



T.C.

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

BİLİMSEL ARAŞTIRMA PROJESİ

SONUÇ RAPORU

**AFYON VE KÜTAHYA YÖRESİ VOLKANİTLERİNİN ÇİMENTO
VE BETON TEKNOLOJİSİNDE DEĞERLENDİRİLMESİ**

PROJE YÜRÜTÜCÜSÜ: Doç. Dr. Cenk KARAKURT

ARAŞTIRMACILAR: Prof. Dr. Yaşar KİBİCİ

: Doç. Dr. Mehmet Uğur TOPRAK

BAŞLAMA TARİHİ: 15/02/2019

BİTİŞ TARİHİ: 16/02/2021

BİLECİK ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ

BİLECİK, 2021

Afyon ve Kütahya Yöresi Volkanitlerinin Çimento ve Beton Teknolojisinde Değerlendirilmesi

Proje Yürütücüsü: Doç. Dr. Cenk KARAKURT

Adresi: Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü

ÖZET

Betonun ana malzemesi olan çimentonun taşıdığı özellikler beton kalitesi ve performansı üzerinde önemli rol oynar. Dünyadaki bu üretim ve tüketim artışıyla birlikte çimento endüstrisinin çevreye verdiği zararda artmaktadır. Klinker üretimi sırasında kalsinasyon ve yanma sonucu ortaya çıkan zararlı CO₂ gazları en önemli çevre problemlerinden birisidir. Bu olumsuzluklar çimentoda klinker yerine puzolanik özeliğe sahip mineral katkı maddelerinin kullanımıyla azaltılabilir. Bununla birlikte özellikle olumsuz çevre koşullarının etkisinde kalan beton ve betonarme yapılarda zamanla kalıcılık sorunları oluşabilmektedir. Mineral katkılı çimentoların betonun kalıcılık performansı üzerine olumlu etkilerinin olduğu yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Afyon ili ve yakın çevresinde kalın seviyeler halinde yüzeylenen volkanik kayalardan alınan örneklerden yapılan mineralojik-petrografik incelemeler ve kimyasal analiz sonuçlarına göre bu bölgedeki volkanik kayaların ada yayı volkanizmasının bir ürünü olduğu belirlenmiştir. Elde edilen bulgularla, volkanik kayaları oluşturan volkanizma malzemelerinin, volkanik küllerden tamamen farklı mineralojik bileşime sahip olduğu ve farklı jenez koşullarında oluştuğu ortaya konmuştur. Önerilen çalışmada Afyon ve Kütahya il bölgesinde yapılacak saha çalışmalarından elde edilecek volkanitlerin mineralojik ve petrografik analizleri yapılarak çimento ve beton teknolojisinde kullanılabilirliği araştırılacaktır. Bu amaçla CEM I 42.5 R çimentosu yerine %10, 20 ve 30 oranlarında ikame edilecek farklı volkanik kökenli tuf ve kül katkılı çimentolar kullanılarak harç ve beton numuneleri üretilecektir. Bu numunelerin fiziksel, mekanik, kalıcılık ve içyapı analizleri yapılacak ve optimum karışım oranı belirlenecektir. Böylece ülke ekonomisine katkı verecek olan daha çevreci, ekonomik ve sürdürülebilir çimento üretimi mümkün olabilecektir.

Anahtar Kelimeler Volkanik kül, Volkanik tuf, Çimento, Beton, Fiziksel ve mekanik özellikler, Kalıcılık

Evaluation of the Volcanites in Afyon and Kütahya Region for the Cement and Concrete Technology

Principal Investigator: Assoc. Prof. Cenk KARAKURT

Address: Bilecik Şeyh Edebali University, Department of Civil Engineering

ABSTRACT

The properties of cement, the main material of concrete, play an important role on the quality and performance of concrete. With the increase in production and consumption in the world, the cement industry is increasing its damage to the environment. One of the most important environmental problems during the clinker production is the detrimental CO₂ gases caused by calcination and combustion. These disadvantages can be reduced by the use of mineral additives with pozzolanic properties instead of clinker in cement. In addition, durability problems may occur in concrete and reinforced concrete structures which are under the influence of adverse environmental conditions. It has been determined that mineral added cements have positive effects on the permanence performance of concrete. According to the mineralogical-petrographic surveys and chemical analysis results of volcanic rocks exposed in thick levels in Afyon province and its near vicinity, volcanic rocks in this region were determined as a product of island arc volcanism. The results show that the volcanic rocks forming volcanic rocks have a different mineralogical composition than the volcanic ashes and occur under different genesis conditions. In the proposed study, the mineralogical and petrographic analysis of the volcanics to be obtained from field studies in Afyon and Kütahya province will be investigated and their usability in cement and concrete technology will be investigated. For this purpose, mortar and concrete samples will be produced by using tuff and ash added cements with different volcanic origin to be replaced in 10, 20 and 30% instead of CEM I 42.5 R cement. Physical, mechanical, durability and microstructure analyzes of these specimens will be made and optimum mixing ratio will be determined. Thus, it will be possible to produce more environmentally friendly, economic and sustainable cement which will contribute to the economy of the country.

Keywords

Volcanic ash, Volcanic tuff, Cement, Concrete, Physical and mechanical properties, Durability

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	1
ABSTRACT.....	2
İÇİNDEKİLER.....	3
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	5
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	6
1. GİRİŞ.....	7
1.1. Doğal Puzolanlar.....	8
1.2. Bölgenin Jeolojisi.....	9
1.3. Betonda Kalıcılık Kavramı.....	10
1.3.1. Alkali-silis reaksiyonu (ASR).....	10
1.3.2. Betonda aşınma etkisi.....	11
1.3.3. Donma-çözülme etkisi.....	12
2. MALZEME VE YÖNTEM.....	12
2.1. Malzeme.....	12
2.2. Yöntem.....	13
3. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	16
3.1. Harçların Fiziksel ve Mekanik Deneyleri.....	16
3.2. Beton Tasarımları.....	19
3.3. Taze Beton Deneyleri.....	20
3.4. Sertleşmiş Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri.....	22
3.4.1. Birim ağırlık deney sonuçları.....	22
3.4.2. Basınç dayanımı deney sonuçları.....	23
3.5. Kalıcılık Deneyleri.....	24
3.5.1. Alkali silika reaksiyonu deney sonuçları.....	24
3.5.2. Aşınma deney sonuçları.....	27
3.5.3. Donma çözülme deney sonuçları.....	28
3.6. Mikroyapı İncelemeleri.....	29

4. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	30
5. KAYNAKLAR.....	32

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Afyon ve Kütahya bölgesi haritaları.....	9
Şekil 2.1. Volkanitlerin araştırma bölgesindeki temin alanları.....	13
Şekil 2.2. Terra rosa malzemesinin kalsinasyon ve öğütme süreçleri.....	14
Şekil 2.3. Tüf, terra rosa ve pomzanın öğütülüp elenmiş durumları.....	15
Şekil 2.4. Üretilen 40x40x160 mm ve 25x25x285 mm boyutlu harç numuneleri.....	16
Şekil 3.1. Sertleşmiş harç numuneleri ve basınç dayanımı deneyi sonrası numuneler	16
Şekil 3.2. Üretilen harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları.....	19
Şekil 3.3. Beton üretiminde kullanılan agregaların karışım granülometrisi.....	20
Şekil 3.4. Taze betonda çökme ve yayılma tablası deneyleri.....	21
Şekil 3.5. Sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanımları.....	23
Şekil 3.6. ASR numunelerindeki deney süreçleri.....	25
Şekil 3.7. Harç numunelerinin ASR deneyi sonundaki boy değişimleri.....	26
Şekil 3.8. Mikroyapı incelemelerinin yapıldığı SEM cihazı.....	27
Şekil 3.9. Mikroyapı analizleri a) Referans, b) PMZ20, c) TRS20 ve d) TUF20.....	30

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Malzemelerin fiziksel özellikleri	13
Çizelge 2.2. Harç numunelerinin karışım oranları.....	15
Çizelge 3.1. İki günlük sertleşmiş harç numunelerinin deney sonuçları.....	17
Çizelge 3.2. Yedi günlük sertleşmiş harç numunelerinin deney sonuçları.....	17
Çizelge 3.3. 28 günlük sertleşmiş harç numunelerinin deney sonuçları.....	18
Çizelge 3.4. 90 günlük sertleşmiş harç numunelerinin deney sonuçları.....	18
Çizelge 3.5. Beton karışım oranları (1 m ³).....	20
Çizelge 3.6. Taze beton işlenebilirlik deney sonuçları.....	21
Çizelge 3.7. Sertleşmiş beton numunelerinin birim ağırlıkları.....	22
Çizelge 3.8. Ağırlıkça ve hacimce aşınma kayıpları.....	27
Çizelge 3.9. Ağırlıkça ve hacimce donma çözülme kayıpları.....	28

1. GİRİŞ

İnşaat sektöründe geçmişten günümüze en yaygın kullanılan yapı malzemesi çimento ve betondur. Betonun üretiminin kolaylığı ve istenen mimari şekli kolaylıkla alması yapılarda öncelikle seçilmesindeki en önemli nedenlerdir. Betonun ana malzemesi olan çimentonun taşıdığı özellikler beton kalitesi ve performansı üzerinde önemli rol oynar. Çimentolar hem havada hem de suda sertleşebilmeleri nedeniyle hidrolik bağlayıcılardır. Portland çimento klinkerinin olağan üretim yönteminde, kalker ve silis içerikli hammaddeler uygun oranlarda karıştırılıp öğütüldükten sonra döner fırında 1450 °C sıcaklıkta pişirilerek klinker elde edilmektedir. Çimento üretiminin en maliyetli kısmı ise klinker üretimidir. Klinker üretimim için yüksek enerji gerekliliği çevresel ve ekonomik açıdan önemli sorunlara neden olmaktadır [1].

Katkılı çimentolar çevresel kazanımların dışında sürdürülebilir beton teknolojisi açısından da önemlidir [2]. Betonun zamanla etkisinde kalacağı olumsuz çevre koşulları çeşitli kalıcılık sorunlarına neden olmaktadır. Sülfatlı ve asitli sular çimentonun hidratasyonu sonucu oluşan Ca(OH)_2 ile reaksiyona girerek alçıtaşını ($\text{Ca(SO)}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ortaya çıkarırlar. Diğer yandan çimentonun C_3A bileşeniyle alçıtaşı kristalleri reaksiyonu sonucu daha zararlı etrenjit ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{Ca(SO)}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) oluşur. Fazla miktarda su içeren ve genişmeye yol açan bu ürün sonucu betonda çatlaklar ve hasarlar ortaya çıkar [3]. Betonu sülfat etkisinden korumanın bir yolu da mineral katkılı çimentolar kullanmaktır [4]. Mineral katkılar içinde fazla miktarda koloidal bileşikler, özellikle aktif silis bulunan malzemelerdir [5]. Çimento üretiminde kullanılan mineral katkılar, hidratasyon sonucu ortaya çıkan Ca(OH)_2 'yi bağlayarak hem dayanıma katkıda bulunur hemde betondaki kalıcılık sorunlarını önlerler [6]. Betonun kalıcı bir yapıda üretilmesiyle inşa edilen yapı, planlanan hizmet ömrü boyunca sorunsuz bir şekilde planlandığı şekilde kullanılabilir [7, 8].

Katkılı çimento, Portland çimentosuna göre çok daha az enerji tüketimi sağlaması ve bazı özelliklerinin getirdiği ilave katkılardan dolayı yapı sektöründe geniş bir kullanım alanına sahiptir. Beton uygulamalarında tras katkılı çimentoların kullanılması; betonun işlenebilirliğini arttırmak, geçirgenliği azaltmak, sülfat etkisine karşı dayanımı arttırmak, çatlamalara karşı dayanımı iyileştirmek, uzun dönemde dayanıklılığı arttırmak gibi çeşitli teknolojik avantajlar da sağlamaktadır [9].

1.1. Doğal Puzolanlar

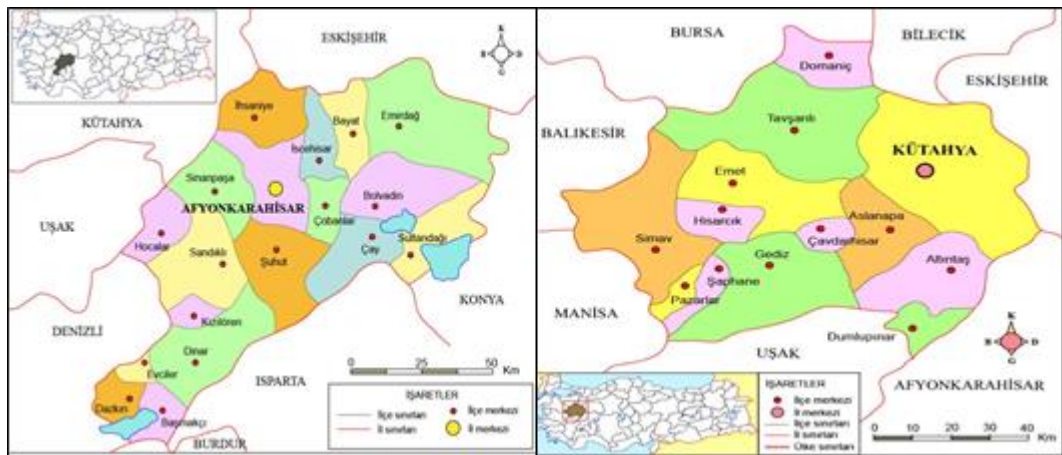
Genellikle doğal puzolanlar ülkemizde tras adıyla bilinmektedir. Ancak doğal puzolanlar kaynak ve yapısına göre farklı gruplarda sınıflandırılmaktadır. Doğal puzolanlar çeşitli sınıflandırmalara göre değerlendirilmektedir. Ancak en yaygın kabul gören sınıflandırma Massazza tarafından yapılan sınıflandırmadır. Piroklastik kayalar volkanik patlamalar sonucu atmosfere atılan erimiş magma parçacıklarından oluşur. Patlama sırasındaki ani basınç düşüşü sıvı magma içerisinde çözünmüş olan gazların ortaya çıkmasına neden olur. Çıkan gazların geride bıraktıkları boşluklar nedeniyle katılaştıran parçacıklarda mikro ve makro boyutta boşluklu yapı görülür. Katılaştıran parçacıkların atmosferde aniden soğuması nedeniyle oluşan camsı faz, volkanik kökenli kayalara puzolanik özellik kazandırır [10].

Klastik kayalar, kil ve diatomitli toprakların tortullaşmasıyla oluşan puzolanik malzemelerdir. Killer volkanik kayaların değişiminden oluşurken, diatomitli topraklar mikroorganizmaların silisli iskeletlerinin tatlı su yada deniz suyunda katmanlaşmasıyla oluşur. Her iki malzeme farklı kökenlerine karşılık suda birikir, dolayısıyla bu malzemeler doğada bir arada karışık bulunurlar. Yüksek oranda amorf silis içermesi ve yüksek özgül yüzeye sahip olmalarından dolayı diatomitli topraklar kirece karşı ileri derecede reaktiftir [10, 11]. Karışık kökenli kayalar (hibrit kayalar) ise birden çok şekilde oluşmuş puzolanları bir arada bulunduran mineral malzemelerden oluşmaktadır. Bu kapsama giren doğal puzolan yataklarında piroklastik, tortul ve organik kaynaklı yapılar katmanlar şeklinde bir arada olabilirler. Tüflerin kimyasal yapısı yöresel olarak farklılık gösterse de yakın içeriklere sahiplerdir. Tüflerin puzolanik aktivitesi yüksek sıcaklıkta kalsinasyon işlemi ile artırabilmektedir [12].

Çimento üretiminde katkı maddesi olarak tras adıyla kullanılan volkanik tüfler, çimentoların erken yaşlardaki dayanımlarını düşürmekle birlikte ileri yaşlarda puzolanik aktiviteyle birlikte dayanımı artırmaktadır. Ayrıca volkanik tüf kullanılarak üretilen katkılı çimentoların özgül ağırlıklarının, artan katkı oranıyla birlikte azaldığı belirlenmiştir [13].

1.2. Bölgenin Jeolojisi

Volkanik kayaçların, geçmişteki plaka hareketlerini belirlemedeki etkin rolleri ve ülkemizin son derece hareketli olan Alp Kuşağında yer alması nedeniyle Anadolu'daki volkanik kayaçlarda, son yıllarda çeşitli araştırmacılar tarafından çok sayıda jeokimyasal, petrografik ve jeokronolojik çalışmalar yapılmış ve Türkiye'nin jeodinamik evrimine ilişkin çeşitli görüşler öne sürülmüştür [14]. Ancak küçük alanlarda yapılan yersel çalışmaların çok sayıda olmalarına karşın, volkanik kayaçları büyük bir alanda bölgesel olarak ele alan geniş kapsamlı araştırmalar halen devam etmektedir. İç Batı Anadolu'da önemli bir yeri olan Afyon volkanitleri bölgede çok geniş alanlar kaplamaktadır (Şekil 1.1). Afyon civarında bulunan volkanik tüfler yapı taşı olarak kullanılabilme ve kolay kazılabilme özelliğine sahiptir. Sahada Paleozoyik ve Senozoyik (Neojen ve Kuvaterner) birimler yer almaktadır. Geniş bir alan kaplayan Senozoyik yaşlı oluşuklar genel olarak Neojen yaşlı birimler ile temsil edilmekte, Neojen çökelleri inceleme alanının tamamında, Paleozoyik kayaçlar üzerinde uyumsuz olarak görülmektedir. Paleozoyik birimler Afyon metamorfileri olarak isimlendirilmiştir. Şistler ve mermerlerden oluşmaktadır. Bu birim başlıca; muskovitbiyotit-kalkşist, kuvars şist, mermer albitklorit- muskovit-serizit şistlerden oluşmuştur. Neojen çökeller özelliklerine göre alttan üste doğru konglomera, kumtaşı seviyeleri, killi kireçtaşı, kumtaşı, volkanik cam, trakiandezitik volkanik kül, karbonat çimentolu tüfit seviyeleri mevcuttur. Ayrıca Neojen tabakaları arasında lav akıntıları görülmektedir. Sahada düz ovalar ve dere yatakları boyunca görülen alüvyonlar geniş alanlar kaplarlar. Bunların dışında yamaç molozları, birikinti konileri ile sıcak suların oluşturduğu travertenler genç çökeller olarak görülmektedir [15, 16].



Şekil 1.1. Afyon ve Kütahya bölgesi haritaları

Afyon yöresinde bulunan volkanik küllerin çimento üretiminde kullanılabilirliğinin saptanması amacıyla Ömer-Gecek bölgesinden alınacak volkanik küllerin deneylerde kullanılması amaçlanmıştır.

1.3. Betonda Kalıcılık Kavramı

Beton ve betonarme yapıların tasarımları, çoğunlukla inşaat mühendisleri tarafından durabilite diye adlandırılan kalıcılık kavramı dikkate alınmadan sadece betonun 28 günlük basınç dayanımı dikkate alınarak yapılagelmektedir. Betonun 28 günlük basınç dayanımını dikkate alan düşünce tarzı elbette güvenli yapı tasarımı ve hesaplamalar için betonun bu dayanımı tüm ömrü boyunca koruyacağı varsayılırsa dikkate alınması gereken bir unsurdur. Geçmiş yıllarda üretilen birçok betonarme yapı örneğinde yeterli 28 günlük basınç dayanımını sağlayan betonlar, zamanla etkisinde kaldıkları çevresel koşullar yada üretim aşamasında uygulanan kür koşullarının eksik ve yetersiz olması sonucu kalitelerini zamanla yitirebilmektedir [17].

Betonun üretimini izleyen hizmet ömrü süresince etkisinde kaldığı çevresel etkilere karşı gösterdiği direnç dayanıklılık olarak tanımlanır. Beton dayanıklılığı çevresel koşullar ve bünyesinde bulunan kimyasallar ile ilgili bir konudur. Çimentonun kimyasal özellikleri, betonun dayanıklılığı üzerinde önemli etkide bulunur [14]. Bununla birlikte ortamda su ve nemin varlığı beton içine zararlı maddeleri taşıyacağından kalıcılıkta önemli etkendir. Betonun içerisine sızan su, karbondioksit, oksijen, sülfat, asit, ve klor gibi maddeler, betonda değişik türlerdeki kimyasal olayların oluşmasına neden olmaktadır. Betonda yer alan kimyasal ve fiziksel olaylar sonucunda, beton daha boşluklu bir malzeme durumuna gelebilmekte, içerisindeki demir donatılar paslanabilmekte, beton aşınabilmekte ve betonun içerisinde çok büyük gerilmeler oluşabilmektedir [7]. Bütün bu kimyasal ve fiziksel olaylar betonun hasar görmesine ve beklenen hizmeti veremez duruma gelmesine yol açmaktadır.

1.3.1. Alkali-silis reaksiyonu (ASR)

Alkali-silis reaktivitesi (ASR) çimentodan kaynaklanan alkali oksitlerle reaktif silika formları içeren agregalar arasında oluşan ve betonda genleşme etkisi yaratan bir reaksiyondur. ASR basitçe iki aşamada gerçekleşir. Birinci aşamada alkalilerle reaktif silikaların birleşmesiyle ASR jel ürünleri oluşur ve daha sonra ikinci aşamada alkali-silis

jelleri ortamdaki nem ile birleşerek büyük oranlı genleşmeleri oluşturur. Oluşan bu genleşmeler de zamanla betonun çatlamasına ve bozulmasına neden olur [18]. ASR'ye neden olabilecek doğadaki reaktif silika mineraller opal, camsı silika, kalsedon, tridimit, kristobalit, kuvars olarak söylenebilir [5].

İçinde aktif silis bulunan ve ASR'ye yol açan agregaların kullanılması durumunda, bağlayıcı maddeye bir miktar puzolan ilave edilerek reaksiyon hızı azaltılabilmektedir. ASR nedeni ile oluşacak genleşmelerin önlenmesi için bağlayıcı maddelerin alkali içeriği düşük olmalı ve dış kaynaklardan betona alkali girişi önlenmelidir. Doğal puzolanlar, uçucu küller, yüksek fırın cürufu ve silis dumanı genleşen jel oluşmasını azaltmaktadır [19-21]. Puzolanların etkisi arayer sıvısındaki Ca(OH)_2 dengesini kurmak şeklinde ortaya çıkmaktadır ve ayrıca daha geçirimsiz beton elde etmede bu mineral katkıların çok büyük yararları vardır [22]. Konu ile ilgili yapılan çalışmalarda, düşük alkali içeriğine sahip puzolanların, yüksek alkali içeriğine sahip olanlara göre betondaki boşluk çözeltisindeki alkaliniteyi ve ASR sonucu oluşan genleşmeyi azaltmada daha etkili olduğu belirlenmiştir [23].

1.3.2. Betonda aşınma etkisi

Betonda fiziksel etkiler nedeniyle oluşan bozulmaya aşınma denir. Aşınma özellikle yollarda, hava alanlarında ve yapılardaki döşeme kaplamalarında ortaya çıkmaktadır. Aşınma konusunda yapılan birçok çalışmada betonun s/ç oranının aşınmaya karşı dayanıklılıkta önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Bununla birlikte betonun aşınma direnci üzerinde betonun boşluk yapısı da önemli rol oynar. Porozitesi düşük olan betonlarda aşınma etkilerine karşı direnç daha yüksek olmaktadır. Cabrera, Sadegzadeh, Gjorv, Naik gibi birçok araştırmacı özellikle betonun aşınma direnci üzerine çalışmalar yapmışlardır. Özetle aşınma direncinin ana temelde betonu dayanım karakteristiklerine, aşındırıcı etkiye maruz kalan yüzeyinin mikro yapısal özelliklerine, yüzeyin bitirilme yöntemine ve test yöntemine bağlı olduğu tespit edilmiştir. İlk olarak basınç dayanımıyla ilgilidir. Aralarındaki ilişki hiperbolik formda olduğunda korelasyon kuvvetlidir. Doğrusal ilişki kurulduğunda da küçük karışımlar için yeterli güvenilirliğe sahiptir [24]. Aşınma ve darbe etkileri, betona fiziksel yönden zarar verebilecek etkenlerdir. Beton kaplamadaki aşınma direnci, doğrudan doğruya agrega danelerinin yüklü taşıt tekerleklerinin aşındırıcı etkilerine karşı dayanıklılıklarının fonksiyonudur. Çimento harcında daha sert agrega

danelerinin varlığı, beton üzerindeki aşındırıcı etkileri azaltır. Aşınmaya yatkın yapı gösteren kalker gibi yumuşak taşların bulunduğunu bilerek, yol yüzeyi gibi aşındırıcı etkenlerin çok sık rastlandığı yerlerde kullanılacak betonların, aşınmaya karşı dirençlerinin önceden saptanmış olması gerekir [25].

1.3.3. Donma-çözülme etkisi

Donma- çözünme etkisi, soğuk iklim Sartlarında betonun durabilitesini etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Betonun içerisindeki suların tümü, açıktaki sular gibi 0 °C sıcaklıkta donmamaktadır. Betondaki suların bünyesinde eriyik olarak yer alabilen değişik tuzların etkisiyle bu sular 0 °C sıcaklıktan daha düşük sıcaklıklarda donmaktadırlar. Buza dönüşen suyun hacmi %9 kadar artmaktadır. Düşük sıcaklıklarda, betonun içerisindeki su, yavaş yavaş donmaya başlamaktadır. Kapiler boşluklar tamamen veya %91'den daha çok suyla dolu durumda olduklarında, donmanın başlaması ve suyun bir miktarının buza dönüşmesiyle ortaya çıkan hacim genişmesi, boşluklardaki henüz donmamış durumdaki su üzerinde hidrolik basınç yaratmaktadır ki; henüz donmamış durumdaki su, boşluklardan dışarıya itilmektedir. Boşluklardan dışarıya çıkmaya zorlanan su, boşlukların etrafındaki çimento hamurunun çatlamasına yol açacak büyüklükte gerilmeler yaratmaktadır [5]. Donma-çözülme olayı, fiziksel bir etkidir. Islanarak doymun duruma gelen ve donma-çözülme devirlerine maruz kalan bütün betonlar kısa sürede hasar görmektedirler. Park alanlarında, hava alanlarında, kaldırımlarda, yollarda kullanılan betonlar, bu tür hasara maruz kalabilecek betonlardır.

2. MALZEME VE YÖNTEM

2.1. Malzeme

Çalışmada agrega olarak Bilecik Dağ-İş Madencilik ocağından temin edilen üç farklı tane boyutuna sahip (0-4 mm, 4-11,2 mm ve 11,2-22,4 mm) kalker kökenli kırmataş agregaları kullanılmıştır. Çimento olarak Eskişehir Çimsa çimento fabrikası üretimi olan CEM I 42,5 R tipi Portland çimentosu kullanılmıştır. Mineral katkı olarak kullanılacak volkanitlerden tüf Afyon-Gecek kaplıcaları bölgesinden, terra rosa Kütahya-Çöğürler köyü ve pomza Kütahya Kumluyurt ve Göçeri köyleri arasındaki alandan saha çalışmalarıyla elde edilmiştir. Sahadan elde edilen malzemeler Şekil 2.1'de görülmektedir.



Şekil 2.1. Volkanitlerin araştırma bölgesindeki temin alanları

Beton karışım suyu olarak Bilecik şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Beton işlenebilirliğini düzenlemek için ise Polisan kimya üretimi olan sülfonat esaslı Süperton 278 S model kimyasal katkı kullanılmıştır. Kullanılan akışkanlaştırıcı katkı oranı sabit tutularak mineral katkı kullanımındaki değişimin beton işlenebilirliği üzerindeki etkileri belirlenmeye çalışılmıştır. Beton üretiminde kullanılan malzemelerin bazı fiziksel özellikleri Tablo 1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Malzemelerin fiziksel özellikleri

Malzeme	Özgül ağırlık	İncelik cm ² /gr
Çimento	3.06	3641
Terra Rosa	2.65	3354
Tuf	2.76	4854
Pomza	2.50	3891
Kırmataş agrega	2.63	-

2.2. Yöntem

Hammaddelerin bulunduğu alanları gösteren jeolojik haritalardan bölge tespiti yapıldıktan sonra sahada inceleme yapılarak hammaddeler yerinden küçük kayalar halinde toplanarak Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Yapı Malzemeleri Laboratuvarına getirilerek burada bulunan çeneli kırıcı ve bilyalı değirmen yardımıyla öğütülerek karışımlarda kullanılmıştır. Pomza ve tuf ilk olarak çeneli kırıcılarda 4 mm çaplı dane

boyutuna indirgenmiş ardından bilyalı değirmen ile çimento inceliğinde öğütülmüştür. Ardından öğütülen malzemeler 90 µm'lik elekten elendikten sonra kullanılmıştır. Terra rosa doğrudan beton karışımlarında kullanılmamış olup kil ve kireçtaşı kökenli olması nedeniyle kalsine olması amacıyla ilk olarak kül fırınında 40 dk süre ile 950°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Fırından alınan kalsine edilmiş malzeme üzerine hava üfleciyle soğuk hava üflenerek amorf yapı eldesi amacıyla ani soğuma etkisi sağlanmıştır. Çıkan ürün ardından bilyalı değirmende çimento inceliğinde öğütülmüştür (Şekil 3).



Şekil 2.2. Terra rosa malzemesinin kalsinasyon ve öğütme süreçleri

İncelemesi yapılan pomza, terra rosa ve tüfün kalıcılık üzerindeki etkileri deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Bu kapsamda ASTM C 1260 standartına uygun olarak üretilen harç çubukları (25x25x285 mm) üzerinde alkali silis reaktivitesi deneyleri yapılmıştır. Aşınma direnci özelliklerinin belirlenmesi için Böhme aşınma deneyi cihazı kullanılmıştır. Bu cihazın üzerinde 70 × 70 × 70 mm boyutlarındaki beton numuneleri 28 ve 90 gün sonunda deneye tabi tutularak aşınma davranışları belirlenmiştir. Yine betonun donma çözülme davranışı üzerine katkı kullanımının etkilerinin belirlenmesi için 28 ve 90 günlük beton numuneleri üzerinde donma çözülme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde 100 Çevrim yapılarak numunelerin donma çözülme deneyi sonundaki kütle kaybı ve dayanım kayıpları belirlenmiştir. Ayrıca beton numunelerinin iç yapılarındaki değişimleri SEM analizleri ile belirlenmiştir.

Yapılan çalışma döneminde harç ve beton numunelerinin tasarımları ve üretimleri gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla pomza, terra rosa ve volkanik tüf kullanılarak %10, %20 ve % 30 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek harç numuneleri tasarlanmıştır. Pomza ve tüf üretim öncesi bilyalı değirmende çimento inceliğinde öğütülerek ve 90 µm'lik elekten elenerek harç karışımlarında kullanılmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Tüf, terra rosa ve pomzanın öğütülüp elenmiş durumları

Terra rosa ise kül fırınında 900°C sıcaklıkta kalsine edildikten sonra öğütülüp elenerek kullanılmıştır. Üretilen harç numuneleri 3 gözlü çelik harç kalıplarında 40x40x160 mm ve 25x25x225 mm boyutlarında numuneler elde edilmesi için kalıplanmıştır. Harç numuneleri 24 saat süreyle laboratuvar ortamında kalıpta saklandıktan sonra kalıptan çıkarılarak kirece doymun standart kür havuzunda şartlandırılmışlardır. Aşağıda Çizelge 1’de 40x40x160 mm’lik harç numunelerinin karışım oranları verilmiştir. Alkali-silis reaktivitesi deneyi için ise karışım oranları ASTM C 1260 standardında belirtilen karışım oranlarına göre hazırlanmıştır.

Çizelge 2.2. Harç numunelerinin karışım oranları

Numune Adı	Çimento (gr)	Su (gr)	CEN Kumu (gr)
Referans	450	225	1350
PMZ10	405	225	1350
PMZ20	360	225	1350
PMZ30	315	225	1350
TRS10	405	225	1350
TRS20	360	225	1350
TRS30	315	225	1350
TUF10	405	225	1350
TUF20	360	225	1350
TUF30	315	225	1350

Numuneler üzerinde fiziksel ve mekanik deneylerin 2, 7, 28 ve 90 gün sonunda gerçekleştirilmesi planlanmıştır. Bu süreler sonunda sertleşmiş birim ağırlık ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Şekil 2.4.’de üretilen harç numuneleri görülmektedir.



Şekil 2.4. Üretilen 40x40x160 mm ve 25x25x285 mm boyutlu harç numuneleri

3. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

3.1. Harçların Fiziksel ve Mekanik Deneyleri

Sertleşmiş harç numuneleri deney zamanı geldiğinde havuzdan çıkarılmış ve bu numunelerin yüzeyleri havlu ile kurulandıktan sonra ağırlıkları ölçülmüştür. Sonrasında numunelerin boyutlarına göre hesaplanmış olan hacimlerine bu kütleler bölünerek sertleşmiş birim hacim ağırlıklar belirlenmiştir. Ardından eğilme presinde iki ayrı parçaya ayrılan numunelere 40x40 mm'lik kesitler üzerinde aksenal basınç dayanımı deneyi uygulanmıştır. Sertleşmiş harç numuneleri ve basınç deneyine tabi olmuş numunelerin görselleri Şekil 3.1'de sunulmuştur.



Şekil 3.1. Sertleşmiş harç numuneleri ve basınç dayanımı deneyi sonrası numuneler

Üretilen numunelerin 2, 7, 28 ve 90 günlük deney sonuçları Çizelge 3.1- 3.4'te verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan özellikle erken yaşlarda çimento yerine pomza, terra rosa ve tuf ile yer değiştirme yapıldığında mekanik özelliklerde yer değiştirme oranındaki artışla

birlikte dayanımların azaldıkları gözlenmiştir. Erken yaşlarda puzolanik reaksiyonun yeterli olmaması ile harcın içindeki çimento miktarındaki azalmanın bu sonuçlar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Çizelge 3.1. İki günlük sertleşmiş harç numunelerinin deney sonuçları

Numune Adı	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)
Referans	2.23	20,68
PMZ10	2.23	17,27
PMZ20	2.23	13,45
PMZ30	2.22	12,20
TRS10	2.22	16,27
TRS20	2.20	14,22
TRS30	2.18	12,09
TUF10	2.25	19,76
TUF20	2.24	15,40
TUF30	2.23	10,67

Çizelge 3.2. Yedi günlük sertleşmiş harç numunelerinin deney sonuçları

Numune Adı	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)
Referans	2.22	28.67
PMZ10	2.22	25.91
PMZ20	2.22	22.09
PMZ30	2.23	19.19
TRS10	2.22	24.38
TRS20	2.25	22.01
TRS30	2.23	21.23
TUF10	2.27	30.15
TUF20	2.27	22.51
TUF30	2.22	12.54

Karışımlarda tuf kullanımı nedeniyle kıvam kayıpları gözlenmiştir. Su emme miktarı fazla olan tuf harcın işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemiştir. Özellikle %30 oranında ikame yapılan TUF30 serisinde bu etkilenme daha fazla gelişmiştir.

Çizelge 3.3. 28 günlük sertleşmiş harç numunelerinin deney sonuçları

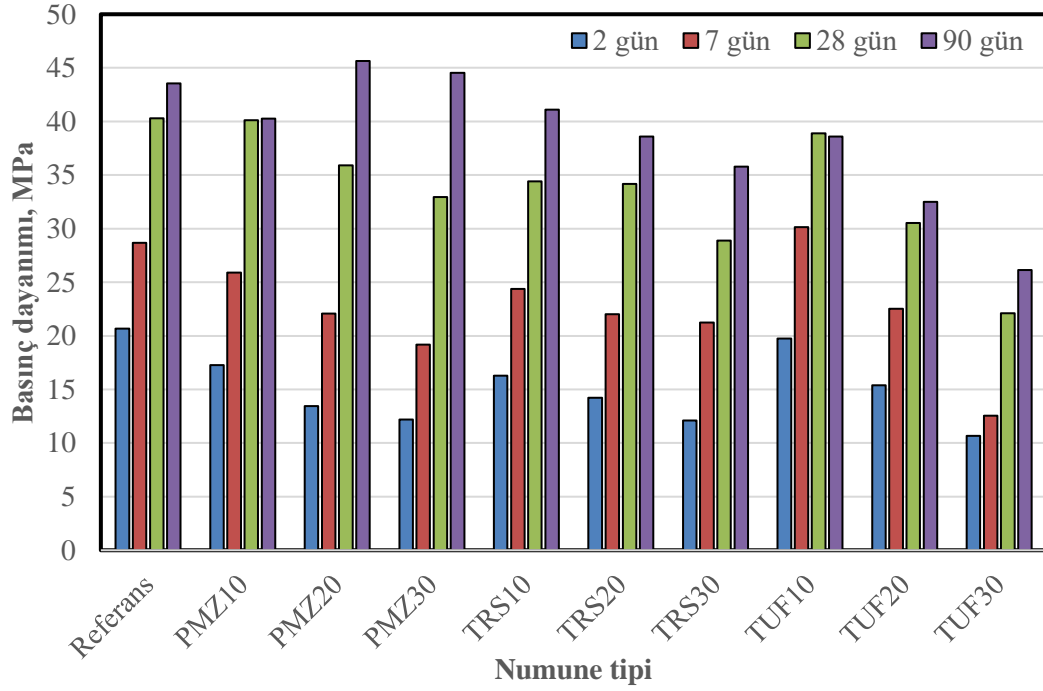
Numune Adı	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)
Referans	2.25	40.29
PMZ10	2.23	40.12
PMZ20	2.21	35.90
PMZ30	2.20	32.94
TRS10	2.23	34.42
TRS20	2.24	34.18
TRS30	2.25	28.89
TUF10	2.28	38.88
TUF20	2.27	30.54
TUF30	2.26	22.12

Çizelge 3.4. 90 günlük sertleşmiş harç numunelerinin deney sonuçları

Numune Adı	Birim Ağırlık (gr/cm ³)	Basınç Dayanımı (MPa)
Referans	2.30	43.56
PMZ10	2.30	40.25
PMZ20	2.27	45.63
PMZ30	2.25	44.53
TRS10	2.28	41.09
TRS20	2.24	38.59
TRS30	2.25	35.78
TUF10	2.29	38.60
TUF20	2.28	32.50
TUF30	2.26	26.15

Üretilen harç numunelerinin 2,7, 28 ve 90 günlük Basınç dayanımı deneyi sonuçları Şekil 3.2'de verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde pomza, Terrarossa ve tuf katkı oranlarının artmasıyla birlikte iki günlük numunelerin basınç dayanımı değerlerinin referans numunesine göre azaldıkları görülmüştür. Tuf numunesindeki o dayanım kaybı TUF30 serisi numuneden daha fazla olmuştur. Benzer davranış yedi günlük numunelerin dayanım sonuçlarından da görülmektedir. Yedi günlük numunelerde en iyi dayanım performansını TUF10 serisi numunede elde edildiği görülmüş olup bu değer referans numunesinin de üzerinde bir değere sahiptir. 28 günlük dayanımlarda ise %10 pomza ve %10 tuf katkılı numunelerin referans numunesine çok yakın değerler verdiği görülmüştür. Katı kullanım oranındaki artışla birlikte küf katkılı numunelerde yerleşme sorunlarına

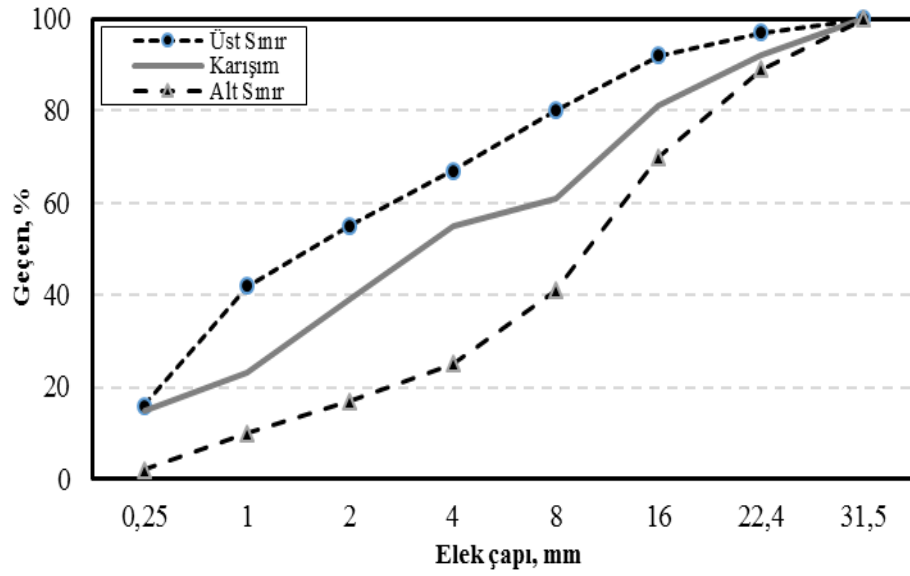
bağlı olarak dayanım kayıpları artmıştır. Pozolanik aktivitenin etkili olduğu 90 günlük numunelerde PMZ20 ve PMZ30 serisi numunelerin referans numunesinin üzerinde diğer katkı bileşenlerinin de üzerinde bir dayanım değerine ulaştıkları görülmüştür. Harç numunelerinde Terrarossa ve tuf katkısının pomza numunesi kadar dayanıma katkısı olmadığı görülmüştür.



Şekil 3.2. Üretilen harç numunelerinin basınç dayanımı sonuçları

3.2. Beton Tasarımları

Beton karışımında kullanılacak agregaların elek analizleri yapılarak karışım agrega granülometrisi belirlenerek Şekil 3.3'te sunulmuştur. İdeal agrega granülometrisinde TS 802 standardına uygun olarak beton karışım hesabı yapılmış olup 1m^3 beton için karışım oranları Çizelge 3.5'te sunulmuştur. Karışım oranlarına göre hazırlanan kuru karışım düşey eksenli laboratuvar tipi karıştırıcıda önce kuru sonra su ile katkının karışımı ile karıştırılarak homojen taze beton karışımları elde edilmiştir. Üretilen betona ilk olarak taze beton deneylerinden olan çökme ve yayılma tablası deneyleri yapılmıştır. Çökme deneyi TS EN 12350-2'ye göre yapılmıştır. Deney yapılacak numune 30 cm yükseklikli yarım koni kalıba 3 kademedeki yerleştirilmiştir. Her kademedeki 16 mm çaplı beton şişleme çubuğu ile 25 şişleme yapılmıştır. Ardından yarım koni kalıp çekilerek betondaki çökme değerleri not edilmiştir.



Şekil 3.3. Beton üretiminde kullanılan agregaların karışım granülometrisi

Çizelge 3.5. Beton karışım oranları (1m³)

Karışım	Çimento kg	Su kg	0-4 mm kg	4-11.2mm kg	11.2-22.4mm kg	K. katkı kg	Tüf kg	Pomza kg	T. rosa kg
Referans	330	170	1000	250	560	4.5	-	-	-
TÜF10	297	170	1000	250	560	4.5	33	-	-
TÜF 20	264	170	1000	250	560	4.5	66	-	-
TÜF 30	231	170	1000	250	560	4.5	99	-	-
PMZ 10	297	170	1000	250	560	4.5	-	33	-
PMZ 20	264	170	1000	250	560	4.5	-	66	-
PMZ 30	231	170	1000	250	560	4.5	-	99	-
TRS 10	297	170	1000	250	560	4.5	-	-	33
TRS 20	264	170	1000	250	560	4.5	-	-	66
TRS 30	231	170	1000	250	560	4.5	-	-	99

3.3. Taze Beton Deneyleri

Yayıma tablası deneyi TS EN 12350-5'e göre yapılmıştır. Taze beton standart yarım koni kalıba iki kademede kare kesitli özel tokmak ile yerleştirilmiştir. Ardından yarım koni kalıp çıkarılarak beton numunesine pimli levha üzerinde 15 kez 4 cm'lik düşü yapılarak deney sonunda yatay ve düşey doğrultuda ölçülen yayılma çaplarının ortalaması alınarak beton yayılma çapı sonuçları belirlenmiştir. Taze beton deneylerinin gerçekleştirilmesiyle ilgili görseller Şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4. Taze betonda çökme ve yayılma tablası deneyinin yapılışı

Karışım oranlarına uygun olarak hazırlanan beton karışımlarının işlenebilirlikleri çökme ve yayılma tablası deneyleri ile belirlenmiştir. Elde edilen deney sonuçları Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Taze beton işlenebilirlik deney sonuçları

Numune Adı	Çökme (mm)	Yayılma Tablası (mm)
Referans	100	370
PMZ10	80	370
PMZ20	80	360
PMZ30	60	340
TRS10	100	370
TRS20	100	400
TRS30	160	480
TUF10	40	220
TUF20	30	190
TUF30	10	190

İlgili sonuçlar incelendiğinde genel davranış olarak tuf ve pomza katkılı betonlarda işlenebilirliklerin hem çökme hem de yayılma tablası değerlerinde katkı kullanım oranındaki artışa bağlı olarak azaldıkları görülmüştür. Özellikle tufün ince gözenekli yapısı nedeniyle beton kıvamında ciddi azalmalar gözlenmiştir. Bu nedenle %20 üzerindeki oranlarda tuf kullanımında akışkanlaştırıcı katkı miktarının beton karışımında artırılması gerektiği düşünülmektedir. Kalsine edilmiş terra rosa ise beton işlenebilirliğinde olumsuz bir etkiye neden olmamıştır. Hatta bunun ötesinde TRS 30

karışımında beton işlenebilirliğinin %30 oranında iyileştiği görülmüştür. Bu etkinin altında ise kalsine terra rosa katkısının akışkanlaştırıcı katkı ile uyumlu çalışması ve taze betonun iç sürtünmesini azaltıcı yönde filler etkisinin rol oynadığı düşünülmektedir. Terra rosa kullanılan betonlarda yüksek işlenebilirlik oranı olduğundan, kendiliğinden yerleşen beton teknolojisinde toz malzeme olarak değerlendirilebileceği saptanmıştır.

3.4. Sertleşmiş Betonların Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

3.4.1. Birim ağırlık deney sonuçları

Taze beton deneyleri yapıldıktan sonra sertleşmiş beton deneylerinin yapılacağı numuneler 150 mm kesitli küp kalıplara yerleştirilerek laboratuvar koşullarında 24 saat süreyle kalıpta bekletilmiştir. Kalıptan çıkarılan sertleşmiş beton numuneleri $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıktaki kirece doymun kür havuzunda 2, 7, 28 ve 90 günlük numune yaşlarına ulaşana kadar bekletilmiştir. Kür süresi tamamlanan numuneler havuzdan çıkartıldıktan sonra yüzeyleri kurulanıp birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Sonrasında beton numunelerinin basınç dayanımları tek eksenli Çevik Makine markalı 200 ton kapasiteli basınç presinde ölçülmüştür. Sertleşmiş beton numunelerinin beton basınç dayanımı deneyi öncesinde 2, 7, 28 ve 90 gün sonundaki suya doymun halde sertleşmiş beton birim ağırlıkları Çizelge 3.7’de görülmektedir.

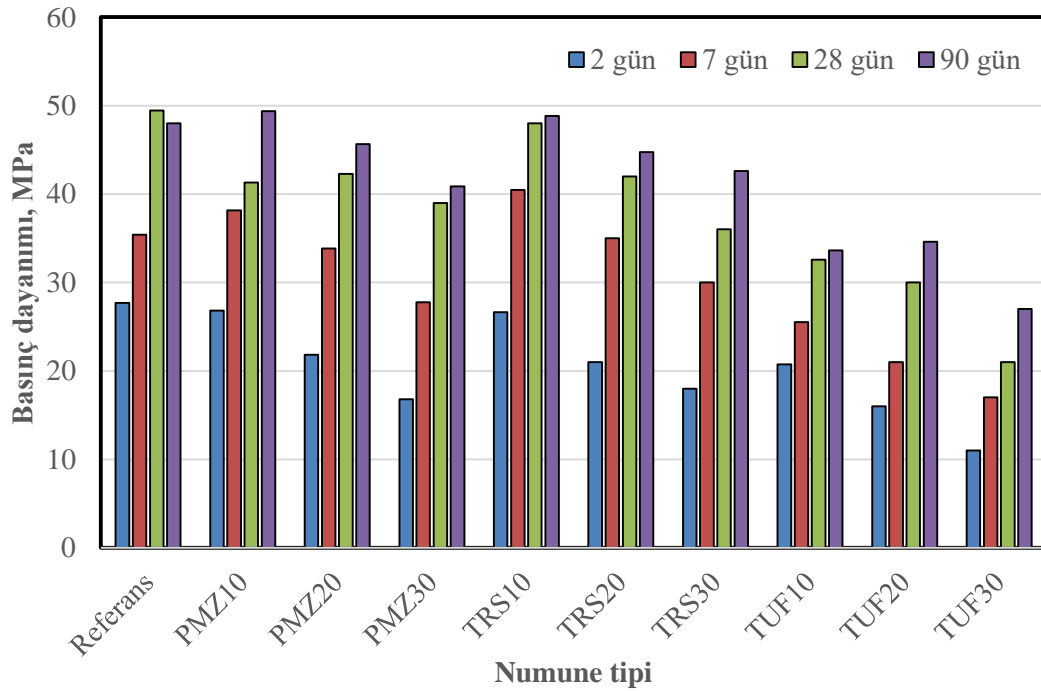
Çizelge 3.7. Sertleşmiş beton numunelerinin birim ağırlıkları

Karışım	Birim Ağırlık 2 gün gr/cm ³	Birim Ağırlık 7 gün gr/cm ³	Birim Ağırlık 28 gün gr/cm ³	Birim Ağırlık 90 gün gr/cm ³
Referans	2.40	2.41	2.40	2.41
PMZ10	2.40	2.39	2.36	2.40
PMZ20	2.38	2.38	2.37	2.39
PMZ30	2.37	2.38	2.36	2.37
TRS10	2.40	2.40	2.43	2.44
TRS20	2.36	2.38	2.40	2.34
TRS30	2.39	2.38	2.36	2.34
TUF10	2.35	2.34	2.33	2.32
TUF20	2.37	2.37	2.36	2.33
TUF30	2.37	2.37	2.36	2.31

Elde edilen sonuçlardan volkanik tuf katkılı beton numunelerinin her yaş için katkı oranındaki artışa bağlı olarak birim ağırlık değerlerinde azalma yönünde davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Bu kütle kaybı 90 günlük tuf numunelerinde %4.5 seviyelerine kadar ulaştığı görülmüştür. Volkanit katkılı beton karışımlarının birim ağırlıklarının azalmasında hem gözeneklilik hem de bu katkı malzemelerinin özgül ağırlıklarının çimentoya oranla daha düşük olması rol oynamıştır.

3.4.2. Basınç dayanımı deney sonuçları

Kür havuzunda deney gününe kadar standart koşullarda şartlandırılan beton numuneleri aksel basınç deneyine tabi tutulmuş olup elde edilen sonuçlar Şekil 3.5'te sunulmuştur. Erken yaş dayanım performansı incelendiğinde tüm katkı türlerinde basınç dayanımlarının referans numunesine göre %3.5 ile %60 arasında azaldıkları gözlemlenmiştir. Buradaki en yüksek dayanım kaybı tuf katkılı TUF30 numunesinde görülmüştür. İlk bir haftalık beton yaşı sonunda tuf katkılı numunelerin tümünde basınç dayanımları referans numunesinin altında kalırken pomza ve kalsine terra rosa katkılı numunelerde %10 ve %20 katkı oranlarında referans numunesinden daha yüksek dayanım değerleri elde edilmiştir.



Şekil 3.5. Sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanımları

Özellikle TRS 10 numunesinde referans numunesine göre %14 oranında daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Benzer davranış 28 günlük numunelerde de gözlenmiş olup bu yaşta en düşük dayanım performansını tuf katkılı numuneler göstermiştir. İleri yaş dayanım performansı açısından referans numunesine göre %10 katkılı PMZ 10 ve TRS 10 numuneleri referans numunesiyle neredeyse aynı dayanım değerini vermiştir. Pomza ve terra rosa katkılı betonlarda %30 oranına kadar katkı kullanımının ekonomik beton üretimine katkı vereceği düşünülmektedir.

Yukarıdaki veriler incelendiğinde referans numuneye oranla volkanit kullanılan betonlarda çok farklı basınç kayıpları oluşmamış olup olumlu konuşmak mümkündür. Özellikle terra rosa kullanılan betonlarda basınç dayanımlarının referans numuneden daha iyi sonuç verdiği açıkça gözükmemektedir. Pomza kullanılan betonların referans betona göre geç dayanım kazandığını söylemek mümkündür ancak ileri priz sürelerinde yüksek dayanımı yakaladığı gözlenmiştir. Çimento yerine kullanılacak olan bu volkanitlerin beton üretiminde kullanımıyla çimento tüketiminin azalması, bölge ekonomisine katkı, zaman ve işçilikten kazanç gibi kazanımların elde edilebileceği düşünülmektedir. Pomza ve tuf katkılı betonların yapı kütlelerinde azalmaya neden olmasının deprem kaynaklı zorlamaların etkilerinin azaltılabilmesine katkı sağlayacağı öngörülmüştür.

3.5. Kalıcılık Deneyleri

Sertleşmiş beton numuneleri üzerinde fiziksel ve mekanik deneyler gerçekleştirildikten sonra Afyon ve Kütahya yöresi volkanitlerinin beton kalıcılığı üzerine etkilerinin belirlenmesi sürecine geçilmiştir. Bu kapsamda ilgili standartlara uygun olarak hazırlanan harç ve beton numuneleri üzerinde alkali silika reaktivitesi, aşınma direnci ve donma çözülme direnci deneyleri yapılmıştır.

3.5.1. Alkali silika reaksiyonu deney sonuçları

Betonda alkali-silika (ASR) etkisini belirlemek için kullanılan deney yöntemleri agregalar ve harç örneklerinde yapılabilen deneyler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Harçlarda yapılan deneylerden olan ASTM C 227 deney yönteminin uzun zaman alması ve uygulamasının zor olmasından dolayı hızlı yöntemler daha kullanışlı olmaktadır. Deneysel çalışmalar kapsamında agrega olarak ASTM C 1260 standardına uygun olarak

reaktifliği bilinen kum karışımı kullanılmıştır [26]. ASTM C 1260'a göre 25x25x285 mm boyutlarında standart harç çubukları 0.47 s/ç oranında ve standartta verilen granülometride üretilmiştir. Harç çubukları neme doygun ortamda 24 saat süreyle kür edilmiştir. Daha sonra kalıplarından alınan numuneler 80±2 °C sıcaklıkta hazırlanan su banyosuna yerleştirilerek 24 saat süreyle ikinci bir küre bırakılmıştır. Üretilen harç çubuklarının görselleri aşağıda Şekil 3.6'da verilmiştir.



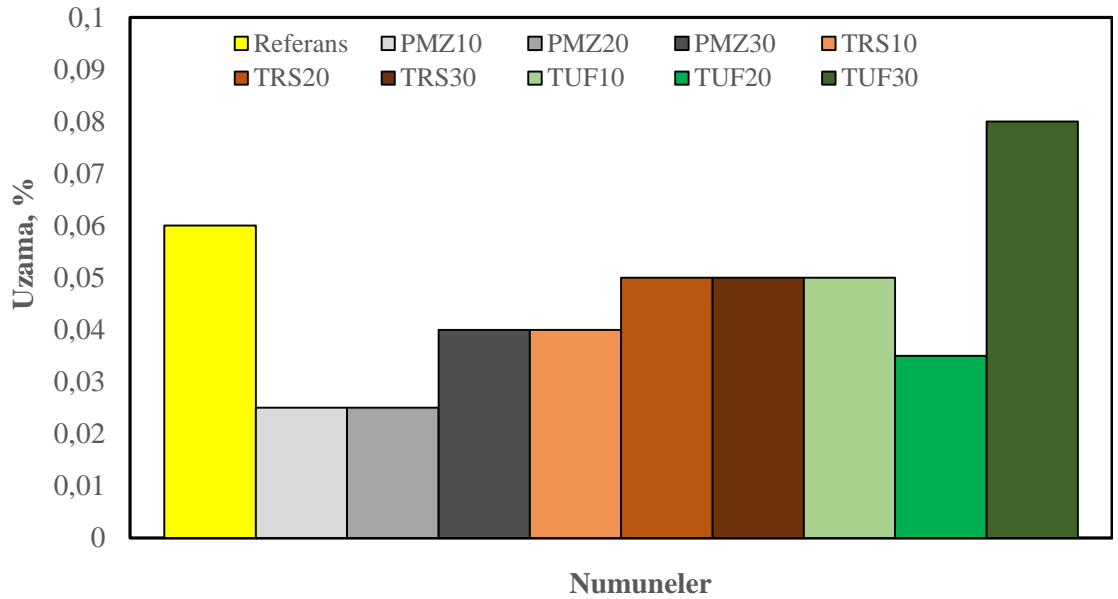
Şekil 3.6. ASR numunelerindeki deney süreçleri

Sıcak su banyosundan çıkarılan harç çubuklarının boyları 0.001 mm hassasiyetli komparatörde ilk okumaları yapılarak referans boyları belirlenmiştir. Sıfır okumaları yapılan harç çubukları daha sonra ağırlıkça %4 NaOH içeren 80±2 °C sıcaklıktaki çözelti banyosu içerisine konularak 14 gün süreyle saklanmıştır. NaOH çözeltisi içerisinde kür edilen harç çubukları üzerinde sırasıyla 4, 8 ve 14. günde komparatör okumaları yapılarak toplam 16 günlük deney periyodu tamamlanmıştır. Harç çubuklarının ortalama boy uzamaları yüzde cinsinden aşağıdaki ifadeyle hesaplanmıştır.

$$\Delta l = \frac{L_x - L_i}{L_g} \times 100$$

Burada; Δl = x yaşındaki % boy değişimi, L_x = x yaşındaki harç çubuğunun komparatör okuması, L_i = harç çubuğunun sıfır okuması L_g =nominal ölçü boyu (285 mm) olarak tanımlanmıştır. Deney süreci sonundaki değerlendirmede %0.10 veya daha az genleşme zararsız davranış, %0.10-0.20 arası potansiyel hasara yol açabilecek genleşme ve % 0.20'nin üzerinde ASR açısından zararlı genleşme söz konusudur.

Alkali silika reaksiyonu (ASR) deneyleri sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda şekil 3.7 de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan tüm numunelerin riskli bölgenin altında olduğu görülmüştür. Mineral katkı kullanımındaki artışa bağlı olarak volkanik tüf kullanılan numuneler dışındaki tüm serilerin genleşme değerlerinin referans numunesinin altında kaldıkları görülmüştür. Bu çerçevede değerlendirildiğinde en iyi ASR performansını pomza katkılı numunelerin verdikleri görülmüştür. Terrarossa ve tüf serilerinde ise %30 oranında tüf kullanılan TUF30 karışımının %0.08 oranında genleşme göstererek en yüksek genleşme değerini gösterdiği görülmüştür. ASR deney sonuçları genel olarak değerlendirildiğinden en iyi performansı pomza katkısının gösterdiği belirlenmiştir. Özellikle %20 oranında pomza Terrarossa ve tüf kullanımının ASR genleşmelerini azalttı tespit edilmiştir. Bu nedenle beton üretiminde %20 oranına kadar bu katkıların kullanımının alkali silika genleşmeleri üzerinde olumlu etki gösterebileceği düşünülmektedir.



Şekil 3.7. Harç numunelerinin ASR deneyi sonundaki boy değişimleri

3.5.2. Aşınma deney sonuçları

Betonda fiziksel etkiler nedeniyle oluşan bozulmaya aşınma denir. Aşınma özellikle yollarda, hava alanlarında ve yapılarıdaki döşeme kaplamalarında ortaya çıkmaktadır.

Aşınma konusunda yapılan birçok çalışmada betonun s/ç oranının aşınmaya karşı dayanıklılıkta önemli rol oynadığı belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan volkanitlerin betonun aşınma davranışı üzerine etkilerinin belirlenmesi için Böhme aşınma direnci deneyi yapılmış olup elde edilen sonuçlar aşağıda Çizelge 3.8 de verilmiştir. Aşınma deneyleri 70×70×70 mm boyutlarındaki küp beton numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.8. Ağırlıkça ve hacimce aşınma kayıpları

Numune Adı	Ağırlıkça aşınma %		Hacimce aşınma %	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
Referans	0.36	0.48	3.53	3.54
PMZ10	0.71	1.00	2.21	1.56
PMZ20	0.49	0.37	1.85	0.94
PMZ30	1.22	1.34	2.49	1.29
TRS10	2.91	1.05	3.24	1.79
TRS20	1.88	1.06	3.25	2.35
TRS30	1.29	1.06	1.18	2.40
TUF10	0.83	0.35	2.45	1.54
TUF20	1.57	0.58	3.85	2.91
TUF30	1.68	1.80	4.20	3.55

Aşınma deneyi sonuçları tablosu incelendiğinde katkı oranındaki artışa bağlı olarak özellikle %30 oranında aşınma kayıplarının hem 28 hem de 90 günlük numunelerde arttığı görülmüştür. Aşınma deneyi sonuçları tablosu incelendiğinde katkı oranındaki artışa bağlı olarak özellikle %30 oranında aşınma kayıplarının hem 28 hem de 90 günlük numunelerde arttığı görülmüştür. Aşınma davranışı açısından pomza ve tuf katkısının olumlu sonuçlar verdiği görülmüş olup pomzanın %20 tufün ise %10 oranında kullanılmasıyla aşınma kayıplarında azalma kazanımı elde edilmiştir.

3.5.3. Donma çözülme deney sonuçları

Donma çözülme etkisini incelemek için TS 3449'dan (1980) yararlanılmıştır. Laboratuvarında üretilen katkılı çimentoların donma-çözülme etkisinin belirlenmesi için 70x70x70 mm boyutlarında harç numuneleri üzerinde donma-çözülme deneyi yapılmıştır. Deney öncesi numuneler 28 ve 90 gün süreyle kirece doymun 20 °C sıcaklıktaki kür havuzunda saklanmıştır. Daha sonra suya doymun hale getirilen beton

numuneleri -20° ile 20°C sıcaklıklar arasında donma çözülme deneylerine tabi tutulmuştur. Bir donma-çözülme çevrimini oluşturan bu süreç 100 defa tekrarlanarak farklı volkanit katkılı betonların donma-çözülme direnci üzerindeki etkiler belirlenmiştir. Donma-çözülme deneyi sonunda hacim ve ağırlık kayıplarında oluşan değişimler belirlenmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Ağırlıkça ve hacimce donma çözülme kayıpları

Numune Adı	Ağırlık kaybı %		Hacim kaybı %	
	28 gün	90 gün	28 gün	90 gün
Referans	0.29	0.25	0.81	0.71
PMZ10	0.30	0.21	0.71	0.51
PMZ20	0.31	0.25	1.02	0.61
PMZ30	0.34	0.30	1.32	1.22
TRS10	0.23	0.23	0.71	0.82
TRS20	0.33	0.21	0.61	0.81
TRS30	0.41	0.37	0.60	0.70
TUF10	0.25	0.22	0.93	1.03
TUF20	0.25	0.17	0.63	0.83
TUF30	0.34	0.38	1.15	1.26

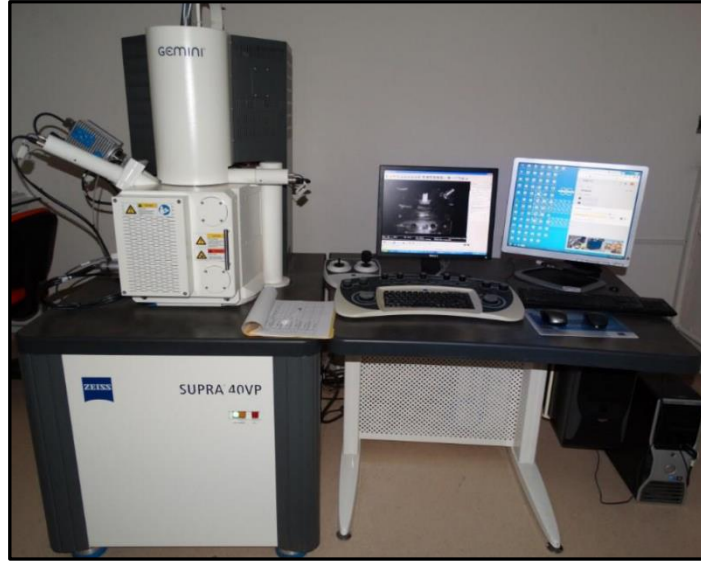
Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre terra rosa ve tuf kullanılan karışımlarda donma çözülme ağırlık kayıplarının azaldıkları tespit edilmiştir. Özellikle terra rosa ve tufün %10 ve %20 oranında kullanıldığı karışımlarda referans numunesine göre daha düşük donma çözülme kayıplarının olduğu gözlenmiştir. Hatta kullanımının %30’a çıktığı oranlarda ise donma çözülme direncinin azaldığı belirlenmiştir. Bu davranışların üzerinde bir çimento esaslı kompozitin içerisinde bulunan boşluk dağılımının etkin rol oynadığı düşünülmektedir.

3.6. Mikroyapı İncelemeleri

Beton karışımlarında volkanik tuf, terra rosa ve pomza kullanımının iç yapı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi için elektron mikroskobu (SEM) ile incelemeler yapılmıştır. Elektron mikroskoplarının çözme güçleri, odaklama derinlikleri ve büyütme oranları optik mikroskoplara göre çok daha fazladır. Bu nedenle deney numunelerinin kristal yüzeylerini daha iyi inceleyebilmek için SEM analizleri yapılmıştır. Özellikle ileri

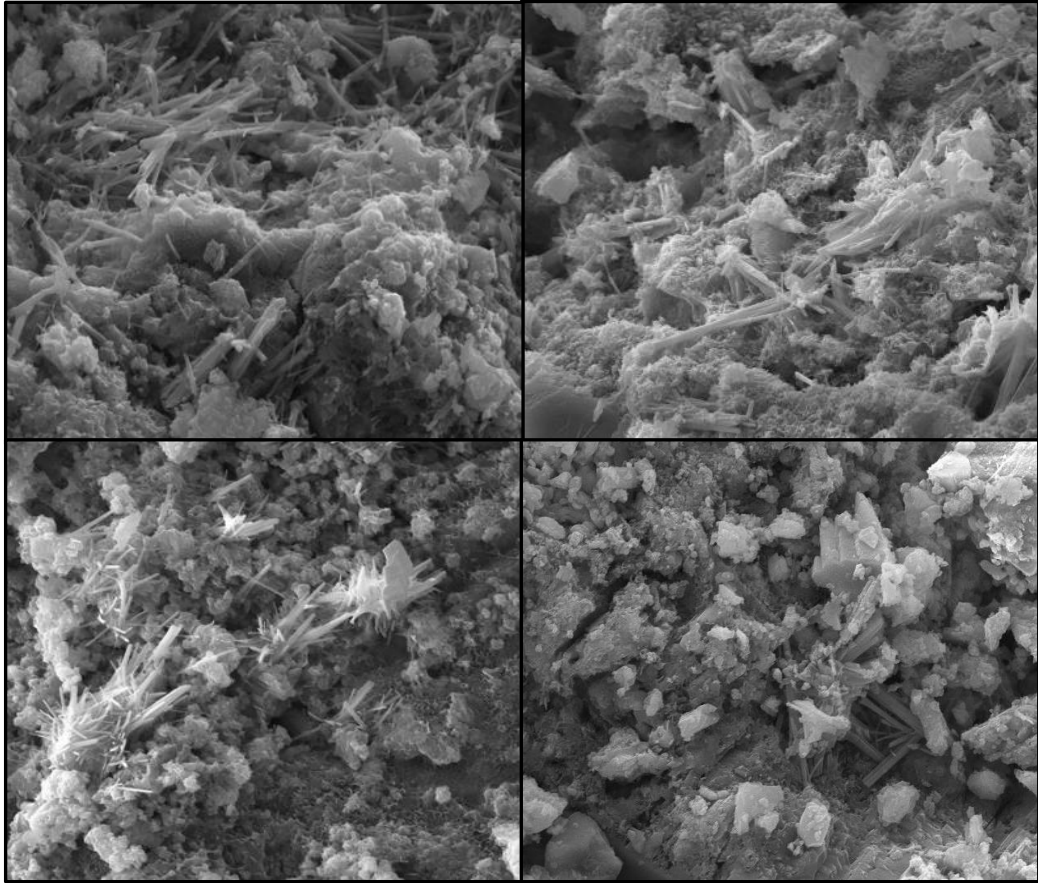
yaşlarda ortaya çıkan puzolanik reaksiyonların içyapıdaki değişime etkisini belirleyebilmek için, 90 gün süreyle kür edilmiş harç numuneleri üzerinde mikroyapı incelemelerinin yapılması uygun görülmüştür.

Çalışmada yapılan analizlerde Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarında bulunan ileri teknoloji ürünü ZEISS Supra 40 VP marka SEM cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.8). SEM analizine başlanmadan önce beton numunelerinden alınan yaklaşık 10 mm çapındaki kırık yüzeyler üzerinde yüzey kaplaması için ön işlem yapılmıştır. Numune kaplama işlemi kapalı argon gazı ortamında 0.2 mm Hg negatif basınç altında numune yüzeyinde yaklaşık 200 °A kalınlığında altın tabakasının kaplanmasıyla yapılmıştır.



Şekil 3.8. Mikroyapı incelemelerinin yapıldığı SEM cihazı

Aşağıda Şekil 3.9’da mikro incelemesi yapılan optimum katkı kullanım oranına sahip numunelerin 5000x büyütme sonucundaki iç yapı görselleri görülmektedir. İç yapılar incelendiğinde referans, pomza ve terra rosa katkılı numunelerin iç yapısındaki CSH yapısının daha sıkı olduğu, tuf katkılı numunede ise iç yapının daha boşluklu olduğu belirlenmiştir.



Şekil 3.9. Mikroyapı analizleri a) Referans, b) PMZ20, c) TRS20 ve d) TUF20

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yürütülen BAP projesi kapsamında yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sunulmuştur. Buna göre;

- Çökme deneyi sonuçlarından tuf katılan beton karışımlarının su emme oranının çok yüksek olduğu, bu nedenle kıvam kayıplarına yol açarak işlenebilirliğin %90'lara kadar azalmasına yol açtığı gözlemlenmiştir. Terra rosa kullanıldığında ise taze beton işlenebilirliğinin %60'a kadar arttığı saptanmıştır.

- Sarsma tablası deneyinden elde ettiğimiz sonuçlara göre terra rosa kullanım oranı arttıkça betonun akışkanlığının arttığı dolayısıyla işlenebilirliğin arttığını söylemek mümkündür. Pomza kullanılan betonlarda İşlenebilirliğin referans numuneye göre %15 azaldığı saptanmıştır.
- Birim hacim ağırlık deneyi sonuçlarına göre pomza kullanılan betonlarda betonda %2 kadar hafifleme gözlemlenmiştir. Tüf kullanılan betonlarda bu hafifleme %4'e kadar ulaşmıştır.
- Basınç dayanımları incelendiğinde, tüf katılan betonlarda referans numuneye oranla basınç dayanımlarının %40 düştüğü gözlemlenmiştir. Pomza kullanılan betonlarda erken yaşlarda dayanımların referans numuneyi yakalayamadığı ancak ileri yaş dayanımlarının puzolanik aktivite sonucu referans numuneye yakın çıktığı saptanmıştır. Terra rosa kullanılan betonlarda erken yaş dayanımlarının referans numuneye oranlar daha çabuk dayanım kazandığı gözlemlenmiştir. Basınç dayanımında olan değişim numunelerin sertleşmiş birim ağırlık değerleri ile orantılı olarak değişim gösterdiği görülmüştür.
- Alkali Silika reaksiyonu, donma çözülme ve aşınma davranışları değerlendirildiğinde %20 oranına kadar pomza, tüf ve terrarossa kullanımının beton kalıcılığı üzerinde olumlu etkilerinin olduğu belirlenmiştir.
- Kullanılan malzemelerin puzolanik aktivite sonucu referans numune dayanımlarının yakalandığı çimento yerine kullanılabileceği saptanmıştır. Dolayısıyla volkanitlerin kullanımının hem malzeme hem de işçilik maliyetleri yönünden kazanç sağlayacağı belirlenmiştir. Ayrıca doğal kaynakların kullanımı ile kalıcı ve sürdürülebilir bir beton üretiminin mümkün olacağı düşünülmektedir.
- Yapılan çalışmada kullanılan doğal malzemelerin beton teknolojisinde kullanılabileceği elde edilen olumlu sonuçlardan görülmektedir. Bu sebeple bu madenlerin işlenip öğütülerek ülke ekonomisine kazandırılması önerilmektedir.

5. KAYNAKLAR

- [1] Postacıoğlu, B., 1986, Beton-bağlayıcı maddeler, Matbaa Teknisyenleri Basımevi, Cilt 1, 175 s.
- [2] Collepardi, M., 2006, The new concrete, Grafiche Tintoretto, Italy, 421 p.
- [3] Aydın, S., Yazıcı, H., Yiđiter, H. ve Baradan, B., 2007, Sulfric acid resistance of high volume fly ash concrete. Building and Environment, 42, 717-721.
- [4] Camacho, R.E. and Afif, R.U., 2002, Importance of using the natural pozzolans on concrete durability, Cement and Concrete Research, 32, 1851-1858.
- [5] Erdogan, T. Y. 2003, Beton, ODTÜ Gelistirme Vakfi Yayıncılık ve İletisim A.S. Yayını, Ankara, s. 760.
- [6] Poon, C.S., Lam, L., Kou, S.C. and Lin, Z.S., 1999, A study on the hydration rate of natural zeolite blended cement pastes, Cement and Concrete Research, 13, 427-432.
- [7] Massazza, F., 1997, Pozzolans and durability of concrete, 1. International Symposium on Mineral Admixtures in Cement, İstanbul, 1-22.
- [8] Monterio, P.J.M., Wang, K., Sposito, G. and Santos, M.C., 1997, Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction, Cement and Concrete Research, 27, 1899-1909.
- [9] Camacho, R.E.R., Afif, R.U., 2002, Importance of Using the Natural Pozzolans on Concrete Durability, Cement and Concrete Research, Elsevier, 32:1851-1858.
- [10] Erdođdu, K., Tokyay, M. ve Türker, P., 2003, Traslar ve traslı çimentolar, Araştırmaların Gözden Geçirilmesi ve Durum Deđerlendirmesi Raporu, TÇMB Yayını, No. Y99.2, Ankara, 61 s.
- [11] Erdođan, T.Y., 1997, Admixtures for concrete, ODTU Geliřtirme Vakfi Yayını, 188 p.

- [12] Liebig, E. and Althaus, E., 1998, Pozzolan activity of volcanic tuff and suevite: effects of calcination, *Cement and Concrete Research*, 28, 567-575.
- [13] Çolak, A., 2002, The long term durability performance of gypsum-Portland cement-natural pozzolan blends, *Cement and Concrete Research*, 32, 109-115.
- [14] Dinç, D. 2014, Afyon yöresi volkanik küllerinin mineralojik ve kimyasal özellikleri ve küllerin yapı sektöründe kullanılabilirliği, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*, s. 139.
- [15] Kibici, Y., Uçar, A., Akçakoca, H., Dinç, D., Uz, V., Sarıışık, A. 2002, Afyon yöresi volkanitleri ve çimentoda kullanılabilirliği, *8.Uluslararası Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 77-88.
- [16] Kibici, Y., Dinç, D., Uçar, A. 2012, Afyonkarahisar yöresi volkanik kayaların mineralojik ve petrografik özellikleri, *Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 29, 53-70.
- [17] Aitcin, P.C., 2000, Cements of yesterday and today concrete of tomorrow, *Cement and Concrete Research*, 30, 1349-1359.
- [18] Bazant, Z.P., Zi, G. and Meyer, C., 2000, Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes, *Journal of Engineering Mechanics*, 126, 226-232.
- [19] Monterio, P.J.M., Wang, K., Sposito, G. and Santos, M.C., 1997, Influence of mineral admixtures on the alkali-aggregate reaction, *Cement and Concrete Research*, 27, 1899-1909.
- [20] Davraz, M. ve Gündüz, L., 2004, Doğal amorf silikanın alkali silika reaksiyonu gelişimine etkisi, *Beton 2004 Hazır Beton Kongresi*, 664-673.
- [21] Topçu, İ.B., Boğa, A.R and Bilir, T., 2008, Alkali-silica reactions of mortars produced by using waste glass as fine aggregate and admixtures such as fly ash and Li_2CO_3 , *Waste Management*, 28, 878-884.

- [22] Akman, M.S., 1999, Betonlarda alkali-silis reaksiyonunun fiziko-kimyası, hasar düzeyi, önlem ve onarım süreçleri, Sika Teknik Bülten, 4-7.
- [23] Duchesne, J. and Berube, M.A., 2001, Long-term effectiveness of supplementary cementing materials against alkali-silica reaction, Cement and Concrete Research, 31, 1057-1063.
- [24] Atiş, C. D. 2003, Abrasion-Porosity-Strength Model For Fly Ash Concrete, Journal of Materials In Civil Engineering, 7-8, 176-179.
- [25] Ađar, E. ve Taşdemir, Y., 2007. Silindir ile Sıkıştırılabilen Beton Yollar, THBB.
- [26] ASTM C 1260, 2007, Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar bar method), ASTM International.