



**POMZA TOZU İKAMELİ HARÇLARDA ÇİMENTO
TÜRÜ VE PUZOLAN İNCELİĞİNİN PUZOLANİK
AKTİVİTEYE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Elif KULLEBİ

**Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN**

**2022
Her hakkı saklıdır.**



**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**POMZA TOZU İKAMELİ HARÇLARDA ÇİMENTO TÜRÜ VE PUZOLAN
İNCELİĞİNİN PUZOLANİK AKTİVİTEYE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Elif KULLEBİ

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Erzurum

2022

Her hakkı saklıdır

ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Erzurum Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez içindeki tüm bilgilerin doğru ve tam olduğunu, bilgilerin üretilmesi aşamasında bilimsel etiğe uygun davrandığımı, yararlandığım bütün kaynakları atıf yaparak belirttiğimi beyan ederim.

13/12/2022

Elif KULLEBİ

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

POMZA TOZU İKAMELİ HARÇLARDA ÇİMENTO TÜRÜ VE PUZOLAN İNCELİĞİNİN PUZOLANİK AKTİVİTEYE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Elif KULLEBİ

Erzurum Teknik Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN

Beton sektöründeki gelişmelere paralel olarak çimentoya olan talep de artmaktadır. Ancak, çimento üretimi sırasında oluşan karbon salınımı çevreyi olumsuz yönde etkilemekle birlikte çimento maliyeti de gün geçtikçe artmaktadır. Bu nedenle doğal puzolanların çimentonun bir kısmı ile ikame edilmek suretiyle beton için gereken çimento miktarının azaltılması yönündeki çalışmalar önemsenmektedir. Bu çalışmada da ülkemizde önemli miktarda rezervi bulunan pomzanın öğütülerek elde edilen pomza tozunun inceliğinin puzolanik aktivite indeksi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çalışmada, Erzurum ili Pasinler ilçesi Demirdöven yöresinden temin edilen pomza taşı 3 farklı incelik değerinde öğütülüp, dayanım sınıfı ve inceliği farklı olan iki tür (CEM II/B-LL 32,5 R ve CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R) çimento ile %5, %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. Çalışma standart harç numuneleri üzerinde gerçekleştirilmiş olup toplamda 26 farklı harç grubu üretilmiştir. Standart su kürü süreleri sonunda 7, 28, 56 ve 90 günlük örneklerin basınç dayanımları ve puzolanik aktivite indeksleri belirlenmiştir. TS 25 ve ASTM C618 standartlarında belirtilen kriterler doğrultusunda yorumlanmıştır. İlaveten, pomza tozu inceliğinin kıvam ve hidratasyon ısısı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda, öğütülen pomza tozlarının incelikleri 4.378, 4.919 ve 6.879 cm²/g olarak belirlenmiştir. En yüksek puzolanik aktivite indeksleri %104-121 aralığında bulunan, CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimento içerisine özgül yüzey alanı 6.879 cm²/g olarak belirlenen %5 ikame oranına sahip pomza tozu katkılı harç numune gruplarında belirlenmiştir. Katkılı harç numune üretiminde pomza tozu kullanımının; işlenebilirliği azalttığı, hidratasyon ısını azalttığı, basınç dayanımı ile puzolanik aktivite indeksini ise kullanılan çimentonun inceliği ile pomza tozunun inceliğine ve ikame oranına bağlı olarak önemli oranlarda artırdığı görülmüştür.

2022, 105 sayfa

Anahtar Kelimeler: Pomza tozu, Çimento türü, İncelik, Basınç dayanımı, Puzolanik aktivite indeksi, Kür süresi

ABSTRACT

MS. Thesis

THE INVESTIGATION OF THE EFFECT OF DIFFERENT CEMENT TYPE AND POZZOLAN FINENESS ON POZZOLANIC ACTIVITY IN MORTARS WITH PUMICE POWDER REPLACEMENT

Elif KULLEBİ

Erzurum Technical University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Türkay KOTAN

In study, pumice stone obtained from Erzurum province Pasinler district Demirdöven region was ground in 3 different fineness values, and two species (CEM II/B-LL 32.5 R and CEM II /A-M (P-LL) 42, 5 R) has been replaced with cement at rates of 5%, 10%, 20% and 30%. The study was carried out on standard mortar samples and a total of 26 different mortar groups were produced. At the end of the standard water curing periods, the compressive strength values and pozzolanic activity indexes of the samples at 7, 28, 56 and 90 days of age were determined. Interpreted in accordance with the criteria specified in TS 25 and ASTM C618 standards. In addition, the effects of pumice powder fineness on consistency and heat of hydration were investigated. As a result of the study, the specific surface areas of the ground pumice powder were determined as 4.378, 4.919 and 6.879 cm²/g. The highest pozzolanic activity indices were determined in the sample groups with pumice powder additive with a 5% replacement rate, the specific surface area of which was determined as 6.879 cm²/g in CEM II /A-M (P-LL) 42.5 R type cement, in the range of 104-121%. The use of pumice powder in the sample production of mortar with additives; It has been seen that it reduces the workability, reduces the heat of hydration, and increases the compressive strength and pozzolanic activity index significantly depending on the fineness of the cement used, the fineness of the pumice powder and the substitution rate.

2022, 105 page

Keywords: Pumice powder, Cement type, Fineness, Compressive strength, Pozzolanic activity index, Curing time

TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum tez çalışmamda öncelikle teknik ve laboratuvar imkanlarından yararlandığım Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği'ne ve Atatürk Üniversitesi İnşaat Mühendisliği'ne teşekkür ederim. Tez çalışmamda konu seçimimden araştırmamın yürütülmesine, laboratuvar çalışmalarından son ana kadar kıymetli zamanını ve desteklerini esirgemeyen, danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Türkay KOTAN'a emeklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca XRF analizi için imkanlarından faydalanmamızı sağlayan Erzurum Aşkale Çimento Sanayi T.A.Ş.'a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar çalışmalarında katkılarından dolayı Sayın Doç. Dr. Rıza POLAT'a, Sayın Arş. Gör. Metehan ARDAHANLI'ya ve Sayın Selen DAYAL'a, yardımlarını esirgemeyen, bu yolda birlikte yürüdüğümüz sevgili dostlarım ve meslektaşlarım Sayın Zeynep ŞAHİN ve Sayın E. Hazal POLAT'a teşekkür ederim. Ayrıca Arter Teknik Cihazlar San. Tic. Ltd. Şti.'den Sayın Serhan DEMİRDÖĞEN'e teknik desteklerinden dolayı teşekkürlerimi sunarım.

Her türlü manevi desteklerini üzerimde hissettiğim, doğrunun ve adaletin izinde, hayata karşı duruşlarından dolayı kendime rehber edindiğim, moral ve motivasyonumu her zaman yükselten, hep yanımda olan kıymetli aileme, her konuda yanımda olan kıymetli dostlarım Hatice KOÇAK, Merve EYÜBOĞLU ve Nilay AKDAĞ'a teşekkür ederim.

Elif KULLEBİ
Aralık 2022

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Puzolan.....	5
1.1.1. Puzolan çeşitleri.....	6
1.1.2. Puzolanik reaksiyon.....	11
1.2. Puzolanik Aktivite	11
1.2.1. Puzolanik aktiviteyi etkileyen faktörler.....	15
1.2.2. Doğal puzolanların inceliğinin çimento harçları üzerindeki etkileri	17
1.3. Pomza.....	18
1.3.1. Pomzanın Dünya ve Türkiye’deki yeri	20
1.3.2. Pomzanın inşaat sektöründe kullanılması.....	23
2. KAYNAK ÖZETLERİ	27
3. MATERYAL ve YÖNTEM	34
3.1. Materyal	34
3.1.1. Çimento.....	34
3.1.2. Pomza tozu.....	35
3.1.3. CEN standart kumu.....	36
3.1.4. Karışım suyu	37
3.2. Yöntem.....	37
3.2.1. Pomzanın öğütülme işlemi	37
3.2.2. Pomza tozunun tane yoğunluğu için Piknometre deneyi (ölgül ağırlık tayini).....	38
3.2.3. Pomza tozunun Blaine metodu ile inceliğinin tayini (ölgül yüzey tayini).....	39
3.2.4. Harç karışımlarının hazırlanması.....	41
3.2.5. Harç numunelerinin kıvam tayini (yayılma tablası deneyi)	43

3.2.6. Harç numunelerinin üretimi.....	44
3.2.7. Harç numunelerinin basınç dayanımı tayini	48
3.2.8. Harç numunelerinin hidratasyon ısısı tayini	48
3.2.9. Harç numunelerinin SEM-EDS görüntülerinin alınması.....	51
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA.....	52
4.1. Pomza Tozlarının Özgül Ağırlık Tayini Deney Sonuçları	52
4.2. Pomza Tozlarının Özgül Yüzey Alanı Tayini Blaine Deney Sonuçları	53
4.3. Harç Numunelerinin Kıvam Tayini Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	53
4.4. Harç Numunelerinin Hidratasyon Isısı Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi	55
4.5. Harç Gruplarının Basınç Dayanım Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	58
4.6. Pomza Tozunun Pozolanik Aktivite Özelliklerinin Değerlendirilmesi	75
4.7. Harç Gruplarının Pozolanik Aktivite İndeksi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	76
4.8. Harç Numunelerinin SEM-EDS Görüntüleri ve Değerlendirilmesi	85
5. SONUÇ ve ÖNERİLER.....	94
KAYNAKLAR	97

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
A	Kalorimetrede toplanan ısı
a_i	Kalorimetrenin ısı kaybı katsayısı
B	Atmosfere yayılan ısı kaybı
b	Prizmanın kare kesitinin kenar uzunluğu (mm)
c	Kalorimetrenin toplam ısıl kapasitesi
d	Çimento-pomza yoğunluğu (g/cm ³)
h	Yükseklik (cm)
K	Kalibrasyon sabiti
l	Mesnet silindirleri arasındaki uzaklık (mm)
m	Kütle (g)
m_b	Boş harç kutusunun kapağıyla birlikte kütlesi
m_c	Bağlayıcı kütlesi
m_s	Kumun kütlesi
m_w	Suyun kütlesi
Q	Numunenin her gramı için joule cinsinden hidratasyon ısısı
r	Yarıçap (cm)
S	Özgül yüzey (cm ² /g)
t	İki çizgi arası geçen süre (sn)
t_i	Hidratasyon süresi
$V_{\text{hücre}}$	Hücre hacmi (cm ³)
θ_t	Verilen zamanda referans kalorimetre ile deney kalorimetresi arasındaki fark
μ	Boş kalorimetrenin ısıl kapasitesi
η	Hava viskozitesi (Pa.s)

Kısaltmalar

ASTM	American Society For Testing and Materials
DAİ	Dayanım Aktivite İndeksi
DPT	Devlet Planlama Teşkilatı
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
MTA	Maden Tetkik ve Arama
PAİ	Puzolanik Aktivite İndeksi
PT	Pomza Tozu
SEM	Scanning Electron Microscope
TS	Türk Standardı
XRF	X-Ray Fluorescence Analysis

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1	Puzolan Çeşitleri (Anonim 2020)	6
Şekil 1.2	Yapay puzolanlar (Engin 2014).....	9
Şekil 1.3	MTA raporunda, a. asidik ve b. bazik pomza taşlarının görünümü	19
Şekil 1.4	a. Pomza kayacı ve b. Sembolik olarak pomza kayacının yapısı (Gündüz vd 2001; Toklu 2009).	20
Şekil 1.5	Dünyada pomza rezervi bulunan ülkeler (Elmastaş 2012)	21
Şekil 1.6	Türkiye’de bulunan pomza rezervleri (Elmastaş 2012).....	21
Şekil 1.7	MTA raporunda 2018 yılı Dünya genelinde pomza üretim payı.....	22
Şekil 1.8	Bimsblok örnekleri (Anonim 2022f)	24
Şekil 1.9	Farklı boyutlarda bulunan pomza taşı (Anonim 2022g).....	25
Şekil 1.10	Pomza tozu	26
Şekil 3.1	Çimento ve pomza tozu	36
Şekil 3.2	CEN standart kumu (a. TS EN 196-1 standardında belirtilen 1350 g , b. TS EN 196-9 standardında belirtilen 1.080 g)	36
Şekil 3.3	a. 4-8 mm boyut aralığındaki pomza agregası, b. Los Angeles cihazında 6.000 devirde öğütülen pomza tozu	38
Şekil 3.4	a. Özgül ağırlık tayini için kullanılan 500 ml’lik piknometre, b. İçi pomza tozu ve suyla dolu piknometre numuneleri, c. 24 saat bekleyen içi pomza tozu ve suyla dolu piknometre numuneleri.....	39
Şekil 3.5	Blaine (hava geçirgenlik) cihazı	40
Şekil 3.6	Harç karıştırma mikseri	43
Şekil 3.7	Harç yayılma tablası, a. Harcın kesik koniye yerleştirilmesi, b. 15 vuruş sonrası yayılan harç, c. Yayılan harcın d_1 ve d_2 doğrularında ölçülmesi	44
Şekil 3.8	Sarsma cihazı, a. ilk kademinin yerleştirilmesi, b. ikinci kademenin yerleştirilmesi	45
Şekil 3.9	24 saat kalıpta bekletilen harç numuneleri	45
Şekil 3.10	24 saat sonra kalıptan çıkarılan harç numuneleri	46
Şekil 3.11	Spiralli taş kesme cihazı	46
Şekil 3.12	Harç numunelerinin su kürü işlemi.....	47
Şekil 3.13	40x40x40 mm küp harç numuneleri	47
Şekil 3.14	Çimento test presi ile numunelerin basınç dayanımının ölçülmesi	48

Şekil 3.15 Hidratasyon ısısı kalorimetre deney düzeneği.....	49
Şekil 3.16 Hidratasyon ısısı deneyi silindir harç numuneleri	49
Şekil 3.17 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	51
Şekil 4.1 Kontrol ve %10 PT ikameli harç gruplarının kıvam (yayılma) değerleri.....	54
Şekil 4.2 CEM II 32,5 R Çimento ve %10 PT ikameli harç ikameli harç gruplarının hidratasyon ısısı değişim grafiği.....	56
Şekil 4.3 CEM II 42,5 R Çimento ve %10 PT ikameli harç ikameli harç gruplarının hidratasyon ısısı değişim grafiği.....	56
Şekil 4.4 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarının 7 günlük basınç dayanım grafiği.	61
Şekil 4.5 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarının 7 günlük basınç dayanım grafiği.	61
Şekil 4.6 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarının 28 günlük basınç dayanım grafiği	64
Şekil 4.7 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarının 28 günlük basınç dayanım grafiği	64
Şekil 4.8 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarının 56 günlük basınç dayanım grafiği	67
Şekil 4.9 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarının 56 günlük basınç dayanım grafiği	67
Şekil 4.10 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarının 90 günlük basınç dayanım grafiği	70
Şekil 4.11 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarının 90 günlük basınç dayanım grafiği	70
Şekil 4.12 Harç numune gruplarının farklı kür sürelerindeki basınç dayanımı değişim grafikleri (a. CEM II 32,5 R çimentolu, b. CEM II 42,5 R çimentolu)	73
Şekil 4.13 %5 PT ikameli harç gruplarının farklı kür sürelerinde Puzolanik Aktivite İndeksi (PAİ) değişim grafiği.....	78
Şekil 4.14 %10 PT ikameli harç gruplarının farklı kür sürelerinde Puzolanik Aktivite İndeksi (PAİ) değişim grafiği.....	79
Şekil 4.15 %20 PT ikameli harç gruplarının farklı kür sürelerinde Puzolanik Aktivite İndeksi (PAİ) değişim grafiği.....	80
Şekil 4.16 %30 PT ikameli harç gruplarının farklı kür sürelerinde Puzolanik Aktivite İndeksi (PAİ) değişim grafiği.....	81

Şekil 4.17 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarında puzolanik aktivite indeksinin pomza tozu (PT) inceliğine göre değişim grafikleri (PT ikame oranları; a. %5, b. %10, c. %20 ve d. %30 için)	83
Şekil 4.18 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarında puzolanik aktivite indeksinin pomza tozu (PT) inceliğine göre değişim grafikleri (PT ikame oranları; a. %5, b. %10, c. %20 ve d. %30 için)	84
Şekil 4.19 CEM II 32,5 R tipi çimento ile hazırlanan kontrol harç numunesi SEM görüntüleri	86
Şekil 4.20 C32,5P1 harç numunesinin SEM görüntüleri ve EDS verileri	87
Şekil 4.21 C32,5P2 harç numunesinin SEM görüntüleri ve EDS verileri	88
Şekil 4.22 C32,5P3 harç numunesinin SEM görüntüleri	89
Şekil 4.23 CEM II 42,5 R tipi çimento ile hazırlanan kontrol harç numunesi SEM görüntüleri	90
Şekil 4.24 C42,5P1 harç numunesinin SEM görüntüleri ve EDS verileri	91
Şekil 4.25 C42,5P2 harç numunesinin SEM görüntüleri	92
Şekil 4.26 C42,5P3 harç numunesinin SEM görüntüleri	93

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1 Bazı doğal puzolanların oksit miktarları (%) (Erdoğan, 2016)	7
Çizelge 1.2 TS 25 ve ASTM C618 standartlarına göre puzolanın kimyasal özellikleri. 13	
Çizelge 1.3 Asidik ve bazik pomzanın karakteristik kimyasal içeriği yaklaşık (Aksay vd 2016).....	19
Çizelge 1.4 Pomzanın kullanıldığı sektörler (Aksay 2005; Anonim 2022a; Anonim 2022c).....	23
Çizelge 1.5 Dünya’da ve Türkiye’de pomzanın sektörlere göre dağılımı (Anonim 2006)	23
Çizelge 3.1 CEM II 32,5 ve CEM II 42,5 çimentolarının kimyasal, fiziksel ve dayanım özellikleri.....	34
Çizelge 3.2 Pomza tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri	35
Çizelge 3.3 CEN standart kumunun tane büyüklüğünün dağılımı	37
Çizelge 3.4 Puzolanik Aktivite İndeksi (PAİ) için hazırlanan harç karışımları	42
Çizelge 3.5 Hidratasyon ısısı tayini için hazırlanan harç karışımları	42
Çizelge 4.1 Pomza tozlarının özgül ağırlık sonuçları	52
Çizelge 4.2 Çimento ve pomza tozlarının özgül yüzey alanı değerleri	53
Çizelge 4.3 Kontrol ve %10 PT ikameli harç gruplarının kıvam (yayılma) değerleri....	54
Çizelge 4.4 Harç gruplarının farklı kür sürelerindeki basınç dayanımı sonuçları	59
Çizelge 4.5 Harç gruplarının farklı kür sürelerindeki Puzolanik Aktivite İndeksi (PAİ) sonuçları	77

1. GİRİŞ

Dünya genelinde artan nüfusun barınma, korunma ve enerji gibi ihtiyaçlarını karşılamak için inşaat sektörü hızla büyümektedir. Nitekim inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan beton malzemesi ile birlikte çimento ihtiyacı da artmaktadır. Beton bileşiminde kullanılan çimento ve katkı malzemeleri birer sanayi ürünüdür. Son zamanlarda artan sanayileşmeyle birlikte dünya genelinde olduğu gibi, ülkemizde de enerji ihtiyacı ve tüketimi giderek artmaktadır. Beton teknolojisinde kullanılan çimento ve katkı malzemelerinin üretimi aşamasında kömür, fuel oil, doğal gaz, elektrik, akaryakıt gibi çeşitli ve önemli miktarlarda enerji kaynakları kullanılmaktadır. Bu bağlamda beton bileşiminde kullanılan çimento, betonun dayanım ve dayanıklılık gibi yararlı özelliklerini sağladığı gibi, üretimi sırasında kısmen çevre kirliliğine de sebep olmaktadır.

Çimento üretiminde ortaya çıkan zararlı gazlar karbon salınımıyla birlikte hava kirliliğine sebep olur ve çevreye karşı olumsuz etkileri göz ardı edilemeyecek kadar çoktur (Bertoldi et al. 2012). Yapılan araştırmalara göre Türkiye’de 2013 yılında 71.3 milyon ton, 2015’de 71,42 milyon ton, 2016’da 75,40 milyon ton ve 2020’de ise 72,30 milyon ton çimento üretilmişken, bu miktarın 2023 yılında 99.8 milyon ton olması beklenmektedir. Bu veriler çimento sanayisinin ne kadar çok büyüdüğünü göstermektedir (Türkkan 2015; Anonim 2021a). Khurana et al. (2002) yapmış olduğu bir çalışmada Hindistan’da yıllık klinker kapasitesi 1 milyon ton olan bir çimento fabrikasının enerji tüketimini incelemiş, üretim sırasında harcanan ısı enerjisinin, fabrikanın harcadığı toplam enerjinin %30’una denk geldiğini gözlemlemiştir. Ayrıca Özcan ve Güngör (2019) yapmış oldukları araştırmada 1 ton portland çimento üretimi için yaklaşık 0,8 ton CO₂ salınımının meydana geldiğini belirtmişlerdir. Çimento fabrikalarının artışı ile CO₂ salınımının arttığı, sülfür oksitlerin, nitrojen oksitlerin, partikül maddelerin çevreyi kirlettiği yapılan çalışmalarla gözlemlenmiştir (Kumar et al. 2008). Dünya genelinde çimento fabrikaları CO₂ salınımının yaklaşık %5-7’sini oluşturmaktadır (He et al. 2019). Fapohunda et al. (2017), çimento yerine %30 oranında ikame edilebilecek mineral katkıların kullanımı ile karbon salınımının büyük oranda azaltılabileceğini belirtmiştir. Bu sebepler göz önünde bulundurularak beton

teknolojisinde çimentonun yerini alabilecek veya kullanımını azaltabilecek doğal kaynaklara yönelmeye başlanmıştır.

Çimento maliyetini ve tüketimini azaltmak için doğada bulunan katkı malzemelerinden faydalanmak mümkündür. Bu amaçla çimento ve beton üretiminde katkı maddesi olarak çeşitli puzolanların kullanılmasıyla çimento miktarı azaltılmaktadır. Puzolanlar Portland çimentoyla birlikte öğütüldükleri gibi çimento yerine ikame de edilebilirler. Çimento ve beton üretiminde ayrıca katkı maddesi olarak yapay puzolanlar da kullanılmaktadır. Uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi yapay puzolanlar sanayi yan ürünü olduklarından, beton endüstrisinde kullanımları atık geri dönüşümü için etkili bir yoldur (Kaplan ve Binici 1995). Puzolanların bağlayıcılık özelliği göstermesi, içeriğindeki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oranına ve inceliğine bağlıdır. Bu nedenle kullanılan puzolanlar için ASTM C 618 (Anonymous 2019) ve TS 25 (Anonim 2008) standartlarında puzolanlarda bulunması gereken özellikler verilmiştir. Bu kriterlere uyan puzolanlar, beton veya harçların yararlı özelliklerine önemli oranda katkı sağlamaktadır. Yapılan araştırmalarda bu özelliklere sahip pomza tozunun doğal puzolan olarak kullanımı mevcuttur.

Pomza, inşaat sektöründen geoteknik mühendisliğine, ziraat ve tekstilden kimyaya birçok alanda kullanılmaktadır. Pomza, hafif bir malzeme olduğu için inşaat sektöründe hafif yapı elemanları üretiminde bimsblok, hafif agrega ve çimento tamamlayıcı puzolan olarak kullanılmaktadır (Gündüz vd 2001; Seraj et al. 2017). Özellikle hafif beton üretiminde hafif agrega olarak kullanımı yaygındır. Gözenekli yapısı sayesinde ısı ve ses yalıtımı sağlamak için oldukça elverişli bir malzemedir. Ayrıca yüksek oranda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içerdiğinden dolayı, ince öğütülerek birçok çalışmada puzolanik malzeme olarak kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar sonucu pomza tozu kullanılan betonlarda, ileri kür yaşlarında basınç dayanımına önemli oranda katkı sağladığı görülmüştür (Hossain 2005; Seraj et al. 2017).

Pomzanın, Dünya'daki toplam rezervinin yaklaşık %15,8'i Türkiye'de, özellikle İç Anadolu bölgesi (Nevşehir ve Kayseri), Doğu Anadolu ve Akdeniz Bölgesi'nde bulunmaktadır. Maden ve Petrol İşleri Genel Müdürlüğü'nün 2020 yılı verilerine göre Erzurum'da 37.665.019 ton civarında pomza rezervi bulunmaktadır (Elmastaş 2012;

Eroğlu ve Şahiner 2020). Pomza ülkemizde süngertaşı, köpüktaşı, topuktaşı, lavtaşı; İngilizcede iri taneli olanları pumice (pümis), ince taneli olanları “pumicite (pümisit)”; Almanya’da ise iri taneli olanları “bims”, ince taneli olanları “bimstein” olarak adlandırılmaktadır. Kullanımı Romalılara dayanan bu malzemeye, Ege ve Akdeniz bölgesinde bulunan bazı tarihi eserlerde rastlanmıştır (Eroğlu ve Şahiner 2020).

Çalışmanın Gerekçesi ve Amacı

Pomzanın kimyasal bileşiminde yüksek oranda $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içermesinden dolayı puzolan inceliğinde öğütülmektedir. Pomza tozunun puzolanik malzeme olarak kullanımında inceliğinin çimento harcı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Pomza tozu üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, Gündüz vd (2001), Hossain (2005), Aksay (2005), Zeyad et al. (2019), Dif et al. (2020) gibi araştırmacılar puzolanik özellik gösterdiğini yapmış oldukları çalışmalarda ortaya koymuşlardır. Pomza tozunun çimento harcı üzerinde inceliğinin etkisini inceleyen sınırlı sayıda çalışmaya rastlanmıştır. Literatürde bulunan mevcut çalışmalar, Seraj et al. (2017) ve Zeyad ve Almalki (2021) örnektir. Seraj et al. (2017) Portland çimento ile farklı ikame oranlarında, farklı yerlerden temin edilmiş farklı inceliklere sahip pomza tozu kullanmışlardır. Zeyad ve Almalki (2021) ise pomza tozunu 3 farklı şekilde öğüterek ikisi Portland çimentosunun özgül yüzey alanından küçük, diğeri ise kullanılan çimentonun özgül yüzey alanından daha büyüktür. Pomza tozunun inceliği arttıkça basınç dayanımına önemli oranda katkı sağlamıştır. Yapılan literatür araştırması sonucunda, pomza tozunun farklı inceliklerde kullanımına ilişkin az sayıda çalışma bulunmakta iken, farklı inceliğe sahip çimentolar ile ikameli kullanımına rastlanmamıştır.

Nitekim yapılan bu çalışmada, Erzurum ili Pasinler ilçesi Demirdöven yöresinde rezervi bulunan pomza taşı öğütülüp 3 farklı incelikte toz haline getirilmiş ve iki farklı incelikteki çimento ile birlikte 4 farklı ikame oranında kullanılarak harç numuneleri üretilmiştir. Harç numuneleri üzerinde kıvam, hidrasyon ısı ve 4 farklı kür süresi sonunda basınç dayanımı deneyleri yapılarak, pomza tozu inceliğinin çimento inceliği ile uyumunun ve puzolanik aktiviteye etkisinin incelenmesi amaçlanmıştır.

Çalışmanın Kapsamı

Bu çalışma kapsamında, öncelikle rezervinden alınan pomza taşı Los Angeles cihazı ile 3.000, 5.000 ve 6.000 devirlerde öğütülerek 3 farklı inceliğe sahip pomza tozları elde edilmiştir. Farklı inceliğe sahip CEM II /B-LL 32,5 R ve CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimentolar ile birlikte %5, 10, 20 ve 30 oranlarında pomza tozu ikameli harç numuneleri üretilmiştir. 40x40x40 mm boyutlu küp numunelerin 7, 28, 56 ve 90 günlük standart su kürü işlemi sonunda, basınç dayanımı ve puzolanik aktivite indeksleri belirlenmiştir. Çalışmada ayrıca, pomza tozu inceliği ve ikame oranının, farklı incelikteki çimentolar ile üretilen harç numunelerinin kıvamına ve hidrasyon ısisına etkisi incelenmiştir.

Çalışmanın Hipotezi

Bu çalışma, pomza tozu ile çimento inceliğinin artmasının puzolanik aktivite indeksini artıracığı hipotezi üzerine kurgulanmıştır.

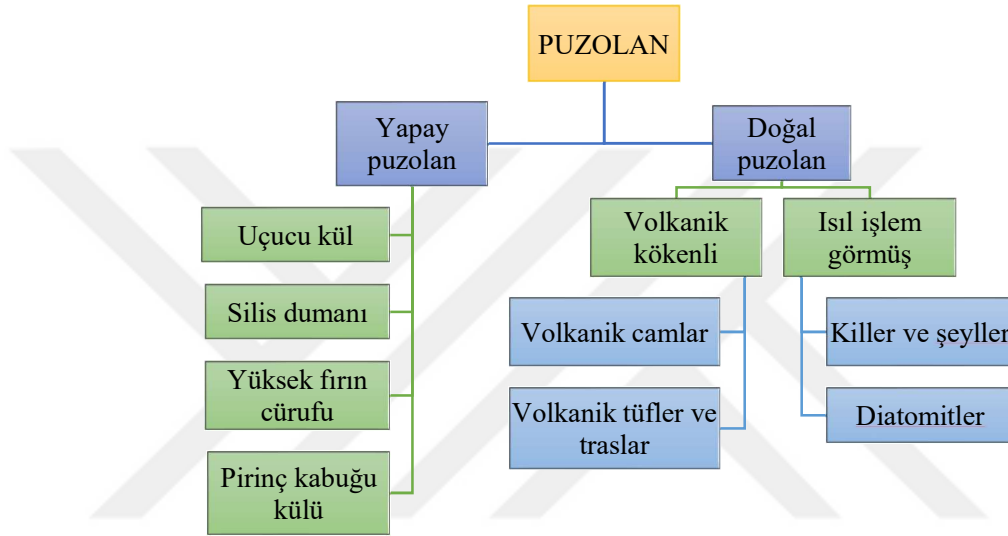
1.1. Puzolan

Avrupa standartlarında belirtildiği üzere, çoğunlukla amorf yapıda silis ve silis-alümin kökenli olan puzolanlar kendi başlarına bağlayıcılığı ya olmadığı ya da çok az olduğu için ince öğütüldüklerinde normal sıcaklık ve nemli ortamlarda kireç veya çimento ile reaksiyona girerek bağlayıcılık özelliği kazanırlar. Puzolanlar, yapısında yüksek oranda SiO_2 (reaktif silisyum dioksit), Al_2O_3 (alüminyum oksit) ve Fe_2O_3 (demir oksit) bulundurmaktadır. Yapısında bulunan oksitler sayesinde puzolan, kireç veya çimentolu harçlarda hidratasyon sonucu serbest halde bulunan Ca(OH)_2 (kalsiyum hidroksit)’i bağlayarak C-S-H jelinin oluşumunu sağlar. Bu sayede puzolanlar betonda hidratasyon ıslısını düşürmek, işlenebilirliği, dayanımı ve dayanıklılığı artırmak gibi önemli yararlar sağlamaktadır (Al-Chaar et al. 2013). Puzolanik malzemelerin %40’a kadar çimento ile yer değiştirebileceğini ve bu malzemelerin betonun dayanıklılığı ile dayanım kazanma oranını iyileştirebileceği yapılan araştırmalarla belirlenmiştir (Hossain 2004).

Geçmişten günümüze pek çok yapıda puzolan kullanılmıştır. İlk Roma döneminde “Puzzuoli” volkanik bölgesinin topraklarının puzolan özelliği gösterdiği anlaşılmıştır ve “Puzolan” ismi de buradan gelmektedir. Almanlar ise doğal yapıda bulunan bu mineralleri “tras” olarak adlandırmaktadır (Kaplan ve Binici 1995). Puzolanların sanayi yan ürünü olan yapay halleri ve volkanik kökenli doğal halleri mevcuttur. Hem çimentonun bazı durumlarını iyileştirmek hem de çimento maliyetini ve tüketimini azaltmak için puzolan katkı malzemelerinden faydalanmak mümkündür. Bu amaçla çimento ve beton üretiminde katkı maddesi olarak çeşitli puzolanlar kullanılarak çimento miktarı azaltılabilmektedir. Malhotra ve Mehta (1996), beton karışımında portland çimentosunun pahalı bir ürün olduğunu, artan enerji maliyetiyle çimento üretiminde maliyetinin arttığını belirtmişlerdir. Bu bağlamda çimento miktarını azaltmak amacıyla betonda puzolan kullanımının ekonomik açıdan tasarruf sağlayabileceğini öne sürmüşlerdir.

1.1.1. Puzolan çeşitleri

Puzolanlar, doğal puzolanlar ve yapay puzolanlar olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Doğal puzolanların volkanik kökenli (volkanik camlar, volkanik tüfler, traslar) veya ısıt işlem görmüş (killer, şeyller, diatomitler) olanları mevcuttur. Yapay puzolanlara ise pirinç kabuğu külü, silis dumanı, uçucu kül gibi endüstriyel atıklar örnek olarak gösterilebilir (Anonim 2020). Puzolan çeşitleri Şekil 1.1’de verilmiştir.



Şekil 1.1 Puzolan Çeşitleri (Anonim 2020)

a. Doğal puzolanlar

Doğal puzolanlar iki grupta incelenmektedir; ilki volkanik kökenli olanlar, ikincisi ise ısıt işlem görmüş olanlarıdır. Volkanik kökenli puzolanlar; volkanik patlamalar sonucu erimiş magmanın püskürmesiyle ani bir hızla soğuması sonucu amorf ve camsı yapıda meydana gelir. Bu yapılar magmanın şiddetli püskürmesi sonucunda camsı yapılar, daha az şiddetli püskürmesi sonucu volkanik küller oluşmaktadır. Her bir parçacık içerisinde çok küçük gözenekli bir yapı oluşturan çok sayıda kabarcık ve kanal içermektedir (Massazza 1998). Volkanik malzemelerin öğütülmesiyle puzolanlar elde edilmektedir. Bu malzemelere pomza, perlit, obsidiyen, zeolit, tras, volkanik küller örnek olarak verilebilir. Isıl işlem görmüş doğal puzolanlar; killer ve şeyllerin yüksek sıcaklıklarda pişirilmesiyle elde edilmektedir. Kil ve şeyllerin ham halleri puzolanik özellik göstermediği için ısıt işleme tabii tutularak kristal özellikleri bozulur ve alümina

1. GİRİŞ

silikat yapısı kazanmaktadır. Diatomitler ise; bazı topraklarda bulunan diatom isimli su bitkisinin kalıntılarıdır. Bu organik malzemeler yüksek silis oranına sahiptir ve puzolanik özellik göstermektedir (Yalçınkaya 2019). Çizelge 1.1’de bazı doğal puzolanların oksitlerinin miktarları yüzde (%) olarak verilmiştir.

Çizelge 1.1 Bazı doğal puzolanların oksit miktarları (%) (Erdoğan 2016)

Doğal Puzolan	Oksit Miktarları (%)					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Alkali
Volkanik camlar	65,1	14,5	5,5	3,0	1,1	6,5
Volkanik tüfler	52,1	18,3	5,8	4,9	1,2	6,6
Diatomlu toprak	86,0	2,3	1,8	-	0,6	0,4
Pişirilmiş killer	42,2	16,1	7,0	21,8	1,9	1,3

Doğal puzolanlar ince öğütülmeleri sayesinde çimento hamurunda bulunan çok küçük çatlakları doldurma yeteneğine sahiptir. İnce taneleri sayesinde beton ve çimento harcında ilave C-S-H oluşumunu hızlandırır ve katkıda bulunurlar. Taze betonun kıvamını ve işlenebilirliğini iyileştirebilir fakat özgül yüzeyinin artması ile su ihtiyacını da arttırabilir (Vu et al. 2001; Pan et al. 2003). Öğütüldüklerinde, taze betonun maliyetini düşürme ve işlenebilirliğini artırmanın yanı sıra, betonun termal çatlamaya, sülfat saldırısına karşı direncini artırmak için kullanılabilirler (Mehta and Monteiro 2001). Alkali-silika reaksiyonlarını azaltmak için doğal puzolanlar kullanılır (Hamalı 2007). TS 25 (2008) standardına göre, doğal puzolanın kimyasal içeriğinde SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ miktarının %70’den daha fazla olması, MgO miktarının en çok %5, SO₃ miktarının en çok %3, rutubet oranının en çok %10, SiO₂ miktarının ise %40 ile %90 arasında olması ve çok ince boyutlarda öğütülmesi gerektiği belirtilmiştir. MTA raporları incelendiğinde Türkiye’de doğal puzolan kaynaklarının yaygın olduğu görülmektedir. Türkiye’de ve Dünya’da beton sektöründe yaygın olarak kullanılan başlıca doğal puzolanların özellikleri aşağıda verilmiştir.

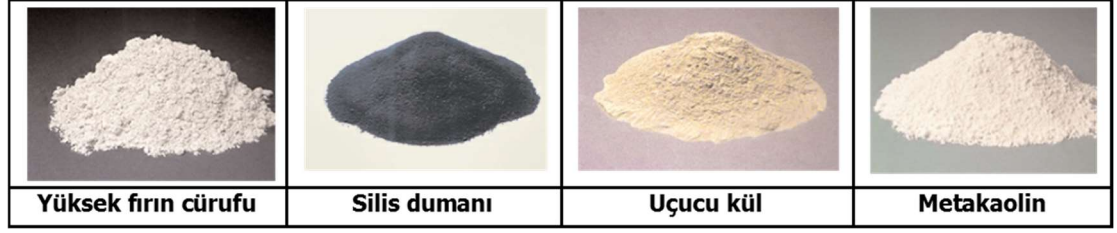
Pomza; volkanik kökenli, silikat esaslı, gözenekli ve gözeneklerinin birbiriyle bağlantılı olmadığı, amorf yapılı, camsı halde bulunan bir kayadır. Sünger taşı, hışır taşı, topuk taşı gibi isimlerle de bilinen, inşaat sektöründe bims olarak yaygın kullanılan kayaç tipidir (Köse ve Pamukçu 1997). Bu tez çalışmasında puzolanik katkı maddesi olarak pomza tozu kullanıldığından pomza hakkında detaylı bilgi 1.3 Pomza konu başlığında verilmiştir.

Perlit; yapısı bakımından %3-10'u kristalleşmiş mineraller olan, obsidiyen parçacıkları içeren ve hacminin %90-97 kadarı volkanik cam olan bir kayadır. Perlitte bulunan elementler oksitler halindedir, bünyesinde bulunan su %3, SiO₂ oranı da %74 civarındadır, özgül ağırlığı 2,2-2,4 arasındadır ve çatlakları nedeniyle kırılğan yapıdadır. Perlit ham halde bulunabildiği gibi toz haline getirilerek yüksek derecelerde ısıtıldığında hafif agrega olarak kullanıldığı genleştirilmiş perlit olarak da bulunmaktadır. Perlit çok iyi su tutabildiği için tarım sektöründe, ısı ve sıcaklık yalıtımı sağlaması ve hafif bir malzeme olması bakımından inşaat sektöründe, endüstri sektörü gibi alanlarda kullanılmaktadır (Kırimer 1976; Yıldız 2014).

Zeolit; Volkanik kristallerin hidrotermal koşullar altında değiştirilmesiyle (Na₂Ca)O·Al₂O₃·4SiO₂·xH₂O tipi bileşikler olan zeolit minerallerinin oluşumuna sebep olur. Volkanik tüf olarak adlandırılan bu ürün, kompakt bir yapıdır (Mehta and Monteiro 2001). Düşük yoğunluğa sahip olduğu için ve kristal yapısı bozulmadan betonda doğal mineral katkı olarak kullanımı yaygındır. Ayrıca zeolitin özgül yüzeyi Portland çimentosunun özgül yüzeyinden daha büyüktür ve bu nedenle beton içerisindeki boşlukları daha iyi doldurabilmektedir. Zeolitin yoğunluğu çimentonun yoğunluğundan düşüktür, bu nedenle zeolit katkılı betonlar katkısız çimento ile üretilen betonlarla kıyaslandığında daha hafif betonlardır. Çimento yerine betonda zeolitin ikame edilmesi çimento kullanımını azaltarak ve çimento üretimi için gerekli olan enerji ile maliyetten tasarruf edilmesi sağlanmaktadır (DPT 2001; Işık 2018). Zeolitin kullanım alanları; iyon değişebilme özelliği nedeniyle kirlilik kontrolünde radyoaktif atıkların, atık suların, baca gazlarının ve petrol sızıntılarının temizlenmesinde, madencilikte, tarımda gübre kokusunu gidermede, ağır metal içeren atık su arıtımında, inşaat, kağıt, deterjan vb. sektörlerde kullanımı mevcuttur (DPT 2001; Gülen vd 2012).

b. Yapay puzolanlar

Yapay puzolanlar endüstriyel yan ürün olarak tanımlanır. En çok bilinenleri; yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve uçucu kül gibi atıklardır. Beton endüstrisinde de en çok kullanılan başlıca yapay puzolanlar hakkında bilgilere aşağıda yer verilmiştir. Şekil 1.2'de yapay puzolan örnekleri görülmektedir.



Şekil 1.2 Yapay puzolanlar (Engin 2014)

Silis dumanı; silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımlarının üretiminde atık malzeme olarak meydana gelen, ayrıca silikon metalinin veya silikonlu metal alaşımlarının üretimi sırasında gazın ani soğutulmasıyla ortaya çıkan, %85-%98 silis içeren ve amorf yapıdan oluşan çok ince parçacıklardan oluşmaktadır (Çetin vd 2018). Silis dumanının özgül yüzey alanı çimentodan yüksektir. Bu durum betonun priz almasını hızlandırır, puzolanik aktivitesi yüksek olduğu için harç ve beton içerisinde ekstra bir C-S-H (kalsiyum silikat hidrat) meydana getirir. C-S-H jeli beton içerisindeki boşlukları doldurarak geçirimsiz bir beton elde edilmesini sağlar (Yenimol vd 2013).

Uçucu kül; kömürün yakıt olarak kullanıldığı elektrik santrallerinin ince toz atık malzemesidir. Uçucu külün kimyasal bileşenleri SiO_2 , CaO , Fe_2O_3 ve MgO 'dur. Nemli ortamda kireç (kalsiyum hidroksit) ile hidratasyon reaksiyonuna girerek suda sertleşir. Küresel yapısı dolayısıyla, taze betonda çok fazla suya gereksinim duymadan işlenebilirliği iyileştirir ve su/çimento oranının azalmasını sağlayarak dayanım ve dayanıklılık özelliklerini artırır. Uçucu kül daha büyük özgül yüzey alanına (inceliğe) sahip olduğundan, betonda bağlayıcı hacmini artırarak çimentodan tasarruf ve ekonomik kazanım sağlanır (Topçu ve Canbaz 2001; Hamalı 2007).

Yüksek fırın cürufu; demir üretimi esnasında endüstriyel fırınlarda erimiş olarak elde edilen atıktır ve kimyasal bileşimi CaO , SiO_2 , Al_2O_3 'ten oluşur. Taze betonda işlenebilirliği artırır, priz süresini uzatır, terlemeyi, hidratasyon ısını ve su geçirimsizliğini azaltır, ayrıca çimentonun mekanik özelliklerine de katkı sağlamaktadır (Dorum vd 2009).

Puzolanların avantaj ve dezavantajları

Puzolanların çimento ve betonda sağladığı avantajlar;

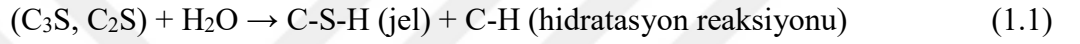
- Çimento üretim maliyetini ve üretim için gereken enerjiyi azaltmak,
- Taze betonun işlenebilirliğini artırmak,
- Hidratasyon ısısının hızını ve miktarını azaltmak,
- Doluluğu arttırarak su geçirimsizliğini azaltmak,
- Terlemeyi ve segregasyonu azaltmak,
- Sülfat dayanıklılığını artırmak,
- Çatlamaya karşı betona direnç sağlamak,
- Normal Portland çimentosunun kullanıldığı betonlarda harcın içerisinde bulunan klorun çatlaklardan sızarak korozyona sebep olduğu, puzolan katkı kullanıldığında bu çatlakların önüne geçerek geçirimsizliği artırıp korozyon oluşumu önlemek,
- Uygun oranlarda kullanıldığında basınç dayanımını artırabilmektedir. (Gündeşli 2008; Anonim 2022b).

Puzolanların çimento ve betonda sağladığı dezavantajlar ise;

- Priz süresi, portland çimentosuna göre daha uzundur, bu da kalıp sökümü için gereken süreyi uzatmaktadır,
- Belli oranların üzerinde kullanıldığında betonun dayanımını düşürmektedir,
- Fazla oranda kullanıldığında betonun su ihtiyacını artırır (Gündeşli 2008),
- Hidratasyon ısısını düşürdüğü için puzolan katkılı çimentolarla üretilen betonların soğuk havalarda kullanılması tavsiye edilmez,
- Soğuk havalarda priz süresini uzatır,
- Hava sürüklenmiş betonda kullanıldıklarında boşlukları dolduracaklarından, hava sürükleyici katkı miktarını arttırmak gerekir (Koca 2013).

1.1.2. Pozolanik reaksiyon

İnce boyutlarda öğütülmüş pozolan, içeriğinde çok miktarda silis ile alümin içerdiğinden sönmüş kireç ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, kalsiyum hidroksit) ve suyla karıştırıldığında bir takım kimyasal reaksiyonlar meydana gelmektedir. Ayrıca Portland çimento ile su arasında ki kimyasal reaksiyon sonucu oluşan serbest halde bulunan sönmüş kireç ile pozolan kimyasal reaksiyona girmektedir. Bu reaksiyon sonucunda kalsiyum hidroksit (C-H) ile pozolanın bünyesinde bulunan SiO_2 (S), C-S-H jelini oluşturmaktadır. Pozolanik reaksiyon denklemi aşağıdaki (1.1) ve (1.2) bağıntılarında verilmektedir (Massazza 1998; Bayraktar 2016).



Çimento ve pozolan ikamesinde hidratasyon sonucu oluşan serbest kalsiyum hidroksitin azaldığı ve harçta meydana gelen büyük kılcal boşlukların C-S-H jeli ile dolmasıyla dayanımın arttığı görülmektedir (Tironi et al. 2013). Özturan (1991), pozolanik reaksiyonun yavaş gerçekleştiğini, ayrıca alkali ile sülfatlı kimyasal katkıların kullanılmasıyla ve kür süresi ile sıcaklığının artmasıyla pozolanik reaksiyon hızının artırılabilceğini belirtmiştir. İlk yaşlarda yavaş ilerleyen pozolanik reaksiyon sebebiyle pozolan katkılı betonlar zamanla dayanım kazanmaktadır. Pozolanik reaksiyonun ilk zamanlarda hızlı gerçekleşmesi için özgül yüzey alanının artırılabilceğine değinilmiştir.

1.2. Pozolanik Aktivite

Pozolanik aktivite; pozolan olarak kullanılan silis ve alümin bakımından zengin mineral katkı maddesinin çimentonun hidratasyonu sonucunda oluşan serbest sönmüş kireci ne derece bağladığının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca karşına eklenen mineral katkının pozolan olarak kullanımına karar vermek için ve pozolanın, bağlayabileceği kireç miktarı ile bağlamak için girdiği reaksiyonun hızını belirlemede kullanılır (Özer 2000; Caputo et al. 2008; Yanık 2019).

Doğal puzolanların puzolanik aktivitesini belirlemek için bazı özelliklerine bakılmaktadır. Day ve Shi (1994)'ün, puzolanik aktivite üzerine yaptıkları çalışmalar incelendiğinde, farklı yüzey alanına sahip farklı puzolanları kullandıkları görülmektedir. Yalnızca inceliğin başlıca etken olmadığını ve puzolanın kimyasal bileşimi, mineral bileşimi, cam içeriği ve magmanın soğuma hızının da puzolanik aktivite için çok önemli olduğunu belirtmişlerdir. Yani, silika ve alümina içeriği, inceliği ve amorf yapıda olması puzolanik aktiviteyi etkilemektedir (Anonim 2020).

Puzolan tarafından bağlanan kireç miktarı;

- Aktif fazların yapısına ve miktarına,
- Aktif fazların SiO_2 miktarına,
- Kür süresine,
- Karışımda bulunan kireç/puzolan oranına bağlıdır.

Kirecin bağlanma hızı ise;

- Puzolanın özgül yüzey alanına,
- Su/katı madde oranına,
- Sıcaklığa bağlıdır (Baradan vd 2015).

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği tarafından yapılan araştırmada, harç basınç dayanımının artmasında her puzolanın inceliğinin etki etmediğini belirtmiştir. Erdoğdu vd (2011), ileri yaş basınç dayanımını artırmada doğal puzolanın içeriğinde bulunan $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarına bağlı olduğu, erken yaş dayanımında ise puzolan inceliğinin etkili olabileceğini ifade etmişlerdir. Puzolanik aktivite ölçümleri için fiziksel, kimyasal, mikro yapısal ve mekanik olmak üzere dört farklı yöntem bulunmaktadır (Kurugöl ve Güleç 2017). Bu gruplar aşağıda açıklanmaktadır.

Fiziksel yöntem; puzolanik aktivite ölçümlerinde birçok yöntem bulunmaktadır.

Bu yöntemlerden ilki, puzolanik malzemenin nitrik-floridik karışım ile karıştırılması sonucunda meydana gelen ısıнын, kalorimetreye ölçülerek değerlendirildiği yöntemdir. Diğer bir yöntemde ise puzolan ile çimento karışımında çimento tanelerinin hidratasyonla özgül yüzey artış hızı ölçülmektedir (Bulut 2007). Ayrıca Tashiro et al. (1994) puzolanik aktiviteyi fiziksel yöntem ile araştırmak için elektrik direnci

1. GİRİŞ

yöntemini kullanmıştır. Pozolan katkılı çimento harcının elektrik direnci ile pozolanik aktiviteyi nasıl etkilediğini incelemiştir. Kurugöl (2017) pozolanik aktiviteyi belirlemede fiziksel yöntemler üzerine genel bir araştırma yapmıştır. Pozolanın fiziksel özellikleri, TS 25 (Anonim 2008) standardına göre; bir mineralin pozolan olarak kullanılması için özgül yüzey alanı en az $4.000 \pm 25 \text{ cm}^2/\text{g}$ ve kızdırma kaybı en çok %5 olmalıdır. Minerallerin pozolan olarak kullanılabilmesi için eleme işlemine tabii tutulan mineraller, göz açıklığı 45 μm elek üzerinde kütlege en az %5 oranında malzeme kalmalıdır.

Kimyasal yöntem: pozolanik reaksiyon sonucu alkaliler veya asitlerde çözünebilen $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ miktarı tespit edilir. Ayrıca pozolan doymuş kireç çözeltisine konulduğunda, belirli bir süre içinde ortamdaki kalsiyum iyonlarının azalması gözlemlenir (Yalçınkaya 2019). Kurugöl ve Güleç (2017), pozolan + kireç karışımında bulunan Ca(OH)_2 miktarındaki değişimin incelenmesi için pozolanik aktivite tayininde kullanılan kimyasal yöntemlerin dört başlıkta incelenebileceğini göstermiştir. Bunlar; Fratini testi, doymuş kireç yöntemi, Chapelle aktivite indisi yöntemi ve diğer kimyasal tekniklerdir. Pozolanın kimyasal özellikleri, TS 25 (Anonim 2008) ve ASTM C618 (Anonymous 2019) standartlarına göre mineralin pozolan olarak kabul edilebilmesi için Çizelge 1.2’de verilen kriterleri sağlaması gerekmektedir.

Çizelge 1.2 TS 25 ve ASTM C618 standartlarına göre pozolanın kimyasal özellikleri

Kimyasal Özellik		Kütlege %	
		TS 25	ASTM C618
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	En az	70	70
SO_3 (Kükürt trioksit)	En çok	3	4
SiO_2 (Reaktif silis)	En az	25	-
Cl^- (Klorür)	En çok	0,1	-

Mekanik yöntem: pozolanik aktiviteyi değerlendirmek için kireç-pozolan ve pozolan-çimento harcının basınç dayanımının ölçülmesine dayanan yöntemdir. Bu yöntemle Ca(OH)_2 miktarının pozolan tarafından ne derece bağlandığı diğer yöntemler gibi hızlı sonuç vermese de yaygın kullanılan bir yöntemdir (Shi 1992). TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına uygun hazırlanan çimento-pozolan karışımının basınç dayanımı ölçülerek, kullanılan pozolanın pozolanik aktivitesi belirlenir.

Puzolanik aktivite indeksini belirlemek için; 1 kısım çimento + 3 kısım kum + ½ kısım su bileşiminden hazırlanan %100 çimento içeren kontrol numunelerin belirlenen dayanımı ile puzolan-çimento karışımıyla elde edilen dayanımı karşılaştırılır. Doğal puzolan ile uçucu kül için “dayanım aktivite indeksi (DAİ)” ile tanımlanırken, yüksek fırın cürufu için “Cüruf Aktivite İndisi, (CAİ)” olarak tanımlanır. Puzolanın dayanım aktivite indeksi (DAİ) için (1.3) denklemi kullanılmaktadır.

$$\text{Dayanım Aktivite İndeksi} = (A/B) \times 100 \quad (1.3)$$

Bağıntı (1.3)’de;

A: Puzolan katkılı harç numunelerinin ortalama basınç dayanımı (MPa),

B: Kontrol harç numunelerinin ortalama basınç dayanımıdır (MPa).

Puzolan katkılı harç numunelerinin 7 ve 28 günlük kür süresinde puzolanik aktivite indeksi (PAİ), ASTM C 618 (Anonymous 2019) standardına göre en az %75 oranında olmalıdır. TS 25 (Anonim 2008) standardına göre; puzolan katkılı harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımı 40 kgf/cm² (4 MPa)’dan, eğilme dayanımı ise 10 kgf/cm² (1 MPa)’dan az olmamalıdır. Puzolanlar beton içinde çimento ağırlığının değişik oranlarında kullanılırlar. Bu oran yapılan araştırmalarda %15’den %40’a kadar değişebileceği belirtilmiştir (Gündeşli 2008). Puzolanik malzemelerin inceliği arttıkça dayanımı artırdığı gözlemlenmiştir. Ancak, belli bir ikame oranından sonra dayanımı düşürdüğü yapılan çalışmalar ile belirlenmiştir (Chatterjee and Lahiri 1967).

Mikro yapısal yöntem: puzolanik aktiviteyi belirlemek amacıyla, elektron mikroskobu, X ışını floresan spektrometresi (XRF), X ışını difraktometresi (X ray powder diffraction, XRD), diferansiyel termal analiz (differential thermal analysis, DTA), termogravimetrik analiz (thermogravimetric analysis, TG) gibi yöntemler kullanılmaktadır.

XRD, puzolanda ve bitmiş üründe bulunan mineral kristallerinin varlığını belirleyerek faz analizini¹ incelemektedir. Harçta bulunan kuvars², kristobalit³, feldspat⁴ cinsi SiO₂ ile amorf yapılı bileşiklerinin ve puzolan harcının içinde kireçle tepkimeye girmeyen Ca(OH)₂ miktarının belirlenmesini sağlar. Çimento hidratasyonunda meydana gelen reaksiyon ürünlerini tanımlamak için kullanılmaktadır (Joshi 1970). XRF yönteminde, puzolanın puzolanik aktivitesini belirlemek için SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ oksitlerinin yüzde oranları incelenmektedir. DTA, bir maddenin fiziksel veya kimyasal değişimi için ısı alışverişinin karşılaştırılmasına dayanan ölçüm yöntemidir. TG ise, maddenin sıcaklık etkisiyle kütle kaybının incelemektedir. Bu iki yöntem ile puzolanik reaksiyon sonucu hidratasyon ısısı gözlemlenerek silikatlar ve Ca(OH)₂ miktarının belirlenmesini sağlar (Kurugöl 2017).

1.2.1. Puzolanik aktiviteyi etkileyen faktörler

Puzolanik aktivite, puzolanın maksimum bağlayabildiği kireç miktarının bir ölçüsü olduğu için, puzolanın yapısı ve aktif fazların kalitesi ile miktarına bağlıdır. Bu nedenle nemli ortamda puzolanın bağladığı kireç miktarı aktif fazın bünyesinde bulunan silika miktarıyla doğru orantılı olarak artmaktadır. Silika (SiO₂) miktarı uçucu küllerde ve volkanik camlarda %45-75 oranında bulunurken, silis dumanı veya doğal silika jelleri gibi çok aktif amorf silikalarda ise %95 oranına kadar bulunmaktadır (Massazza 1998). Puzolanik aktiviteyi etkileyen faktörler aşağıda verilmektedir. Bunlar;

- Harç karışımında oluşan serbest haldeki Ca(OH)₂'i bağlamak için belli oranlarda katkı olarak kullanılan puzolan katkı maddesinin miktarına bağlıdır. Yani belli oranlarda puzolan katkı miktarının artması, bağlanan kireç miktarının artmasına sebep olmaktadır.

¹ “Faz analizi, maddenin farklı sıcaklık, basınç ve bileşim gibi etkiler altındaki davranışının incelenmesi.”

² “Kuvars, oldukça saf silisyum dioksit (SiO₂) kristallerine verilen addır. Silisyum ve oksijen atomlarından oluşan sert, kristalli bir mineraldir (Anonim 2022d).”

³ “Kristobalit (cristobalite), silikanın yüksek sıcaklıkta kalsine edilmesiyle oluşan, yüksek saflıkta ve beyazlıkta kimyasal inert ürünlerdir (Anonim 2022e).”

⁴ “Feldspatlar yerkabuğunun %60-65’ini oluşturan susuz alümina silikatlardır (Anonim 2010).”

- Bağlanan Ca(OH)_2 miktarı kür süresi ile doğru orantılıdır. De Rojas ve Frias (1996) opalin kayaç, uçucu kül ve silis dumanı ikameli harçlarda 2 saat, 1, 7, 28 ve 90 günlük su küründe puzolanik aktivite değerleri incelenmiştir. Kür süresi arttıkça puzolanik aktivite değerlerinin de arttığı görülmüştür.
- Puzolanik reaksiyon sıcaklık ile birlikte önemli ölçüde artmaktadır. Kür sıcaklığı belli oranlarda arttıkça puzolanik aktivitenin de arttığı görülmüştür. Mirza et al. (1991) Portland çimento ile toz haline getirilmiş tuf, cüruf ve silis dumanı gibi puzolanik malzemelerle karıştırılan, normalden daha yüksek sıcaklığa maruz kalma durumunda, özellikle 35-50 °C aralığında, harçların performansını ve beton mukavemetini iyileştirmeye yardımcı olduğu sonucuna varmıştır. Ayrıca, Paya et al. (2000) uçucu kül katkılı çimento harcında 20, 40, 60 ve 80 °C’de kür sıcaklıklarında inceleme yapmış ve optimum puzolanik reaksiyonun 40 °C’de olduğunu belirlemiştir.
- Doğal puzolanın ısıtıl işlem görmesi genel olarak puzolanik aktiviteyi artırmaktadır. Isıtıl işlem görmüş puzolanın ısıtıl işlem sıcaklığına ve ısıtıl işlem süresine bağlı olarak puzolanik aktiviteye olan etkisi değişebilmektedir. Kara (2022) yapmış olduğu çalışmada, pileki puzolanını 850 °C ısıtıl işleme tabii tutarak puzolanik özelliğini iyileştirmiştir.

Puzolanın özgül yüzey alanı için Massazza (1983) puzolanın özgül yüzey alanının ilk yaşlarda, kimyasal yapısının ise ileri yaşlarda daha çok etkili olduğunu saptamıştır. Navrátilová ve Rovnaníková (2016) puzolan olarak kullanılan tuğla tozunun özgül yüzey alanının artmasıyla harçlarda puzolanik aktivitenin arttığına değinmiştir. Ayrıca Mota dos Santos ve Cordeiro (2021), diatomiti öğütürerek daha geniş yüzey alanı elde etmiştir. Böylece diatomitin silika çözünürlüğünü ve puzolanik aktivitesini artırmıştır. Zeyad ve Almalki (2021) ise büyük yüzey alanına sahip pomza tozu ikameli harç numunelerinin daha küçük yüzey alanına sahip pomza tozu ikameli harç numunelerine kıyasla daha yüksek puzolanik aktiviteye sahip olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak her ne kadar yüzey alanının puzolanik aktiviteyi ilk yaşlarda etkilediği söylene de yüzey alanının büyüklüğü hem erken yaş hem de ileri yaş için puzolanik aktiviteyi etkileyen önemli bir faktördür.

1.2.2. Doğal puzolanların inceliğinin çimento harçları üzerindeki etkileri

Kıvam üzerine etkileri;

Betonun ve harçların kıvamı, bileşiminde kullanılan suyun miktarına, çimentonun ve varsa puzolan katkısının miktarına ve inceliğine, kimyasal katkı miktarına, ayrıca agreganın şekline ve gradasyonuna bağlıdır. Çimentoyla yakın özgül yüzey alanına sahip puzolanlar uygun oranda kullanıldığında işlenebilirliğinde çok az miktarda azalma görülmektedir. Katkı olarak kullanılan puzolanın incelik değeri arttıkça kıvam azalmakta ve su ihtiyacı artmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalar incelendiğinde, uygun oranın üzerinde katkı kullanıldığında kıvamın azaldığı görülmektedir (Stuart et al. 1980; Çelik et al. 2019). İnce malzeme miktarı çok fazla kullanıldığında hidrasyon reaksiyonlarının miktarı artacağı için betonun su ihtiyacı artacaktır. Bu durum, su/bağlayıcı oranının artmasına ve dayanımın düşmesine neden olacaktır (Anonim 2021b).

Hidrasyon ısısı üzerindeki etkileri;

Çimentonun inceliği hidrasyon ısısını doğrudan etkiler. Su ile reaksiyona giren çimento zamanla tane yüzeyinden başlayarak çekirdeğine doğru hidrasyona uğrar. İnceliği daha fazla olan çimentonun, nispeten daha kaba olan çimentoya göre hidrasyon reaksiyonu daha hızlı gelişir. Nitekim çimentonun inceliği, hidrasyon ısısının oluşum hızını etkiler ancak toplam hidrasyon ısısında bir değişikliğe neden olmaz (Ardoğa 2014). Puzolan katkısının, çimentonun hidrasyon ısısını düşürdüğü bilinmektedir. Yapılan araştırmalar sonucunda puzolan inceliğinin etkisi için bir genelleme bulunmamaktadır.

Basınç dayanımına etkisi;

Day and Shi (1994) puzolanik katkı malzemesinin özgül yüzey alanı arttıkça basınç dayanımının arttığını belirtmiştir. Ayrıca Zeyad and Almalki (2021) puzolanın inceliğinin arttıkça çimentonun hidrasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile ince öğütülmüş puzolanın bünyesindeki oksitler hızla tepkimeye girebildiğine değinmiştir. Tepkime

sonucu oluşan C-S-H jeli zamanla daha çok büyüyerek tabaka oluşturur. İri taneli puzolan ile kıyaslandığında, ince taneli puzolanın dıştan içe doğru ilerleyen reaksiyonu çekirdeğe doğru daha çok ilerler ve daha çok tükenebilir. Bu durumda, oluşan harç içerisinde çimento ile agrega veya kum arasında güçlü aderans oluşturur, basınç dayanımını artırır. Ayrıca daha çok boşlukları doldurabildiği için filler malzeme olarak da kullanılabilir.

1.3. Pomza

Volkanik cam yapıda, süngerimsi, amorf alüminyum silikat olarak bilinen kayalara pomza denir. Whitham ve Sparks (1986) pomzayı, genellikle yoğunluğu suyun yoğunluğundan daha az olması sebebiyle volkanik patlama sonucu oluşan ve benzeri bulunmayan jeolojik bir ürün olarak da tanımlamaktadır. Kullanımı MÖ 1. yüzyılda Vitruvio'ya dayanmaktadır. Mimari belgelerde sudan hafif, yüzebilen, su emebilen ve hijyenik olduğuna değinilmiştir. Anadolu'da antik zamanlarda kullanımına rastlanmaktadır. Roma, Bizans ve Osmanlı dönemlerinde binalarda yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. 1800'lü yıllarda Almanya'da her ne kadar kullanılmış olsa da, Avrupa çok fazla ilgi göstermemiştir. Amerika'da da kullanımının çok yaygın olduğu bilinmektedir (Eroğlu ve Şahiner 2020).

Pomza üzerine yapılan; Adams (1941), Vaudrey (1950), Fisher ve Schmincke (1984), Whitham ve Sparks (1986) gibi birçok araştırma sonucunda, pomzanın fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Pomzanın, bünyesindeki gazların aniden uzaklaşmasıyla oldukça gözenekli bir yapıda olduğu ve gözenekler arasında bağlantı olmadığından geçirgenliği düşük, ses ve ısı yalıtımı yüksektir. Pomzanın ısı geçirgenlik katsayısı 0,30-0,80 kcal/mh °C arasında olup, normal betondan 5 ile 7 kat daha düşüktür. Bu özelliğinden dolayı önemli ölçüde ısı yalıtımı ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Yagi (1966) yapmış olduğu çalışmada, atmosfer basıncında yapılan sıcaklık deneyinde 1350°C'de pomzanın tam erimeye başladığını, sıcaklık arttıkça FeO miktarının azaldığını ve 100°C'den sonra artmaya başladığını belirtmiştir. Bileşimindeki Al₂O₃ ateş ve ısıya dayanım gösterir, SiO₂ oranı kayaca aşındırıcı özellik sağlar ve yüksek silis oranına sahiptir (Adams 1941; Eroğlu ve Şahiner

1. GİRİŞ

2020; Anonim 2022a). Çizelge 1.3’de, asidik ve bazik türden pomzaların tipik kimyasal bileşim oranları verilmiştir.

Çizelge 1.3 Asidik ve bazik pomzanın karakteristik kimyasal içeriği yaklaşık (Aksay vd 2016)

Bileşik	Asidik Pomza	Bazik Pomza
SiO ₂	72	45
Al ₂ O ₃	14	21
Fe ₂ O ₃	2,5	7
CaO	0,3	11
MgO	0,6	7
Na ₂ O + K ₂ O	9	8
Sıcaklık kaybı	3	1

Pomzanın doğada asidik ve bazik olmak üzere iki türü mevcuttur. En çok bulunan asidik pomza açık renkli, hafif, sertliği Mohs skalasına göre 5-6, yoğunluğu 0.5-1 g/cm³’tür. Bazik pomza ise koyu renkli, ağır, sertliği 5-6, yoğunluğu 1-2 g/cm³’tür. Kimyasal bileşiminde; yüksek oranlarda silisyum mevcutken alüminyum, demir, magnezyum, sodyum, kalsiyum, potasyum ve ilaveten az miktarda titanyum ve kükürt mevcuttur. Pomzanın rengi beyazdan sarıya, kırmızıya, kahverengiye ve bazı durumlarda siyaha kadar değişiklik gösterebilmektedir (Vaudrey 1950). Şekil 1.3’de, asidik ve bazik pomza taşlarının görünümü gösterilmiştir.

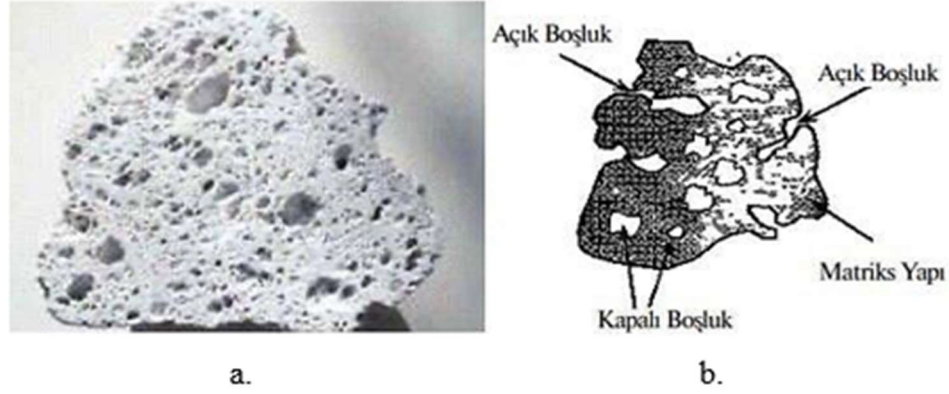


Şekil 1.3 MTA raporunda, **a.** asidik ve **b.** bazik pomza taşlarının görünümü

Pomza, oldukça boşluklu yapısı ve özgül ağırlığının düşük olmasından dolayı hafif bir malzemedir. Farklı yerlerden elde edilen pomza örneklerinin hafiflikleri biraz farklılık gösterebilmektedir (Köse ve Pamukçu 1997). Fisher ve Schmincke (1984) pomzanın boşluk oranının %90’larda, Özün (2019), pomzanın boşluk oranının

1. GİRİŞ

%70'lerde ve Grasser ve Minke (1990) ise pomzanın boşluk oranının %85'lerde olabileceğini belirtmişlerdir. Pomza kayacının Şekil 1.4'te boşluklu yapısı gösterilmiştir.



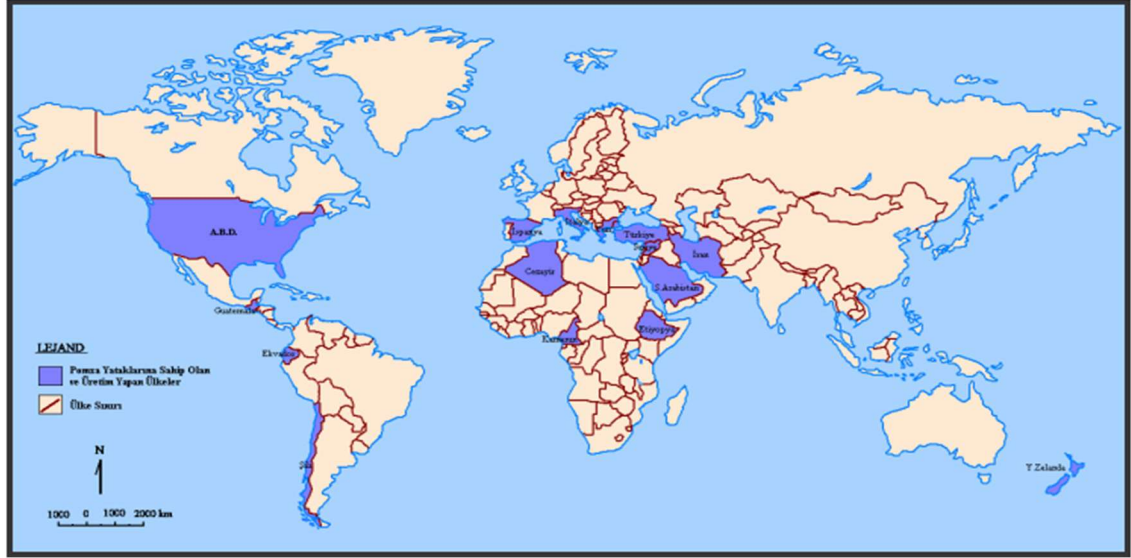
Şekil 1.4 a. Pomza kayacı ve **b.** Sembolik olarak pomza kayacının yapısı (Gündüz vd 2001; Toklu 2009).

1.3.1. Pomzanın Dünya ve Türkiye'deki yeri

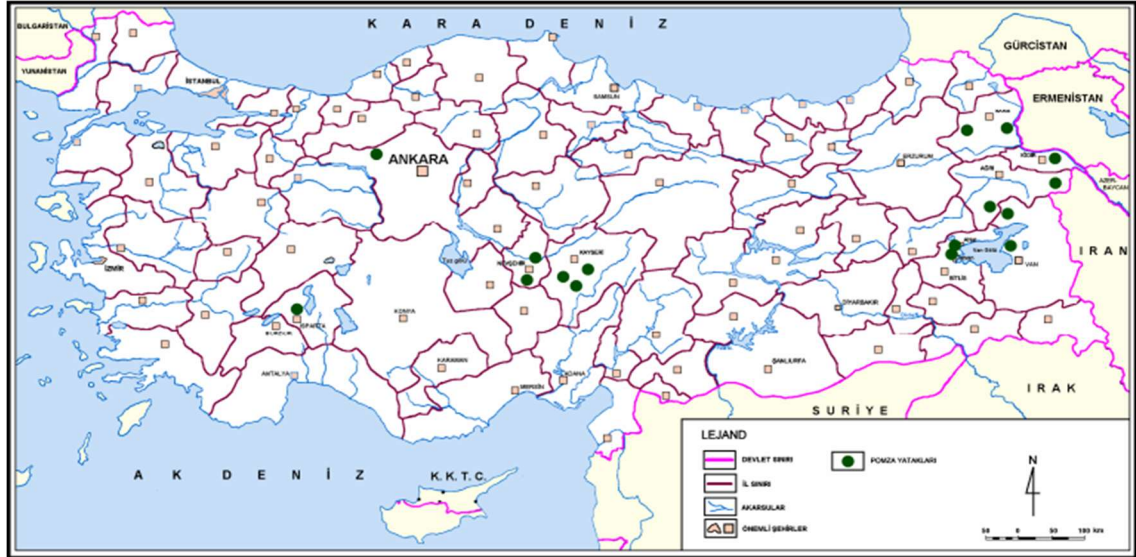
Yeryüzünde pomza taşının bulunduğu yerler volkanik geçmişli olup, ABD, Türkiye, İtalya, Yunanistan gibi ülkelerde pomza yatakları yaygın olarak bulunmaktadır. Türkiye, dünya pomza rezervinin yaklaşık %15,8'ine sahiptir. Türkiye'de pomza rezervlerinin büyük çoğunluğu ise Doğu Anadolu ve İç Anadolu Bölgesinde yoğunlaşmaktadır (Elmastaş 2012).

Dünya'da ve Türkiye'de bulunan pomza rezervlerinin dağılımı Şekil 1.5 ve Şekil 1.6'da gösterilmiştir.

1. GİRİŞ

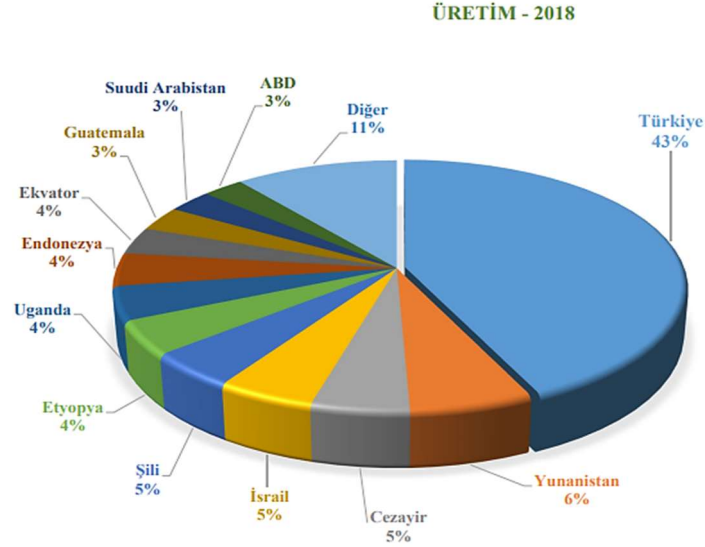


Şekil 1.5 Dünyada pomza rezervi bulunan ülkeler (Elmastaş 2012)



Şekil 1.6 Türkiye’de bulunan pomza rezervleri (Elmastaş 2012)

Son zamanlarda Dünya’da pomza üretim miktarı artmaktadır. 2020 yılında yayımlanan Amerikan Jeoloji Araştırmaları Kurumunun raporlarına göre, 2018 yılında 7,8 milyon ton üretim miktarı ile Türkiye ilk sırada yer alırken, sırasıyla Yunanistan (1,1 milyon ton), Cezayir (900 bin ton), İsrail (900 bin ton) ve Şili (800 bin ton) olmak üzere Türkiye’yi takip etmektedir. Pomzanın 2018 yılı Dünya genelindeki üretim payı Şekil 1.7’de verilmektedir.



Şekil 1.7 MTA raporunda 2018 yılı Dünya genelinde pomza üretim payı

Pomza ülkemizde ve dünyada, başta inşaat sektörü olmak üzere tarım, tekstil, kozmetik ve kimya ile endüstri sektörlerinde çok çeşitli amaçlarla kullanılmaktadır. MTA raporlarında 2020 yılında Dünya çapında rezervi bulunan pomzanın yaklaşık %90'ının inşaat sektöründe kullanıldığı belirtilmiştir. Özellikle inşaat sektöründe yapılarda ısı, ses ve yangın yalıtımı ile %50 düzeyinde tasarruf sağlamaktadır. Ayrıca Seraj et al. (2017) yapmış olduğu çalışmada, volkanik kökenli pomza tozunun doğal puzolan katkı malzemesi olarak kullanılabildiği için birçok araştırmacının ilgisini çektiğini belirtmiştir. Doğal ve hafif bir malzeme olduğu için Japonya, Almanya, Amerika, Fransa, Çin, Mısır, Birleşik Arap Emirlikleri, İtalya, Hindistan, Tunus, Suriye, Fas, Meksika, Yeni Zelanda, Pakistan, Kanada ve Avustralya gibi ülkelerde çok yaygın olarak kullanılmaktadır.

Pomzanın kullanıldığı sektörler ve kullanım alanları Çizelge 1.4'de verilmiştir. Bims Sanayicileri Derneğinin 2006 yılı verilerine göre, Dünya'da ve Türkiye'de pomzanın sektörlere göre dağılımı Çizelge 1.5'de verilmiştir.

1. GİRİŞ

Çizelge 1.4 Pomzanın kullanıldığı sektörler (Aksay 2005; Anonim 2022a; Anonim 2022c)

Sektörler	Kullanım Alanları
Tarım sektöründe	Yüksek su tutma özelliği sayesinde toprağa karıştırılarak bitki yetiştirilmesinde
Tekstil sektöründe	Kot kumaşların yıkanmasında
Kozmetik ve kimya sektöründe	- Diş sağlığı için diş temizleme ve diş macunu üretiminde, - Sıvı sabun üretiminde, - Cilt bakım kremi, - Topuk taşı, - Deterjan üretiminde
Endüstri sektöründe	- Su ve atık su arıtmada, - Zeytinyağı atık arıtımında, - Hava temizlemede kullanılmaktadır
İnşaat sektöründe	- Dolu veya boşluklu hafif yapı elemanlarının üretiminde, - Prefabrik yapı elemanlarının üretiminde, - Dekoratif ve çatı kaplamalarında, - Hafif hazır sıva ve harç üretiminde, - Hafif beton üretiminde, - Çatı ve döşeme izolasyon dolgusu olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 1.5 Dünya’da ve Türkiye’de pomzanın sektörlere göre dağılımı (Anonim 2006)

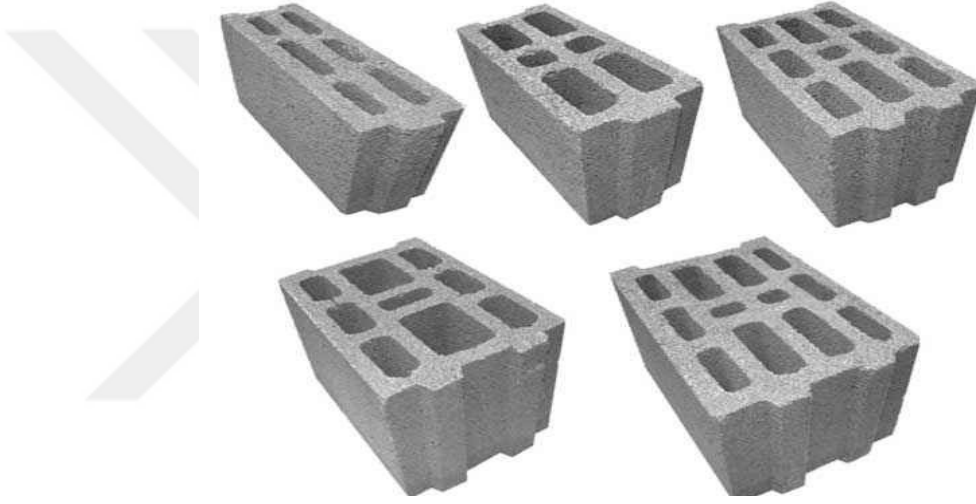
Sektörler	Dünya Pomza Tüketimi (%)	Türkiye’nin Dünya Pomza Tüketimindeki Payı (%)
İnşaat sektöründe	74	9
Tekstil Sektörü	5	61
Tarım sektöründe	5	6
Kimya Sektörü	6	5
Diğer Sektörler	10	19

1.3.2. Pomzanın inşaat sektöründe kullanılması

İnşaat sektöründe pomza bimsblok, hafif agrega ve puzolanik katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Pomzanın inşaat sektöründe kullanım alanları aşağıda verilmiştir.

a. Pomzanın bimsblok olarak kullanılması

Hafif yapı malzemeleri olarak kullanılan bimsbloklar binanın yükünü önemli ölçüde azaltmaktadır. Pomza esaslı olan bimsbloklar yangına karşı dayanıklı, ısı yalıtımı ve ses yalıtımı yüksektir. Bimsbloğun yapılarda kullanımı; lentolarda, duvar örme, asmolen uygulamaları gibi uygulamalarda kullanılmaktadır. Gözenekli yapısı sayesinde ortamın nemini dengeleyebilmektedir. Uygulama ve işçiliği kolaydır. İmalatı ve nakliyesi bakımından ekonomiktir (Çelik 2022). Şekil 1.8’de bimsblok örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 1.8 Bimsblok örnekleri (Anonim 2022f)

Bimsblok üzerine yapılan bazı araştırmalar; Kurç ve Anıl (2008) çalışmasında modellemiş olduğu betonarme bir yapıda duvar malzemesi olarak bimsblok kullanarak bina maliyetini ve deprem yükünü incelemiştir. Mboya et al. (2011), bimsblokların $4,8 \text{ N/mm}^2$ basınç dayanımına, çimento-kum ile yapılan blokların ise $4,7 \text{ N/mm}^2$ basınç dayanımına sahip olduğunu belirlemişler, bimsblokların çimento-kum bloklarının yerine kullanılabileceği sonucuna varmışlardır. Demirel (2013) yapmış olduğu çalışmada, pomza ve EPS kullanarak hem hafif ve yalıtımı yüksek hem de iyi bir mukavemete sahip bloklar üretmiştir. Kara ve Kayılı (2021) bimsblok, tuğla ve gaz beton ile oluşturulan duvar malzemelerinin enerji performansını incelemişlerdir.

b. Pomzanın hafif agregası olarak kullanılması

Pomza, çok ince toz (0-2 mm), kum (2-8 mm) ve çakıl (8-65 mm) gibi boyutlarda görülmektedir (Grasser and Minke 1990). Hafif yapı elemanları son zamanlarda artarak kullanılmaktadır. Bu bağlamda pomza taşının, beton tasarımında agregası olarak yaygın kullanımı mevcuttur (Gökçe ve Can 2009). Farklı boyutlarda bulunan pomza taşı Şekil 1.9'de gösterilmiştir.



Şekil 1.9 Farklı boyutlarda bulunan pomza taşı (Anonim 2022g)

Pomzanın hafif agregası olarak kullanılması üzerine yapılan bazı araştırmalar; Şahin et al. (2003), pomza agregasını normal agregası ile belirli oranlarda ikameli şekilde kullanarak beton üretmişlerdir. Yapılan incelemeler sonucunda, karışımlarda artan pomza agregasının oranına bağlı olarak betonun yoğunluğunda azalma meydana geldiği görülmüştür. Türkel ve Kadiroğlu (2007), taşıyıcı hafif beton üretimi için pomza agregası kullanmıştır. Çalışmada pomza agregaları kullanılarak hazırlanan betonlar, standartta bulunan basınç dayanımı koşullarını sağladığından taşıyıcı hafif betonların üretilebileceğini göstermiştir. Pomzanın hafif beton üretiminde agregası olarak kullanıldığı bir diğer çalışma olan Kotan (2009)'da, tamamen pomza agregası kullanılarak elde edilen hafif betonlarda su ve hava kürünün süresi arttıkça basınç dayanımı, birim ağırlığı, eğilme dayanımı, statik elastisite modülü ve ultrases geçiş hızı değerlerinin arttığını belirtilmiştir. Onoue et al. (2015), pomza agregası kullanılarak üretilen hafif betonlarda darbe sonucu şok emici özelliğini araştırmışlardır.

c. Pomzanın puzolanik katkı malzemesi olarak kullanılması

Pomzanın kimyasal içeriğini inceleyen araştırmacılar bileşiminde yüksek oranda SiO_2 , Al_2O_3 ve Fe_2O_3 bulunduğunu belirtmişlerdir. Bu özelliği bakımından puzolanlara

benzemektedir. Pomzanın puzolanik özellik gösterebilmesi için puzolan boyutlarında öğütülmesi gerekmektedir. Pomzada yüksek silis oranı nedeniyle öğütme işleminde aşındırma problemi görülebilmektedir. Bu yüzden öğütme işleminde bilyeli öğütücüler kullanılmaktadır (Aksay vd. 2016). Şekil 1.10'da öğütme ile elde edilen pomza tozu görülmektedir. Pomzanın puzolanik malzeme olarak kullanıldığı; Hossain (2005), Seraj et al. (2017) ve Zeyad et al. (2019) gibi bazı çalışmalarda, pomzanın betonda belirli ikame oranlarında mukavemeti artırdığı görülmektedir. Yapılan bu tez çalışmasında, puzolanik malzeme olarak kullanılan pomza tozunun farklı inceliklerde öğütülerek basınç dayanımına ve puzolanik aktiviteye etkileri incelenmiştir.



Şekil 1.10 Pomza tozu

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Turanlı vd (2005), çok miktarda doğal puzolan ilavesinin katkılı çimento üzerindeki etkisini incelemiştir. Yaptığı çalışmada Blaine metodu ile belirlenmiş inceliği 450 m²/kg olan, ikame oranları %35, 45 ve 55 olan Türkiye’den temin edilmiş volkanik tüf doğal puzolanı ile Portland çimentosu ve alçıtaşını karıştırarak harç numuneleri hazırlamıştır. Yapmış olduğu Blaine metodu ile incelik tayininde 400 m²/kg’dan küçük değerlere sahip doğal puzolanın, harç içerisinde erken dayanımda tatmin edici sonuçlar çıkarmadığı sonucuna vararak, puzolan incelik değeri 450 m²/kg olan volkanik tüfü kullanmıştır. 91 güne kadar her yaş için test edilen numunelerin puzolan oranı yüksek katkılı çimentoların kontrol numunelere göre dayanımının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Hossain (2005), çimento harcında katkı maddesi olarak kullanılmış olan volkanik kül ve pomza tozunun puzolanik aktivitesini, alkali-silika reaksiyonunu ve otoklav genleşmesinin özelliklerini incelemiştir. Portland çimento yerine her biri için %0, 10, 20, 30 ve 40 ikame oranlarında 45 µm elekten geçen volkanik kül ile pomza tozu kullanmıştır. 50x50 mm küp çimento harç numunelerini 7 ve 28 günlük kür sürelerinde bekletmiştir. Bu numuneleri tek eksenli basınç dayanımı testine tabii tutmuş ve puzolanik aktivite indeksini incelemiştir. Volkanik kül ile pomza tozu ikameli numunelerin ikame oranının artmasıyla çimento harç numunelerinin basınç dayanım değerlerinde azalma olduğunu fark etmiştir. Puzolanik aktivite indeksi incelendiğinde ise, 7 günlük numunelerin %78 ile %100 arasında ve 28 günlük numunelerin %67 ile %100 arasında değerler gösterdiğini belirtmiş olup bu değerlerin ASTM standartlarında kabul edilir değerde olduğunu ortaya koymuştur.

Cordeiro et al. (2008), şeker kamışı küspesini 8, 15, 30, 60, 120 ve 240 dakika öğüterek 6 farklı inceliğe sahip şeker kamışı küspesi tozu elde etmişlerdir. Elde edilen silika esaslı toz malzemenin harç ve beton içerisinde katkı maddesi olarak kullanımı araştırılmıştır. Şeker kamışı küspesi tozu ilk önce kalsiyum hidroksit, su ve kum ile karıştırılarak 7 günlük puzolanik aktivite indeksi incelenmiş, daha sonra Portland çimentosu, su ve kum ile harç numuneleri hazırlayarak 7, 14 ve 28 günlük puzolanik aktivite indeksini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucu şeker kamışı küspesi tozunun

puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabileceğini belirlemiş ve kullanılan puzolanın inceliğinin artmasıyla harç numunelerinde basınç dayanımının arttığını gözlemlemişlerdir.

Demirel (2008), Elazığ yöresinden temin edilen, çimento inceliğinde öğütülmüş pomzanın beton basınç dayanımına etkisini yapay sinir ağı ile belirlemek üzere çalışmıştır. Öğütülmüş pomza tozu %5, 10, 15 ve 20 ikame oranlarında kullanılmış ve bu ikame oranlarına ek %10 silis dumanı katkılı numuneler de hazırlanmıştır. Numuneler 3, 7, 28 ve 90 günlük kür koşullarında bekletilerek tek eksenli basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur. Geri yayımlı yapay sinir ağı kullanılarak modellenen verilerden elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar büyük oranda benzerlik göstermiştir. Deneysel sonuçlarda pomza ikameli numunelerin ikame oranı arttıkça 28 gün dayanımı kontrol numunesine göre daha çok düştüğü görülürken, 90 gün dayanımı 28 gün basınç dayanımlarının neredeyse aynı olduğu, yalnız pomza ikamesi ile silis dumanı ikamesinin birlikte kullanıldığı numunelerin daha yüksek dayanım kazandığı görülmüştür.

Koca (2013), betonda kullanılan doğal katkı malzemelerinin tane boyutunun, su ihtiyacı ve puzolanik aktivite indeksi üzerine etkilerini incelemiştir. Kayseri yöresinden temin edilen ignimbirit puzolanik malzemeyi üç farklı incelikte öğüterek üç farklı oranda harmanlamıştır. Kullanılan bu doğal katkıların yüzey yükleri (zeta potansiyelleri⁵), Blaine incelikleri, su ihtiyaçları ve puzolanik aktivite indeksleri incelenmiştir. Artan inceliğin erken yaş dayanıma etkisinin çok olduğu, geç dayanıma etkisinin ise daha az olduğunu belirtmiştir. 10-15 µm inceliğine kadar dayanım artmış, fakat inceliğin daha fazla olduğu numunelerde dayanımın düştüğü saptanmıştır.

Tekin (2014), farklı inceliklere sahip mineral katkılı çimentoların fiziksel ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Öğütülmüş Bayburt taşını ve Yatağan termik santral

⁵ “Zeta potansiyel, taneler arası çekim ya da dağılma mekanizmaları ile ilgili ayrıntılı bilgi vermektedir. Su içerisinde belli bir yük kazanan tane, süspansiyon (sıvı içerisinde katı bir maddenin çözünmeden kalması) içerisindeki karşı yükteki iyonları çekmektedir. Buna bağlı olarak yüklü tanenin yüzeyinde güçlü bir bağ yüzeyi ve dışı doğru yayılmış bir yüzey oluşmaktadır. Günümüzde çimento, puzolan, kil ve çeşitli mineraller, kimyasal katkılar, doğal fiber gibi birçok alanda kullanım imkânı bulmaktadır (Uçar vd 2010).”

taban külünü 63 ve 125 µm incelikte, CEM I çimento içerisine ikame %0, 10, 20 ve 30 oranlarında kullanmıştır. Standart kürde 2, 7 ve 28 günlerde bekletilen harç numunelerin basınç dayanımları incelenmiştir. Deney sonucunda, çimento hamuruna eklenen mineral katkıların incelikleri arttıkça priz süresinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca %10 ve %20 oranlarında Bayburt taşı tozu ve termik santral taban külü ikameli numunelerin, 28 günlük kür sürelerinde basınç dayanımlarının arttığı belirlenmiştir.

Tuncer (2014), Gümüşhane yöresi volkanik kayaçların puzolanik aktivitesinin araştırılması üzerine çalışma yapmıştır. Gümüşhane yöresinden Aysima bölgesinden (volkanik tuf ve andezit), Süleymaniye bölgesinden (andezit), Tekke bölgesinden (andezit, dasit), Refene bölgesinden (volkanik tuf) ve Bayburt'tan temin edilen volkanik tüfler kullanılmıştır. Volkanik tüflerin inceliklerini sabit tutmuş ve %0, 10, 20, 30, 40 ve 50 oranında ikame edilerek üretilen harçlar üzerinden 7, 28 ve 90 günlük eğilme, basınç dayanımları ve ultrases geçiş hızlarını incelemiştir. Çalışma sonucunda TS 25'e göre Puzolanik aktivite için 1 MPa'lık eğilme dayanımı ile 4 MPa'lık basınç dayanımına ulaşan Aysima andezitleri, Süleymaniye andezitleri, Bayburt tufu ve Refene volkanik tufünün puzolanik aktivitesinin olduğu belirlenmiştir. Puzolan ikame miktarı arttıkça basınç dayanımı değerleri azalmış, kür süresi arttıkça basınç dayanımının da arttığı gözlemlenmiştir ve ayrıca en ideal ikame oranının %10 olduğuna kanaat getirilmiştir.

Sanjuán et al. (2015), silis dumanının inceliğinin Portland çimentosunun mukavemetinin iyileştirilmesine etkisini incelemişlerdir. 45 µm elek üstü kalan miktarı %32,11 olan kaba silis dumanı %25 ikame oranıyla CEM I 52.5 tür Portland çimento ile harç numunesi hazırlanmıştır. Bu numunelerin puzolanik aktivite indeksi düşük değerler vermiştir. Elde edilen kaba silis dumanı, 45 µm elek üstü kalan miktarı %4,13 ve %0,98'e kadar tekrar öğütülmüştür. Çimento içerisine %25 oranında ikame edilen silis dumanı ile harç numuneleri hazırlanmıştır. X-ışını floresans metodu (XRF) ile kullanılan silis dumanının kimyasal içeriği belirlenmiş olup, elde edilen harç numunelerine dayanım aktivite indeksi uygulanmıştır. Deney sonucunda yüksek inceliğe sahip silis dumanı ikameli harç numunelerinin yüksek puzolanik aktivite değerine ve yüksek mukavemet değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir.

Seraj et al. (2017), farklı inceliğe sahip üç farklı yerden temin edilmiş pomza tozunun %20 ikame oranında kullanılan çimento harç numunelerinde PAİ hızı, basınç dayanımı ve alkali silika reaksiyonuna (ASR) direnç üzerindeki etkisini incelemiştir. Çalışma sonucunda, pomza tozunun inceliğinin artması ile çimento hidratasyon reaksiyonunu, puzolanik aktivite reaksiyonunu ve basınç dayanımını artırdığını, aynı zamanda karışım viskozitesini artırdığını belirtmiştir. Puzolanları daha ince boyutlarda öğütürerek puzolanik reaksiyon hızını artırmanın mümkün olduğunu, en küçük parçacık boyutuna sahip pomza tozunun kontrol numunesiyle karşılaştırıldığında, 7 günlük çimento harç numunelerinin %10 ve 28 günlük çimento harç numunelerinin %24 oranında kalsiyum hidroksit tükettiği gözlemlenmiştir.

Ustabaş ve Kaya (2018), farklı inceliğe sahip uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve Rize yöresinden temin edilen öğütülmüş obsidiyen katkılı çimentoların puzolanik aktivitesi, hidratasyon ısısının tayini ve yapay sinir ağlarıyla optimum puzolan katkı oranının belirlenmesi üzerine çalışma yapmıştır. Bilyeli öğütücülerde obsidyen 45, 60 ve 75 dk, uçucu kül 20 ve 40 dk ve yüksek fırın cürufu 20 ve 40 dk öğütülerek Blaine metodu ile incelik değerleri hesaplanmıştır. Puzolanik aktivite incelemesi için, uçucu külün belirlenmesinde TS EN 450-1 standardına göre %25 oranında ikame edildiğinden, öğütülmüş obsidiyen için de %25 ikame oranı kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufu ile karşılaştırmak için TS EN 15167-1 standardına göre %50 ikame oranında yüksek fırın cürufu kullanıldığından öğütülmüş obsidyen de %50 ikame oranında kullanılmış ve CEM I 42,5 R türü çimentoyla harç numuneleri hazırlanmıştır. Puzolanik aktivite indeksi, her bir grup kendi ikame oranıyla kıyaslanarak, katkılı çimento harcının dayanım değerinin katkısız harç numune basınç değerine oranlanarak bulunmuştur. Çalışma sonunda Rize yöresi obsidiyenin puzolan olarak kullanılabileceği ve yüksek fırın cürufu ile uçucu kül katkılarıyla kıyaslandığında obsidiyenin su ihtiyacı ile priz başlangıç-bitiş yönünden daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. %25 ikameli obsidiyenin kendi içinde incelikleri bakımından kıyaslandığında, inceliği arttıkça ileriki yaş basınç dayanımının arttığı, bundan dolayı puzolanik aktivite değerinin de arttığı belirlenmiştir. %50 ikame oranında ise dayanım ve puzolanik aktivite indeksinin azaldığı sonucuna varılmıştır.

Yanık (2019), yapmış olduğu çalışmada Rize yöresinden temin edilen obsidiyeni üç farklı incelikte öğütterek puzolan olarak kullanmıştır. Ayrıca uçucu kül ve yüksek fırın cürufu katkıları kullanarak çimentolara her bir puzolan örneği için %10, 20, 30 ve 40 oranlarında ikame ederek oluşan harç numunelerinin puzolanik aktivite indeksi ile basınç dayanımlarını incelemiştir. Çalışmanın sonucunda kullandığı 45, 60 ve 75 dakika öğütülen obsidiyenin inceliğinin arttıkça basınç dayanımının arttığı, puzolanik aktivite indekslerinin mukayesesinde obsidyen ikameli harçların dayanımaktivite indekslerinin uçucu kül ikameli harçlardan fazla olduğu ve yüksek fırın cürufu ikameli harçlardan ise az olduğunu belirlenmiştir. Obsidiyenin puzolan olarak harç içerisinde kullanımının uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Zeyad et al. (2019), volkanik pomza tozu katkılı yüksek dayanımlı betonda pomza tozunun puzolanik aktivitesini incelemişlerdir. Çalışmada, Portland çimento ile %0, 10, 20 ve 30 oranlarında, $4298 \text{ cm}^2/\text{g}$ Blaine inceliğine sahip volkanik pomza tozu ikamesi kullanılmıştır. Hazırlanan harç numuneleri 7, 14, 28, 90 ve 180 günlük kür sürelerinde test edilmiştir. Her bir kür süresinin sonunda numunelerin basınç dayanımı ve durabilite özellikleri araştırılmıştır. Basınç dayanımı deneyi sonunda volkanik pomza tozunun ikame oranı arttıkça dayanımı azalttığı görülmüştür. Yalnız ileri yaş dayanımları incelendiğinde, %10 pomza tozu ikame oranına sahip numunelerin basınç dayanımlarının pomza tozu ikame edilmeyen kontrol numunelerin basınç dayanımından daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca numunelere X-ışını floresans metodu (XRF) uygulanmıştır. Bu metot ile volkanik pomza tozuyla oluşturulan numunelerin içeriğindeki oksit ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$) miktarlarının %76,01 olduğu belirlenmiştir. Böylece pomza tozunun hem puzolanik aktivite indeksi ile hem de X-ışını floresans metodu ile puzolanik özellik gösterdiği sonucuna varılmıştır.

Dif et al. (2020), yapmış oldukları çalışmada volkanik kökenli puzolan olan pomza tozu ve perlit tozunu CEM I 42,5 çimentoya %0, 10, 20 ve 30 oranlarında her bir puzolan için ikame ederek kullanmışlardır. Çalışmada yoğunluk, porozite, basınç dayanımı, termal iletkenlik ve termal direnç gibi özellikler incelenmiştir. Çimentoya kıyasla pomza ve perlitin yoğunluklarının düşük olmasından kaynaklı numunelerin yoğunluğunun azaldığı ve porozitenin arttığı görülmüştür. 365 günlük ısı iletkenliği pomza ve perlit miktarının artmasıyla azaldığını belirtmişlerdir. Ayrıca puzolan ikame

oranının arttığı 28 günlük kürde bekletilmiş numunelerde basınç dayanımının azaldığı da sonuçlardan elde edilmiştir.

Zeyad ve Almalki (2021), üç farklı incelikte her biri için üç farklı oranda pomza tozu ikameli çimento harç numunelerinin akış özelliklerine, mukavemet ve geçirgenlik üzerine etkilerini incelemiştir. Portland çimentoya 64,1, 11,6 ve 4,96 μm granül çapında, sırasıyla 2120, 3010 ve 4298 cm^2/g Blaine inceliğine sahip pomza tozu, çimento kütlesinin %10, %20 ve %30 oranlarında ikame edilerek harç numuneleri hazırlanmıştır. Çalışma sonunda, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde incelenen numunelerde ikame oranının artmasıyla basınç dayanımı azalmıştır. Pomza tozunun 4,96 μm boyutlarında ikame edilen numunelerin diğer boyutta ikame edilen numunelere göre daha yüksek basınç dayanım değeri göstermiştir. Pomza tozu inceliği arttıkça puzolanik aktivite indeksinde de artış olduğu belirlenmiştir. Ayrıca 90 günlük numunelerin puzolanik aktivite indeksleri %80,7 ile %104,5 arasında değerlere sahip olduğu sonucuna varılmıştır.

Bargoth (2021), yapmış olduğu çalışmada öğütülmüş pomzanın kendiliğinden yerleşen beton (KYB) özelliklerine etkilerini incelemiştir. KYB içerisinde öğütülmüş pomza (özellikler $2,45 \text{ g/cm}^3$ ve Blaine inceliği $6.300 \text{ cm}^2/\text{g}$), uçucu kül (özellikler $2,46 \text{ g/cm}^3$ ve Blaine inceliği $7.200 \text{ cm}^2/\text{g}$) ve öğütülmüş yüksek fırın cürufu (özellikler $2,95 \text{ g/cm}^3$ ve Blaine inceliği $4.989 \text{ cm}^2/\text{g}$) kullanarak 3, 7, 28 ve 90 günlük kür koşullarında bekletilen numunelerin basınç dayanımı ve ultrasonik geçiş hızını incelemiştir. Sonuç olarak öğütülmüş pomza, uçucu kül ve öğütülmüş yüksek fırın cürufunun yüksek oranlarda birlikte katkı olarak kullanıldığı numunelerin basınç dayanımlarının daha yüksek olduğunu bulmuştur. Pomza tozunun 3 ve 7 günlük basınç dayanım değerlerinde azalma olduğu, %5 pomza tozu ikameli 28 günlük numunelerde ve %5 ile %10 pomza tozu ikameli 90 günlük numunelerde basınç dayanım değerlerinde artış olduğu belirlenmiştir.

Kaynak özetlerinde değinilen literatür araştırmaları sonucunda benzer çalışmalara rastlansa da, kullanılan pomza tozunun Blaine inceliklerinin (4.378, 4.919 ve $6.879 \text{ cm}^2/\text{g}$) çok daha büyük olduğu, pomza tozu inceliklerine ait harç numunelerinde %5, 10, 20 ve 30 ikame oranlarının kullanıldığı, Erzurum ili Pasinler

ilçesi Demirdöven yöresinden elde edilen pomzanın öğütülerek puzolan olarak kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılan bu çalışma, bahsedilen yönleriyle özgün bir nitelik taşımaktadır.



3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

3.1.1. Çimento

Bu tez çalışmasında TS EN 197-1 standardına uygun olarak Erzurum Aşkale Çimento Fabrikası'ndan CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü ve Erzincan Aşkale Çimento Fabrikası'ndan CEM II /B-LL 32,5 R türü çimentolar temin edilip kullanılmıştır. Çimentoların, üreticilerinden alınan analiz raporlarına göre kimyasal, fiziksel ve dayanım özellikleri Çizelge 3.1'de verilmiştir. Bu çalışmada, puzolanik katkı maddesi olarak kullanılan pomza tozu ile çimentoların incelik etkileşimi araştırıldığından, kullanılan çimentoların Blaine metodu ile inceliği kontrol amaçlı olarak Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında yeniden belirlenmiştir.

Çizelge 3.1 CEM II 32,5 ve CEM II 42,5 çimentolarının kimyasal, fiziksel ve dayanım özellikleri.

Bileşenler ve Özellikler		CEM II /B-LL 32,5 R	CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R
Kimyasal Özellikler (%)	SiO ₂	17,24	22,5
	Al ₂ O ₃	4,47	5,00
	Fe ₂ O ₃	3,23	3,18
	CaO	57,39	57,94
	MgO	1,02	1,10
	SO ₃	2,73	2,78
	Kızdırma kaybı	13,38	-
	Na ₂ O	0,43	0,56
	K ₂ O	0,66	0,78
	Cl	0,0049	0,0105
	Ölçülemeyen	-	-
	Serbest CaO	-	1,49
Fiziksel ve Dayanım Özellikleri	İncelik (32 µm elek üstü %)	-	10,9
	Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,98	3,01
	Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g)	4352	4403
	Priz başı (dk)	175	165
	Priz sonu (dk)	230	230
	Hacim genişlemesi (mm)	2,0	1
	Su ihtiyacı (%)	28,2	30,6
	Basınç dayanımı (MPa) 2.gün	20,0	20-26,1
	Basınç dayanımı (MPa) 7.gün	28,6	41,6
	Basınç dayanımı (MPa) 28.gün	-	42,5-62,5

3.1.2. Pomza tozu

Pomza taşı, oluşumu itibariyle büyük oranda boşluklu yapıda olmasından dolayı sahip olduğu hafiflik ve ısı yalıtımı gibi yararlı özellikleri nedeniyle, inşaat sektöründe çoğunlukla hafif yapı elemanlarının üretimi ile dolgu ve yalıtım işlerinde agrega olarak kullanılmaktadır. Ayrıca pomza, uygun kimyasal bileşimi dolayısıyla, öğütülerek betonda puzolanik katkı maddesi olarak kullanılabilir.

Bu çalışmada, Erzurum ili Pasinler ilçesi Demirdöven yöresindeki rezervinden alınan pomza taşı 3 farklı incelikte öğütülmüş ve betonda puzolanik katkı maddesi olarak çimento ağırlığına göre 4 farklı ikame oranıyla kullanılmıştır. Bu pomzanın kimyasal bileşimi, Aşkale Çimento Fabrikası'nda yaptırılan XRF (X-Ray Fluorescence) analizi ile belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan pomza tozunun, beton tasarımı ve incelik tespiti için gerekli olan özgül ağırlık ve özgül yüzey özellikleri ise, Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında ilgili standartlara göre yapılan testler ile belirlenmiştir. Pomza tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiş, kullanılan pomza tozu ve çimento Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.2 Pomza tozunun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Bileşenler	Oran (%)
SiO ₂	66,45
Al ₂ O ₃	13,12
Fe ₂ O ₃	1,82
CaO	1,26
MgO	0,54
SO ₃	0,17
Na ₂ O	2,76
K ₂ O	3,79
Kızdırma kaybı	3,66
Fiziksel Özellikler	Değer
Özgül ağırlık (g/cm ³) (3.000 devir)	2,16
Özgül ağırlık (g/cm ³) (5.000 devir)	2,18
Özgül ağırlık (g/cm ³) (6.000 devir)	2,24
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g) (3.000 devir)	4378
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g) (5.000 devir)	4916
Özgül yüzey (Blaine) (cm ² /g) (6.000 devir)	6.879



Şekil 3.1 Çimento ve pomza tozu

3.1.3. CEN standart kumu

Bu çalışma kapsamında, kontrol ve pomza tozu ikameli harçların pozolanik aktivite ve kıvam tayini için üretilen harç numunelerinin bileşiminde, TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına uygun olarak Limak Batı Çimento'dan temin edilen CEN standart kumu kullanılmıştır. Bu kum, tanecik boyutuna göre önceden harmanlanmış ve deneye hazır 1.350 gramlık plastik torbalar içinde bulunmaktadır. Ayrıca çalışmada, harç numunelerinin hidrasyon ısısı tayini için referans numunesinde TS EN 196-9 (Anonim 2011) standardında belirtildiği gibi, 1.080 gramlık plastik torbalarda bulunan bir diğer CEN standart kumu kullanılmıştır. Bu kumlar Şekil 3.2'de gösterilmiştir.



Şekil 3.2 CEN standart kumu (a. TS EN 196-1 standardında belirtilen 1.350 g , b. TS EN 196-9 standardında belirtilen 1.080 g).

TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına göre CEN standart kumu en az %98 oranında SiO₂ bulundurulmalıdır. CEN standart kumunun tane büyüklüğünün dağılımı Çizelge 3.3’de verilmiştir.

Çizelge 3.3 CEN standart kumunun tane büyüklüğünün dağılımı

Kare Göz Açıklığı (mm)	Kümülatif Elekte Kalan (%)
2,00	0
1,60	7±5
1,00	33±5
0,50	67±5
0,16	87±5
0,08	99±1

3.1.4. Karışım suyu

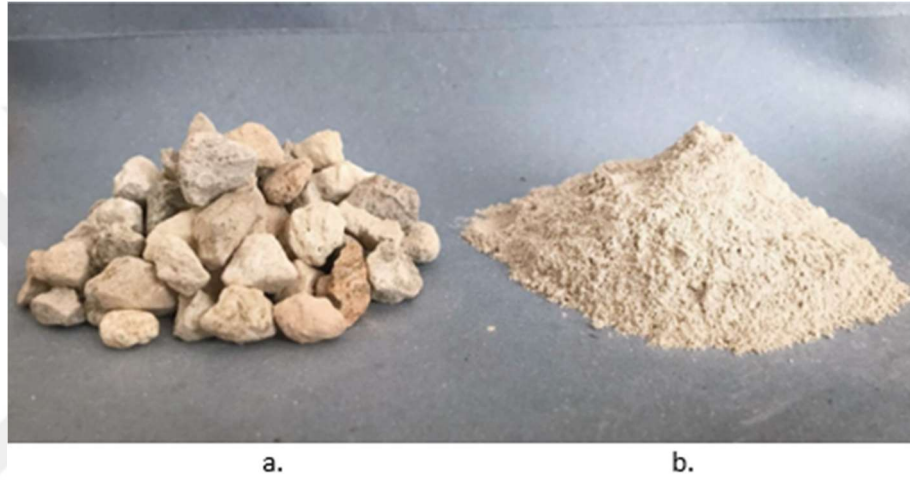
Çalışmada, Erzurum Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemesi Laboratuvarında TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına uygun olarak üretimi yapılan harç numunelerinin bileşiminde, içilebilir nitelikte, temiz ve sıcaklığı yaklaşık 20±5 °C sıcaklığında olan Erzurum şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2. Yöntem

3.2.1. Pomzanın öğütülme işlemi

Pomza, boşluklu yapıda olmasından dolayı nem tutabilme yeteneği oldukça fazladır. Bu nedenle çalışmada, rezervinden nemli durumda alınan pomza agregası öğütme işleminden önce 110±5 °C sıcaklığındaki hava dolaşımli etüvde 48 saat boyunca kurutulmuştur. Aksay (2005), yapmış olduğu araştırmada pomzanın puzolan olarak kullanabilmesi için çimento inceliğinde öğütülmesi gerektiğini ve pomzanın aşındırma özelliği yüksek olduğu için bilyeli karıştırma değirmenlerinin kullanılmasının uygun olabileceğini belirtmiştir. Nitekim bu çalışmada kullanılan pomzanın öğütme işlemi için, TS EN 1097-2 (Anonim 2000a) standardına uygun olarak Los Angeles deney cihazında, 4-8 mm boyut aralığındaki 5 kg pomza agregasının ilk önce 3.000 devirde öğütülerek örnekten 1 kg pomza tozu alınmış, kalan 4 kg pomza 2.000 devir daha

öğütüldükten sonra içinden 1 kg pomza tozu daha alınmış ve kalan 3 kg pomza 1.000 devir daha öğütülmüştür. Sonuçta toplam olarak 3.000, 5.000 ve 6.000 devirlerde öğütülmüş üç farklı inceliğe sahip pomza tozu elde edilmiştir. Üretilen pomza tozlarının 63 μ m elek ile yapılan eleme işleminde, 3.000 devirde öğütülen pomza tozunun %50 den fazlası ve 5.000 ile 6.000 devirde öğütülen pomza tozlarının ise büyük çoğunluğu 63 μ m'dan küçük tane boyutuna sahip olduğu belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan pomza agregası ve öğütülme işleminden sonra pomza tozunun görünümü Şekil 3.3'de verilmiştir.



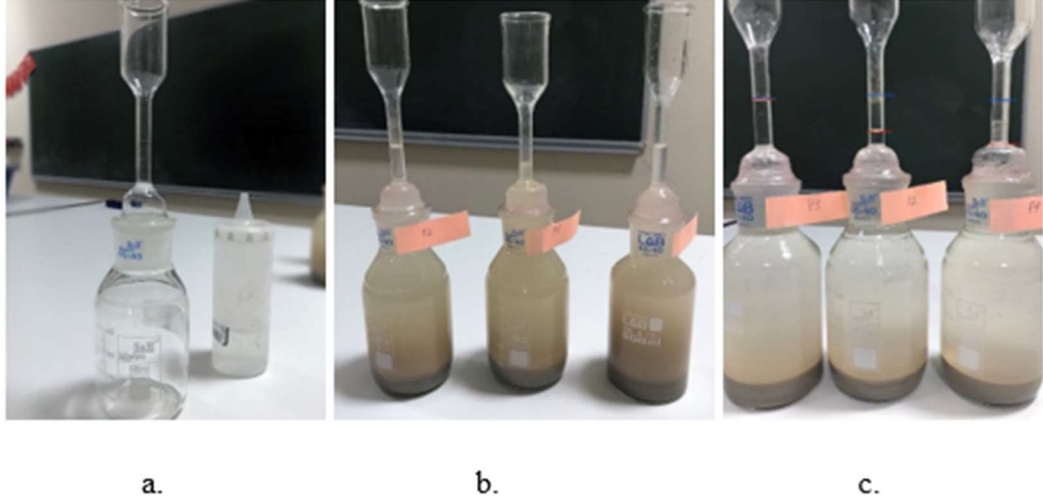
Şekil 3.3 a. 4-8 mm boyut aralığındaki pomza agregası, **b.** Los Angeles cihazında 6.000 devirde öğütülen pomza tozu.

3.2.2. Pomza tozunun tane yoğunluğu için Piknometre deneyi (özellik ağırlık tayini)

Pomza tozunun harç karışım hesapları için gerekli olan tane yoğunluğu, TS EN 1097-7 (Anonim 2001) standardına uygun olarak, farklı incelikteki pomza tozlarının her biri için ayrı ayrı belirlenmiştir. Bu deneyde 500 ml kapasiteli piknometreler kullanılmıştır. Boş ağırlığı M_1 olarak tartılan piknometrelerin içerisine farklı incelikteki pomza tozlarından 100'er gram koyulup, piknometre ile birlikte M_2 ağırlıkları bulunur ve pomza tozu konulmuş piknometreler saf (damıtılmış) su ile doldurulur (Şekil 3.4). İçerisinde hava kabarcıkları kalmaması için sarsma işlemi gerçekleştirilir. 24 saat boyunca 25 °C sıcaklıktaki su içerisinde bekletilen piknometreler tartılarak M_3 ağırlıkları bulunur. Piknometrelerin içi boşaltılıp tamamen su ile doldurulur ve dışı

kurularak tartılır ve ağırlığı M_4 olarak kaydedilir. Aşağıda verilen formül (3.1) ile pomza tozunun özgül ağırlığı hesaplanır.

$$G_s = \frac{M_2 - M_1}{(M_4 - M_1) - (M_3 - M_2)} \quad (3.1)$$



Şekil 3.4 a. Özgül ağırlık tayini için kullanılan 500 ml’lik piknometre, **b.** İçi pomza tozu ve suyla dolu piknometre numuneleri, **c.** 24 saat bekleyen içi pomza tozu ve suyla dolu piknometre numuneleri.

3.2.3. Pomza tozunun Blaine metodu ile inceliğinin tayini (özgül yüzey tayini)

Bu çalışmada kullanılan farklı incelikteki pomza tozları ve çimentoların özgül yüzey alanı ve dolayısıyla incelik düzeyleri, TS EN 196-6 (Anonim 2000b) standardına göre Blaine (hava geçirgenlik) metodu ile belirlenmiştir. Şekil 3.5’de gösterilen Blaine cihazı; manometre, hücre, piston, hücre yuvası ve delikli diskten oluşur. Deneyin ilk aşamasında civa kullanılarak numune yatağının hacmi belirlenir ve daha sonra inceliği bilinen bir çimento ile kalibrasyon yapılır. Kalibrasyon için hücreye filtreler ve kütlesi belirlenen çimento yerleştirilir. Manometrede bulunan sıvı U borusunun en alt seviyesindeyken hücre ağzı kapatılır ve sıvı seviyesi en üst çizgiye çıkana kadar pompayla yükseltilir. Sıvı en üst seviyeye gelince hücre ağzı açılır ve bu andan itibaren manometrenin diğer kolunda, numunenin hava geçirgenliğine bağlı olarak yükselen sıvının hareketi takip edilir ve bu koldaki işaretli iki çizgi arasında sıvının yükselmesi için geçen süre kaydedilir. Kalibrasyon formülü (3.4)’de ilgili işlemler yapılarak K sabiti bulunur. Los Angeles deneyi ile 3.000, 5.000 ve 6.000 devirde öğütülen pomza

3. MATERYAL ve YÖNTEM

tozlarının her birine aynı işlemi uygulayarak özgül yüzey alanı büyüklükleri aşağıda verilen (3.5) bağıntısıyla hesaplanır.



Şekil 3.5 Blaine (hava geçirgenlik) cihazı

$$V_{hücre} = \pi r^2 \times h \quad (3.2)$$

$$m = d_0 \times V \times 0.5 \quad (3.3)$$

$$K = \frac{0,5 \times S \times d \times \sqrt{\eta}}{\sqrt{t} \times \sqrt{e^3}} \quad (3.4)$$

$$S = \frac{\sqrt{e^3} \times K \times \sqrt{t}}{d \times 0,5 \times \sqrt{\eta}} \quad (3.5)$$

$V_{hücre}$: hücre hacmi (cm³)

r : yarıçap (cm)

h : yükseklik (cm)

m : kütle (g)

d_0 : ayar numunesi yoğunluğu (g/cm³)

e : gözeneklilik (0,5)

d : katkı yoğunluğu (g/cm³)

K : kalibrasyon sabiti

S : özgül yüzey (cm²/g)

t : iki çizgi arası geçen süre (s)

η : hava viskozitesi (Pa.s) (0,0001808)'ni ifade etmektedir.

3.2.4. Harç karışımlarının hazırlanması

Çalışmada, harç numune gruplarının kıvam ve basınç dayanımı ile puzolanik aktivite tayini için ayrı ayrı olarak, TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına göre bileşimi 450 g çimento, 1.350 g CEN kumu ve 225 g sudan oluşan harç karışımları hazırlanmıştır. Ayrıca harç numunelerinin hidratasyon ısısı tayini için TS EN 196-9 (Anonim 2011) standardına göre 360 g çimento, 1.080 g CEN standart kumu ve 180 g sudan oluşan harç karışımları hazırlanmıştır.

Bu karışımlar için, çalışma kapsamındaki 2 farklı inceliğe sahip çimento ile üretilen kontrol harç numune grupları dışında, 3 farklı incelikte pomza tozu çimento yerine ağırlıkça literatür ışığında belirlenen dörder farklı oranda ikame edilerek kullanılmıştır. Harç gruplarının bileşen miktarları CEM II 32,5 R ile CEM II 42,5 R çimento türlerinin her ikisi için de aynı olup, kıvam ve puzolanik aktivite tayini için üretilen harç numunelerinin kontrol ve ikameli gruplarına ait kütlece bileşen miktarları Çizelge 3.4’de verilmiştir. Ayrıca, Çizelge 3.5’de hidratasyon ısısı tayini için hazırlanan harç karışımları verilmiştir.

Harç numune gruplarının Çizelge 3.4’de gösterilen kısa kodlamalarında;

- **C32,5**; CEM II 32,5 R türü çimentolu harç numune gruplarını, **C42,5**; CEM II 42,5 R türü çimentolu harç numune gruplarını ifade eder.
- **P1**; 3.000 devirde öğütülen 4.378 cm²/g inceliğe sahip pomza tozu ikameli numune gruplarını, **P2**; 5.000 devirde öğütülen 4.919 cm²/g inceliğe sahip pomza tozu ikameli numune gruplarını, **P3**; 6.000 devirde öğütülen 6.879 cm²/g inceliğe sahip pomza tozu ikameli numune gruplarını ifade eder.
- %5, 10, 20 ve 30 gösterimleri ise; harçların bileşimindeki pomza tozu ikame oranlarını ifade eder.

Bu çalışmada harç numune gruplarının pomza tozu ikame oranları; Hossain (2005), Demirel (2008) ve Zeyad et al. (2019) gibi incelenen bazı çalışmaların sonuç ve önerileri ışığında %5, 10, 20, 30 olabileceği öngörülmüştür.

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Çizelge 3.4 Puzolanik Aktivite İndeksi (PAİ) için hazırlanan harç karışımları

Harç Numune Grupları	Kıvam ve PAİ için Karışım Miktarları (TS EN 196-1)			
	Çimento (g)	Pomza tozu (g)	Su (g)	CEN Kumu (g)
C32,5-Kontrol	450	0		
C32,5-P1%5	427,5	22,5		
C32,5-P1%10	405	45		
C32,5-P1%20	360	90		
C32,5-P1%30	315	135		
C32,5-P2%5	427,5	22,5		
C32,5-P2%10	405	45		
C32,5-P2%20	360	90		
C32,5-P2%30	315	135		
C32,5-P3%5	427,5	22,5		
C32,5-P3%10	405	45		
C32,5-P3%20	360	90		
C32,5-P3%30	315	135		
C42,5-Kontrol	450	0	225	1.350
C42,5-P1%5	427,5	22,5		
C42,5-P1%10	405	45		
C42,5-P1%20	360	90		
C42,5-P1%30	315	135		
C42,5-P2%5	427,5	22,5		
C42,5-P2%10	405	45		
C42,5-P2%20	360	90		
C42,5-P2%30	315	135		
C42,5-P3%5	427,5	22,5		
C42,5-P3%10	405	45		
C42,5-P3%20	360	90		
C42,5-P3%30	315	135		

Çizelge 3.5 Hidratasyon ısısı tayini için hazırlanan harç karışımları

Harç Numune Grupları	Hidratasyon Isısı için Karışım Miktarları (TS EN 196-9)			
	Çimento (g)	Pomza tozu (g)	Su (g)	CEN Kumu (g)
C32,5-Kontrol	360	0		
C32,5-P1%10	324	36		
C32,5-P2%10	324	36		
C32,5-P3%10	324	36		
C42,5-Kontrol	360	0	180	1.080
C42,5-P1%10	324	36		
C42,5-P2%10	324	36		
C42,5-P3%10	324	36		

Harç numunelerinin karıştırma işlemi için, bileşen miktarları Çizelge 3.4 ve Çizelge 3.5’de verilen çimento ve ikameli gruplarda pomza tozu ile karışım suyu Şekil 3.6’da gösterilen harç karıştırma mikserine koyulduktan sonra beklemeden mikser 62,5 devir/dakika ile düşük devirde 30 saniye boyunca çalıştırılır. Daha sonra mikserde 30 saniye boyunca karışıma CEN kumu ilavesi yapılır ve mikser 125 devir/dakika ile yüksek devirde 30 saniye daha çalıştırılır. Mikser durdurularak kabın içinde bulunan harç karışımı spatula yardımıyla hızlı bir şekilde kabın ortasına toplanır ve yüksek devirde 60 saniye boyunca karıştırılmaya devam edilir. Bu işlem sonunda harç karışımının, kalıplara yerleştirilmesi veya test işlemlerine hemen başlanır.



Şekil 3.6 Harç karıştırma mikseri

3.2.5. Harç numunelerinin kıvam tayini (yayılma tablası deneyi)

Çalışmada, taze harç numunelerinin kıvam tayini TS EN 1015-3 (Anonim 2000c) standardına göre yayılma tablası ile yapılmıştır. Bu deney için kullanılan Şekil 3.7’deki yayılma tablası; üst tarafında dairesel plak ve alt tarafında çevirme kolu bulunan düzeneğe kesik koni biçiminde kalıptan oluşan bir sistemdir.



Şekil 3.7 Harç yayılma tablası, **a.** Harcın kesik koniye yerleştirilmesi, **b.** 15 vuruş sonrası yayılan harç, **c.** Yayılan harcın d_1 ve d_2 doğrularında ölçülmesi.

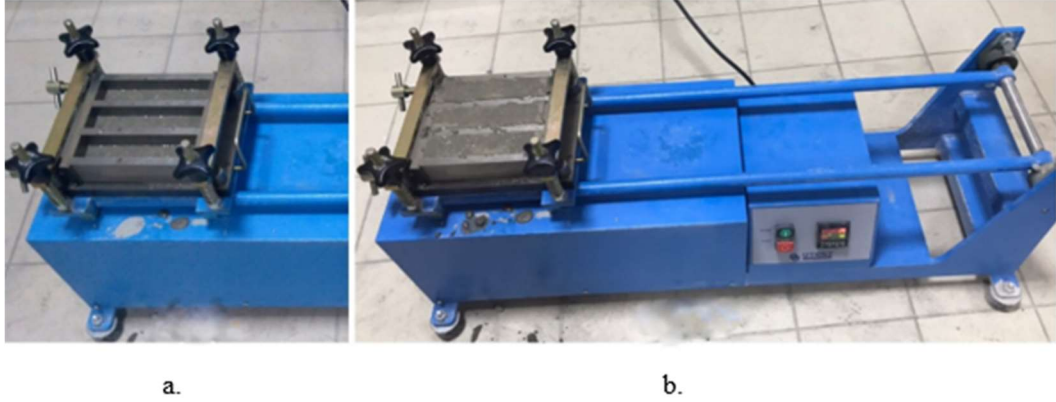
Yayılma tablası deneyinde, TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına uygun olarak hazırlanan harç numunesi, vakit kaybetmeden üzeri yağlanmış dairesel levhanın merkezine koyulan kesik koni içerisine önce ilk yarısına kadar doldurulup 10 defa şişlenir ve ardından ikinci yarısı da doldurulup 10 defa şişlenerek yerleştirilir. Yerleştirilen harç üzerine gerektiğinde kesik koni tam dolacak şekilde harç ilavesi yapılır veya fazla bulunan harç spatula yardımıyla koni üzerinden alınır. 15 s bekletilen kesik koni dik bir şekilde kaldırılır. Küçük bir tepe şeklinde bulunan harç çevirme kolu yardımıyla her biri 1 saniyeye denk gelecek şekilde 15 defa çevrilerek harcın yayılması sağlanır. Şekil 1.5’de görüldüğü gibi yayılan harç birbirine dik doğrultularda (d_1 ve d_2) cetvel ile ölçülerek harcın ortalama yayılma çap ölçüsü belirlenir. Bu çap ölçüsü doğrudan harcın kıvam düzeyini ifade eder.

3.2.6. Harç numunelerinin üretimi

Çalışmada, farklı incelikteki çimento ve pomza tozu ikameli harç numune gruplarının basınç dayanımı ve puzolanik aktivite tayini için 40x40x40 mm boyutlu harç numunelerinin üretimine ihtiyaç duyulmuştur. Harç numunelerinin üretimi için, TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına uygun olarak hazırlanan harç karışımları, yapışmayı önlemek için önce yağlanan ve sıkıştırma işlemi için Şekil 3.8’de gösterilen sarsma cihazına (şok masası) sabitlenen 40x40x160 mm boyutlu çelik kalıplara iki eşit tabaka halinde yerleştirilir. Standartta belirtildiği gibi; harç tabakalarının ilki kalıba doldurulur ve şok masasında 60 sarsma ile sıkışması sağlanır. Daha sonra ilk tabaka

3. MATERYAL ve YÖNTEM

üzerine ikinci tabaka doldurularak spatula ile düzleştirilir ve ikinci 60 sarsma ile sıkıştırılır.



Şekil 3.8 Sarsma cihazı, **a.** ilk kademinin yerleştirilmesi, **b.** ikinci kademenin yerleştirilmesi

Kalıplara yerleştirilen harç numunelerinin açıkta olan üst yüzeyleri nem kaybını engellemek için bir örtü ile örtülür. 24 saat boyunca kalıpta bekletilen numuneler sertleşince (Şekil 3.9), zarar görmeyecek şekilde kalıplardan çıkarılır ve isimlendirilir (Şekil 3.10).



Şekil 3.9 24 saat kalıpta bekletilen harç numuneleri



Şekil 3.10 24 saat sonra kalıptan çıkarılan harç numuneleri

Kalıptan çıkarılan harç numuneleri, 7 gün boyunca standart su küründe bekletildikten sonra Şekil 3.11’de gösterilen taş kesme aletiyle kesilerek yaklaşık 40x40x40 mm boyutlu küp numuneler elde edilmiştir. Bu yöntemle, çalışma kapsamındaki basınç dayanım testlerinde kullanılmak üzere, dört farklı kür süresinin her biri için aynı harç karışımından üçer adet harç numunesi hazırlanmıştır. Çalışmada, iki farklı incelikte çimento ile üç farklı incelik ve dörder farklı oranda pomza tozu ikameli harç grupları oluşturulmuştur. Nitekim 2’si kontrol grubu olmak üzere toplam 26 farklı harç numune grubunun 4 farklı kür süresinde basınç dayanımı ve puzolanik aktivite tayini için toplamda 312 adet küp numune hazırlanmış ve kullanılmıştır.



Şekil 3.11 Spiralli taş kesme cihazı

3. MATERYAL ve YÖNTEM

Hazırlanan 40x40x40 mm boyutlu harç numuneleri, TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına uygun olarak 7, 28, 56 ve 90 günlük tek eksenli basınç dayanımlarını belirlemek için 20 ± 2 °C sıcaklıktaki kirece doymun su küründe bekletilmiştir. Numuneler, üretim tarihinden itibaren kalıpta sertleşmelerinin beklendiği bir günün ardından kür havuzunda su kürüne koyulmuş ve kür süresinin tamamlanacağı tarihten bir gün önce kürden çıkarılarak laboratuvar ortamında kurumaya bırakılıp, hava kurusu durumda dayanım testlerinin yapılması sağlanmıştır. Harç numunelerinin, kür havuzundaki su kürü işlemi Şekil 3.12’de, hava kurusu durumları ise Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



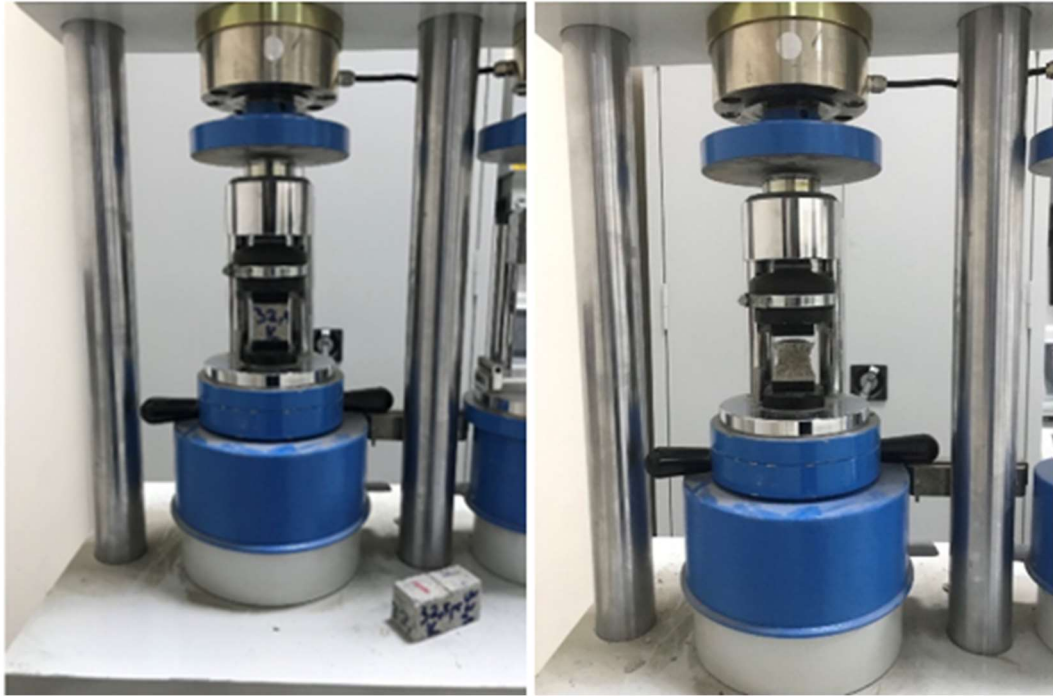
Şekil 3.12 Harç numunelerinin su kürü işlemi



Şekil 3.13 40x40x40 mm küp harç numuneleri

3.2.7. Harç numunelerinin basınç dayanımı tayini

Çalışmada, harç numune gruplarının 7, 28, 56 ve 90 günlük standart su kürü işlemi sonundaki basınç dayanımları belirlenmiştir. TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına göre yapılan bu testlerde, farklı kür süreleri ve numune gruplarının her biri için hazırlanan üçer adet 40×40×40 mm boyutlu küp numune kullanılmıştır. Test öncesinde numunelerin enkesit boyutları ($a \times b$) ölçülüp not edilir ve hidrolik olarak tek eksenli basınç yükü uygulayabilen Şekil 3.14'teki çimento test presine yerleştirilir. Pres aletinde harç numunelerinin her birine, yaklaşık 0,4 MPa/s sabit yükleme hızı ile basınç yükü kırılma anına kadar uygulanır. TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına göre harç numunesinin basınç dayanımı (N/mm^2); numunenin kırılmasına sebep olan en büyük yükün (N), numune enkesit alanına ($A=a \times b$) bölünmesi ile hesaplanır.



Şekil 3.14 Çimento test presi ile numunelerin basınç dayanımının ölçülmesi

3.2.8. Harç numunelerinin hidratasyon ısısı tayini

Üretilen harç karışımlarının hidratasyon ısını belirlemek için TS EN 196-9 (Anonim 2011) standardında belirtilen Yarı Adyabatik (Langavant) Yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde kullanılan düzenek, Şekil 3.15'de görülen biri referans numunesinin yerleştirildiği kalorimetreden diğeri ise deneyde hazırlanan harç

3. MATERYAL ve YÖNTEM

numunesinin yerleştirildiği kalorimetreden oluşmaktadır. Deneyin amacı, hazırlanan çimento harcında meydana gelen hidrasyon ısısının belirlenmesidir. TS EN 196-9 (Anonim 2011) standardına göre, hazırlanan standart harç karışımının 41 saat boyunca hidrasyon ısısı ölçülerek, her bir gram çimento için joule (joule.gr^{-1}) şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 3.15 Hidratasyon ısısı kalorimetre deney düzeneği



Şekil 3.16 Hidratasyon ısısı deneyi silindir harç numuneleri

Deney numunesinde kullanılan harç bileşimi; 360 g çimento, 1.080 g CEN standart kumu ve 180 g sudan oluşmaktadır. Su ile çimento bir araya geldiği andan itibaren 6 dk içinde hem karıştırılmalı hem de harç kutusuna yerleştirilerek

kalorimetreye konulması gerekmektedir. Şekil 3.16’de verilen 800 cm³ hacminde silindir harç kutusunun içerisine yerleştirilen toplam numune ağırlığı standartta belirtildiği gibi 1.575±1 g olmalıdır. Deney ve referans harç numunelerinin önce harç kutularına ve ardından kalorimetrelere yerleştirilmesinden sonra, TS EN 196-9 (Anonim 2011) standardında belirtildiği gibi 41 saat boyunca referans numune ile harç numunesinin hidratasyon ısısındaki değişimler incelenmektedir. Harç numunelerinin ölçülen hidratasyon ısısı verileri SIRIUS programı ile toplanmaktadır. Harç karışımlarının hidratasyon ısısı hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılmaktadır.

$$Q = A+B \quad (3.6)$$

$$A = \frac{c}{m_c} \theta_t \quad (3.7)$$

$$B = \frac{1}{m_c} \sum_0^t a_i \times \theta_i \times \Delta t_i \quad (3.8)$$

Q : Numunenin her gramı için joule cinsinden hidratasyon ısısı

A : Kalorimetrede toplanan ısı

B : Atmosfere yayılan ısı kaybı

c : Kalorimetrenin toplam ısıl kapasitesi (J.K⁻¹), (c = 0,8(m_c+m_s)+3,8m_w+0,5m_b+μ)

m_c : Bağlayıcı kütlesi (g)

m_s : Kumun kütlesi (g)

m_w : Suyun kütlesi (g)

m_b : Boş harç kutusunun kapağıyla birlikte kütlesi (g)

μ : Boş kalorimetrenin ısıl kapasitesi (g)

θ_t : Verilen zamanda referans kalorimetre ile deney kalorimetresi arasındaki fark (Kelvin)

a_i : Kalorimetrenin ısı kaybı katsayısı (J. h⁻¹K⁻¹)

t_i : Hidratasyon süresi (saat)’ni ifade etektedir.

Deneyde SIRIUS programı ile toplanan veriler CEMTECH programına aktarılmıştır ve bu program yardımıyla hidratasyon ısısını hesaplayarak gerekli Zaman-Hidratasyon Isısı grafikleri hazırlanmıştır.

3.2.9. Harç numunelerinin SEM-EDS görüntülerinin alınması

Basınç dayanımı ve puzolanik aktivitesi incelenen pomza tozu ikameli harç numuneleri ile kontrol numunelerinden alınan örneklerden Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM; Scanning Electron Microscope) yardımıyla görüntüler alınmıştır. Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) yardımıyla ise kullanılan numunenin belirli bir bölgesinin kimyasal bileşimi hakkında verilere ulaşılmıştır. Erzurum Teknik Üniversitesi İleri Teknoloji Araştırma Merkezi (YÜTAM) tarafından ileri görüntüleme laboratuvarında SEM görüntüleri alınmıştır. Kullanılan Quanta FEG 250 taramalı elektron mikroskobu (SEM), yüksek vakum, düşük vakum ve ESEM olarak üç modda çok yönlü analiz için yüksek performanslı sistemdir. Quanta FEG 250 SEM sistemi, enerji dağılımlı spektrometre, dalga boyu dağılımlı X-Işınları spektroskopisi ve elektron geri yansıma kırınımı gibi analitik sistemlerden oluşmaktadır. Ayrıca, alan emisyon tabancası (FEG) sistemleri, parlak alanlı ve karanlık alanlı örnek görüntüleme için bir S/TEM dedektörü içermektedir. Şekil 3.17’de Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) verilmiştir.



Şekil 3.17 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Bu çalışmada, iki farklı inceliğe sahip CEM II /B-LL 32,5 R ve CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimentolar ile pomza taşının öğütülmesiyle elde edilen üç farklı incelikteki pomza tozu çimento yerine kütlece %5, 10, 20, 30 oranlarında ikame edilerek harç numuneleri üretilmiştir. Pomza taşının öğütülme işlemi, Los Angeles deney cihazında 3.000, 5.000 ve 6.000 devirlerde yapılarak, sırasıyla 4.378, 4.916 ve 6.879 cm²/g özgül yüzey alanına sahip pomza tozları elde edilmiştir. Çimento türlerinin her biri için kontrol grupları ve üç farklı incelikteki pomza tozlarının dörder farklı ikame oranında kullanılmasıyla toplamda 26 harç numune grubu üretilmiştir. Harç numunelerine taze halde kıvam ve hidrasyon ısısı deneyleri yapılmıştır. Ayrıca harç numunelerine sertleşmiş halde 7, 28, 56 ve 90 günlük sürelerle uygulanan standart su kürü sonunda basınç dayanım deneyleri yapılarak puzolanik aktivite indeksleri (PAİ) incelenmiştir. Çalışmada, pomza tozu ikameli harçların kıvam, hidrasyon ısısı ve puzolanik aktivite indeksi özelliklerine inceliğin etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca, harçların basınç dayanımı gelişimine bağlı olarak, çimento ile pomza tozu inceliğinin uyumu araştırılmıştır. Bu amaçlar için yapılan testlerden elde edilen bulgular, bu bölümde ilgili başlıklar altında sunulmuştur.

4.1. Pomza Tozlarının Özgül Ağırlık Tayini Deney Sonuçları

Çalışma kapsamında, harç numunelerinin üretiminde çimento yerine kütlece ikameli olarak kullanılan ve Los Angeles cihazında 3.000, 5.000 ve 6.000 devirlerde öğütülerek elde edilen pomza tozlarının, TS EN 197-7 (Anonim 2001) standardına uygun olarak piknometre metodu ile belirlenen özgül ağırlık sonuçları Çizelge 4.1’de verilmiştir.

Çizelge 4.1 Pomza tozlarının özgül ağırlık sonuçları

Pomza Tozu	Pomza Tozunun İncelik Düzeyi		
	P1, 4.378 cm ² /g (3.000 devir)	P2, 4.919 cm ² /g (5.000 devir)	P3, 6.879 cm ² /g (6.000 devir)
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,16	2,18	2,24

4.2. Pomza Tozlarının Özgül Yüzey Alanı Tayini Blaine Deney Sonuçları

Çalışmada, üç farklı incelikte öğütülmüş pomza tozları ile CEM II 32,5 R ve CEM II 42,5 R türü çimentoların özgül yüzey alanı (Blaine incelik) değerleri, TS EN 196-6 standardına uygun olarak Hava Geçirgenlik (Blaine) Metodu ile belirlenmiştir. Çalışmada, harç numunelerinin bileşiminde kullanılan çimento ve pomza tozlarının belirlenen özgül yüzey alanı (Blaine incelik) değerleri Çizelge 4.2’de verilmiştir. Pomza tozları ve çimentoların inceliği karşılaştırıldığında; her üç devirde öğütülen pomza tozlarının özgül yüzey alanları CEM II 32,5 R tipi çimentonun özgül yüzey alanından daha büyük, 5.000 ve 6.000 devirde öğütülen pomza tozlarının özgül yüzey alanları ise CEM II 42,5 R tipi çimentonun özgül yüzey alanından daha büyüktür. Belirlenen bu sonuçlara göre, çalışmada üretilen harçların bileşiminde puzolanik katkı maddesi olarak kullanılmak üzere öğütülerek elde edilen üç farklı incelikteki pomza tozları, TS 25 (Anonim 2008) standardında, bir mineralin puzolan olarak kullanılması için öngörülen özgül yüzey alanı en az $4.000 \pm 25 \text{ cm}^2/\text{g}$ olması koşulunu sağlamaktadır.

Çizelge 4.2 Çimento ve pomza tozlarının özgül yüzey alanı değerleri

İncelik Özelliği	CEM II 32,5R	CEM II 42,5R	P1 (3.000 devir)	P2 (5.000 devir)	P3 (6.000 devir)
Özgül Yüzey Alanı (Blaine inceliği) (cm^2/g)	4.352	4.403	4.378	4.919	6.879

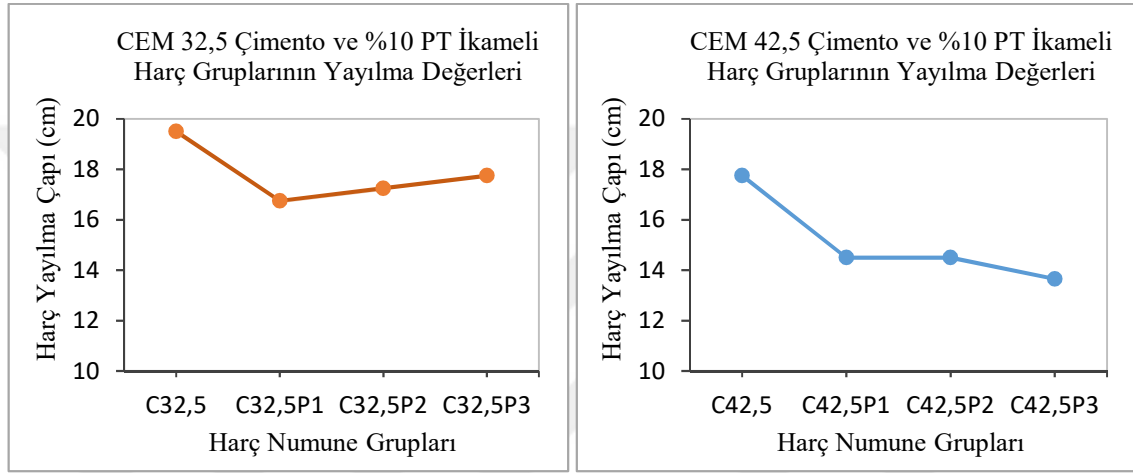
4.3. Harç Numunelerinin Kıvam Tayini Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında üretilen harç numunelerinin, taze durumda iken yayılma tablası deneyi ile belirlenen kıvam (yayılma çapı) sonuçları ile kontrol gruplarına göre yüzde (%) değişim oranları Çizelge 4.3’de verilmiş ve yayılma çapı değerleri Şekil 4.1’de grafik olarak gösterilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.3 Kontrol ve %10 PT ikameli harç gruplarının kıvam (yayılma) değerleri

Harç Grupları	Yayılma Çapı Değerleri (cm)	Kontrol Gruplarına Göre Değişim (%)
C32,5	19,50	-
C32,5P1%10	16,75	-14,1
C32,5P2%10	17,25	-11,5
C32,5P3%10	17,75	-9,0
C42,5	17,75	-
C42,5P1%10	14,50	-18,3
C42,5P2%10	14,50	-18,3
C42,5P3%10	13,65	-23,1



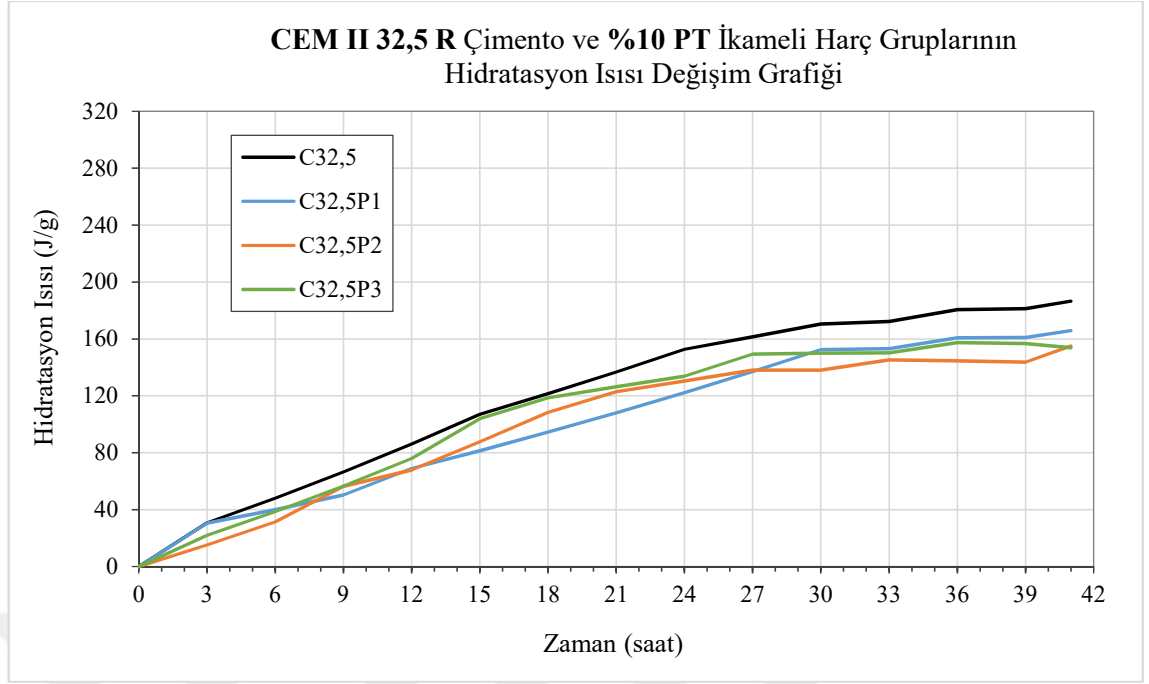
Şekil 4.1 Kontrol ve %10 PT ikameli harç gruplarının kıvam (yayılma) değerleri

Hazırlanan harç gruplarında su/bağlayıcı oranı sabit tutulmuştur. CEM II 32,5 R çimento ile hazırlanan harçların kontrol grubu (pomza tozu ikamesiz) ve P1, P2, P3 inceliğindeki %10 pomza tozu ikameli harç grupları, CEM II 42,5 R çimento ile üretilen harçların aynı gruplarına kıyasla daha çok yayılma göstermiştir. Pomza tozu ikameli harç gruplarında pomza tozu inceliği arttıkça, CEM II 32,5 R çimentolu harçlarda yayılma miktarı artmış, CEM II 42,5 R çimentolu harçlarda ise yayılma miktarı azalmıştır. Farklı inceliğe sahip bu çimentoların her biri için P1, P2 ve P3 inceliğindeki %10 PT ikameli harç gruplarında, aynı tür çimento ile üretilen harç gruplarının kontrol grubuna göre kıvam (yayılma çapı) değerlerinin tümünde gerçekleşen azalış oranları yüzde (%) olarak Çizelge 4.3’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, CEM II 32,5 R tipi çimentolu gruplarda en düşük inceliğe sahip P1 inceliğindeki %10 PT ikameli harç grubunun kıvam değerinde %14,1 ile en büyük azalış meydana gelmiştir. Bunun sebebinin SEM görüntülerinde de tespit edilen pomza tozunun yüzey yapısının çimento tanesi gibi küresel olmayıp köşeli olmasından kaynaklı yüzeyinde daha fazla su tutmuş

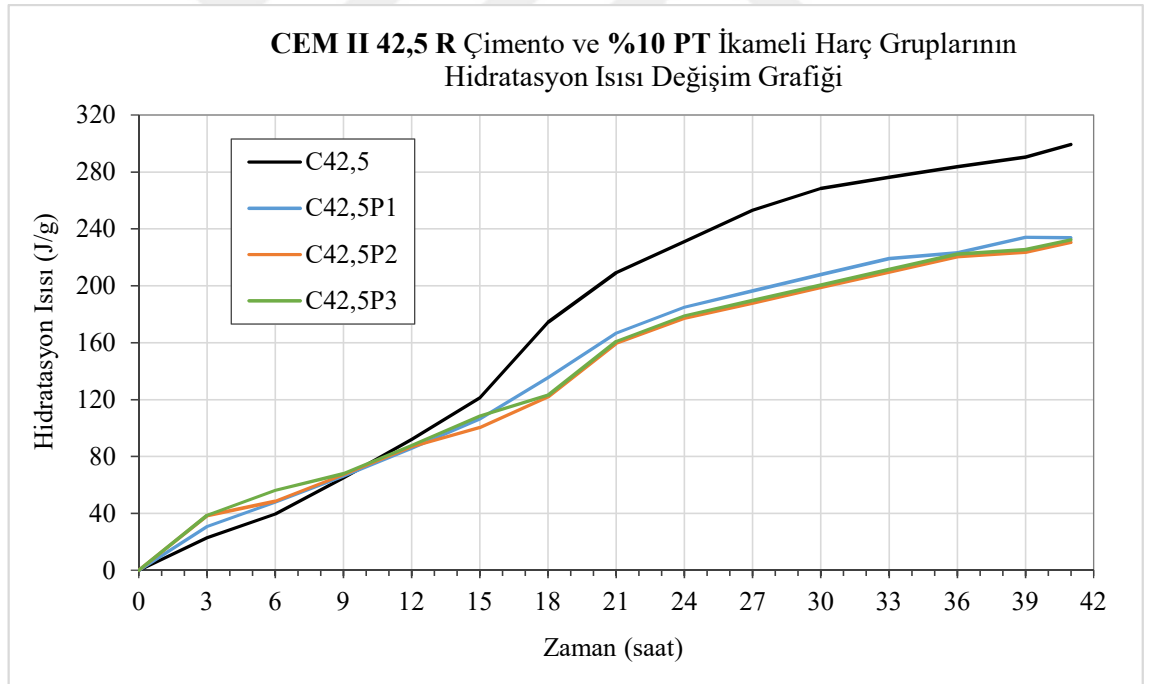
olabileceği ve pomzanın boşluklu yapısından dolayı iri tanelerin daha çok su emmiş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, CEM II 42,5 R çimentolu gruplardan en yüksek inceliğe sahip P3 inceliğindeki %10 PT ikameli harç grubunun kıvam değerinde %23,1 ile en büyük azalış meydana gelmiştir. Pomza tozu ikameli numune gruplarının kıvamında bu azalışlar tespit edilmekle birlikte, harçların kalıplara yerleştirilmesinde güçlük yaşanmamıştır. Harçların kıvamındaki bu azalmanın, bileşiminde kullanılan çimento ve puzolan inceliğinin artmasına bağlı olarak, harç karışımındaki toplam katı parçacık yüzey alanının artması sonucu, aynı işlenebilirlik için gereken su ihtiyacının da artmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Literatürde bu durumu destekleyen çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin Sun et al. (2021), Portland çimentosu yerine farklı boyutlarda ikame ettiği nano-silika ile hazırlanan harçların işlenebilirliğini incelemiş ve katkı olarak kullanılan nano-silikanın inceliğinin artmasıyla harcın işlenebilirliğinin azaldığını belirtmiştir. Ayrıca Özcan ve Koç (2018), Portland çimentosu yerine pomza tozu ikamesinde bulunduğu harç numunelerinde pomza tozunun akışkanlığı azaltıcı etkisinin olduğunu ve pomza tozu oranının artmasıyla harcın işlenebilirliğinin azaldığını vurgulamıştır.

4.4. Harç Numunelerinin Hidratasyon Isısı Deney Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Çalışmada, CEM II 32,5 R ve CEM II 42,5 R türü çimentolar ile üretilen harçların kontrol grupları ile yalnız %10 pomza tozu (PT) ikameli harç grupları üzerinde yapılan hidratasyon ısısı deney sonuçları Şekil 4.2 ve Şekil 4.3’de gösterilmiştir.



Şekil 4.2 CEM II 32,5 R Çimento ve %10 PT ikameli harç ikameli harç gruplarının hidratasyon ısısı değişim grafiği.



Şekil 4.3 CEM II 42,5 R Çimento ve %10 PT ikameli harç ikameli harç gruplarının hidratasyon ısısı değişim grafiği.

Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 TS EN 196-9'a göre incelendiğinde ilk 41 saatlik süreç genelinde %10 pomza tozu ikameli harç numuneleri kontrol numuneleri ile kıyaslandığında hidratasyon ısısının azaldığı saptanmıştır. %10 pomza tozu ikameli numunelerin hidratasyon ısısında, özellikle ilk 12 saatten sonra kontrol numunelerine

kıyasla daha belirgin azalma miktarları olduğu görülmektedir. CEM II 42,5 R türü çimento ile hazırlanan numunelerde bu azalmalar daha belirgindir. Deney sonucunda, ilk saatlerde pomza tozu katkılı numunenin hidrasyon ısısının kontrol numunesinin değerine yakın olduğu görülmektedir. Ancak C_3S ve C_2S hidrasyonu ile ortaya çıkan $Ca(OH)_2$ kullanılmasıyla reaksiyona girerek ısı artışı meydana geldiği, bu artış miktarının mineral katkılı çimentolarda daha fazla olduğu görülmektedir. 41 saat sonunda CEM II 32,5 tip çimento ile hazırlanan numuneler incelendiğinde kontrol numunesine kıyasla %10 pomza tozu ikameli numunelerde sırasıyla P1 inceliğinde %7,02, P2 inceliğinde %10,70 ve P3 inceliğinde %11,04 oranında hidrasyon ısısının azaldığı, CEM II 42,5 tip çimento ile hazırlanan numuneler incelendiğinde ise kontrol numuneye kıyasla %10 pomza tozu ikameli numunelerde sırasıyla P1 inceliğinde %21,74, P2 inceliğinde %23,08 ve P3 inceliğinde %22,41 oranında hidrasyon ısısının azaldığı tespit edilmiştir. Referans numune deney boyunca 18 °C civarı ölçülmüş olup hazırlanan numunelerin ilk sıcaklıkları 18 °C civarında ölçülmüştür. C42,5P2 ve C42,5P3 numuneleri haricinde elde edilen numunelerin ilk sıcaklıkları referans numunesiyle aynı olup, bu iki numunenin ilk sıcaklıkları Şekil 1.2.b de verildiği gibi daha yüksek değerlerdedir. Bunun nedeni pomza tozunun inceliğinden kaynaklı hızlı reaksiyona girmiş olabileceği düşünülmektedir. Deney sonucunda pomza tozunun hidrasyon ısısını düşürdüğü, pomza tozu ikamesinin hidrasyon ısısının düşürülmesinde inceliğin çok fazla etkisinin olmadığı ancak pomza tozunun inceliğinin artması ile hidrasyon ısısının çok az miktarlarda dahi olsa azaldığı belirlenmiştir. Çimento inceliği arttıkça hidrasyon ısısının arttığı bilinmektedir. Bu yüzden CEM II 42,5 R çimentonun yüzey alanı CEM II 32,5 R tipi çimentosundan daha büyük olduğu için CEM II 42,5 R çimentosunun hidrasyon ısısı daha yüksek seviyelerde ölçülmüştür. Ayrıca içeriğinde bulunan klinker oranı da hidrasyon ısısını etkiler.

Thongsanitgarn et al. (2014), Portlant çimentosunda farklı inceliklere sahip kireçtaşı tozunu farklı oranlarda ikame ederek harç numuneleri hazırlamış ve bu harçlar üzerinde kireç taşı tozunun inceliğinin hidrasyon ısısına etkisini incelemiştir. Bulunan sonuçlar neticesinde kireçtaşı tozunun inceliğinin artmasıyla hidrasyon ısısında çok az miktarlarda azalma olduğu görülmüştür. Literatür çalışması ile yapılan deney sonuçları birbirini destekler niteliktedir. Bir başka çalışmada ise Ustabas et al. (2021), farklı inceliğe sahip obsidiyen puzolan katkı maddesinin çimento harç numunelerinin

hidratasyon ısısı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Kullanılan obsidiyenin inceliğinin artması ile hidratasyon ısısında artış olduğu görülmüştür. Yapılan literatür araştırmaları ile deney çalışmasının sonucunda her puzolanın inceliğinin farklı sonuçlara neden olduğu fark edilmiştir. Ayrıca, Khalaf et al. (2018) çimento ile farklı oranlarda uçucu kül ikameli numuneler hazırlamış ve bu numunelerin hidratasyon ısısında meydana gelen değişimleri incelemiştir. Kullanılan puzolanların ikame oranının arttıkça hidratasyon ısısının azaldığı çalışma sonunda ifade edilmiştir. Bu çalışma sonucunda pomza tozunun hidratasyon ısısını düşürdüğü, hidratasyon ısısından kaynaklı iç gerilmeleri azaltarak çatlak oluşumunun önüne geçebileceği söylenebilir.

4.5. Harç Gruplarının Basınç Dayanım Sonuçları ve Değerlendirilmesi

CEM II 32,5 R ve CEM II 42,5 R tür çimentolar ile üç farklı incelikteki pomza tozu, çimento yerine dört farklı ikame oranında kullanılarak üretilen harç numunelerinin, dört farklı kür süresindeki basınç dayanımı ve kontrol numuneye göre % değişim oranları Çizelge 4.4'te verilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.4 Harç gruplarının farklı kür sürelerindeki basınç dayanımı sonuçları

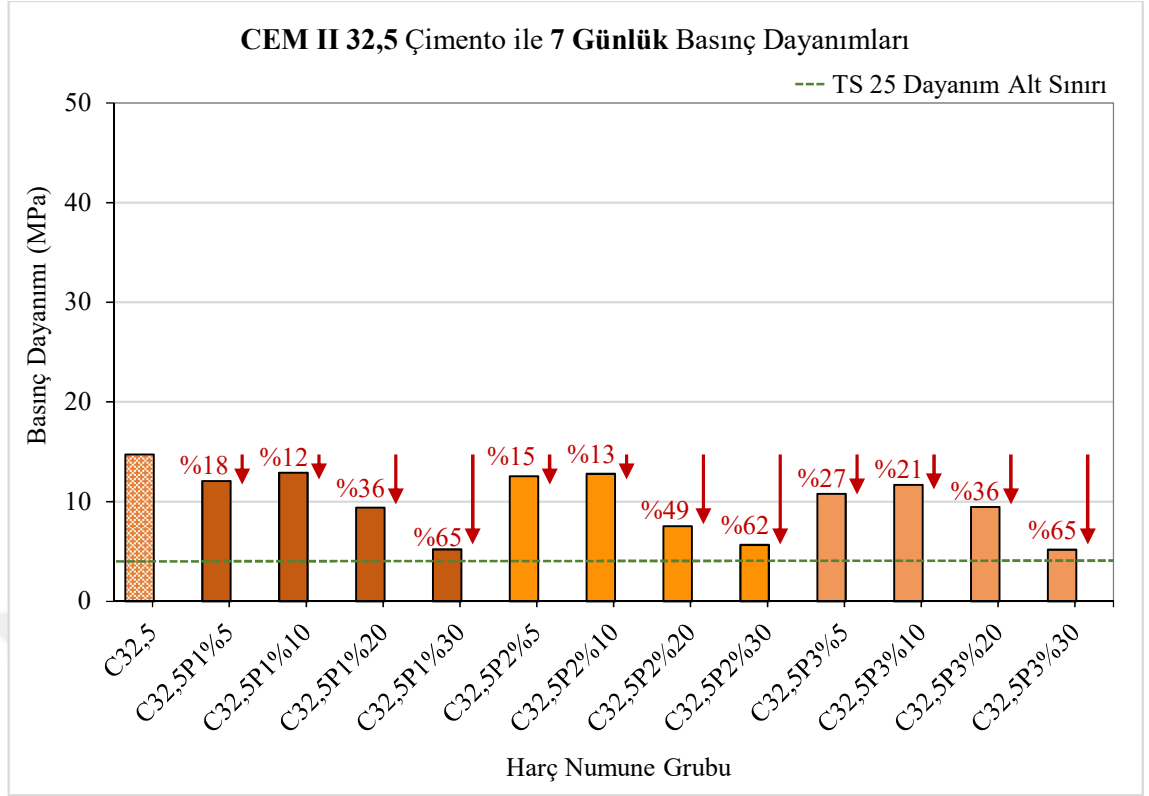
Harç Numune Grupları	Kür Süresi							
	7. gün		28. gün		56. gün		90. gün	
	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Değişim oranı (%)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Değişim oranı (%)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Değişim oranı (%)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Değişim oranı (%)
Kontrol-32,5	14,72	-	26,17	-	29,73	-	30,64	-
C32,5-P1%5	12,06	-18	26,66	+2	30,32	+2	32,08	+5
C32,5-P1%10	12,9	-12	23,62	-10	28,01	-6	27,17	-11
C32,5-P1%20	9,39	-36	18,89	-28	20,15	-32	20,6	-33
C32,5-P1%30	5,21	-65	11,83	-55	14,06	-53	16,98	-45
C32,5-P2%5	12,55	-15	22,34	-15	27,97	-6	28,56	-7
C32,5-P2%10	12,79	-13	23,03	-12	29,4	-1	30,47	-1
C32,5-P2%20	7,53	-49	15,04	-43	19,49	-35	20,01	-35
C32,5-P2%30	5,66	-62	12,58	-52	15,46	-48	14,32	-53
C32,5-P3%5	10,79	-27	23,29	-11	28,64	-4	30,28	-1
C32,5-P3%10	11,68	-21	23,71	-9	28,55	-4	30,86	+2
C32,5-P3%20	9,47	-36	20,37	-22	26,04	-13	27,25	-11
C32,5-P3%30	5,18	-65	15,93	-39	22,38	-25	21,77	-29
Kontrol-42,5	30,2	-	37,65	-	38,26	-	38,59	-
C42,5-P1%5	25,49	-16	32,83	-13	33,17	-13	38,82	+1
C42,5-P1%10	22,8	-25	33,82	-10	33,99	-11	36,54	-5
C42,5-P1%20	17,45	-42	28,36	-25	27,14	-29	26,78	-31
C42,5-P1%30	12,99	-57	25,22	-33	24,18	-37	23,97	-38
C42,5-P2%5	26,34	-13	35,2	-7	35,76	-7	40,56	+5
C42,5-P2%10	23,13	-23	35,71	-5	37,94	-1	41,65	+8
C42,5-P2%20	16,84	-44	30,62	-19	33,69	-12	33,38	-14
C42,5-P2%30	15,45	-49	26,73	-29	28,06	-27	30,63	-21
C42,5-P3%5	31,51	+4	40,01	+6	42,09	+10	46,81	+21
C42,5-P3%10	28,74	-5	39,57	+5	41,17	+8	43,34	+12
C42,5-P3%20	25,11	-17	33,23	-12	34,27	-10	41,74	+8
C42,5-P3%30	19,92	-34	25,8	-31	25,58	-33	29,71	-23
Açıklama; C32,5: CEM II 32,5 R tür çimento, C42,5: CEM II 42,5 R tür çimento, P1: 3.000 devirde öğütülen pomza tozu, P1: 5.000 devirde öğütülen pomza tozu, P1: 6.000 devirde öğütülen, %5, 10, 20, 30: harç karışımlarında pomza tozu ikame oranları.								

Pomza tozu ikameli harç numune grupları Çizelge 4.4'te incelendiğinde en düşük basınç dayanımına sahip olan C32,5P3%30 harç grubunda ortalama basınç dayanımı 5,18 MPa olarak ölçülmüştür ve TS 25 (Anonim 2008)'de puzolan katkılı

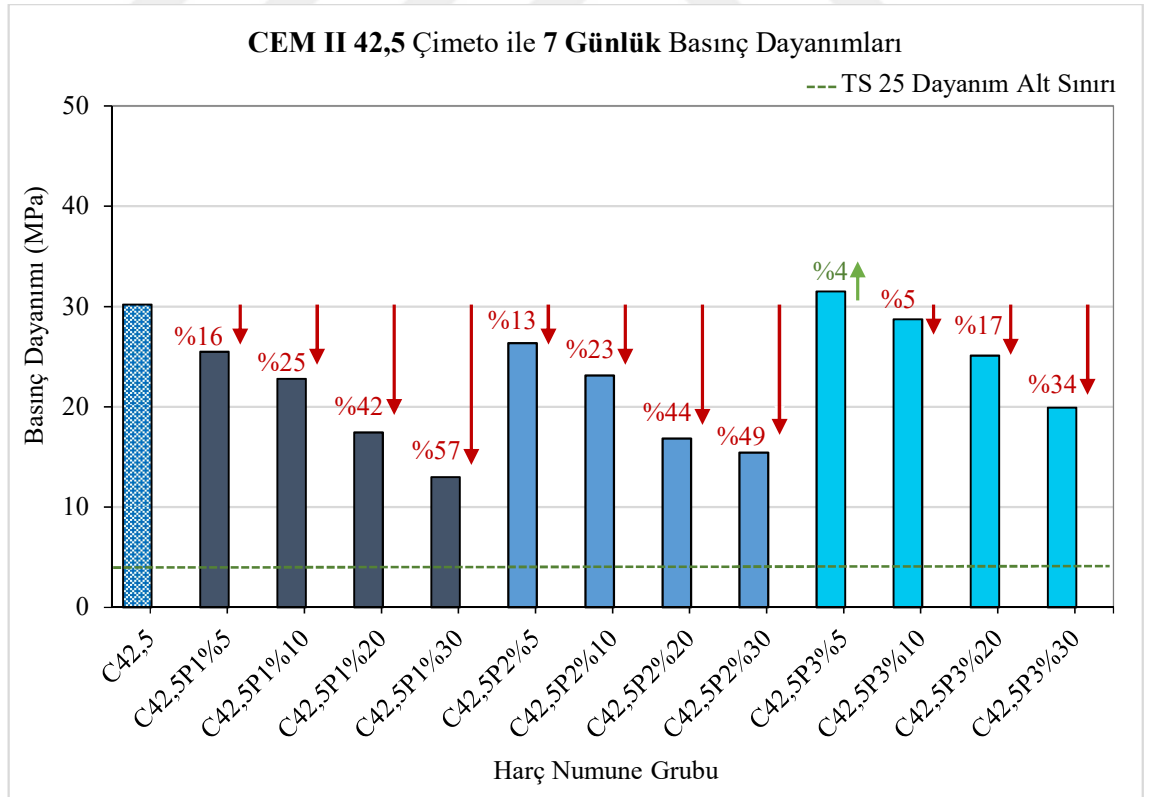
numuneler için 7 günlük basınç dayanımının en az 4 MPa olması gerektiğini belirten uygunluk kriterini sağlanmıştır.

Harç numune gruplarında incelenen tüm kür süreleri için genel olarak pomza tozu ikame oranının %10'a kadar artışı ile basınç dayanımlarında artış veya azalışlar gözlenirken, ikame oranının %10'dan sonraki artışlarında basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Basınç dayanımındaki değişimlerin, harç numunelerinde kullanılan çimento türü ile pomza tozu incelik ve ikame oranına bağlı olduğu fark edilmiştir. Harç gruplarının 7, 28, 56 ve 90 günlük basınç dayanımının sonuçları grafik olarak aşağıda sırasıyla gösterilmektedir.

CEM II 32,5 R ve CEM II 42,5 R çimentoları ile üretilen kontrol ve pomza tozu ikameli harç gruplarının 7 günlük basınç dayanım sonuçları Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'de grafik olarak verilmiştir.



Şekil 4.4 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarının 7 günlük basınç dayanım grafiği



Şekil 4.5 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarının 7 günlük basınç dayanım grafiği

Şekil 4.4 ve Şekil 4.5’den görüldüğü üzere; CEM II 32,5 R ve CEM II 42,5 R çimentoları ile üretilen harç gruplarının 7 günlük basınç dayanımları, C42,5P3%5 harç grubu dışındaki pomza tozu ikameli gruplarda aynı çimento ile üretilen kontrol grubuna göre azalma göstermiştir. Basınç dayanımındaki bu azalmaların pomza tozu inceliği ve ikame oranına bağlı olduğu görülmektedir.

%5 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C32,5P3 numunesinde %21 azalma görülürken C42,5P3 %4 artış görülmektedir. Aynı ikame oranına sahip farklı incelikte bulunan pomza tozu ile farklı inceliğe sahip çimento tiplerinde bu oranların değişim gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebi reaksiyona girecek çimentonun ve pomza tozunun birim ağırlığa düşen toz bağlayıcı-puzolan miktarının artmış olabileceği, daha fazla C-S-H jeli oluşturup boşlukları doldurarak basınç dayanımını arttırmış olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, %5 ikame oranına sahip numune grubunda 10,79 MPa ile C32,5P3 numunesi en düşük basınç dayanımına, 31,51 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

%10 pomza tozu ikamesinde bulunan harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C42,5P1 numunesi %25 oranında en çok azalma oranına sahip numune iken, yine aynı tip çimentoda elde edilen C42,5P3 numunesi %5 oranında en düşük azalma oranına sahip numune olduğu görülmektedir. Farklı incelikte pomza tozu, aynı ikame oranı ve aynı tip çimento ile hazırlanan harç numune gruplarında birbirinden farklı basınç dayanımları saptanmıştır. %10 ikame oranına sahip numune grubunda 11,68 MPa ile C32,5P3 numunesi en düşük basınç dayanımına, 28,74 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

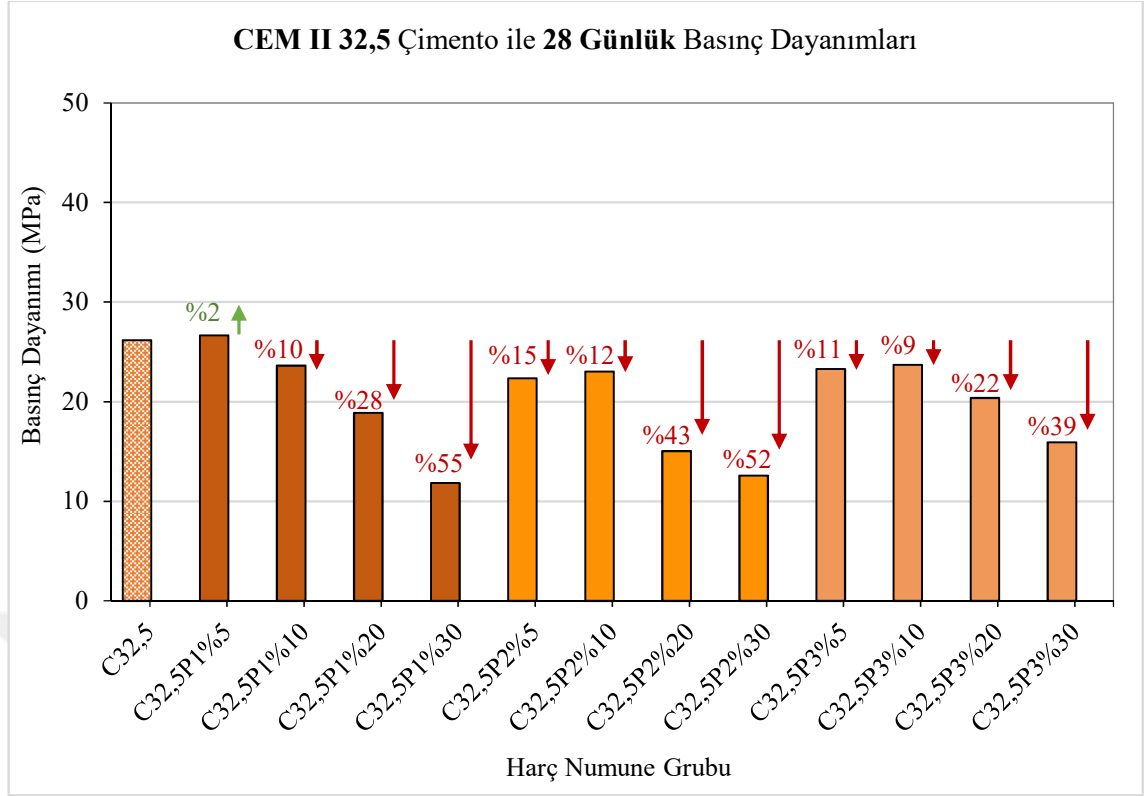
%20 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C32,5P2 numunesi %44 oranında basınç dayanımı en çok azalma oranına sahip numune iken, C42,5P3 numunesi %17 oranında basınç dayanımı en düşük azalma oranına sahip numune olduğu görülmektedir. %20 ikame oranına sahip numune grubunda 7,53 MPa ile C32,5P2 numunesi en düşük

basınç dayanımına, 25,11 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

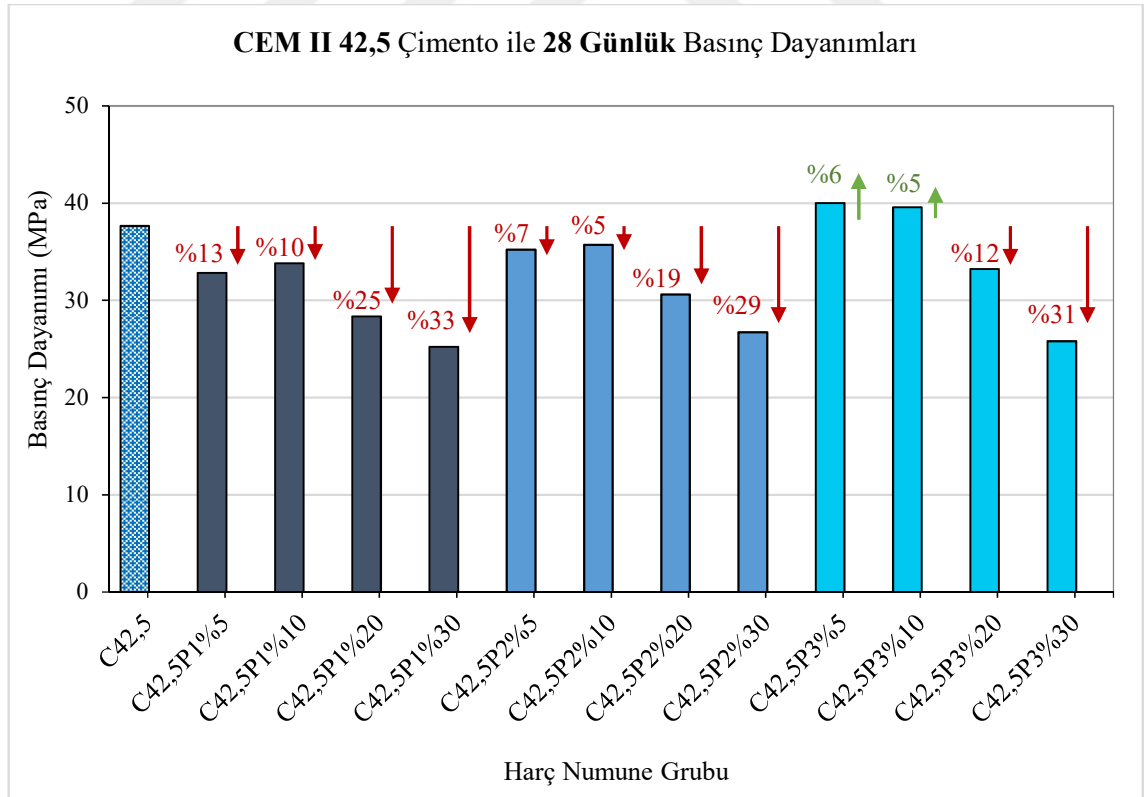
%30 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde ise, C32,5P3 numunesi %65 oranında basınç dayanımı en çok azalma oranına sahip numune iken, C42,5P3 numunesi %34 oranında basınç en düşük azalma oranına sahip numune olduğu görülmektedir. Bu gruba ait numunelerde 5,18 MPa ile C32,5P3 numunesi en düşük basınç dayanımına, 19,92 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Bağlayıcı madde inceliğinin basınç dayanımını etkileyen faktörler arasında olduğu çeşitli çalışmalar ile bilinmektedir (Örneğin; Çavdar ve Yetgin (2004), Mota dos Santos et al. (2021)). CEM II 32,5 R tip çimentoda pomza tozu inceliği arttıkça basınç dayanımında azalma görülmüş, CEM II 42,5 R tip çimentoda ise pomza tozu inceliği arttıkça basınç dayanımında artış görülmüştür. Pomza tozunun ikamesi yapılan numunelerde özgül yüzey alanı büyük olan P3 ($6.879 \text{ cm}^2/\text{g}$) pomza tozu ile daha yüksek basınç dayanımlı harç numuneleri elde edilmiştir. Puzolanik tepkimeye giren $6.879 \text{ cm}^2/\text{g}$ inceliğine sahip pomza tozunda bulunan amorf silis ile çimentonun hidratasyonu sonucu serbest halde bulunan Ca(OH)_2 , harç bünyesinde yüksek oranda C-S-H ve C-H-A yapılarını oluşturduğu söylenebilir. Ayrıca aynı inceliğe sahip pomza tozunun ikame oranı arttıkça basınç dayanımı azalmıştır.

Pomza tozu ikameli harç numuneleri ile kontrol numunelerinin 28 günlük basınç dayanım grafiği Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’da verilmiştir.



Şekil 4.6 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarının 28 günlük basınç dayanım grafiği



Şekil 4.7 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarının 28 günlük basınç dayanım grafiği

Şekil 4.6 ve Şekil 4.7’de görüldüğü üzere; CEM II 32,5 R ve CEM II 42,5 R çimentoları ile üretilen harç gruplarının 28 günlük basınç dayanımları, C32,5P1%5, C42,5P3%5 ve C42,5P3%10 harç grupları dışındaki pomza tozu ikameli gruplarda aynı çimento ile üretilen kontrol grubuna göre azalma göstermiştir. En çok azalma gösteren numune grupları pomza tozu ikame oranının fazla olduğu numunelerde saptanmıştır.

%5 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C32,5P1, C42,5P3%5 ve C42,5P3%10 numunelerinde sırasıyla %2, %6 ve %5 oranlarında artış belirlenmiştir. Ayrıca C32,5P2 numunesi %15 oranında en çok azalma oranına sahip numune iken, C42,5P2 numunesi %5 oranında en düşük azalma oranına sahip numune olduğu görülmektedir. Aynı inceliğe sahip pomza tozu farklı inceliklere sahip çimento tiplerinde çok farklı basınç dayanımı sonuçları ortaya koymuştur. Bu gruba ait numunelerde 22,34 MPa ile C32,5P2 numunesi en düşük basınç dayanımına, 40,01 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

%10 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C42,5P3 numunesi %5 oranında artış gösteren tek numunedir. C32,5P2 numunesi %12 oranında basınç dayanımı en çok azalma oranına sahip numune, C42,5P2 numunesi ise %5 oranında en düşük azalma oranına sahip numune olduğu görülmektedir. Aynı oranlarda kullanılan pomza tozuyla hazırlanan harç numunelerinde farklı inceliklerin farklı basınç dayanımlarına sebep olduğu fark edilmiştir. CEM II 42,5 R tipi çimentoda incelik arttıkça basınç dayanımı da artmıştır. CEM II 32,5 R tipi çimentoda ise değişken basınç dayanım sonuçları elde edilmiştir. Bu gruba ait numunelerde 23,03 MPa ile C32,5P2 numunesi en düşük basınç dayanımına, 39,57 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

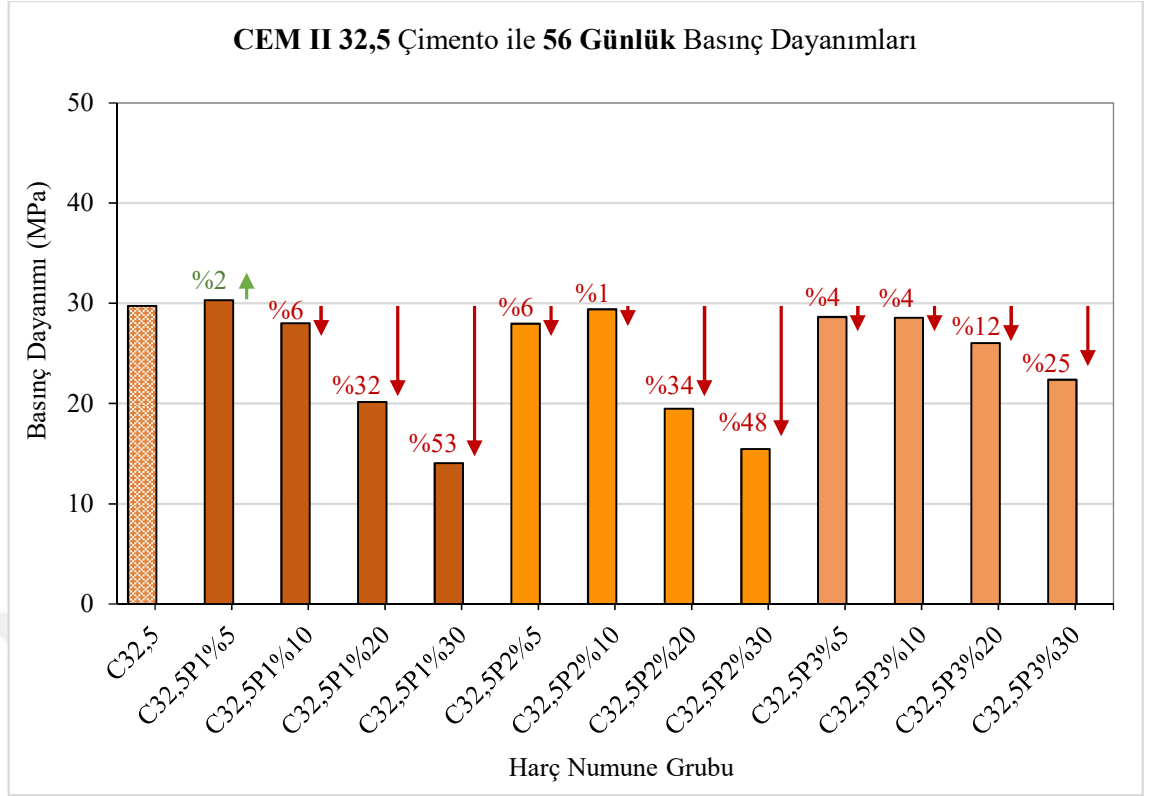
%20 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C32,5P2 numunesi %43 oranında basınç dayanımı en çok azalma oranına sahip numune, C42,5P3 numunesi ise %12 oranında en düşük azalma oranına sahip numune olduğu görülmektedir. Bu gruba ait numunelerde 15,04 MPa ile C32,5P2 numunesi en düşük basınç dayanımına, 33,23 MPa ile C42,5P3

numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Aynı oranda ikame edilen pomza tozu ile hazırlanan harç numunelerinde pomza tozunun özgül yüzey alanı (incelik) arttıkça basınç dayanımının da arttığı söylenebilir.

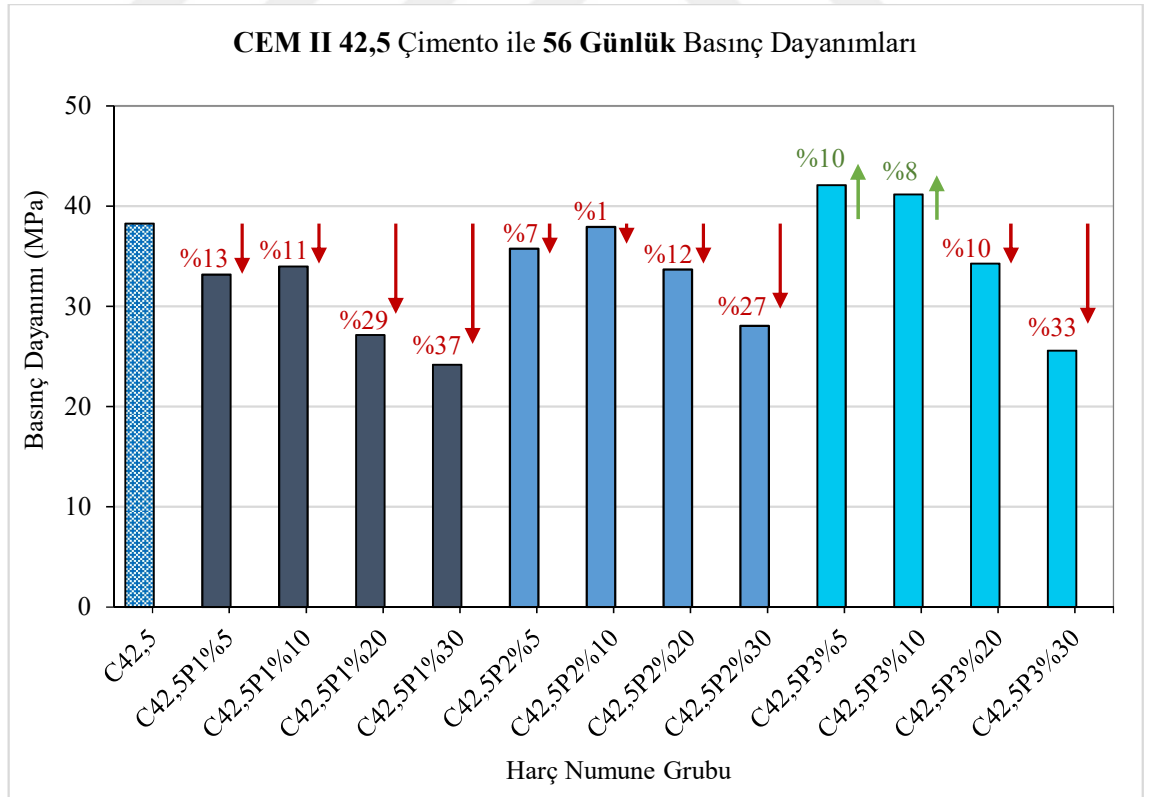
%30 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C32,5P1 numunesi %55 oranında basınç dayanımı en çok azalma oranına sahip numune, C42,5P2 numunesi ise %29 oranında en düşük azalma oranına sahip numune olduğu görülmektedir. Bu gruba ait numunelerde 11,83 MPa ile C32,5P1 numunesi en düşük basınç dayanımına, 19,92 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Hazırlanan çimento harçlarında 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde her iki tip çimento için %5 ve %10 ikameye sahip pomza tozlarının inceliğe bağlı olarak önemli ölçüde basınç dayanımlarına katkı sağladığı söylenebilir. 28 günlük basınç dayanımının büyük oranını 7 günlük basınç dayanımında kazandığı görülmektedir.

Pomza tozu ikameli harç numuneleri ile kontrol numunelerinin 56 günlük basınç dayanım grafiği Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'de verilmiştir.



Şekil 4.8 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarının 56 günlük basınç dayanım grafiği



Şekil 4.9 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarının 56 günlük basınç dayanım grafiği

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9’da görüldüğü üzere; CEM II 32,5 R ve CEM II 42,5 R çimentoları ile üretilen harç gruplarının 56 günlük basınç dayanımları, C32,5P1%5, C42,5P3%5 ve C42,5P3%10 harç grupları dışındaki pomza tozu ikameli gruplarda aynı çimento ile üretilen kontrol grubuna göre azalma göstermiştir. Harç numunelerinde pomza tozu inceliğine ve ikame oranına bağlı olarak basınç dayanımında değişimler tespit edilmiştir.

%5 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C42,5P3 numunesinde %10 oranında artış saptanmıştır. C42,5P1 numunesi %13 oranında basınç dayanımı en çok azalmaya sahip numune, C32,5P3 numunesi ise %4 oranında en düşük azalma oranına sahip numune olduğu görülmektedir. Bu gruba ait numunelerde 27,97 MPa ile C32,5P2 numunesi en düşük basınç dayanımına, 42,09 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

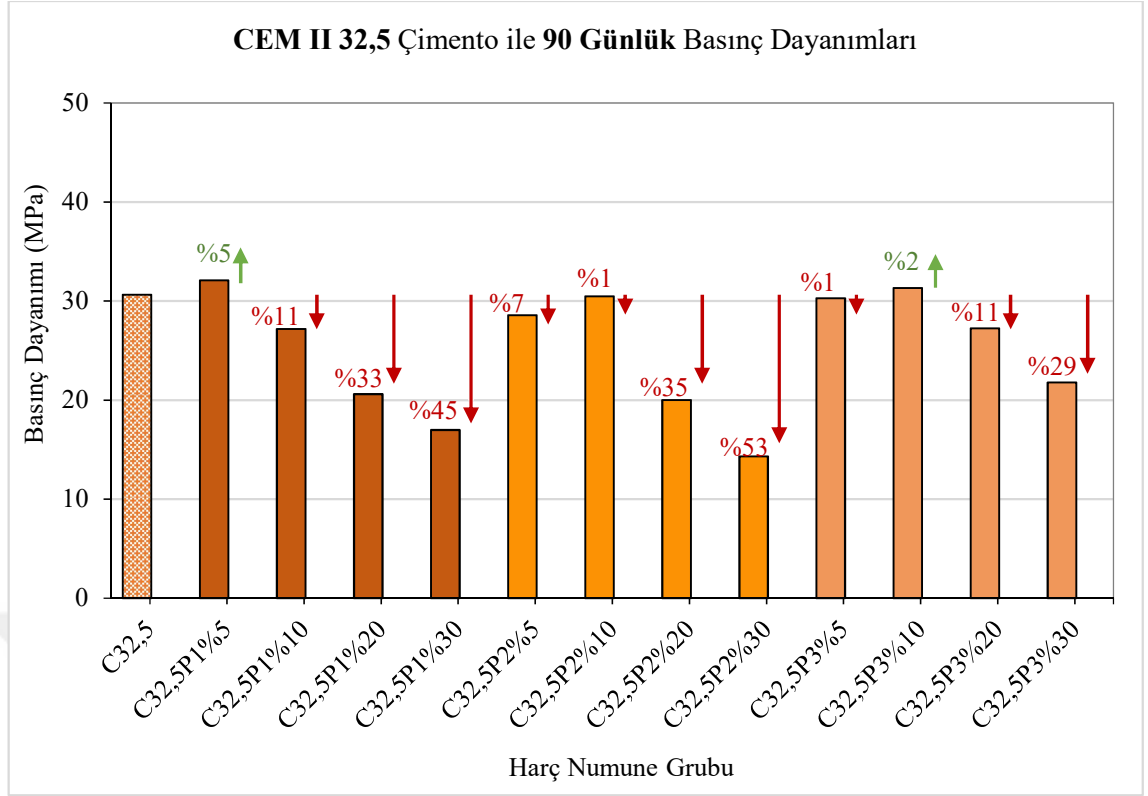
%10 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C42,5P3 numunesi yaklaşık %8 oranında artış göstermiştir. C42,5P1 numunesi %11 oranında basınç dayanımı en çok azalmaya sahip numune, C32,5P2 ve C42,5P2 numuneleri ise yaklaşık %1 oranında en düşük azalma oranına sahip numuneler olduğu görülmektedir. Bu gruba ait numunelerde 28,01 MPa ile C32,5P1 numunesi en düşük basınç dayanımına, 41,17 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. %10 pomza tozu ikame oranına sahip numunelerin basınç dayanımları pomza tozunun inceliğine bağlı olarak incelik arttıkça basınç dayanımının da arttığı tespit edilmiştir.

%20 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C32,5P2 numunesi %35 oranında basınç dayanımı en çok azalmaya sahip numune, C42,5P3 numunesi ise %10 oranında en düşük azalma oranına sahip numuneler olduğu görülmektedir. Bu gruba ait numunelerde 19,49 MPa ile C32,5P1 numunesi en düşük basınç dayanımına, 34,27 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. %20 oranında ikame edilen pomza tozunun inceliği arttıkça numunelerin basınç dayanımları artmıştır.

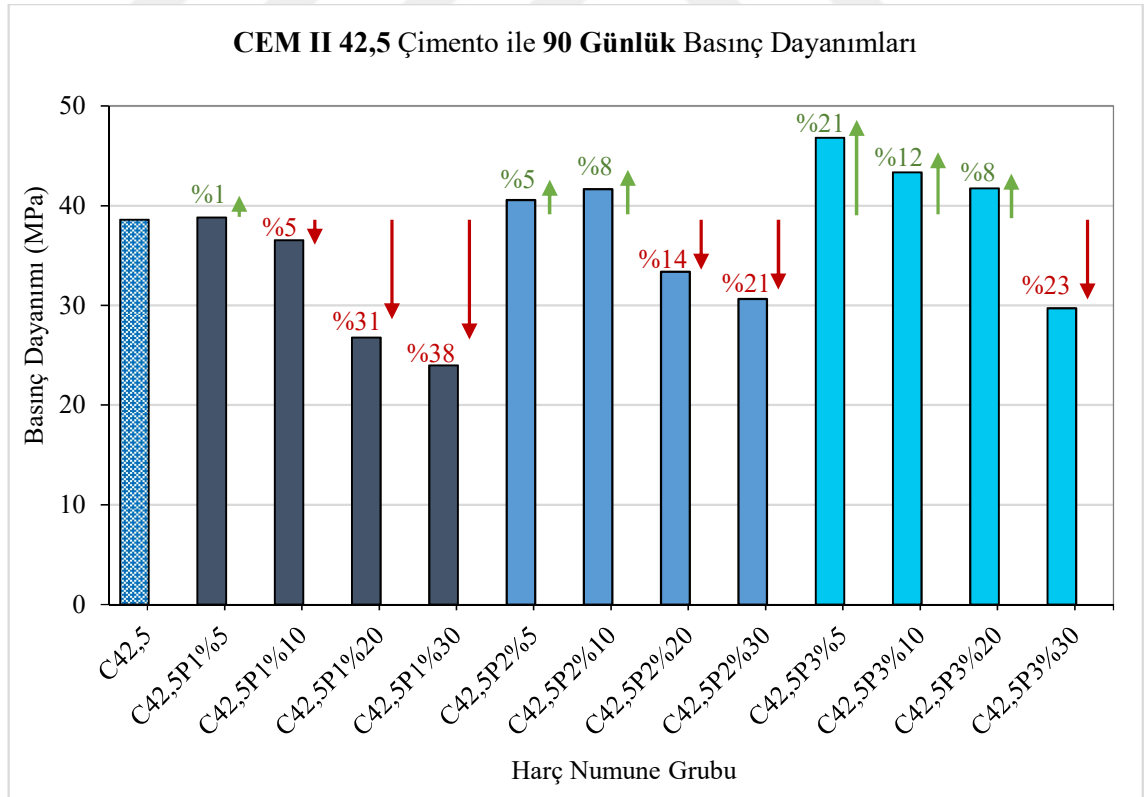
%30 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C32,5P1 numunesi %53 oranında basınç dayanımı en çok azalmaya sahip numune, C32,5P3 numunesi ise %23 oranında en düşük azalma oranına sahip numuneler olduğu görülmektedir. Bu gruba ait numunelerde 14,06 MPa ile C32,5P1 numunesi en düşük basınç dayanımına, 26,73 MPa ile C42,5P2 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

Pomza tozu ikameli harç numuneleri ile kontrol numunelerinin 90 günlük basınç dayanım grafiği Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’da verilmiştir.





Şekil 4.10 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarının 90 günlük basınç dayanım grafiği



Şekil 4.11 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarının 90 günlük basınç dayanım grafiği

Şekil 4.10 ve Şekil 4.11’de görüldüğü üzere; CEM II 32,5 R ve CEM II 42,5 R çimentoları ile üretilen harç gruplarının 90 günlük basınç dayanımları, C32,5P1%5, C32,5P3%10, C42,5P1%5, C42,5P2%5, C42,5P2%10, C42,5P3%5, C42,5P3%10 ve C42,5P3%20 numunelerinin basınç dayanımlarında artış saptanmışken, diğer numunelerin basınç dayanımlarında azalma belirlenmiştir. Pomza tozu ikamesi 90 günlük basınç dayanımında önemli ölçüde katkı sağladığı söylenebilir. Ayrıca pomza tozu inceliği arttıkça CEM II 42,5 R tipi çimentoda basınç dayanımında artış belirlenmiştir. CEM II 32,5 R tipi çimento ile hazırlanan harç numunelerinde ise P1 ve P2 inceliklerinde %5 ile %10 pomza tozu ikamesi bulunan numuneler ile P3 ikamesi yapılan pomza tozunun her ikame oranına sahip numuneleri basınç dayanımında etkisini daha çok göstermiştir.

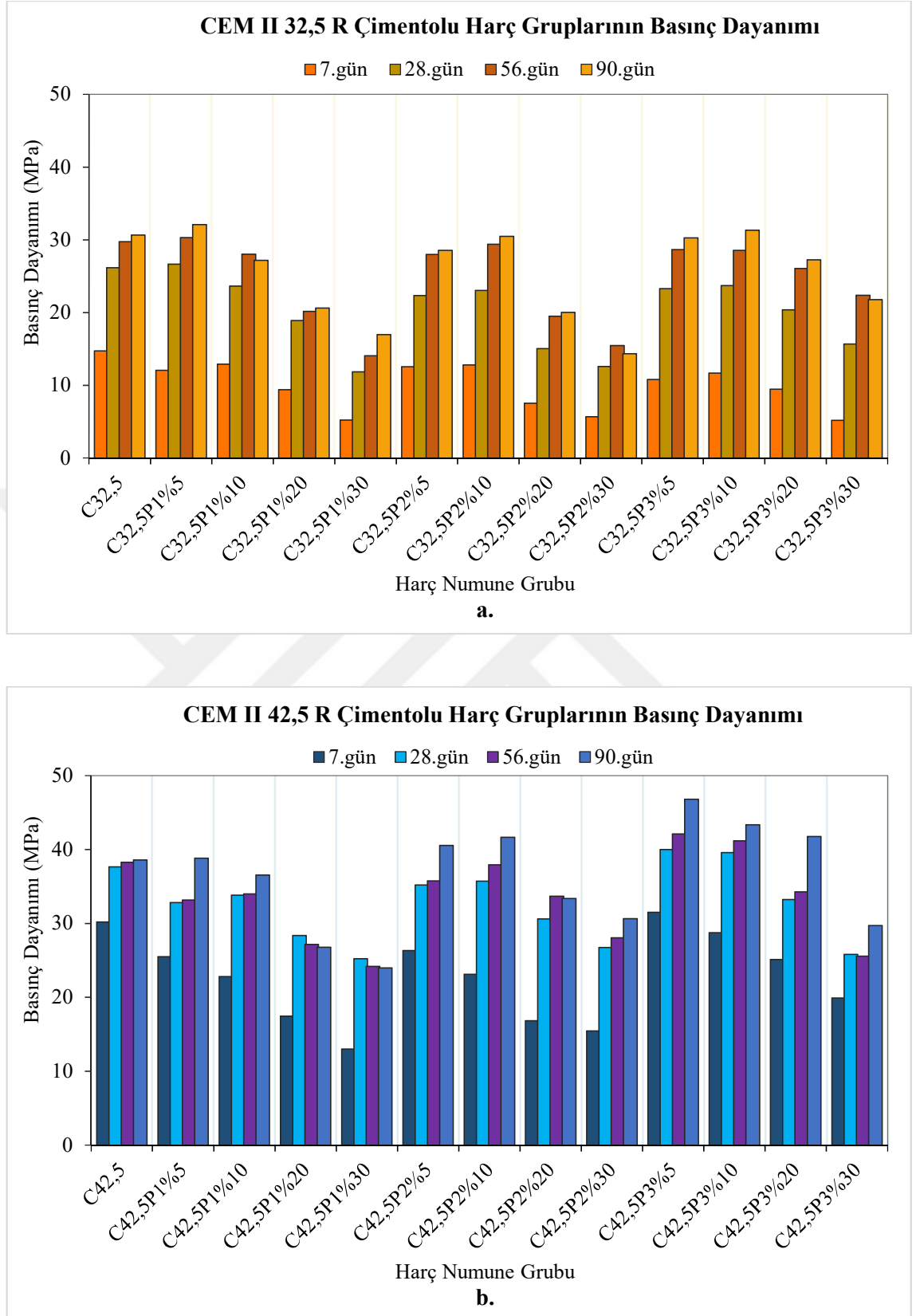
%5 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, her iki tip çimento ile hazırlanan numunelerde basınç dayanımı kontrol numunesinin üzerinde değerlere sahiptir, yalnızca C32,5P2 numunesinde %7 oranında azalma tespit edilmiştir. Bu grupta en yüksek basınç dayanımı %21 oranında basınç dayanımı kazanmıştır. En az basınç dayanımı kazanan numune ise %1 oranında artış göstererek C42,5P1 numunesinde belirlenmiştir. %5 pomza tozu ikame oranına sahip numunelerde 28,56 MPa ile C32,5P2 numunesi en düşük basınç dayanımına, 46,81 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca basınç dayanımı sonucunda pomza tozu inceliği arttıkça genel olarak basınç dayanımının da arttığı söylenebilir.

%10 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C32,5P3, C42,5P2 ve C42,5P3 numunelerinin basınç dayanım değerlerinde artış saptanmıştır. Basınç dayanımı C42,5P3 numunesinde %12 oranında en çok artış oranına sahip numune iken, C32,5P1 numunesi %11 oranında en çok azalma oranına sahip numune olduğu belirlenmiştir. Aynı tip çimentoda aynı ikameye sahip harç numunelerinde inceliğin basınç dayanımındaki etkisi açıkça fark edilmiştir. Bu gruba ait numunelerde 27,17 MPa ile C32,5P1 numunesi en düşük basınç dayanımına, 43,34 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu tespit edilmiştir.

%20 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C42,5P3 numunesinde %8 oranında artış saptanmıştır. C32,5P2 numunesi %32 oranında basınç dayanımı en çok azalan numune, C32,5P3 numunesi ise %11 oranında en düşük azalma oranına sahip numuneler olduğu görülmektedir. Bu gruba ait numunelerde 20,01 MPa ile C32,5P2 numunesi en düşük basınç dayanımına, 41,74 MPa ile C42,5P3 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olduğu belirlenmiştir.

%30 pomza tozu ikamesine sahip harç numunelerinin kontrol numunelere kıyasla basınç dayanımları incelendiğinde, C32,5P2 numunesi %53 oranında en çok azalma görülen numune iken yine aynı inceliğe sahip pomza tozu ile elde edilen C42,5P2 numunesi %21 oranında en düşük azalma oranına sahip numuneler olduğu görülmektedir. Bu gruba ait numunelerde 14,32 MPa ile C32,5P2 numunesi en düşük basınç dayanımına, 30,63 MPa ile C42,5P2 numunesi en yüksek basınç dayanımına sahip olmuştur.

Şekil 4.12a ve Şekil 4.12b’de üretilen harç numune gruplarının basınç dayanımlarının yaşa göre değişim sonuçları verilmiştir.



Şekil 4.12 Harç numune gruplarının farklı kür sürelerindeki basınç dayanımı değişim grafikleri (a. CEM II 32,5 R çimentolu, b. CEM II 42,5 R çimentolu).

Çalışma sonunda Şekil 4.12a ve Şekil 4.12b’de de görüldüğü üzere, beklenildiği gibi bağlayıcı malzemenin inceliğinin artmasıyla harç numunelerinde basınç dayanımı artmıştır. Küçük partiküllerin büyük partiküllere kıyasla daha verimli ve daha hızlı etkileşime girebileceği, bu sayede basınç dayanımının yüksek değerlerde olabileceği bazı literatür çalışmalarında belirtilmiştir. Zeyad ve Almalki (2021) yapmış olduğu benzer bir çalışmada ikame edilen pomza tozu inceliği arttıkça harç numunelerde basınç dayanımının arttığını, 7 günlük basınç dayanım değerlerinin 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerlerinden daha az değerlere sahip olabileceğini belirtmiş ve bunun sebebinin çimento + su reaksiyonu sonucu bağlanamayan CH (kalsiyum hidroksit)’in pomza tozu ile reaksiyonunda C-S-H jeli oluşturmamasının uzun zaman alabileceğini belirtmiştir. Yapılan bu çalışmadaki bulgular Zeyad ve Almalki (2021)’nin yapmış olduğu çalışma ile uyumlu sonuçlar vermektedir. Bununla birlikte pomza tozu ikameli numunelerin ikame oranı arttıkça genel olarak basınç dayanımı azalmıştır ve elde edilen sonuçlar literatür çalışmaları ile desteklenmektedir. Örneğin Lawrence et al. (2003), seyreltme etkisi olarak adlandırılan bu durumun, çimentonun azaltılarak yerine mineral katkı kullanımının sonucunda basınç dayanımında azalmaya neden olduğunu ifade etmiştir. Ayrıca mineral katkının inceliğinin artmasıyla seyreltme etkisinde azalmanın olduğu sonucuna varmıştır. Yani aynı ikame oranlarında incelik arttıkça basınç dayanımının arttığını belirtmiştir.

Genel olarak pomza tozu inceliği arttıkça ve çimentonun inceliği arttıkça harç numunelerinde basınç dayanımı yükselmiştir. Özellikle ileri yaş olan 90 günlük numunelerde önemli ölçüde basınç dayanımına katkı sağladığı söylenebilir.

Diğer bir husus da Baradan vd (2015), CEM II 42,5 türü bir çimento ile hazırlanan numunenin standart kür koşullarında 28 günlük basınç dayanımının yaklaşık %65’ini 7 günlük basınç dayanımında kazanabileceğini ifade etmiştir. Harç numunelerinin 28/7 günlük basınç dayanımları incelendiğinde, CEM II 42,5 R kontrol numunesi yaklaşık %80’ini oluşturmuştur. Bu değere en yakın değerler C42,5P1%5, C42,5P2%5, C42,5P3%5, C42,5P3%10, C42,5P3%20 ve C42,5P3%30 numunelerinde belirlenip sırasıyla bu değerler %78, 75, 79, 73, 76 ve 77 oranlarında, en düşük oranın %55 ile C42,5P2%20 numunesinde hesaplanmıştır. CEM II 32,5 R kontrol numunesinde ise yaklaşık %56’sını oluşturmuştur. Bu değere en yakın C32,5P1%10,

C32,5P2%5 ve C32,5P2%10 numunelerinde belirlenip sırasıyla bu değerler %55, 56 ve 56 oranlarında, en düşük oranın %33 ile C32,5P3%30 numunesinde hesaplanmıştır. Bulunan bu sonuçlar pomza tozu ikameli numunelerin CEM II 42,5 R tipi çimentoda 28 günlük mukavemetinin önemli bir kısmını 7 günlük iken kazanmış ve incelik arttıkça bu oran da artmıştır. CEM II 32,5 R tipi çimentoda ise kontrol numuneye göre makul seviyelerde kalmış ve bu oran en iyi P2 inceliğine sahip numunelerde belirlenmiştir.

4.6. Pomza Tozunun Pozolanik Aktivite Özelliklerinin Değerlendirilmesi

TS 25 (Anonim 2008)'de bir malzemenin pozolan olarak kullanılması için bazı önemli kriterler bulunmaktadır. Bu kriterlerden biri kullanılacak pozolanın kimyasal içeriğinde $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ toplamının kütlece en az %70'ini oluşturması gerektiridir. Kimyasal analizi yapılan pomza tozunda bu değer kütlece %81,39'unu oluşturduğu bulunmuştur. Bu da harç numunesinde boşlukları doldurarak basınç dayanımını arttıran C-S-H jelinin oluşumunda etkilidir. Yine aynı standartta pozolanın özgül yüzey alanının en az $4.000 \pm 25 \text{ cm}^2/\text{g}$ olması gerektiğine değinilmiştir. Pomza tozu üzerine yapılan Blaine metodu sonucunda 4.378, 4.916 ve 6.879 cm^2/g incelik değerleri belirlenmiştir ve standartta belirtilen sınır değerinin üzerindedir. Diğer bir kriter ise pozolan katkılı numuneler hazırlayıp basınç dayanımları incelenerek pozolanik aktivite indeksinin belirlenmesidir.

Yapılan bu tez çalışmasında, TS EN 196-1 (Anonim 2002) standardına uygun hazırlanan harç numuneleri içerisinde kullandığımız çimento ve pomza tozunun kireci bağlayabilme yeteneği basınç dayanımı ile belirlenmiştir. Pozolan karışumlu numunelerde TS 25 (Anonim 2008) standardında belirtildiği gibi 7 günlük basınç dayanımı göz önünde bulundurulmuştur. Basınç dayanımı sınır değeri en az 4 MPa olarak verilmiştir. Hazırlanan pomza tozu ikameli harç numunelerinde 7 günlük basınç dayanımı 4 MPa'nın üzerinde değerlere sahip olduğu için bir diğer kriter olan pozolanik aktivite indeksi incelenmiştir.

4.7. Harç Gruplarının Pozolanik Aktivite İndeksi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Pozolanik aktivite indeksi (PAİ), pozolanın bağlayabildiği kireç (kalsiyum hidroksit) miktarının çokluğunu ifade etmektedir. Karışımında ne kadar çok çimento bağlanabilirse o kadar çok C-S-H jelinin oluşabileceği ve bu sayede yapılan çalışmalarda dayanımı artırdığı ifade edilmiştir (Koca 2013).

ASTM C618 (Anonymous 2019) standardına göre doğal pozolanın 7 ve 28 günlük pozolanik aktivite indeks değerinin %75'den az olması istenmemektedir. Hazırlanan inceliğin pozolanik aktivite üzerindeki etkilerini incelemek için kullanılan pomza tozu ikameli çimento harcının pozolanik aktivite indeksi sonuçları Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5 incelendiğinde basınç dayanımına bağlı olarak ikame oranı arttıkça pozolanik aktivite indeksinin azaldığı saptanmıştır. İnceliğin pozolanik aktivite indeksi üzerindeki etkilerini incelemek için her bir pomza tozunun inceliğinin %5, 10, 20 ve 30 ikame oranına sahip 7, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerine ait verilerin grafikleri aşağıda verilmiştir.

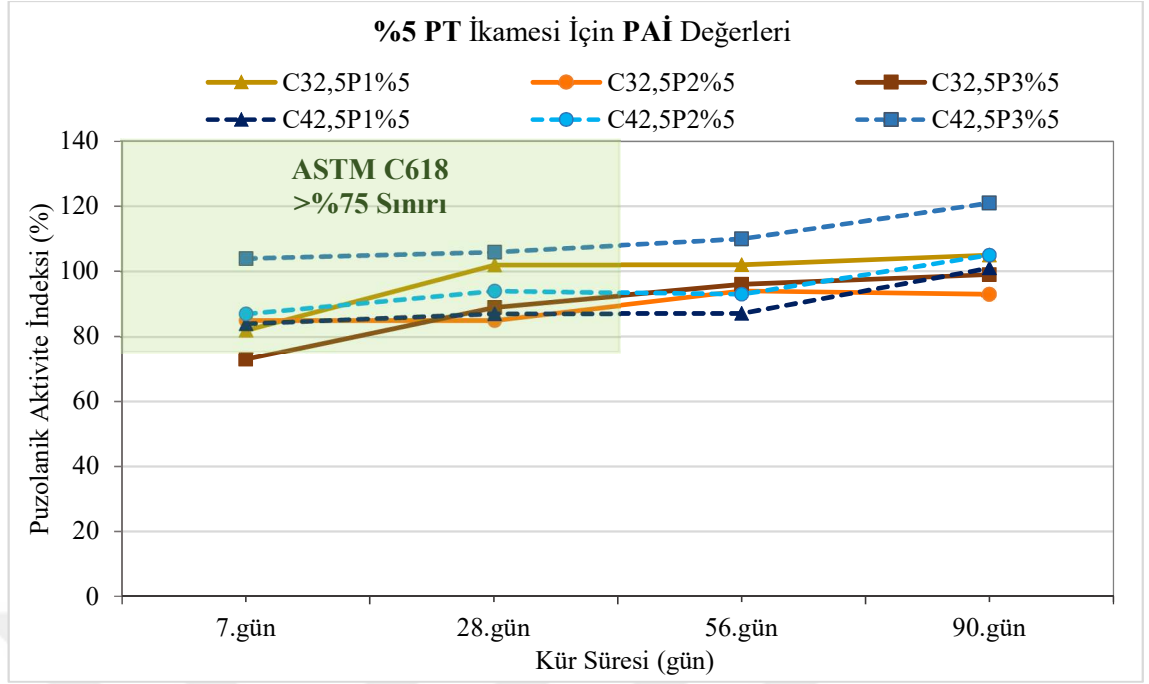
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Çizelge 4.5 Harç gruplarının farklı kür sürelerindeki Puzolanik Aktivite İndeksi (PAİ) sonuçları

Çimento Türü	Harç Numune Grupları	Puzolanik Aktivite İndeksi (%)			
		7. gün	28. gün	56. gün	90. gün
CEM II 32,5 R	Kontrol-32,5	-	-	-	-
	C32,5-P1%5	82	102	102	105
	C32,5-P1%10	88	90	94	89
	C32,5-P1%20	64	72	68	67
	C32,5-P1%30	35	45	47	55
	C32,5-P2%5	85	85	94	93
	C32,5-P2%10	87	88	99	99
	C32,5-P2%20	51	57	66	65
	C32,5-P2%30	38	48	52	47
	C32,5-P3%5	73	89	96	99
	C32,5-P3%10	79	91	96	102
	C32,5-P3%20	64	78	88	89
	C32,5-P3%30	35	61	75	71
CEM II 42,5 R	Kontrol-42,5	-	-	-	-
	C42,5-P1%5	84	87	87	101
	C42,5-P1%10	75	90	89	95
	C42,5-P1%20	58	75	71	69
	C42,5-P1%30	43	67	63	62
	C42,5-P2%5	87	94	93	105
	C42,5-P2%10	77	95	99	108
	C42,5-P2%20	56	81	88	86
	C42,5-P2%30	51	71	73	79
	C42,5-P3%5	104	106	110	121
	C42,5-P3%10	95	105	108	112
	C42,5-P3%20	83	88	90	108
	C42,5-P3%30	66	69	67	77

Açıklama; C32,5: CEM II 32,5 R tür çimento, C42,5: CEM II 42,5 R tür çimento, P1: 3.000 devirde öğütülen pomza tozu, P1: 5.000 devirde öğütülen pomza tozu, P1: 6.000 devirde öğütülen, %5, 10, 20, 30: harç karışımlarında pomza tozu ikame oranları.

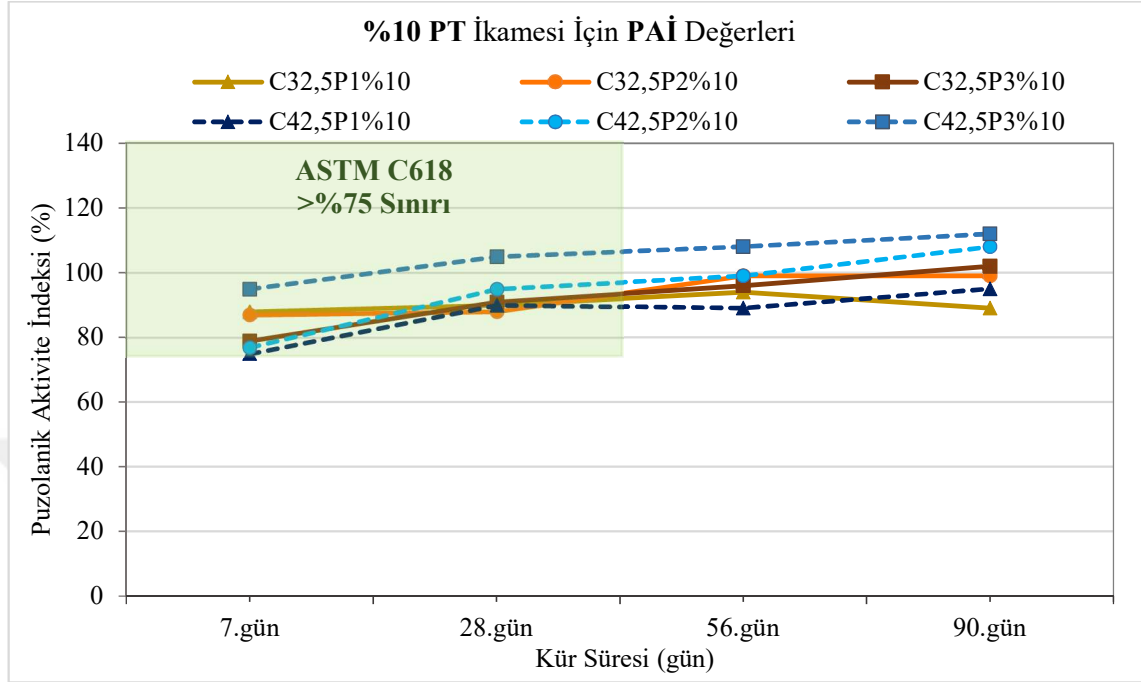
%5 pomza tozu ikame oranına sahip harç numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde puzolanik aktivite indeksi Şekil 4.13’de verilmiştir.



Şekil 4.13 %5 PT ikameli harç gruplarının farklı kür sürelerinde Pozolanik Aktivite İndeksi (PAİ) değişim grafiği.

Şekil 4.13’de görüldüğü gibi, %5 ikame oranına sahip pomza tozu ile hazırlanan harç gruplarının 7 günlük pozolanik aktivite indeksi incelendiğinde, C32,5P3 numunesi haricindeki tüm numunelerin pozolanik aktivite indeksi ASTM C618 (Anonymous 2019) standardında istenilen %75 kriterinin üzerinde olduğu belirlenmiştir. C42,5P3 numunesi %104 değeri ile en yüksek pozolanik aktivite indeksine sahiptir. Bu malzemenin pozolanik aktivitesi kontrol numunesine %4 oranında pozolanik katkıda bulunduğu söylenilebilir. C32,5P3 numunesinde ise %73 pozolanik aktivite indeksi ile en düşük pozolanik aktivite indeksi belirlenmiştir. 28 günlük harç numunelerinin pozolanik aktivite indeksleri ASTM C 618 (Anonymous 2019) %75 sınır değerinin üzerinde olduğu görülmektedir. C42,5P3 numunesi %106 oranında pozolanik aktivite indeksi ile en yüksek değere ulaşmıştır. Böylelikle üç farklı inceliğe sahip pomza tozunun %5 ikame oranıyla pozolanik olarak kullanılabileceği söylenebilir. 56 ve 90 günlük pozolanik aktivite indeksleri incelendiğinde pomza tozunun önemli ölçüde harç numunelerine katkıda bulunduğu görülmektedir. 90 günlük pozolanik aktivite indeksi en yüksek %121 oranı ile C42,5P3 numunesinde görülürken, en düşük %93 oranı ile C32,5P2 numunesinde görülmektedir. Pomza tozunun özgül yüzey alanları ile CEM II 42,5 R çimentonun özgül yüzey alanı büyük olduğu için su ile aralarında hızlı hidratasyon reaksiyonu gerçekleşmiş olabileceği ve bu yüzden 7 ile 28 günlük pozolanik aktivite indeksi değerlerinin yakın olduğu düşünülmektedir.

%10 pomza tozu ikame oranına sahip harç numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde puzolanik aktivite indeks değerleri Şekil 4.14’de verilmiştir.

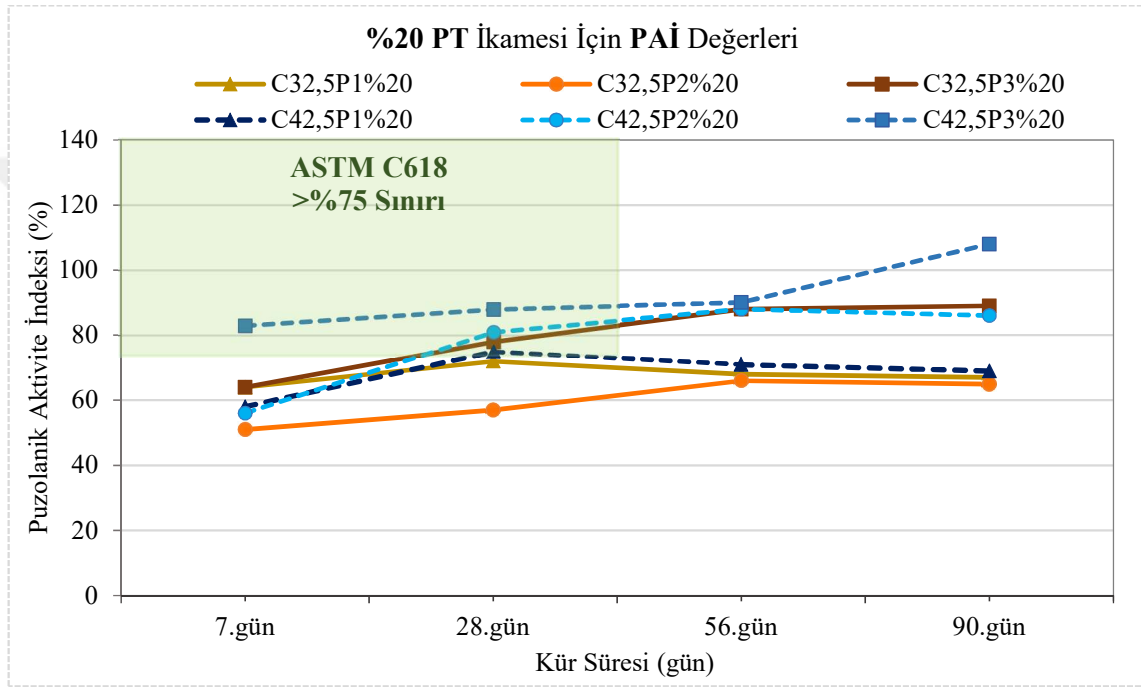


Şekil 4.14 %10 PT ikameli harç gruplarının farklı kür sürelerinde Puzolanik Aktivite İndeksi (PAİ) değişim grafiği.

Şekil 4.14’te görüldüğü gibi, %10 ikame oranına sahip pomza tozu ile hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük puzolanik aktivite indeksi incelendiğinde, tüm numunelerin puzolanik aktivite indeksi ASTM C 618 (Anonymous 2019) standardında istenilen %75 kriterinin üzerinde olduğu görülmektedir. En yüksek puzolanik aktivite indeksi %95 oranı ile C42,5P3 numunesine, en düşük puzolanik aktivite indeksi %75 oranı ile C42,5P1 numunesine ait olduğu belirlenmiştir. 28 günlük puzolanik aktiviteleri verilen numunelerin ASTM C 618 (Anonymous 2019) standardında %75 olarak belirtilen kritik değerlerin üzerinde olduğu görülmektedir. C42,5P3 numunesi %95 oranında puzolanik aktivite indeksi ile en yüksek değere ulaşmıştır. Bu numunede incelenen 56 ve 90 günlük değerler sırasıyla %108 ve %112 oranlarında ölçülerek 7, 28, 56 ve 90 günün en yüksek puzolanik aktiviteye sahip numunesi olduğu belirlenmiştir. Bu grup numunelerde incelik arttıkça zamanla birlikte puzolanik aktivite indeksi de artmıştır. C32,5P1 numunesinin 56 ve 90 günlük puzolanik aktivite indekslerinde çok az miktarda olsa dahi azalma mevcuttur. Bunun sebebi, hazırlanan bu grup harç numunesinin 56 ve 90 günlük basınç dayanımlarında az miktarda artış gösterip kontrol

numunenin bu sürelerde daha fazla miktarlarda artış göstermiş olmasıdır. C32,5P1 numunesinde bu yaşlarda pozolanik reaksiyonun yavaşlamış olabileceği düşünülmektedir. Pomza tozunun bu incelik değerleriyle %10 ikame oranıyla kullanılabileceği söylenebilir.

%20 pomza tozu ikame oranına sahip harç numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde pozolanik aktivite indeks değerleri Şekil 4.15’de verilmiştir.

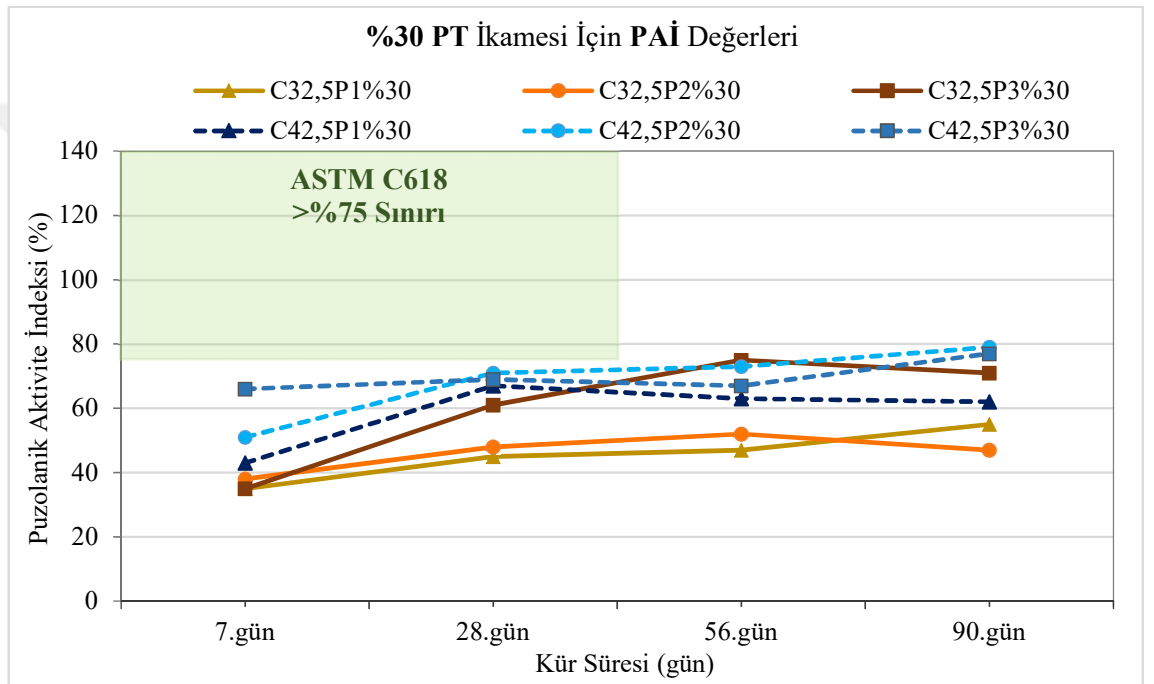


Şekil 4.15 %20 PT ikameli harç gruplarının farklı kür sürelerinde Pozolanik Aktivite İndeksi (PAİ) değişim grafiği.

Şekil 4.15’de görüldüğü gibi, %20 ikame oranına sahip pomza tozu ile hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük pozolanik aktivite indeksi incelendiğinde, yalnızca C42,5P3 numunesinin pozolanik aktivite indeksi ASTM C 618 (Anonymous 2019) standardında istenilen %75 kriterinin üzerinde %83 oranında olduğu görülmektedir. C32,5P2 numunesinin 7 ile 28 gün arası pozolanik aktivite indeksinin artış miktarı beklenildiğinden az olduğu saptanmıştır. Bunun nedeni katkı oranının artmasıyla basınç dayanımında azalma miktarının artmış olabileceğidir. 56 ve 90 günlük pozolanik aktivite indekslerinde incelik arttıkça indeks değeri artsa da ikame oranı bunu belirlemede önemli bir etken olduğu saptanmıştır. Diğer ikame gruplarında olduğu gibi en yüksek pozolanik aktivite değeri C42P3 numunesinde görülmektedir. 56 ve 90

günlük değerleri sırasıyla %90 ve %108 olarak tespit edilmiş, en düşük pozolanik aktivite indeksi ise C32,5P2 numunesinde her iki zamanda da %65 oranında olduğu tespit edilmiştir. P1 inceliğine sahip numuneler 28 günden sonra pozolanik aktiviteyi azaltıcı yönde etki etmiş, P3 inceliğine sahip numuneler ise pozolanik aktiviteyi artırıcı yönde etki etmiştir.

%30 pomza tozu ikame oranına sahip harç numunelerinin 7, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde pozolanik aktivite indeks değerleri Şekil 4.16’de verilmiştir.

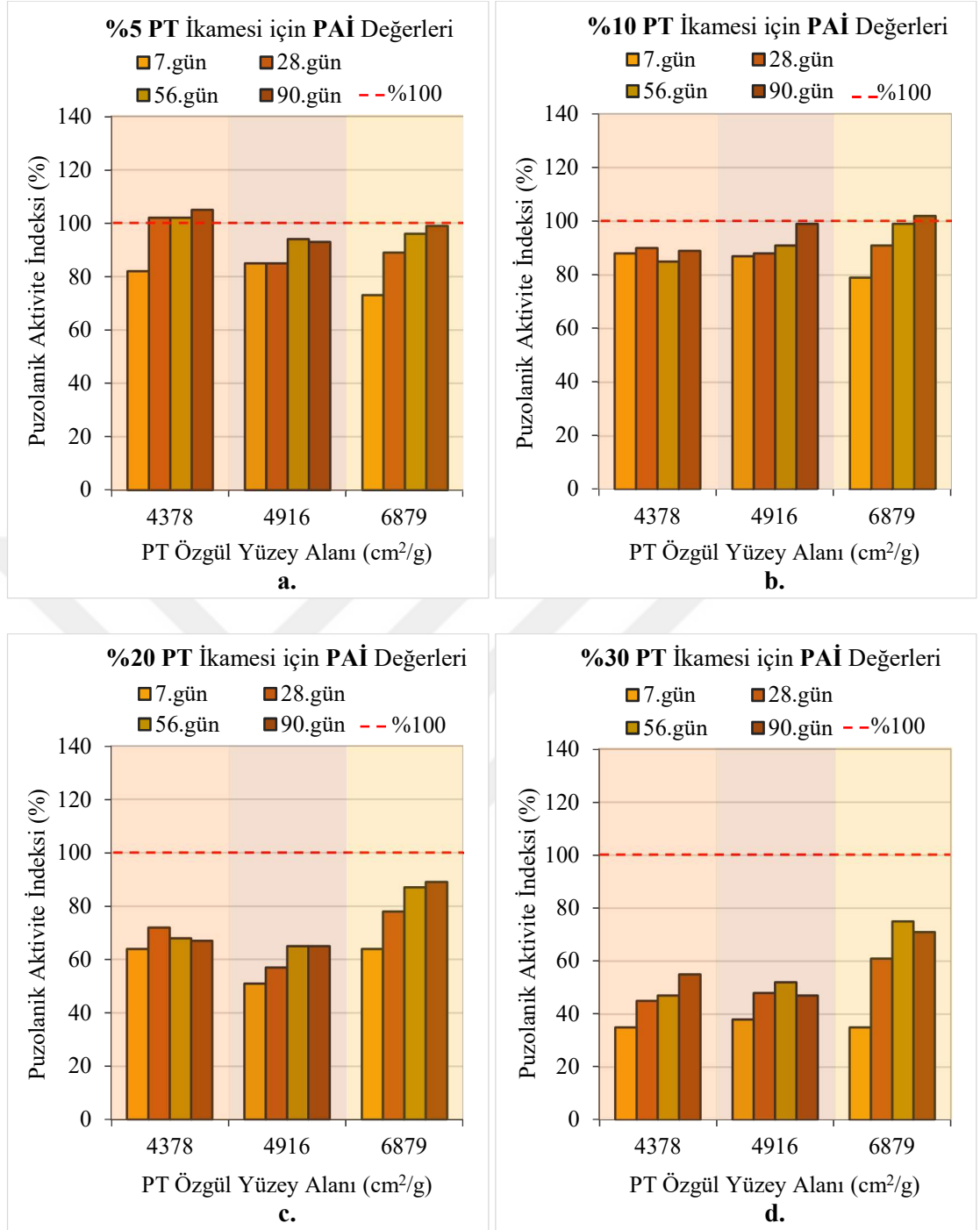


Şekil 4.16 %30 PT ikameli harç gruplarının farklı kür sürelerinde Pozolanik Aktivite İndeksi (PAİ) değişim grafiği.

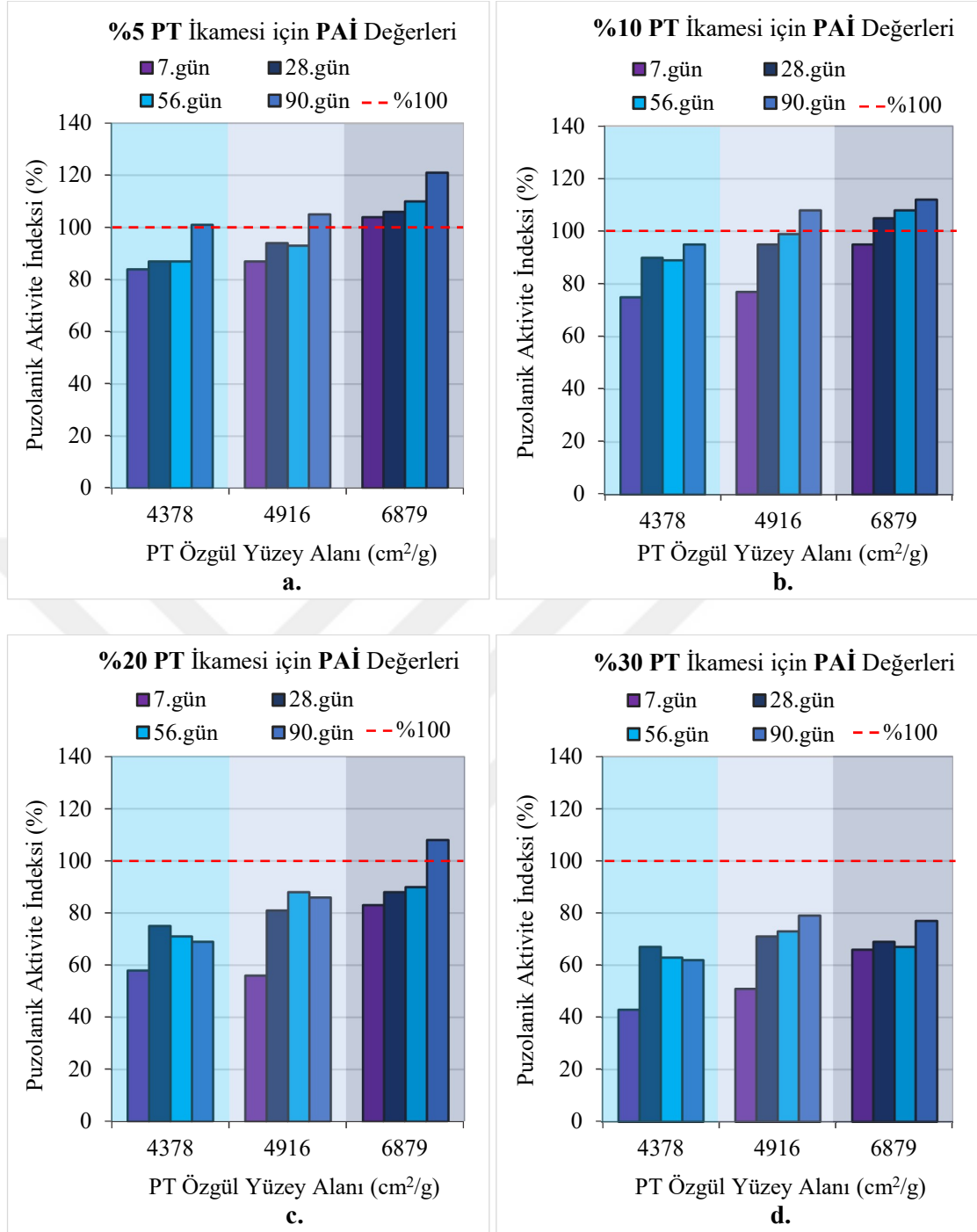
Şekil 4.16’da görüldüğü gibi, %30 ikame oranına sahip pomza tozu ile hazırlanan harç numunelerinin 7 günlük pozolanik aktivite indeksi incelendiğinde, hazırlanan tüm harç numunelerinin pozolanik aktivite indeksi ASTM C 618 (Anonymous 2019) standardında istenilen %75 kriterinin altında olduğu görülmektedir. 7 günlük pozolanik aktivite indeksi en yüksek olan C42,5P3 numunesinde %66 oranında ölçülmüştür. 28 günlük pozolanik aktiviteleri verilen numuneler incelendiğinde, diğer ikame oranlarında C42,5P3 numunesinin pozolanik aktivite indeksi en yüksek değer iken, %30 ikame oranlı gruplarda C42,5P2 numunesinde en yüksek değer ölçülmüştür. İnce malzeme miktarının fazla olması basınç dayanımında

azaltıcı etki göstermiş olup bunun sebebi bağlayıcı çimentonun miktarı azaldığı için serbest halde bulunan CH yeteri kadar puzolan ile bağlanıp C-S-H oluşturmuş olabileceği, bağlanamayan fazla puzolanın harç numunesinde zamanla basınç dayanımını düşürebileceği söylenebilir. 56 ile 90 gün arasında puzolanik aktivite indeksi azalma gösteren numuneler mevcuttur. Bu numuneler C32,5P1, C32,5P2 ve C42,5P3 numuneleridir. Özellikle C42,5P3 numunesinin 56 günlük basınç dayanımında azalma mevcut iken 90 günde basınç dayanımının artmış olduğu görülmektedir. Elde edilen bu sonuç puzolanik aktivite indeksini etkilemektedir. Genel olarak %30 ikame oranında pomza tozu ilaveli harç numunelerinde puzolanik aktivite indeksi standartta verilen kritik değerler altında olduğu görülmüştür. Lawrence et al. (2003) çalışmasında değindiği gibi bu azalmanın sebebinin çimentonun seyreltme etkisinden kaynaklı olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca 7 günlük erken yaş dayanımı, pomza tozu ikamesinin artması ile karışımın hidrasyon ısını ve çimento içerisindeki C_3S (tirikalsiyum silikat) miktarını düşürmüş olup bu etkinin basınç dayanımında azalmaya neden olduğu düşünülebilir.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18’de pomza tozunun inceliğinin farklı inceliklere sahip harç numunelerinde puzolanik aktivite indeksini ne derece etkilediği görülmektedir.



Şekil 4.17 CEM II 32,5 R çimentolu harç gruplarında pozolanik aktivite indeksinin pomza tozu (PT) inceliğine göre değişim grafikleri (PT ikame oranları; **a.** %5, **b.** %10, **c.** %20 ve **d.** %30 için).



Şekil 4.18 CEM II 42,5 R çimentolu harç gruplarında pozolanik aktivite indeksinin pomza tozu (PT) inceliğine göre değişim grafikleri (PT ikame oranları; **a.** %5, **b.** %10, **c.** %20 ve **d.** %30 için).

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere, CEM II /B-LL 32,5 R türü çimento ile hazırlanan harç numunesinde incelik arttıkça etkisini ilerleyen yaşlarda daha çok göstermiştir. 4.378 cm²/g inceliğine sahip pomza tozunun ikame oranı arttıkça pozolanik aktivite üzerinde etkisi azalmış, 6.879 cm²/g inceliğine sahip pomza tozunun ise pozolanik aktivite üzerinde etkisi artmıştır. Şekil 4.18’de görüldüğü üzere, CEM II /A-M (P-LL)

42,5 R türü çimento ile hazırlanan harç numunesinde ise her yaşta incelik arttıkça pozolanik aktivite indeksi de artmaktadır. Özellikle 7 ile 90 gün arasındaki süreçte pozolanik aktivite indeksinde artışlar belirlenmiştir. Bunun sebebi 7 günlük pozolanik malzemelerin dışında yeni oluşan ince bir tabakanın oluştuğu ve 28 güne ulaştığında pozolanik malzemenin dış kısmının daha çok kalınlaşarak oluşan C-S-H jeli boşlukları doldurduğu düşünülmektedir. Pozolanın tane boyutunun küçüklüğü tepkimeye giren yüzeyi artırması nedeniyle dayanımda artış sağlamış pozolanik aktivite indeksinde artışa sebep olmuştur. Reaksiyona giren birim çimento miktarı ile pomza tozunun miktarı pozolanik aktiviteyi etkileyen etmenler arasında olduğu söylenebilir.

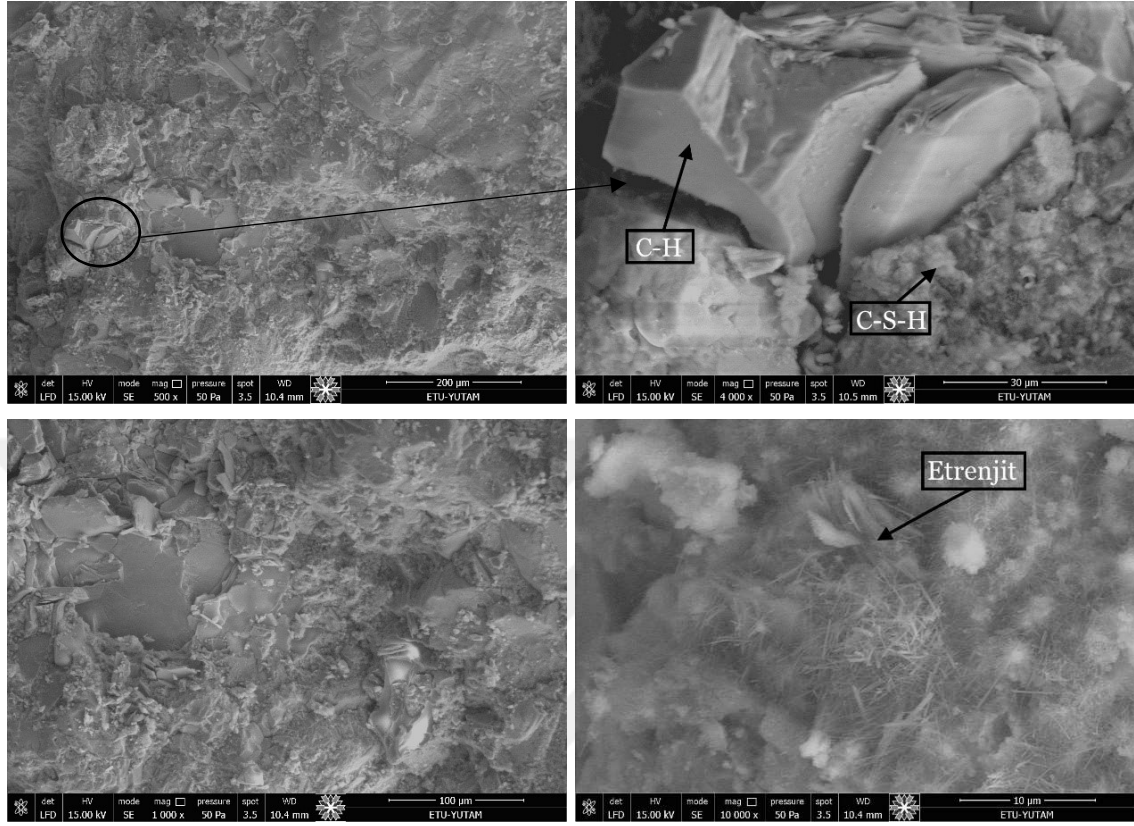
Zeyad ve Almalki (2021) benzer bir çalışmada pomza tozu inceliği arttıkça yüzey alanının daha çok artarak bağlayıcı ve kum arasında kuvvetli bir ara yüzey oluşturabileceğine değinmiştir. Çimento hidratasyon ürünü olan Ca(OH)_2 ile ince öğütülmüş pozolan geniş yüzey alanı sayesinde hızlı tepkimeye girerek ilave C-S-H oluşturabileceğini ve bu sayede basınç dayanımında artış görülebileceğini ifade etmiştir. Pomza tozunun inceliği arttıkça hem kısa vadede hem de uzun vadede basınç dayanımında artış belirlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar benzer bir çalışma olan Zeyad ve Almalki (2021)'nin çalışmasıyla destekler niteliktedir.

4.8. Harç Numunelerinin SEM-EDS Görüntüleri ve Değerlendirilmesi

Çalışma kapsamında üretilen 56 günlük %10 pomza tozu ikameli harç numuneleri ile kontrol numunelerinin basınç dayanımı sonrası yaklaşık 1-3 cm boyutlarında alınan örneklerden SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 4.19 ve Şekil 4.23'de SEM görüntüleri incelenen kontrol harç numunelerinde hidratasyona girmemiş çok sayıda C-H (Portlandit, Ca(OH)_2) görülmektedir. Ayrıca etrenjit oluşumuna da rastlanmıştır. Çimentonun ana bileşenlerinden biri olan C_3A 'nın reaksiyonu sonucu ortaya çıktığı düşünülmektedir. Şekil 4.20 ile Şekil 4.24'de verilen $4.378 \text{ cm}^2/\text{g}$ inceliğine sahip pomza tozu ikameli harç numunelerinden, Şekil 4.21 ile Şekil 4.25'de $4.916 \text{ cm}^2/\text{g}$ inceliğine sahip pomza tozu ikameli harç numunelerinden ve Şekil 4.22 ile Şekil 4.26'da $6.879 \text{ cm}^2/\text{g}$ inceliğine sahip pomza tozu ikameli harç numunelerinden örnekler alınmış olup SEM görüntüleri ve EDS verileri incelenmiştir. SEM görüntülerinde görülen pomza tozlarının köşeli oluşu pomzanın aşındırıcı özelliğinden

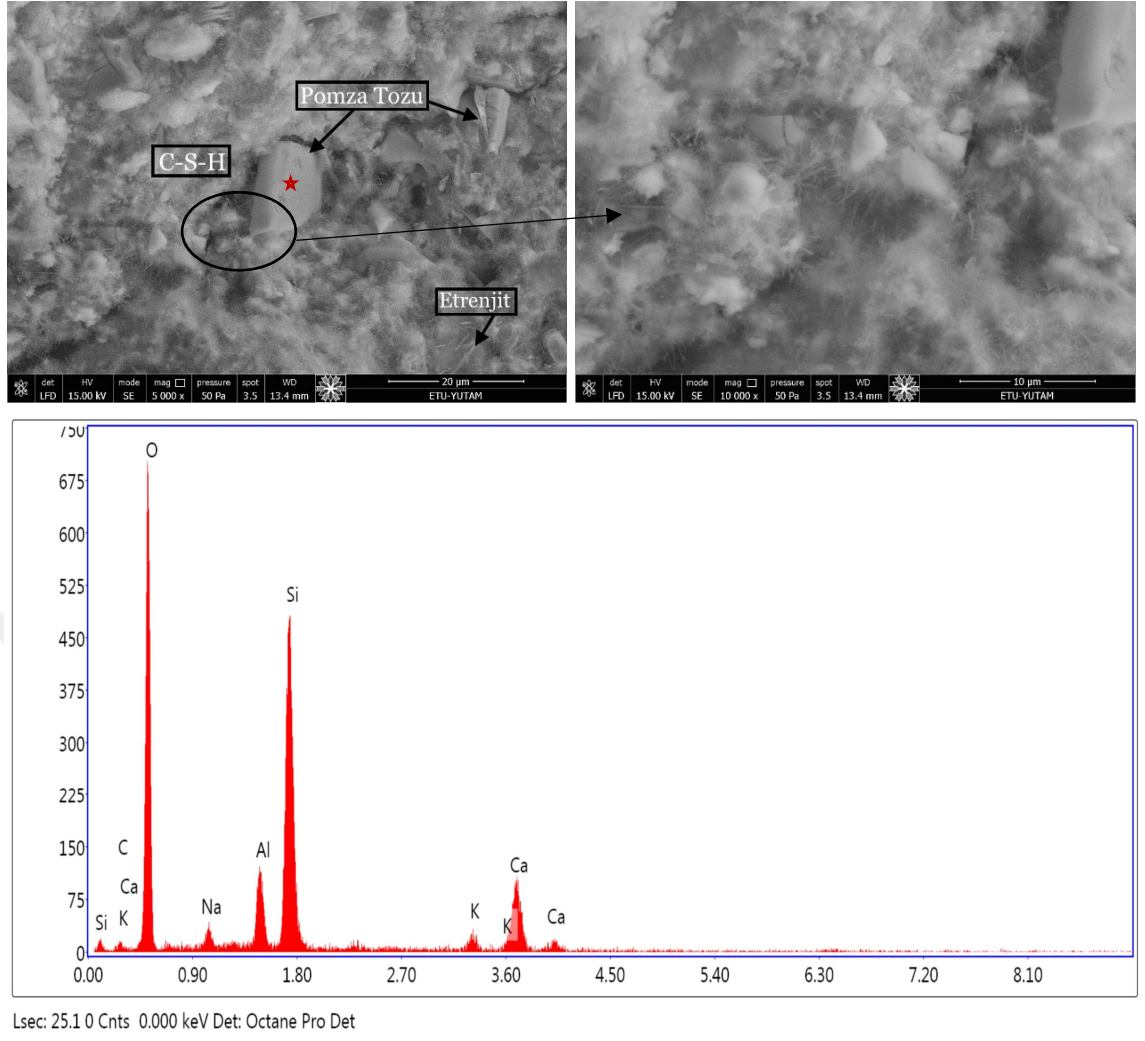
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

kaynaklıdır. İncelenen SEM görüntülerinde, pomza tozunun ve çimentonun inceliği arttıkça C-S-H oluşumlarında yoğunluk görülmektedir.

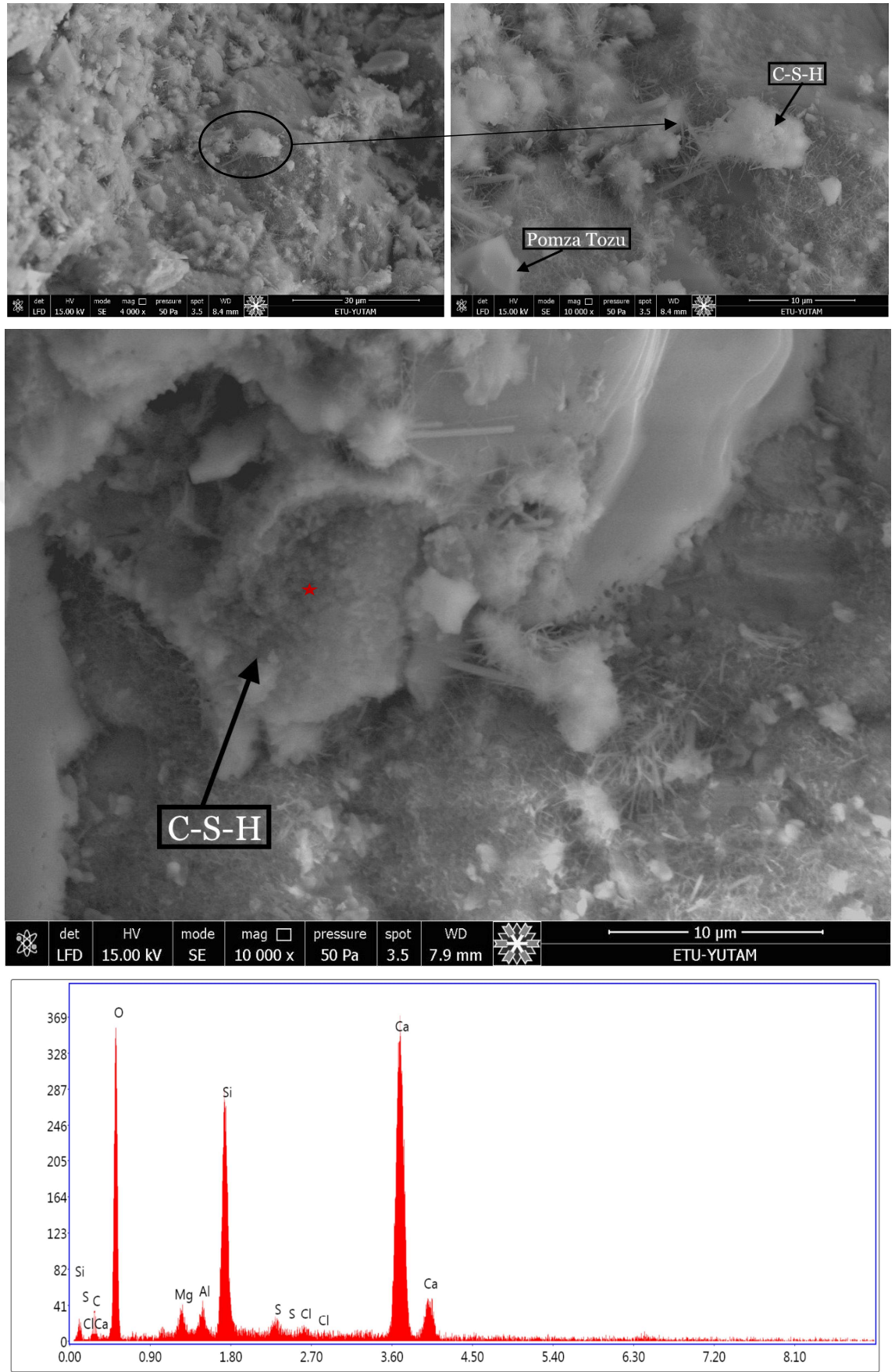


Şekil 4.19 CEM II 32,5 R tipi çimento ile hazırlanan kontrol harç numunesi SEM görüntüleri

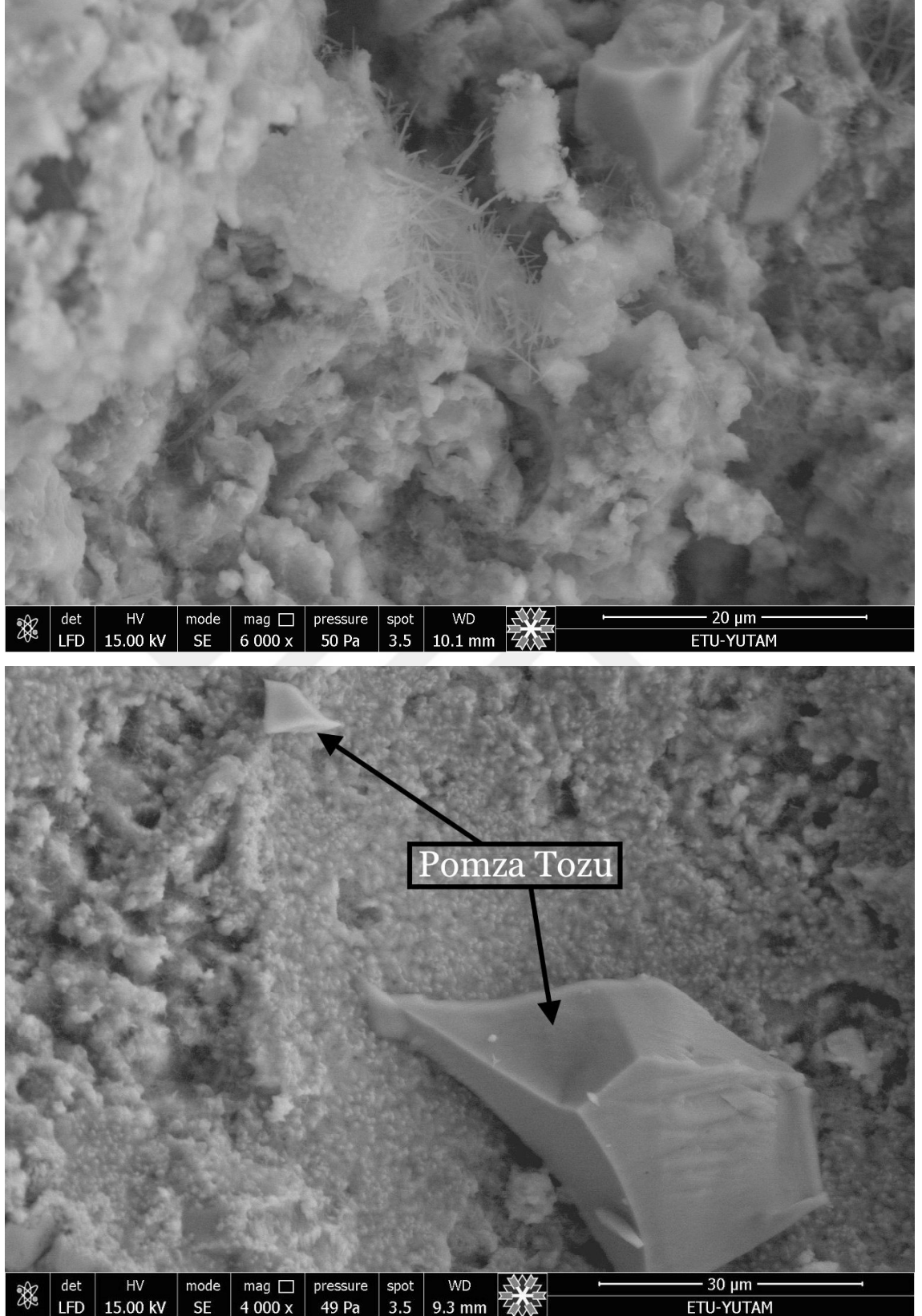
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



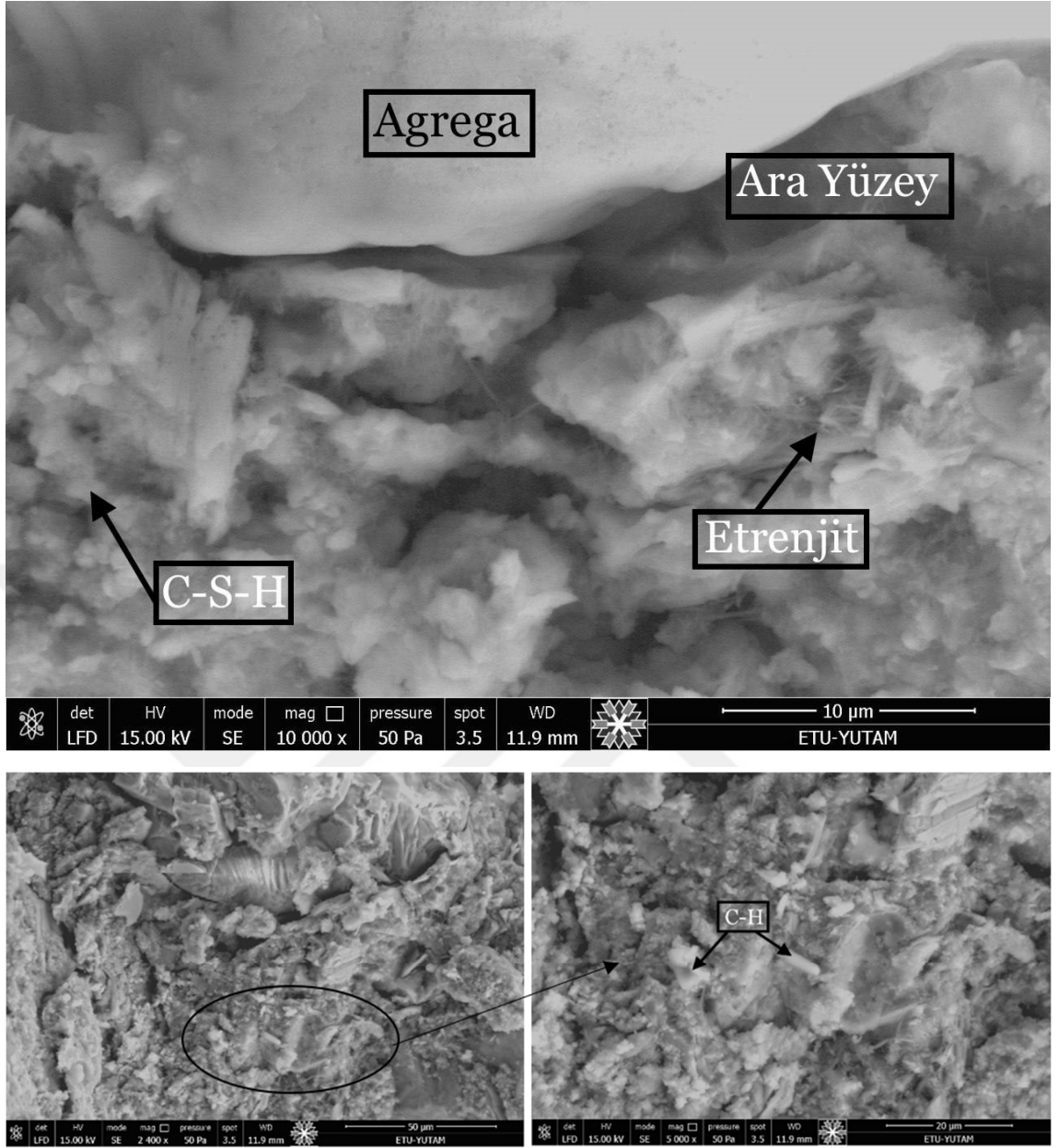
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.21 C32,5P2 harç numunesinin SEM görüntüleri ve EDS verileri

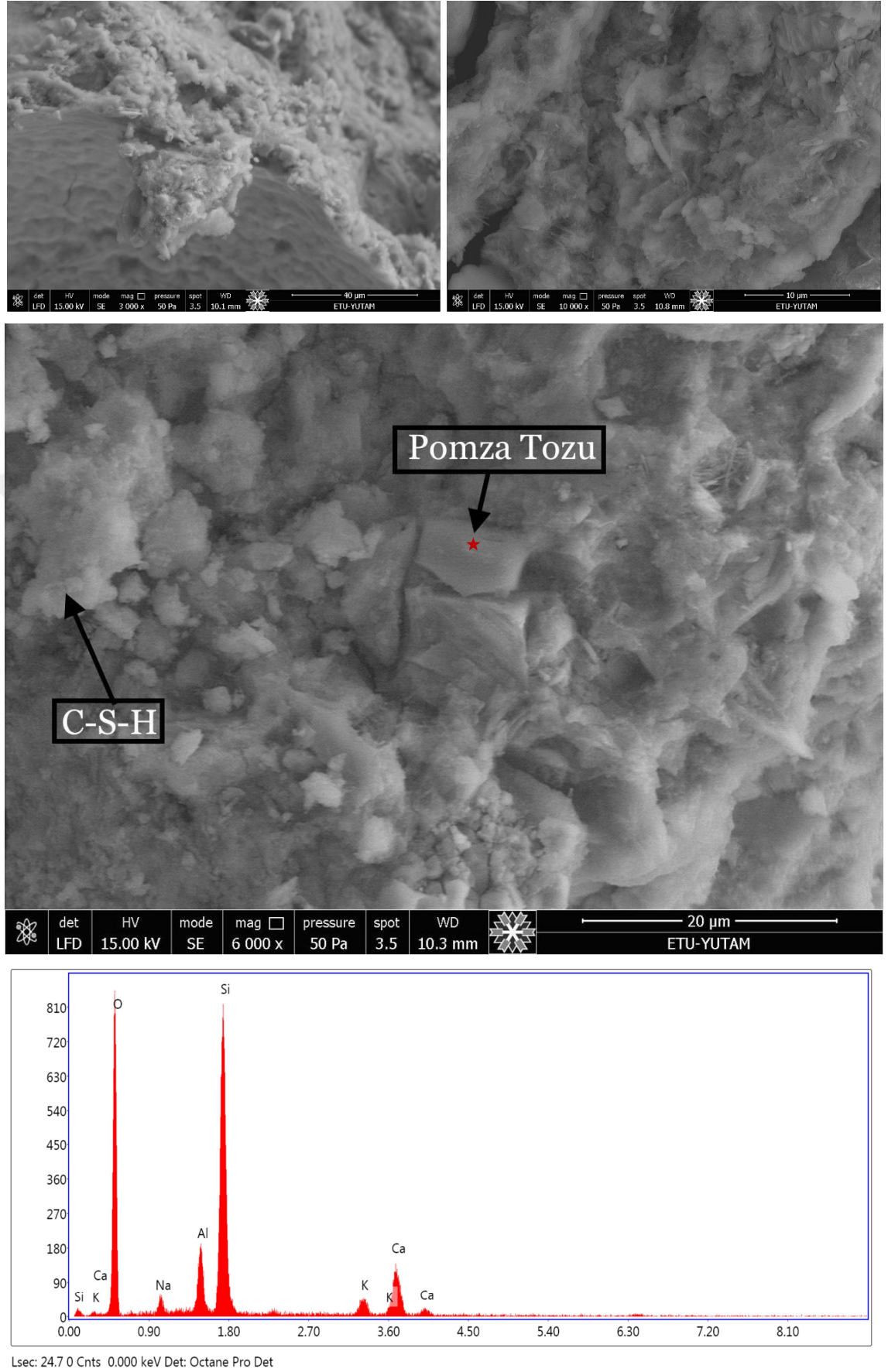


Şekil 4.22 C32,5P3 harç numunesinin SEM görüntüleri

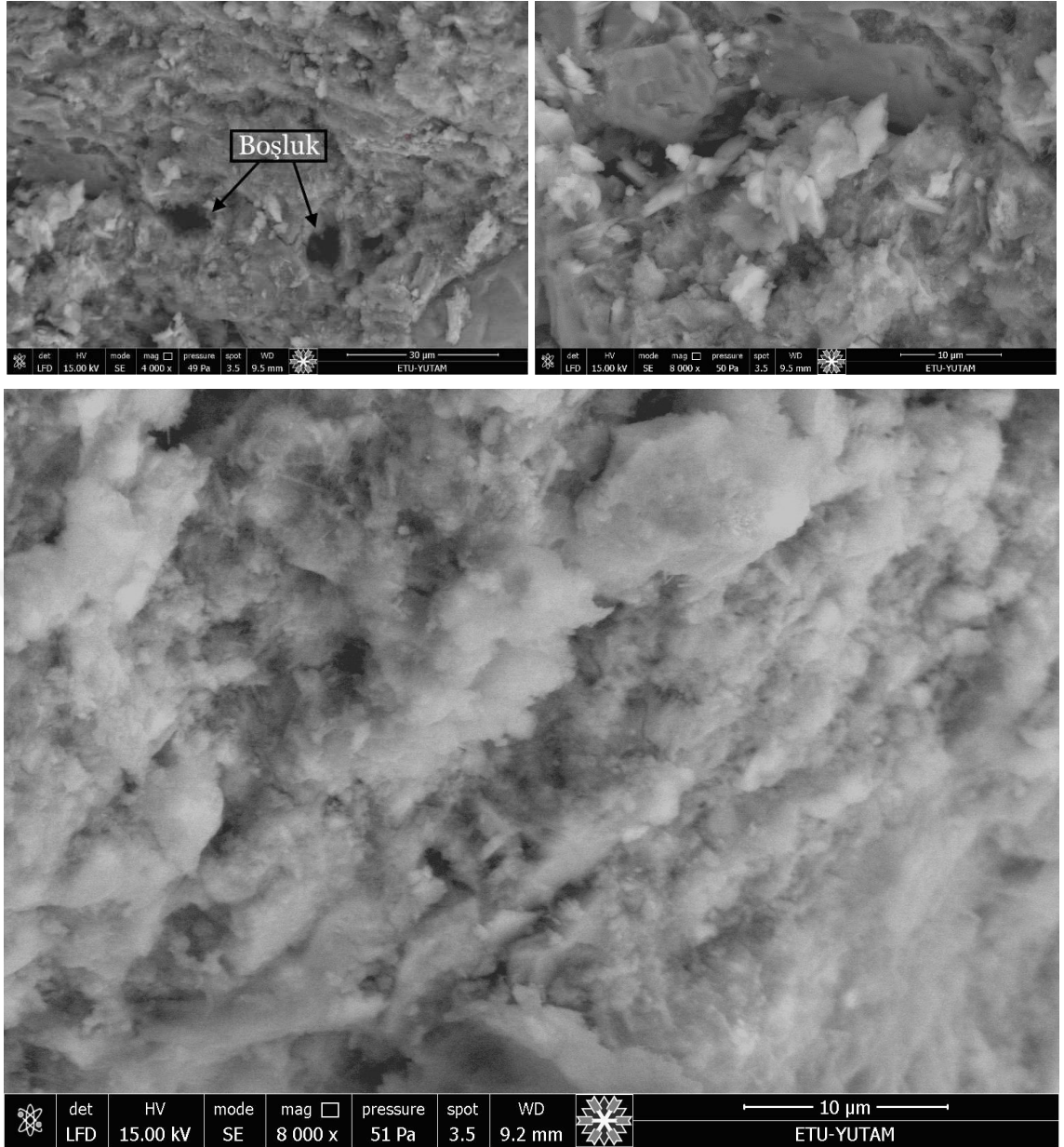


Şekil 4.23 CEM II 42,5 R tipi çimento ile hazırlanan kontrol harç numunesi SEM görüntüleri

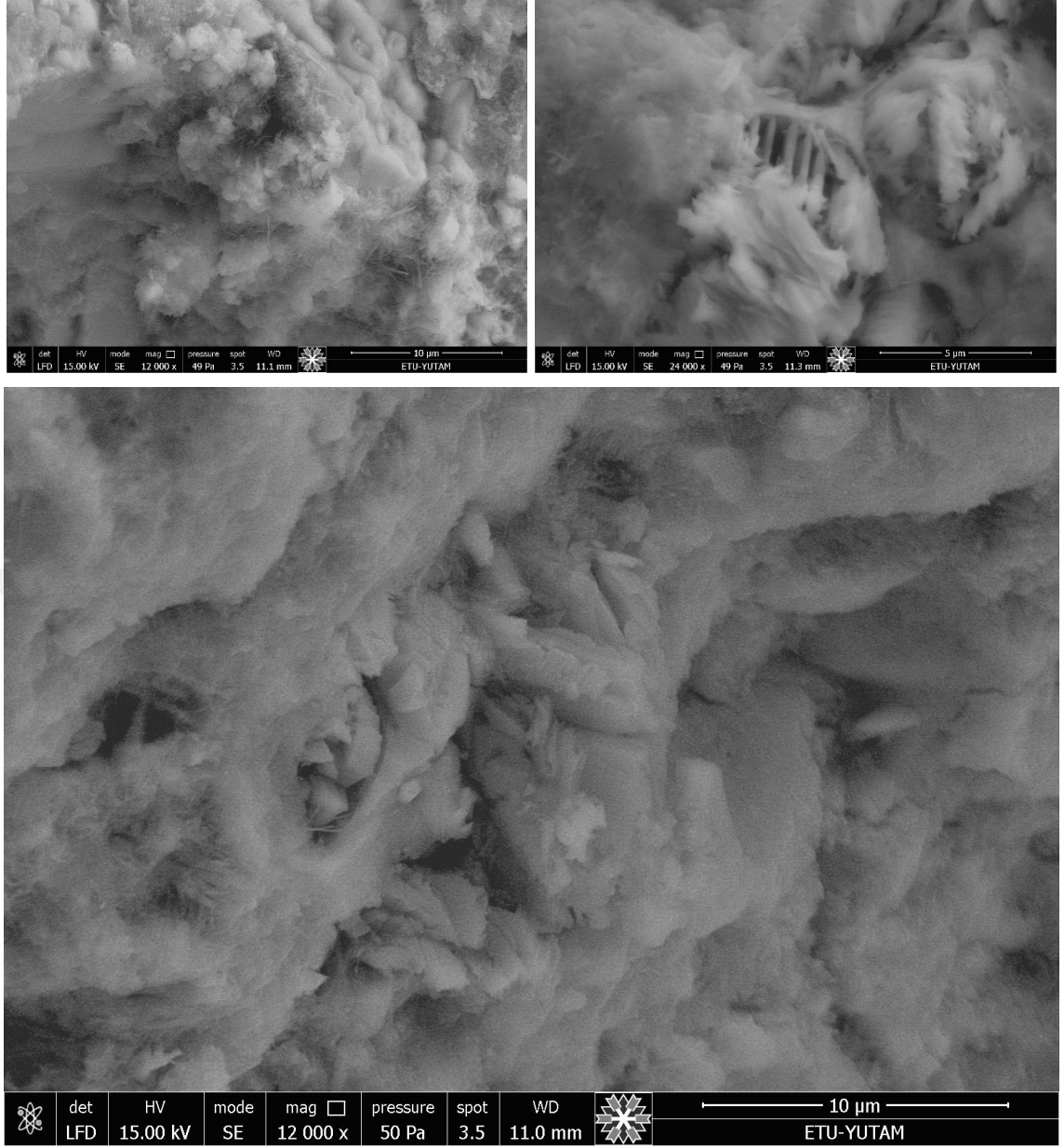
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA



Şekil 4.24 C42,5P1 harç numunesinin SEM görüntüleri ve EDS verileri



Şekil 4.25 C42,5P2 harç numunesinin SEM görüntüleri



Şekil 4.26 C42,5P3 harç numunesinin SEM görüntüleri

5. SONUÇ ve ÖNERİLER

Yapılan bu tez çalışmasında pomzanın puzolanik malzeme olarak kullanılabilirliği incelenmiş olup, daha sonra 3 farklı incelikte öğütülerek iki farklı inceliğe sahip aynı tip çimento ile üretilen harçlarda basınç dayanımına ve puzolanik aktivite indeksine etkisi incelenmiştir. Bunlara ek olarak, pomza tozu ikameli harçlarda, pomza tozu inceliğinin kıvam ve hidratasyon ısısı üzerine etkileri incelenmiştir. Elde edilen bulgularla şu sonuçlar çıkarılmıştır;

1. Çalışmada kullanılan pomzanın kimyasal bileşiminin kütlece %81,39'unu $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ oluşturmaktadır. Los Angeles cihazında 3.000, 5.000 ve 6.000 devirde öğütülen pomza tozlarının incelik değerleri sırasıyla 4378, 4916 ve $6.879 \text{ cm}^2/\text{g}$ olarak belirlenmiştir. Bu pomzanın, kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından TS 25 (Anonim 2008) ve ASTM C 618 (Anonim 2019) standartlarında belirtilen puzolan olabilme koşullarını sağladığı görülmüştür.
2. Pomza tozu ikamesi çimentonun kıvamını azaltmış ve en çok CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimento bu durumdan etkilenmiştir. CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimento ile pomza tozunun inceliği arttıkça harcın kıvamı azalmış, CEM II /B-LL 32,5 R türü çimento ile hazırlanan harçlarda ise kıvam artmıştır.
3. Pomza tozunun inceliği arttıkça, kullanıldığı harçlarda hidratasyon ısısı azalmıştır. Özellikle CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimento ile hazırlanan harcın yüksek miktardaki hidratasyon ısısını, pomza tozu %21 – 23 oranında azaltmıştır. CEM II /B-LL 32,5 R türü çimento ile hazırlanan harç daha düşük seviyelerde olduğundan hidratasyon ısısının düşürülmesinde pomza tozu daha az rol oynamıştır.
4. Pomza tozu ikameli harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanımları 5,18 – 31,51 MPa arasında değişiklik göstermiş olup, bu pomzanın puzolan olarak kullanılabilirliğini gösteren diğer bir TS 25 (Anonim 2008) standart kriterini sağladığı görülmüştür.
5. Pomza tozu ikamesi, bileşiminde kullanıldığı harçların basınç dayanımına önemli ölçüde katkı sağlamıştır. Öyle ki pomza tozunun bazı ikame oranlarında, kontrol numunelerinin üzerinde basınç dayanımı değerleri saptanmıştır. Bu olumlu etkinin, pomzanın yüksek orandaki $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ içerdiğinden

kaynaklandığı düşünülmektedir. CEM II /B-LL 32,5 R türü çimento ile CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimentoda çok farklı değerler belirlenmiştir.

6. Pomza tozu ikameli harç numunelerin zamanla basınç dayanımı artmıştır. 6.000 devirde öğütülen 6.879 cm²/g inceliğine sahip pomza tozu ikameli harç numunelerinde bu durum daha belirgin şekilde görülmektedir.
7. Pomza tozu ikameli harç numunelerinin 7 günlük basınç dayanım değerleri, puzolan inceliğindeki artışa bağlı olarak artmıştır. Özellikle 6.879 cm²/g inceliğine sahip pomza tozunun, CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimentoda %5 ikame edilmesiyle üretilen harç numunesinin basınç dayanımı kontrol numunesinin basınç dayanımından daha yüksektir.
8. 7 günlük (erken yaş) basınç dayanımları incelenen harç numunelerinde incelik arttıkça basınç dayanımında artış görülse de 90 günlük (ileri yaş) basınç dayanımlarında ciddi oranda artış görülmüştür.
9. 90 günlük basınç dayanımı sonuçları incelendiğinde, CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimentoda %5 oranında 6.879 cm²/g inceliğine sahip pomza tozu ikame edilen numunede kontrol numuneye göre %21 oranında basınç dayanımını artırmıştır. Kontrol-42,5 numunesinin 90 günlük basınç dayanımı 38,59 MPa ölçülürken C42,5P3%5 numunesinin basınç dayanımı 46,81 MPa olarak ölçülmüştür. C42,5P3%10 numunesinin basınç dayanımı ise 43,34 MPa olarak belirlenmiştir. Bu tür çimento ile hazırlanan harç numunelerinin her yaşında %5 ve %10 pomza tozu ikame oranları önemli ölçüde basınç dayanımlarını artırmıştır.
10. Puzolanik aktivite indeksi incelenen numunelerde CEM II /A-M (P-LL) 42,5 R türü çimentoda %20 ikame oranına kadar 6.879 cm²/g inceliğine sahip pomza tozu ikame edilebileceği belirlenmiştir. 7 ile 28 günlük basınç dayanımları ASTM C 618 sınır değeri olan en az %75 indeks kriterine sahip olma koşulunu sağlayan çok sayıda numune bulunmaktadır.
11. Harç numuneleri arasında 7, 28, 56 ve 90 günlük puzolanik aktivite indeksi en yüksek olan numune grubu sırasıyla %104, 106, 110 ve 121 değerleriyle 42,5P3%5 numunesidir.
12. Harç numunelerinin puzolanik aktivitesi; incelik ve kür süresi arttıkça artmış, ikame oranı arttıkça azalmıştır.
13. Pomza tozu ikamesinde bulunan numunelerin SEM-EDS görüntüleri incelendiğinde C-S-H jeli oluşumları görülmektedir.

Çalışma sonucunda puzolanik malzeme olarak kullanılan pomza tozunun inceliği arttıkça basınç dayanımı ile puzolanik aktivite indeksi artmıştır. Çimentonun hidratasyonu sonucu serbest halde bulunan Ca(OH)_2 büyük özgül yüzey alanına sahip pomza tozu ile daha hızlı reaksiyona girerek C-S-H oluşturmuştur. Çimentonun inceliğinin artması ile pomza tozu arasında tahmin edildiği gibi daha büyük puzolanik aktivite indeksi elde edilmiştir. Ayrıca çimento yerine ikame edilen pomza tozu çimento miktarını azaltarak çimento maliyetini azaltmıştır. Aynı zamanda çimento için klinker üretimi esnasında kullanılan enerji ve karbon salınımını azaltabileceği söylenebilir.

Bu çalışmanın ilerisi için verilebilecek öneriler;

- Pomza agregasını puzolan olarak kullanabilmek için öğütme işleminin maliyeti hesaplanabilir.
- Pomza tozunun daha çok öğütülmesi ile harç/beton numunelerindeki etkileri araştırılabilir.
- Puzolan olarak kullanılan pomza tozunu farklı tür çimentolarda etkileri araştırılabilir.
- Farklı incelikler farklı oranlarda çimento ikamesinde kullanılabilir.
- Pomza tozu katkılı harç numunelerinin farklı kür sıcaklıklarının basınç dayanımı ve puzolanik aktiviteye etkisi araştırılabilir.

KAYNAKLAR

- Adams, J. A. 1941. Pumice and pumicite. GMI Short Paper, State of Oregon, Department of Geology and Mineral Industries, (6), 8.
- Aksay, E. K. 2005. İzmir-menderes yöresi pomza cevherinin kullanımına yönelik teknolojik özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Bölümü, Cevher Hazırlama Anabilim Dalı, 278, İzmir.
- Aksay, E. K., Akar, A. ve Cöcen, İ. 2016. Pomza cevherinin hazırlanması ve zenginleştirilmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(2), 384-390.
- Al-Chaar, G. K., Alkadi, M. and Asteris, P. G. 2013. Natural pozzolan as a partial substitute for cement in concrete. The Open Construction and Building Technology Journal, 7, 33-42.
- Anonim, 2000a. TS EN 1097-2: Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2000b. TS EN 196-6: Çimento Deney Metotları- Bölüm 6: İncelik Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2000c. TS EN 1015-3: Kagit Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası İle), Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2001. TS EN 1097-7: Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 7: Taşunu (Filler) Tane Yoğunluğunun Tayini- Piknometre Metodu. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2002. TS EN 196-1: Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2006. Bims (Pomza) Alt Sektör Raporu. Bims Sanayicileri Derneği, Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Türkiye Toprak Sanayi Meclisi, 48, Ankara.
- Anonim, 2008. TS 25: Doğal puzolan (tras)- çimento ve betonda kullanılan- tarifler, gerekler ve uygunluk kriterleri. Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2010. Feldspat Raporu. TMMOB Maden Mühendisleri Odası, 40, Ankara.
- Anonim, 2011. TS EN 196-9: Çimento Deney Yöntemleri- Bölüm 9: Hidratasyon Isısı- Yarı Adyabatik Yöntem, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Anonim, 2020. Puzolan nedir? Çimento İçerisinde Kullanılması. Web Sitesi: <https://santiyede.com.tr>, Erişim Tarihi: 12.07.2022.

- Anonim, 2022a. Bims & Pomza Nedir. Web Sitesi: <https://www.kapadokyaperlit.com>, Erişim Tarihi: 18.07.2022.
- Anonim, 2022b. Puzolanik Maddeler. Web Sitesi: <https://panoramakine.com.tr>, Erişim Tarihi: 24.07.2022.
- Anonim, 2022c. Web Sitesi: <https://pomzamer.sdu.edu.tr>, Erişim Tarihi: 13.07.2022.
- Anonim, 2022d. Kuvars. Web Sitesi: <https://tr.wikipedia.org>, Erişim Tarihi: 01.11.2022.
- Anonim, 2022e. Kristobalit ve Kristobalit Unu. Web Sitesi: <https://chs.com.tr>, Erişim Tarihi: 01.11.2022.
- Anonim, 2022f. Briket Bims Fiyatları 2022 Listesi. Web Sitesi: <https://www.yapikulubu.com>, Erişim Tarihi: 15.11.2022.
- Anonim, 2022g. Pomza taşı. Web Sitesi: <https://www.teknobims.com.tr>, Erişim Tarihi: 28.09.2022.
- Anonymous, 2019. ASTM C 618- Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete.
- Ardoğa, M. K. 2014. Effect of particle size on heat of hydration of pozzolan incorporated cements. The Degree of Master of Science, Middle East Technical University, Civil Engineering, 109, Ankara.
- Baradan, B., Türkel, S., Yazıcı, H., Ün, H., Yiğiter, H., Felekoğlu, B., Felekoğlu, K.T., Aydın, S., Yardımcı, M., Topal, A. ve Öztürk, U. 2015. Beton. Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 825, İzmir.
- Bargoth, M. A. 2021. Öğütülmüş pomzanın kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı, 278, Kastamonu.
- Bayraktar, O. Y. 2016. Puzolanik katkı malzemeleriyle üretilen harçlarda sıcaklık etkisi altında meydana gelebilecek kaza anındaki mekanik davranışlarının istatistiksel olarak karşılaştırılması. Doktora tezi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kazaların Çevresel ve Teknik Araştırması Anabilim Dalı, 215, Ankara.
- Bertoldi, M., Borgini, A., Tittarelli, A., Fattore, E., Cau, A., Fanelli, R. and Crosignani, P. 2012. Health effects for the population living near a cement plant: an epidemiological assessment. Environment International, 41(1), 1-7.
- Bulut, Ü. 2007. Perlitin puzolanik aktivitesi. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık Anabilim Dalı, 162, İstanbul.
- Caputo, D., Liguori, B. and Colella, C. 2008. Some advances in understanding the pozzolanic activity of zeolites: The effect of zeolite structure. Cement and Concrete Composites, 30(5), 455–462.

- Celik, K., Hay, R., Hargis, C. W. and Moon, J. 2019. Effect of volcanic ash pozzolan or limestone replacement on hydration of Portland cement. *Construction and Building Materials*, 197(197), 803–812.
- Chatterjee, M. K. and Lahiri, D. 1967. Pozzolanic activity in relation to specific surface of some artificial pozzolanas-part 1: measurement of surface area from water adsorption isotherms. *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 26(1), 65-70.
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M. and Fairbairn, E. M. R. 2008. Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), 410–418.
- Çavdar, A. ve Yetgin, S. 2004. Tane İnceliğinin Traslı Çimento Özelliklerine Etkisi, Türkiye İnşaat Mühendisliği 17. Teknik Kongre ve Sergisi, 15-17 Nisan, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, 451-454, İstanbul.
- Çelik E. 2022. Bims Nedir? Nerelerde Kullanılır?. Web Sitesi: <https://cimsa.com.tr>, Erişim Tarihi: 01.11.2022.
- Çetin, M., Baki, V. A. ve Gürbüz, A. 2018. Silis dumanı katkılı beton harçlar üzerine deneysel bir çalışma. *Türk Hidrolik Dergisi*, 2(2), 9-12.
- Day, R. L. and Shi, C. 1994. Influence of the fineness of pozzolan on the strength of lime natural-pozzolan cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 24(8), 1485–1491.
- De Rojas, M. I. S. and Frías, M. 1996. The pozzolanic activity of different materials, its influence on the hydration heat in mortars. *Cement and Concrete Research*, 26(2), 203–213.
- Demirel, B. 2013. Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks. *Construction and Building Materials*, 40, 306–313.
- Demirel, B. 2008. Öğütülmüş pomzanın beton basınç dayanımına etkisinin yapay sinir ağı ile belirlenmesi. *Engineering Sciences*, 3(1), 20-29.
- Dif, F., Douara, T. H., Zaitri, R. and Mouli, M. 2020. Effects of combined natural volcanic powders on the thermo-physical and mechanical properties of structural eco-concrete. *Journal of Building Engineering*, 32, 101835, 1-9.
- Dorum, A., Koçak, Y., Yılmaz, B. ve Uçar, A. 2009. Yüksek fırın cürufunun çimento yüzey özelliklerine ve hidratasyona etkileri. *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (19), 47-58.
- DPT. 2001. Endüstriyel hammaddeler alt komisyonu genel endüstri mineralleri II (mika-zeolit-lületaşı). Sekizinci Beş Yıllık Kalkınma Planı, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, 75, Ankara.
- Elmastaş, N. 2012. Türkiye ekonomisi için önemi giderek artan bir maden: pomza (sünger taşı). *Uluslararası Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 5(23), 197-206.

- Engin, Y. 2014. Çimento üretiminde kullanılan mineral katkıları. Web Sitesi: <https://www.betonvecimento.com>, Erişim tarihi: 05.11.2022.
- Erdoğan, T. Y. 2003. Beton (1. Baskı). ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayınları, 741, Ankara.
- Erdoğan, K., Tokyay, M. ve Türker, P. 2011. Traslar ve Traslı Çimentolar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 3-61, Ankara.
- Eroğlu, G. ve Şahiner, M. 2020. Dünya'da ve Türkiye'de Pomza. Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, 32.
- Fapohunda, C., Akinbile, B. and Shittu, A. 2017. Structure and properties of mortar and concrete with rice husk ash as partial replacement of ordinary Portland cement – A review. International Journal of Sustainable Built Environment, 6(2), 675–692.
- Fisher, R. V. and Schmincke, H. U. 1984. Pyroclastic fragments and deposits, In: Pyroclastic Rocks. 89-124.
- Gökçe, H. S. ve Can, Ö. 2009. Pomza agregasının farklı zamanlardaki su emmelerinin hafif betonun mekanik ve fiziksel özelliklerine etkisi. Politeknik Dergisi, 12(4), 293-298.
- Grasser, K. and Minke, G. 1990. Building with pumice. A Publication of Deutsches Zentrum für Entwicklungstechnologien, In Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 1-64, Germany.
- Gülen, J., Zorbay, F. ve Arslan, S. 2012. Zeolitler ve kullanım alanları. Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi, 2(1), 63-68.
- Gündeşli, U. 2008. Uçucu kül, silis dumanı ve yüksek fırın cürufunun beton ve çimento katkısı olarak kullanımı üzerine bir kaynak taraması. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 71, Adana.
- Gündüz, L., Rota, A. ve Hüseyin, A. 2001. Türkiye ve Dünyadaki Pomza Oluşumlarının Malzeme Karakteristiği Analizi, 4. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 18-19 Ekim, 175-188. İzmir.
- Hamalı, Y. 2007. Metakaolin ve silis dumanı içeren harç ve betonların özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 45, İstanbul.
- He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M. and Wang, Y. 2019. Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. Construction and Building Materials, 211, 965–973.
- Hossain, K. M. A. 2004. Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete. Cement and Concrete Research, 34, 283–291.

- Hossain, K. M. A. 2005. Volcanic ash and pumice as cement additives: pozzolanic, alkali-silica reaction and autoclave expansion characteristics. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1141–1144.
- Işık, A. 2018. Farklı mineral katkı içeren harç numunelerinin dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, 86, İstanbul.
- Joshi, R. C. 1970. Pozzolanic reactions in synthetic fly ashes. Doctoral Thesis, Iowa State University, Civil Engineering, 217, Iowa.
- Kaplan, H. ve Binici, H. 1995. Tras ve traslı çimentolar. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(2-3), 121-127.
- Kara, F. Ç. ve Kayılı, M. T. 2021. Yapı malzemelerine sürdürülebilir mimarlık bağlamında bütüncül bir bakış: duvar malzemelerinin çevresel etkilerinin ve enerji performansının belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 31 (Ek Sayı 1), 583-593.
- Kara, İ. B. 2022. Characterization, pozzolanic activity of natural pileki and calcined pileki and effect to mechanic properties of cement mortars. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 37(1), 555-569.
- Khalaf, A. A., Idan, F. K. and Nasser, K. Z. 2018. Effect the localfly ash on cement mortar properties. *Journal of University of Babylon, Engineering Sciences*, 26(5), 383-394.
- Khurana, S., Banerjee, R. and Gaitonde, U. 2002. Energy balance and cogeneration for a cement plant. *Applied Thermal Engineering*, 22(5), 485–494.
- Kırimer, H. 1976. Perlit. *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 15(6), 37-44.
- Koca, K. 2013. Betonda kullanılan doğal mineral katkı malzemelerinin tane boyut dağılımının su ihtiyacı ve dayanım aktivite indeksi üzerindeki etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı. 86, Niğde.
- Kotan, T. 2009. Pasinler – Demirdöven pomzası ile üretilen hafif betonların mekanik özelliklerine atmosferik basınçlı buhar kürünün etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 133, Erzurum.
- Köse, H. ve Pamukçu, Ç. 1997. Pomza ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanım Olanakları, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, 16-17 Ekim, 97-105, İzmir.
- Kumar, S. S., Nagpure, A. S., Kumar, V., Sunisha, B., Preeti, S., Deepali, S. and Nath, S. R. 2008. Impact of dust emission on plant vegetation in the vicinity of cement plant. *Environmental Engineering and Management Journal*, 7(1), 31-35.

- Kurç, Ö. ve Anıl, E. B. 2008. Gazbeton, tuğla ve bims blok kullanımının bina statik tasarımına ve maliyetine olan etkilerinin incelenmesi. Orta Doğu Teknik Üniversitesi 07-03-03-1-0069 Kodlu Danışmanlık Projesi Raporu, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 21, Ankara.
- Kurugöl, S. and Güleç, A. 2017. Puzolanik aktivite kimyasal tespit yöntemleri. Restorasyon ve Konservasyon Çalışmaları Dergisi, (19), 63-72.
- Kurugöl, S., 2017. Puzolanik aktivite tespit yöntemleri: fiziksel metotlar. Cumhuriyet Üniversitesi Fen Fakültesi Fen Bilimleri Dergisi, 38(1), 21-39.
- Lawrence, P., Cyr, M. and Ringot, E. 2003. Mineral admixtures in mortars Effect of inert materials on short-term hydration. Cement and Concrete Research, 33(12), 1939–1947.
- Malhotra, V. M. and Mehta, P. K. 1996. Pozzolanik and cementitious materials. Gordon and Breach, Philadelphia, 1, 191.
- Massazza, F. 1983. Admixtures in concrete. Advances in Cement Technology, 569–648, Italy.
- Massazza, F. 1998. Pozzolana and pozzolanic cements. Lea's Chemistry of Cement and Concrete, 471–635.
- Mboya, H. A., Makunza, J. and Mwishwa, Y. H. B. 2011. Assessment of pumice blocks in comparison to cement sand blocks and burnt blocks 'The case of Mbeya City – Tanzania'. Journal of Civil Engineering Research and Practice, 8(1), 43–55, Tanzania.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. 2001. Concrete: microstructure, properties and materials. University of California, 239.
- Mirza, W. H., Al-Noury, S. I., and Al-Bedawi, W. H. 1991. Temperature effect on strength of mortars and concrete containing blended cements. Cement and Concrete Composites, 13(3), 197–202.
- Mota dos Santos, A. A. and Cordeiro, G. C. 2021. Investigation of particle characteristics and enhancing the pozzolanic activity of diatomite by grinding. Materials Chemistry and Physics, 270.
- Navrátilová, E. and Rovnaníková, P. 2016. Pozzolanik properties of brick powders and their effect on the properties of modified lime mortars. Construction and Building Materials, 120(5), 530-539.
- Onoue, K., Tamai, H. and Suseno, H. 2015. Shock-absorbing capability of lightweight concrete utilizing volcanic pumice aggregate. Construction and Building Materials, 83, 261–274.
- Özcan, F. and Koç, M. E. 2018. Influence of ground pumice on compressive strength and air content of both non-air and air entrained concrete in fresh and hardened state. Construction and Building Materials, 187, 382–393.

- Özcan, U. ve Güngör. S. 2019. Sürdürülebilir bir yöntem / betonda puzolan kullanımı. *European Journal of Science and Technology*, 15, 176-182.
- Özer, B. 2000. Doğal puzolanlar ile üretilen betonlarda kür etkisinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 64, İstanbul.
- Özturan, T. 1991. Yüksek Mukavemetli Beton Üretiminde Mineral Katkı Maddelerin Etkinliği, 2. Ulusal Beton Kongresi, 27 Mayıs, Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı, 280–291, Ankara.
- Özün, S. 2019. Pomza'nın fiziksel özelliklerinin kuru birim hacim ağırlığı ve termal iletkenliği üzerine etkileri. Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 23, 26-32.
- Pan, S., Tseng, D. and Lee, C. 2003, Influence of the fineness of sewage sludge ash on the mortar properties. *Cement Concrete Research*, 33(11), 1749-1754.
- Paya, J., Monzo, J., Borrachero, M. V., Peris-Mora, E. and Amahjour, F. 2000. Mechanical treatment of fly ashes Part IV. Strength development of ground fly ash-cement mortars cured at different temperatures. *Cement and Concrete Research*, 30(4), 543-551.
- Sanjuán, M. Á., Argiz, C., Gálvez, J. C. and Moragues, A. 2015. Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance. *Construction and Building Materials*, 96, 55–64.
- Seraj, S., Cano, R., Ferron, R. D. and Juenger, M. C. G. 2017. The role of particle size on the performance of pumice as a supplementary cementitious material. *Cement and Concrete Composites*, 80, 135-142.
- Shi, C. 1992. Activation of natural pozzolans, fly ashes and blast furnace slag. Doctoral Thesis, The University of Calgary, Department of Civil Engineering, 239, Canada.
- Stuart, K. D., Anderson, D. A. and Cady, P. D. 1980. Compressive strength studies on portland cement mortars containing fly ash and superplasticizer. *Cement and Concrete Research*, 10(6), 823–832.
- Sun, H., Zhang, X., Zhao, P. and Liu, D. 2021. Effects of nano-silica particle size on fresh state properties of cement paste. *Journal of Civil Engineering*, 25(7), 2555–2566.
- Şahin, R., Demirboğa, R., Uysal, H. and Gül, R. 2003. The effects of different cement dosages, slumps and pumice aggregate ratios on the compressive strength and densities of concrete. *Cement and Concrete Research*, 33(8), 1245–1249.
- Tashiro, C., Ikeda, K. and Inoue, Y. 1994. Evaluation of pozzolanic activity by the electric resistance measurement method. *Cement and Concrete Research*, 24(6), 1133–1139.

- Tekin, D. 2014. Farklı inceliklerdeki mineral katkılı çimentoların bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 103, Bayburt.
- Thongsanitgarn, P., Wongkeo, W., Chaipanich, A. and Poon, C. S. 2014. Heat of hydration of Portland high-calcium fly ash cement incorporating limestone powder: Effect of limestone particle size. *Construction and Building Materials*, 66, 410–417.
- Tironi, A., Trezza, A. M., Scian, A. N. and Irassar, E. F. 2013. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. *Cement and Concrete Composites*, 37, 319–327.
- Toklu, K. 2009. Pomza taşından üretilen bims blok kalitesinin artırılma olanaklarının araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Ana Bilim Dalı, 81, İstanbul.
- Topçu, İ. B. ve Canbaz, M. 2001. Uçucu kül kullanımının betondaki etkileri. *Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(2), 11-23.
- Tuncer, E. 2014. Gümüşhane yöresi volkanik kayaçların pozvolanik aktivitesinin araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 74, Gümüşhane.
- Turanlı, L., Uzal, B. and Bektaş, F. 2005. Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements. *Cement and Concrete Research*, 35, 1106–1111, Ankara.
- Türkel, S. ve Kadiroğlu, B. 2007. Pomza agregalı taşıyıcı hafif betonun mekanik özelliklerinin incelenmesi. *Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(3), 353-359.
- Türkkan, A. 2015. Çimento Fabrikalarının Sağlık Etkileri. Bursa Tabip Odası Yayınevi, 35, Bursa.
- Uçar, A., Koçak, Y. ve Dorum, A. 2010. Çimento sektöründe zeta potansiyel. *Engineering Sciences*, 5(3), 308-318.
- Ustabaş, I. and Kaya, A. 2018. Comparing the pozzolanic activity properties of obsidian to those of fly ash and blast furnace slag. *Construction and Building Materials*, 164, 297-307, Rize.
- Ustabaş, İ., Erdoğan, Ş., Ömür, İ. and Yılmaz, E. 2021. Pozzolanik effect on the hydration heat of cements incorporating fly ash, obsidian, and slag additives. *Hindawi Advances in Civil Engineering*, Article, 12.
- Vaudrey, C. 1950. Wyoming pumice concrete. Master's Thesis, University of Wyoming, The Department of Civil Engineering, 130, Wyoming.
- Vu, D., Stroeven, P. and Bui, V. 2001. Strength and durability aspects of calcined caolin – blended portland cement mortar and concrete. *Cement and Concrete Composites*, 23, 471- 478.

- Whitham, A. G. and Sparks, R. S. J. 1986. Pumice. Bulletin of Volcanology, 48(4), 209–223.
- Yagi K. 1966. Experimental study on pumice and obsidian. International Symposium on Volcanology, 29, 559-572.
- Yalçinkaya, Ç. 2019. Bağlayıcı maddeler. Yapı Malzemesi II Ders Notları, Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, 94, İzmir.
- Yanık, M. 2019. Farklı incelikte öğütülmüş obsidyen katkılı çimentoların pozolanik özelliklerinin tayini. Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 55, Rize.
- Yenimol, S., Caferoğlu, Ö. ve Gündüz, İ. 2013. Silis dumanlı beton uygulaması. T.C Orman ve Su İşleri Bakanlığı Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü DSİ Ilısu Projesi 16. Bölge Müdürlüğü, 120, Mardin.
- Yıldız, N. 2014. Yalıtımda Doğal Çözüm: Perlit. Madencilik Türkiye Dergisi, (102), 100-102.
- Zeyad, A. M. and Almalki, A. 2021. Role of particle size of natural pozzolanic materials of volcanic pumice: flow properties, strength, and permeability. Arabian Journal of Geosciences, 14, 107.
- Zeyad, A. M., Tayeh, B. A. and Yusuf, M. O. 2019. Strength and transport characteristics of volcanic pumice powder based high strength concrete. Construction and Building Materials, 216, 314–324.