T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PONZA TOZU VE YÜKSEK FIRIN CÜRUFU ESASLI ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ MALZEMENİN FİZİKSEL, MEKANİK VE İÇYAPI ÖZELLİKLERİ

Mümin MERT

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yapı Programı

Danışman

Prof. Dr. Nihat KABAY

Aralık, 2021

Danışmanım Prof. Dr. Nihat KABAY sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Ponza Tozu Ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Alkali İle Aktive Edilmiş Malzemenin Fiziksel, Mekanik Ve İçyapı Özellikleri başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Mümin MERT

İmza

Bu çalışma, Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü' nün FYL-2020-3867 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

Babama

TEŞEKKÜR

Bu çalışma kapsamında yaptığım deneyler ve tez yazım aşamasında benimle ilgilenen, gerek kaynak sağlamada gerek deney metotlarındaki bilgisi ve tecrübesiyle bana her türlü yardımı sağlayan tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Nihat KABAY'a,

Çalışmalarımda bana yardım eden Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü lisans öğrencileri Nausad MIYAN ve Sıla YAMAN'a,

Yapı Laboratuvarındaki deney aletlerinin nasıl kullanılması gerektiği hususundaki yardımlarından dolayı Lab. Tek. Halil YAVAŞÇI'ya

Bana bu süreçte desteklerini esirgemeyen aileme ve nişanlım Sahra BAŞYAZGAN'a ayrıca hayatımın her döneminde bana ilham kaynağı olan merhum babam İnş. Müh. Münir MERT'e

Yapı Malzemesi Laboratuvarı Personeline ve mensubu olmaktan gurur duyduğum tüm Yıldız Teknik Üniversitesi Ailesi'ne teşekkürlerimi sunarım.

Mümin MERT

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xii
ÖZET xiii
ABSTRACT xv
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 7
1.3 Orijinal Katkı 7
2 GENEL BİLGİLER 8
2.1 Geopolimerler 8
2.2 Alkali Aktivatör 9
2.3 Puzolan 11
2.3.1 Doğal Puzolanlar 13
2.3.2 Yapay Puzolanlar 14
2.4 Ponza 16
2.4.1 Ponzanın Tanımı ve Oluşumu 16
2.4.2 Dünyada ve Ülkemizde Ponza 18
2.4.3 Ponzanın Kullanım Alanları 20
2.5 Yüksek Fırın Cürufu 24
3 DENEYSEL ÇALIŞMA 28
3.1 Malzemeler 29
3.1.1 Ponza 29
3.1.2 Yüksek Fırın Cürufu 31
3.1.3 Çimento 33
3.1.4 Potasyum Hidroksit (KOH) 33
3.1.5 Sodyum Hidroksit (NaOH) 34
3.1.6 Sodyum Silikat 35
3.1.7 Kum 36
3.1.8 Karma Suyu 36

3.2 Numunelerin Üretimi 37
3.2.1 Hamur Numunelerin Üretimi 37
3.2.2 Harç Numunelerin Üretimi 39
3.3 Deneyler 41
3.3.1 Hamur Fazda Yapılan Deneyler 41
3.3.2 Harç Fazda Yapılan Deneyler 42
4 DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ 46
4.1 Hamur Fazda Yapılan Deneylerin Sonuçları 46
4.2 Harç Fazda Yapılan Deneylerin Sonuçları 50
4.2.1 Basınç Dayanımı 50
4.2.2 Su Emme Oranı, Yoğunluk ve Boşluk Oranı 52
4.2.3 Isı İletkenlik Katsayısı 55
4.2.4 İçyapı Analizleri 56
5 SONUÇ ve ÖNERİLER 61
Kaynakça 63
Tezden Üretilmiş Yayınlar 69

SİMGE LİSTESİ

B	Daldırma Sonrası Yüzey Kuru Numunenin Havadaki Ağırlığı (g)
D	Daldırma ve Kaynatma Sonrası Numunenin Sudaki Ağırlığı (g)
C	Daldırma ve Kaynatma Sonrası Yüzey Kuru Numunenin Havadaki Ağırlığı (g)
V	Hacim (cm^3)
m	Kütle (g)
A	Numunenin Havadaki Kuru Ağırlığı (g)
ρ	Suyun Özgül Ağırlığı (g/cm^3)
d	Yoğunluk (g/cm^3)

KISALTMA LİSTESİ

İS	İlave Su
P	Ponza
ss'li	Sodyum Silikatlı
ss'siz	Sodyum Silikatsız
ss/aa	Sodyum silikat/Alkali hidroksit oranı
yfc	Yüksek Fırın Cürufu

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Alüminosilikatların alkali aktivasyonu için kavramsal model 11
Şekil 2.2 Puzolanların sınıflandırılması.....13
Şekil 2.3 Ponzanın agregasının oluşum evreleri.....16
Şekil 2.4 Ponza agregasının gözenekli yapısı 17
Şekil 2.5 Dünya ponza ihracat payı.....20
Şekil 2.6 Yüksek fırın cürufunun oluşma prosesi.....25
Şekil 2.7 Granülasyon yöntemi 26
Şekil 2.8 Peletleme yöntemi.....27
Şekil 3.1 Ponzanın öğütülmesinde kullanılan disk öğütücü 29
Şekil 3.2 Öğütme işlemi sonucunda elde edilen ponza tozu.....29
Şekil 3.3 Ponza tozunun SEM görüntüsü 30
Şekil 3.4 Yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü.....31
Şekil 3.5 Ponza tozu ve yüksek fırın cürufuna ait tane dağılımları.....32
Şekil 3.6 Deneysel çalışmada kullanılan doğal kum.....36
Şekil 3.7 4,5 litre kapasiteli harç mikseri ve işlem sonrası elde edilen homojen karışım.....37
Şekil 3.8 Harç numuneler 40
Şekil 3.9 Hamur fazda yapılan basınç dayanımı deneyi düzeneği ve kırılma sonrası hal 41
Şekil 3.10 Harç numunede basınç deneyi 42
Şekil 3.11 Deney sonrası kırılma şekli.....42
Şekil 3.12 Silindir numuneler 43
Şekil 3.13 30 dakikalık su emme oranlarının bulunması için suya konulan numuneler.....43
Şekil 3.14 Numunelerin kaynar suda bekletilmesi 44
Şekil 3.15 Isı iletkenlik katsayılarının belirlenmesi için üretilen numune.....45
Şekil 3.16 Isı iletkenlik katsayılarının ölçümünde kullanılan KEM QTM 500 cihazı 45
Şekil 4.1 NaOH içeren hamur serilerin basınç dayanımı gelişimi 47
Şekil 4.2 KOH içeren hamur serilerin basınç dayanımı gelişimi 47
Şekil 4.3 NaOH ve sodyum silikat içeren (ss/aa=1,0) serilerin basınç dayanımı gelişimi.....48

Şekil 4.4 KOH ve sodyum silikat içeren (ss/aa=1,0) serilerin basınç dayanımı gelişimi 49

Şekil 4.5 Sodyum silikat/Alkali aktivatör oranının KOH içeren serilerin basınç dayanımına etkisi 49

Şekil 4.6 Harç serilerin basınç dayanımı gelişimi 51

Şekil 4.7 İnce ponza agregası içeren serilerin basınç dayanımı 52

Şekil 4.8 Harç serilerin su emme oranları 53

Şekil 4.9 Ponza agregası içeren harç serilerin su emme oranları 54

Şekil 4.10 Harç serilerin ısı iletkenlik katsayıları 55

Şekil 4.11 Ponza agregalı serilerin ısı iletkenlik katsayıları 56

Şekil 4.12 Portland çimentolu referans seriye ait SEM görüntüsü ve EDS analizi 57

Şekil 4.13 P50 deney serisine ait SEM görüntüsü ve EDS analizi 57

Şekil 4.14 P80 serisine ait SEM görüntüsü ve EDS analizi 57

Şekil 4.15 Deney serilerine ait FT-IR analiz sonuçları 58

Şekil 4.16 OPC deney serisine ait XRD analiz sonuçları 59

Şekil 4.17 Alkaliler ile aktive edilmiş deney serilerine ait XRD analiz sonuçları .60

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Asidik ponza ve bazik ponzanın kimyasal bileşimleri 18
Tablo 2.2 Türkiye ponza rezervleri 19
Tablo 2.3 Türkiye'deki ponza agregalarının genel fiziksel ve kimyasal özellikleri 23
Tablo 3.1 Ponza tozunun kimyasal kompozisyonu 30
Tablo 3.2 Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu 32
Tablo 3.3 Potasyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri 33
Tablo 3.4 Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri 34
Tablo 3.5 Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri 35
Tablo 3.6 Hamur serilere ait malzeme miktarları 38
Tablo 3.7 Hamur fazdaki deney serilerine ait kodların açılımı 38
Tablo 3.8 Harç serilere ait malzeme miktarları 40
Tablo 3.9 Harç fazdaki deney serilerine ait kodların açılımı 41
Tablo 4.1 Hamur fazda serilere ait 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları 46
Tablo 4.2 Harç serilerinin basınç dayanımı 51
Tablo 4.3 İnce ponza agregası içeren deney serilerine ait basınç dayanımı 52
Tablo 4.4 Harç serilerin su emme deney sonuçları 53
Tablo 4.5 Ponza agregası içeren harç serilerin su emme oranları 54
Tablo 4.6 Harç serilerin yoğunluk ve boşluk oranı 55
Tablo 4.7 Deney serilerine ait EDS analizi sonuçları 58

ÖZET

Ponza Tozu Ve Yüksek Fırın Cürufu Esaslı Alkali İle Aktive Edilmiş Malzemenin Fiziksel, Mekanik Ve İçyapı Özellikleri

Mümin MERT

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Nihat KABAY

Normal portland çimentosu üretimi global CO_2 salınımlarının önemli bir miktarını oluşturmakta ve küresel ısınmayı olumsuz yönde etkilemektedir. Dolayısıyla inşaat sektöründe kullanılan çimentoya alternatif küresel ısınmaya en az etki yapacak ve sürdürebilirliği sağlayacak yeni malzemelerin geliştirilmesi gereklilik halini almıştır. Bu kapsamda günümüzde çimentoya alternatif olarak düşük CO_2 emisyonuna sahip alkaliler ile aktive edilmiş bağlayıcılar pek çok araştırmacının ilgisini çekmektedir.

Bu çalışmada Türkiye'de önemli bir rezerve sahip ponza taşı öğütülerek toz hale getirilmiş ve yüksek fırın cürufu ile farklı oranlarda birleştirilmiştir. Toz bileşim KOH, NaOH ve sodyum silikat içeren alkali çözeltiler ile aktive edilerek bağlayıcı üretilmiştir. Çalışmada öncelikle hamur fazda 17 farklı seri üretilmiş, en yüksek dayanımı veren alkali aktivatör kombinasyonu belirlenmiştir. Optimum aktivatör karışımı kullanılarak 7 farklı harç karışımı üretilmiş, harcın fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır. Bunlara ilaveten seçilen serilerde içyapı analizleri gerçekleştirilmiştir.

Deney sonuçları dikkate alındığında, en yüksek dayanımın 6 M KOH ve sodyum silikat/alkali aktivatör oranının 1 olduğu durumda elde edildiği görülmüştür. Karışımdaki ponza tozu oranının artması ile harç numunelerin su emme, etüv kurusu yoğunluk ve boşluk oranında belirgin bir değişiklik görülmezken ısı iletkenlik katsayısı önemli ölçüde azalmıştır. Ayrıca karışımdaki doğal kumun %50'ye kadar ponza ince agregası ile ikame edilmesinin dayanımda önemli düşüşe neden olmadan ısı iletkenlik katsayısını kayda değer biçimde azalttığı gözlenmiştir. Alkali aktivasyon sonucu meydana gelen reaksiyon ürünleri içyapı analizleri ile belirlenmiş, portland çimentolu kontrol serisi ile önemli farklılıklar tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ponza, yüksek fırın cürufu, alkali aktivasyon, fiziksel ve mekanik özellikler, içyapı.

ABSTRACT

Physical, Mechanical And Microstructural Properties Of Pumice Powder And Blast Furnace Slag Based Alkali Activated Material

Mümin MERT

Department of Civil Engineering

MSc. Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Nihat KABAY

The ordinary portland cement production is responsible for a significant part of global CO_2 emission and contributes to global warming. This, in turn, forces the development of alternative sustainable materials instead of cement. In this context, geopolymers activated by alkali oxides, which are more sustainable than cement, are of interest for many researchers.

In this study, pumice stone found in abundance in Turkey was first ground into powder and blended with blast furnace slag in different ratios. The blended powder was then activated with alkaline solutions containing KOH, NaOH, and sodium silicate to produce a binder. Initially, a total of 17 paste mixes were produced to find the best activator combination which yields the highest compressive strength. The optimum activator combination was then used to produce mortar mixes, and a total of 7 mixes were manufactured to determine

their physical and mechanical properties. Furthermore microstructural analysis were performed on selected mixes.

Test results showed that the highest compressive strength can be obtained when the activator solution was designed as 6 M KOH and sodium silicate/alkaline activator ratio of 1. The increase in pumice powder content insignificantly affected the water absorption, oven dry density, and voids content of the mortar, but clearly reduced the thermal conductivity coefficient. Furthermore, replacing natural sand with fine pumice aggregate up to 50% reduced the thermal conductivity without causing a significant drop in compressive strength. The microstructural analysis revealed reaction products due to alkali activation and some clear differences compared to the control mix produced with portland cement.

Keywords: Pumice, blast furnace slag, alkali activation, physical and mechanical properties, microstructure.

1
GİRİŞ

Günümüzde beton endüstrisi artan çimento ihtiyacına karşılık sınırlı hammadde kaynağından dolayı sıkıntılar yaşamaktadır [1]. Dünya genelinde her yıl, beton sanayi yaklaşık 12 milyar ton beton üretmekte ve yaklaşık 1.6 milyar ton Portland çimentosu kullanmaktadır [2]. Çimento üretimi her yıl %3 civarında artmakta [2] ve her bir ton çimento yaklaşık 0.94 ton CO_2 emisyonuna yol açmaktadır [3]. Bu büyük çaptaki üretim hem doğal kaynakların hızla tüketilmesine hem de bir takım çevresel ve ekonomik problemlerin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Dolayısı ile günümüzde araştırmacılar için atık malzemelerden yararlanarak Portland çimentosuna alternatif olacak şekilde yeni tip bağlayıcıların geliştirilmesi önemli çalışma konularından birisidir [1]. Bu çalışmalar genel olarak alkali ile aktive edilmiş malzemeler (geopolimerler), kalsiyum sülfoalüminat çimentosu, süper sülfat çimentosu gibi farklı başlıklar altında toplanmaktadır [4]. Geopolimerler, kireç ve Portland çimentosunun ardından üçüncü nesil bağlayıcılar olarak tanımlanmaktadır [1]. Geopolimer bağlayıcılar Portland çimentosuna oranla %80-90 oranında daha az karbondioksit salınımına yol açmaktadır [5]. Genel olarak geopolimer bağlayıcı üretiminde kullanılan hammadde cüruf, uçucu kül, kil, doğal puzolanlar ve diğer alüminosilikat malzemelerdir.

Ponza, volkanik aktivite sonucu oluşan gözenekli ve hafif bir malzemedir. Ülkemiz ponza rezervi açısından oldukça zengin olmakla birlikte dünya rezervinin yaklaşık %14'ü Türkiye'de bulunmaktadır [6]. Öğütülmüş ponza tozunun alkali aktivasyon ile bağlayıcı olarak kullanımına yönelik literatürde az sayıda çalışma bulunmaktadır [6-9]. Bu araştırmalar ponza tozunun uygun aktivatör çözeltileri ile bir araya getirildiğinde bağlayıcı özellik kazanabileceğini göstermektedir. Konu ile ilgili şimdiye kadar yeterli ve kapsamlı bir bilginin bulunmaması nedeni ile bu projede ponza tozunun alkali aktivasyonu ile elde edilmeye çalışılacak bağlayıcının fiziksel ve mekanik özelliklerinin kapsamlı olarak araştırılması

amaçlanmıştır. Bu araştırmalar için önce hamur fazda daha sonrasında ise harç fazda üretimler yapılmıştır. Hamur fazda üretilen serilerde elde edilen basınç dayanımlarından yola çıkarak harç fazdaki serilerin üretimi yapılmıştır. Harç fazdaki serilerin basınç dayanımlarının yanı sıra su emme oranları, ısı iletkenlik katsayısı ve yoğunluk gibi fiziksel özellikleri belirlenmiştir. Bu çalışma ile ponzanın geleneksel kullanımının dışında alternatif kullanımı inşaat sektöründe de yenilik yaratacaktır. Tez konusuyla ilgili olarak daha önce literatürde yapılmış çalışmalar bir sonraki bölümde özetlenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Yadollahi ve diğ. [8] yaptıkları çalışmada ponza ile ürettikleri geopolimerlere ısıl kürlemenin etkilerini araştırmışlardır. Bu kapsamda alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat ($Na_2O.SiO_2$) karışımı kullanılmıştır. Hazırlanan numuneler 25, 45, 65, 85 ^oC'de 48 saat bekletilmiş, ardından deney gününe kadar 25 ^oC'de saklanmıştır. Bu çalışmanın sonunda en iyi kür sıcaklığı 65 ^oC olarak belirlenmiş, ayrıca sabit su/bağlayıcı oranında sodyum silikat miktarının artması ile dayanımın da arttığı tespit edilmiştir.

Nadoushan ve diğ. [10] tarafından yapılan çalışmada yüksek fırın cürufu ile ikameli olacak şekilde ponza kullanmışlardır. Alkali aktivatör olarak ise KOH, NaOH ve sodyum silikat kullanılmıştır. Üretilen numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra deney günlerine kadar 23 ± 2^oC'de kür edilmiş, 3, 7, 14, 21, 28 ve 91 günlük dayanımlarına bakılmış ve basınç dayanımı açısından potasyum hidroksitin (KOH), sodyum hidroksitten daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Buna ilaveten sodyum silikat miktarının artmasıyla basınç dayanımlarının arttığı görülmüş, her iki alkali aktivatörde de geçerli olmak üzere en yüksek basınç dayanımları %5 ve %10 ponza ikamesi içeren numunelerde gözlenmiştir.

Öztürk [11] belirli oranlarda perlit agregası, ponza agregası ve EPS kullanarak hafif beton üretmiş ve üretilen bu betonların çeşitli mekanik ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Yapılan deneyler sonunda %85 ponza agregası ve %15 kum içeren deney serisinin hem 7. gün hem de 28. gün dayanımlarının en yüksek olduğu

saptanmış, ayrıca bu deney grubunun diğer deney grupları arasında en yüksek birim ağırlığa sahip olduğu belirlenmiştir. %85 perlit agregası ve %15 EPS içeren deney grubunun ise 7 ve 28. gün dayanımları diğer gruplara kıyasla düşük tespit edilmiş, buna mukabil bu deney grubunun birim ağırlığı da diğer gruplara kıyasla en düşük olarak belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında basınç dayanımı yönünden yapılan çalışmalar sonucunda perlit agregasının erken dayanımı arttırdığı tespit edilmiştir. %85 ponza agregası %15 perlit agregası içeren deney grubunun 28 günlük basınç dayanımının %84'nü 7 günde kazandığı, %85 perlit agregası %15 EPS içeren deney grubunun ise 28 günlük basınç dayanımının %63'nü 7 günde kazandığı belirlenmiştir.

Pekdemir [12] yaptığı çalışmada çimento ile ikameli olarak %5, %10 ve %15 oranlarında uçucu kül veya silis dumanı kullanmış, ayrıca ürettiği numunelerde normal agregayla ikameli olarak %25, %50, %75 ve %100 oranlarında ponza agregası koymuştur. Bu kapsamda 5 deney grubu üretmiş, her grupta 7 seri olmak üzere toplamda 35 seri üretimi yapmıştır. Üretilen serilerde uçucu külün, silis dumanın ve ponza agregasının ikame oranlarını değiştirerek basınç dayanımı, eğilme dayanımı, basınç altında su işleme derinliği ve ultrases geçiş hızı değerleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Yaptığı çalışmalar sonucunda silis dumanı miktarının artmasıyla 28 günlük basınç ve eğilme dayanımı değerlerinin arttığı görülmüş, uçucu kül miktarının artmasıyla bu iki parametrenin silis dumanına göre bir miktar azaldığı tespit edilmiştir. Basınç ve eğilme dayanımı değerleri ponza agregası yönünden incelendiğinde ponza agregası ile üretilen betonlarda ponza agregasının ikame oranı arttıkça bu iki değerinde düştüğü gözlemlenmiştir. Ponza agregasının boşluklu bir yapıya sahip olması nedeniyle, ponza agregasının ikame oranı arttığında ultrases geçiş hızında bir azalma su geçirimliliğinde ise artış tespit edilmiştir.

Şahin [13] yaptığı çalışmada ponza agregasının hafif beton üretiminde kullanılabilirliğini ve bu ponza agregasından elde edilen ponza tozunun puzolanik aktiviteye sahip olup olmadığını araştırmıştır. Ayrıca %75 normal agrega %25 ponza agregası içeren bir deney serisi oluşturmuş bu deney grubundaki çimentonun dozajını değiştirerek dozajın fiziksel ve mekanik özelliklere etkisini

araştırmıştır. Bu çalışma sonucunda üretilen serilerdeki ponza agregasının ikame oranın artmasıyla basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte %25 ve %100 ponza agregası ikameli numunelerin birim ağırlıklarının normal portland çimentosu harcının birim ağırlığına göre %12 ve %41,5 oranında düşük olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çimento içerisine ikameli olarak katılan ponzanın ikame oranının artmasıyla 28 günlük basınç dayanımının düştüğü görülmüştür.

Yadollahi [14] yaptığı çalışmada Hasankale ponzasından alkali aktivasyon yöntemiyle geopolimer çimento üretilebilirliğini araştırmıştır. Bu kapsamda yapılan çalışmada çimento boyutunda öğütülmüş ponza agregasıyla 0,52, 0,60, 0,68 silika modüllü %4, %7, %10 oranlarında Na_2O içeren 0,36, 0,40 ve 0,44 su/bağlayıcı oranlarına sahip olan 9 farklı deney serisi üretilmiştir. Çalışma dahilinde üretilen hamurlar kalıplardan çıkarıldıktan sonra numunelere farklı sürelerde (0, 12, 24, 48 ve 96 saat) ısı kürü uygulanmıştır. Ayrıca numuneler ısı kürü uygulandıktan sonra farklı bekleme sürelerinde (0, 6, 12 ve 24 saat) tutulmuşlardır. Silika modülü, Na_2O içeriği, su/bağlayıcı oranı, ısı kürü süresi ve bekleme süresi gibi parametrelerin değişiminin numunelerdeki ultra ses geçiş hızı, basınç dayanımı, hacim değişikliği ve karışımların içyapısındaki değişiklikler üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca deney serilerinden en yüksek basınç dayanımı veren deney serisi daha sonrasında harç olarak üretilmiştir. Üretilen bu harcın basınç dayanımı, betonun yüksek sıcaklıktan (100~800°C) önceki ve sonraki birim ağırlıkları, ultrases geçiş hızı ve ısı iletkenliği incelenmiştir. Çalışma kapsamında ise ponzanın alkali aktivasyonu için NaOH kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında üretilen deney serilerinde sabit sıcaklıkta silika modülünün artmasının ve su/bağlayıcı oranının azalmasının basınç dayanımını arttırdığı tespit edilmiştir. 0,68 silika modülüne sahip, %10 Na_2O içeren ve 0,36 su/bağlayıcı oranlı deney serisinin 28. gün basınç dayanımı 40,28 MPa olarak ölçülmüştür. 28. günden sonra ise basınç dayanımının zamanla artma eğiliminin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda en iyi kür süresi 48 saat, en iyi ısı kürü sıcaklığı ise 65 °C olarak tespit edilmiştir.

Bahavsar ve diğ. [15] yaptıkları çalışmada bağlayıcı olarak uçucu kül ile birlikte katkı maddesi olarak silis dumanı ve priz hızlandırıcı kullanımının geopolimer

betonun işlenebilirlik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Uçucu külün alkali aktivasyonu için ise sodyum hidroksit ve sodyum silikat kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında yapılan tüm çökme deneyleri sonucunda; silis dumanının artmasıyla işlenebilirliğin azaldığı, süper akışkanlaştırıcı oranının artmasıyla işlenebilirliğin arttığı, priz hızlandırıcı oranının artmasıyla ise prizin hızlandığı fakat işlenebilirliğin azaldığı ve bununla birlikte çökme değerinin de çok az olduğu tespitlerine varılmıştır. Tüm bu tespitlerle birlikte geopolimer üretiminde endüstriyel atıkların kullanılmasıyla maliyetlerin ciddi miktarda düştüğü sonucu da elde edilmiştir.

Atiş ve diğ. [16] yaptıkları çalışmada portland çimentosu kullanmadan sadece yüksek fırın cürufunun alkali aktivasyonuyla elde edilen bir bağlayıcı geliştirmek istemişlerdir. Bu çalışma kapsamında sodyum silikat, sodyum hidroksit ve sodyum karbonat olmak üzere 3 farklı alkali aktivatör kullanılmıştır. Bu çalışma kapsamında üretilen numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve eğilmede çekme dayanımları incelenmiştir. Buna ilaveten üretilen numunelerin 6 aylık kuruma rötrelerine ve priz sürelerine de bakılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılan numunelerin priz sürelerinin normal portland çimentosuna göre daha yüksek olduğu, buna karşın sodyum karbonat kullanılan numunelerin priz sürelerinin normal portland çimentosuna benzer olduğu tespit edilmiştir. 28 günlük basınç dayanımı sodyum silikatlı numunelerde 81 MPa, sodyum hidroksitli numunelerde 29 MPa, sodyum karbonatlı numunelerde 36 MPa ve normal portland çimentolu numunelerde ise 33 MPa olarak bulunmuştur. 28 günlük eğilme dayanımı sonuçları ise sodyum silikatli numunelerde 6,8 MPa, sodyum hidroksitli numunelerde 3,8 MPa, sodyum karbonatlı numunelerde 5,3 MPa ve normal portland çimentosunda ise 5,2 MPa olarak ölçülmüştür. Kuruma rötresi sonuçları dikkate alındığında sodyum silikatlı numunelerin normal portland çimentosundan 6 kat daha fazla rötre yaptığı, bu oranın sodyum hidroksitli numunelerde 3 kat daha fazla olduğu gözlenmiştir. Buna karşın sodyum karbonatlı numunelerin kuruma rötreleri normal portland çimentosununkine benzer olduğu tespit edilmiş, tüm çalışmalar sonucunda yüksek

fırın cürufu için en iyi alkali aktivatörün sodyum karbonat olduğu sonucuna varılmıştır.

Pehlivan [17], yaptığı çalışmada alkali içeriği ve silika modülünün harç fazdaki numunelerin işlenebilirlik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada bağlayıcı olarak yüksek fırın cürufu kullanılmış, alkali aktivatör olarak ise tüm serilerde NaOH tercih edilmiş, NaOH'nin molaritesi 12 molar olarak sabit tutulmuştur. Üretilen tüm deney serilerinde ise yüksek fırın cürufunun dozajı 500 kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda Na_2O/Cüruf oranları %3, %6, %9 ve %12, silika modülleri ise 0,5, 1,0, 1,5 ve 2,0 olarak değiştirilmiş, 16 farklı deney serisi üretilmiş, deney serileri dökümleri yapıldıktan 48 saat sonra kalıplardan çıkarılmış ve deney gününe kadar 21±2°C'de bulunan kür havuzunda bekletilmiştir. Deney sonuçlarına göre en yüksek basınç ve eğilme dayanımı 28. günde, %9 Na_2O/Cüruf oranına sahip ve silika modülü 2,0 olan deney serisinde elde edilmiş, ayrıca silika modülünün ve karışımdaki toplam sodyum miktarının artmasıyla işlenebilirliğin ciddi miktarda azaldığı gözlenmiştir.

Aydın ve Baradan [18] yaptıkları çalışmada alkaliler ile aktive edilmiş cürufun işlenebilirlik ve dayanım özelliklerini araştırmışlardır. Çalışmada alkali aktivatör olarak sodyum silikat ve sodyum hidroksit kullanılmıştır. Deney serilerinde 2, 7, 28 ve 90. günlerde basınç ve eğilme deneyleri yapılmış, en yüksek basınç dayanımı 90. günde SiO_2/Na_2O oranı 1,6 olan ve 8 molar NaOH içeren deney serisinde 99 MPa olarak, en yüksek eğilme dayanımı ise SiO_2/Na_2O oranı 0,8 olan ve 6 molar NaOH içeren deney serisinde 12,7 MPa olarak belirlenmiştir. Ayrıca yapılan çalışmalar sonucunda karışımdaki NaOH artışının işlenebilirliği önemli ölçüde azalttığı tespit edilmiştir.

Toprak [19] yaptığı çalışmada termik santral taban külünün alkali aktivasyonu ile elde edilen geopolimerlerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Bu kapsamda yapılan çalışmalarda Na_2O/Taban külü ve SiO_2/Taban külü oranlarının değişimlerinin dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Üretilen deney serilerinde en yüksek basınç dayanımını veren serinin Na_2O/Taban külü

oranı %12 ve SiO_2/Taban külü oranı %8 olan deney serisi olduğu tespit edilmiş, 7. günde 20,48 MPa, 28. günde ise 26,23 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir.

Bondar ve diğ [20] yaptıkları çalışmada doğal puzolanların aktivasyonunda kullanılan alkali tipinin, alkali miktarının, SiO_2/Na_2O oranının ve çeşitli kür koşullarının geopolimerin dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Bu kapsamda yapılan çalışmada doğal puzolan olarak volkanik kül kullanılmıştır. Volkanik külün aktivasyonunda KOH ve NaOH olmak üzere iki farklı aktivatör kullanılmış, üretilen deney serilerine de 40°C, 60°C'de 24 saat ve 2,5 MPa basınçta 150 °C'de 3 saat kürleme yapılmıştır. Yapılan deneylerde basınç dayanımları açısından KOH'nin NaOH'den daha iyi performans sergilediği tespit edilmiş, 28. gün basınç dayanımlarında en yüksek sonuç otoklavda kür işlemi yapılan ve 7,5 molar KOH içeren deney serisinden alınmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu çalışmada yüksek fırın cürufu ile farklı oranlarda birleştirilen ponzanın farklı tip alkali aktivatörle aktivasyonu sağlanmıştır. Alkali aktivasyonu sağlanan ponza ve cüruf karışımı ile elde edilen bağlayıcıyla önce hamur fazda daha sonrasında ise harç fazda üretimler yapılmıştır. Hamur fazda ve harç fazda üretilen serilerdeki alkali tipi ve miktarı, SS/AA oranı gibi parametrelerin değiştirilmesiyle fiziksel ve mekanik özelliklerdeki değişimin araştırılması amaçlanmıştır.

1.3 Orijinal Katkı

Çalışma ile ülkemizde bolca bulunan ponza ile Portland çimentosuna alternatif bir bağlayıcı geliştirilmesi, ponzaya geleneksel kullanımından farklı bir kullanım alanı sağlanması amaçlanmıştır. Çalışma ile ponzanın yüksek fırın cürufu ile ve uygun aktivatör bileşimi ile birleştirilmesi ile elde edilen bağlayıcının fiziksel, mekanik ve içyapı özellikleri karakterize edilmiştir.

2
GENEL BİLGİLER

2.1 Geopolimerler

Geopolimer terimi ilk olarak 1979 yılında Joseph Davidovits tarafından ortaya atılmıştır. Geopolimerler kısaca doğal veya yapay puzolanların çeşitli alkali aktivatörler aracılığıyla aktive edilmesiyle oluşturulan bağlayıcı malzemeler olarak tanımlanabilir [21]. Geopolimer bağlayıcılar normal portland çimentosuna kıyasla daha ileri mühendislik özellikleri sergileyen malzeme grubu olarak tanımlanabilir [22]. Ayrıca geopolimer bağlayıcı üretimi esnasında, portland çimentosu üretiminden 5 kat daha az CO_2 salınımı gerçekleştiği ve % 60 oranında enerji tasarrufu yapıldığı bilinmektedir [23]. Geopolimerler alimünosilikat esaslı inorganik polimerlerdir [24]. Geopolimerleşme reaksiyonlarının başlaması için hammadde olarak silisyum, alüminyum ve alkali çözelti gereklidir [25]. Geopolimerlerin özellikleri silisyum/alüminyum oranından ve kaolinit gibi bileşenlerden büyük ölçüde etkilenmektedir [26]. Son yıllarda çevre dostu olmalarının yanında yüksek erken dayanımı, asit ve sülfat dirençlerinden dolayı geopolimerler portland çimentosuna göre daha çok ilgi görmektedirler. Geopolimerler uçucu kül, silis dumanı, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu gibi yüksek silisyum ve alüminyum içeren hammaddelerden üretilse de günümüzde daha çok uçucu kül esaslı geopolimerler tercih edilmektedir. Bu kapsamda üretilen geopolimer bağlayıcılar asit etkisine olan dirençleri açısından normal portland çimentosuna alternatif olabilirler çünkü geopolimerler yapısal bütünlüğünü kalsiyum-silikat-hidrat yerine alüminosilikat esaslı yapı ile sağlarlar [27]. Alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcılar yerinde döküm ve prekast döküm gibi yöntemlerle üretilebilirler. Fakat alkalilerin uygun bir biçimde karıştırılabileceği ve kontrollü kür işleminin mümkün olduğu prekast dökümün bu malzemeler için daha uygun olduğu yapılan çalışmalar sonucu tespit edilmiştir [28]. Geopolimer

bağlayıcı elde etmek için çimento yerine alüminyum ve silisyum açısından zengin olan hammaddeler alkali aktivatörlerle aktive edilir [29].

Geopolimerlerin üretiminde doğal puzolanların kullanımının yanı sıra yapay puzolanlar da kullanılmaktadır. Bu yapay puzolanlar genellikle depolanması ve yok edilmesi zor olan bazı endüstriyel atıklardır. Geopolimer üretiminde bu endüstriyel atıkların kullanılması bu malzemelerin hem ekonomiye tekrar kazandırılmasına hem de depolanması veya bertaraf edilmesi esnasında oluşacak olumsuz çevresel etkinin ortadan kaldırılmasına olanak sağlamaktadır.

Geopolimer bağlayıcı üretiminde en çok kullanılan alümino silikat esaslı malzemeler aşağıda sıralanmıştır [30]:

- Uçucu kül
- Yüksek fırın cürufu
- Taban külü
- Pirinç kabuğu külü
- Silis dumanı
- Metakaolin
- Ponza
- Kırmızı çamur

Geopolimer bağlayıcı üretiminde en çok kullanılan alkali aktivatörler ise şöyledir [30]:

- KOH
- NaOH
- Sodyum silikat ($nSiO_2Na_2O$)
- Potasyum silikat ($nSiO_2K_2O$)

2.2 Alkali Aktivatör

Aktivatör meydana gelen kimyasal tepkimenin genel yapısını etkilemeden kimyasal tepkime hızını artıran maddedir [14]. Başka bir deyişle aktivatör

kimyasal reaksiyonun hızını artıran ve kimyasal reaksiyon denkleminde görülen madde olarak ta tanımlanabilir [31]. Bütün bu tanımlardan özet olarak aktivatör kavramı kimyasal reaksiyonun sonucunu değiştirmeyen fakat o reaksiyon içindeki bileşikleri istenilen reaksiyon oranına ulaştıran malzeme olarak değerlendirilebilir. Alkali aktivasyon ise amorf veya camsı yapıdaki alüminosilikatların, alkali aktivatörler ile aktive edilerek portland çimentosuna benzeyen yeni bir malzeme elde edilmesi olarak tanımlanabilir [32]. Günümüzde yapılan alkali aktivasyon çalışmalarının çoğu cürufların aktivasyonu üzerine yapılmıştır. Bunun nedeni ise geopolimerde kullanılan cürufların alkali aktivasyon ile iyi bağlayıcılık özellikleri göstermesidir [14]. Alkali aktivasyon yönteminin en önemli özelliklerinden birisi kil ve feldspat gibi doğal malzemelerin yanında alüminosilikat içeren endüstriyel atıkların da yapı malzemesi olarak kullanımını mümkün hale getirmesidir [33].

Portland çimentosu ve alüminatlı çimentoların hidratasyonu aşağıdaki denklemlerde verilmiştir [32].

$$CaO\text{-}SiO_2 + H_2O \longrightarrow CaO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$$

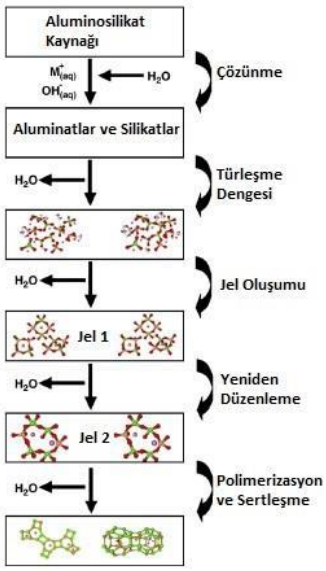
$$CaO\text{-}Al_2O_3 + H_2O \longrightarrow CaO\text{-}Al_2O_3\text{-}H_2O$$

Alkaliler ile aktive edilmiş bağlayıcıların hidratasyonu ise aşağıdaki denklemlerde verilmiştir [32].

$$Al_2O_3\text{-}SiO_2 + R_2O + H_2O \longrightarrow R_2O\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$$

$$RO\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2 + R_2O + H_2O \longrightarrow RO\text{-}R_2O\text{-}Al_2O_3\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$$

Alüminosilikatlı malzemelerin alkali aktivasyonu için kavramsal model; çözünme, türleşme dengesi, jel oluşumu ve polimerizasyon olarak Duxon ve arkadaşları tarafından 2007 yılında modellenmiştir [34]. Bu modelleme Şekil 2.1'de gösterilmiştir.



Şekil 2.1 Alüminosilikatların alkali aktivasyonu için kavramsal model [34]

Günümüzde alkali aktivatör olarak KOH, NaOH ve Na_2SiO_3 yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alkaliler bağlayıcı üretimi sırasında katı veya sıvı fazda karışıma katılabilmektedirler.

Geçmişte ise alkali aktivasyon yöntemi ile çimento benzeri bir bağlayıcı üretme patenti 1895 yılında James Whiting tarafından alınmıştır. Whiting aldığı patentte cüruf ile sönmüş kireç ve kostik soda kullanılarak elde edilen malzemenin çimento benzeri özellikler gösterdiğini belirtmiştir. Ayrıca Whiting aldığı patentte yaklaşık olarak %2 kostik soda kullanımının priz süresini azalttığını ve basınç dayanımlarında artış sağladığını eklemiştir [35]. 1908 yılında ise Alman Kühl firması tarafından cüruf çimentosu patenti alınmıştır. Kühl aldığı patentte aliminosilikat bazlı bir malzeme ile bir alkali kaynağının birleşmesi sonucu ortaya çıkan yeni malzemenin priz alan bir malzeme olduğunu ve ayrıca bu yeni malzemenin portland çimentosuyla benzer özellikler gösterdiğini belirtmiştir [36].

2.3 Puzolan

Puzolanlar tek başına bağlayıcılık özelliği göstermeyen veya çok az bağlayıcılık özelliği gösteren fakat ince taneli olduklarında, sulu ortamlarda normal ortam

sıcaklığında çözünmüş kalsiyum hidroksit ile birleştiklerinde hidrolik bağlayıcı nitelik kazanan silika ve alumina içerikli malzemelerdir [37,38].

Puzolanlar ilk olarak yaklaşık milattan önce 100 yıllarında Romalılar tarafından Napoli yakınlarındaki Pozzuoli kasabası civarında elde edilmiştir. Malzemenin ismi de buradan gelmektedir. Romalılar tarafından Vezüv'ün eteklerinden elde edilen bu malzeme aslında camlaşmış volkan külüdür [39]. Puzolanlar genel olarak reaktif olan silisyum dioksit (SiO_2) ve aliminyum oksitten (Al_2O_3) oluşmuştur. Geri kalan kısımlarında ise demir oksit (Fe_2O_3) ve demirin diğer oksitleri bulunmaktadır. İdeal bir puzolan malzemede reaktif silisyum dioksit oranı %25'i geçmelidir. Bu kapsamda ele alındığında her puzolan malzeme istenilen miktarda bağlayıcılık özellikleri göstermeyebilir. Puzolan malzemelerin istenilen düzeyde bağlayıcılık özelliği gösterebilmeleri için:

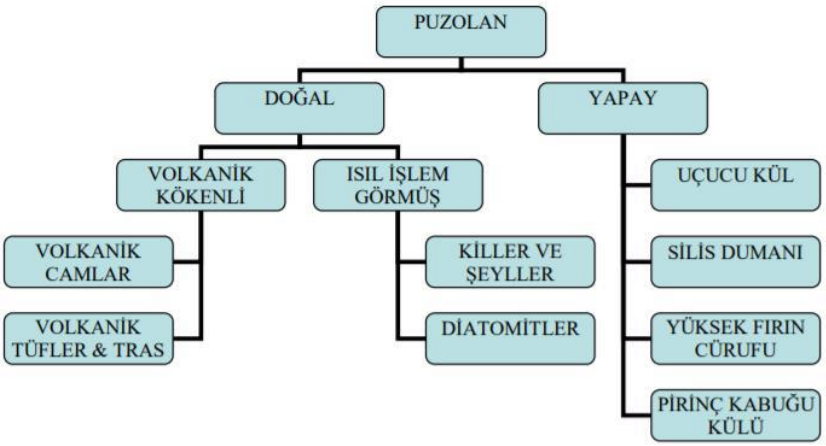
- İçeriğindeki silika ve alumina miktarının yüksek olması,
- Amorf yapıda olması,
- Saf haldeyken taneciklerinin çok ince yapıda olması veya malzemenin öğütülerek en az çimento tanecikleri kadar ince halde olması gerekmektedir [40].

İnsanoğlunun su içinde priz yapabilme kabiliyeti olan ve su etkisi ile bağlayıcılık özelliğini kaybetmeyen bir malzeme ihtiyacı çok eski zamanlara hatta medeniyetin başlangıcına dayanmaktadır. Bu problemin tam olarak çözümü ise çimentonun bulunması ile gerçekleşmiştir. Çimentonun bulunmasına kadar geçen zamanda ise insanoğlu silisyum içeriği yüksek toprakların kireçle karıldığında ortaya çıkan malzemenin bağlayıcılık özelliğinin olduğunu ve istenilen performans hedeflerini kısmen de olsa karşıladığını keşfetmiştir [41].

Puzolan malzemeler doğal olarak volkanik oluşumlu malzemeleri veya yapay olarak uçucu kül, silis dumanı, yüksek fırın cürufu gibi malzemeleri kapsamaktadır [42]. Puzolan malzemeler bulundukları yerlere has isimler almışlardır. Genelde bu malzemelere Almanya'da Tras, Yunanistan'da ise Santorini Toprağı denilmektedir. Bizim ülkemizde ise bu malzemelere Almanya ile benzer olarak tras denilmektedir. Türkiye tras yönünden ciddi rezervlere sahiptir. Bu rezervler

ülkemizin hemen hemen tüm bölgelerinde bulunmaktadır fakat özellikle İç Anadolu Bölgesi'nin tras rezervi açısından oldukça zengin olduğunu söylemek mümkündür.

Sanayi Devrimi'ne kadar olan süreçte insanoğlu doğal puzolanları kullanmış, ancak endüstriyelleşme ile birlikte bir takım endüstriyel atıklar ortaya çıkmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda ortaya çıkan bu endüstriyel atıkların da puzolanik özellik gösterdiği tespit edilmiştir. Bu kapsamda günümüzde puzolanlar iki grupta incelenmektedir. Bunlar doğal puzolanlar veya yapay puzolanlardır. Oluşum şekillerine göre puzolanlar Şekil 2.2'de gösterilmiştir.



Şekil 2.2 Puzolanların sınıflandırılması [39]

2.3.1 Doğal Puzolanlar

Bu grupta yer alan malzemeler yerküre üzerinde doğal biçimde bulunan ve puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Şekil 2.2'de de belirtildiği üzere bu grupta:

- Volkanik camlar
- Volkanik tüfler ve traslar
- Killer ve şeyller
- Diatomitler yer almaktadır.

Şekil 2.2' de de gösterildiği üzere doğal puzolanlar oluşumlarına göre ikiye ayrılmaktadırlar. Bunlar volkanik kökenli olan puzolanlar ve ısıl işlem görmüş puzolanlar olarak ayrılabilir. Volkanik kökenli puzolanlar erimiş magmanın püskürmesi sonucu oluşurlar. Bu grupta oluşacak puzolanın tipini magmanın püskürme hızı belirlemektedir. Magmanın hızlı püskürmesi sonucunda puzolanik aktivesi yüksek olan volkanik camlar oluşurken, magmanın daha yavaş püskürmesi sonucunda daha az puzolanik aktiviteye sahip volkanik küller oluşmaktadır [39].

Isıl işlem görmüş puzolanlar sınıfında bulunan killer ve şeyller hammadde formunda kristal yapıda olduklarından puzolanik özellik göstermemektedirler. Bu malzemelerin puzolanik özellik gösterebilmesi için ısıl işlem uygulanması gerekmektedir. Bu kapsamdaki en yaygın yöntem ise döner fırınlarda 700-900°C'de 1-2 saat uygulanan ısıl işlemdir. Isıl işlem sonucu kristal yapıları bozulmuş olan kil mineralleri puzolanik özellik kazanırlar. Buna ilaveten pişmiş killer yalnızca bu yolla ile değil pişmiş tuğla ve fayans kırıklarının çok ince öğütülmeleri ile de elde edilebilirler. Ayrıca ısıl işlem görmüş killerin puzolanik özellikleri, ısıl işlem sıcaklıklarına göre de önemli miktarda farklılık göstermektedir [39].

Diatomitler ise suda yaşayan bir bitki olan diatomların kalıntılarıdır. Bu kalıntılar toprak içinde bulundukları için aslında bu gruba diatomlu topraklar da denilmektedir. Diatom bitkisinin ardında bıraktğı kalıntılar çok yüksek oranda silis içermektedir. Diatomitlerin puzolanik aktivesi ise içerdikleri amorf silis miktarına göre değişmektedir. Bünyesinde kil bulunduran diatomlu toprakların ise puzolanik aktivesi oldukça düşüktür böyle diatomlu toprakların puzolanik aktivitesini artırmak için ise aynı killer ve şeyllerde olduğu gibi ısıl işlem uygulanması gerekmektedir. Bu ısıl işlem ise genellikle 760-1000°C arasında yapılmaktadır [39].

2.3.2 Yapay Puzolanlar

Yapay puzolanlar diye adlandırılan grup aslında endüstriyel faaliyetlerden sonra atık olarak ortaya çıkan ve puzolanik özellik gösteren malzemelerdir. Bu malzeme

grubu içerinde yapı sektöründe en çok kullanılanları ise silis dumanı, yüksek fırın cürufu ve uçucu küldür. Asya kıtasında yapay puzolan olarak buğday sapı külü ve pirinç kabuğu külü oldukça fazla bir şekilde kullanılmaktadır. Bunun başlıca sebebi ise bölgede buğday ve pirinç hasadının çok olmasıdır [39].

Uçuçu küller termik santrallerde elektrik üretimi için pulverize kömürün yakılması sonucu ortaya çıkan atık bir malzemedir. Ortaya çıkan uçucu kül amorf yapıdadır ve boyutları 1-150 μm arasındadır [39]. Ayrıca çok yüksek miktarlarda silika ve alümina içermektedirler.

Yüksek saflık derecesinde bulunan kuvars bilindiği üzere yaklaşık olarak 2000 °C'de indirgenme tepkimesini gerçekleştirmektedir. Bu tepkime sırasında ise SiO gazı ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu gaz havayla temas ettiği zaman hızlı bir şekilde yoğunlaşır ve bunun sonucunda SiO_2 meydana gelir. Meydana gelen bu SiO_2 amorf yapıdadır ayrıca çok yüksek miktarda silika içermektedir. Bu malzemeye ise silis dumanı denilmektedir.

Yüksek fırın cürufu ise ham demir üretimi esnasında demir filiz gangı, kok kömürü ve kireç taşının yanması sonucunda ortaya çıkan artıklardan oluşmaktadır. Bilindiği üzere ham demir üretimi yüksek fırınlarda yapılmaktadır. Meydana gelen yüksek fırın cürufu ise mevzubahis fırınlarda hafifliğinden dolayı ham demirin üzerinde bulunmaktadır Yüksek fırın cürufunun ortalama oluşum sıcaklığı ise 1400-1600 °C'dir [43].

Pirinç kabuğu külü ise pirincin üretimi sonrası artığı olan pirinç kabuklarının yakılması sonucu ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan bu pirinç kabuğu külü soğuma hızına göre iki farklı formda olmaktadır. Pirinç kabuğu külünün yavaş soğuması halinde kristal yapılı pirinç kabuğu külü, hızlı soğuması halinde ise amorf yapılı pirinç kabuğu külü ortaya çıkmaktadır. Yüksek özgül yüzey alanı ve yüksek puzolanik aktivesiyle inşaat sektöründe yapı malzemesi olarak kullanılan pirinç kabuğu külü ise amorf yapılı olandır [44].

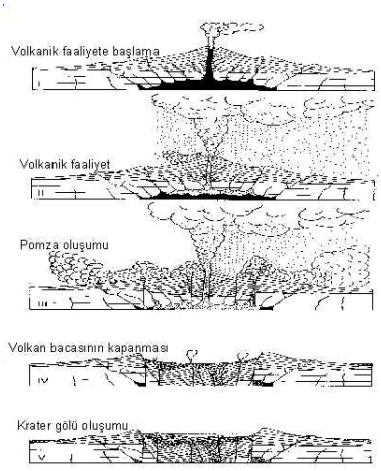
2.4 Ponza

2.4.1 Ponzanın Tanımı ve Oluşumu

Ponza veya diğer bir adıyla bims birbirinden bağımsız boşluklu süngere benzeyen, silika esaslı, genellikle birim hacim ağırlığı 1 g/cm^3'ten düşük olan, sertlik değeri ise Mohs Skalası'na göre yaklaşık olarak 6 olan ve camsı doku gösteren volkanik bir kayaçtır [45].

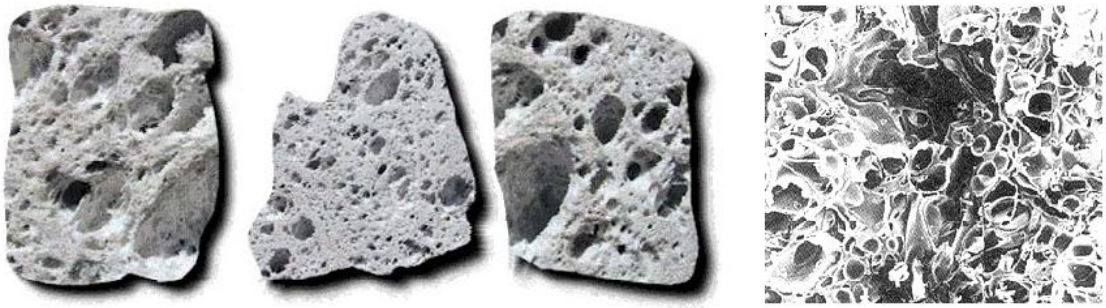
Esasen ponza terimi İtalyanca bir sözcüktür. Bu terim farklı dillerde farklı şekillerde adlandırılmaktadır. Bunlara örnek vermek gerekirse İngilizce'de ponzanın iri tanelisine "Pumice" ince tanelisine ise "Pumicite", Almanca'da ise ponzanın iri tanelisine "Bims" ince tanelisine ise "Bimstein" denilmektedir. Türkçe'de ise ponza süngertaşı, nasırtaşı, köpüktaşı, hışırtaşı, küvek ve kisir gibi farklı şekillerde adlandırılmaktadır [46].

Bilindiği üzere volkanik faaliyetler esnasında yüksek sıcaklık ve basınç altındaki magma tabakası şiddetli olarak atmosferin üst tabakalarına püskürür. Bu sırada magmanın içinde sıvı halde bulunan eriyikler atmosferin üst tabakalarında soğuk havayla karşılaşır ve ani bir soğuma olayı yaşanır. Bu soğuma sonucunda piroklastik kayaç içinde bulunan su buharı ve fümeroller piroklatik kayaçtan uzaklaşır ve geriye kristalleşmeye imkan bulamayan poroz bir kayaç kalır. Oluşan bu poroz kayaç ise atmosferden volkan kraterinin etrafına yağarak yığışır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3 Ponza agregasının oluşum evreleri [47]

Ponza taşı genel olarak gaz boşlukludur. Oluşumu sırasında bünyesindeki gazlar aniden soğur ve bünyeyi terk eder. Bundan dolayı ponza agregası makro ölçekten mikro ölçeğe kadar sayısız gözenek içerir. Gözenekler genellikle birbirinden bağımsız olduğundan (özellikle makro gözenekler) ponza agregasının permeabilitesi düşük, ısı ve ses yalıtımı ise oldukça yüksektir [46]. Ponza agregasının gözenekli yapısı Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Ponza agregasının gözenekli yapısı [48]

Ayrıca ponza agregası fiziksel ve kimyasal etkilere oldukça dayanıklıdır. Ortalama olarak ergime noktası 1343 °C'dir ve 760 °C'nin altındaki sıcaklıklarda herhangi bir hacim değişikliğine uğramaz. Sadece bu sıcaklıklarda ponza agregasının dış yüzeyinde mikro ölçekte bulunan lifler büzülür ve çekilir. Ayrıca ponza agregası 480 °C ile 650 °C aralığındaki alevlerde herhangi bir yapısal bozulmaya uğramaz [46].

Dünyada asidik veya bazik özellikler gösteren volkanik faaliyetler görülmektedir. Gerçekleşen volkanik faaliyetin tipini magmada eriyik halde bulunan malzemelerin özellikleri belirlemektedir. Bu özellikler bazik ise volkanik faaliyet bazik, asidik ise volkanik faaliyet asidik olarak nitelendirilmektedir. Bilindiği üzere ponza volkanik bir kayaçtır. Ponza asidik volkanik faaliyetler sonucu oluşuyorsa asidik ponza, bazik volkanik faaliyetler sonucu oluşuyorsa bazik ponza ismini alır. Ayrıca bazik ponzaya bazaltik ponza veya scoria da denilmektedir [49]. Bazik ponzaların yoğunlukları genel olarak 1g/cm^3'ten yüksektir. Ayrıca renkleri

kahverengiden kırmızıya doğru veya koyu griden siyaha doğru değişmektedir. Bazik ponzalarda SiO_2 oranı genelde %50'den düşük olmaktadır. Buna karşın Fe_2O_3 oranı ise genel olarak %5'ten büyüktür [48]. Yeryüzünde en yaygın olarak bulunan ponza tipi asidik ponza ise bazik ponzaya göre daha hafiftir ve yoğunlukları genel olarak 1g/cm^3'ten düşüktür. Hatta yoğunlukları bazen 0,35 g/cm^3'ün altına da düşebilmektedir. Asidik ponzaların renkleri açık griden beyaza doğru değişmektedir. Asidik ponzalarda genel olarak SiO_2 oranı %50'den büyük Fe_2O_3 oranı ise %3'ten düşüktür [48]. Asidik veya bazik nitelikler taşıyan ponzaların genel kimyasal bileşimleri ise Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1 Asidik ponza ve bazik ponzanın kimyasal bileşimleri [49]

Bileşim	Asidik Ponza (%)	Bazik Ponza (%)
SiO_2	70	45
Al_2O_3	14	21
Fe_2O_3	2,5	7
CaO	0,9	11
MgO	0,6	7
$Na_2O + K_2O$	9	8
Kızdırma Kaybı	3	1

2.4.2 Dünyada ve Ülkemizde Ponza

Dünyanın birçok ülkesinde farklı özelliklerde bulunan ponza oluşumları bulunmaktadır. Bu ülkelere örnek olarak İtalya, Yunanistan, Almanya, ABD, Yeni Zellenda ve Türkiye verilebilir. İtalya'daki volkanlar genel olarak Agenien Dağları'na ve Tiran Kıyıları'na pararel olan bir hatta görülmektedirler. Bu hat üzerinde oldukça fazla ponza rezervi vardır fakat İtalya'daki en büyük ponza üretimi Lipari Adası'nda yapılmaktadır. Yunanistan'da ise ponza madenciliği çok eski zamanlara dayanmaktadır. Ayrıca ülkede saf olarak olmasa da çok miktarda ponza içeren agrega ocağı bulunmaktadır. Yunanistan'daki en büyük ponza rezervleri ise Yali ve Thira adalarında bulunmaktadır. Almanya'da ponza üretimine uzun yıllar önce başlamıştır. Almanya'da bulunan ponza rezervleri ise genellikle Ren bölgesinde ve Renanya-Palatina eyaletinde bulunan Neuwied

kasabasının birkaç kilometre dışındaki bölgelerde bulunmaktadır [49]. Fakat Almanya'ya ait rezervler azaldığından Almanya ponza ihtiyacını Yunanistan ve Türkiye'den karşılamaktadır. Ülkemizdeki madencilik teknolojilerinin ve üretim tekniklerinin gelişmişliği göz önüne alındığında bu durum ülkemiz ekonomisi için oldukça avantajlı bir durum olabilir. ABD'de ise ponza üretimi temel olarak 4 batı eyaletinde yapılmaktadır. Bu eyaletler California, İdaho, New Mexico ve Oregon'dur. Yeni Zelanda da ise en büyük ponza üretimi Kuzey Adası'nın Rotorua Taupo bölgesinde yapılmaktadır [49].

Dünyada bugüne kadar resmi olarak 18 milyar m^3 ponza rezervi bildirilmiştir. Ülkemiz bu rezervin yaklaşık olarak %40'ına sahiptir. Bu durum ponza madenciliğinin ülkemiz için önemli bir potansiyeli olduğunu göstermektedir. Ülkemizde işletilen ponza ocakları bakımından İç Anadolu Bölgesi başı çekmektedir, fakat Akdeniz ve Doğu Anadolu Bölgesi'nde de önemli miktarlarda ponza rezervi bulunmaktadır [45]. 2020 yılına göre Türkiye'de bulunan ponza rezervlerinin dağılımı Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2 Türkiye ponza rezervleri [50]

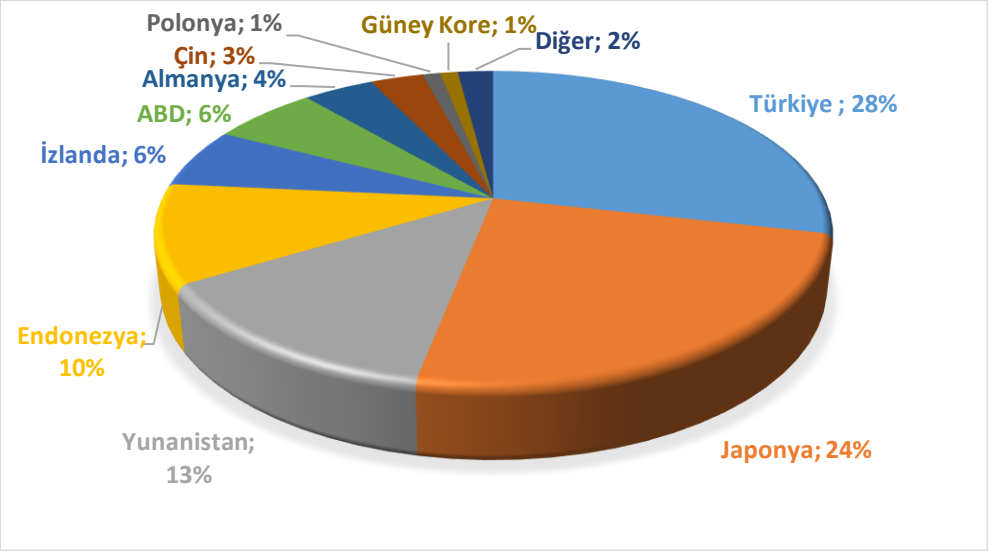
İl	Rezerv (ton)
Nevşehir	1.069.115.572
Manisa	398.267.172
Kayseri	136.329.518
Osmaniye	110.172.625
İzmir	79.473.342
Konya	72.253.259
Bitlis	40.570.132
Diyarbakır	39.744.197
Erzurum	37.665.019
Isparta	32.557.558
Van	30.553.860
Burdur	25.282.904
Iğdır	20.354.889
Mardin	19.800.149
Hatay	19.264.565
Ağrı	17.761.140
Elazığ	14.417.717
Kars	12.225.478
Aksaray	9.218.516
Ankara	2.658.576

Tablo 2.2 Türkiye ponza rezervleri [50] (devam)

Gaziantep	1.100.000
Niğde	752.468
Erzincan	550.747
Toplam	2.190.089.403

Dünya'da ise ponza üretiminin önemli bir miktarı ülkemize aittir. 2018 verilerine göre dünya ponza üretiminin %43'ü Türkiye'de yapılmıştır.

Bu ülkeler ürettikleri ponzanın bir kısmını kendileri kullanmaktadırlar. Bundan dolayı ülkelere göre ponzanın ihracat oranı, üretim oranlarından farklılık göstermektedir. 2018 yılına göre ülkelerin ponza ihracat yüzdeleri Şekil 2.5'te verilmiştir.



Şekil 2.5 Dünya ponza ihracat payı [50]

2.4.3 Ponzanın Kullanım Alanları

Ponza kendisine has birçok kimyasal ve fiziksel özellikleri nedeniyle başta inşaat alanı olmak üzere birçok farklı alanda kullanılır. Ponzanın kullanıldığı endüstrilere örnek vermek gerekirse kimya, ziraat ve sağlık endüstrileri gibi

örnekler verilebilir [49]. Ponzanın yapı endüstrisinde geniş bir alanda kullanılmasının nedenleri:

- Düşük birim hacim ağırlık,
- Yüksek ses ve ısı yalıtımı,
- İklimlendirme özelliği,
- Kolay sıva tutması,
- Deprem yük ve davranışları karşısındaki elastikiyeti,
- Alternatiflerine göre daha ekonomik oluşu olarak sıralanabilir [51].

Ponza son yıllarda inşaat sektöründe briket yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca ponza düşük birim hacim ağırlığı nedeniyle hafif beton yapımında agrega olarak kullanılmaktadır. Ponzanın konutlardaki yapı elemanlarında kullanılmasının temel nedenleri ise ses ve ısı yalıtımı bakımından sağladığı üstün özelliklerdir. Ponza malzemesinin kırılmadan önce yüksek deformasyonlar yaptığı bilinmektedir. Bundan dolayı deprem bölgelerinde yapılacak yapılarda kullanılan bağlayıcılarda çimento ile ikameli olarak bir miktar ponza kullanılmaktadır. Fakat böyle durumlarda yapının projesinde seçilen beton dayanımının biraz daha yüksek seçilmesi esası vardır [52].

Tekstil sektöründe ponza agregası veya ponza tozu aşındırıcı etkisi nedeniyle kot taşama veya kumaş ağartma işlemlerinde kullanılmaktadır. Tarımsal uygulamalarda ise daha ziyade demir, magnezyum, alüminyum ve kalsiyum bileşenleri yüksek olan ponzalar kullanılmaktadır. Bu kapsamda toprak ıslahı yapmak, topraklı veya topraksız ortamlarda bitki yetiştirmek için kullanılmaktadır. Ayrıca kuraklık sorunu yaşanan yerlerdeki tarlalarda yüksek su tutma kapasitesi özelliği ile sulama miktarını azaltırken, kirli tarlalarda drenajı sağlar ve köklerin büyümesini destekler. Su kaynakları bakımından yetersiz olan Suudi Arabistan, İsrail ve Kuveyt gibi ülkeler sulama suyunun aşırı buharlaşması sonucu oluşan su kaybını önlemek için toprağın altına belli bir derinlikte ve belli bir kalınlıkta ponza agregası sermişlerdir. Tarım ilaçlarının toz halinde atılmasında taşıyıcı eleman olarakta ponza tozu aktif olarak kullanılmaktadır. Kimya sektöründe ise ponza kozmetik ürünleri, diş macunu, diş pastası, el sabunu,

deterjan, tarım ilacı, izolatif boya, kibrit vb. ürünlerin yapımında katkı olarak kullanılmaktadır [50].

Tüm bunlara ilaveten ponza:

- Plastik ve kağıt sanayinde dolgu malzemesi olarak,
- Asfalt kaplamalarda bitüm kusmalarını önleyen absorban olarak,
- Tavuk çiftliklerinde taban yaygısı olarak,
- Gübre imalinde topaklanmayı önleyici katkı olarak,
- Piyano tuşu, bilardo topu ve fildişi gibi süs eşyalarının pürüzlülüğünün giderilmesi ve cilasında,
- Seramik sanayinde seramiklerin ısı yalıtım değerlerini artırmada, pürüzlü seramik ve absorpsiyonlu seramik tanelerin (boncuk) imalatında,
- İzolatif duvar boyasında, pürüzlü kaplamalarda, motifli boyalarda, astar macunlarında, vernik dolgusunda ve aşınmayan trafik boya ve kaplamalarında,
- Kaymaz tip lastik yapımında,
- Ağır ve kirli ortamlarda yağ benzeri sıvıları absorbe eden yer yaygısı olarak kullanılabilmektedir [45].

Görüldüğü üzere ponzanın oldukça geniş bir kullanım alanı vardır. Ülkemizde dünya ponza rezervinin yaklaşık olarak %40'nın bulunduğu düşünüldüğünde bu potansiyelin ekonomimizde daha efektif kullanılması ülkemiz ekonomisine oldukça katkı sağlayacaktır. Bununla birlikte ponzanın olası olarak kullanılabileceği ürünlerde ponza kullanımının teşvik edilmesi durumunda bu ürünlerdeki üretim maliyetlerinin düşeceği aşikardır. Bu maliyet düşüşünün temel sebebi ise ponza üretiminin maliyetinin düşük olmasıdır. Ayrıca ponzaya alternatif doğal olmayan malzemelerin yerine, ponza kullanımının artması doğaya salınan CO_2 miktarını da düşürmektedir. Bu da üretilen ürünlerin CO_2 ayak izinin düşürülmesinde önemli derecede rol oynamaktadır. Fakat ponza üretiminin yapıldığı ponza ocaklarının işletmesinin, bulunduğu çevreye ve oradaki yöre halkına en az etki edecek şekilde yapılması esastır.

Farklı endüstrilerde kullanılan ve ülkemizde bulunan ponza agregalarının genel fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2.3'te verilmiştir.

Tablo 2.3 Türkiye'deki ponza agregalarının genel fiziksel ve kimyasal özellikleri [53]

Fiziksel Özellikler	
Renk	Açık griden, kirli beyaza
Kristal Şekli	Amorf (kristal şekli yok)
Kristal Suyu	Yok
Sertlik (MOHS)	5,5-6,0
Kuru Birim Hacim Ağırlığı (g/cm^3)	0,32-0,97
Gerçek Özgül Ağırlığı (ρ) (g/cm^3)	1,90-2,65
Porozite (n) (%)	45-70
Rötre (mm/m)	2
Isı İletkenlik Katsayısı (λ) (kcal/m.h.°C)	0,12-0,20
Isınma Isısı (c) (cal/g.°C)	0,24-0,28
Ses Yalıtımı (R) (dB)	40-55
Tek Eksenli Basınç Dayanımı (σ) (kg/cm^2)	16-30
Su Emme (Ağırlıkça %)	30-70
Buhar Difüzyon Katsayısı (Ŋ)	5-10
Kimyasal Özellikler	
pH	7-7,3
Radyoaktivite	Yok
Suda Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça %)	≤ 0,15
Asitte Çözünen Madde Miktarı (Ağırlıkça %)	≤ 2,9
Uçucu Madde Miktarı (Ağırlıkça %)	Yok
Asitle Etkileşim (*)	İnert
Alevlenme Derecesi (°C)	Yok
Ergime Derecesi (°C)	900
Kimyasal Bileşenler	
Silisyumdioksit (SiO_2)	52-75
Alimünyumoksit (Al_2O_3)	11-17
Demiroksit (Fe_2O_3)	0,5-5,0
Kalsiyumoksit (CaO)	1-8
Magnezyumoksit (MgO)	0,5-3,0
Kimyasal Bileşenler	
Silisyumdioksit (SiO_2)	52-75
Alimünyumoksit (Al_2O_3)	11-17
Demiroksit (Fe_2O_3)	0,5-5,0
Kalsiyumoksit (CaO)	1-8
Magnezyumoksit (MgO)	0,5-3,0

Tablo 2.3 Türkiye'deki ponza agregalarının genel fiziksel ve kimyasal özellikleri [53] (devam)

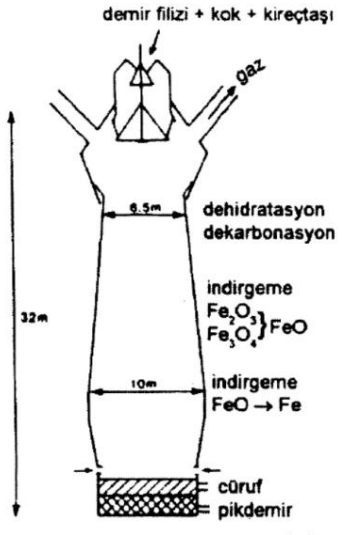
Sodyumoksit + Potasyumoksit (Na_2O + K_2O)	3-9
Titanyumoksit (TiO_2)	< 1
Sülfürtrioksit (SO_3)	< 1
Kızdırma Kaybı	1-3

2.5 Yüksek Fırın Cürufu

Cüruf, çeşitli metalürji tesislerinden atık olarak elde edilen malzemelere verilen genel isimdir. Kimyasal yapılarına, elde edildikleri sanayi kuruluşunun ürettiği ürün tipine ve bu üretimde kullanılan üretim yöntemine göre cüruflar farklılık göstermektedir. Bu duruma örnek vermek gerekirse yüksek fırın cüruflarının kendi başına bağlayıcı özelliği olmasına rağmen nikel ve bakır cüruflarının sadece puzolanik özelliği vardır. Klasik çelik üretimi sonucu ortaya çıkan cüruflar kristal yapıya sahiptirler. Bu tür cüruflar yol malzemesi veya beton agregası olarak kullanılabildiği gibi hiçte kullanılmaya bilirler. Fakat daha modern yöntemlerle çelik üretimi yapan tesislerde atık olarak camsı yapıda olan ve az da olsa hidrolik özellikler gösterebilen cüruflar elde edilir. Bu tür cürufların çimento içerisinde ikameli olarak kullanımı mümkündür. Bu tarz özellikler gösteren cürufların başında olan ve en yaygın şekilde kullanılanı yüksek fırın cürufudur [43].

Demir elde edebilmek için demir cevherlerinin yüksek fırın adı verilen fırınlarda çok yüksek sıcaklıklara kadar ısıtılmaları gerekmektedir. Bunun amacı demir cevherini oksijen ve diğer yabancı maddelerden arındırmaktır. Yakıt olarak kok kömürünün kullanıldığı bu fırınlarda arındırma işlemine yardımcı olması için kalker taşıda demir cevheri ile birlikte ısıtılmaktadır. Yüksek sıcakılığın etkisiyle kok kömürünün karbonu ile demir oksitin oksijeni birleşerek CO ve CO_2 gazları oluşmaktadır. Oluşan bu gazlar fırını terk etmektedir ve geride eriyik halde CaO, SiO_2, Al_2O_3, MgO, MnO ve S gibi yabancı maddeler kalmaktadır. Demirin yoğunluğu oluşan bu yabancı maddelerden fazla olduğu için demir eriyik halde en altta bulunurken bu yabancı maddeler ise eriyik halde demirin üsttünde

bulunur. Demir ve yabancı malzemeler yüksek fırından ayrı ayrı çıkışlardan çıkarılır. Bütün bu işlemler sonucunda elde edilen bu yabancı malzemeler topluluğuna ise yüksek fırın cürufu denir. Yaklaşık olarak yüksek fırının oluşma sıcaklığı ise 1400-1600 °C'dir [54]. Yüksek fırın cürufunun oluşma süreci ise Şekil 2.6'da verilmiştir.



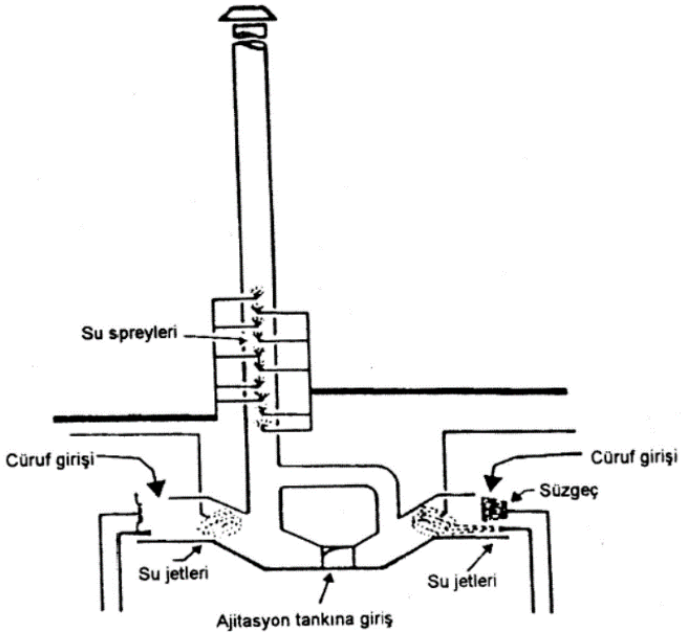
Şekil 2.6 Yüksek fırın cürufunun oluşma prosesi [43]

Yüksek fırın cürufu yavaş soğutulduğu zaman kristal bir yapıya sahiptir. Kristal yapıda olan bu yüksek fırın cürufu bazalta benzeyen özellikler taşımaktadır. Bu halde olan yüksek fırın cürufu beton agregası olarak kullanılabilmektedir. Yüksek fırın cürufunun hızlı soğutulmasıyla camsı yapıda olan ve bir miktar hidrolik özellik gösteren yüksek fırın cürufu elde edilir. Elde edilen bu malzeme tek başına bağlayıcılık özelliği bulundurabildiği gibi çimentoyla da ikameli bir şekilde kullanılabilir.

Eriyik haldeki yüksek fırın cürufu ani olarak soğutulduğunda eriyik haldeki malzemenin akışkanlığı hızlı bir şekilde düşer. Akışkanlığın bu denli hızlı azalması kristal yapı oluşmasının önüne geçer ve sonuç olarak camsı yapıda bir malzeme oluşur. Oluşan bu yüksek fırın cürufu, sodyum hidroksit, kalsiyum hidroksit gibi

aktivatörler kullanılarak veya daha ince öğütülerek hidrolik özelliğe sahip olur [55].

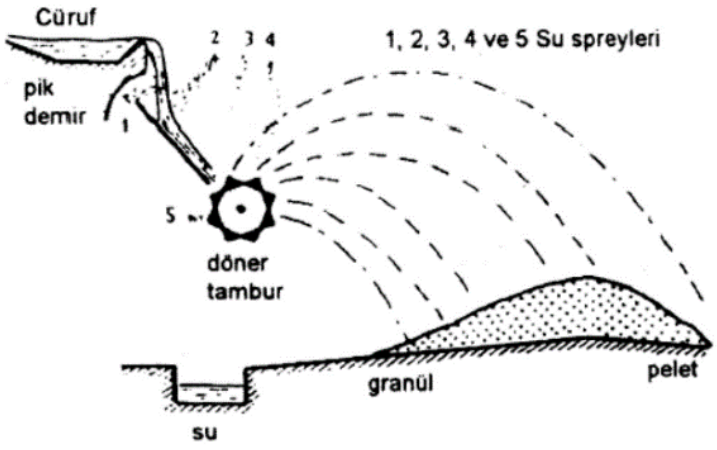
Yüksek fırın cürufunun ani soğutulması için iki farlı yöntem mevcuttur. Bu yöntemler granülasyon yöntemi ve peletleme yöntemleridir. Granülasyon yönteminde 1 ton yüksek fırın cürufunun soğuması için 100 m^3 su kullanılmaktadır. Bu işlem sonucu elde edilen yüksek fırın cürufu %30 oranında su içermektedir. Bu su daha sonra kurutucu değirmenlerde veya filtreli havuzlarda cüruftan uzaklaştırılır. Bu yöntemle üretilen granüle yüksek fırın cürufu özellikleri bakımından en iyi yüksek fırın cürufudur. Fakat granülasyon yönteminin uygulanması çok pahalıdır bu pahalılıkta granülasyon yönteminin baş kısıtlayıcısıdır [56]. Granülasyon yönteminin bir tasviri Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7 Granülasyon yöntemi [43]

Yüksek fırın cürufunun ani soğutulmasında kullanılan bir diğer yöntem ise peletleme yöntemidir. Peletleme yöntemi, granülasyon yöntemine göre uygulama kolaylığı ve maliyet düşüklüğü gibi etkenler nedeniyle daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntemde eriyik haldeki yüksek fırın cürufu suyla

soğutulduktan sonra dakikada 300 devir yapan bir tambur yardımıyla havaya fırlatılır. Bu yöntemde 1 ton yüksek fırın cürufunun soğuması için genellikle 1 m^3 su kullanılmaktadır. İşlem sonucunda cürufun içinde kalan su oranı ise %10'dur. Daha sonrasında bu su granülasyon yönteminde olduğu gibi kurutucu değirmenler veya filtreli havuzlar aracılığıyla cüruftan uzaklaştırılır. Fakat peletleme yöntemiyle değişik boylarda yüksek fırın cürufu elde edilmektedir. 4-15 mm arasında gözenekli yapıda olan yüksek fırın cürufları kristal yapıya sahiptir ve bunlar beton agregası olarak kullanılmaktadır. 4 mm'den küçük olan yüksek fırın cürufları ise camsı yapıya sahiptir ve bu malzemeler çimentoyla ikameli olarak kullanılırlar [56]. Peletleme yönteminin bir tasviri ise Şekil 2.8'de verilmiştir.



Şekil 2.8 Peletleme yöntemi [43]

3
DENEYSEL ÇALIŞMA

Çalışmada hamur ve harç olmak üzere iki fazda üretimler yapılmıştır. Hamur fazda 3, 7 ve 28. günlerde basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Hamur fazda yapılan deneylerden elde edilen bilgiler ışığında harç fazdaki numuneler üretilmiştir. Ayrıca harç fazda numunelerin içerisindeki yüksek fırın cürufu oranları değiştirilmiştir. Bu değişimin harcın fiziksel ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Harç fazda yapılan deneyler şöyle sıralanabilir:

- 3, 7 ve 28. günlerde basınç deneyi
- Su emme oranlarının belirlenmesi
- Isı iletkenlik katsayısı ölçümü
- Numunelerin yoğunluklarının belirlenmesi
- İç yapı analizleri (SEM-EDS, FT-IR, XRD)

Harç fazda üretilen numunelerde ince agrega olarak standart CEN kumu kullanılmıştır. Harç fazda üretilen 2 deney grubunda ponza agregasının fiziksel ve mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi amacı ile bu deney gruplarında belirli oranlarda kum ile ikameli olarak ince ponza agregası kullanılmıştır. Kullanılan bu ince ponza agregaları harçlara katılmadan önce suya doygun yüzey kuru hale getirilmiştir. İlaveten 2 deney serisinde kullanılan ince ponza agregalarının en büyük tane boyutu 2 mm'dir. Ayrıca sodyum silikat/alkali hidroksit oranının değişiminin fiziksel ve mekanik özelliklere etkisinin gözlenebilmesi için bu oran hamur fazda üretilen numunelerde değiştirilmiştir. Hamur ve harç fazda yapılan 3, 7 ve 28. günlerdeki basınç dayanımı testleri ASTM C 109'a göre gerçekleştirilmiştir. Harç fazdaki numunelerin yoğunluk, su emme ve boşluk oranının belirlenmesi ASTM C642-13 yönetmeliğine göre yapılmıştır. Harç fazdaki numunelerin 30 dakikalık su emme oranları ise BS 1881'e göre belirlenmiştir.

Çalışma kapsamında hamur fazda toplam 14 deney serisi harç fazda ise 7 deney serisi üretilmiştir.

3.1 Malzemeler

Bu çalışma kapsamında üretilen numunelerde malzeme olarak ponza, yüksek fırın cürufu, NaOH, KOH, sodyum silikat, CEN kumu ve şebeke suyu kullanılmıştır.

3.1.1 Ponza

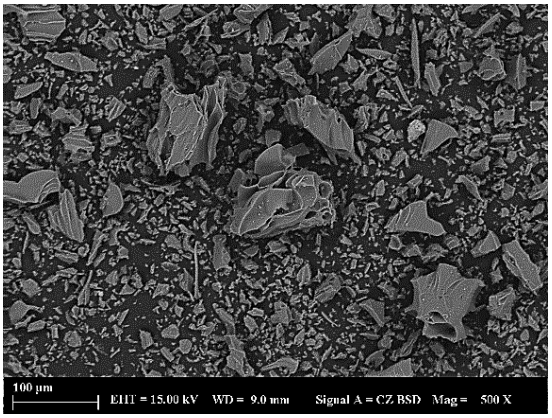
Çalışmamızda kullanılan ponza agrega olarak Nevşehir Yöresi' nden temin edilmiştir. Ponza agregası laboratuvar tipi disk öğütücüde (Şekil 3.1) öğütülerek toz hale getirilmiş (Şekil 3.2), toz malzemenin özgül ağırlığı helyum piknometresi ile yapılan ölçümde 2,3433 g/cm^3 olarak belirlenmiş, ponza tozunun taramalı elektron mikroskopu (SEM) görüntüsü Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Ponzanın öğütülmesinde kullanılan disk öğütücü



Şekil 3.2 Öğütme işlemi sonucunda elde edilen ponza tozu



Şekil 3.3 Ponza tozunun SEM görüntüsü

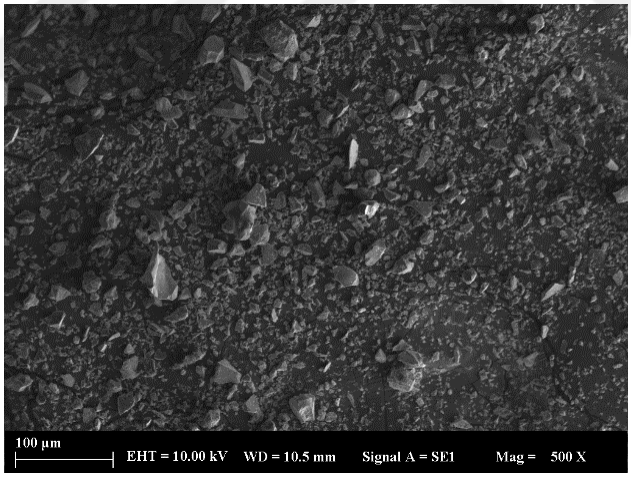
Çalışmamızda kullanılan ponza tozunun kimyasal kompozisyonu ise Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1 Ponza tozunun kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Kompoziyon	Oranlar (%)
CaO	0,10
SiO_2	77,52
Al_2O_3	12,99
Fe_2O_3	1,50
MgO	0,40
Na_2O	0,12
K_2O	0,95
SO_3	0,52
Kızdırma Kaybı	5,42
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2,3433

3.1.2 Yüksek Fırın Cürufu

Bilindiği üzere yüksek fırın cürufu, demir çelik üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Ortaya çıkan bu yüksek fırın cürufu düşük sıcaklıklara çeşitli yöntemlerle getirilerek granüle edilir. Granüle yüksek fırın cürufu ise daha sonra öğütme işlemlerinden geçirilir. Yüksek fırın cürufu tek başına bağlayıcılık özelliği gösterebildiği gibi çimento ile kullanıldığında da bağlayıcılık özelliği gösterir. Aynı zamanda ponza gibi doğal puzolanların yanında ikameli olarak kullanıldığında da bağlayıcılık özelliği gösterir. Ayrıca karışımlarda yüksek fırın cürufu kullanımının oluşturulan numunelerde dayanım ve dayanıklılık özelliklerini olumlu yönde etkilediği bilinmektedir. Bizim çalışmamızda da yüksek fırın cürufu bu avantajları nedeniyle ponzanın içine ikameli olarak belirli oranlarda katılmıştır. Çalışmamız da kullanılan yüksek fırın cürufu camsı yapıda olan ve hidrolik özellikler gösteren bir yüksek fırın cürufudur. Kullanılan yüksek fırın cürufunun özgül ağırlığı 2,91 g/cm^3 olarak belirlenmiş, yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü ise Şekil 3.4'te verilmiştir.



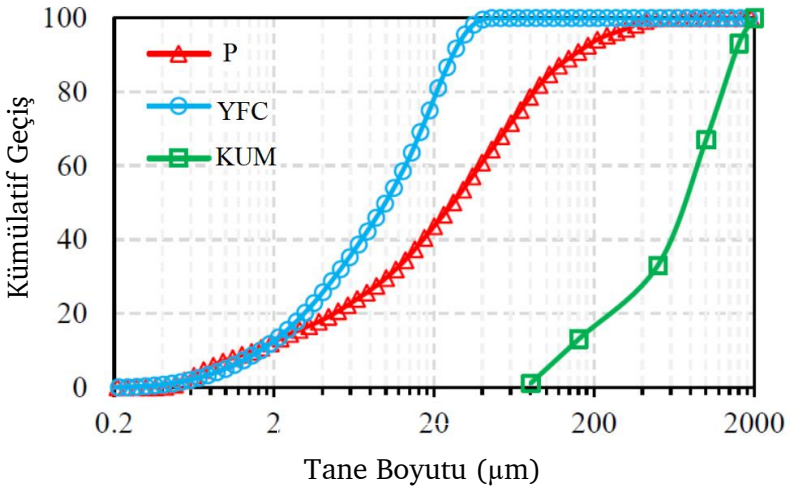
Şekil 3.4 Yüksek fırın cürufunun SEM görüntüsü

Çalışmamızda kullanılan ve hazır temin yoluyla elde edilen yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu ise Tablo 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.2 Yüksek fırın cürufunun kimyasal kompozisyonu

Kimyasal Kompoziyon	Oranlar (%)
CaO	37,50
SiO_2	39,00
Al_2O_3	12,50
Fe_2O_3	1,00
MgO	5,00
Na_2O	0,60
K_2O	0,20
SO_3	0,20
Kızdırma Kaybı	0,02
Özgül Ağırlık (g/cm^3)	2,91
Yüzey alanı (Blaine	5300

Bilindiği üzere çalşmamızda bulunan her iki fazda da yüksek fırın cürufu ponza ile ikameli olarak belirli oranlarda kullanılmıştır. Çalışmamızda kullanılan ponza tozu ve yüksek fırın cürufuna ait tane dağılımları ise Şekil 3.5'te gösterimi yapılan grafikte verilmiştir.



Şekil 3.5 Ponza tozu ve yüksek fırın cürufuna ait tane dağılımları

3.1.3 Çimento

Harç fazda ponza ve yüksek fırın cürufuyla üretilen numunelerin normal portland çimentosu harcıyla kıyasının yapılabilmesi için çalışmanın bu bölümünde bir kıyas serisi oluşturulmuştur. Bu kıyas serisinde bağlayıcı olarak TS EN 197-1'e uygun CEM-I 42,5R tipi portland çimentosu kullanılmıştır.

3.1.4 Potasyum Hidroksit (KOH)

Potasyum hidroksit endüstride daha ziyade potas kostik olarak bilinen kimyasal bir bileşiktir. Potasyum hidroksitin suda çözünmesi ise ekzotermik olarak gerçekleşir. Ayrıca potasyum hidroksit güçlü bazik özellikler göstermektedir. Potasyum hidroksitin kullanım alanı geniştir. Bu kullanım alanlarına tarım, kimya ve kağıt endüstrileri örnek gösterilebilir. Potasyum hidroksit tarımda endüstrisinde asidik toprakların pH dengesini sağlamada, kimya endüstrisinde sıvı sabun üretiminde, kağıt endüstrisinde geri dönüşümlü kağıtların yapımında kullanılmaktadır. Ayrıca potasyum hidroksit ilaç endüstrisinde de oldukça kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan potasyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.3'te verilmiştir.

Tablo 3.3 Potasyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri [57]

Kimyasal Formül	KOH
Yoğunluk	2,04 g/cm^3 (20 °C)
Erime Noktası	380 °C
pH Değeri	13,5 (5,6 g/l, H_2O, 25 °C)
Buhar Basıncı	1 hPa (719 °C)
Çözünürlük	1130 g/l
Fiziksel Hal	Katı
KOH (Asimetrik)	≥ %85
K_2CO_3 (Karbonat)	≤ %1
Cl (Klorit)	≤ %0,01
PO_4 (Fosfat)	≤ %0,0005
SiO_2 (Silikat)	≤ %0,005
SO_4 (Sülfat)	≤ %0,0005
N (Toplam Nitrojen)	≤ %0,0005
Ağır Metaller (Pb olarak)	≤ %0,0005
Al (Alüminyum)	≤ %0,001
Ca (Kalsiyum)	≤ %0,001

Tablo 3.3 Potasyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri [57] (devam)

Cu (Bakır)	≤ %0,0002
Fe (Demir)	≤ %0,0005
Na (Sodyum)	≤ %0,5
Ni (Nikel)	≤ %0,0005
Pb (Kurşun)	≤ %0,0005
Zn (Çinko)	≤ %0,0025

3.1.5 Sodyum Hidroksit (NaOH)

Sodyum hidroksit endüstride daha çok kostik veya kostik soda olarak bilinen inorganik kimyasal bir bileşiktir. Suda çözünmesi ise ekzotermiktir. Bu çözünme sırasında açığa çıkan ısı, çok kısa zamanda çok yüksek değerlere ulaşabilmektedir. Suda çözündüğünde ise yumuşak kaygan sabun hissi veren bir çözelti oluşturmaktadır. Ayrıca sodyum hidroksit güçlü bir bazdır. Sodyum hidroksitin kullanım alanı geniştir. Laboratuvar ortamında CO_2 gibi asidik gazların yakalanmasında, yapay ipek, kağıt, sabun, boya ve deterjan üretimlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunların yanı sıra petrol rafinerilerinde de kullanımı söz konusudur. Ucuz olması ve kolay bir şekilde temin edilebilmesi avantajlarındandır [58]. Çalışmada kullanılan sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.4'te verilmiştir.

Tablo 3.4 Sodyum hidroksitin fiziksel ve kimyasal özellikleri [59]

Kimyasal Formül	NaOH
Yoğunluk	2,13 g/cm^3 (20 °C)
Erime Noktası	318 °C
pH Değeri	> 14 (100 g/l, H_2O, 20 °C)
Buhar Basıncı	24 hPa (20 °C)
Çözünürlük	1090 g/l
NaOH (Asimetrik)	≥ %97
Na_2CO_3 (Karbonat)	≤ %1
Cl (Klorit)	≤ %0,012
SO_4 (Sülfat)	≤ %0,010
Ağır Metaller (Pb olarak)	≤ %0,002
Al (Alüminyum)	≤ %0,002
Fe (Demir)	≤ %0,002

3.1.6 Sodyum Silikat

Sodyum silikat, cam suyu olarakta bilinen ve yoğun olarak Na_2O ve SiO_2 içeren kimyasal bir bileşiktir. Genel formülü ise $Na_2O(SiO_2)_n$ olarak tanımlanmaktadır. Çoğunlukla renksiz bir haldedir fakat ticari türevlerinde içlerine konulan ilave kimyasalların etkisiyle yeşil veya mavi renk alabilirler. Sodyum silikatın uygulama alanları ise oldukça geniştir. Bu kullanım alanları özet olarak:

- Suların arıtılması esnasında suyun pıhtılaşmasını önlemede
- Mürekkep çözücü olarak
- Kerestelerin işlenmesinde
- Silika jel üretiminde
- Deterjan üretiminde
- Betonların sertleştirilmesinde
- Betonların daha asit geçirmez bir yapıda olmasında
- Tekstil sektöründe pH değerlerinin düzenlenmesinde
- Seramik üretimi sırasında kilin sıvılaştırılmasında ve pıhtılaşmasının önlenmesinde
- Madencilikte minarallerin paketlenmesinde
- Petrol prose işleminde aşınmanın önüne geçilmesinde
- Yanmaz kağıt katalizörü olarak
- Peroksit stabilizer olarak tekstil sektöründe ve kağıt üretiminde şeklinde sıralanabilir [60].

Çalışmada kullanılan sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri [61]

Kimyasal Formül	$Na_2O.SiO_2$
Kaynama Noktası	> 100 °C (1013 hPa)
Yoğunluk	1,35 g/cm^3 (20 °C)
pH Değeri	11,0-11,5 (50 g/l, H_2O, 20 °C)
Na_2O (Asimetrik)	%7,5-8,5
SiO_2 (Asimetrik)	%25,5-28,5
Yoğunluk (20 °C)	1,296-1,396 g/ml
Fe (Demir)	≤ 50 ppm

Tablo 3.5 Sodyum silikatın fiziksel ve kimyasal özellikleri [61] (devam)

Ağır Metaller (Pb olarak)	≤ 50 ppm

3.1.7 Kum

Harç fazda yapılan çalışmalarımızda Limak San. ve Tic. A.Ş. Trakya Çimento Fabrikasında üretilen TS EN 196-1 ile uyumlu ve en büyük tane boyutu 2 mm olan CEN kumu kullanılmıştır. (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 Deneysel çalışmada kullanılan doğal kum

3.1.8 Karma Suyu

Çalışma kapsamında hamur ve harç numunelerde karma suyu olarak şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

3.2 Numunelerin Üretimi

3.2.1 Hamur Numunelerin Üretimi

Hamur fazda aktivatör tipi ve konsantrasyonunun basınç dayanımına etkisinin belirlenmesi amacı ile 14 farklı deney grubu oluşturulmuş, bu numunelerde basınç dayanımı 3, 7 ve 28. günlerde gerçekleştirilen basınç deneyi ile belirlenmiştir. Hamur serilerde bağlayıcı olarak ponza tozu ve yüksek fırın cürufu kullanılmış, ponza tozu ağırlıkça %80 oranında alınmış, tüm serilerde su/bağlayıcı oranı 0,34 olarak sabit tutulmuş, serilere ait karışım miktarları Tablo 3.6'da özetlenmiştir. Hamur serilerin üretimi laboratuvar tipi harç mikserinde (Şekil 3.7) gerçekleştirilmiş, karıştırma işlemi homojen bir karışım (Şekil 3.7) elde edilinceye kadar, yaklaşık 3 dakika, sürdürülmüştür. Elde edilen taze hamur 50 mm boyutlu küp kalıplara yerleştirilmiş, kalıpların üstü streç filmle kapatılmıştır. Kalıptan 24 saat sonra çıkartılan numuneler %55±2 bağıl nem ve 21±2°C ortam şartlarını sağlayan nem kabininde deney gününe kadar bekletilmiştir.



Şekil 3.7 4,5 litre kapasiteli harç mikseri ve işlem sonrası elde edilen homojen karışım

Tablo 3.6 Hamur serilere ait malzeme miktarları

Seri Kodu	Ponza (g)	YFC (g)	Su (g)	NaOH (g)	KOH (g)	SS (g)	ss/aa	İS (g)
P-4N	409,31	102,33	173,96	27,83	-	-	-	-
P-6N				41,75	-	-	-	
P-8N				55,67	-	-	-	-
P-4K				-	39,04	-	-	-
P-6K				-	58,56	-	-	-
P-8K				-	78,09	-	-	-
P-4N-SS1,0	412,50	103,12	157,42	28,05	-	28,05	1,0	-
P-6NSS1,0			148,47	42,07	-	42,07	1,0	-
P-8N-SS1,0			139,52	56,10	-	56,10	1,0	-
P-4K-SS1,0			150,21	-	39,35	39,35	1,0	-
P-6K-SS1,0			137,66	-	59,02	59,02	1,0	-
P-8K-SS1,0			125,10	-	78,69	78,69	1,0	
P-6K-SS0,5			156,48	-	59,02	29,51	0,5	-
P-6K-SS1,5			118,83	-	59,02	88,53	1,5	39,40

Hamur fazda üretilen deney serilerinin kodlamasında “P” harfi hamur seriyi, P harfinden sonra gelen 4K, 6N gibi ifadeler o deney serisinde kullanılan alkali aktivatör tipini ve molaritesini, “SS” ifadesi o deney serisinde sodyum silikat bulunduğunu, SS ifadesinin yanındaki rakam ise sodyum silikat/alkali aktivatör oranını belirtmektedir. Doğal olarak sodyum silikat bulundurmayan deney serilerinde “SS” ifadesi ve o ifadenin sağında bulunan rakam yoktur. Seri kodlarının açılımlarına örnek vermek gerekirse; P-6K-SS1,0 kodu, hamur fazda üretilen, 6 molar KOH içeren, sodyum silikatli ve sodyum silikat/alkali aktivatör oranı 1 olan deney serisini ifade etmektedir. Hamur fazda üretilen deney serilerinin kod açılımlarının daha iyi anlaşılabilmesi için hamur fazda üretilen tüm deney serilerine ait kodların açıklamaları Tablo 3.7’ de verilmiştir.

Tablo 3.7 Hamur fazdaki deney serilerine ait kodların açılımı

Seri Kodu	Açıklama
P-4N	Hamur fazda üretilen ve 4 molar NaOH içeren deney serisi
P-6N	Hamur fazda üretilen ve 6 molar NaOH içeren deney serisi
P-8N	Hamur fazda üretilen ve 8 molar NaOH içeren deney serisi
P-4K	Hamur fazda üretilen ve 4 molar KOH içeren deney serisi
P-6K	Hamur fazda üretilen ve 6 molar KOH içeren deney serisi

Tablo 3.7 Hamur fazdaki deney serilerine ait kodların açılımı (devam)

P-8K	Hamur fazda üretilen ve 8 molar KOH içeren deney serisi
P-4N-SS1,0	Hamur fazda üretilen ve 4 molar NaOH içeren, ss'li (ss/aa=1,0) deney serisi
P-6N-SS1,0	Hamur fazda üretilen ve 6 molar NaOH içeren, ss'li (ss/aa=1,0) deney serisi
P-8N-SS1,0	Hamur fazda üretilen ve 8 molar NaOH içeren, ss'li (ss/aa=1,0) deney serisi
P-4K-SS1,0	Hamur fazda üretilen ve 4 molar KOH içeren, ss'li (ss/aa=1,0) deney serisi
P-6K-SS1,0	Hamur fazda üretilen ve 6 molar KOH içeren, ss'li (ss/aa=1,0) deney serisi
P-8K-SS1,0	Hamur fazda üretilen ve 8 molar KOH içeren, ss'li (ss/aa=1,0) deney serisi
P-6K-SS0,5	Hamur fazda üretilen ve 6 molar KOH içeren, ss'li (ss/aa=0,5) deney serisi
P-6K-SS1,5	Hamur fazda üretilen ve 6 molar KOH içeren, ss'li (ss/aa=1,5) deney serisi

3.2.2 Harç Numunelerin Üretimi

Hamur fazda elde edilen basınç deneyi sonuçlarından yararlanarak harç fazda toplamda 7 farklı deney serisi oluşturulmuş, karışım miktarları Tablo 3.8'de verilmiş, seri kodlarının açıklaması Tablo 3.9'da gösterilmiştir. Harç fazda üretilen deney serilerinde ponza tozu ile yüksek fırın cürufu aşağıda belirtildiği gibi farklı oranlarda kullanılmış, su/bağlayıcı oranı ise 0,50 olarak sabit tutulmuştur.

- %80 ponza, %20 yüksek fırın cürufu
- %70 ponza, %30 yüksek fırın cürufu
- %60 ponza, %40 yüksek fırın cürufu
- %50 ponza, %50 yüksek fırın cürufu

Hamur fazda sodyum silikatli deney serilerinin sodyum silikatsiz olanlara göre daha iyi performans sergilediği, en iyi sodyum silikat/alkali aktivatör oranının 1,0 olduğu, ayrıca 6 M KOH kullanılan serinin en yüksek dayanımı verdiği görülmüş, bu nedenle harç fazda üretilen tüm numunelerde sodyum silikat/alkali aktivatör oranı 1,0 olarak alınmış ve 6 M KOH kullanılmıştır.

Harç fazda yapılan çalışmalarda numunelerin basınç dayanımı 3, 7 ve 28. günlerde gerçekleştirilen basınç deneyi ile belirlenmiş, ayrıca yoğunluk, su emme, boşluk oranı ve ısı iletkenlik katsayıları 28. günde belirlenmiştir. Basınç deneyi 50 mm boyutlu küp numunelerde ASTM C 109'a göre, 30 dakikalık su emme oranı BS 1881'e göre, yoğunluk, su emme ve boşluk oranı ASTM 642'ye göre belirlenmiştir. Bu özellikler 100 mm çapında ve 50 mm yüksekliğindeki numunelerde belirlenmiştir. Isı iletkenlik katsayılarının belirlenmesi için üretilen numune boyutları ise 120×60×30mm'dir.

Harç numuneler laboratuvar tipi harç mikserinde üretilmiş, üretimi takip eden süreçte taze harç ilgili kalıplara yerleştirilerek kalıp yüzeyleri streç film ile kapatılmıştır (Şekil 3.8). Kalıptan 24 saat sonra çıkartılan numuneler hamur serilerde olduğu gibi kontrollü sıcaklık ve bağıl nem sağlayan nem kabininde deney gününe kadar bekletilmiştir.



Şekil 3.8 Harç numuneler

Tablo 3.8 Harç serilere ait malzeme miktarları

Seri Kodu	P (g)	YFC (g)	Çimento (g)	Kum (g)	İPA (g)	Su (g)	KOH (g)	SS (g)
M80	1170,7	292,7	-	3555,9	-	547,5	246,3	246,3
M70	1033,8	443,1	-	3555,9	-	579,8	248,6	248,6
M60	894,3	596,2	-	3555,9	-	585,2	250,9	250,9
M50	752,3	752,3	-	3555,9	-	590,7	253,3	253,3
OPC	-	-	1629,2	3555,9	-	814,6	-	-
M50-PA25	752,3	752,3	-	2666,9	559,4	590,7	253,3	253,3
M50-PA50	752,3	752,3	-	1777,9	1118,7	590,7	253,3	253,3

Tablo 3.9 Harç fazdaki deney serilerine ait kodların açılımı

Seri Kodu	Açıklama
M80	Harç fazda üretilen, %80 ponza tozu içeren deney serisi
M70	Harç fazda üretilen, %70 ponza tozu içeren deney serisi
M60	Harç fazda üretilen, %60 ponza tozu içeren deney serisi
M50	Harç fazda üretilen, %50 ponza tozu içeren deney serisi
OPC	Normal portland çimentosu ile üretilen harç
M50-PA25	Harç fazda üretilen, %50 ponza tozu içeren ve ince agreganın %25 oranında ponza agregası ile ikame edildiği deney serisi
M50-PA50	Harç fazda üretilen, %50 ponza içeren ve ince agreganın %50 oranında ponza agregası ile ikame edildiği deney serisi

3.3 Deneyler

3.3.1 Hamur Fazda Yapılan Deneyler

Hamur fazda toplamda 14 farklı deney serisi üretilmiş, alkali aktivatör olarak NaOH ve KOH olmak üzere 2 farklı aktivatör kullanılmış, her iki aktivatör ayrıca sodyum silikat ile birleştirilerek hamur serilerin basınç dayanımına etkisi incelenmiştir.

Basınç deneyi 3, 7 ve 28. günlerde 50mm×50mm×50mm boyutlu küp numunelerde ASTM C 109'a uygun olarak gerçekleştirilmiş (Şekil 3.9), numuneler deney gününe kadar %55±2 bağıl nem ve 21±2°C de bekletilmiştir.



Şekil 3.9 Hamur fazda yapılan basınç dayanımı deneyi düzeneği ve kırılma sonrası hal

3.3.2 Harç Fazda Yapılan Deneyler

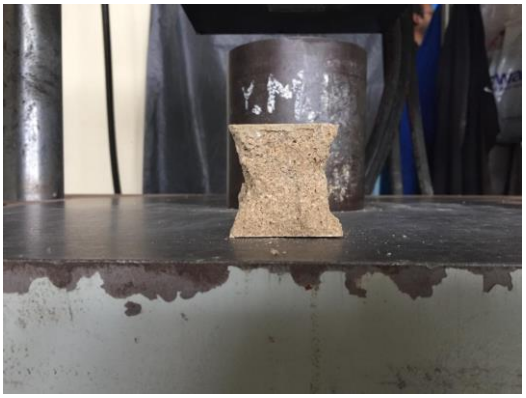
Hamur fazda en iyi dayanımı veren alkali aktivatör kombinasyonu dikkate alınarak harç fazda 7 farklı seri üretilmiş, bu serilerden iki tanesinde ince agrega ponza agregası ile iki farklı oranda yer değiştirilerek fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır.

3.3.2.1 Basınç Deneyi

Harç fazda üretilen deney serilerinde 3,7 ve 28. günlerde basınç deneyleri yapılmıştır (Şekil 3.10-3.11). Deney, 50 mm boyutlu küp numunede gerçekleştirilmiş, basınç dayanımı kırma yükünün yük uygulanan yüzey alanına oranlanması ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.10 Harç numunede basınç deneyi



Şekil 3.11 Deney sonrası kırılma şekli

3.3.2.2 Su Emme Oranı, Yoğunluk ve Boşluk Oranı

Harç numunelerin fiziksel özellikleri ASTM C 642-13'e uygun olarak belirlenmiştir. Bu amaçla her deney serisi için 100/200 mm boyutlu silindir numune üretilmiş, bu numune 28. günde 50'şer mm kalınlığında kesilmiş (Şekil 3.12) ve deneyler 3'er adet numunede gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12 Silindir numuneler

Numunelerin su emme oranı, etüv kurusu yoğunluk ve boşluk oranı gibi fiziksel özelliklerinin belirlenmesi amacı ile numuneler 48 saat boyunca 105 °C'de etüvde kurutulmuş ve kuru tartımları yapılmış, 30 dakikalık su emme oranının (BS 1881) belirlenmesi için içinde bir miktar su bulunan kaplara konulmuş (Şekil. 3.13), 30 dakikanın ardından tekrar tartılmıştır.



Şekil 3.13 30 dakikalık su emme oranlarının bulunması için suya konulan numuneler

Bu işlemin ardından 48 saatlik su emme oranını belirlemek üzere numuneler tekrar suya konulmuş, 48. saatin sonunda numuneler sudan çıkartılıp üstleri kuru bir bez vasıtasıyla silinmiş ve tartımları yapılmıştır. Sonrasında numuneler kaynar suda 5 saat bekletilmiş (Şekil 3.14), su içinde soğuması beklenmiş ve ardından havada ve suda tartımlar yapılarak deney tamamlanmıştır.



Şekil 3.14 Numunelerin kaynar suda bekletilmesi

ASTM 642-13'e göre bulunan daldırma sonrası emilim oranı (3.1) bağıntısından, elde edilmektedir. Ayrıca yine ASTM 642-13'e göre bulunan deney serilerinin kuru yoğunlukları (3.2) bağıntısından, tayin edilmektedir. Harç fazdaki deney serilerimizin ASTM 642-13'e göre boşluk oranları ise (3.3) bağıntısından tespit edilmektedir.

$$Daldırma\ Sonrası\ Emilim\ \ (\%) = \frac{B - A}{A} \times 100 \tag{3.1}$$

$$Kuru\ Yoğunluk\ (g/cm^3) = \frac{A}{C - D} \times \rho \tag{3.2}$$

$$Boşluk\ oranı\ (\%) = \frac{C - A}{C - D} \times 100 \tag{3.3}$$

Bağıntılarında yer alan A ifadesi numunenin etüv kurusu ağırlığını, B ifadesi numunenin suya doygun yüzey kuru ağırlığını, C ifadesi numunenin daldırma ve kaynama sonrası suya doygun yüzey kuru ağırlığını ve D ifadesi ise numunenin daldırma ve kaynama sonrası sudaki ağırlığını, ρ ise suyun yoğunluğunu temsil etmektedir.

3.3.2.3 Isı İletkenlik Katsayısının Belirlenmesi

Isı iletkenlik katsayısı 120mm×60mm×30mm boyutlu prizmatik numunelerde (Şekil 3.15) belirlenmiştir. Deneyde, ölçüm aralığı 0,023-11,63 W/mK, ölçüm hassasiyeti %5 olan KEM QTM 500 cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.16). Harç numunelerde ısı iletkenlik katsayılarının ölçümünde numunelerin üst ve alt yüzeylerinden 3'er ölçüm olmak üzere toplamda 6 ölçüm yapılmış, ısı iletkenlik katsayısı bu 6 değerin ortalaması alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.15 Isı iletkenlik katsayılarının belirlenmesi için üretilen numune



Şekil 3.16 Isı iletkenlik katsayılarının ölçümünde kullanılan KEM QTM 500 cihazı [62]

4
DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

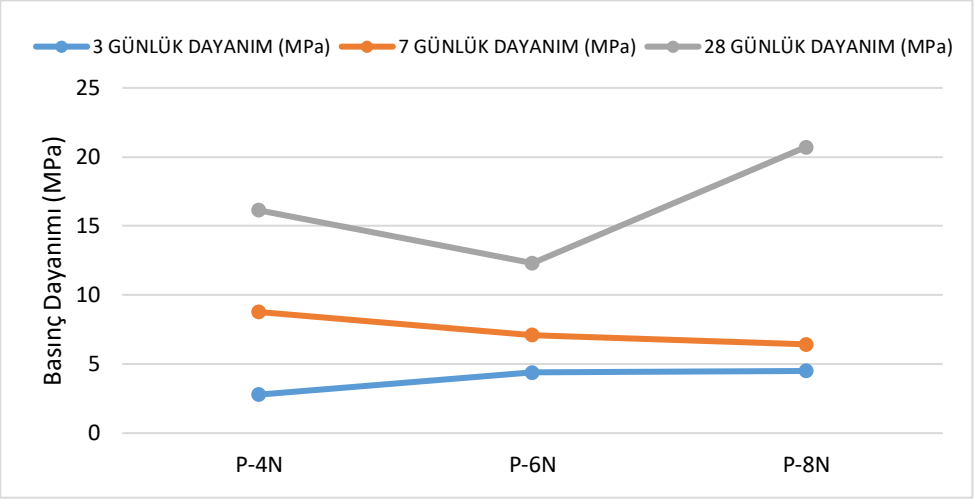
4.1 Hamur Fazda Yapılan Deneylerin Sonuçları

Hamur fazdaki deney serilerinde elde edilen 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 4.1'de verilmiştir. Çalışmanın hamur fazında 3 farklı tip aktivatör kullanılmıştır.

Tablo 4.1 Hamur fazda serilere ait 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

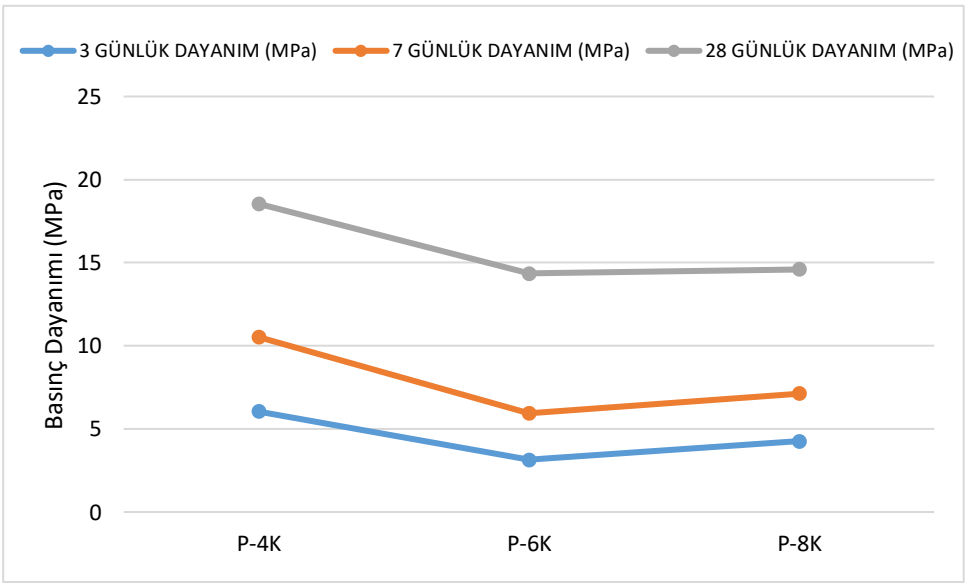
Seri Kodu	3. gün (MPa)	7. gün (MPa)	28. gün (MPa)
P-4N	2,79	8,77	16,14
P-6N	4,39	7,10	12,31
P-8N	4,50	6,43	20,72
P-4K	6,04	10,52	18,54
P-6K	3,15	5,94	14,36
P-8K	4,26	7,12	14,61
P-4N-SS1,0	3,69	8,18	18,10
P-6N-SS1,0	2,66	10,10	16,70
P-8N-SS1,0	2,95	5,42	11,18
P-4K-SS1,0	3,31	10,67	28,00
P-6K-SS1,0	3,62	17,15	29,00
P-8K-SS1,0	6,93	14,88	28,20
P-6K-SS0,5	1,78	5,20	18,61
P-6K-SS1,5	4,54	10,00	23,72

NaOH içeren serilere ait basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1 NaOH içeren hamur serilerin basınç dayanımı gelişimi

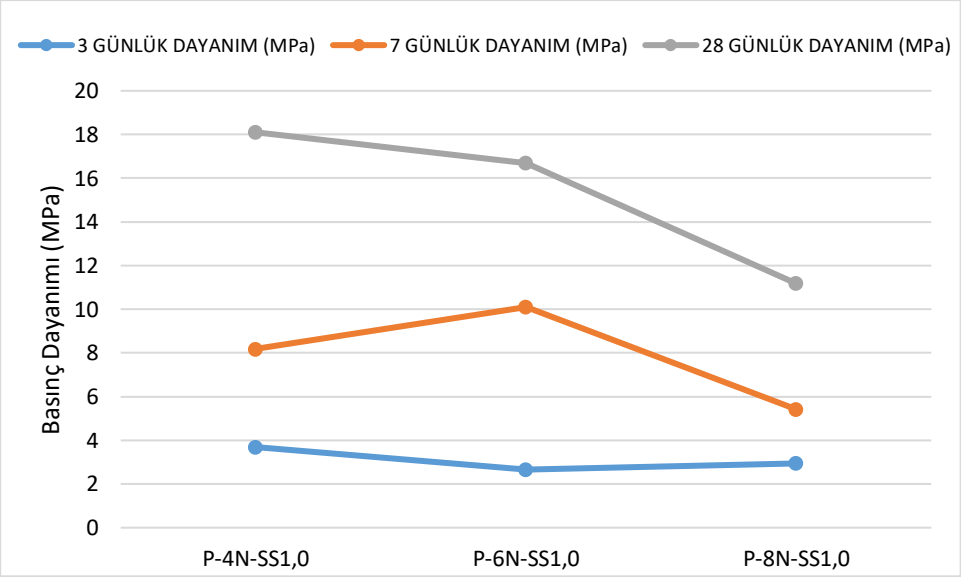
Deney sonuçları dikkate alındığında NaOH molaritesinin 3 ve 7 günlük basınç dayanımı üzerinde önemli etkisinin olmadığı, 28 günlük basınç dayanımının ise 8 M NaOH kullanıldığında en yüksek değeri aldığı gözlenmiştir. Alkali aktivatör olarak KOH içeren deney serilerine ait basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 KOH içeren hamur serilerin basınç dayanımı gelişimi

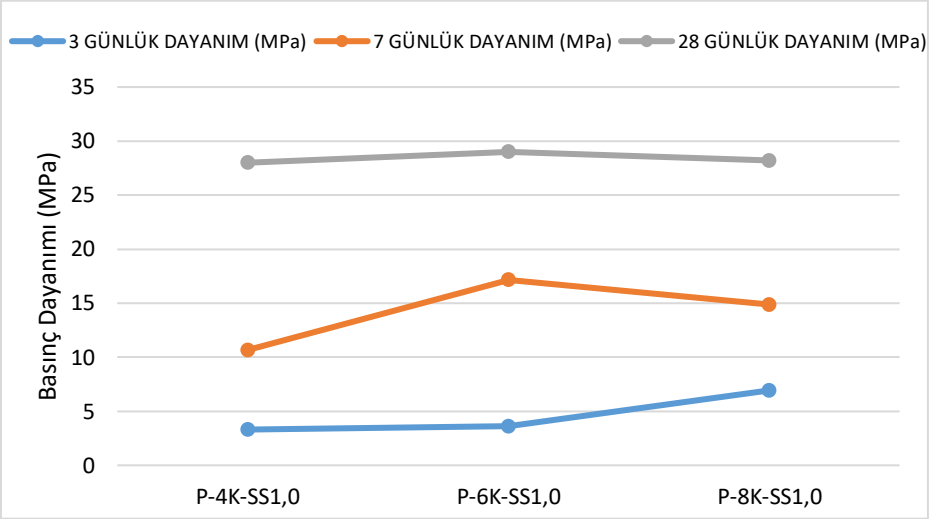
Deney sonuçlarına göre KOH molaritesi 4'ten 6'ya arttıkça belirgin bir düşüş, 6'dan 8'e arttıkça ise bir miktar artış görülmüştür. En yüksek dayanım KOH molaritesinin 4 olduğu serilerde gözlenmiş, NaOH ile kıyaslandığında dayanım açısından çok belirgin bir farklılığın bulunmadığı tespit edilmiştir.

Aktivatör olarak NaOH ve sodyum silikat içeren (ss/aa=1,0) deney serilerine ait basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir. Deney sonuçları genel olarak artan NaOH molaritesi ile birlikte dayanımın düştüğünü göstermiş, sodyum silikat kullanımının dayanım üzerinde belirgin bir katkı yaratmadığı görülmüştür.



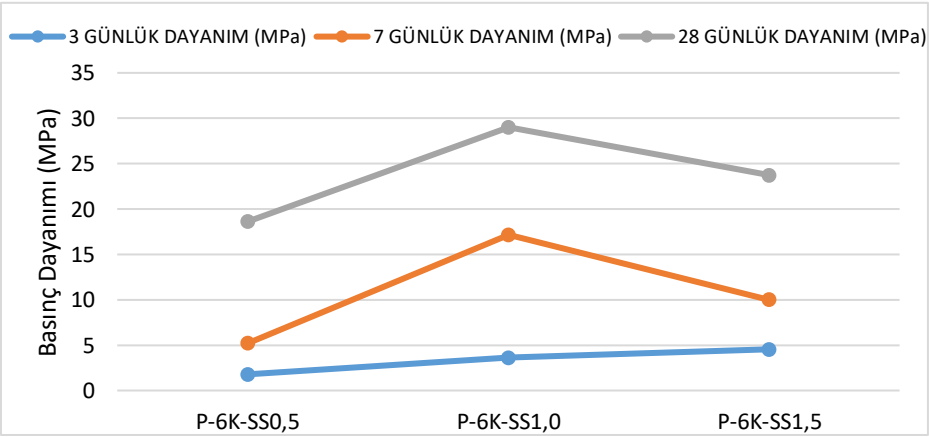
Şekil 4.3 NaOH ve sodyum silikat içeren (ss/aa=1,0) serilerin basınç dayanımı gelişimi

Aktivatör olarak KOH ve sodyum silikat kullanılan (ss/aa=1,0) serilere ait basınç dayanımı sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. Deney sonuçları dikkate alındığında diğer aktivatör kombinasyonları ile kıyaslandığında en yüksek dayanımın KOH ve sodyum silikatli serilerde elde edildiğini, basınç dayanımının 28. günde 29 MPa'a ulaştığı görülmüştür.



Şekil 4.4 KOH ve sodyum silikat içeren (ss/aa=1,0) serilerin basınç dayanımı gelişimi

Hamur fazda yapılan tüm çalışmalar sonucunda alkali aktivatör olarak KOH'nin NaOH'den dayanım açısından daha iyi bir performans gösterdiği tespit edilmiştir. Deney serilerinde KOH konsantrasyonunun artmasının işlenebilirliği arttırdığı, diğer taraftan NaOH konsantrasyonunun artmasının işlenebilirliği oldukça azalttığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte sodyum silikat ilavesinin işlenebilirliği az da olsa azalttığı gözlemlenmiştir. 12 farklı hamur seri incelendiğinde 28. günde en yüksek basınç dayanımının P-6K-SS1,0 serisinde elde edildiği saptanmıştır, ss/aa oranının 0,5 ve 1,5 olduğu serilerde dayanımın daha düşük değerler aldığı görülmüştür (Şekil 4.5).



Şekil 4.5 Sodyum silikat/Alkali aktivatör oranının KOH içeren serilerin basınç dayanımına etkisi

Hamur fazda yapılan tüm çalışmalardan elde edilen sonuçlar özet olarak aşağıda belirtilmiştir:

- KOH miktarı arttıkça işlenebilirliğin arttığı NaOH miktarı arttığında ise işlenebilirliğin azaldığı,
- Basınç dayanımı açısından KOH'nin NaOH'den daha iyi performans sergilediği ve en iyi dayanım veren KOH konsantrasyonunun 6 molar olduğu,
- Deney serilerindeki ss/aa oranının (sodyum silikat miktarının) artmasıyla işlenebilirliğin azaldığı,
- Sodyum silikatlı deney serilerinin genel olarak sodyum silikat içermeyen deney serilerinden daha iyi dayanım sergilediği ve ideal ss/aa oranının 1,0 olduğu belirlenmiştir.

Hamur fazda yapılan çalışmalardan elde edilen ve yukarıda sıralanan bilgiler ışığında harç fazdaki deney serilerinin hepsinde 6 molar KOH kullanılmıştır. Ayrıca tüm deney serilerinde sodyum silikat/alkali aktivatör oranı 1,0 olarak belirlenmiştir.

4.2 Harç Fazda Yapılan Deneylerin Sonuçları

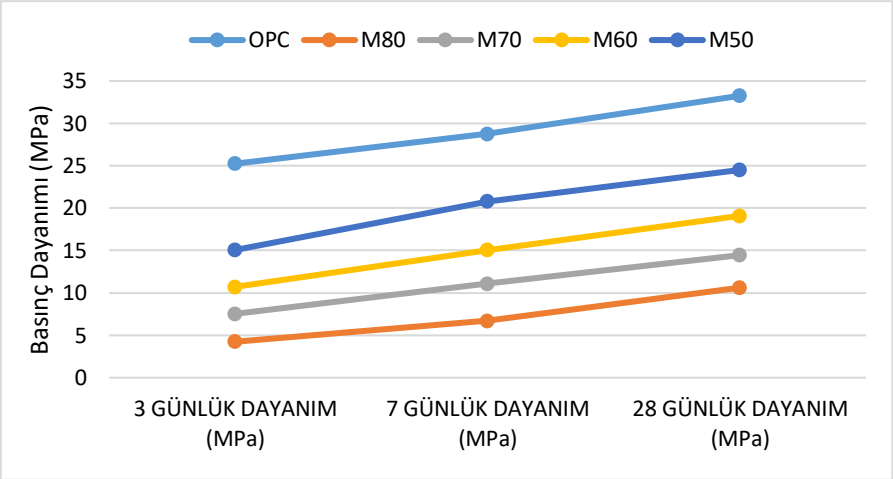
Harç fazda üretilen deney serilerinde ponza tozu oranı %50 ile %80 arasında değiştirilmiş, ayrıca ponza tozunun %50 kullanıldığı seride ilave olarak doğal kum ince ponza agregası ile %25 ve %50 oranında ikame edilmiştir. Deney sonuçlarının portland çimentolu harç ile kıyaslanması için kontrol serisi üretilmiştir.

4.2.1 Basınç Dayanımı

Harç fazda üretilen ve ince ponza agregası içermeyen deney serilerinin 3, 7 ve 28 günlük basınç dayanımı deneyi sonuçları Tablo 4.2'de ve Şekil 4.6'te verilmiştir.

Tablo 4.2 Harç serilerinin basınç dayanımı

Seri Kodu	3 Günlük Dayanımı (MPa)	7 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)
OPC	25,24	28,77	33,25
M80	4,24	6,72	10,61
M70	7,53	11,07	14,45
M60	10,71	15,05	19,09
M50	15,06	20,78	24,50



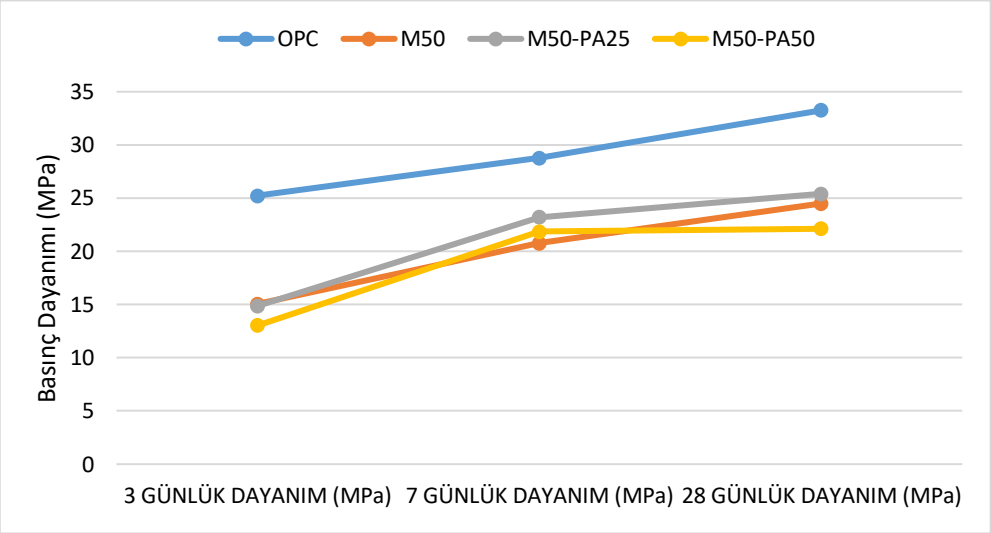
Şekil 4.6 Harç serilerin basınç dayanımı gelişimi

Deney sonuçlarına göre ponza tozu miktarının artması ile basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. En düşük dayanım 28. günde M80 serisine ait iken en yüksek dayanım M50 serisinde gözlenmiştir. Portland çimentosu ile üretilen kontrol serisi 28. günde 33,25 MPa basınç dayanımına ulaşırken M50 serisinin 28. gündeki basınç dayanımı 24,5 MPa olarak belirlenmiştir. Deney serilerinde kullanılan yüksek fırın cürufu miktarının artmasıyla işlenebilirliğin arttığı tespit edilmiş, M80 serisinin en kötü işlenebilirliğe sahip olduğu gözlenmiştir.

Doğal kumun ince ponza agregası ile ikame edildiği serilerin basınç dayanımı sonuçları Tablo 4.3'te ve Şekil 4.7'de verilmiştir.

Tablo 4.3 İnce ponza agregası içeren deney serilerine ait basınç dayanımı

Seri Kodu	3 Günlük Dayanım (MPa)	7 Günlük Dayanım (MPa)	28 Günlük Dayanım (MPa)
OPC	25,24	28,77	33,25
M50	15,06	20,78	24,50
M50-PA25	14,87	23,22	25,41
M50-PA50	13,03	21,85	22,12



Şekil 4.7 İnce ponza agregası içeren serilerin basınç dayanımı

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere M50, M50-PA25 ve M50-PA50 serilerinin basınç dayanımının birbirine çok yakın olduğu görülmüş, ponza agregasının doğal kumla %50 oranına kadar ikame edilebileceği tespit edilmiştir.

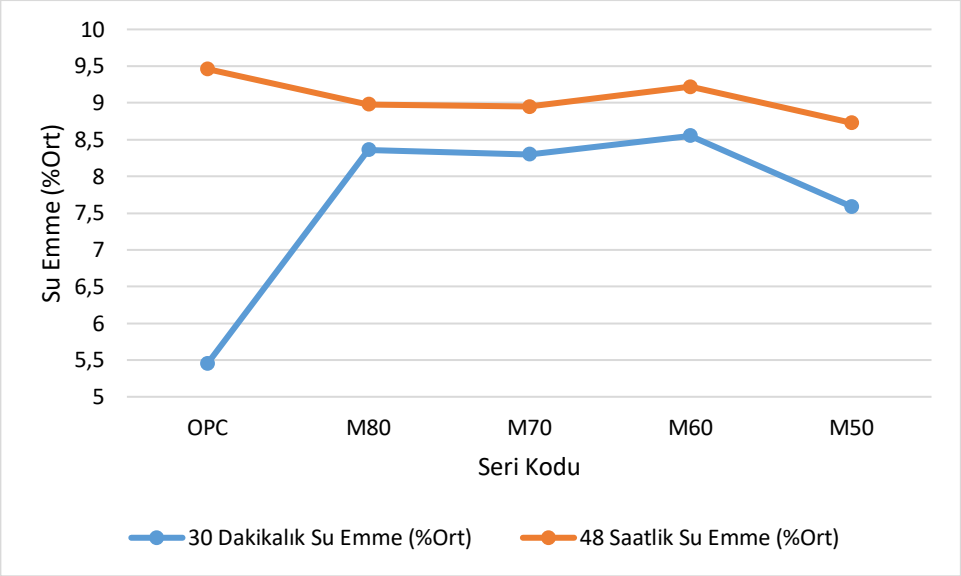
4.2.2 Su Emme Oranı, Yoğunluk ve Boşluk Oranı

Harç serilere ait su emme deneyi sonuçları Tablo 4.4'te ve Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre 30 dakikalık su emme oranlarının artan ponza tozu miktarı ile birlikte az miktarda arttığı, üretimde bağlayıcı olarak portland çimentosu kullanılan kontrol serisinde su emmenin %5,45 ile en düşük değeri aldığı görülmüştür. 48 saatlik su emme değerleri dikkate alındığında ise su emme oranının alkali ile aktive edilen serilerde kontrol serisine göre daha düşük

değerlerde olduğu, ponza tozu oranının su emmeye belirgin bir etkisinin olmadığı gözlenmiştir.

Tablo 4.4 Harç serilerin su emme deney sonuçları

Seri Kodu	Su emme $_{30\ dakika}$ (%)	Su emme $_{48\ saat}$ (%)
OPC	5,45	9,46
M80	8,36	8,98
M70	8,30	8,95
M60	8,55	9,22
M50	7,59	8,73

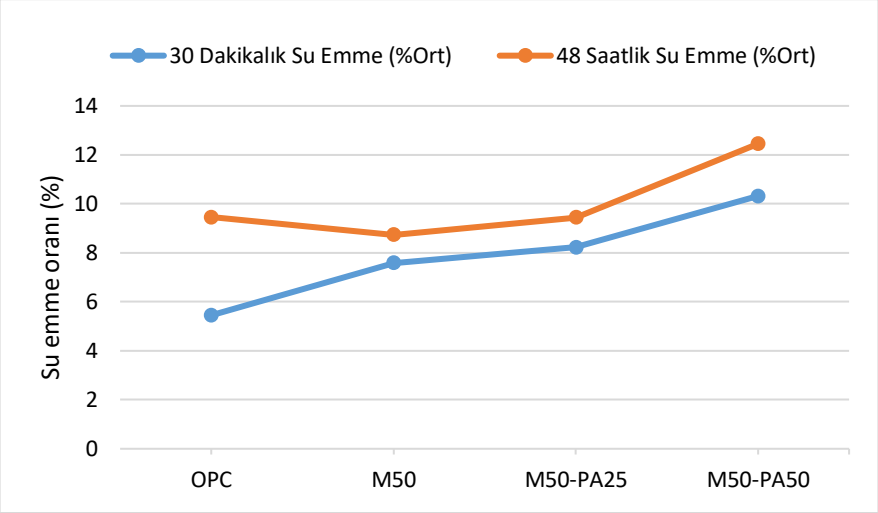


Şekil 4.8 Harç serilerin su emme oranları

Doğal kumun ince ponza agregası ile yer değiştirmeli kullanıldığı serilere ait su emme sonuçları Tablo 4.5'te ve Şekil 4.9'da gösterilmiştir. Ponza agregası ikame oranı %50'ye çıkartıldığında hem 30 dakikalık hem de 24 saatlik su emme değerlerinde belirgin bir artış meydana gelmiş, diğer taraftan %25 ponza ikameli seri su emme oranını düşük bir oranda arttırmıştır. Ponza agregasının gözenek yapısının doğal kuma göre daha boşluklu olması özellikle %50 ikameli serinin yüksek su emme oranını açıklamaktadır.

Tablo 4.5 Ponza agregası içeren harç serilerin su emme oranları

Seri Kodu	Su emme $_{30\ dakika}$ (%)	Su emme $_{48\ saat}$ (%)
OPC	5,45	9,46
M50	7,59	8,73
M50-PA25	8,23	9,44
M50-PA50	10,32	12,45



Şekil 4.9 Ponza agregası içeren harç serilerin su emme oranları

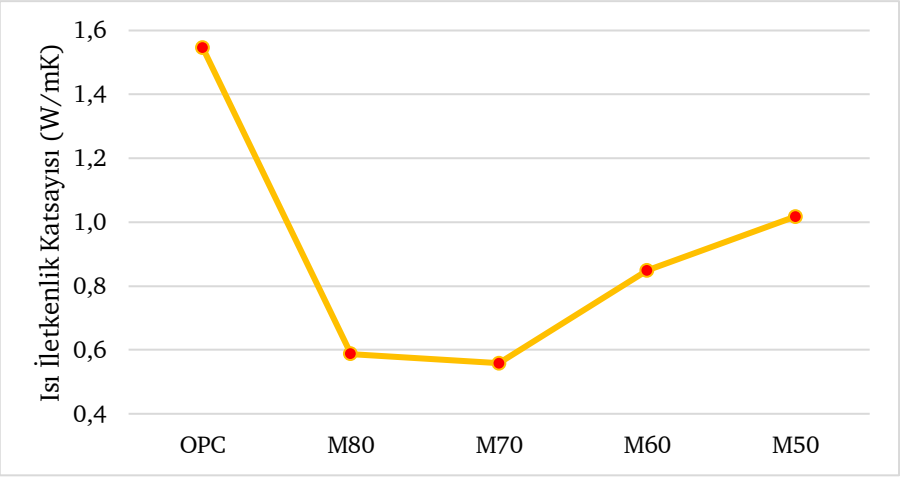
Deney serilerine ait etüv kurusu yoğunluk ve boşluk oranı sonuçları Tablo 4.6'da gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre ponza tozu ikame oranının artması ile etüv kurusu yoğunluğun ve boşluk oranının düşük miktarda azaldığı, portland çimentolu serilere göre boşluk oranının yaklaşık %20 oranında daha yüksek olduğu, öte yandan etüv kurusu yoğunluğun bir miktar düşük olduğu görülmektedir. Ponza agregasının doğal kum ile ikameli kullanıldığı serilerde; %25 ikame oranının harcın yoğunluk ve boşluk oranında önemli bir etki yaratmadığı, %50 ikame oranında ise yoğunluğun belirgin şekilde düştüğü, boşluk oranının ise arttığı gözlenmiştir.

Tablo 4.6 Harç serilerin yoğunluk ve boşluk oranı

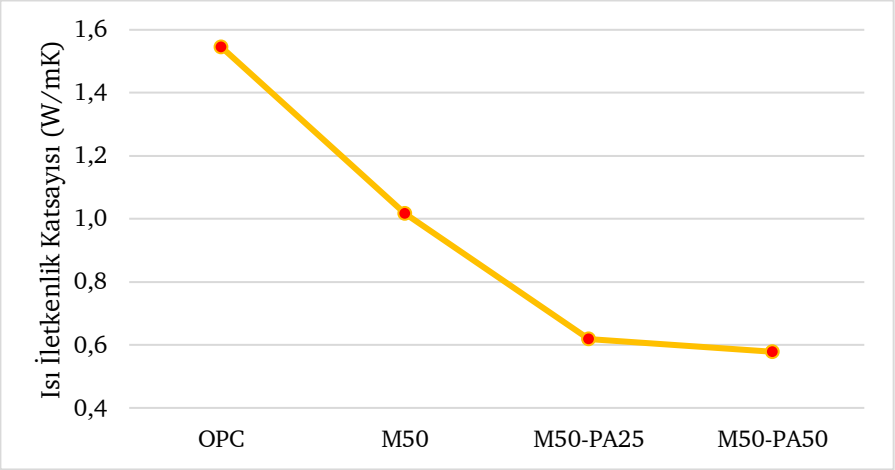
Seri Kodu	Etüv kurusu yoğunluk (g/cm^3)	Boşluk oranı (%)
OPC	2,02	19,98
M80	1,87	23,89
M70	1,89	23,09
M60	1,89	24,00
M50	1,92	22,50
M50-PA25	1,94	22,15
M50-PA50	1,77	26,62

4.2.3 Isı İletkenlik Katsayısı

Harç serilere ait ısı iletkenlik katsayısı değerleri Şekil 4.10 ve Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Deney sonuçlarına göre ponza tozu ikame oranı arttıkça ısı iletkenlik katsayısı azalmış, en düşük değer M80 ve M70 serilerinde yaklaşık 0,6 W/mK olarak tespit edilmiştir. M50 serisi ile kıyaslandığında ısı iletkenlik katsayısında yaklaşık %40'lık, referans portland çimentolu seri ile kıyaslandığında ise yaklaşık %60'lık bir azalma gerçekleşmiştir. Ponza agregasının ikameli kullanıldığı %50 ponza tozu ikameli serilerde de ponza agregasının ısı iletkenlik katsayısını belirgin şekilde azalttığı tespit edilmiştir (Şekil 4.11).



Şekil 4.10 Harç serilerin ısı iletkenlik katsayıları



Şekil 4.11 Ponza agregalı serilerin ısı iletkenlik katsayıları

4.2.4 İçyapı Analizleri

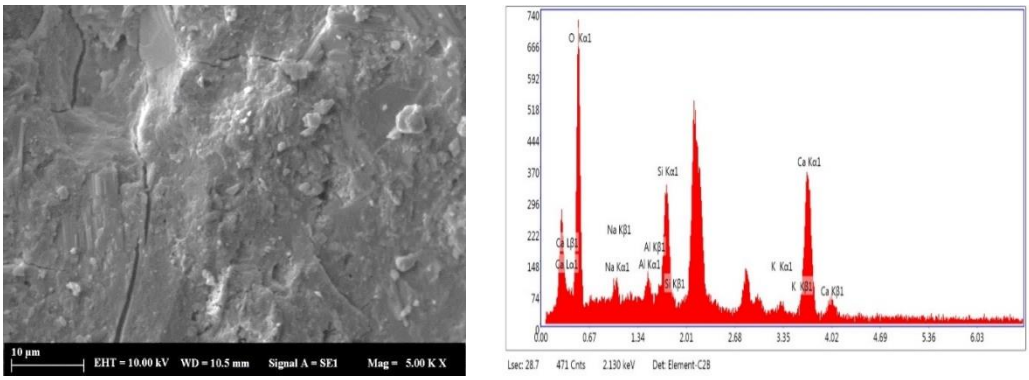
İçyapı analizleri hamur serilerde 28. günde gerçekleştirilmiş, seçilen serilerde (portland çimentolu referans seri, P50 ve P80) aşağıda ifade edilen analizler gerçekleştirilmiştir.

- SEM (Taramalı Elektron Mikroskopu) ve EDS (Enerji Dağılımlı X Işını Spektoropisi) analizi,
- FT-IR (Fourier Dönüşümlü Kızılötesi Spektrometresi) analizi,
- XRD (X Işını Kristalografisi) analizi.

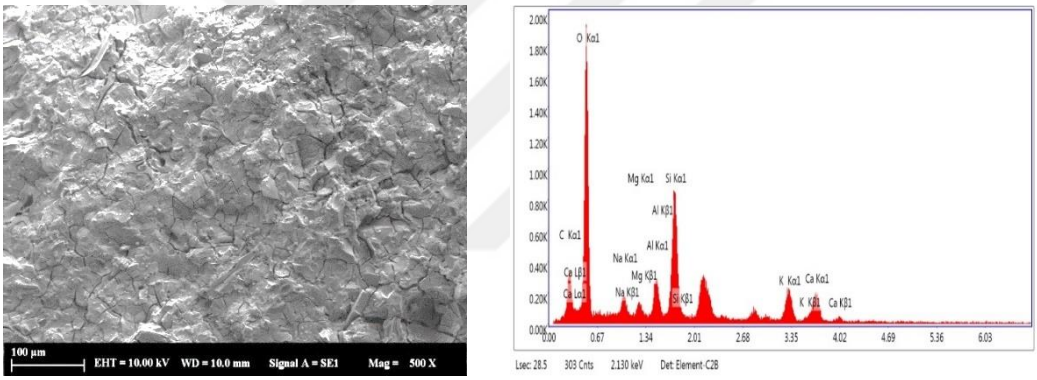
4.2.4.1 SEM-EDS Analizi

Deney serilerine ait SEM ve EDS analizi görüntüleri Şekil 4.12-4.14'te, EDS analizi sonuçları Tablo 4.7'de gösterilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde P80 deney serisinin diğer serilere kıyasla boşluklu, düzensiz ve heterojen bir yapıda yüzey dokusuna sahip olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan, P50 serisinin daha az boşluklu, daha düzenli ve homojen bir yüzey dokusuna sahip olduğu, ancak içyapıda yüksek fırın cürufuna bağlı olarak geliştiği düşünülen bazı mikro

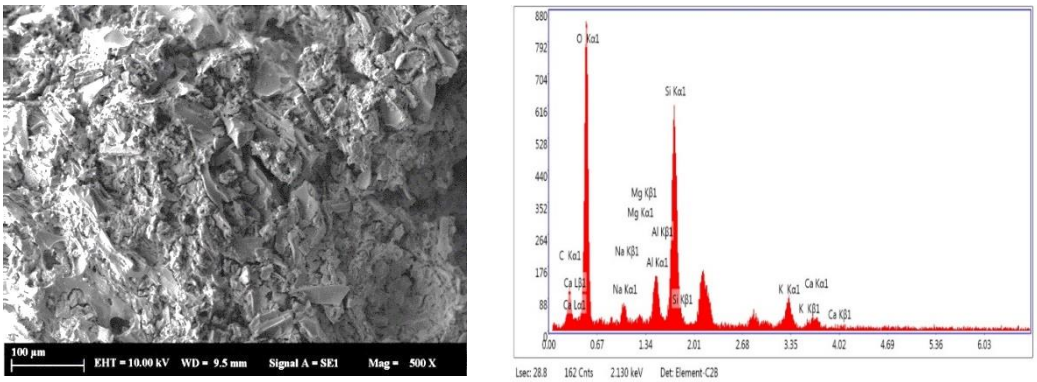
çatlakların oluştuğu tespit edilmiştir. Portland çimentolu referans seride (OPC) yapılan incelemede içyapının daha yoğun ve homojen olduğu görülmüştür.



Şekil 4.12 Portland çimentolu referans seriye ait SEM görüntüsü ve EDS analizi



Şekil 4.13 P50 deney serisine ait SEM görüntüsü ve EDS analizi



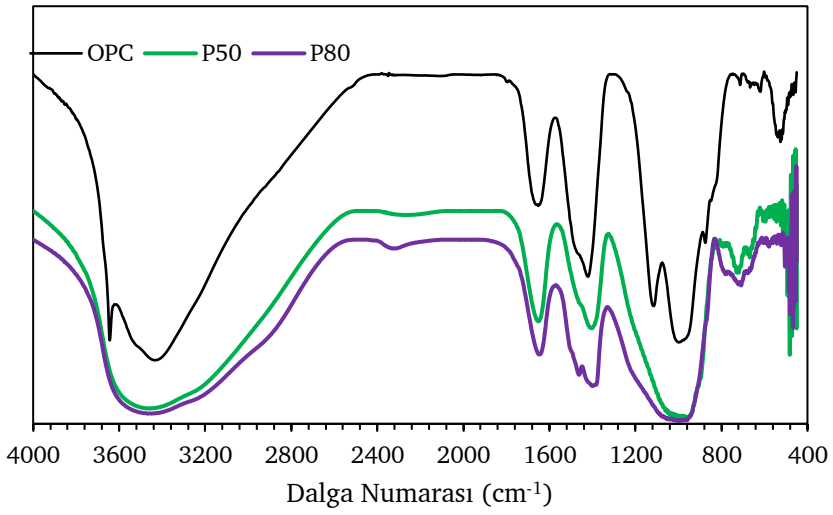
Şekil 4.14 P80 serisine ait SEM görüntüsü ve EDS analizi

EDS analizi sonuçlarına göre portland çimentolu seride daha ziyade kalsiyum (Ca) ve silisyum (Si) bazlı bileşiklerin baskın olduğu, ponza tozu ve yüksek fırın cürufu ile üretilen P50 ve P80 serilerinde ise kalsiyum (Ca) ve silisyum (Si) bazlı bileşiklerin yanı sıra alüminyum (Al) ve potasyumun (K) da bulunduğu belirlenmiştir. Ayrıca, ponza tozu miktarının artmasıyla silisyum (Si) miktarının arttığı, yüksek fırın cürufunun artmasıyla da kalsiyum (Ca) miktarının arttığı gözlemlenmiştir.

Tablo 4.7 Deney serilerine ait EDS analizi sonuçları

Seri Kodu	Ana Kimyasal Bileşenler (Atomik %)					
	NaK	MgK	AlK	SiK	KK	CaK
OPC	0,8	-	1,3	9,5	1,3	35,5
P80	0,8	0,1	4,7	23,7	7,0	3,2
P50	2,7	1,8	4,2	13,5	8,1	9,1

4.2.4.2 FT-IR Analizi



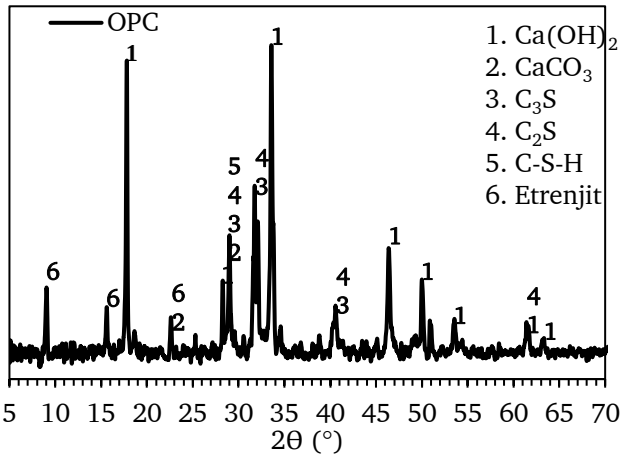
Şekil 4.15 Deney serilerine ait FT-IR analiz sonuçları

Deney serilerine ait FT-IR analizi sonuçları Şekil 4.15'te gösterilmiştir. Tüm deney serilerinde 966-1000 cm^{-1}, ~1400 cm^{-1} ve 1640-1670 cm^{-1} dalga boylarında benzer

pikler gözlenmiştir. 1640-1670 cm^{-1} dalga boyuna karşılık gelen pik tüm deney serilerinin esas olarak tipik özellikler gösteren bir polimerik yapının alüminosilikat bağları içerdiğini ve bu serilerdeki O-H bağlarının hidrasyon ürünlerinde absorbe edildiğini göstermektedir. 800-1200 cm^{-1} dalga boyları arasında olan titreşimler alkali aktivasyona bağlı olarak oluşan jelin gelişimini gösteren Si-O-T kimyasal bağları (buradaki T, alüminyum veya silisyumu temsil etmektedir) ile ilişkilidir. Deney serilerinin tümünde 1200-1500 cm^{-1} arasında bulunan dalga boyları ise O-C-O kimyasal bağlarının varlığını ifade etmekte ve karbonat bileşiklerinin oluştuğunu göstermektedir. Bütün bunlara ilaveten 715-775 cm^{-1} arasında bulunan dalga boylarının, Si-O-Si bağlarının simetrik gerilme titreşimini gösterdiği tespit edilmiştir. 916-1004 cm^{-1} arasında bulunan dalga boyları ise, tüm deney serilerimizde Si-O-Si veya Si-O-Al kimyasal bağlarının bulunduğunu göstermektedir.

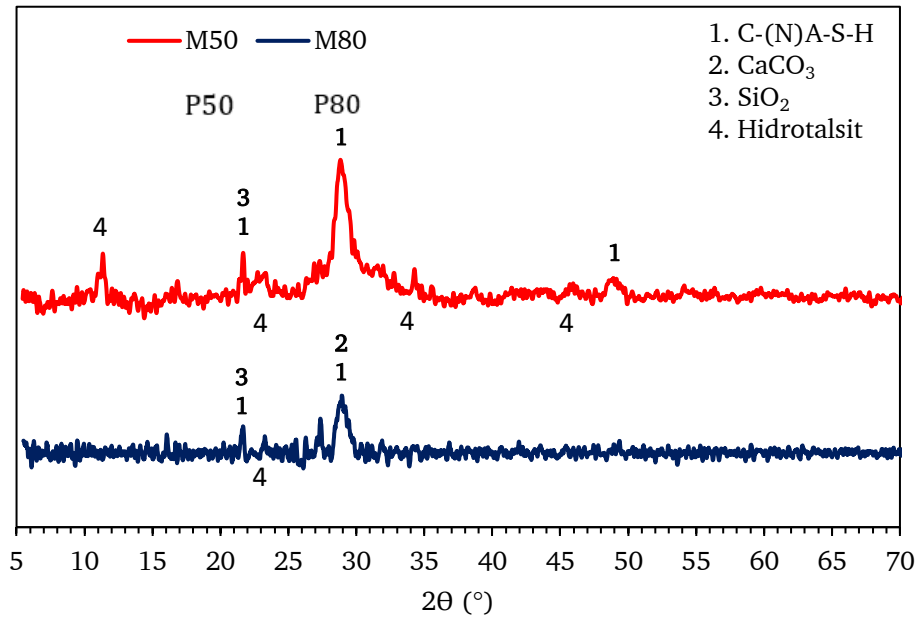
4.2.4.3 XRD Analizi

Deney serilerine ait XRD analizi sonuçları Şekil 4.16 ve 4.17'de verilmiştir. XRD analizleri değerlendirildiğinde portland çimentolu referans serinin diğer serilerle belirgin farklılıklar taşıdığı net biçimde görülmektedir. Hidrate OPC deney serisi, $Ca(OH)_2$, C-S-H ve etrenjit gibi hidrasyon ürünleri için tipik pikler göstermektedir. Ayrıca reaksiyona girmemiş C_2S, C_3S içerdiği görülmektedir.



Şekil 4.16 OPC deney serisine ait XRD analiz sonuçları

P80 ve P50 deney serilerine ait XRD spektrumları incelendiğinde C-(N)-A-S-H, Hidrotalsit, SiO_2 ve $CaCO_3$ gibi benzer bileşenler tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmamızda yapılan XRD analizleri sonucunda P80 ve P50 serilerinde referans seriden farklı olarak C-S-H jelinin alüminosilikat bileşikler içerdiği tespit edilmiştir. Bütün bunlara ek olarak P50 ve P80 deney serilerine ait spektrumlara bakıldığında alüminosilikat (Si-O-Al ağı) bileşiklerinin varlığı 33-34°'ye gelen piklerde görülmektedir. Bu durum P50 deney serisine ait spekturumda daha net belli olmaktadır.



Şekil 4.17 Alkaliler ile aktive edilmiş deney serilerine ait XRD analiz sonuçları

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Alkali ile aktive edilmiş doğal puzolanın fiziksel, mekanik ve içyapı özelliklerinin araştırıldığı bu çalışmada yapılan incelemeler önceki bölümlerde belirtildiği gibi 2 farklı fazda yapılmıştır. Tez kapsamında hamur fazda 14, harç fazda ise 7 farklı deney serisi oluşturulmuştur.

Hamur fazda yapılan çalışmalarda üretilen deney serilerinde alkali aktivatör olarak NaOH ve KOH kullanıl, her iki aktivatör ayrıca sodyum silikatle birleştirilerek deney serileri elde edilmiştir.

Çalışmanın harç fazında hamur serilerden elde edilen sonuçlar ışığında aktivatör olarak KOH ve sodyum silikat kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca üretilen bazı harç serilerinde doğal kumu farklı oranlarda ikame edecek şekilde ince ponza agregası kullanılmış, harcın fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir.

Bu çalışmada üretimi yapılan hamur ve harç deney serilerinden elde edilen sonuçlara göre;

- Hamur fazda yapılan çalışmalarda alkali aktivatör olarak KOH'nin NaOH'den gerek dayanım gerekse işlenebilirlik açısından daha iyi performans gösterdiği,
- Hamur fazdaki deney serilerinde kullanılan NaOH miktarının artmasıyla işlenebilirliğin azaldığı, diğer taraftan KOH miktarının artmasıyla işlenebilirliğin arttığı,
- Hamur fazda üretilen deney serilerinde NaOH molaritesinin 3 ve 7 günlük basınç dayanımı üzerinde önemli etkisinin olmadığı, 28 günlük basınç dayanımının ise 8 M NaOH kullanıldığında en yüksek değeri aldığı,
- Hamur serilerde KOH molaritesi 4'ten 6'ya arttıkça belirgin bir düşüş, 6'dan 8'e arttıkça ise bir miktar artış görüldüğü, en yüksek dayanımın KOH molaritesinin 4 olduğu serilerde gözlendiği, NaOH ile kıyaslandığında dayanım açısından çok belirgin bir farklılığın bulunmadığı,

- Sodyum silikatlı deney serilerinin genel olarak sodyum silikat içermeyen deney serilerinden daha iyi dayanım sergilediği ve ideal ss/aa oranının 1,0 olduğu,
- Basınç dayanımı sonuçları dikkate alındığında en iyi aktivatör kombinasyonunun 6 molar KOH ve ss/aa'nın 1 olduğu karışımla elde edildiği,
- Harç fazda üretilen deney serilerinde ponza tozu miktarının artması ile basınç dayanımının azaldığı, ponza agregasının doğal kum ile %50 oranına kadar ikame edilmesinin basınç dayanımında ciddi bir düşüşe neden olmadığı,
- Karışımdaki ponza tozu miktarının artması ile su emme oranı, etüv kurusu yoğunluk ve boşluk oranında önemli bir değişiklik olmadığı, ancak ısı iletkenlik katsayısının belirgin bir şekilde azaldığı,
- Ponza agregasının doğal kumla ikameli kullanıldığı serilerde yoğunluk ve ısı iletkenlik katsayılarının belirgin bir şekilde azaldığı,
- İç yapı analizleri artan YFC oranı ile birlikte daha az boşluklu ve yoğun bir yapının oluştuğunu, OPC ile kıyaslandığında reaksiyon ürünlerinin önemli farklılıklar içerdiği tespit edilmiştir.

Tez çalışması kapsamında ponza tozunun alkali aktivasyonda hammadde olarak kullanılabileceği, harcın ısı iletkenlik katsayısını önemli derecede azaltmasından dolayı özellikle yalıtım harcı olarak tercih edilebileceği düşünülmektedir. Sonraki çalışmalarda harcın dayanıklılık özelliklerinin araştırılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKÇA

[1] B. Singh, G. Ishwarya, M. Gupta ve S. K. Bhattacharyya, «Geopolymer Concrete: A Review Of Some Recent Developments,» *Construction And Materials,* no. 85, pp. 78-90, 2015.

[2] A. M. Rashad, «A Comprehensive Overview About The Influence Of Different Additives On The Properties Of Alkali-Activated Slag – A Guide For Civil Engineer,» Construction and Building Materials, no. 47, pp. 29-55, 2013.

[3] E. Gartner, «Industrially Interesting Approaches To "Low-CO_2" Cements,» Cement And Concrete Research, cilt XXXIV, no. 9, pp. 1489-1498, 2004.

[4] C. Shi, A. F. Jiménez ve A. Palomo, «New Cements For The 21st Century: The Pursuit Of An Alternative To Portland Cement,» Cement and Concrete Research, cilt XLI, no. 7, pp. 750-763, 2011.

[5] J. Davidovits, «Geopolymer Properties And Chemistry,» 1st European Conference on Soft Mineralurgy, Geopolymer 88, Compiegne, Fransa, 1988.

[6] A. Özodabaş ve K. Yılmaz, «Improvement Of The Performance Of Alkali Activated Blast Furnace Slagmortars With Very Finely Ground Pumice,» Construction and Building Materials, no. 48, pp. 26-34, 2013.

[7] A. T. Al Malkawi, S. Hamadna ve P. Soroushian, «One-Part Alkali Activated Cement Based Volcanic Pumice,» Construction and Building Materials, no. 152, pp. 367-374, 2017.

[8] M. M. Yadollahi, R. Demirboğa ve R. Polat, «Effect Of Heat Treatment Temperature On Ground Pumice Activation In Geopolymer Composites,» Science and Engineering of Composite Materials, cilt XXI, no. 3, pp. 377-382, 2014.

[9] A. Allahverdi, K. Mehrpour ve E. N. Kani, «Investigating The Possibility Of Utilizing Pumice-Type Natural Pozzonal In Production Of Geopolymer Cement,» Ceramics Silikaty, cilt LII, no. 1, pp. 16-23, 2008.

[10] M. J. Nadoushan, A. A. Ramezanianpour ve S. M. Kheriandish, «Mechanical And Durability Properties Of Alkali Activated Slag For Sustainable Concrete,» Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Las Vegas, 2016.

[11] M. Öztürk, «Pomza Ve Perlit İçerikli Hafif Betonun Fiziksel Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,» Tekirdağ, 2012.

[12] M. Pekdemir, «Hasankale Pasinler Pomzası İle Üretilen Betonların Bazı Mekanik Özelliklerinin Araştırılması,» Erzurum, 2011.

[13] R. Şahin, «Kocapınar Pomzası İle Üretilen Hafif Betonun Mukavemetinin Araştırılması,» Erzurum, 1996.

[14] M. M. Yadollahi, «Hasankale Pomzasından Alkali Aktivasyon Yöntemiyle Geopolimer Çimentosunun Üretilebilirliğinin Araştırılması,» Erzurum, 2013.

[15] G. D. Bahavsar, K. R. Talavia, D. P. Suthar, M. B. Amin ve A. A. Parmar, «Workabılıty Propertıes Of Geopolymer Concrete Usıng Accelerator And Sılıca Fume As An Admıxture,» International Journal For Technological Research In Engineering, cilt I, no. 8, pp. 541-544, 2014.

[16] C. D. Atiş, C. Bilim, Ö. Çelik ve O. Karahan, «Influence Of Activator On The Strength And Drying Shrinkage Of Alkali-Activated Slag Mortar,» Construction and Building Materials, cilt XXIII, no. 1, pp. 548-555, 2009.

[17] A. O. Pehlivan, «Effect Of Alkali Content And Activator Modulus On Mechanical Properties Of Alkali Activated Mortars,» Karaelmas Science and Engineering Journal, cilt X, no. 2, pp. 177-185, 2020.

[18] S. Aydın ve B. Baradan, «Effect Of Activator Type And Content On Properties Of Alkali-Activated Slag Mortars,» Composites Part B: Engineering, no. 57, pp. 166-172, 2014.

[19] M. U. Toprak, «Termik Santral Taban Küllerinden Alkali Aktivasyon İle Geopolimer Üretilmesi,» Eskişehir, 2011.

[20] D. Bondar, C. J. Lynsdale, N. B. Milestone, N. Hassani ve A. A. Ramezanianpour, «Effect Of Type, Form, And Dosage Of Activators On Strength Of Alkali-Activated Natural Pozzolans,» Cement and Concrete Composites, cilt XXXIII, no. 2, pp. 251-260, 2011.

[21] J. Davidovits ve D. Comrie, «Long Term Durability Of Hazardous Toxic And Nuclear Waste Disposals,» Geopolymer '88 First European Conference on Soft Mineralurgy, Compiègne, Fransa, 1988.

[22] J. Davidovits, D. C. Comrie, J. H. Paterson ve D. J. Ritcey, «Geopolymeric Concretes For Environmental Protection,» Concrete International, cilt XII, no. 7, pp. 30-40, 1990.

[23] S. M. A. El-Gamal ve S. Faten, «Utilization Of Some Industrial Wastes For Eco-friendly Cement Production,» Sustainable Materials and Technologies, no. 12, pp. 9-17, 2017.

[24] J. Davidovits, «Geopolymers: Inorganic Polymeric New Materials,» Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, cilt XXXVII, no. 8, pp. 1633-1656, 1991.

[25] V. Barbosa, K. J. MacKenzie ve C. Thaumaturgo, «Synthesis And Characterisation Of Materials Based On Inorganicpolymers Of Alumina And Silica: Sodium Polysialate Polymers,» International Journal of Inorganic Materials, cilt II, no. 4, pp. 309-317, 2000.

[26] H. Xu ve J. S. Van Deventer, «Microstructural Characterisation Of Geopolymers Synthesised From Kaolinite/Stilbite Mixtures Using XRD, MAS-NMR, SEM/EDX,TEM/EDX, And HREM,» Cement and Concrete Research, cilt XXXII, no. 11, pp. 1705-1716, 2002.

[27] S. Thokchom, P. Ghosh ve S. Ghosh, «Effect Of Na_2O Content On Durability Of Geopolymer Mortars In Sulphuric Acid,» Engineering and Technology International Journal of Civil and Environmental Engineering, cilt III, no. 3, pp. 193-198, 2009.

[28] J. L. Provis, «Alkali-Activated Materials,» Cement and Concrete Research, no. 114, pp. 40-48, 2018.

[29] F. Kantarcı, «Nano Silis, Mikro Silis Ve Polimer Katkılar İçeren Volkanik Tüf Esaslı Geopolimer Beton Üretimi Ve Özelliklerinin Araştırılması,» Malatya, 2018.

[30] A. A. Arslan, «Metakaolin Tabanlı Geopolimer Harçlara Farklı Kür Koşullarının Etkisinin İncelenmesi,» Balıkesir, 2019.

[31] A. Ü. Sağlık, «Alkali-Silica Reactivity And Activatıon Of Ground Perlite Containing Cementitious Mixtures,» Ankara, 2009.

[32] E. Eren, «Borik Asit Ve Borik Asit Atıklarının Uçucu Kül Ve Yüksek Fırın Cürufu Alkali Aktivasyonu Sürecine Etkilerinin Araştırılması,» İstanbul, 2018.

[33] F. P. Torgal, J. Labrincha, C. Leonelli, Á. Palomo ve P. Chindaprasirt, Dü, Handbook Of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes 1st Edition, Cambridge: Woodhead Publishing, 2014.

[34] P. Duxon, J. Provis ve A. F. Jiménez, «Geopolymer Technology: The Current State Of The Art,» Journal of Materials Science, cilt XLII, no. 9, pp. 2917-2933, 2007.

[35] J. Whiting, «Manufacture Of Cement». Amerika Birleşik Devletleri/Chicago Patent: 544,796, 1895.

[36] H. Kühl, «Slag Cement And Process Of Making The Same». Amerika Birleşik Devletleri Patent: 900,939, 13 Ekim 1908.

[37] Türk Standartları Enstitüsü, TS 25, Doğal Puzolan (Tras)-Çimento Ve Betonda Kullanılan-Tarifler, Gerekler Ve Uygunluk Kriterleri, Ankara: TSE, 2008.

[38] R. C. Mielenz, «Mineral Admixtures - History And Background,» Concrete International, cilt V, no. 8, pp. 34-42, 1983.

[39] D. Eren, «Puzolanların Puzolanik Aktivitelerinin Çimento Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi,» Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2018.

[40] T. Y. Erdoğan, «Sorular Ve Yanıtlarıyla Beton Malzemeleri,» İstanbul, 2004.

[41] U. Gündeşli, «Uçucu Kül, Silis Dumanı Ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton Ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması,» Adana, 2008.

[42] M. S. Gani, «Some Additives (Admixtures) Used In Mortar And Concrete,» Cement And Concrete, Victoria, CHAPMAN&HALL, 1997, pp. 82-89.

[43] M. Tokyay ve K. Erdoğdu, «Yüksek Fırın Cürufu,» Cüruflar Ve Cüruflu Çimentolar, Ankara, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, 2009, p. 9.

[44] F. Mazlum, «Pirinç Kabuğu Külünün Puzzolanik Özelikleri Ve Külün Çimento Harcının Dayanıklılığına Etkisi,» Fen bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1989.

[45] T. Kotan, «Pasinler – Demirdöven Pomzası İle Üretilen Hafif Betonların Mekanik Özelliklerine Atmosferik Basınçlı Buhar Kürünün Etkisi,» Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, 2009.

[46] Ş. G. Özkan ve G. Tuncer, «Ponza Madenciliğine Genel Bir Bakış,» Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, cilt VII, no. 2, pp. 269-276, 2001.

[47] A. Rittmann, Volcanoes, Londra: Orbis Publishing, 1976.

[48] M. Davraz, «Pomzanın Endrüstriyel Kullanım Alanları,» Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta, 2001.

[49] L. Gündüz, A. Sarıışık, B. Tozaçan, İ. Uğur ve O. Çankıran, Pomza Teknolojisi, Isparta: ISBAŞ, 1998.

[50] G. Eroğlu ve M. Şahiner, «Dünyada Ve Türkiye'de Pomza,» Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, Ankara, 2020.

[51] M. Sezgin, M. Davraz ve L. Gündüz, «Pomza Endüstrisine Sektörel Bakış,» Türkiye Pomza Sempozyumu ve Sergisi, Isparta, 2005.

[52] M. Dener, «Öğütülmüş Pomza Kullanılarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Lifli Betonlarda Yüksek Sıcaklık Etkisi,» Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2017.

[53] Bims Sanayicileri Derneği, «Bims (Pomza) Alt Sektör Raporu,» TOBB Türkiye Toprak Sanayi Meclisi, Ankara, 2006.

[54] T. Y. Erdoğan, Beton, Ankara: ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık, 2003.

[55] L. U. Spellman, «Granulated Blast Furnace Slag As A Material Admixture,» Concrete International, cilt IV, no. 7, pp. 66-71, 1 Temmuz 1982.

[56] R. N. Swamy, «Slags And Slag Cement,» Cement Replacement Materials (Concrete Technology & Design), R. N. Swamy, Dü., Guilford, Surrey University Press, 1986, pp. 73-99.

[57] Merck Millipore, «Potassium Hydroxide,» 17 Şubat 2021. [Çevrimiçi]. Available: https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/Potassium-hydroxide,MDA_CHEM-105033?bd=1#overview. [Erişildi: 5 Mayıs 2021].

[58] E. Luga, «Uçucu Kül Ve Yüksek Fırın Cürufu Jeopolimer Harçların Özellikleri,» Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 2015.

[59] Merck Millipore, «Sodium Hydroxide,» 24 Mart 2020. [Çevrimiçi]. Available: https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/Sodium-hydroxide,MDA_CHEM-106462?bd=1#overview. [Erişildi: 5 Mayıs 2021].

[60] M. T. Turan, «Farklı Lif Çeşitlerinin Ve Sodyum Silikat Solüsyonunun Alçı Malzeme Özelliklerine Etkisi,» Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, 2017.

[61] Merck Millipore, «Sodium Silicate Solution,» 13 Ekim 2016. [Çevrimiçi]. Available: https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/Sodium-silicate-solution,MDA_CHEM-105621?bd=1#overview. [Erişildi: 5 Mayıs 2021].

[62] İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü-JEOMER, «Isı İletim Katsayısı Ölçme Cihazı (KEM QTM 500),» 2021. [Çevrimiçi]. Available: https://geocen.iyte.edu.tr/isi-iletim-katsayisi-olcme-cihazi-kem-qtm-500/. [Erişildi: 12 Mayıs 2021].

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makale

1. N. Kabay, M. Mert, N. Miyan ve T. Ömür, «Pumice As Precursor In Geopolymer Paste And Mortar,» *Journal Of Civil Engineering And Construction,* cilt 10, no. 4, pp. 225-236, 2021.