesine kadar basıncı arttırdığı, oranın artması durumunda ise basınç dayanımında azalmanın meydana geldiğini belirlemişlerdir (Aldea *et al.* 2000).

Austin ve Al-Kindy yapmış oldukları çalışmada, yüksek fırın cürufu içeren betonlara yetersiz kür uygulanarak geçirimsizlik özelliklerinin normal betonlara oranla daha fazla etkilendiğini belirlemişlerdir. Aynı çalışmada hava geçirgenlik deneyinin betonun durabilite özelliklerini saptama açısından daha duyarlı olduğu, kılcal su emme deneyinin ise daha dar bir aralıkta geçerli olduğu kaydedilmiştir (Austin and Al-Kindy 2000).

Brooks ve arkadaşları; çimentoya farklı oranlarda YFC, SD, UK, MK ikame ederek yüksek mukavemetli betonların priz süreleri üzerine bir çalışma yürütmüşlerdir. Çalışmadan elde edilen verilere göre; mineral katkıların oranlarının artması ile birlikte numunelerin priz süresinde artış meydana geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca yüksek fırın cürufunun %40' dan fazla ikame edilmesi durumunda numunelerin başlangıç ve bitiş priz sürelerinde sırasıyla 11 ve 17 saatten fazla sürelerde ciddi bir gecikme olduğu belirlenmiştir (Brooks *et al.* 2000).

Öğütülmüş yüksek fırın cürufunun işlenebilirlik üzerindeki olumlu etkisi, tane yüzey durumu nedeniyle yaklaşık %3-5 civarında su azalttığı ve çimento ile yer değiştirme seviyesine bağlı olarak priz süresinde uzamaya neden olduğu bilinmektedir (Lewis *et al.* 2003, ACI 1995, Meusel and Rose 1983).

Sonuç olarak cürufun kimyasal bileşimi, bulunduğu ortamdaki alkali konsantrasyonu, cürufun camsı fazının miktarı, cüruf ile çimentonun incelikleri ve erken hidrasyon sürecindeki sıcaklık gibi çok sayıda ve karmaşık etkene bağlı olan cürufun bağlayıcılık özelliğinin ve performansının, birlikte kullanılacağı malzemelerle deney yapılarak kontrol edilmesi gerekmektedir (Doğan 2008).

3. MATERYAL ve METOT

3.1 Karışımda Kullanılan Malzemeler

Çimento harcı üretiminde ikame malzemesi olarak kullanılan uçucu kül (UK) Tunçbilek Termik Santrali'nden (Kütahya-Türkiye) elde edilmiştir. Harç malzemelerinin hazırlanması için kullanılan kum, standart kum, çimento olarak ise CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Yüksek Fırın Cürufu Bolu Çimento'dan, Silis dumanı ise Antalya Eti Elektrometalurji Tesisinden elde edilmiştir. Bununla birlikte karışımlarda İşlenmiş Silika (Pirojen Silika) Wacker™ HDK N20 malzemesi harç özelliklerini geliştirmek amacıyla çimento ve farklı pozolanik malzemeler (uçucu kül, yüksek fırın cürufu, silis dumanı)'den oluşan bağlayıcı karışımlara ilave edilmiştir. İşlenmiş Silika (Pirojen Silika) Wacker™ HDK N20 İMCD Group firmasından bedelsiz tedarik edilmiştir. Silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül malzemeleri %10, %20 ve %30 oranlarında bağlayıcı malzeme olarak ikame edilmiştir. Kullanılan İşlenmiş Silika'nın (Pirojen Silika) Wacker™ HDK N20 özellikleri ise Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1 İşlenmiş Silika Wacker™ HDK N20 karakteristik özellikleri.

Ham Madde	Pirojen Hidrofilik Silika
Yüzey Alanı (m ² /gr)	175-225
Kızdırma Kaybı	<1,5 %
Elek Altı Mlz.	<0,03 %
Sıkıştırılmış yoğunluk	40gr/L
PH	3,8 – 4,3

3.2 Hammaddelere Uygulanan Analizler

Çalışmada kullanılan malzemelerin kimyasal bileşimlerinin belirlenmesi amacıyla XRF analizleri Rigaku ZSX Primus cihazı (b) ile yapılmıştır. Tane boyutunun belirlenmesi amacıyla da lazer tane boyutu analizi Malvern Mastersizer 2000 cihazı (c) ile XRD analizleri ise Bruker D 8 advance cihazında (a) yapılmıştır. (Resim 3.1)



(a)



(b)



(c)

Resim 3.1 Bruker D8 Advance (a), Rigaku ZSX Primus(b), Malvern Mastersizer 2000 (c).

3.3 Harçların Hazırlanması

Öncelikle CEM I çimento, standart kum ve su ile referans harç üretimi yapılmıştır. Ardından %0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00 oranlarından oluşan nano-silis optimizasyonu için harç üretimleri yapılarak 7 ve 28 günlük mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenmiştir. (Çizelge 3.2 – Çizelge 3.3). Optimizasyon çalışmalarından sonra, bağlayıcı malzemeye ikame olarak ayrı ayrı kullanılacak olan silis dumanı, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile oluşturulan harçlar Çizelge 3.4 de (Su kürü uygulanan örnekler) verilmiştir. UK, YFC ve SD ikame oranları %10, %20 ve %30 oranlarında olmak üzere toplam üç farklı oranda kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmaları neticesinde; tüm numuneler fiziksel ve mekanik sonuçlara göre karşılaştırıldığında nano-silis katkı oranı toplam bağlayıcı malzeme

ağırlığının %0.50'si olarak alınması kararlaştırılmıştır. Harç örnekleri otomatik programlanabilir çimento mikserinde (Resim 3.4) TS EN 196-1'e (TS EN 196-1 2016) göre hazırlanmış ardından da 40x40x160 mm'lik metal kalıplara vibrasyon yöntemiyle yerleştirilmiştir (Resim 3.5). Kalıplara yerleştirilen örnekler bir gün laboratuvar ortamında bekletildikten sonra kalıplardan alınarak ilgili örneklerin testlerinin yapılacağı güne kadar (7, 28 ve 90 gün) su tankında kür edilmiştir.

Çizelge 3.2 Nano-silisli referans harçların optimizasyon sonuçları (7 günlük).

Seri	Görünür Porozite (%)	Su Emme(%)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Görünür Yoğunluk (kg/m ³)	Eğilme Dayanımı (Mpa)	Basınç Dayanımı (Mpa)
RHM7	11.7	5.5	2113.9	2392.7	6.8	42.9
25M7	11.0	5.2	2132.1	2395.5	6.4	41.9
50M7	11.5	5.4	2121.8	2398.1	8.2	38.8
75M7	12.0	5.7	2119.0	2408.6	7.2	44.6
1M7	12.4	6.0	2084.5	2380.8	7.8	43.6

Çizelge 3.3 Nano-silisli referans harçların optimizasyon sonuçları (28 günlük).

Seri	Görünür Porozite (%)	Su Emme(%)	Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Görünür Yoğunluk(kg/m ³)	Eğilme Dayanımı (Mpa)	Basınç Dayanımı (Mpa)
RHM28	13.2	6.3	2092.9	2410.6	9.5	45.6
25M28	12.6	6.0	2121.0	2427.3	9.5	46.9
50M28	13.0	6.2	2104.5	2419.6	9.8	48.0
75M28	13.4	6.4	2096.0	2420.8	9.4	45.2
1M28	13.9	6.7	2085.9	2422.7	9.8	45.1



Resim 3.2 Çimento mikseri.



Resim 3.3 Numuneler.

Çizelge 3.4 Harç üretiminde kullanılan malzemeler (7,28,90 gün).

No	Kod	Çimento (g)	Puzolan (g)	Kum (g)	Nano-Silis (g)	Su (g)
1	RM7-28-90	450	-	1350	-	225
2	MK17	405	45	1350	2.25	225
3	MK27	360	90	1350	2.25	225
4	MK37	315	135	1350	2.25	225
5	MS17	405	45	1350	2.25	225
6	MS27	360	90	1350	2.25	225
7	MS37	315	135	1350	2.25	225
8	MY17	405	45	1350	2.25	225
9	MY27	360	90	1350	2.25	225
10	MY37	315	135	1350	2.25	225
11	MK128	405	45	1350	2.25	225
12	MK228	360	90	1350	2.25	225
13	MK328	315	135	1350	2.25	225
14	MS128	405	45	1350	2.25	225
15	MS228	360	90	1350	2.25	225
16	MS328	315	135	1350	2.25	225
17	MY128	405	45	1350	2.25	225
18	MY228	360	90	1350	2.25	225
19	MY328	315	135	1350	2.25	225
20	MK190	405	45	1350	2.25	225
21	MK290	360	90	1350	2.25	225
22	MK390	315	135	1350	2.25	225
23	MS190	405	45	1350	2.25	225
24	MS290	360	90	1350	2.25	225
25	MS390	315	135	1350	2.25	225
26	MY190	405	45	1350	2.25	225
27	MY290	360	90	1350	2.25	225
28	MY390	315	135	1350	2.25	225

Hazırlanan harç örneklerin kodlamasında; herhangi bir nano-silis ve puzolanik malzeme kullanılmadığı RM kodlu örnekler referans harç örneklerini (%100 çimento) temsil etmektedir. Diğer harç örneklerinin kodlamalarında sırasıyla ikame edilen puzolanik malzemesinin kısaltması, (Silis Dumanı için; MS, Yüksek Fırın Cürufu için; MY, Uçucu Kül için; MK) ardından kullanılan puzolanın oranı (%10, %20, %30) ve son olarak da uygulanan kür süresine göre belirleyici kısaltmalar kullanılmıştır. Örneğin %20 UK

ikameli %0.50 nano-silis içeren harçlar 90 gün su kürüne tabi tutulmuşsa, MK290 olarak kodlanmıştır.

3.4 Fiziksel ve Mekanik Testler

Mekanik testler için otomatik kontrollü laboratuvar tipi çimento presi kullanılmıştır (Resim 3.6 ve Resim 3.7). Fiziksel özelliklerin belirlenmesi amacıyla ilgili örnekler 24 saat boyunca su tankına yerleştirilmiştir. Ardından ilgili örneklerin Arşimet prensibine göre (TS EN 772-4 2000) ile (TS EN 771-1 2005) standartlarına göre; su emme, görünen porozite, birim hacim ağırlık ve görünür yoğunluk gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Ardından, mekanik testler için laboratuvar tipi çimento presi kullanılmış olup testlerde 7, 28 ve 90 günlük harç örnekleri kullanılmıştır. Harçların mekanik özellikleri (TS EN 196-1 2016) göre belirlenmiştir. Numunelerin fiziksel ve basınç dayanım testlerinde her bir örnek grubundan üç numunenin ortalaması alınmıştır.



Resim 3.4 Eğilme dayanım testi.



Resim 3.5 Basınç dayanım testi.

3.5 SEM Analizleri

Harç örneklerinin morfolojik özelliklerinin belirlenmesi amacıyla LEO 1430 VP model SEM cihazı ile seçilen örnekler üzerinde SEM analizleri yapılmıştır.



4. BULGULAR

4.1 Hammadde Analizleri

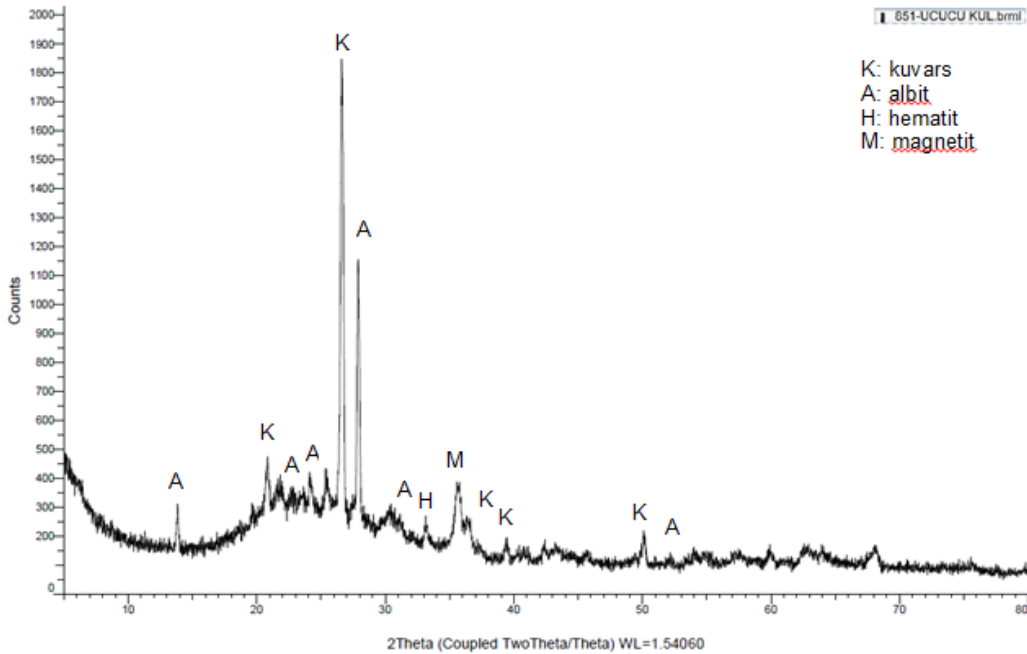
XRF (Çizelge 4.2) analizlerinden elde edilen verilere göre kullanılan UK, ASTM C 618 (2000)'e göre toplam $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ değeri %70'den fazla ve CaO %10'dan az olduğu için F sınıfı uçucu küldür. Çalışmada kullanılan UK (Gümüş 2006), malzemesinin XRD analizlerine göre bünyesinde; kuvars, magnetit ve mullit gibi fazlar bulunmaktadır (Şekil 4.1). Uçucu küle ait lazer tane boyut analiz değerleri ise Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Uçucu küle ait lazer tane boyut analiz değerleri.

Numune	d ₁₀ (µm)	d ₅₀ (µm)	d ₉₀ (µm)
Uçucu kül	7.122	37.375	139.115

Çizelge 4.2 UK'nın XRF kimyasal analiz sonuçları.

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	K.K.	Toplam
Uçucu kül	49.81	18.50	13.40	4.56	0.55	1.84	1.45	4.31	3.52	97.94

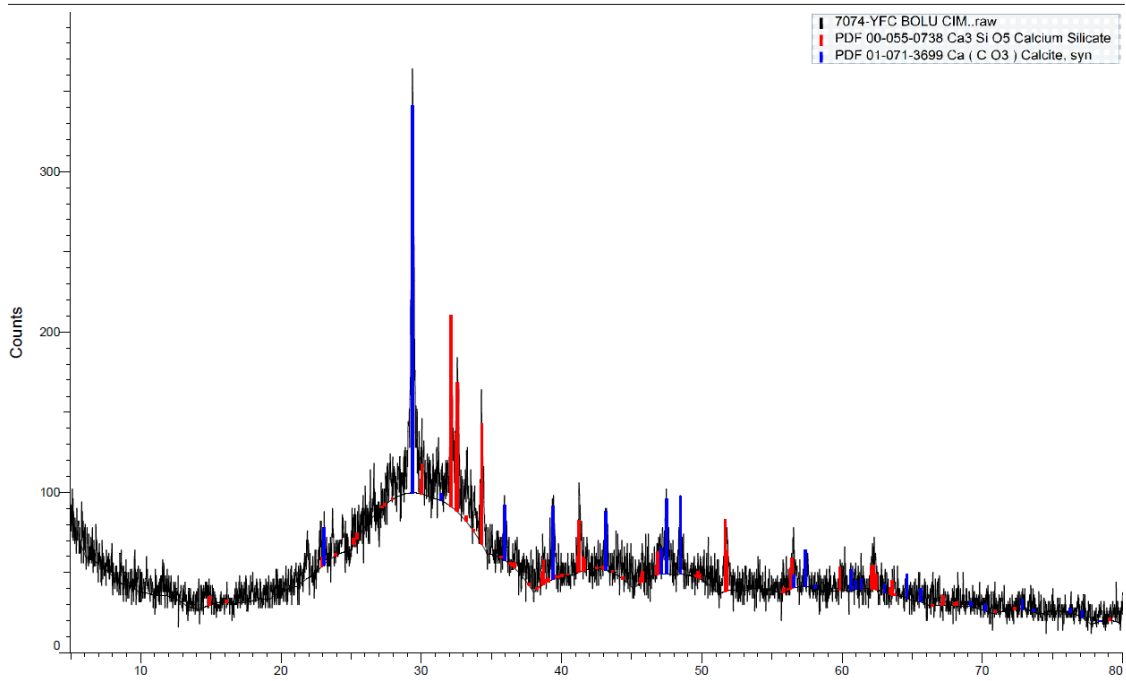


Şekil 4.1 UK'nın XRD difraktogramı.

Çizelge 4.3 YFC malzemesine ait XRF analiz sonuçları.

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	K.K.	Toplam
YFC	32.22	11.67	1.55	4.19	0.48	0.95	2.22	42.64	2.26	98.18

YFC malzemesine ait XRD analizinden elde edilen verilere göre yüksek fırın cürufunda; kalsiyum silikat ve kalsit gibi minerallerin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4.2). YFC malzemesine ait XRF sonuçları ise Çizelge 4.3’de verilmiştir.

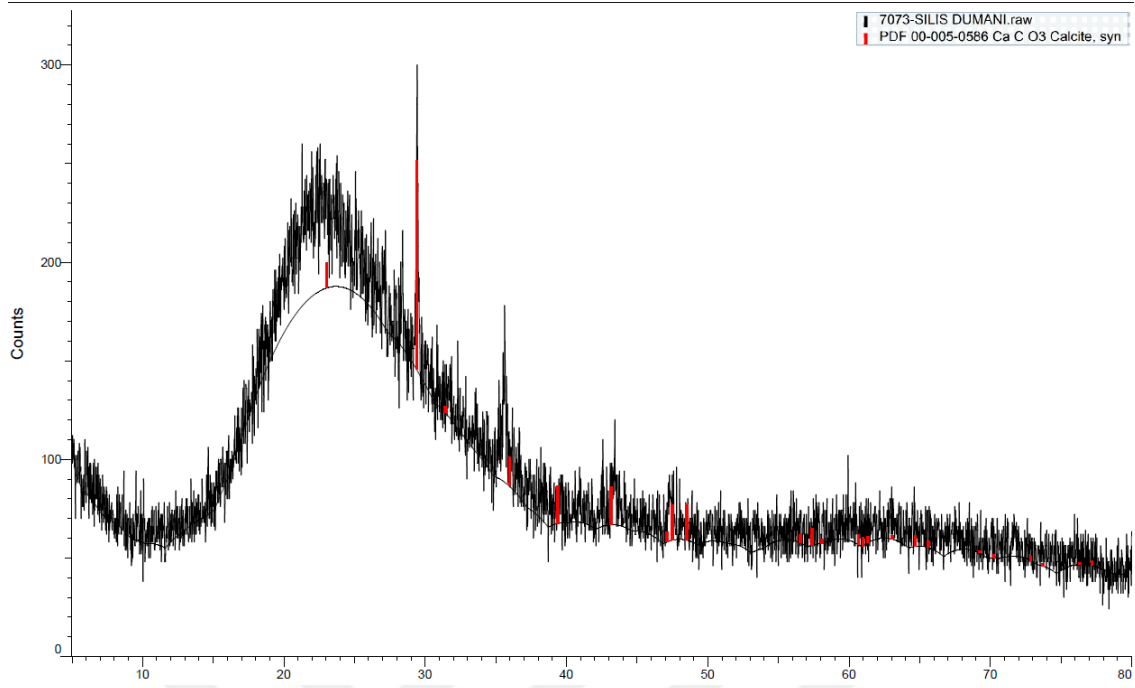


Şekil 4.2 YFC’ nin XRD difraktogramı.

Çizelge 4.4 SD’nin XRF kimyasal analiz sonuçları.

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	K.K.	Toplam
SD	72.21	0.84	0.46	16.25	1.45	2.23	1.03	0.59	2.35	97.41

SD malzemesine ait XRD analizinden elde edilen verilere göre silis dumanında; kuvars ve kalsit gibi minerallerin varlığı tespit edilmiştir (Şekil 4.3). SD malzemesine ait XRF sonuçları Çizelge 4.4 incelendiğinde, %72.21 oranında SiO₂ varlığı tespit edilmiştir. Bu miktar SD malzemesi için oldukça düşüktür.



Şekil 4.3 SD'nin XRD difraktogramı.

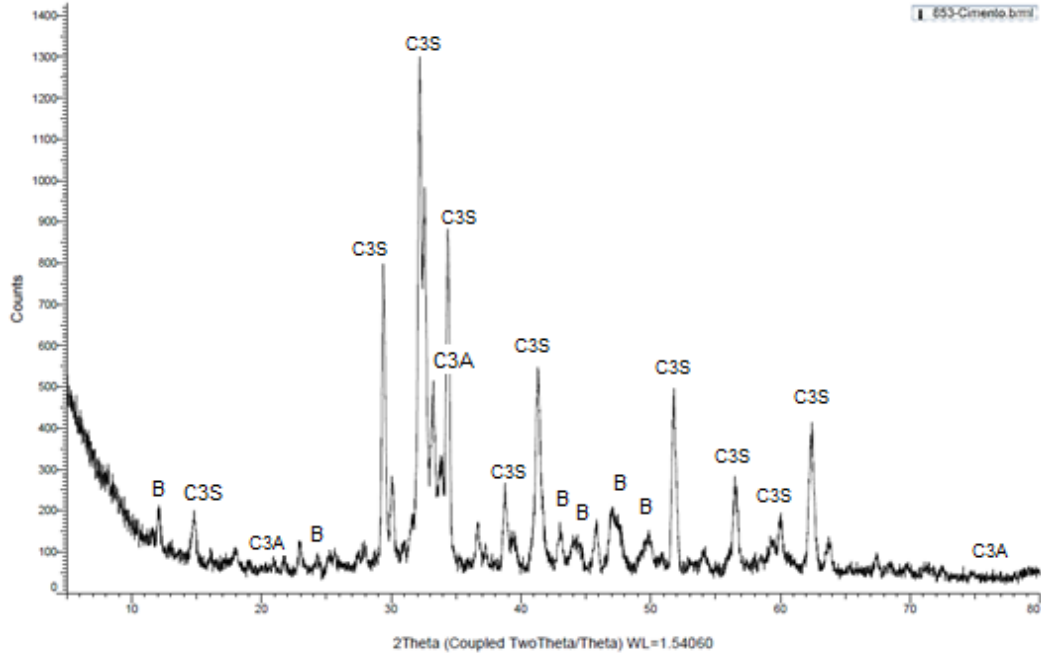
Çimento bünyesinde ise elde edilen verilere göre tri kalsiyum silikat (C_3S), tri kalsiyum alüminat (C_3A) ve brownmillerit fazları saptanmıştır (Şekil 4.4). Çimentoya ait XRF sonuçları ise Çizelge 4.5'de, lazer tane boyut analizi değerleri ise Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.5 Çimento malzemesine ait XRF kimyasal analiz sonuçları.

Oksit (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO	K.K.	Toplam
Çimento	16.66	4.62	3.75	1.92	0.79	1.27	4.18	63.90	1.74	98.83

Çizelge 4.6 CEM 42.5 R tipi çimentoya ait lazer tane boyut analiz değerleri.

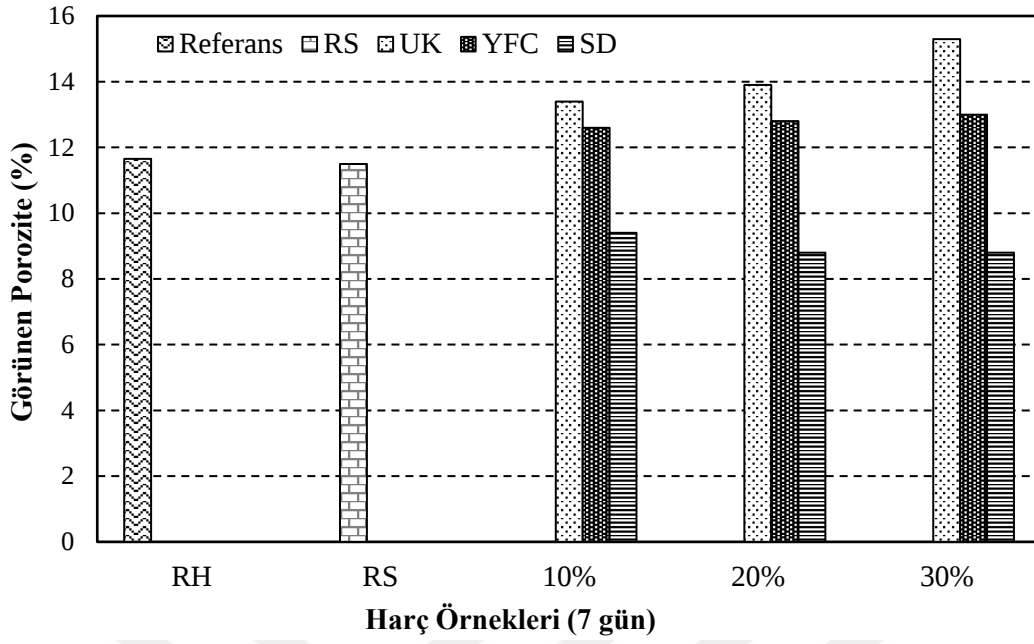
Numune	d ₁₀ (µm)	d ₅₀ (µm)	d ₉₀ (µm)
Çimento	1.913	17.322	53.956



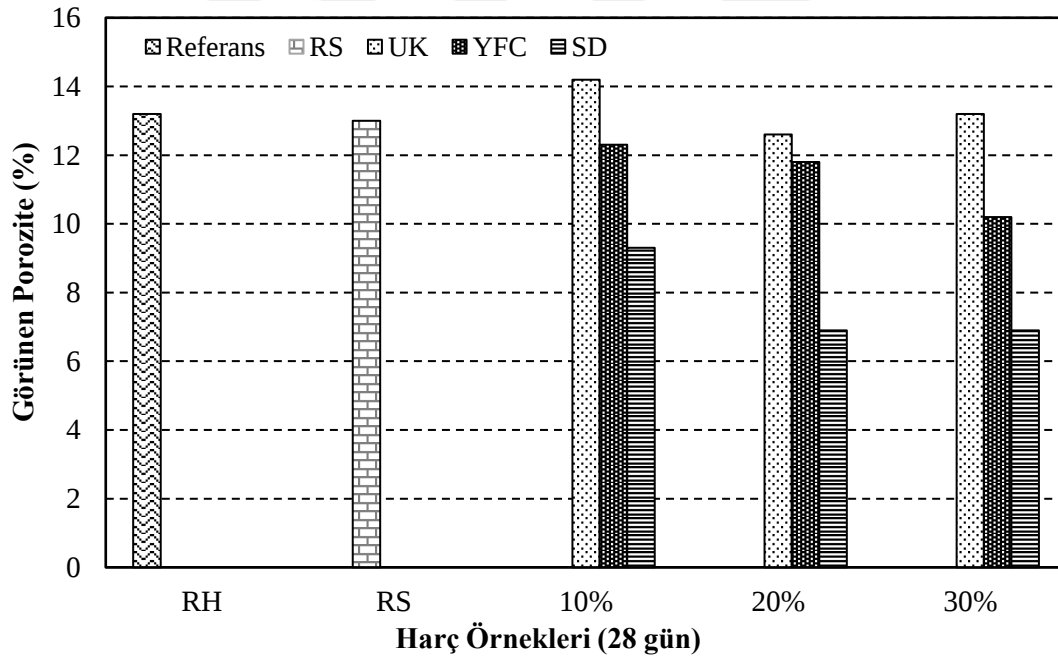
Şekil 4.4 Çimentoya ait XRD difraktogramı.

4.2 Harçların Fiziksel Özellikleri

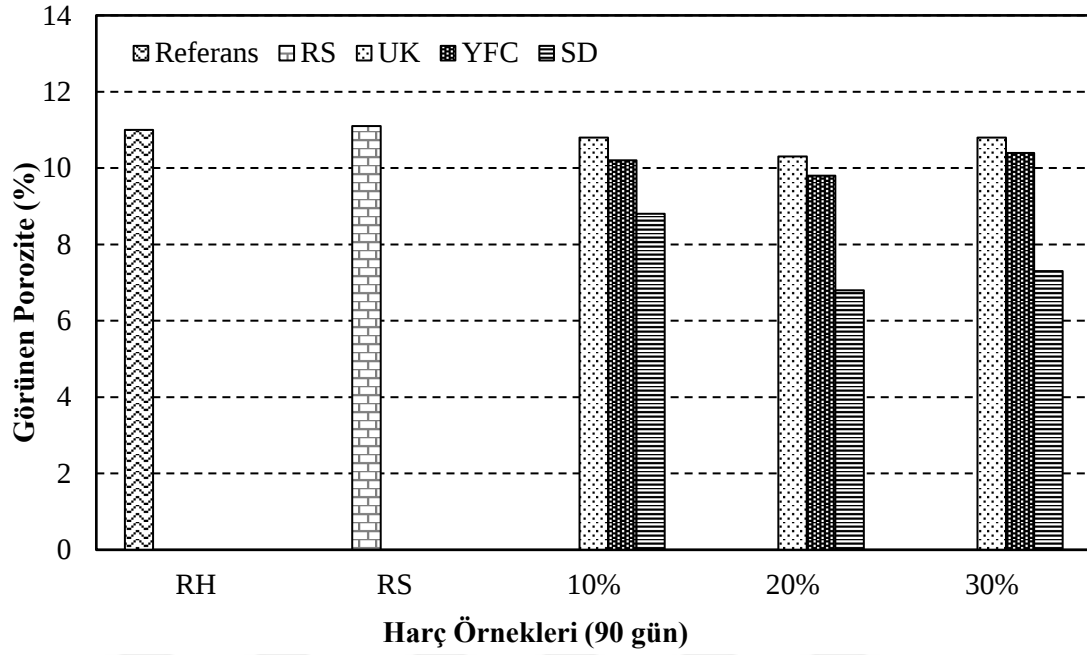
Üretilen harç numunelerinden elde edilen verilere göre görünen porozite değerleri kür süresi arttıkça azalmıştır. Görünen porozite; 7 günlük numunelerde %8.8 – %15.3, 28 günlük numunelerde %14.2 – %6.9, 90 günlük numunelerde ise %11.1 - %6.8 arasında değişiklik göstermektedir. UK ve YFC ikame edilen harç numunelerinde malzemelerin yüzdesi arttıkça, 7 günlük örneklerde görünen porozite değerlerinde artış olduğu, ancak SD ikame edilen harç numunelerinde ise bu durum azalma olarak gözlemlenmiştir (Şekil 4.5). 28 ve 90 günlük örneklerde ise çimento harçlarına ikame edilen puzolan katkılarının oranları arttıkça ilgili örneklerin görünen porozitelerinin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4.6 ve Şekil 4.7). %100 çimentolu referans harca eklenen %0.5 nano-silis katkısı görünen porozite değerleri incelendiğinde; 7 günlük ve 28 günlük numunelerde azalma söz konusu iken, 90 günlük numunelerde ise nano-silis katkısıyla görünen porozite değerinde artış meydana gelmiştir.



Şekil 4.5 7 günlük numunelerin görünen porozite değerleri

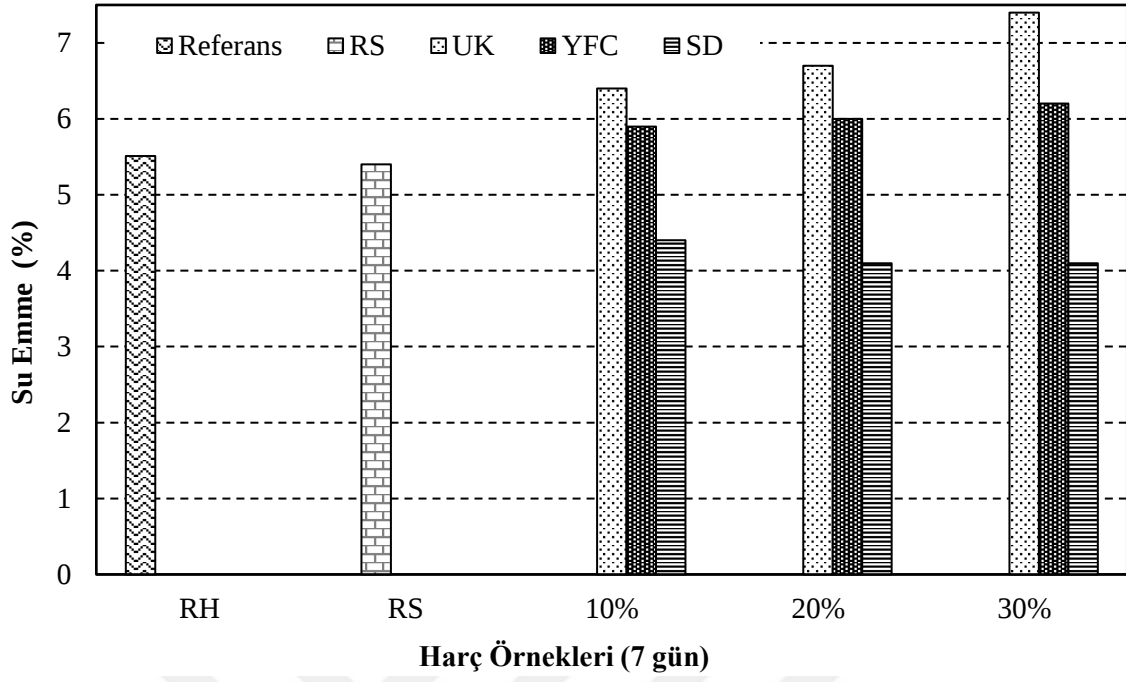


Şekil 4.6 28 günlük numunelerin görünen porozite değerleri.

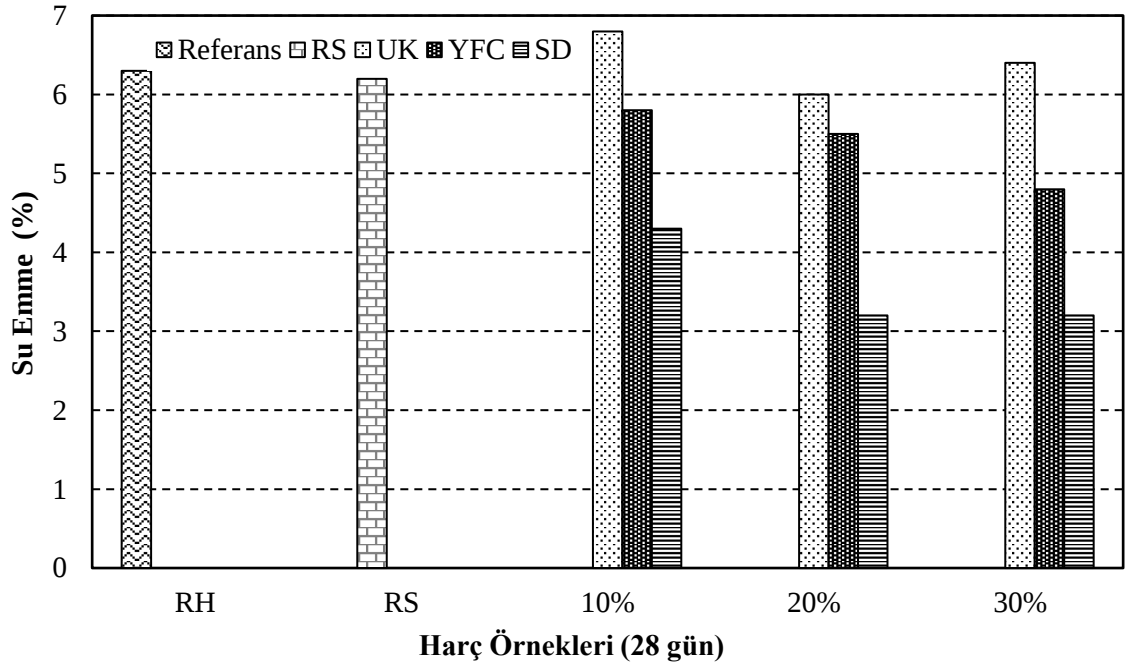


Şekil 4.7 90 günlük numunelerin görünen porozite değerleri.

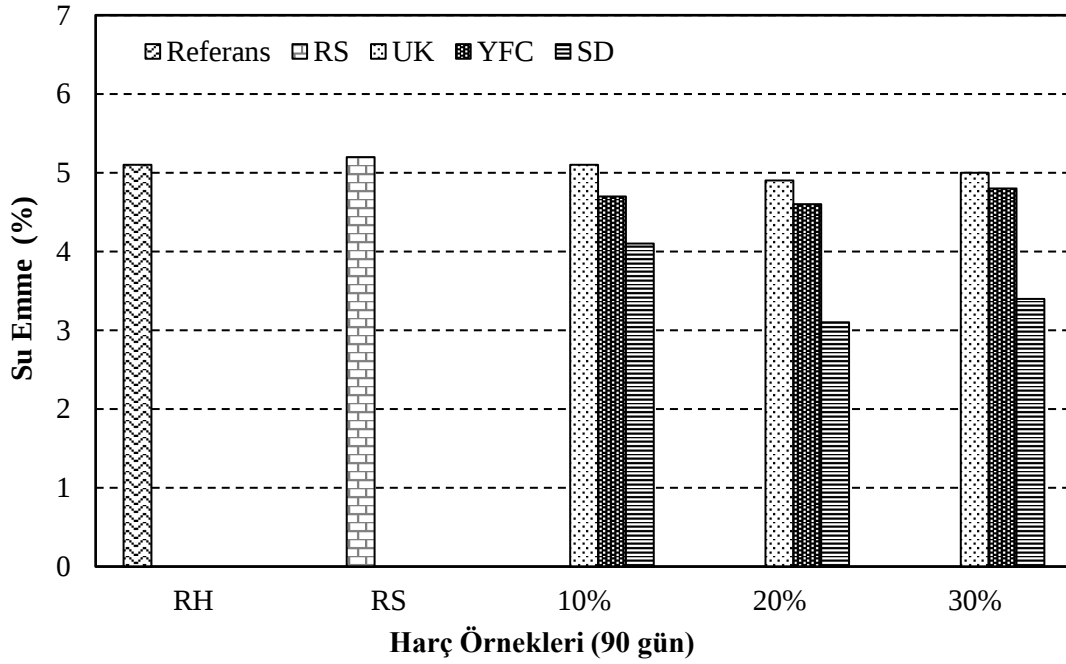
Yapıların uzun ömürlü olabilmesi için su emme oranlarının düşük seviyelerde olması istenmektedir. Bu sebeple boşluk oranını azaltmak için nano boyuttaki malzemelerin kullanımı önem kazanmıştır. Örneklerden elde edilen verilere göre; tüm örnek gruplarında %100 çimentolu referans harca eklenen % 0.5 nano-silis katkılı numunelerde, referans harç numunelerine oranla su emme yüzdesinde azalmalar görülmüştür. Tüm kür sürelerinde, su emme verilerinde en yüksek değerler UK ikameli numunelerde, en düşük veriler ise SD ikameli numunelerde görülmüştür. İkame oranlarına göre incelendiğinde en düşük değerler; 90 günlük örneklerin %20 puzolanik malzeme ikamesine sahip numunelerde elde edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde su emme oranları; 7 günlük numunelerde %4.1 – %7.4, 28 günlük numunelerde %6.8 – %3.2 ve 90 günlük numunelerde %5.2 – %3.1 arasında değerler elde edilmiştir (Şekil 4.8 – Şekil 4.10).



Şekil 4.8 7 günlük numunelerin su emme değerleri.

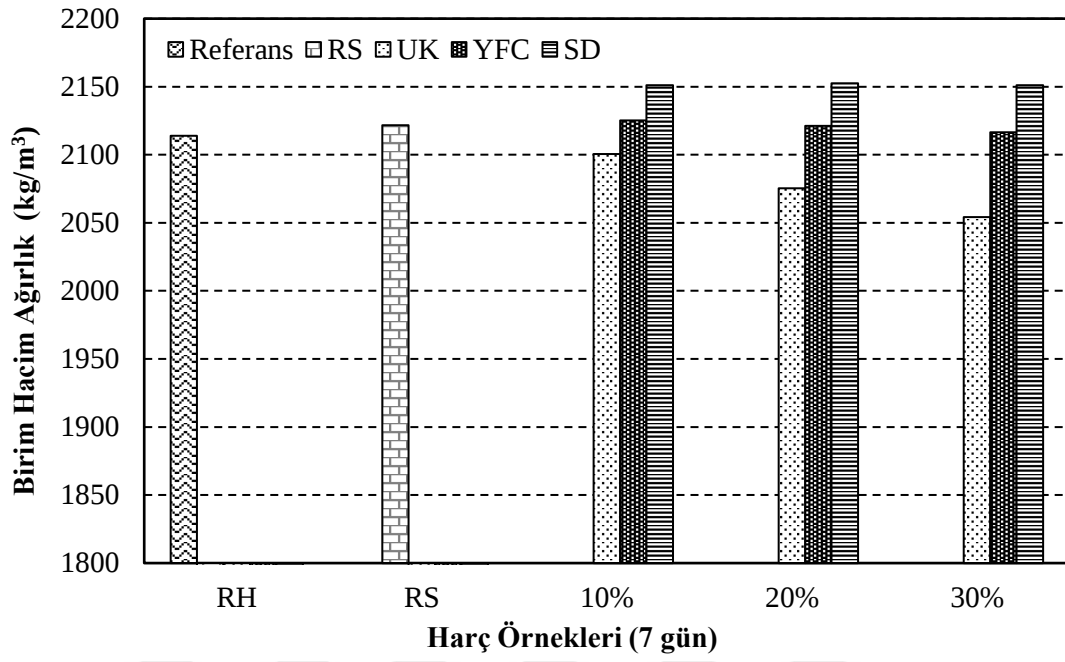


Şekil 4.9 28 günlük numunelerin su emme değerleri.

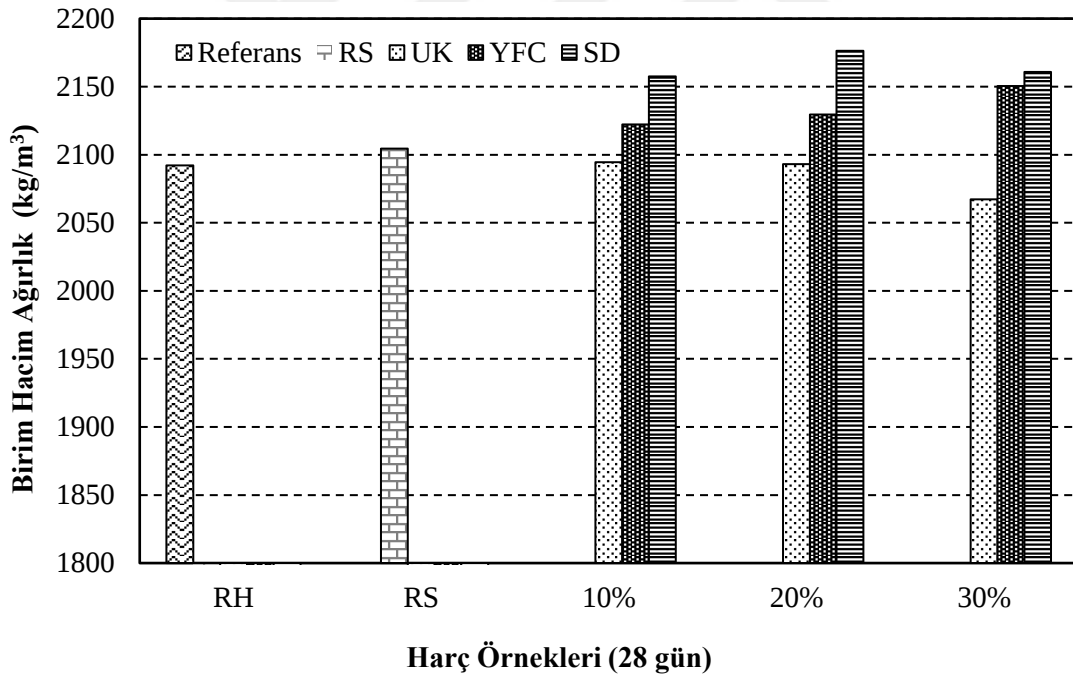


Şekil 4.10 90 günlük numunelerin su emme değerleri.

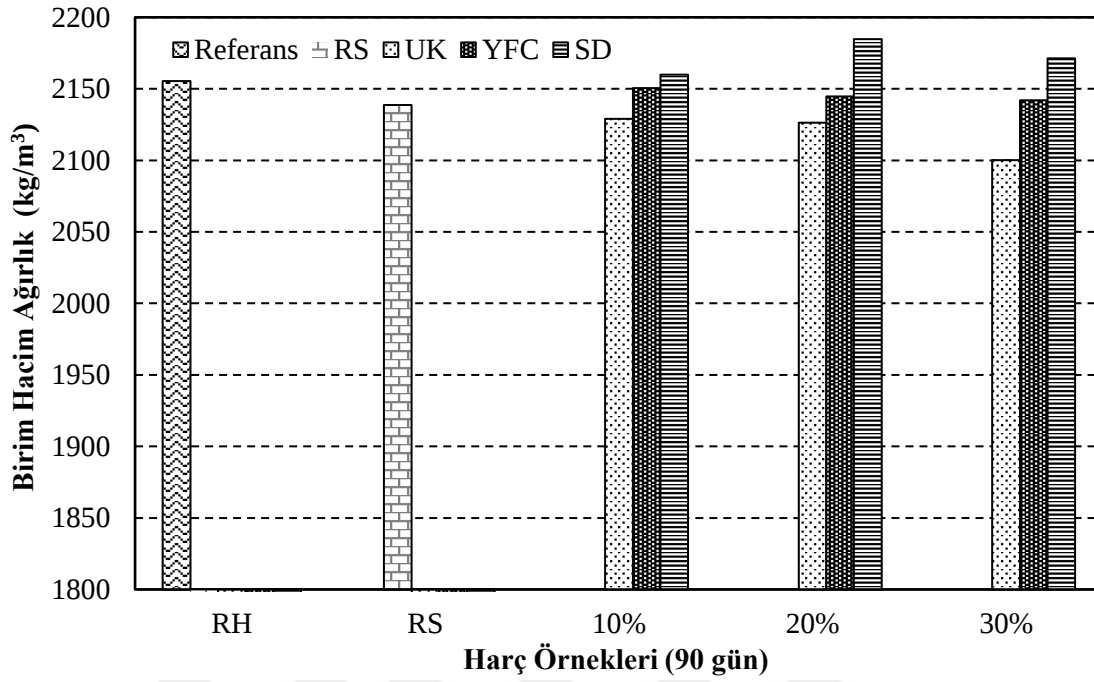
Birim hacim ağırlık sonuçları değerlendirildiğinde; referans harcın ve nano silis ilaveli harcın birim hacim ağırlığı kür süresi ile incelendiğinde değişkenlik göstermiştir. Kür süreleri ayrı ayrı incelendiğinde 7 ve 28 günlük örneklerde referans harca nano-silis katkısı birim hacim ağırlığında artış meydana getirirken, 90 günlük örneklerde ise azalma görülmüştür. 7 günlük kür süresi incelendiğinde UK ve YFC ikameli numunelerde ikame oranı arttıkça, birim hacim ağırlıkta azalma, SD ikameli numunelerde ise belirli bir değişkenlik söz konusu değildir. 28 günlük örneklerde YFC ve SD ikame oranı arttıkça birim hacim ağırlıkları da artmıştır, ancak %20 ikame oranına sahip SD malzemesine sahip numunelerde gözlenen birim hacim ağırlık değerleri kür süresinin örnekleri içinde en yüksek seviyedir. 90 günlük numunelerde, tüm kür süreleri ve malzeme grupları için %20 oranında SD ikameli numunelerde en yüksek birim hacim ağırlık değerleri (2184.70 kg/m^3) elde edilmiştir. SD ikameli numunelerde %20 ikameye kadar artış yaşanırken %30 ikameli numunelerde tekrar azalma yaşanmıştır. Tüm kür sürelerinde de nano-silis katkılı referans harca ikame edilen UK malzemeli numunelerin birim hacim ağırlık değerlerinde gözlenen azalma dikkat çekicidir. Genel olarak UK' lı numunelerde 2067.30 kg/m^3 - 2129.10 kg/m^3 , YFC' li numunelerde 2150.50 kg/m^3 – 2122.30 kg/m^3 ve SD' li numunelerde 2184.70 kg/m^3 – 2157.50 kg/m^3 arasında değişkenlik göstermektedir (Şekil 4.11-Şekil 4.13).



Şekil 4.11 7 günlük numunelerin birim hacim ağırlıkları.



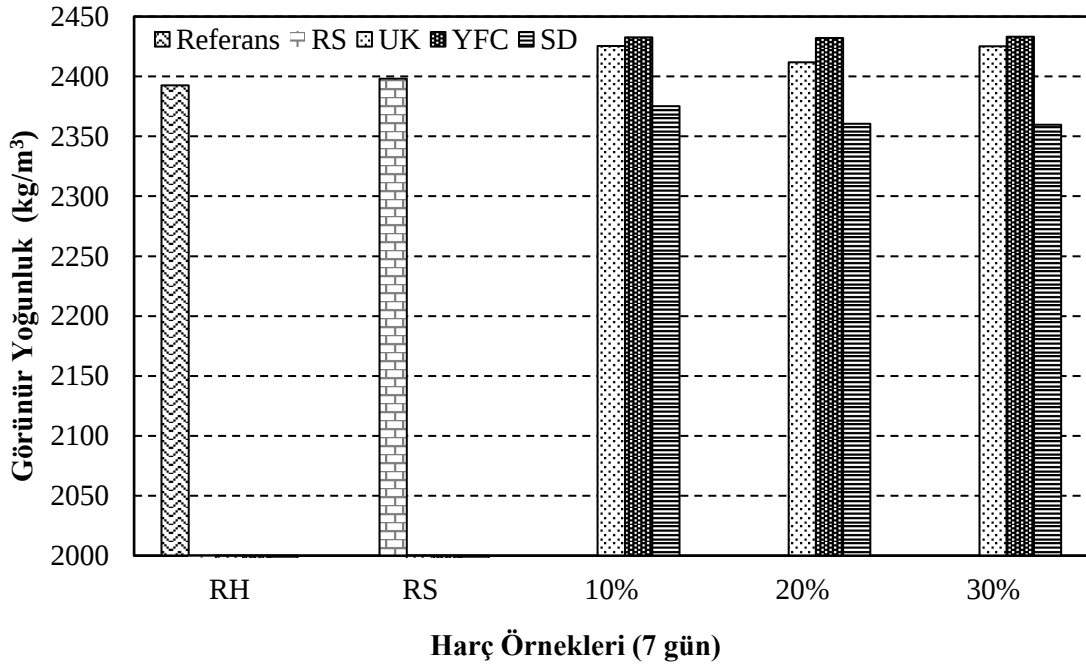
Şekil 4.12 28 günlük numunelerin birim hacim ağırlıkları.



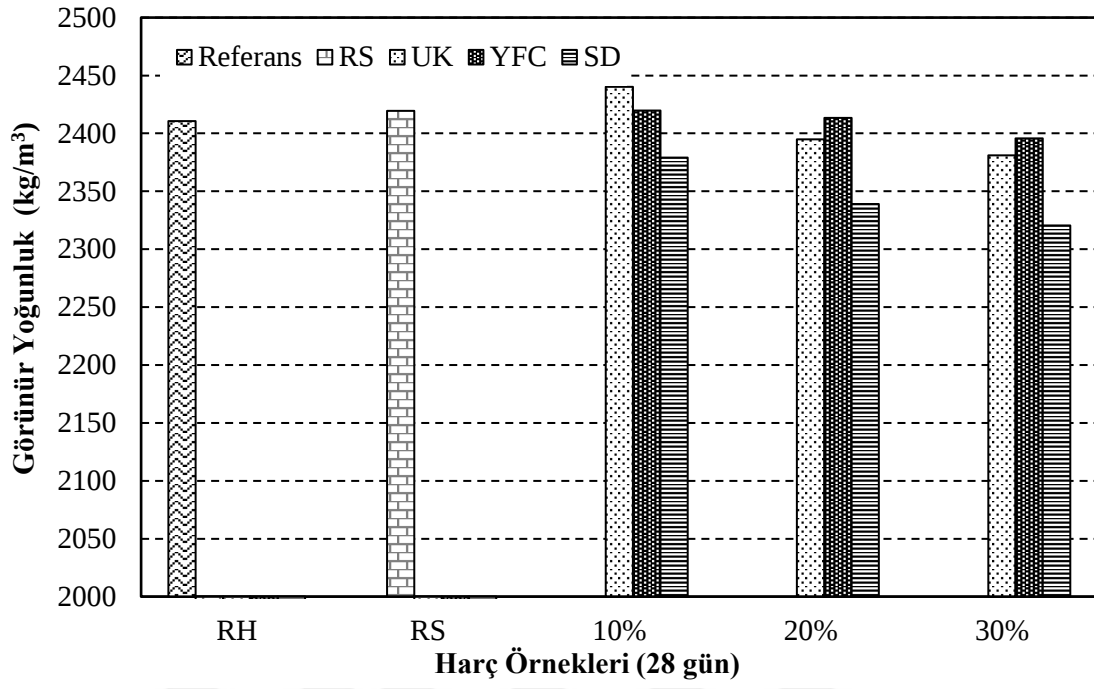
Şekil 4.13 90 günlük numunelerin birim hacim ağırlıkları.

Görünür yoğunluk değerleri incelendiğinde; 7 ve 28 günlük örneklerde %0.5 katkılı nano-silis içeren referans numuneler %100 çimentolu referans harç numunelerinden daha fazla görünür yoğunluk değerlerine sahipken, bu durum 90 günlük örneklerde ise tam tersidir. UK ikameli numunelerde: ikame oranı arttıkça görünür yoğunluk değerleri lineer bir doğrultuda azalmıştır, ancak 7 günlük numunelerde değerler değişkenlik göstermiştir. Tüm kür süreleri için Nano-silis referans harcına ikame edilen SD malzemeli numunelerde görünür yoğunluk değerlerinde azalma söz konusudur. Numuneler ikame oranına göre incelendiğinde; %10 ikame oranlı numunelerde en yüksek değerlerin saptandığı görülmüştür. 28 günlük numunelerin görünür yoğunluk değerleri 90 günlük numunelere kıyasla daha yüksektir. 7 günlük numunelerde $2359.7 \text{ kg/m}^3 - 2433.3 \text{ kg/m}^3$ 28 günlük numunelerde $2320.5 \text{ kg/m}^3 - 2440.2 \text{ kg/m}^3$ ve 90 günlük numunelerde $2342.9 \text{ kg/m}^3 - 2422.1 \text{ kg/m}^3$ değerleri arasında değişkenlik göstermektedir. YFC ikameli numunelerde; 28 günlük numunelerde ikame oranı arttıkça görünür yoğunluk değerleri azalmıştır, ancak 7 günlük numunelerde belirli bir değişiklik söz konusu değilken, 90 günlük numunelerde değerlerde değişken eğrilik söz konusudur. SD ikameli numunelerde: tüm kür sürelerinde ikame oranı arttıkça görünür yoğunlukta azalma meydana gelmiştir. Bu durum, 7 günlük numunelerde $2375.1 \text{ kg/m}^3 - 2359.7 \text{ kg/m}^3$

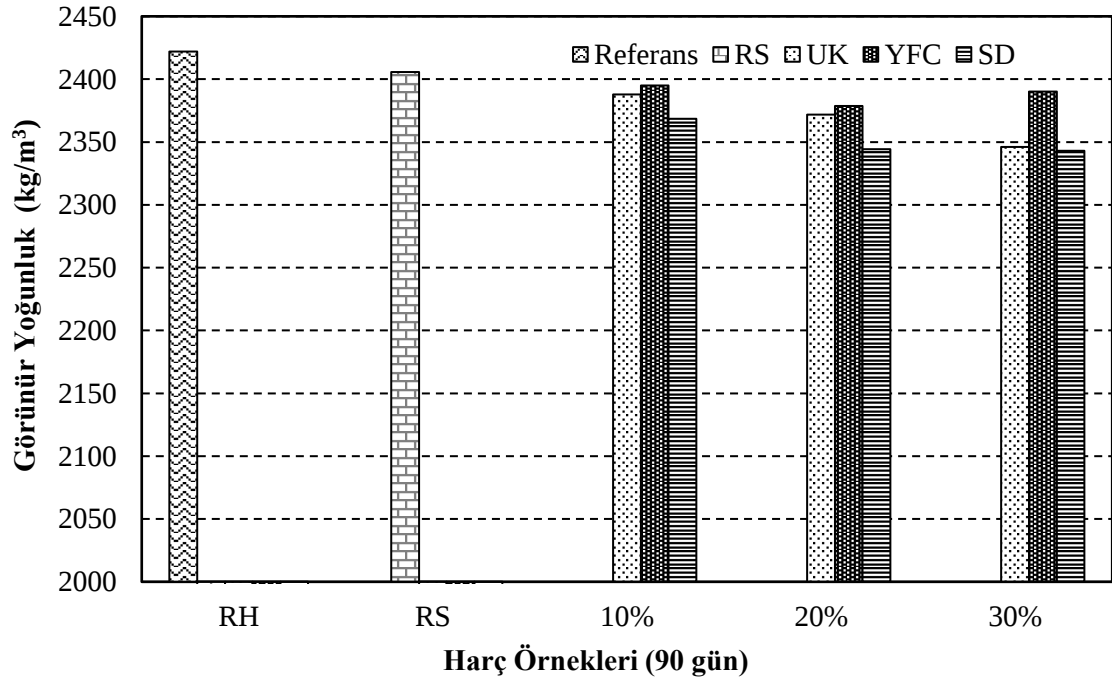
değerleri 28 günlük numunelerde $2379.0 \text{ kg/m}^3 - 2320.5 \text{ kg/m}^3$ değerleri ve 90 günlük numunelerde $2368.6 \text{ kg/m}^3 - 2342.9 \text{ kg/m}^3$ değerleri arasında değişmektedir. Genel olarak değerlendirildiğinde referans harcın kür süresinin artması ile görünür yoğunluğu artmıştır, ancak nano-silis katkılı referans harç numunelerinde bu durum değişkenlik göstermiştir. İkameli harçlarda ise kür süresi arttıkça görünür yoğunluk azalmıştır (Şekil 4.14 – Şekil 4.16).



Şekil 4.14 7 günlük numunelerin görünür yoğunlukları.



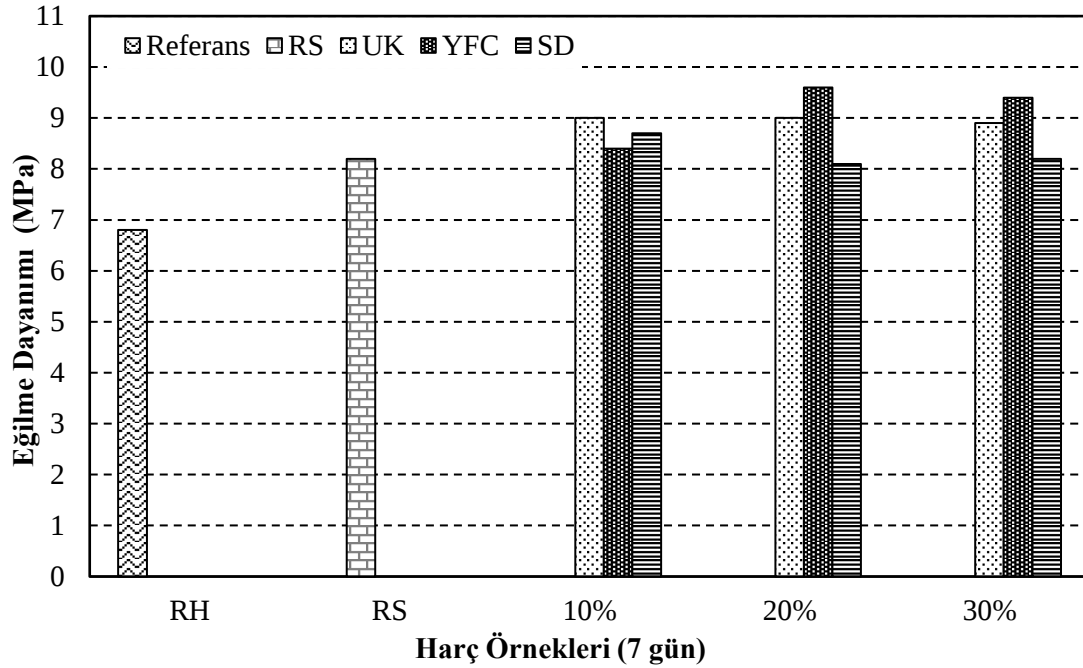
Şekil 4.15 28 günlük numunelerin görünür yoğunlukları.



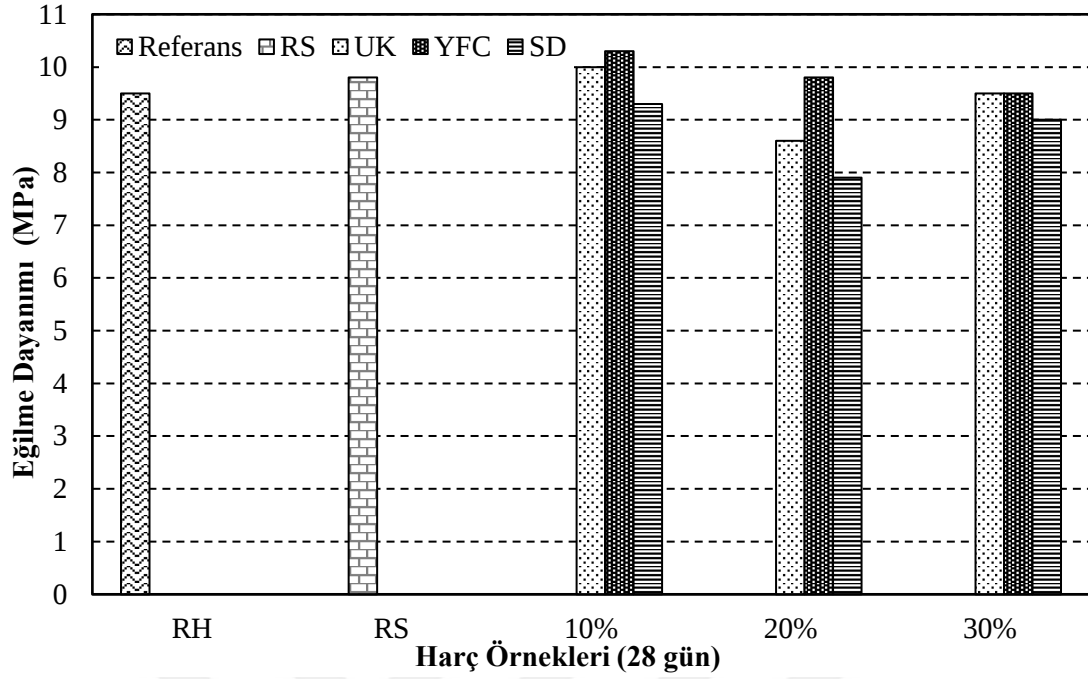
Şekil 4.16 90 günlük numunelerin görünür yoğunlukları.

4.3 Numunelerin Eğilme ve Basınç Dayanım Özellikleri

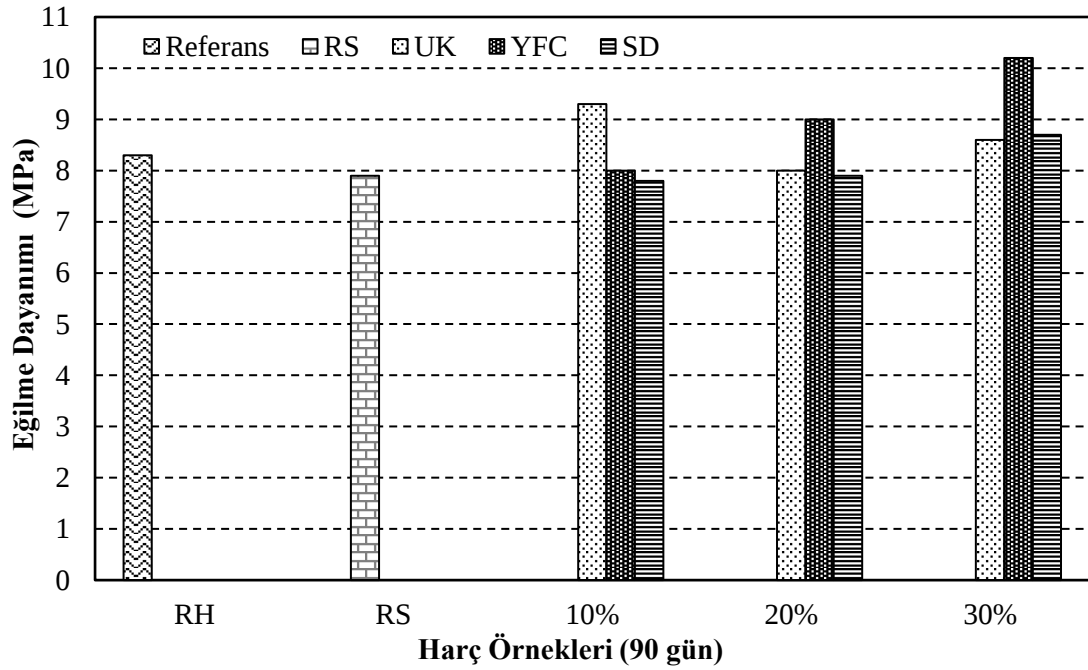
Harç numunelere yapılan eğilme deneyinden elde edilen sonuçlara göre; referans harç numunelerde en yüksek değerler 28 günlük örneklerde alınmıştır. 7 ve 28 günlük örneklerde nano-silis katkılı referans harç numuneleri, %100 çimentolu referans harç numunelerinden daha fazla eğilme dayanımına sahipken, 90 günlük örneklerde %100 çimento esaslı referans harç daha fazla eğilme dayanımına sahiptir. 7 günlük örneklerde puzolanik malzeme ikameli numunelerin referans harç numunelerinden daha fazla eğilme dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. İkame oranına göre 7 günlük numuneler incelendiğinde UK ikameli numunelerde belirli bir fark oluşmamıştır, YFC ve SD ikameli numunelerde değişkenlik söz konusudur. 28 günlük örneklerde UK ve SD ikameli numuneler ikame oranından bağımsız şekilde değerlerde değişkenlik söz konusudur. YFC ikameli numunelerde ise YFC yüzdesinin artmasıyla eğilme dayanımı azalmıştır. 90 günlük örneklerde ise ikameli numunelere bakıldığında YFC ve SD malzemelerinin yüzdesinin artmasıyla eğilme dayanımı artmıştır, ancak UK ikameli harç numunelerinde eğrisel bir değişiklik saptanmıştır. Genel olarak grafiklere bakıldığında 7 günlük örneklerde 6.8 MPa – 9.6 MPa, 28 günlük örneklerde 7.9 MPa – 10.3 MPa, 90 günlük örneklerde 7.8 MPa – 10.2 MPa arasında değişkenlik göstermektedir (Şekil 4.17 – Şekil 4.19).



Şekil 4.17 7 günlük numunelerin eğilme dayanımları.



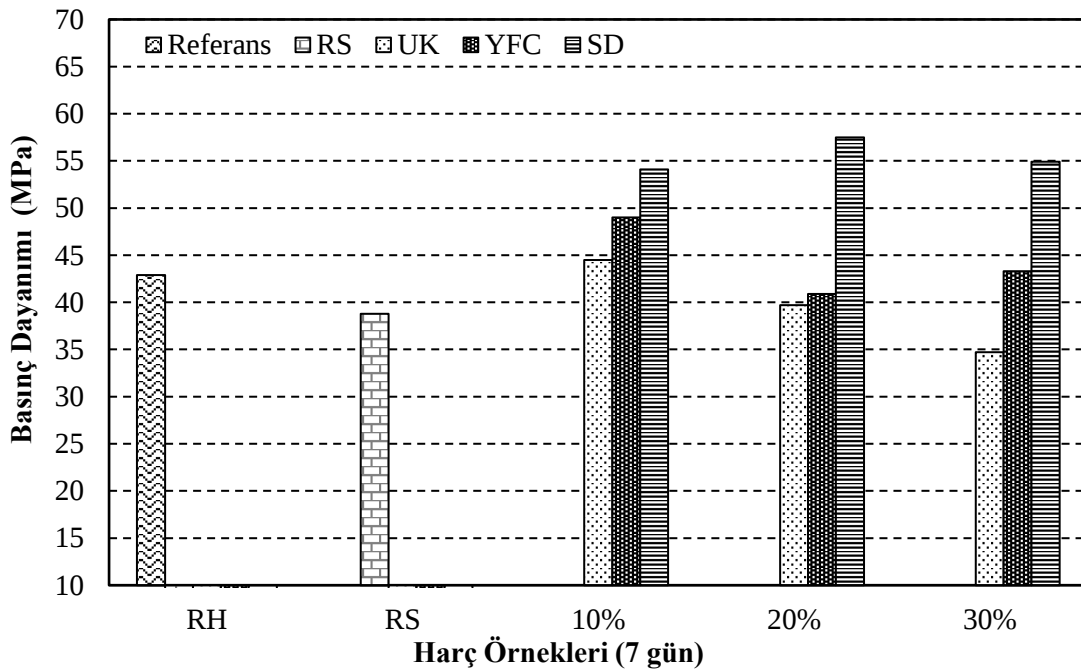
Şekil 4.18 28 günlük numunelerin eğilme dayanımları.



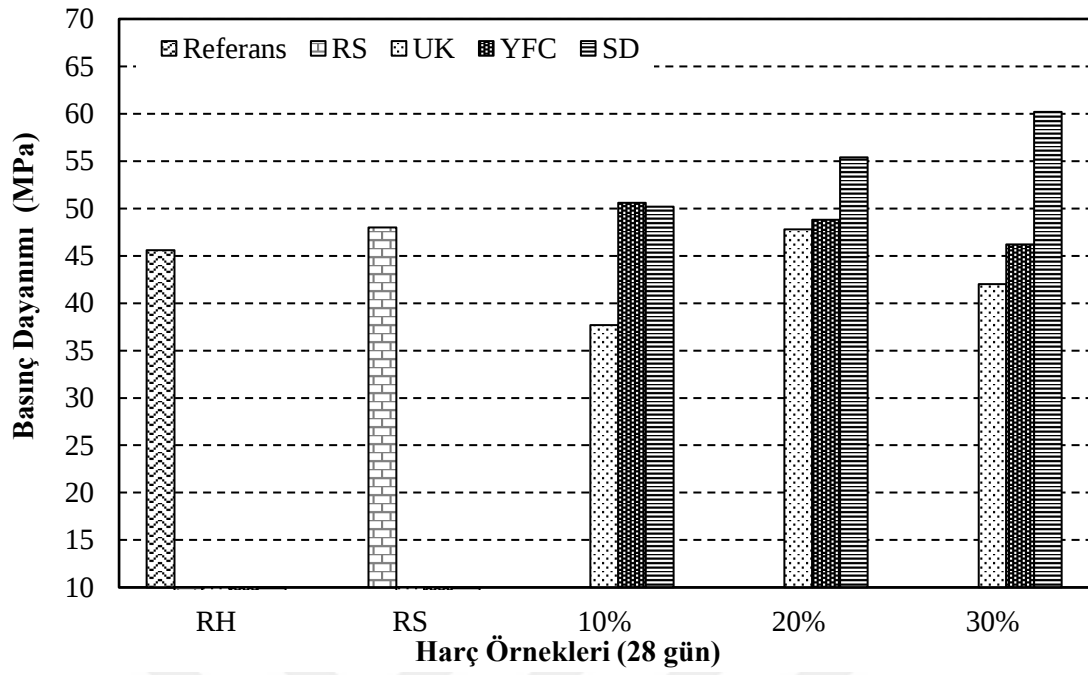
Şekil 4.19 90 günlük numunelerin eğilme dayanımları.

Basınç dayanım değerlerine göre; 7 ve 90 günlük örneklerde nano-silis katkılı referans harç numuneleri %100 çimentolu referans harç numunelerinden daha az değer elde edilmiş, 28 günlük örneklerde ise basınç dayanımı daha fazla belirlenmiştir. UK ikameli harç numuneleri, 7 günlük örneklerden %10 ikameli numune haricinde referans harca kıyasla daha düşük basınç dayanımı değerleri almıştır. 7 günlük örneklerde ikame edilen

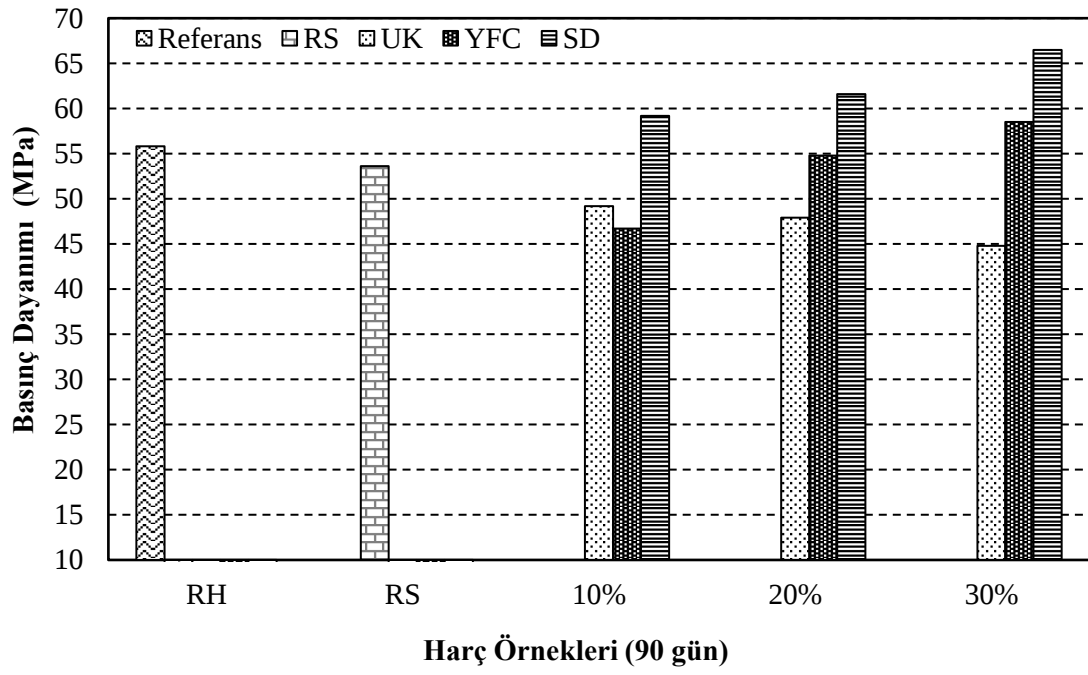
malzemeler, ikame oranına göre incelendiğinde tüm ikame oranlarında SD ikameli numuneler en yüksek değerleri almıştır. Bu durum SD malzemesinin inceliğine bağlı olarak numunenin matrisinde oluşturduğu homojen doluluğun basınç dayanımına etkisi ile açıklanabilir. Bu durum 90 günlük örneklerde de söz konusudur. 28 günlük örneklerde YFC ikameli harçlarda YFC yüzdesi arttıkça basınç dayanımı düşerken, SD ikameli harçlarda ikame yüzdesi arttıkça basınç dayanımı artmıştır. 28 günlük numunelerde basınç dayanımı 37.7 MPa – 60.2 MPa arasında değişkenlik göstermiştir. 90 günlük numunelerde UK yüzdesi arttıkça basınç dayanımı azalmıştır. YFC ve SD ikameli numunelerde ise ikame yüzdesi arttıkça basınç dayanımı artmıştır. 7 günlük örnekler 34.7 MPa – 57.5 MPa, 28 günlük örnekler 37.7 MPa – 60.2 MPa ve 90 günlük örneklerde basınç dayanımı 44.8 MPa – 66.5 MPa arasında değişiklik göstermektedir. Tüm kür süreleri kıyaslandığında en yüksek basınç dayanımı 90 günlük kür süresine maruz kalan %0.5 nano-silis katkılı %30 SD ikameli harç numunelerinden elde edilmiştir. Bu olay SD pozolanik malzemesinin uzun kür süresinde daha çok dayanım kazanmasıyla açıklanabilir (Şekil 4.20 – Şekil 4.22).



Şekil 4.20 7 günlük numunelerin basınç dayanımları.



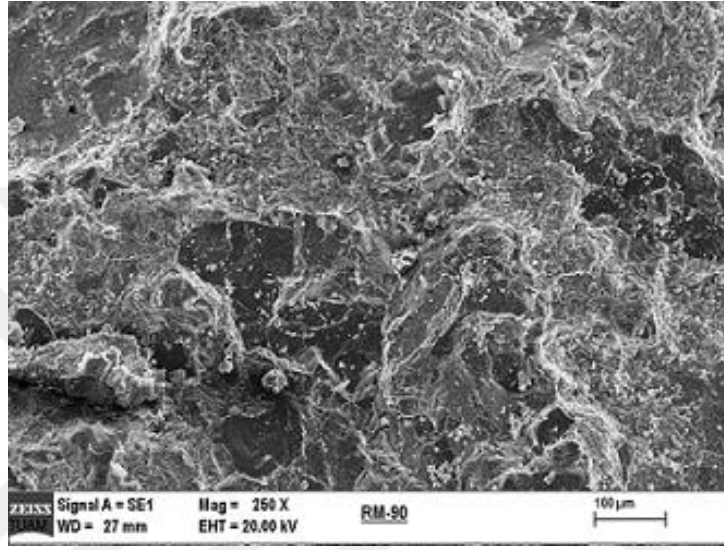
Şekil 4.21 28 günlük numunelerin basınç dayanımları.



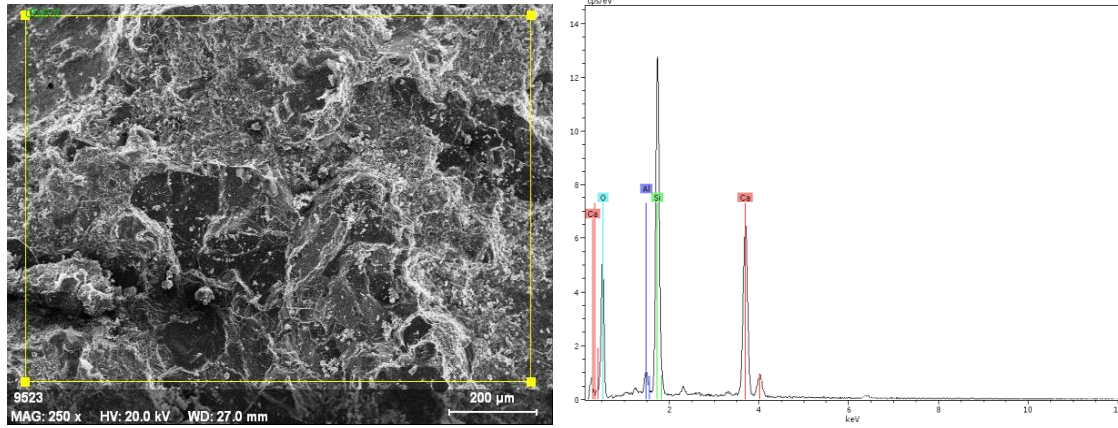
Şekil 4.22 90 günlük numunelerin basınç dayanımları.

4.4 Harçların SEM Görüntüleri

Harç örneklerinden seçilen bazı örnekler üzerinde SEM-EDX analizleri uygulanmış ve ilgili örneklerin morfolojik özellikleri ile içerdikleri bileşikler araştırılmıştır. Bu kapsamda 90 günlük referans harç örnekleri ile % 10 - % 20 - % 30 UK, YFC ve SD ikameli harç örneklerine ait SEM-EDX SEM-EDX grafikleri bu bölümde verilmiştir.



Resim 4.1 RH90 kodlu numunenin SEM görüntüsü.



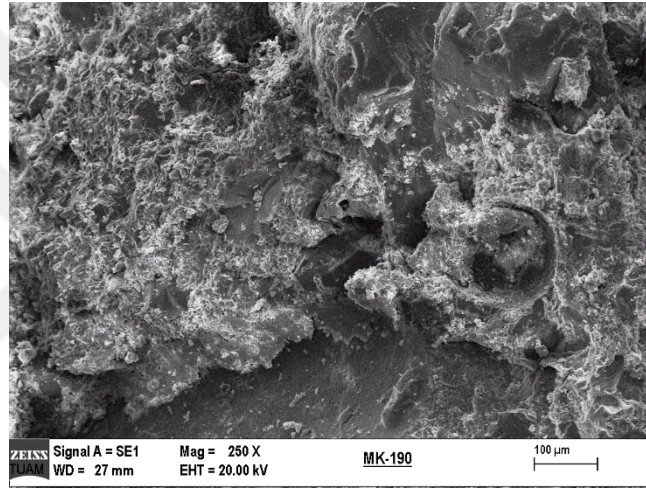
Resim 4.2 RH90 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

RH90 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.1 ve Resim 4.2’de gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al_2O_3 (% 2.91), SiO_2 (% 57.26) ve CaO (% 39.83) varlığı gözlenmiştir.

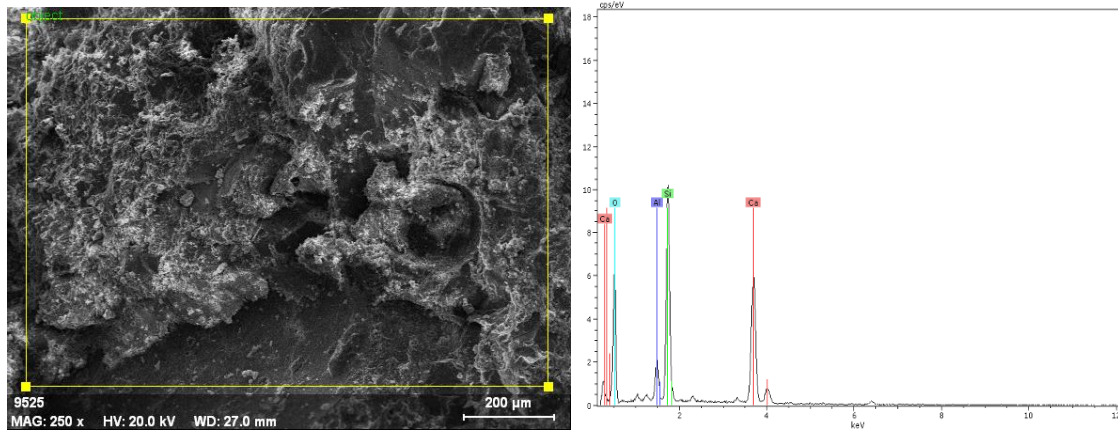
Çizelge 4.7 RH90 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Alüminyum	2114	1.09	1.06	0.79	Al ₂ O ₃	2.91
Silis	39376	18.97	18.43	13.15	SiO ₂	57.26
Kalsiyum	29798	20.18	19.61	9.80	CaO	39.83
Oksijen	13558	62.69	60.90	76.26		38.98

MK190 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.3 ve Resim 4.4’de gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al₂O₃ (% 10.19), SiO₂ (% 54.64) ve CaO (% 35.17) varlığı gözlenmiştir.



Resim 4.3 MK190 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

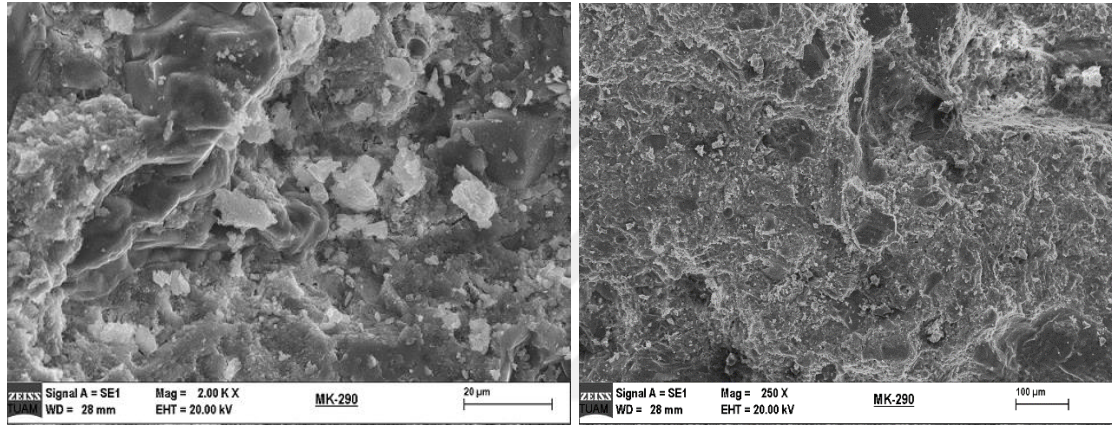


Resim 4.4 MK190 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

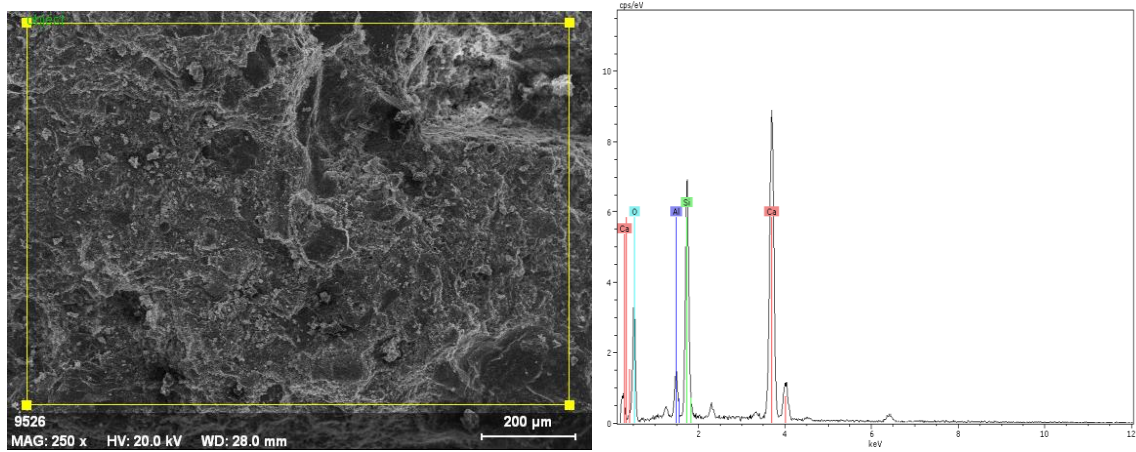
Çizelge 4.8 MK190 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Alüminyum	4071	4.33	3.73	2.75	Al ₂ O ₃	10.19
Silis	20911	20.50	17.67	12.51	SiO ₂	54.64
Kalsiyum	17939	20.18	17.39	8.63	CaO	35.17
Oksijen	10723	71.04	61.21	76.10		38.32

MK290 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.5 ve Resim 4.6’da gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al₂O₃ (% 10.19), SiO₂ (% 54.64) ve CaO (% 35.17) varlığı gözlenmiştir.



Resim 4.5 MK290 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

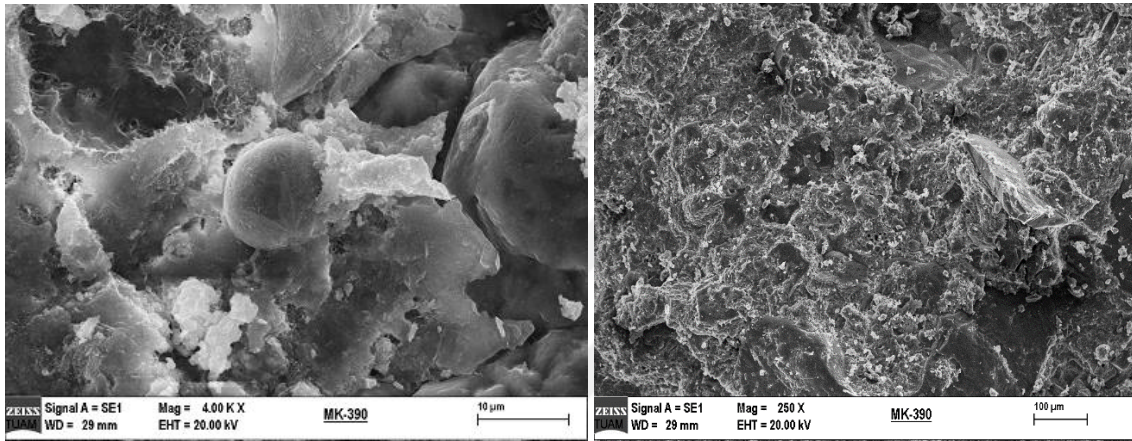


Resim 4.6 MK290 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

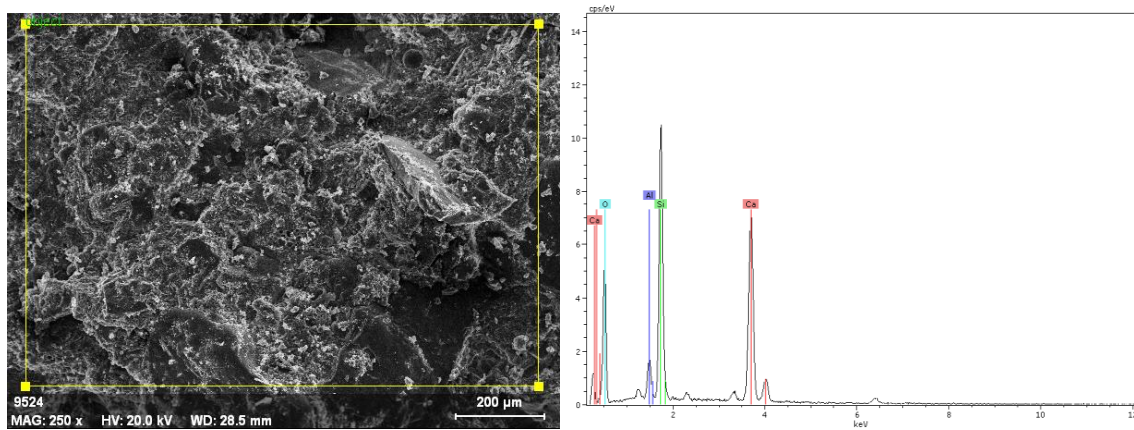
Çizelge 4.9 MK290 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Alüminyum	2280	2.19	2.18	1.70	Al ₂ O ₃	5.76
Silis	14150	12.73	12.69	9.47	SiO ₂	37.94
Kalsiyum	26722	28.89	28.80	15.06	CaO	56.30
Oksijen	5996	56.50	56.32	73.77		37.22

MK390 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.7 ve Resim 4.8’de gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al₂O₃ (% 6.01), SiO₂ (% 50.54) ve CaO (% 43.46) varlığı gözlenmiştir.



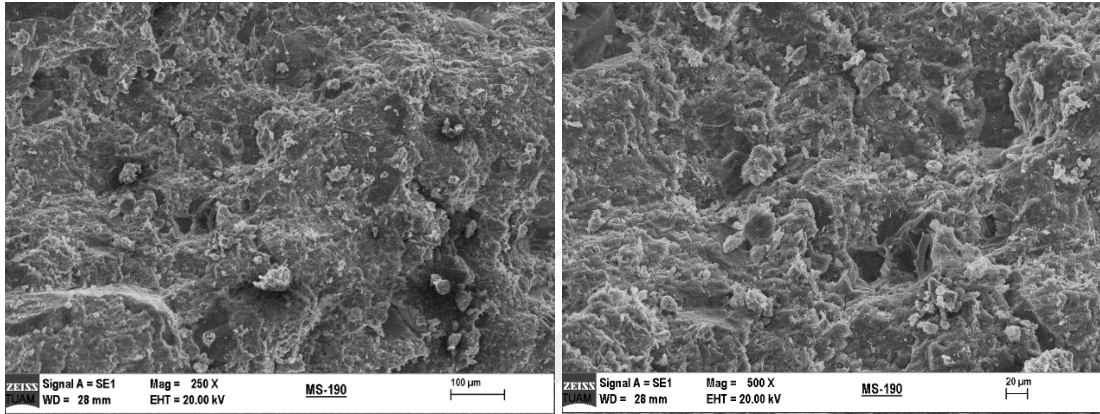
Resim 4.7 MK390 kodlu numunenin SEM görüntüsü.



Resim 4.8 MK390 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

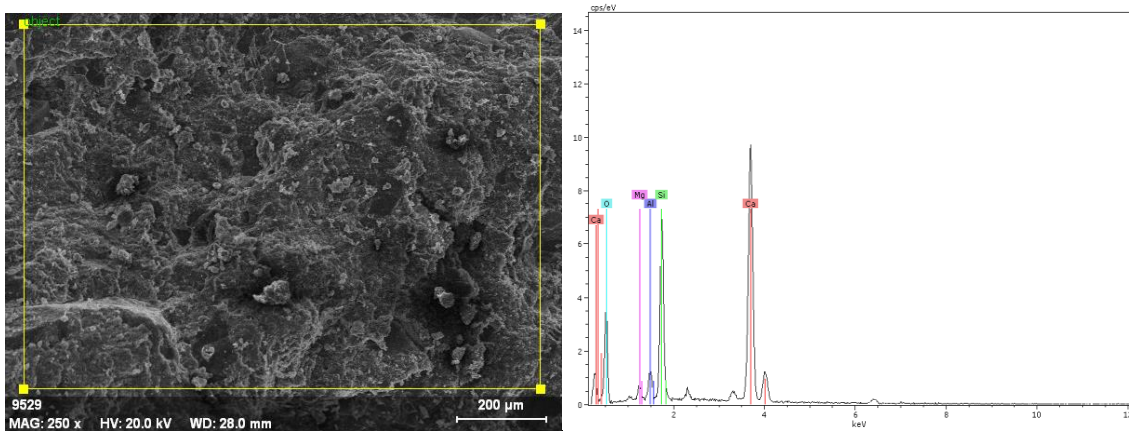
Çizelge 4.10 MK390 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Alüminyum	3183	1.97	2.01	1.47	Al ₂ O ₃	6.01
Silis	24800	14.66	14.91	10.49	SiO ₂	50.54
Kalsiyum	24711	19.28	19.61	9.66	CaO	43.46
Oksijen	10785	62.41	63.47	78.38		45.53



Resim 4.9 MS190 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

MS190 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.9 ve Resim 4.10'da gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al₂O₃ (% 6.05), SiO₂ (% 38.87) ve CaO (% 53.17) varlığı gözlenmiştir.

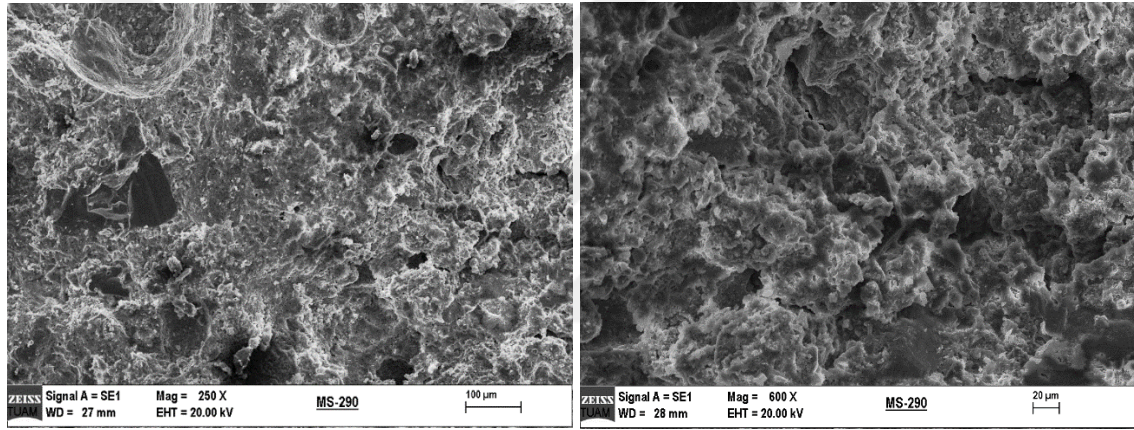


Resim 4.10 MS190 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

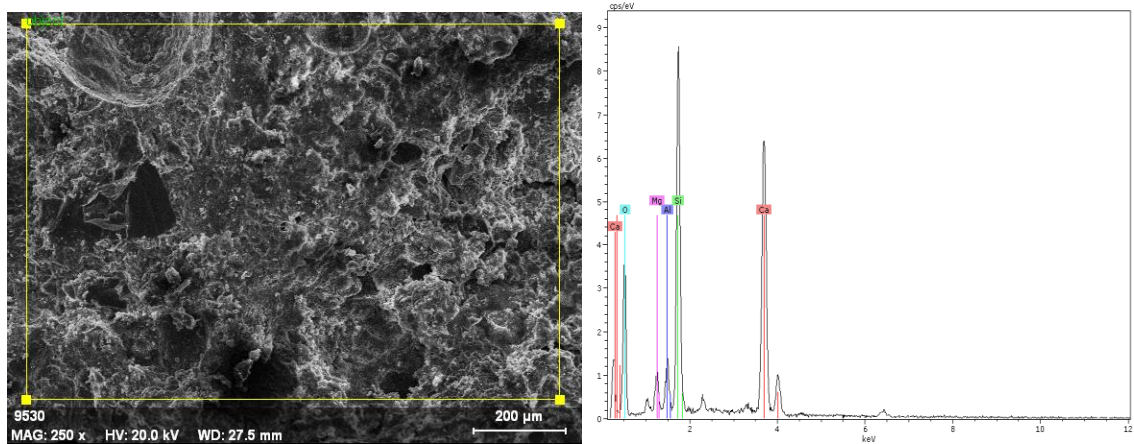
Çizelge 4.11 MS190 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Magnezyum	1127	1.53	1.46	1.28	Mg	1.90
Alüminyum	2358	2.58	2.46	1.94	Al ₂ O ₃	6.05
Silis	14954	14.64	13.94	10.59	SiO ₂	38.87
Kalsiyum	28650	30.61	29.15	15.52	CaO	53.17
Oksijen	6444	55.65	52.99	70.67		31.06

MS290 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.11 ve Resim 4.12’de gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al₂O₃ (% 6.41), SiO₂ (% 48.67) ve CaO (% 41.78) varlığı gözlenmiştir.



Resim 4.11 MS290 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

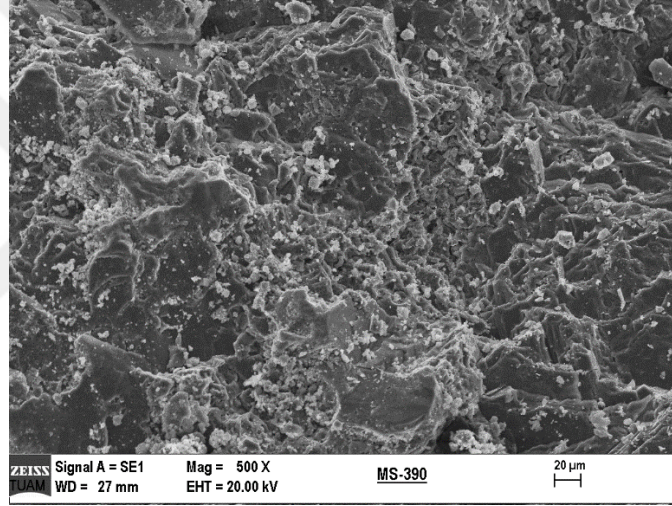


Resim 4.12 MS290 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

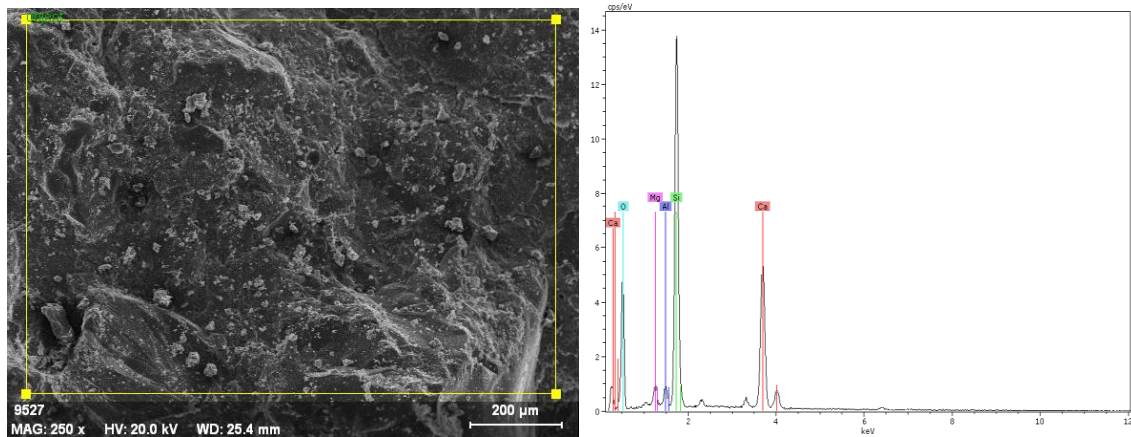
Çizelge 4.12 MS290 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Magnezyum	1397	2.35	2.34	1.98	Mg	3.15
Alüminyum	1835	2.53	2.52	1.92	Al ₂ O ₃	6.41
Silis	13687	16.97	16.90	12.41	SiO ₂	48.67
Kalsiyum	15216	22.27	22.18	11.41	CaO	41.78
Oksijen	5057	56.31	56.07	72.27		33.16

MS390 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.13 ve Resim 4.14’de gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al₂O₃ (% 0.92), SiO₂ (% 17.22) ve CaO (% 7.63) varlığı gözlenmiştir.



Resim 4.13 MS390 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

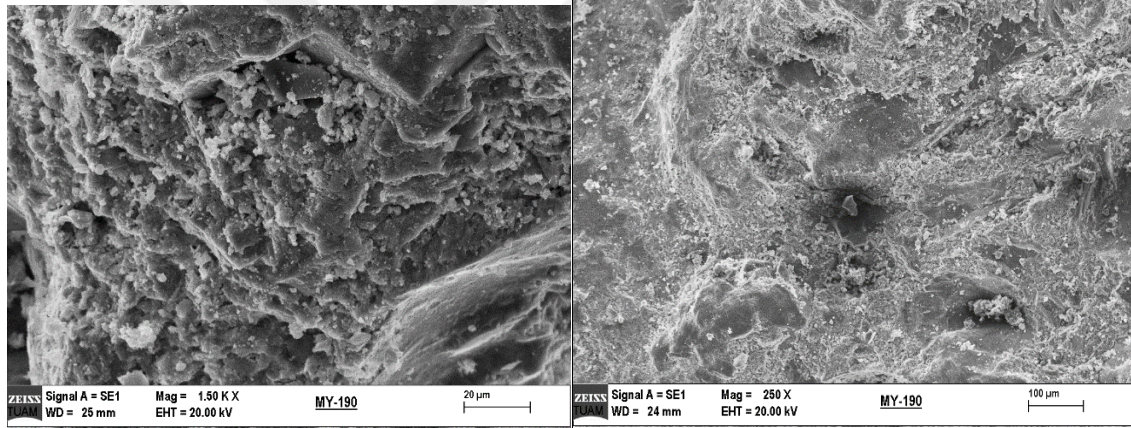


Resim 4.14 MS390 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

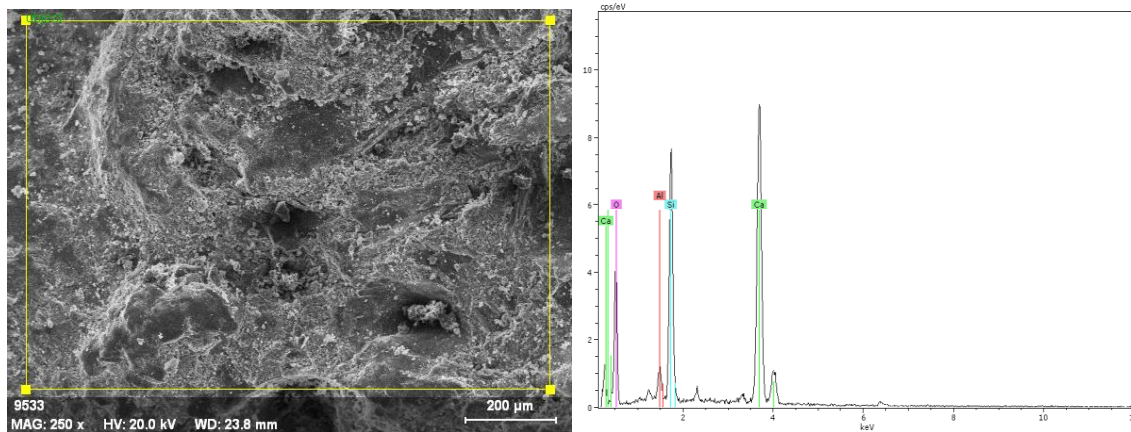
Çizelge 4.13 MS390 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]
Alüminyum	2499	1.32	1.23	0.92
Magnezyum	2978	1.93	1.80	1.49
Silis	54140	25.77	24.01	17.22
Kalsiyum	29634	16.29	15.18	7.63
Oksijen	15924	62.01	57.78	72.74

MY190 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.15 ve Resim 4.16’da gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al_2O_3 (% 3.65), SiO_2 (% 38.11) ve CaO (% 58.24) varlığı gözlenmiştir.



Resim 4.15 MY190 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

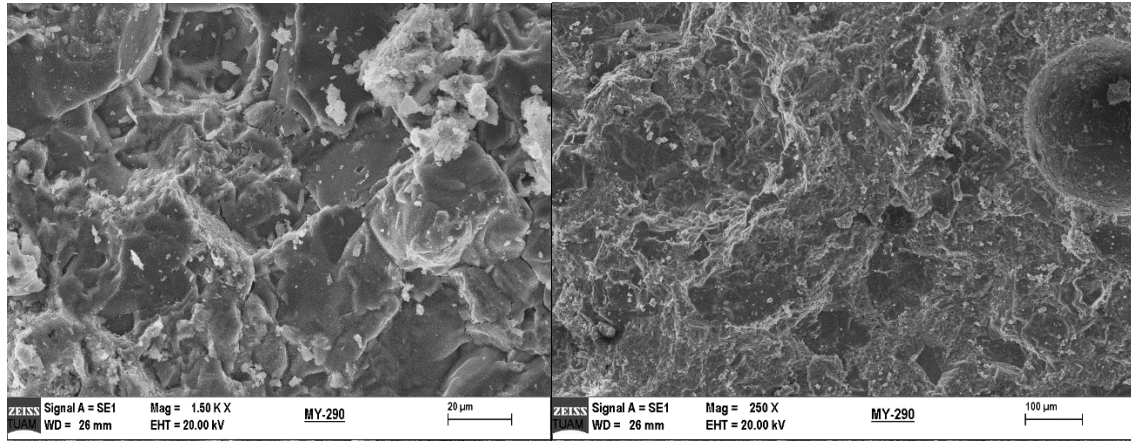


Resim 4.16 MY190 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

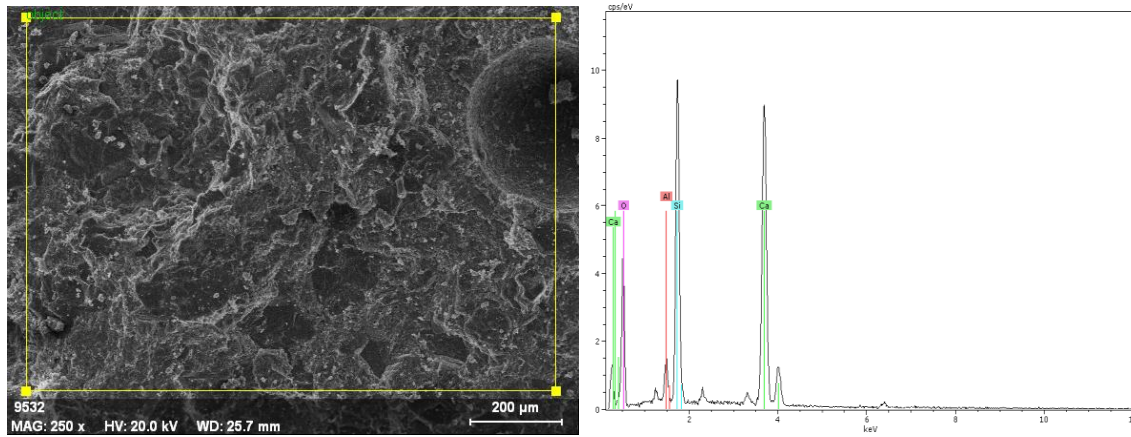
Çizelge 4.14 MY190 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Alüminyum	1243	1.21	1.22	0.92	Al ₂ O ₃	3.65
Silis	12293	11.16	11.24	8.12	SiO ₂	38.11
Kalsiyum	21007	26.08	26.27	13.30	CaO	58.24
Oksijen	5862	60.81	61.26	77.67		46.76

MY290 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.17 ve Resim 4.18’de gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al₂O₃ (% 4.23), SiO₂ (% 43.73) ve CaO (% 52.04) varlığı gözlenmiştir.



Resim 4.17 MY290 kodlu numunenin SEM görüntüsü.

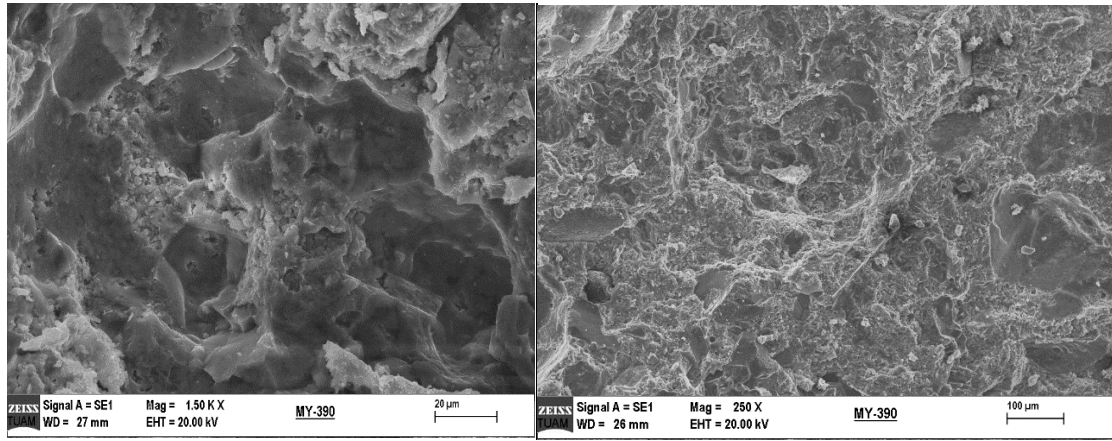


Resim 4.18 MY290 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

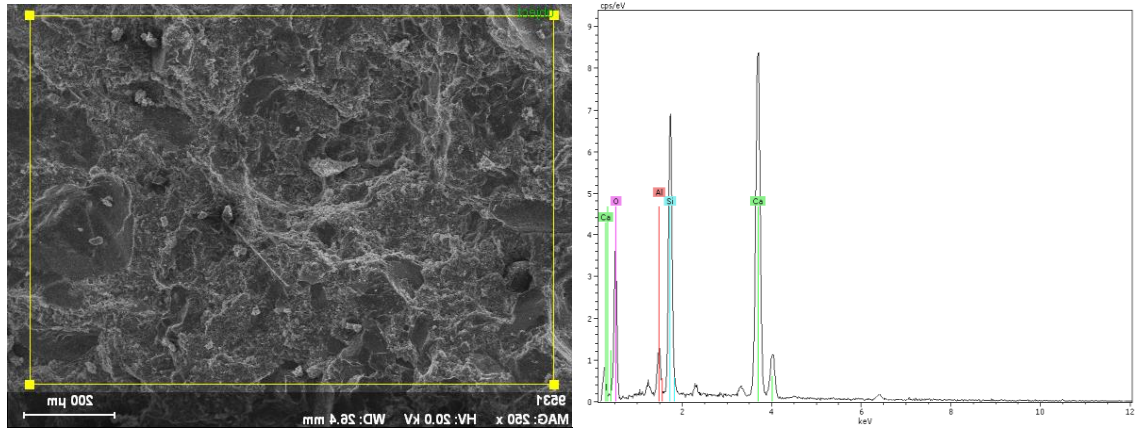
Çizelge 4.15 MY290 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Alüminyum	1942	1.59	1.55	1.18	Al ₂ O ₃	4.23
Silis	18951	14.51	14.19	10.39	SiO ₂	43.73
Kalsiyum	25269	26.40	25.81	13.25	CaO	52.04
Oksijen	7276	59.78	58.45	75.17		39.35

MY390 kodlu örneğe ait SEM görüntüleri ve SEM-EDX analizleri Resim 4.19 ve Resim 4.20’de gösterilmiştir. EDX analizlerinden elde edilen verilere göre malzeme bünyesinde Al₂O₃ (% 4.72), SiO₂ (% 38.18) ve CaO (% 57.11) varlığı gözlenmiştir.



Resim 4.19 MY390 kodlu numunenin SEM görüntüsü.



Resim 4.20 MY390 kodlu numunenin SEM – EDX görüntüsü.

Çizelge 4.16 MY390 kodlu numunenin EDX analiz sonuçları.

Element	Net	unn. C [wt.-%]	norm. C [wt.-%]	Atom. C [at.-%]	Oksit	Oksit C [wt.-%]
Alüminyum	2472	1.76	1.73	1.33	Al ₂ O ₃	4.72
Silis	18909	12.55	12.35	9.13	SiO ₂	38.18
Kalsiyum	33811	28.70	28.24	14.64	CaO	57.11
Oksijen	8254	58.63	57.69	74.90		40.00

Elde edilen tüm SEM görüntüleri incelendiğinde örnek morfolojisinde önemli bir değişiklik gözlenmediği tespit edilmiştir. Bununla birlikte yüzey morfolojisinde önemli gözüken herhangi bir çatlak veya boşluk yapısına da rastlanmamıştır.

5. TARTIŞMA ve SONUÇ

Çimento esaslı harç örneklerine ikame edilen uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı ikameli nano-silis katkılı karışımların fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana getirdiği değişimlerin araştırıldığı bu çalışmada elde edilen bulgulara göre;

- Harçların hazırlanmasında üç farklı puzolanik malzeme (UK, YFC ve SD) ikame edilmiştir. Yapılan çalışmada çimentoya katkı olarak %0.25, %0.5, %0.75 ve %1.00 oranlarında test edilen nano-silis malzemesinin çimentoya katkı olarak %0.5 oranında kullanılması kararlaştırılmıştır.
- Yapılan önceki çalışmalar incelendiğinde genel anlamda silis dumanı malzemesinin XRF sonuçlarında SiO_2 miktarı %80 – 90 oranlarında olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada kullanılan silis dumanı malzemesinin içeriğinde bulunan düşük seviyedeki SiO_2 miktarı, SD ikameli harç numunelerinin fiziksel ve mekanik test sonuçlarında yeterli etkiyi göstermediği belirlenmiştir.
- Referans harç örneklerinde su emme oranları %5.1- %6.3 arasında değişkenlik göstermiştir. %0.5 oranında nano-silis katkılı ve %100 çimentolu harç örneklerinin her ikisinde de 90 günlük numunelerde su emme oranlarında azalma meydana gelmiştir. Bununla birlikte %30 SD ikameli %0,5 oranında nano-silis katkılı karışımların 90 günlük numunelerinde %3,2 oranlarında su emme değerleri elde edilmiştir.
- 90 günlük referans harç örnekleri incelendiğinde puzolanik malzeme katkılı numunelerde; CaO ve Al_2O_3 oranlarının artışına sebep olmuştur. Bununla birlikte puzolanik malzeme ikameli karışımlarda oksit miktarlarının arttığı tespit edilmiştir.
- 90 günlük numunelerde %10- %30 aralığında kullanılan SD ve YFC ikame oranlarının 0.5 oranında nano-silis katkılı referans harç numunelerinde göre basınç dayanımlarını arttırdığı, UK ikamesinin oranı arttıkça dayanım

değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. 28 günlük MS328 kodlu numuneler 60.2 MPa, 90 günlük MS390 kodlu numuneler ise 66.5 MPa ile en yüksek basınç dayanım değerini vermiştir.

- Harç numunelere ikame edilen puzolan malzeme ve nano-silis katkısının taze harç üzerinde etkisi söz konusudur. Tane boyutuna bağlı olarak silis dumanı ikameli numunelerin işlenebilirliği oldukça azalmıştır. İşlenebilirliği istenen seviyede tutmak için akışkanlaştırıcı katkı kullanılması önerilmektedir.

Sonuç olarak, harç numunelerden elde edilen basınç dayanım değerleri incelendiğinde uygulanan kür süresinin artması ile birlikte numunelerin dayanımlarında artış olduğu belirlenmiştir. Harç numunelerinin içerisine UK ikame edilen numunelerde su emme kapasitesinin arttığı ve bunun sonucu olarak mekanik dayanımın azaldığı tespit edilmiştir. Yapılan çalışmanın geliştirilmesi düşünüldüğünde Nano-silis malzemesinin bağlayıcı malzemeye ilave oranı arttırılarak harç özelliklerinde meydana gelecek olan değişimlerin araştırılması önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- American Concrete Institute Committee, (1995). Ground Granulated Blast-Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete, American Concrete Institute, Detroit, USA, ACI 95 – 233.
- American Concrete Institute Committee 226, (1987). Silica Fume in Concrete, *American Concrete Institute Material Journal*, **84**: 158-166.
- Ahmaruzzaman, M., (2010). A Review on the Utilization of Fly Ash, *Progress in Energy and Combustion Science* **36**: 327–363.
- Aköz, F., Yüzer, N. ve Koral S. (1995). Portland Çimentolu ve Silis Dumanı Katkılı Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkileri, *TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası Teknik Dergi*, **69**: 919-931
- Alasali M.M. and Malhotra V.M. (1991). Role of concrete incorporating high volumes of fly ash in controlling expansion due to alkali-aggregate reaction. *American Concrete Institute Material* **88**: 63 - 159.
- Aldea, C.M., Young, F., Wang, K. and Shah, S.P. (2000). Effects of curing conditions on properties of concrete using slag replacement, *Cement and Concrete Research*, **30**: 465-472.
- Anonim, (2007). USGBC, LEED rating system, version 3.0, US Green Building Council, Washington.
- ASTM C 618, (2000). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete, Annual Book of ASTM Standard, No. 04.02.
- Austin, S.A. and Al-Kindy, A.A. (2000). Air Permeability Versus Sorptivity: Effects of Field Curing on Cover Concrete After One Year Old Field Exposure, *Magazine of Concrete Research*, **52**: 17-24.
- Barker D., Turner S., Napier-Moore P., Clark M. and Davison J. (2009). CO₂ capture in the cement industry, *Energy Procedia*, **1**: 87–94.
- Barthel, H., Heinemann, M., Stintz, M. and Wessely, B. (1998). Particle sizes of fumed

silica, *Chemical Engineer Technology*, **21**: 745-752.

Bayasi, Z., and Zhou, J. (1993). Properties of Silica Fume Concrete and Mortar, *American Concrete Institute Materials Journal*, **90**: 349-356.

Belkowitz J., and Armentrout D.L. (2009). The investigation of nano-silica in the cement hydration process. *American Concrete Institute Special Publication*, **267**: 87-100.

Bentur, A., Bonen, D. and Goldman, A. (1993). Discussion of a Paper by Chong, X.. at all. Roll of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar and Concrete. *American Concrete Institute Material Journal*, 376.

Bicer A. (2018). Effect of fly ash particle size on thermal and mechanical properties of fly ash-cement composites, *Thermal Science and Engineering Progress*, **8**: 78–82.

Brooks, J. J., Johari, M. A. M. and Mazloom, M. (2000). Effect of admixtures on the setting times of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*, **22**: 293–301.

Campillo I., Dolado J.S. and Porro A. (2003). High-performance nanostructured materials for construction. In: Proceeding of the first international symposium on nanotechnology in construction (NICOM1). Scotland, UK, 25 - 215

Chithra, S., Senthil Kumar, S.R.R. and Chinnaraju, K. (2016). The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate.

Damtoft J., Lukasik J., Herfort D., Sorrentino D. and Gartner E. (2008). Sustainable development and climate change initiatives. *Cement and Concrete Research*, **38**: 27-115.

Deja J., Uliasz-Bochenczyk A. and Mokrzycki E. (2010). CO₂ emissions from polish cement industry. *International Journal Greenhouse Gas Control*, **4**: 8-583.

Doğan, Ü.A., (2008). Beton bileşim parametrelerinin geçirimsizlik özellikleri ve gömülü çelik donatı korozyonuna etkisi, Doktora Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Drexler K.E., Peterson C. and Pergamit G. (1991). Unbounding the future: the nanotechnology revolution. New York: William Morrow.

- Ekinci, C.E., ve Yeğınobalı, M.A. (1996). Silis Dumanı Katkılı Betonların Çarpma Dayanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, 279-289.
- Erdoğan, T.Y. (2003). Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı ve Yayıncılık A.Ş., Ankara, 741.
- Erdoğan, T.Y. (1995). Betonun Oluşturan Malzemeler – Çimentolar, Türkiye Hazır Beton Birliği.
- Gaitero, J.J., Campillo I. and Guerrero A. (2008). Reduction of the calcium leaching rate of cement paste by addition of silica nanoparticles. *Cement and Concrete Research*, **38**: 8-1112.
- Gümüş, A. (2006). Effect of thermal curing process on geopolymer concrete properties, Afyon Kocatepe University.
- Haque, M. and Langan B. Ward M. (1984). High fly ash concretes. *American Concrete Institute Journal Proceedings*, **81**: 54–60.
- Jana, S.C. and Jain, S. (2001). Dispersion of nanofillers in high performance polymers using reactive solvents as processing aids, *Polymer*, **42**: 6897-6905.
- Ji, T. (2005). Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, **35**: 7-1943.
- Kallel, T., Kallel, A. and Samet, B. (2016). Durability of mortars made with sand washing waste, *Construction and Building Materials*. **122**: 728–735.
- Koca, C. (1996). Yüksek Performanslı Beton Üretiminde Mikrosilis, Curuf, Klinker Karışımı Çimento Kullanımı. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, 381-394.
- Kong, D., Du, X., Wei, S., Zhang, H., Yang, Y. and Shah, S.P. (2012). Influence of nano-silica agglomeration on microstructure and properties of the hardened cementbased materials. *Construction and Building Materials*, **37**: 15-707.
- Lee, B.Y., Thomas, J.J., Treager, M. and Kurtis, K.E. (2009). Influence of TiO₂ nanoparticles on early C₃ S hydration. *American Concrete Institute Special Publication*, **267**: 35-44.

- Lewis, R., Sear, L., Wainwright, P. and Ryle, R. (2003). Cementitious additions, in *Advanced Concrete Technology; Constituent Materials*, Chapter 3, Eds. Newman, J. & Choo, B. S., Elsevier Butterworth-Heinemann, Burlington.
- Li, G. (2004). Properties of high-volume fly ash concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, **34**: 9-1043.
- Malvar, L., Cline, G., Burke, D., Rollings, R., Sherman, T. and Greene, J. (2002). Alkali-silica reaction mitigation: state of the art and recommendations. *American Concrete Institute Material Journal*, **99**: 9-480.
- Mangat, P.S. and Molloy B.T. (1991). Influence of PFA, slag and micro silica on chloride induced corrosion of reinforcement in concrete, *Cement and Concrete Research*, **21**: 819-834.
- Mehta, P.K. (1999). Concrete Technology For Sustainable Development, *Concrete International*, **11**: 47-52.
- Meusel, J. W. and Rose, J. H. (1983). Production of granulated blast furnace slag at sparrows point, and the workability and strength potential of concrete incorporating the slag, Fly Ash, Silica Fume, Slag & Other Mineral By-Products in Concrete, *American Concrete Institute Special Publication*, **79**: 867-890.
- Naik, T.R., Singh, S.S. and Ramme, B.W. (1998). Mechanical properties and durability of concrete made with blended fly ash. *American Concrete Institute Material Journal*, **95**: 62-454.
- Najigivi, A., Rashid, S.A., Aziz, F.N.A. and Saleh, M.A.M. (2010). Investigations on the permeability properties development of binary blended concrete with nano- SiO₂ particles, *Journal of Composite Materials*, **45**: 1931-1938.
- Nordstrom, J., Matic, A., Sun, J., Forsyth, M. and MacFarlane, D.R. (2010). Aggregation, ageing and transport properties of surface modified fumed silica dispersions, *Soft Matter*, **6**: 2293-2299.
- Öner, M. (2001). Yüksek fırın cürüflarının çimento üretiminde kullanımında öğütmeyle ilgili parametrelerin etkilerinin belirlenmesi. *Hacettepe Üniversitesi Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, **23**: 61-69.

- Özbek, R. (1998). Silis Dumanın Betonun Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 86.
- Özger O.B. (2011). Effect Of Using Different Kind Of Mineral Admixtures To Permeability And Durability Properties Of Self Compacting Concrete, İstanbul, 11-20.
- Quercia, G., Spiesz, P., Husken, G. and Brouwers, H.J.H. (2014). SCC modification by use of amorphous nano-silica. *Cement and Concrete Composite*, **45**: 69–81.
- Saran, A.G. (2007). Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufunun betonun durabilite özelliklerine etkisi, İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Schmidheiny, S. (2002). The cement sustainability initiative: our agenda for action. World Business Council for Sustainable Development (WBCS), Geneva, Switzerland, July.
- Shaikh, F.U.A., Supit S.W.M. and Sarker, P.K. (2014). A study on the effect of nano silica on compressive strength of high volume fly ash mortars and concretes. *Material and Design*, **60**: 42 - 433.
- Song, H.W. and Saraswathy, V. (2006). Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag – An overview, *Journal of Hazardous Materials*, **138**: 226- 233.
- Taşdemir, C. (1996). Mikrofiller Malzemelerin Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. 4. Ulusal Beton Kongresi Beton Teknolojisinde Mineral ve Kimyasal Katkılar Bildiri Kitabı, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, 199-208.
- Taylor, H.F.W. (1990). Composite Cement. *Cement Chemistry*, 459.
- Tokay, M. ve Erdoğan, K. (2003). Cürufklar ve cürufllu çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Değerlendirmesi Raporu, 97: 2, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği/AR-GE Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1, (2016). Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength,
- TS EN 771-1, (2005). Kagit Birimler, Özellikler- Bölüm 1: Kil kâgır birimler (Tuğlalar). TSE, Ankara.
- TS EN 772-4, (2000). Kagit Birimler, deney metotları – Bölüm 4: Tabii taskâgır

birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile bosluksuz ve bosluklu birim hacim kütlesinin tayini. TSE, Ankara.

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, (2003). Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, Ankara.

Yazıcı, Ş. (1996). The Mechanical Properties and Durability of High Strength Concrete with Silica Fume and Fly Ash. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, İzmir, 115s

Yogendran, V., Langan, B.W., Haque, M.N. and Ward, M.A. (1987). Silica Fume in High Strength Concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, Detroit, **84**: 124- 129.

Zhang, M.H., Islam, J. and Peethamparan, S. (2012). Use of nano-silica to increase early strength and reduce setting time of concretes with high volume of slag. *Cement and Concrete Composite*, **34**: 62-650.

Zou, H., Wu, S. and Shen, J. (2008). Polymer/silica nanocomposites: preparation, characterization, properties, and applications, *Chemical Reviews*, **108**: 3893-3957.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ahmet Mücahit BOZKURT
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul, 22.04.1994
Yabancı Dili : İngilizce
İletişim (Telefon/e-posta) : 0534 0870418 / amb0334@gmail.com

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Necip Fazıl Kısakürek Lisesi, (2008 – 2012)
Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği
Bölümü (2012 – 2016)
Yüksek Lisans : Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı (2016 – 2019)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Özkınık İnşaat Proje Taahhüt, (2016-2017)
Ekol Restorasyon Rest. Mim. Müh. Hiz, (2017-
Devam ediyor)