



Usage of micronized zeolite in high performed concrete

Semih Ceylan*¹, Salih Yazıcıoğlu², Lutfullah Turanlı³

¹Gazi University, Institute of Science, Civil Engineering Department, 06500 Beşevler, Ankara, Turkey

²Gazi University Faculty of Technology, Civil Engineering Department, 06500, Beşevler, Ankara, Turkey

³Yıldırım Beyazıt University, Faculty of Engineering and Architecture, Civil Engineering Department, 06220, Etlik, Ankara, Turkey

Highlights:

- Mikronize zeolit kullanımı ile geçirimsiz beton elde edilmesi
- Silis dumanına yakın etki gösteren mineral katkı kullanımı
- Durabil beton elde edilmesinde farklı yaklaşımlar

Keywords:

- Pozzolan
- Silica Fume
- Zeolite

Graphical/Tabular Abstract

Silica fume is a commonly used mineral additive in structures like harbors, bridge piers, nuclear facilities and airfields. It is an expensive and limited material. Therefore it is important to find an alternative material to silica fume. Clinoptilolite type zeolite can be found in Turkey commonly. The most important experiment in this study to evaluate the impermeability was chloride-ion permeability test. The results of the chloride ion permeability test is given below. The test results were in accordance with porosity, water permeability, capillarity in terms of impermeability. Therefore it is assumed that micronized zeolite provides impermeable concrete and can be used instead of silica fume.

Table A. Test results of chloride-ion permeability

Mixture	7 day (coulomb)	28 day (coulomb)	365 day (coulomb)
Control	6317	3832	2417
Silica Fume %10	1873	633	469
Zeolite %15	3537	1786	1278

Article Info:

Research Article
Received: 08.02.2020
Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.686689

Correspondence:

Author: Semih Ceylan
e-mail:
smhceylan@hotmail.com.
phone: +90 532 543 4131

Purpose: In this study effect of replacing %15 micronized zeolite to impermeability and other engineering properties was investigated experimentally with various experiments and compared mainly with silica fume.

Theory and Methods:

Compressive strength, split tension strength, porosity, capillarity, water absorption, chloride ion permeability, ultrasonic pulse velocity, modulus of elasticity, poisson ratio, heat of hydration, carbonation, SEM, XRD, FTIR and TGA analyses were done to observe the effect of micronized zeolite replacement.

Results:

The laboratory experiments were carried out and due to the results obtained zeolite replacement gave close strength results to control concrete made with CEM I 42,5 R. Zeolite filled the voids, strengthened the ITZ in concrete therefore impermeable and durable concrete is achieved according to the results.

Conclusion:

It can be advised to use micronized zeolite instead of silica fume in concrete to get durable and impermeable concrete.



Mikronize edilmiş zeolitın yüksek performanslı betonda kullanımı

Semih Ceylan*¹, Salih Yazıcıoğlu², Lutfullah Turanlı³

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500 Beşevler, Ankara, Türkiye

²Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06500, Beşevler, Ankara, Türkiye

³Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 06220, Etlik Ankara, Türkiye

ÖNEÇİKANLAR

- Mikronize zeolit kullanımı ile geçirimsiz beton elde edilmesi
- Silis dumanına yakın etki gösteren mineral katkı kullanımı
- Durabil beton elde edilmesinde farklı yaklaşımlar

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 08.02.2020

Kabul: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.686689

Anahtar Kelimeler:

Puzolan,
zeolit,
silis dumanı

ÖZET

Bu çalışmanın başlıca amacı ülkemizde bol miktarda bulunan doğal zeolit mineralinin mikronize edilerek silis dumanına alternatif olarak yüksek performanslı betonda kullanımını araştırmaktır. Bu amaçla çimentoya %15 oranında mikronize edilmiş zeolit ve %10 oranında silis dumanı ikame edilerek 10x10x10 cm boyutunda küp, 10x20 cm ve 15x30 cm boyutlarında silindir numuneler hazırlanmıştır. Çalışmalar kapsamında 3, 7, 14, 21, 28, 56, 90 ve 365 günlük numunelerin basınç, yarma dayanımlarına bakılmış olup birim hacim ağırlık, su emme, klor-iyon geçirgenliği, porozite, elastisite modülü, poison oranı, karbonatlaşma, ultrasonik hız, kılcallık, hidrasyon ısı deneyleri yapılmış ve birbirleriyle olan ilişkileri kıyaslanmıştır. Ayrıca mikro yapıda oluşan değişimleri gözlemek amacıyla numunelere SEM, XRD, FTIR ve TGA analizleri de yapılmış olup birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara göre %15 mikronize zeolit kullanımının, %10 silis dumanı kullanımına yakın dayanım değerleri verdiği, mikronize zeolit kullanımı ile silis dumanına yakın geçirimsiz ve durabil beton edilebileceği görülmüş olup mikronize zeolitın silis dumanına alternatif olabileceği tespit edilmiştir.

Usage of micronized zeolite in high performance concrete

HIGHLIGHTS

- Attaining impermeable concrete using micronized zeolite
- Usage of mineral admixture showing close affect to silica fume
- Different approaches to attain durable concrete

Article Info

Research Article

Received: 08.02.2020

Accepted: 25.06.2020

DOI:

10.17341/gazimmfd.686689

Keywords:

Pozzolan,
zeolite,
silica fume

ABSTRACT

The main purpose of this study is to investigate the usage of micronized natural zeolite that has big amounts of reserves in our country as an alternative to silica fume in high performance concrete. 10x10x10 cm, 10x20 cm and 15x30 cm concrete specimens made with 10% replaced silica fume, 15% replaced micronized zeolite were prepared to achieve this aim. Compressive strength and split tensile strength tests were done to concrete specimens on the 3rd, 7th, 14th, 21st, 28th, 56th, 90th and 365th days during the study and unit weight, water absorption, chloride-ion impermeability, porosity, modulus of elasticity, poisson ratio, carbonation, ultrasonic pulse velocity, capillarity, heat of hydration experiments were done and their relation compared with each other. Also SEM, FTIR, XRD, TGA analyses were done to specimens to observe the change in microstructure and the results obtained were compatible with each other. According to the results obtained from experiments, usage of 15% micronized zeolite gave close results to silica fume and it is observed that impermeable and durable concrete can be attained by usage of micronized zeolite instead of silica fume, therefore it is determined that micronized zeolite can be alternative to silica fume.

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author: smhceylan@hotmail.com, syazicioglu@gazi.edu.tr, lturanli@ybu.edu.tr / Tel: +90 532 543 4131

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Beton mekanik özellikleri ve dayanımından dolayı en çok kullanılan yapı malzemesidir [1, 2]. Ancak Portland çimentosu, üretimi esnasında (betonun ana bileşeni olarak kullanılan ana malzeme) olumsuz birçok çevresel etkilere sebep olabilir çünkü ciddi oranda CO₂ açığa çıkmakta ve doğaya salınmaktadır [3]. Doğal zeolitlerin betona puzolan olarak ilave edilmesinin betonun mekanik özelliklerini ve durabilitesini artırdığı ve ayrıca geçirgenliğin azalmasına yardımcı olduğu görülmüştür [3]. Bu sorunları çözmek için birçok çözümler önerilmiş olup en önemlilerinden bir tanesi çimento tüketimini azaltmaktır. Bu da doğal puzolan ya da endüstriyel atık olan yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve silis dumanı gibi malzemelerin kullanılmasıyla olmaktadır [4, 5].

Bağlayıcı olarak etkili olması için zeolit çok ince öğütülmesi gerekmektedir. Zeolit düşük sertliği ve öğütme esnasında daha az enerji ihtiyacı olduğu için bir takım avantajlar sağlamaktadır. Zeolit betonda çimento ikamesi olarak kullanımı çimento tüketimini ve karbon ayak izini azaltmış olup beton üretiminin sürdürülebilirliğine katkı sağlamıştır [6].

Zeolit genelde perlit, uçucu kül, pomzatasından daha fazla Ca(OH)₂ tüketmektedir. Bu kapsamda yüksek özgül yüzeyli zeolit daha fazla puzolanik reaktiviteye sahiptir [7]. Zeolit bol miktarda SiO₂ ve Al₂O₃ içermektedir [8]. Mineral katkı olarak kullanılmasının sebebi; yüksek iyon değişim kapasitesi, bol silisli olması, düşük yoğunluğu, özgül yüzeyinin yüksek oluşu, ve kristal yapısı bozulmadan dehidratasyona uygunluğudur. Bunlardan dolayı zeolit üstün özelliklere sahiptir [9].

Elemental silikon metalinin ve ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen silis dumanı çok ince ve bol miktarda amorf silis içeren puzolanik malzemedir (Yoğunlaştırılmış silis dumanı ve mikrosilika olarak da bilinmektedir) [10]. Silis dumanının yüksek performanslı betonda etkili bir bağlayıcı olduğu kanıtlanmıştır. Ancak aşırı ince olması çok su ihtiyacına sebep olmakta olup ayrıca yüksek maliyetli bir üründür. Silis dumanı ASTM C 1240 doğrultusunda genelde %10 seviyesinde çimento yerine ikame edilerek kullanılmaktadır [11]. Silis dumanı vb. mineral katkılar betonun porozitesindeki düşmenin yanında, harç, beton ve agrega ara yüzeyindeki boşlukların azalmasını da sağlarlar [12]. Silis dumanı, suyun çimento ile reaksiyonunun ürünü olan Ca(OH)₂ ile uçucu kül ve granüle yüksek fırın cürufu gibi diğer puzolanik malzemelere göre daha erken ve hızlı tepkimeye girer. Silis dumanının çimentonun suyla olan reaksiyonuna kimyasal etkisinin yanında fiziksel etkisi de bulunmaktadır. Silis dumanı, ince olması ve mineral yapısı sayesinde çimentonun su ile olan reaksiyonunu hızlandırarak betonun dayanım kazanma sürecini hızlandırmış olur. Geçirgenlik betonun dayanıklılığı üzerinde etkili olan en önemli parametredir. Betonun geçirgenliği düştükçe durabilitesi artar. Ca(OH)₂ dayanıma katkısı olmayan, suda çözünen ve betonun boşluklu

yapısından sorumludur. Betonda bulunan Ca(OH)₂ suda çözünebildiği için kılcal boşluklar oluşturur. Betonun içerisinde minimum miktarda olması daha iyidir. Silis dumanı ise Ca(OH)₂ ile reaksiyona girerek boşluklarda kararlı C-S-H jeli oluşturur ve geçirimsizliği azaltır [13].

Turanlı vd. [14] klinoptiloliti farklı oranlarda ve daha kaba kullanarak yapmış oldukları puzolanik çalışmalarda olumlu sonuçlar elde etmiş olup farklı bir çalışmada [15] ise silis dumanı, zeolit, uçucu kül ve non-zeolitik puzolanlar kullanarak zeolit uçucu külden daha iyi, silis dumanının altında değerler verdiğini gözlemlemişlerdir.

Şimşek vd. [16] zeolitik tuf ikamesinin farklı agregalar üzerinde alkali-silika reaksiyonu etkilerinin belirlenmesi için deneysel çalışmalar yapmış olup zeolitik tuf katkısının reaktif agregaların ASR'sini önlemede etkili olduğunu tespit etmişlerdir.

Şimşek vd. [17] farklı oranlarda zeolitik tuf, içme suyu, deniz suyu ile birtakım deneyler yaparak fiziksel ve mekanik özelliklere etkilerini araştırmışlardır.

Şimşek vd. [18] zeolit, uçucu kül ve atık cam malzemelerin Portland kompoze çimento üretiminde kullanılabilirliği ile ilgili birtakım deneyler yaparak bahse konu malzemelerin çimento üretiminde katkı malzemesi olarak kullanılabilirliğini tespit etmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı betona bu kadar üstün özellikler sağlayan silis dumanı yerine ülkemizde çok fazla bulunan klinoptilolit türü zeolit mikronize seviyede öğütülerek kullanılması ve böylelikle silis dumanına yakın değerler elde etmektir. Silis dumanı havaalanlarında ve yüksek mukavemet istenen yerlerde kullanılan pahalı ve genellikle ithal edilen bir mineral katkıdır. Bu kapsamda bu pahalı ve değerli olan mineral katkıya yakın üstünlükler sağlayan bir mineral katkı malzemesi bulunmasının ülkemize teknik, ticari ve milli anlamda avantajlar sağlayacağı değerlendirilmektedir.

2. MALZEMELER (MATERIALS)

2.1. Çimento (Cement)

Deneylerde, kimyasal içeriği Tablo 1'de, dayanım özellikleri Tablo 2'de yer alan TS EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 R Portland Çimentosu kullanılmış olup başlangıç ve bitiş priz süreleri sırasıyla, 165 ve 280 dakikadır. Kullanılan çimentoya ait SEM görüntüsü Şekil 1'de yer almaktadır.

Deneylerde kullanılan çimento bileşenleri Rietveld Analizi yöntemiyle bulunmuştur. Bu kapsamda kullanılan çimentoda %54 Alite-Nishi (C₃S), %16,5 Belite (C₂S), %10,5 Brownmillerite (C₄SAF), %3,5 kübik C₃A, %1,2 ortho C₃A, %0,2 kireç, %0,8 periklas, %0,6 alçı, %3,3 hemihidrat, %5,8 kalsit, %0,1 quartz, %1,9 dolomite, %1,7 kübik mayenit bulunmuştur.

Tablo 1. Kullanılan malzeme özellikleri
(Specifications of the materials used)

Kimyasal İçerik (%)	Çimento	Zeolit	Silis Dumanı
SiO ₂	19,39	72	94
CaO	63,91	4,44	0,47
Al ₂ O ₃	5,65	12,74	0,35
Fe ₂ O ₃	3,42	2,64	0,25
MgO	2,15	1,2	0,55
SO ₃	3,91	1,2	0,95
Na ₂ O	0,87	1,24	0,72
K ₂ O	1,37	4,54	2,7
Kızdırma Kaybı	3,70	9-14	3,5
Çözünmeyen Kalıntı	0,89	-	-
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,11	2,3	2,4
Özgül Yüzey (cm ² /g)	3640	19340	20230
BET değeri (cm ² /g)	-	458624	331000

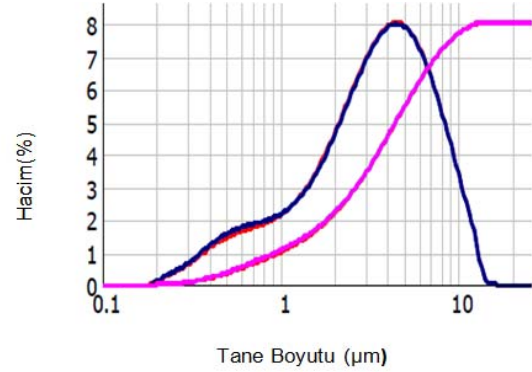
Tablo 2. Çimento dayanım özellikleri (MPa)
(Strength of the cement used)

Gün	Basınç Dayanımı (MPa)
1	20,1
2	33,2
7	44,9
28	52,8

2.2. Zeolit (Zeolite)

Manisa yöresinde faaliyet gösteren bir firmadan temin edilen klinoptilolit türü 10 mikron inceliğinde öğütülmüş doğal zeolit ağırlıkça %15 çimento yerine ikame edilerek deneylerde kullanılmıştır. Zeolit kimyasal kompozisyonu

Tablo 1’de, Malvern Mastersizer 2000 aleti yardımıyla elde edilen lazer tane boyut dağılımı Şekil 2’de yer almakta olup dane çapı dağılımı d(10): 0,78 µm, d(50) : 3,855 µm, d(90) : 8,162 µm’dir. Kullanılan zeolite ait SEM görüntüsü Şekil 3’de yer almaktadır.

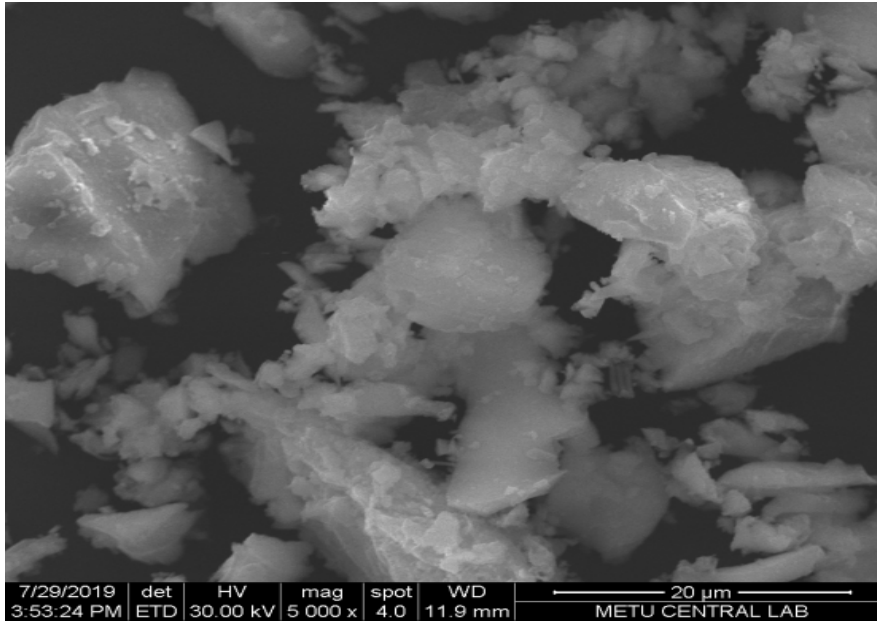
**Şekil 2.** Zeolit’e ait lazer tane boyut dağılımı
(Gradation of zeolite)

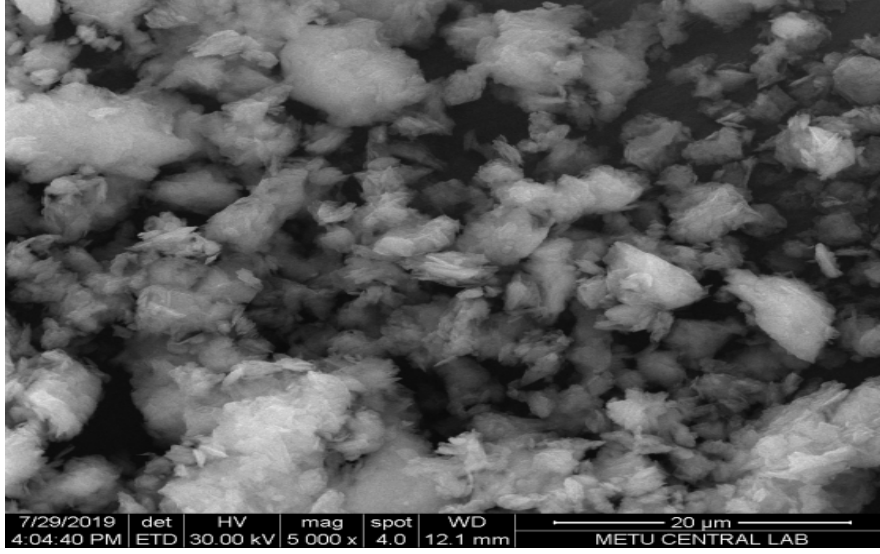
2.3. Silis Dumanı (Silica Fume)

Çalışmada ağırlıkça %10 çimento yerine ikame edilerek ithal silis dumanı kullanılmış olup kimyasal kompozisyonu Tablo 1’de, SEM görüntüsü de Şekil 4’te yer almaktadır.

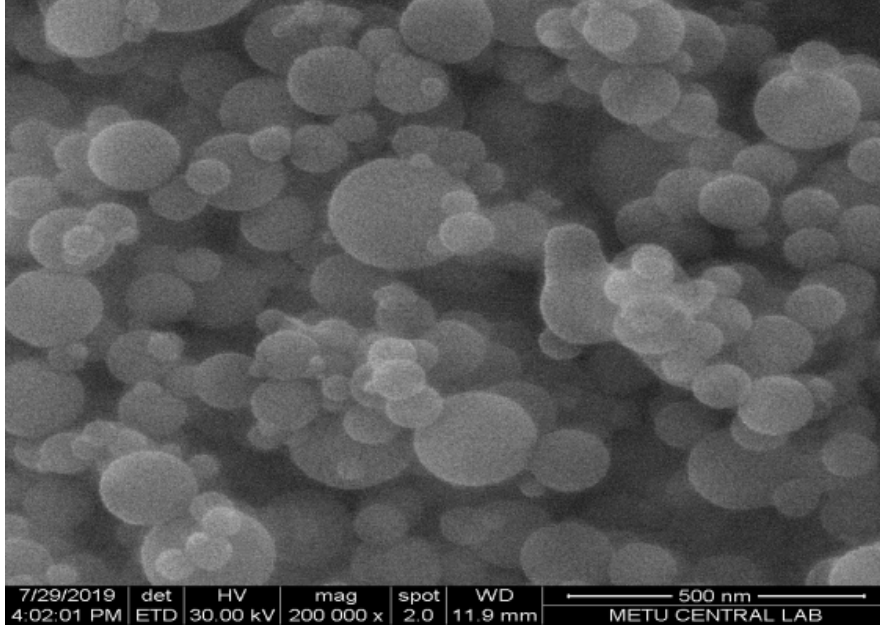
2.4. Akışkanlaştırıcı (Plasticizer)

Zeolit ve silis dumanı katkısının kıvamda oluşturacağı olumsuz etkiyi azaltma ve işlenebilirliği aynı yapabilmek için beton karışımlara ağırlıkça %1,5-2 oranında melamin sülfonat esaslı toz süper akışkanlaştırıcı katkı ilavesi yapılmış olup özellikleri Tablo 3’te yer almaktadır.

**Şekil 1.** Kullanılan çimentonun SEM görüntüsü (SEM image of cement used)



Şekil 3. Kullanılan zeolitinin SEM görüntüsü (SEM image of zeolite used)



Şekil 4. Kullanılan silis dumanının SEM görüntüsü (SEM image of silica fume used)

Tablo 3. Akışkanlaştırıcı özellikleri
(Specifications of the superplasticizer used)

Özellik	Değer
Malzeme Yapısı	Melamin Sülfonat
Görünüm	Toz, Beyaz
Yoğunluk	1,80±0,01 g/cm ³ (20°C)
pH	10±0,01

2.5. Agregası (Aggregate)

Ankara Hasanoğlan bölgesi taşocaklarından temin edilen agregalar deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Karışımlarda %60 ince agregası (0-4 mm), %20 kaba agregası (4-11mm), %20 kaba agregası (11-22,4 mm) kullanılmış olup agregası özellikleri Tablo 4 ve Tablo 5’de yer almaktadır.

Tablo 4. Kullanılan agregalara ait doymuş yüzey kuru, kuru birim ağırlıklar ve su emme oranları (TS 1097-6) (Saturated surface dry unit weight, dry unit weight, water absorption ratio of the aggregates used)

Agregası	0-4 mm	4-11 mm	11-22,4 mm
γ_{dyk} (g/cm ³)	2,69	2,69	2,7
γ_k (g/cm ³)	2,67	2,67	2,6
Su emme (%)	0,58	0,59	0,1

3. DENEYSEL METOD (EXPERIMENTAL METHOD)

Beton deneylerine geçmeden önce zeolit ikame oranını belirlemek için 5x5x5 cm numunelerle harç deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneylerde ASTM C 1240

doğrultusunda silis dumanı için en çok kullanılabilir oran olan %10 ikame oranı kullanılmış olup zeolit için %10, %15, %20 gibi ikame oranları kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda %15 zeolit kullanımının silis dumanına en yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Tablo 5. Kullanılan agregalara ait gradasyon
(Gradation of the aggregates used)

Kümülatif Geçen, %			
Elek (mm)	0-4 mm	4-11 mm	11-22,4 mm
44,8	100,0	100,0	100,0
31,5	100,0	100,0	100,0
22,4	100,0	100,0	90,5
16	100,0	100,0	46,1
11,2	100,0	97,0	10,6
8,0	100,0	55,4	5
5,6	100,0	14,3	-
4	98,34	-	-
2	70,78	-	-
1	47,02	-	-
0,5	31,68	-	-
0,25	20,04	-	-
0,125	-	-	-

3.1. Beton Deneyleri ve Karışım Dizaynı (Concrete Experiments and Mix Design)

Harç numunelerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda beton deneylerinde ağırlıkça %10 silis dumanı ve %15 zeolit ikame edilerek 18 adet 10x10x10 cm küp, 210 adet 10x20 cm ve 27 adet 15x30 cm silindir beton numuneler hazırlanmış olup beton karışım oranları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Beton karışım dizaynı (Concrete mix design)

Malzeme	Kontrol Karışımı	Silis Dumanlı Karışım	Zeolitli Karışım
Çimento	350 kg	315 kg	297,5 kg
Su	165,5 kg	166,5 kg	166,5 kg
Silis Dumanı	-	35 kg	-
Zeolit	-	-	52,5 kg
0-4 Agregası	1147 kg	1247 kg	1247 kg
4-11 Agregası	383 kg	379 kg	379 kg
11-22 Agregası	386 kg	382 kg	382 kg
Akışkanlaştırıcı	4,9 kg	5,95 kg	6,3 kg
TOPLAM	2431,5kg	2424,5 kg	2424,5 kg

Hesaplamalarda su/çimento oranı 0,45 olarak öngörülmuş olup agregaların su emme muhtevalarına göre su oranları tekrar hesaplanmıştır. Tüm dökümler 40 dm³ hacimli betoniyerde karışımların slump değerleri 12 cm olacak şekilde ayarlanmıştır. Betonlarda hava oranları %1,5 bulunmuştur.

3.2. Beton Birim Hacim Ağırlıkları (Concrete Unit Weight)

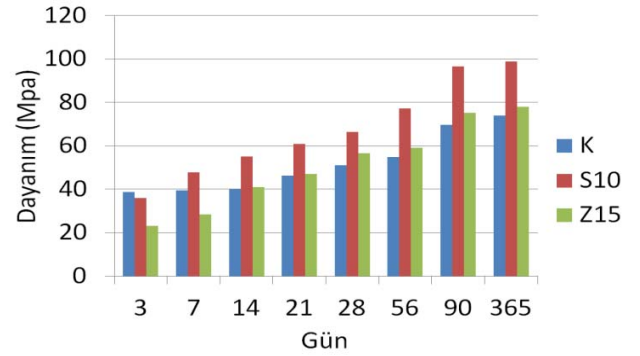
Beton karışımlarının birim hacim ağırlıkları Tablo 7'de yer almaktadır.

Tablo 7. Beton karışımların birim hacim ağırlıkları (ASTM C 29'ye uygun olarak) (Unit weight of concrete mixtures)

Karışım	kg/m ³
Kontrol	2500
Silis Dumanı %10	2380
Zeolit %15	2300

3.3. Beton Basınç Dayanımı (Compressive Strength of Concrete)

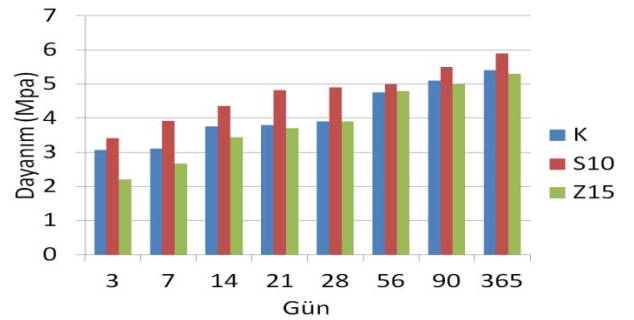
ASTM C 39/C doğrultusunda her karışımından her deney günü hidrolik yük kontrollü beton basınç dayanım presinde 3 kN/s yükleme hızı uygulanarak minimum 3 adet numuneye deney yapılmış olup sonuçların ortalaması alınmıştır. 10x20 cm silindir beton basınç dayanım sonuçları Şekil 5'de yer almaktadır.



Şekil 5. Beton Basınç Dayanımı
(Compressive Strength of Concrete)

3.4. Beton Yarma Dayanımı (Split Tension Strength of Concrete)

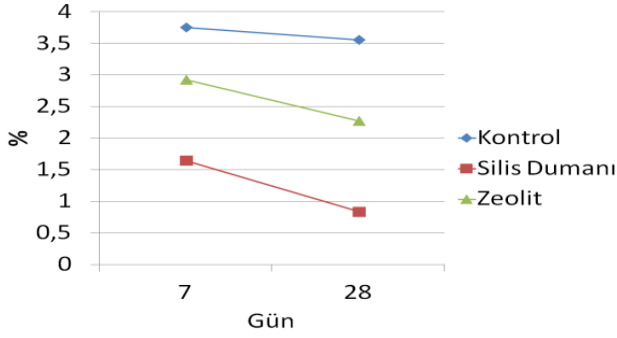
ASTM C 496 'ye uygun olarak her karışımından her deney günü minimum 3 adet numuneye deney yapılmış olup sonuçların ortalaması alınmıştır. 10x20 silindir beton yarma dayanım sonuçları Şekil 6'da yer almaktadır.



Şekil 6. Beton yarma dayanımı (Split tension strength of concrete)

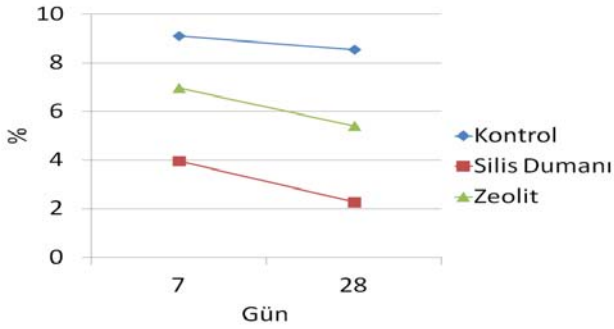
3.5. Su Emme ve Porozite Oranları (Water Absorption and Porosity Ratio)

ASTM C 642'ye uygun olarak 10 cm³'lük küp numunelerin 7 ve 28.günlerde su emme oranları ve porozite değerleri hesaplanmıştır. Numuneler deneylerden 1 gün önce kür havuzundan çıkartılarak etüvde kurutulmuştur.



Şekil 7. 10 cm³ beton numunelere ait su emme değerleri
(Water absorption ratio of 10 cm³ concrete specimens)

Her karışımdan her deney günü 3 adet numuneye deney yapılmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Su emme oranları Şekil 7'de yer almaktadır.



Şekil 8. 10 cm³ beton numunelere ait porozite değerleri
(Porosity ratio of 10 cm³ concrete specimens)

Her karışımdan her deney günü 3 adet numuneye deney yapılmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır. Porozite oranları Şekil 8'de yer almaktadır.

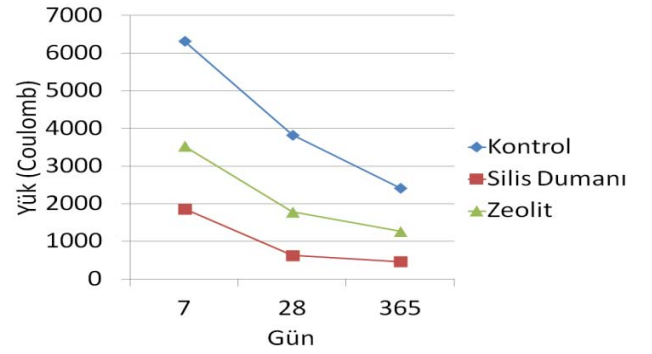
3.6. Klor-İyon geçirgenliği deneyleri (Chloride-Ion Permeability Experiments)

Klor-iyon geçirgenliği deneyleri ASTM C 1202-17'ye uygun olarak 7, 28 ve 365. günlerde 10x20 cm lik numunelerden 5 cm boyunda beton numuneleri kesilerek her numuneye 6 saat boyunca 60 V elektrik akımı uygulanarak yapılmıştır. ASTM C 1202-17'ye göre değerlendirme tablosu Tablo 8'de olup deney sonuçları Şekil 9'da yer almaktadır.

Her karışımdan her deney günü 4-6 adet numuneye deney yapılmış olup çıkan sonuçların ortalaması alınmıştır.

Tablo 8. ASTM C 1202-17'ye göre klor-iyon geçirgenliği yönünden değerlendirme (Evaluation of chloride-ion permeability with respect to ASTM C 1202-17)

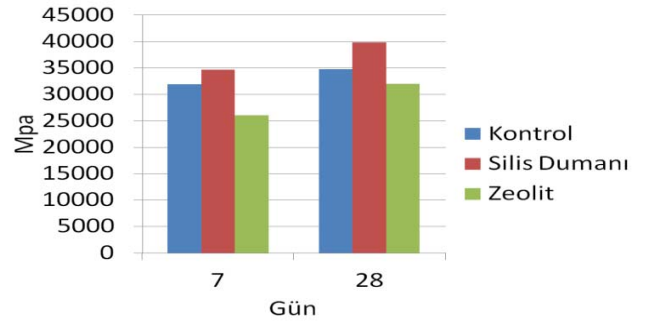
Geçen elektriksel yük miktarı (Coulomb)	Klor İyonu Geçirgenliği Yönünden Değerlendirme
>4000	Yüksek
2000-4000	Orta
1000-2000	Düşük
100-1000	Çok Düşük
<100	İhmal Edilebilir



Şekil 9. Klor-iyon geçirgenlik değerleri
(Test results of chloride-ion permeability)

3.7. Elastisite Modülü ve Poisson Oranı Deneyleri (Test results of modulus of elasticity and Poisson Ratio)

ASTM C469 doğrultusunda 7 ve 28 günlük 10x20 cm silindir numunelere MTS marka aksenal test cihazıyla elastisite modülü deneyi yapılmış olup deney sonuçları Şekil 10'da yer almaktadır.



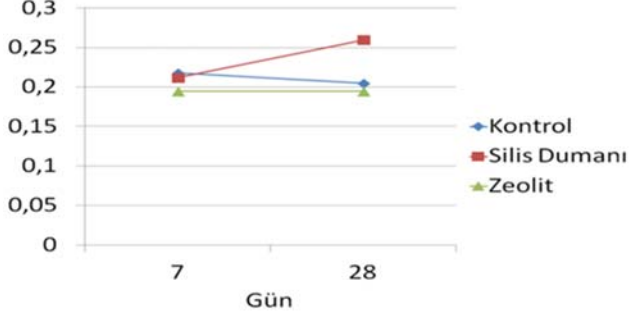
Şekil 10. Elastisite Modülü değerleri
(Test results of modulus of elasticity)

Ayrıca ASTM C469'a uygun olarak 7 ve 28 günlük 10x20 cm silindir numunelere MTS marka aksenal test cihazıyla elastisite modülü deneyi yapılırken numunelerin poisson oranları da hesaplanmış olup deney sonuçları Şekil 11'de yer almaktadır.

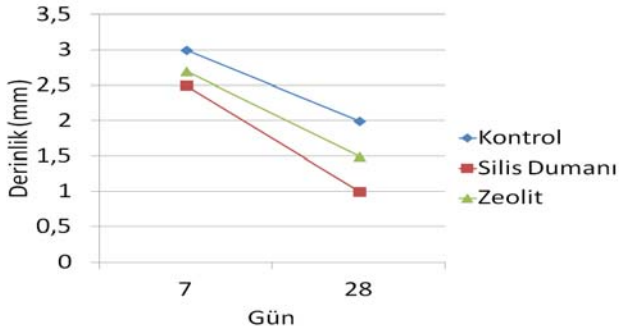
3.8. Karbonatlaşma Deneyleri (Carbonation Experiments)

7 ve 28 günlük numuneler karbonatlaşma deneyi için karbonasyon tankının içine konulmuştur. 24 saat 1 atmosfer

basınçta CO₂ dolu tank içinde bekletilen 10 cm³'lük beton numuneler tanktan çıkartılarak ortadan ikiye kırılmıştır. Kırılan yüzeylere %1 fenolftalin içeren çözelti püskürtülerek asidik-bazik bölge ayrımı yapılmıştır. Renk değişimi olmayan yerlerin yüzeyden uzunlukları ölçülmüş ve karbonasyon derinlikleri bulunmuştur. Deney sonuçları Şekil 12 ve Şekil 13'de yer almaktadır.



Şekil 11. Poisson oranı değerleri (Poisson's ratio values)

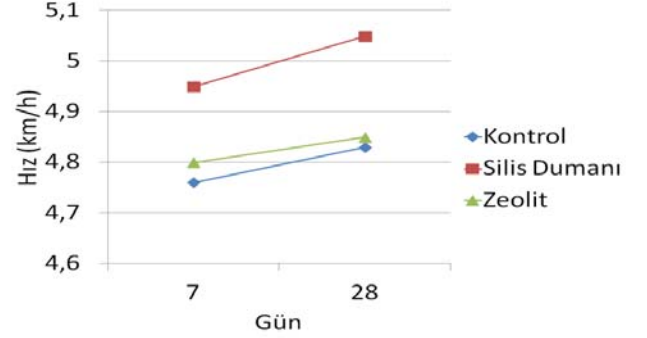


Şekil 12. Karbonatlaşma derinlik değerleri (Carbonation depth values)

3.9. Ultrasonik Hız Deneyi (Ultrasonic Pulse Velocity Experiments)

ASTM C 597 doğrultusunda her karışımdan her deney günü 6 adet 10 cm³'lük numuneye birbirine paralel beton yüzeylere problar yerleştirilerek ultrasonik hız deneyleri yapılmıştır.

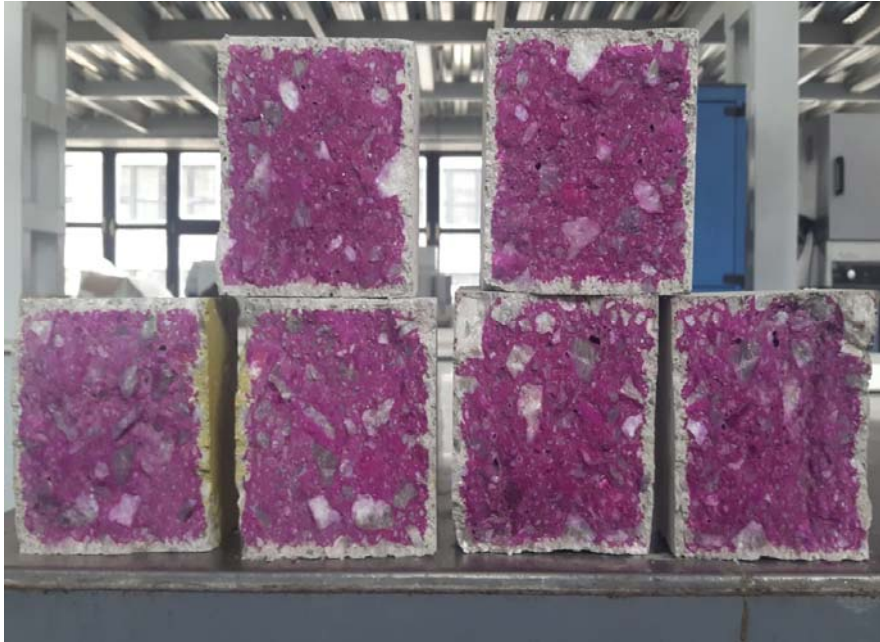
Elde edilen sonuçların ortalaması alınmış olup deney sonuçları Şekil 14'te yer almaktadır.



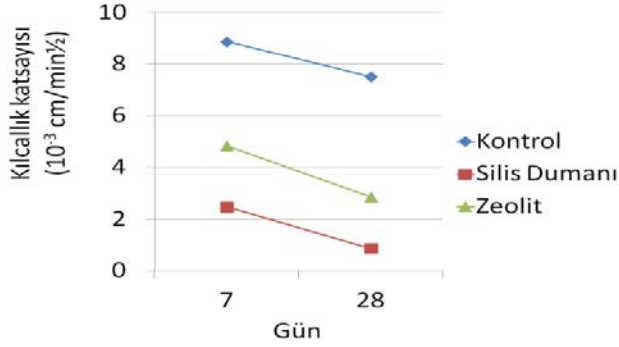
Şekil 14. Ultrasonik hız değerleri (Ultrasonic Pulse Velocity values)

3.10. Kılcallık Deneyi (Capillarity Experiments)

ASTM C 1585 doğrultusunda her karışımdan her deney günü 3 adet 10 cm³'lük numune 24 saat boyunca standartta belirtilen şekilde su yüzeyinde bırakılarak belirli zaman aralıklarında ağırlıkları ölçülmüştür. Çıkan sonuçların ortalaması alınmış olup deney sonuçları Şekil 15'de yer almaktadır.



Şekil 13. Karbonatlaşma deneyi (Carbonation test)



Şekil 15. Kılcallık katsayısı değerleri (Coefficient of capillarity values)

3.11. Hidratasyon Isısı Deneyi (Heat of Hydration Experiments)

TAM AIR marka izotermal kalorimetre cihazı ile yapılan hidratasyon ısısı deneyi sonucu Şekil 16'da yer almaktadır.

3.12. Mikroyapı Deneyleri (Microstructure Experiments)

Puzolanik reaksiyon sonucu oluşan mekanik dayanım, reaksiyona giren $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 'den ziyade hidratasyon ürünlerinin mikroyapısı tarafından kontrol edilmektedir. Bu kapsamda mikroyapıda oluşan değişimleri incelemek amacıyla 3,7 ve 28. günlük beton numunelerine SEM, XRD, FTIR ve TGA analizleri yapılmıştır.

3.12.1. SEM Deneyleri (SEM Experiments)

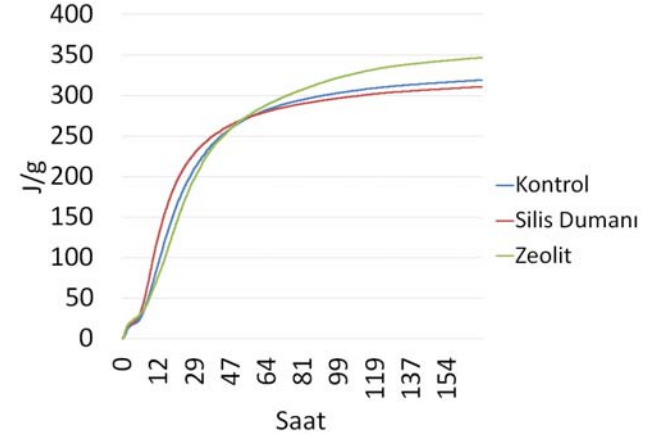
28 günlük SEM analizi görüntüleri Şekil 17, Şekil 18 ve Şekil 19'da yer almaktadır.

3.12.2. XRD Deneyleri (XRD Experiments)

Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22 ile belirtilmiştir.

3.12.3. FTIR Analizleri (FTIR Analyses)

FTIR analizi sonucu 3,7 ve 28 günlük grafikler birbiriyle karşılaştırılarak yorumlanmış olup karşılaştırmalı şekiller Şekil 23, Şekil 24 ve Şekil 25'de yer almaktadır.



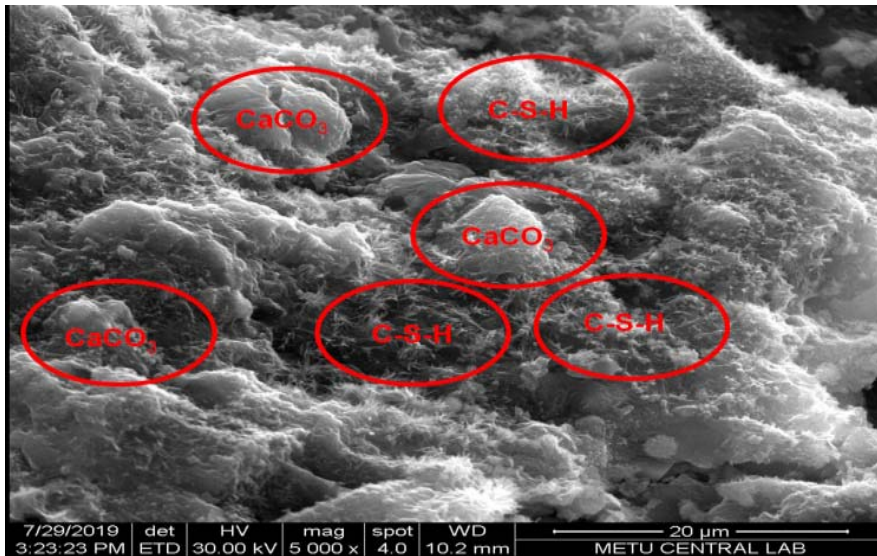
Şekil 16. Hidratasyon ısısı değerleri (Heat of hydration values)

3.12.4. TGA Analizleri (TGA Analyses)

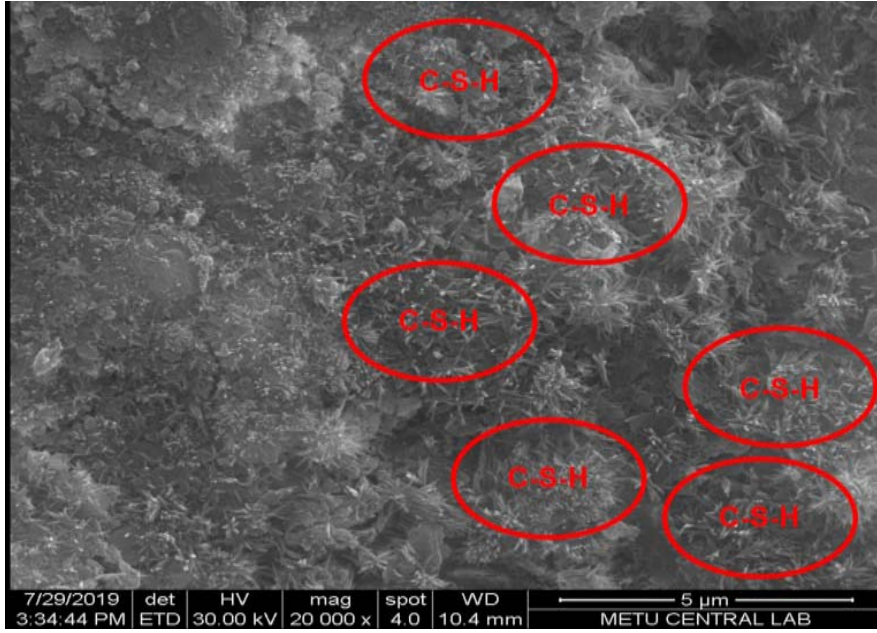
TGA analizi sonucu 3,7 ve 28 günlük grafikler birbiriyle karşılaştırılarak yorumlanmış olup karşılaştırmalı şekiller Şekil 26, Şekil 27 ve Şekil 28'de yer almaktadır.

4. DENEYSEL BULGULAR VE TARTIŞMALAR (EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION)

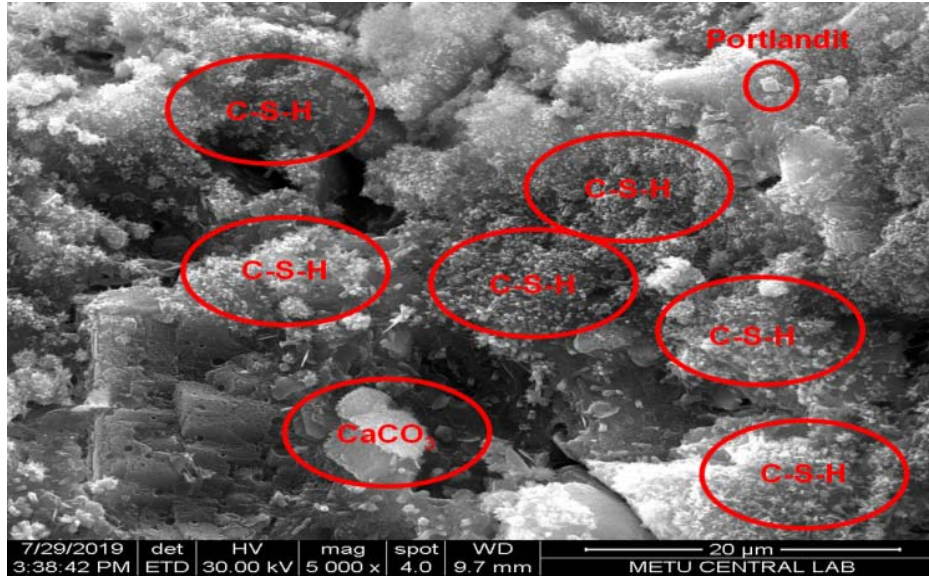
Zeolit ve silis dumanı hafif malzemeler olmaları dolayısıyla birim hacim ağırlıkları kontrol numunesine göre daha düşük seviyede çıkmıştır.



Şekil 17. 28 günlük kontrol numunesine ait SEM görüntüsü (SEM image of 28 day cured concrete specimen)



Şekil 18. 28 günlük silis katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü
(SEM image of 28 day cured silica fume replaced concrete specimen)



Şekil 19. 28 günlük zeolit katkılı beton numunesine ait SEM görüntüsü
(SEM image of 28 day cured zeolite replaced concrete specimen)

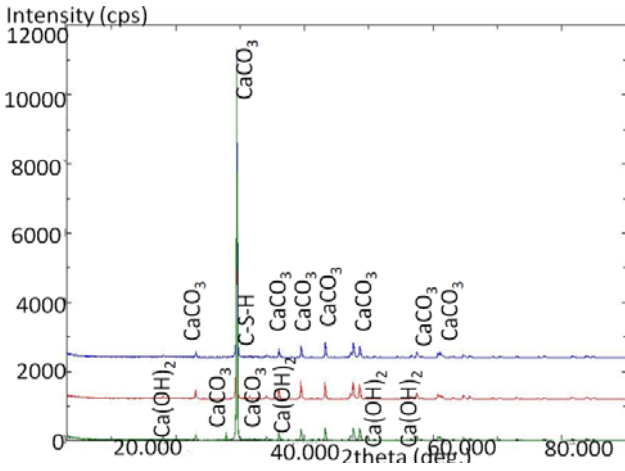
Basınç deneyleri sonuçları değerlendirildiğinde zeolitın erken dayanıma etkisinin düşük olduğu gözlemlenmiştir. Artan kür süresiyle birlikte silis dumanı ikameli betonlar en yüksek değerleri vermiş olup zeolit ikameli betonlar kontrol ve silis dumanı ikameli beton arasında değerler vermiştir. Zeolit ve silis dumanı toplam boşluk miktarını azaltarak ve agrega çimento hamuru arasındaki arayüzü iyileştirerek dayanımın artmasını sağlamışlardır. Yarma deneyleri sonuçları değerlendirildiğinde silis dumanı ikameli betonlar en yüksek değerleri vermiş olup kontrol ve zeolit ikameli betonlar birbirlerine yakın değerler vermiştir.

Su emme deney sonuçları değerlendirildiğinde zeolit ikameli beton, kontrol ve silis dumanı ikameli beton arasında değerler vermiştir.

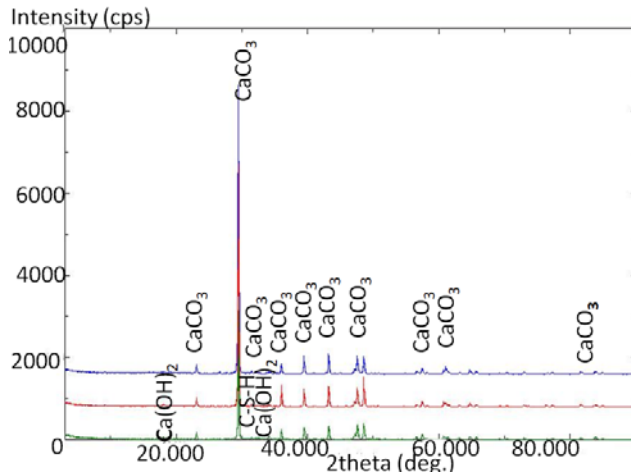
Porozite deney sonuçları değerlendirildiğinde zeolit ikameli beton kontrol ve silis dumanı ikameli beton arasında değerler vermiştir. Klor-iyon geçirgenliği deney sonuçları değerlendirildiğinde 7. günden sonra yapılan deneylere göre kontrol ve zeolitın geçirimsizliği yüksek olup silis dumanı geçirimsizliği düşük seviyededir. 28 ve 365 gün sonunda yapılan deneylerde kontrol numunelerinin geçirimsizliği orta

seviyede, silis dumanı ikameli betonun geçirirliiği çok düşük seviyede, zeolit ikameli betonun geçirirliiği düşük seviyededir. Yapılan deneyler sonucu 28 ve 365 gün sonunda puzolanik aktivitenin artmasıyla boşlukların azaldığı arayüzün dolduğu ve güçlendiği böylelikle geçirirliiğin azaldığı sonucuna varılmıştır. Klor iyonu geçirgenliği deneyi su emme ve porozite deneylerine uyumlu sonuçlar vermiştir.

XRD deneyinden çıkan sonuçlar doğrultusunda 3, 7 ve 28 günlük grafikler birbiriyle karşılaştırılmış olup 3 günlük numunelerde zayıf Ca(OH)_2 ve güçlü CaCO_3 gözlemlenmiştir. Puzolanik reaksiyonların artması ile birlikte Ca(OH)_2 'in azaldığı CaCO_3 'ün daha yoğun olduğu Şekil 20, Şekil 21 ve Şekil 22'de gözlemlenmiştir.



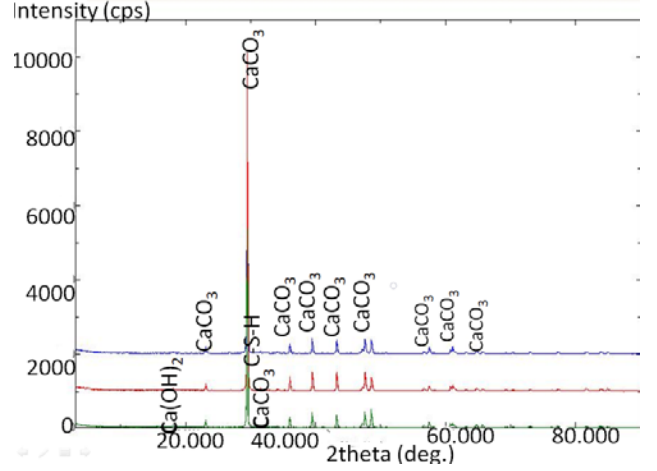
Şekil 20. 3,7 ve 28 günlük kontrol beton numunesine ait XRD grafiği (XRD of 3,7 and 28 day cured control concrete specimen)



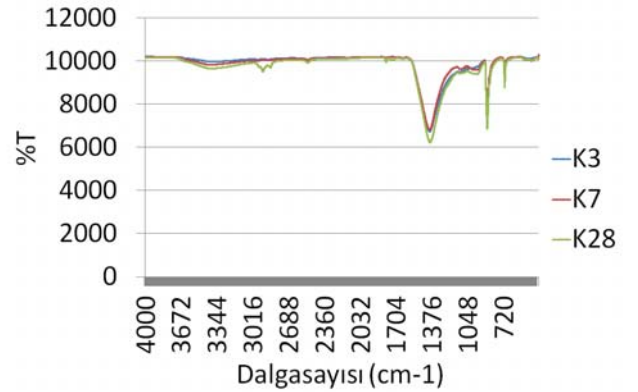
Şekil 21. 3,7 ve 28 günlük silis dumanı katkılı beton numunesine ait XRD grafiği (XRD of 3,7 and 28 day cured silica fume replaced concrete specimen)

Karbonatlaşma deney sonuçları değerlendirildiğinde artan kür süresi ve tamamlanan hidrasyon reaksiyonları ve gelişen boşluk yapısı karbonatlaşma derinliklerini azaltmıştır. Silis dumanı karbonasyon açısından en olumlu etkiyi göstermiş olup zeolit, kontrol ve silis dumanı arasında

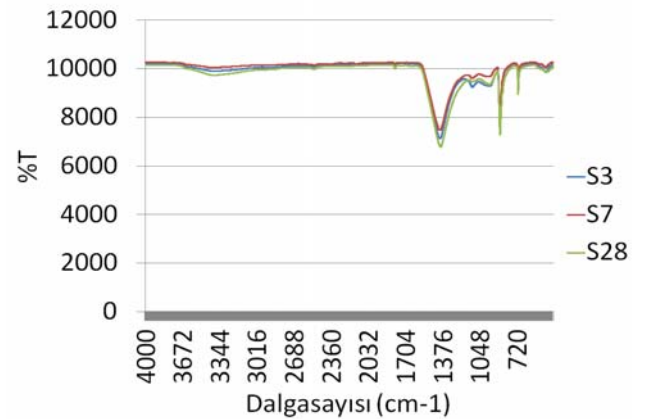
bir etki göstermiştir. Karbonatlaşma deneyinin yapılan klor iyonu geçirgenliği deneyi su emme ve porozite deneylerine uyumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



Şekil 22. 3,7 ve 28 günlük zeolit katkılı beton numunesine ait XRD grafiği (XRD of 3,7 and 28 day cured zeolite replaced concrete specimen)

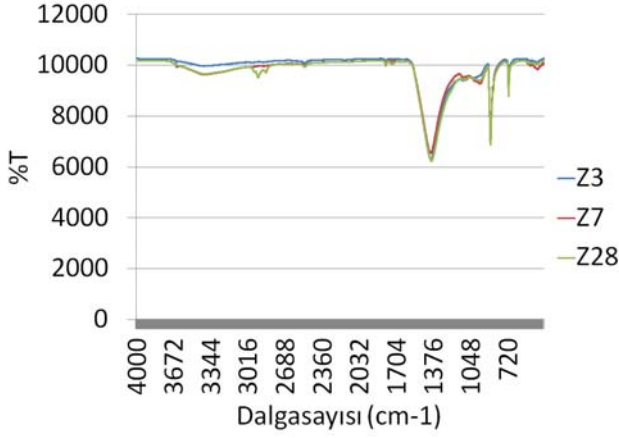


Şekil 23. 3,7 ve 28 günlük kontrol beton numunesine ait FTIR analizi (FTIR analysis of 3,7 and 28 day cured control concrete specimen)

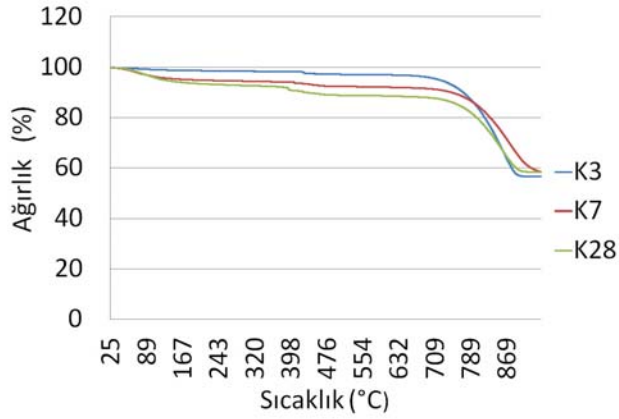


Şekil 24. 3,7 ve 28 günlük silis dumanı katkılı beton numunesine ait FTIR analizi

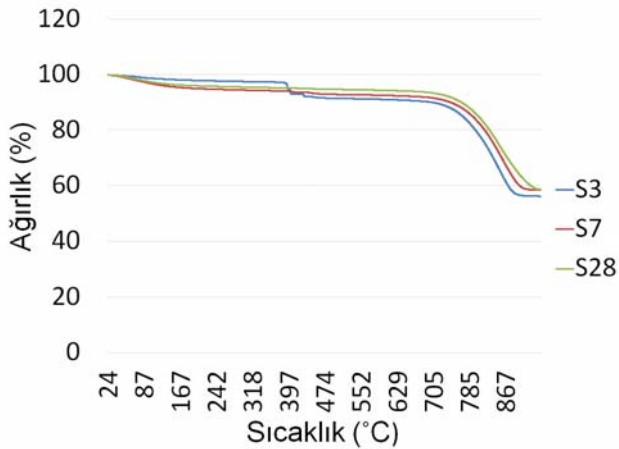
(FTIR analysis of 3,7 and 28 day cured silica fume replaced concrete specimen)



Şekil 25. 3, 7 ve 28 günlük zeolit katkılı beton numunesine ait FTIR analizi (FTIR analysis of 3,7 and 28 day cured zeolite replaced concrete specimen)

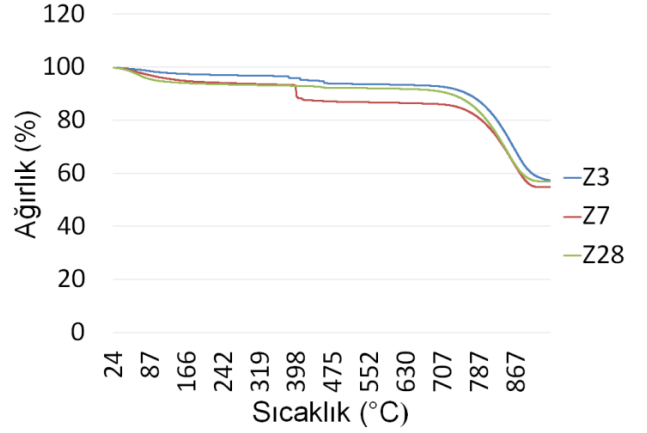


Şekil 26. 3,7 ve 28 günlük kontrol beton numunesine ait TGA analizi (TGA analysis of 3,7 and 28 day cured control concrete specimen)



Şekil 27. 3,7 ve 28 günlük silis dumanı katkılı beton numunesine ait TGA analizi

(TGA analysis of 3,7 and 28 day cured silica fume replaced concrete specimen)



Şekil 28. 3,7 ve 28 günlük zeolit katkılı beton numunesine ait TGA analizi

(TGA analysis of 3,7 and 28 day cured zeolite replaced concrete specimen)

Ultrasonik hız deneyi sonuçları değerlendirildiğinde hız değerleri basınç dayanım değerleri ile orantılı sonuçlar vermiştir. İçerisinde daha çok boşluk bulunan bir betonda, sesüstü dalganın betonun bir yüzeyinden diğerine ulaşabilme süresi daha uzundur. Bir başka deyişle, betonun içerisindeki boşluk miktarı arttıkça, sesüstü dalganın hızı daha az olmaktadır. [19] Kılcallık deneyi sonuçları değerlendirildiğinde silis dumanının beton yapısındaki boşlukları azalttığı zeolitin ise kontrol ve silis dumanı arası değerler verdiği gözlemlenmiş, deney kapsamında su emme ve porozite deneyleriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Betonun emebileceği toplam su miktarı, betonun içerisindeki boşlukların toplam hacmiyle ilgilidir. Silis dumanı ve zeolit çok ince olduğundan dolayı, hamur içindeki boşluklar ve agrega çimento arasındaki arayüz bu mineral katkıları tarafından doldurulduğundan kapiler boşluklar azalmıştır. Mineral katkıların en önemli rolü durabiliteyi dayanıklılığı arttırmak ve kapiler emme de azalma sağlamaktır.

Hidratasyon ısı deney sonuçlarına göre kullanılan mineral katkıların bir miktar hidratasyon ısını artırdığı gözlemlenmiştir. Silis dumanı yüzey alanı nedeniyle C_3S hidratasyonunu hızlandırdığından 3 günlük süre sonunda kontrol numunesine göre daha yüksek sonuç vermiş olup zeolitin de yüzey alanının fazla olmasının aynı etkiyi yarattığı değerlendirilmektedir.

Yapılan SEM deneyleri doğrultusunda her 3 karışımda yoğun olarak C-S-H jelleri ve $CaCO_3$ zeolit numunesinde az miktarda portlandit gözlemlenmiştir. Zamana bağlı olarak gelişen puzolanik reaksiyonlar sebebiyle C-S-H jelleri yoğun olarak gözlemlenmiş olup C-S-H jellerine bağlı olarak basınç ve yarma dayanımları yüksek değerler vermiştir.

FTIR analizlerinde $1394,871$ ve 713 cm^{-1} dalga boylarında $CaCO_3$, 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında C-S-H, 3646 cm^{-1} dalga boyunda $Ca(OH)_2$ gözlemlendiği literatur

çalışmalarında belirtilmiştir. [20].Bu kapsamda kontrol numunesinde 1394,871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 gözlemlenmiş olup sadece 7 günlük numunede 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H gözlemlenmiştir. Silis dumanı ile yapılan 3 günlük numune grafiğinde 3646 cm^{-1} dalga boyunda zayıf Ca(OH)_2 diğer tüm numunelerde 1394,871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H gözlemlenmiştir. Zeolit grafiklerinde 1394,871 ve 713 cm^{-1} dalga boylarında CaCO_3 , 1114 ve 965 cm^{-1} dalga boylarında etrenjit ve C-S-H, sadece 28 günlük numuneye ait grafikte 2924 ve 2854 cm^{-1} dalga boylarında CH gözlemlenmiş olup literatur çalışmaları ile uyumludur.

TGA analizlerinde 105-420°C aralığında hidrasyon ürünlerinden C-S-H'nin, 420-540°C aralığında Ca(OH)_2 'in 540-950°C aralığında CaCO_3 'in parçalandığı literatur çalışmalarında belirtilmiştir [21]. Bu kapsamda beton numunelerine yapılan TGA analizleri sonucu 420-540°C aralığında %1-3 civarlarında kütle kaybına neden olan Ca(OH)_2 'in parçalandığı 540-950°C aralığında %40 civarlarında kütle kaybına neden olan CaCO_3 'in parçalandığı gözlemlenmiş olup elde edilen sonuçlar literatur çalışmaları ile uyumludur.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda zeolitin %15 çimento yerine ikame edilerek kullanılmasının geçirimsiz ve daha durabil beton elde edilmesinde olumlu sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Zeolitin erken dayanıma etkisi düşük olup artan kür süresiyle puzolanik reaksiyonların artmasına bağlı olarak dayanımda artışlar meydana gelmiştir. İkincil C-S-H'ların oluşumu, ortamdaki portlanditin tüketilmesi dayanımın artmasını sağlamıştır. Hidrasyon ürünlerinin beton arayüzeyini ve boşlukları doldurmasından dolayı kılcallık, su emme ve porozite değerlerinde olumlu sonuçlar gözlemlenmiştir. Puzolanik reaksiyonlar boşluk yapılarında iyileşmelere ve kapiler boşlukların birbiriyle bağlanamamasına neden olmuştur. Klor iyonu geçirimsizlik deneyinde zeolit ile yapılan deneylerde silis dumanına yakın geçirimsizlik değerleri elde edilmiştir. Klor iyonu geçirimsizlik deneyi karbonasyon deneyi, su emme, porozite ve kılcallık deneyleri kapsamında birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Karışımların elastisite modülleri basınç ve çekme dayanımları ile orantılı sonuçlar vermiş olup zeolit dayanım olarak kontrol ve silis dumanı arasında değerler vermiştir. Zeolit ve silis dumanı hafif malzemeler olması dolayısıyla birim hacim ağırlıkları kontrol betonuna göre daha düşük çıkmıştır. SEM, XRD, FTIR ve TGA analizlerinde birbirleriyle uyumlu olarak yoğun miktarda C-S-H, CaCO_3 ve zayıf miktarda Ca(OH)_2 gözlemlenmiştir. FTIR analizinin XRD analizine göre daha farklı miktarlardaki hidrasyon ürünlerini gözlemlenmede etkili olduğu sonucuna varılmıştır. %15 zeolit ikamesinin optimum bir ikame oranı olduğu daha fazla oranda zeolit ikamesinin su ve akışkanlaştırıcı ihtiyacını artıracığından ekonomik ve uygulanabilir olmayacağı değerlendirilmektedir. Silis dumanı dünyada az bulunan ve

pahalı bir malzeme olmasından dolayı havaalanları, köprü ayakları, nükleer tesisler gibi geçirimsizlik ve durabilite gereksinimi olan yapılarda ülkemizde yaygın olarak bulunan klinoptilolit türü zeolitin mikronize seviyede öğütülerek kullanılmasının faydalı olacağı değerlendirilmektedir. Sonuç olarak mikronize zeolit, dayanım ve durabilite yönünden kontrol ve silis dumanı arasında değerler vermiş olup mikronize zeolitin silis dumanı yerine alternatif olarak kullanılabilmesi değerlendirilmektedir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu proje Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Proje Birimi tarafından 07/2018–2030 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Eskandari H, Vaghefi M, Kowsari K. Investigation of mechanical and durability properties of concrete influenced by hybrid nano silica and micro zeolite. *Procedia Materials Science*, 11, 594-9, 2015.
2. Markiv T, Sobol K, Franus M, Franus W. Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16 (4), 554-62, 2016.
3. Tran Y, Lee J, Kumar P, Kim K, Lee S. Natural Zeolite and its application in concrete composite production. *Composites Part*, 165, 354-364, 2019.
4. Rajendran RR. Flexural behavior of concrete beam with GGBS and fly ash as supplementary cementitious material, 10, 32310, 2015.
5. Hefni Y., Zaher YAE, Wahab MA, Influence of activation of fly ash on the mechanical properties off concrete. *Constr. Build Mater*, 172, 728-34, 2018.
6. Nagrockiene D., Girskas G., Research into properties of concrete modified with natural zeolite addition. *Constr. Build.Mater.*113, 964-969, 2016.
7. Ghafari E., Feys D., Khayat K., Feasibility of using natural SCMs in concrete for infrastructure applications, *Constr. Build. Mater*, 127, 724-732, 2016.
8. Canpolat F., Yılmaz K., Köse M., Yurdusevm A., Use of Zeolite, Coal Bottom Ash and Fly Ash as Replacement Materials in Cement Production , *Cement and Concrete Research*, 34, 731-735, 2004.
9. Sevim U.K., Okumuş N., Strength and permeability of concrete containing natural zeolite and silica fume, *Çukurova University, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 26 (2), 57-63, 2011.
10. ASTM C 1240, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures.
11. Z.Zhang, B.Zhang, P.Yan, Comparative study of effect of raw and densified silica fume in the paste, mortar and concrete, *Constr. Build. Mater.*105, 82-93, 2016.
12. Hassan, K.E., Cabrera J.G., Maliehe R.S. The effect of mineral admixtures on the properties of high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*,2, 267-271, 2000.

13. Holland, T, Silica Fume User's Manual, Silica Fume Association, Washington, 2005.
14. Turanlı L., Uzal B., Mehta P.K., High-volume natural pozzolan concrete for structural applications, ACI Mater J. 104, 535-538, 2007.
15. Turanlı L., Uzal B., Yücel H., Göncüoğlu M.C., Çulfaz A., Pozzolanic activity of clinoptilolite: A comparative study with silica fume, fly ash and a non-zeolitic natural pozzolan, Cement and Concrete Research.40, 398-404, 2010.
16. Şimşek O., Taban S., Gökçe H.S., Investigation of Usability of Zeolite, Fly Ash and Waste Glass Materials in Portland Composite Cement Production, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (4), 803-809, 2010.
17. Şimşek O., Taban S., Determination of Alkali-Silica Reaction Effects of Zeoliti Tuff Addition on the Different Aggregates, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University 24 (1), 145-153, 2009.
18. Şimşek O., Dayı M., Aruntaş H.Y., Çavuş M., The Effect of Zeolitic Tuff Additon Ratio and Sea Water on Physical and Mechanical Properties on Cement, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 28 (3), 491-499, 2013.
19. Erdoğan T., Beton, Metu Pres, Ankara, 2003.
20. Qin L., Gao X., Chen T., Influence of mineral admixtures on carbonation curing of cement paste , Constr. Build. Mater., 212, 653-662, 2019.
21. Qin L., Gao X., Li Q., Upcycling carbon dioxide to improve mechanical strength of portland cement, J.Clean Prod., 196, 726-738, 2018.