

Uçucu Kül Esaslı Geopolimer Harçlara Diatomit İkamemesinin Isı İletkenliğe Etkisi Serhan İLKENTAPAR ^{*1}, Ezgi ÖRKLEMEZ ²

^{*1} Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ
² Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği, KAYSERİ

(Alınış / Received: 25.09.2020, Kabul / Accepted: 13.12.2020, Online Yayınlanma / Published Online: 25.12.2020)

Anahtar Kelimeler

Geopolimer harç
Uçucu kül
Diatomit
Isı iletkenlik
Sıcaklık kürü

Öz: Bu çalışmada F sınıfı uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara diatomit ikamesinin etkileri araştırılmıştır. Diatomit ikameli geopolimer harçların ısı iletkenlik katsayısı, ultrasonik geçiş hızı, yarmada çekme dayanımı ve birim ağırlık özellikleri incelenmiştir. Ayrıca geopolimer hamurların mikro yapısı üzerinde FESEM incelemeleri yapılmıştır. Çalışmada üretilen numunelerde ağırlıkça su/bağlayıcı oranı 0,31 ve kum/bağlayıcı oranı 3,0 olarak belirlenmiştir. Aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) seçilmiş olup, bağlayıcı malzemeye göre ağırlıkça %10 oranında Na⁺ içerecek şekilde kullanılmıştır. Karışımların hazırlanmasında uçucu küle ağırlıkça %1, %2, %3, %4 ve %5 oranlarında diatomit ikame edilmiştir. Üretilen geopolimer harçlar 90°C sıcaklıkta 24 saat sıcaklık kürüne tabii tutulmuştur. Sonuç olarak %1, %2, %3 oranında diatomit ikamesi, referans numuneye göre daha boşluksuz yapıda geopolimer oluşumunu sağlarken, %4 ve %5 oranında diatomit ikamesi daha boşluklu yapı oluşumuna sebep olmuştur. Buna paralel olarak en düşük ısı iletkenlik katsayısı %5 oranında diatomit ikamesi ile elde edilirken, en yüksek yarma dayanımı sonucu da %3 oranında diatomit ikamesi ile elde edilmiştir. Ayrıca diatomit ikameli geopolimer harçlarda ısı iletkenlik katsayısı ile ultrasonik geçiş hızı (R=0,9275), yarma dayanımı (R=0,9645) ve birim ağırlık **değeri (R=0,9327)** arasında yüksek oranda doğrusal ilişki olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

The Effect of Diatomite Addition on Fly Ash Based Geopolymer Mortars on Thermal Conductivity Values

Keywords

Geopolymer mortar
Fly ash
Diatomite
Thermal conductivity
Heat curing

Abstract: In this study, the effects of diatomite addition on F class fly ash based geopolymer mortars were investigated. Thermal conductivity coefficient, ultrasound transmission rate, split tensile strength and unit weight properties of diatomite addition geopolymer mortars were investigated. In addition, FESEM examinations were made on the microstructure of geopolymer paste. In the samples produced in the study, the water / binder ratio by weight was determined as 0.31 and the sand / binder ratio as 3.0. Sodium hydroxide (NaOH) was selected as the activator and used to contain 10 % by weight of Na⁺ relative to the binder material. Diatomite was replaced with binder by weight basis at the rations of 1%, 2%, 3%, 4% and 5% in the mixtures. The produced geopolymer mortars were head cured at 90°C in a furnace for 24 hours. As a result, diatomite addition at the rate of 1%, 2%, 3% provided the formation of a more compact geopolymer, while the diatomite substitution at 4% and 5% caused a more porous structure. In parallel, the lowest thermal conductivity coefficient was obtained with 5% diatomite addition, while the highest splitting strength was obtained with 3% diatomite substitution. In addition, it has been concluded that there is a high linear relationship between thermal conductivity coefficient and ultrasonic transmission speed (R = 0.9275), splitting strength (R = 0.9645) and unit weight (R = 0.9327) in diatomite addition geopolymer mortars.

*İlgili Yazar, email: serhan@erciyes.edu.tr

1. Giriş

Betona talep giderek artmasına rağmen betonun hammaddesi olan çimentonun üretimi, çevre kirliliğini arttırmakta ve çimentonun hammaddesi olan kalkerini azaltmaktadır [1]. Çimento üretilirken büyük miktarda

enerji ve hammaddeye ihtiyaç duyulmaktadır. Ayrıca çimento üretimi esnasında %5-8 oranında atmosfere sera gazı salınımı yapılmaktadır [2-4]. Klinker içermeyen çimento üretmek ya da kullanılan çimentoya mineral katkı malzemeleri kullanmak inşaat sektöründe CO₂ salınımını azaltmak için uygulanan yöntemlerden bazılarıdır [5-7]. Bunların dışında geopolimer sistemler yüksek basınç mukavemeti, yüksek sıcaklığa dayanımı ve düşük büzülme özellikleri ile Portland çimentosuna alternatif olarak görülmektedir [8]. Geopolimerler üç boyutlu alümina-silikat esaslı bir bağlayıcı olarak ilk defa Davidovits tarafından tanımlanmıştır. Geopolimerler katı haldeki alümina-silikat ve yüksek konsantrasyondaki sıvı alkali hidroksit veya silikat çözeltisinin reaksiyonu ile oluşmaktadır. Alümina-silikatlar güçlü alkali çözeltilerde hızlıca çözülerek serbest SiO₄ ve AlO₄ tetrahedral yapılarını oluşturur, reaksiyonun ilerlemesi ile SiO₄ ve AlO₄ tetrahedral yapıları oksijen (O) atomları ile bağ kurarak polimerik Si-O-Al bağını oluşturur. Geopolimerlerdeki bu reaksiyon polikondansasyon sonucu gerçekleşmekte ve geopolimerizasyon olarak tanımlanmaktadır [9,10].

Geopolimer üretiminde uçucu kül, granüle yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü, silis dumanı vb. endüstriyel atıkların kullanımı daha önceki çalışmalarda araştırılmıştır [11]. Araştırmacılar termik santrallerde kömürün yanması ile elde edilen, bir yan ürün olan uçucu külü geopolimer çalışmalarında kullanmışlardır [12-16]. Uçucu külün ana bileşenleri amorf silika ve alüminidir. Küresel yapıya sahip olan ve işlenebilirliği iyileştiren uçucu kül geopolimer üretimi için uygun şekil ve boyuttadır [17]. Ayrıca uçucu kül tabanlı geopolimer sistemlere yüksek oranda silis içeren farklı malzemelerin ikame edilmesi daha önce yapılan çalışmalar arasında yer almaktadır. Yüksek oranda silis içeren nano veya mikro boyuttaki malzemelerin geopolimer harçların dayanım ve durabilite özelliklerine etkileri önceki çalışmalarda araştırılmıştır [18-21]. Bunlardan farklı olarak yapısında yüksek oranda silis ihtiva eden diatomit, tek hücreli organizmalar olan diatomların silisli iskelet kalıntılardan oluşmaktadır. Diatomit yapısında alümina, demir oksit ve silika gibi daha birçok mineral içermektedir. Gözenekli yapısı, düşük maliyeti ve yüksek oranda silis içermesi gibi birçok avantajlara sahiptir. Ayrıca, seramik imalatında, ısı yalıtımında ve ağır metal iyonların giderilmesinde kullanılmaktadır [22, 24].

Thammarang vd. yapmış oldukları çalışmada geopolimer numuneler üretirken metakaoline ağırlıkça %5, %10, %15, %20 ve %25 oranında diatomit ikamesi yapmışlardır. NaOH ve Na₂SiO₃ çözeltisi ile aktive edilen geopolimerler 1.5x1.5x1.5 cm'lik küp numunelerde üretilmiş olup faz oluşumları incelenmiştir. Geopolimerlerin faz oluşumu XRD ve mikro yapıları SEM kullanılarak araştırılmıştır. 3, 7, 14, 21 ve 28 gün oda sıcaklığında kür uygulanan geopolimer numunelerin basınç dayanımlarına bakıldığında ağırlıkça %5 ile %10 aralığında diatomit içeren numunelerde diatomit miktarı arttıkça basınç dayanımının azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi ise numunede yüksek miktarda Si içeren diatomitin dozajının fazla olması ile açıklanmıştır. OH⁻ iyonlarının Al³⁺ iyonlarını tam olarak çözmede yetersiz kalması ve numunede zayıflayan artık hammadde bırakmasıyla basınç dayanımını düşürdüğü rapor edilmiştir [25]. Ayrıca Tokay vd. bir diğer yüksek gözenekliliğe sahip vermikülit geopolimer sistemlerde kullanmışlardır. Yapılan çalışmada yüksek gözenekliliğe sahip vermikülit uçucu kül tabanlı geopolimere ikame edilerek, geopolimer harçların ısı yalıtım artırılmıştır. Vermikülit kullanarak hafif, ısı ve ses yalıtımlı geopolimer harç üretilen çalışma sonucunda; ultrasonik geçiş hız değerlerini 1,84-3,0 km/s ve ısı iletkenlik katsayısı değerlerini 0,373-0,794 W/mk arasında elde etmişlerdir. Numunelerde boşluk oranı arttıkça basınç dayanımlarında azalmalar gözlemlenmiştir. Molarite arttıkça geopolimer harcın boşluk oranının azaldığı böylece ultrasonik geçiş hızının da arttığı belirtilmiştir. Vermikülit oranı yüksek olan numunelerin ısı iletkenlik katsayıları düşük çıkmıştır. Bunun sebebi ise vermikülit ikameli geopolimer harçların birim hacim ağırlıklarının daha düşük olduğu, daha boşluklu ve hafif bir yapı meydana getirerek ısı iletkenlik katsayı değerini azalttığı belirtilmiştir [26].

Bu çalışmada, geopolimer sistemlerde kısıtlı çalışma alanı bulunan yüksek gözenekliliğe sahip ve yüksek oranda silis içeren diatomitin F sınıfı uçucu küle ikamesi araştırılmıştır. Ana bağlayıcı olarak uçucu kül, ikame malzemesi olarak diatomit ve alkali aktivatör olarak NaOH kullanılıp, geopolimer harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen diatomitli geopolimer harçların ultrasonik geçiş hızına, ısı iletkenlik özelliklerine, yarmada çekme dayanımına ve birim ağırlıklarına etkileri incelenmiş olup geopolimer hamurlar üzerinde FESEM görüntülemesi yapılarak mikro yapısı incelenmiştir.

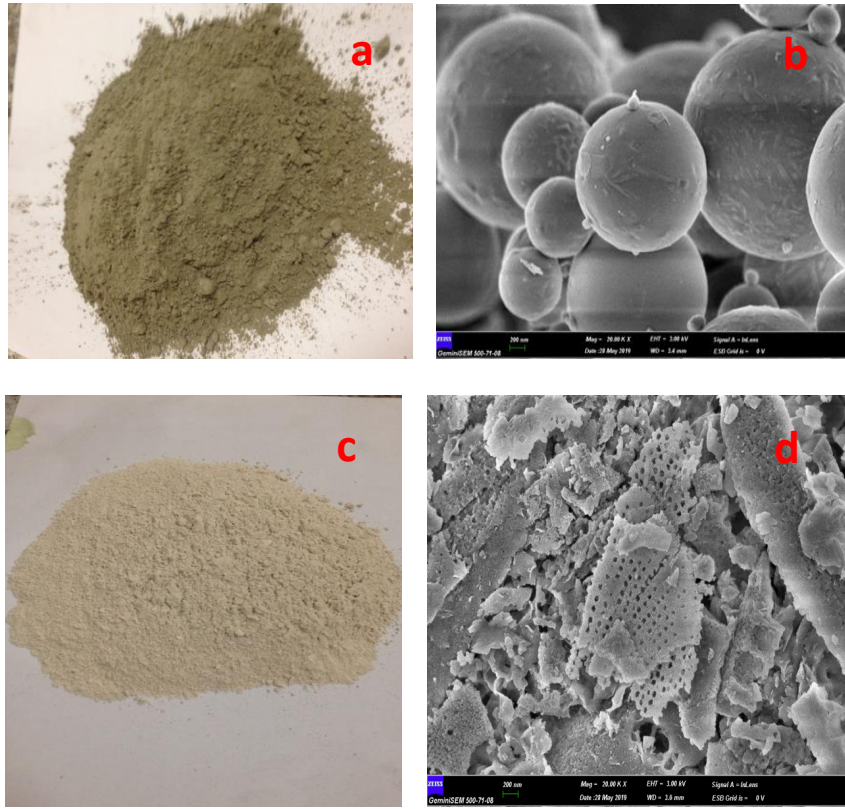
2. Materyal ve Metot

2.1.Uçucu kül ve diatomit

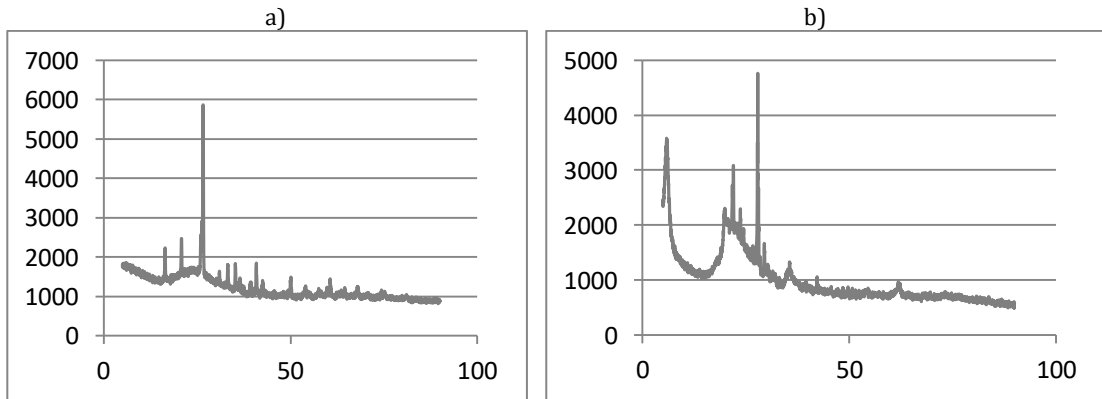
Bu çalışmada, Zonguldak Çatalağzı Termik Santrali F sınıfı uçucu külü kullanılmıştır. Uçucu kül tabanlı geopolimer harca ikame edilmek üzere kullanılan diatomit ise Kayseri Hırka diatomit yatağından temin edilmiştir. Bağlayıcı olarak kullanılan malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Erciyes Üniversitesi Teknoloji Araştırma ve Uygulama Merkezi (TAUM) tarafından belirlenmiştir. Bağlayıcı malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 1' de, FESEM görüntüleri Şekil 1'de ve minerolojik yapısına ait XRD grafikleri Şekil 2' de verilmiştir.

Tablo 1. Uçucu kül ve diatomitin kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri

Kimyasal Kompozisyon	Uçucu Kül	Diatomit
SiO ₂ (%)	51,70	73,60
Al ₂ O ₃ (%)	26,10	4,65
Fe ₂ O ₃ (%)	6,90	2,72
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ ≥ %70	84,7	80,97
K ₂ O (%)	4,55	0,26
Na ₂ O (%)	0,64	0,46
MgO (%)	1,69	1,03
CaO (%)	2,75	2,38
Kızdırma Kaybı (%)	4,40	7,4
Yoğunluk (kg/m ³)	2,13	1,32
BET Yüzey Alanı (m ² /g)	1,75	42,74



Şekil 1. a) Uçucu kül dış görünümü b) Uçucu kül 20000 kez büyütülmüş FESEM görüntüsü, c) Diatomit dış görünümü d) Diatomit 20000 kez büyütülmüş FESEM görüntüsü



Şekil 2. XRD grafikleri a)Uçucu kül, b)Diatomit

2.2. Standart kum

Çalışmada üretilen geopolimer harçlarda TS EN 196-1'e [27] uygun CEN standart kumu kullanılmıştır. Kullanılan standart kumun elek analizi sonuçları ve TS EN 196-1 sınır değerleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. CEN standart kumu elek analizi ve sınır değerleri

Özellik	Elek Çapı (mm)					
	2,00	1,60	1,00	0,50	0,16	0,08
Elek Üstü Kalan (%)	0,0	7,0	34,5	71,0	86,5	99,5
TS EN 196-1 Sınır Değerleri (%)	0	7±5	33±5	67±5	87±5	99±1

2.3. Aktivatör

Çalışmada alkali aktivatör olarak %97'den yüksek safılıkta olan NaOH kullanılmıştır. Tablo 3'de alkali aktivatörün kimyasal bileşimi verilmiştir.

Tablo 3. Alkali aktivatör kimyasal bileşimi

NaOH (%)	Na ₂ CO ₃ (%)	Cl (%)	Al (%)	Fe (%)	SO ₄ (%)
≥97	≤1	≤0.01	≤0.002	≤0.002	≤0.01

2.4. Su

Geopolimer harç karışımlarında şehir şebekesinden alınan içilebilir musluk suyu kullanılmıştır. TS EN 1008'de karışım suyu olarak içilebilir suların kullanımının uygun olduğu belirtilmektedir [28].

2.5. Deneysel çalışmalar

Deneysel çalışmalarda üretilen geopolimer kontrol harç numunelerinde F sınıfı uçucu kül, CEN standart kumu, NaOH ve şebeke suyu kullanılmıştır. Uçucu kül tabanlı geopolimer harca kütlece bağlayıcı oranının %1, %2, %3, %4 ve %5'i kadar diatomit ikamesi yapılmış ve toplam 6 grup harç karışımı hazırlanmıştır. Aktivatör olarak kullanılan NaOH'ın çözeltideki Na oranı bağlayıcı miktarının kütlece %10'u olacak şekilde ayarlanmıştır. Su/bağlayıcı oranı 0,31 ve kum/bağlayıcı oranı 3 olarak bütün harç karışımlarında sabit tutulmuştur. Tablo 4'de geopolimer harçların karışım oranları verilmiştir. Üretilen harç gruplarının tamamına 90°C sıcaklıkta 24 saat sıcaklık kürü uygulanmıştır. Ayrıca iç yapısı incelenecek olan uçucu kül tabanlı geopolimer hamurlara kütlece bağlayıcı oranının %1, %2, %3, %4 ve %5'i kadar diatomit ikamesi yapılmış ve yine toplam kontrol hamuruyla birlikte 6 grup hamur karışımı hazırlanmıştır. Hazırlanan hamur karışımlarının su/bağlayıcı oranı 0,31 olarak sabit tutulmuştur. Aktivatör olarak kullanılan NaOH'ın çözeltideki Na oranı bağlayıcı miktarının kütlece %10'u olacak şekilde kullanılmıştır. Üretilen hamur numunelerin tamamına 90°C sıcaklıkta 24 saat sıcaklık kürü uygulanmıştır.

Tablo 4. Geopolimer harçların karışım oranları

Numune Adı	Uçucu Kül (g)	Diatomit (g)	Kum (g)	NaOH (g)	Su (g)
D0	450	-	1350	80	140
D1	445,5	4,5	1350	80	140
D2	441	9,0	1350	80	140
D3	436,5	13,5	1350	80	140
D4	432	18,0	1350	80	140
D5	427,5	22,5	1350	80	140

2.5.1. Isı iletkenlik tayini

Çalışmada 15,5x14x4 cm boyutlarında 90°C sıcaklıkta 24 saat etüvde kür uygulanan kontrol ve %1, %2, %3, %4, %5 oranında diatomit ikamesi yapılan numunelerin ısıl geçirimsizlik katsayıları Şekil 3'de gösterilen Thermost markalı HFM-100 Heat Flow Meter modeli cihaz ile belirlenmiştir.



Şekil 3. Numunelerin ısı iletkenlik katsayılarının belirlenmesi

2.5.2. Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini

Çalışmada 40x40x160 mm boyutlarında 90°C sıcaklıkta 24 saat etüvde kür sürelerini tamamlayan kontrol ve %1, %2, %3, %4, %5 oranında diatomit ikamesi yapılan numunelere ultrasonik atımlı dalga hızları TS 12504-4 [29] standardına uygun olarak Şekil 4'de verilen Pundit (Portable Ultrasonic Non-destructive Digital Indicating Tester) adı verilen Proceq marka cihaz ile belirlenmiştir. Numunelerin ultrasonik atımlı dalga hızı ölçümleri 160 mm'lik boyları doğrultusunda yapılmıştır. Her bir harç karışımı için 3'er adet numune üzerinde ultrasonik atımlı dalga hızı testi ölçümü yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır. Ultrasonik atımlı dalga hızları aşağıdaki denklem (1) kullanılarak hesaplanmıştır.

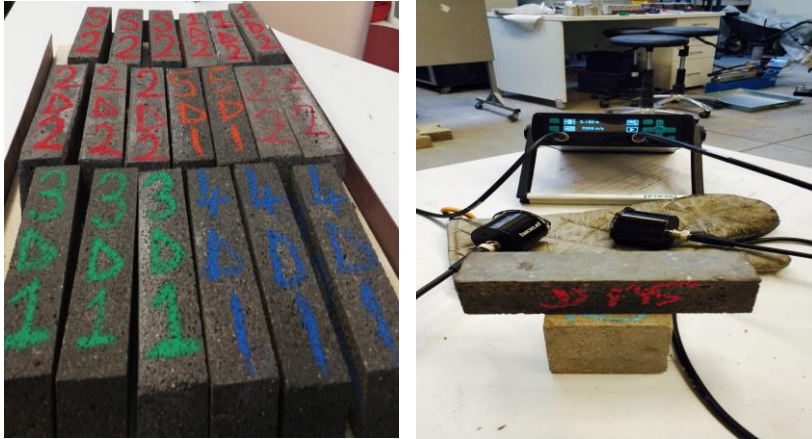
$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

Burada;

V: Ultrasonik hız, km/s

L: Geçiş uzunluğu, mm

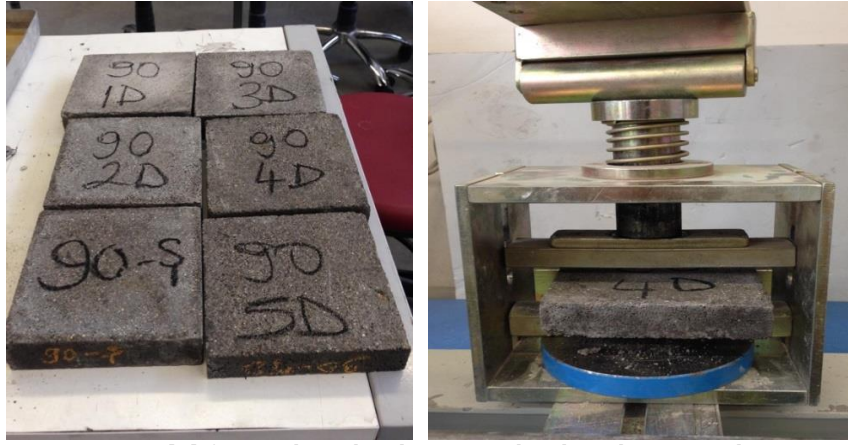
T: Geçiş zamanı, μ s



Şekil 4. Ultrasonik atımlı dalga hızı tayini

2.5.3. Yarmada çekme dayanımı

15,5x14x4 cm boyutlarında 90°C sıcaklıkta 24 saat etüvde kür uygulanan referans ve %1, %2, %3, %4, %5 oranında diatomit ikamesi yapılan numunelere TS 2824 [30] standardında belirtilen şartlara uygun olarak Şekil 5'de gösterildiği gibi test uygulanmıştır.



Şekil 5. Geopolimer harçlara yarmada çekme deneyi uygulaması

2.5.4. Birim ağırlık

Geopolimer harçlar 90°C'lik etüve 24 saatlik sıcaklık kürünü tamamladıktan sonra oda sıcaklığına gelinceye kadar soğuması beklenmiştir. Numunelerin havadaki ağırlıkları Arşimet terazisinde tartılarak etüv kurusu ağırlıkları belirlenmiş ve numunelerin hacmine bölünerek birim ağırlık değerleri hesaplanmıştır.

2.5.5. FESEM görüntüsü

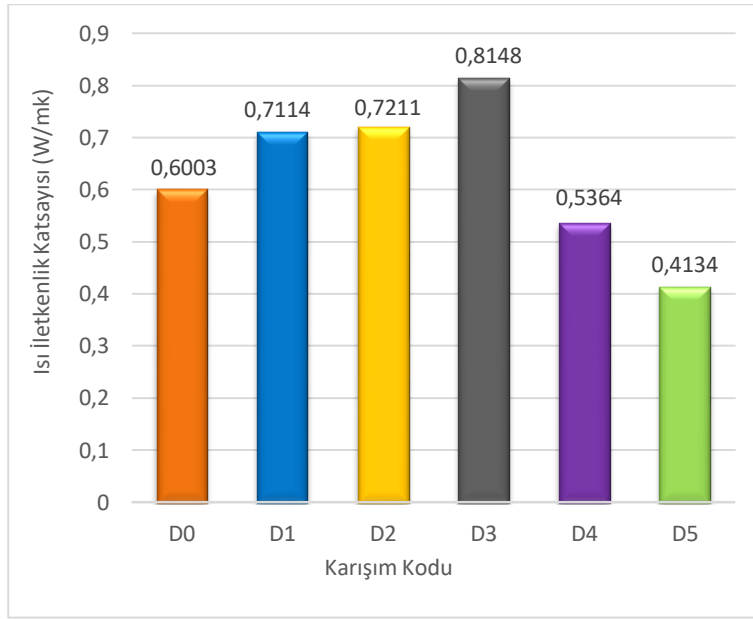
Çalışmada kontrol ve %1, %2, %3, %4, %5 oranında diatomit ikamesi yapılan hamur numunelerin mikro yapıları taramalı elektron mikroskobu (FESEM) ile incelenmiştir. 90°C sıcaklıkta 24 saat etüve kür edilen hamur numunelerden 10-15 mm kırık yüzey parçalar alınmış ve altın paladyum kaplaması yapılarak Şekil 6'da gösterilen Zeiss (GeminiSEM 500) marka cihaz kullanılarak kırık yüzey incelemesi yapılmıştır.



Şekil 6. FESEM incelemeleri

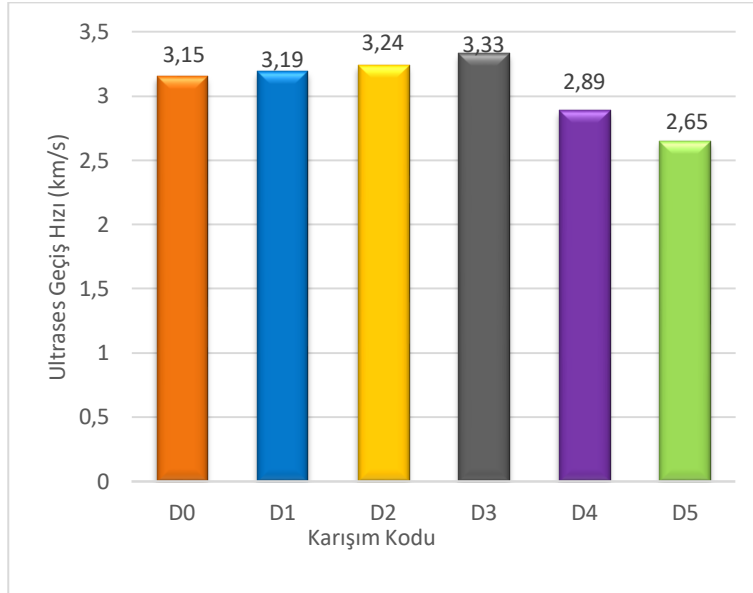
3. Bulgular

Geopolimer numunelerin ısı iletkenlik katsayıları değerlendirildiğinde %1, %2 ve %3 oranında diatomit ikame edilen harçlarda (D1, D2 ve D3) ısı iletkenlik katsayılarının referans numuneye (D0) göre arttığı, %4 ve %5 oranında diatomit ikamesi yapılan harçlarda (D4 ve D5) ise ısı iletkenlik katsayılarının referans numuneye göre azaldığı Şekil 7'de gösterilmiştir. % 5 oranında diatomit ikamesi ısı iletkenlik katsayısını 0,4134 W/mk değerine kadar düşürmüş olup en fazla katkıyı sağlamıştır. % 4 ve %5 diatomit ikamesinin ısı iletkenlik katsayısını azaltması, hem diatomitin gözenekli yapısının (BET yüzey alanı 42,74 m²/g) uçucu küle (BET yüzey alanı 1,75 m²/g) göre çok fazla olmasıyla hem de fazla miktarda diatomitin topaklanmasının geopolimer harçlarda boşluklu yapı oluşumunu sağlamasıyla açıklanabilir. Şekil 14'de FESEM görüntülerinde gösterildiği üzere % 10 Na konsantrasyonunda yeterli miktarda çözünemeyen ve reaksiyona giremeyen diatomit taneleri bu boşluklu yapıyı desteklemiştir. %1, %2, % 3 oranında diatomit ikamesinin %10 Na oranında 90°C de 24 saat kür edilmesi ile yüksek oranda reaktif silis içeren diatomitin yapısındaki silisin çözülüp NASH jelini desteklediği görülmüştür. Bu sayede daha boşluksuz bir yapı oluşturmuş olup ısı iletkenlik katsayısını referans numuneye göre artırmıştır.

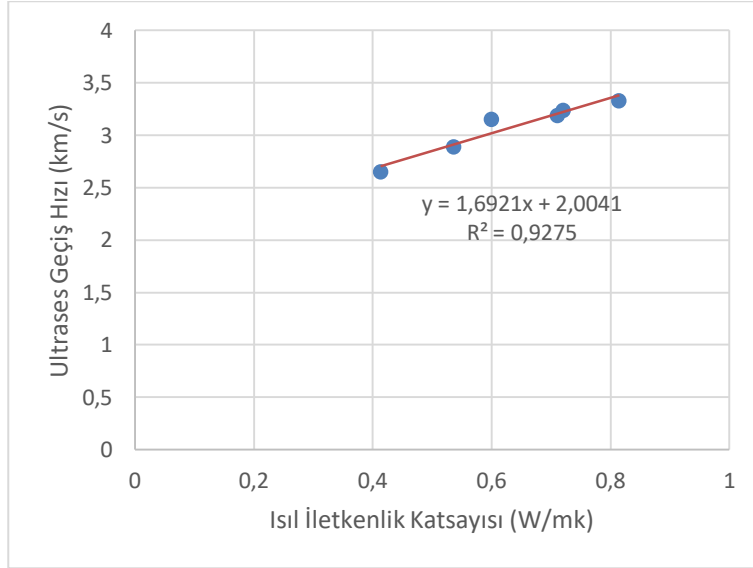


Şekil 7. Isı iletkenlik katsayısı değerleri

90°C sıcaklıkta 24 saat kür edilen %1, %2, %3 oranında diatomit ikamesi yapılan (D1, D2, D3) numunelerin referans numunesine göre ultrasonik geçiş hızlarında artış olduğu, %4 ve %5 oranında diatomit ikamesi yapılan (D4, D5) numunelerin ise ultrasonik geçiş hızlarında azalma olduğu Şekil 8'de gösterilmiştir. En yüksek ultrasonik geçiş hızı (3,33km/s) ile %3 oranında diatomit ikamesi yapılan numunede ölçülürken en düşük ultrasonik geçiş hızı (2,65km/s) ile %5 oranında diatomit ikamesi yapılan numunede ölçülmüştür. % 3 oranında kadar ikame edilen diatomit 90°C sıcaklık küründe ilk 24 saate kadar NASH jelini artırmış ve daha dolu bir matris oluşmasını sağlamıştır. Bir malzemenin ultrasonik geçiş hızı o malzemenin boşluk yapısına bağlı olmasından dolayı literatürde daha önce yapılan çalışmalarda da boşluklu yapının artması ile ultrasonik geçiş hızının azaldığı rapor edilmiştir [31, 32]. Daha önce çalışılan çimentolu sistemlerde de ultrasonik geçiş hızı ile ısı iletkenlik katsayısı arasında güçlü bir ilişki olduğu görülmüştür [33, 34]. Ayrıca geopolimer harç numunelerin ısı iletkenlik kat sayıları ile ultrasonik geçiş hızı değerleri karşılaştırıldığında yüksek oranda doğrusal ilişki ($R=0,9275$) olduğu Şekil 9'da gösterilmiştir.

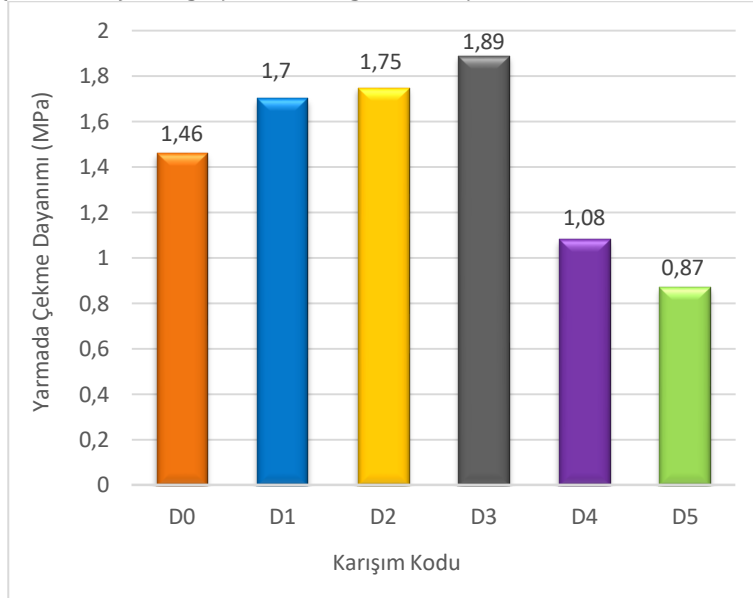


Şekil 8. Ultrasonik geçiş hızı değerleri

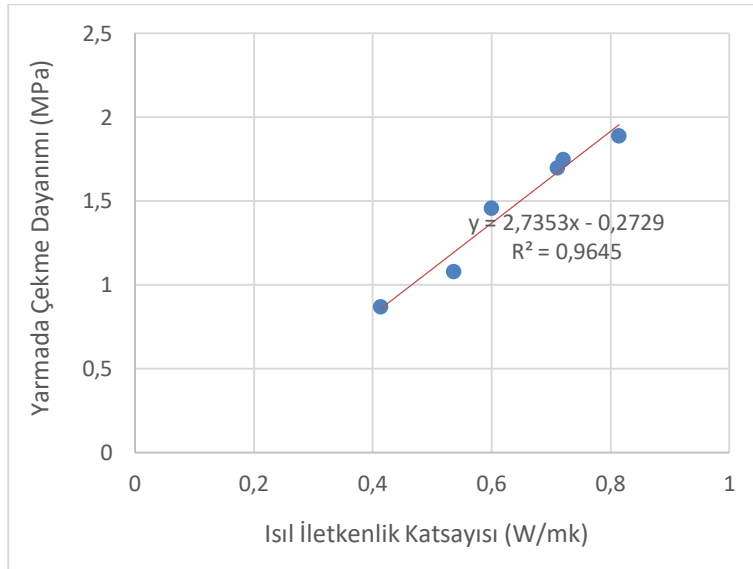


Şekil 9. Diatomit ikameli harçlarda ısı iletkenlik ile ultrasonik geçiş hızı arasındaki ilişki

Geopolimer harç numunelerinin yarmada çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde, %1, %2 ve %3 oranında diatomit ikamesinin yarmada çekme dayanımını arttırdığı ancak %4 ve %5 oranında diatomit ikamesinin yarmada çekme dayanımını düşürdüğü Şekil 10'da gösterilmiştir. En yüksek yarmada çekme dayanımı (1,89 MPa), %3 oranında diatomit ikamesi içeren geopolimer harç numunesinde tespit edilmiştir. Referans geopolimer harç numunesine göre % 3 diatomit ikameli geopolimer harcın ısı iletkenlik katsayısının daha yüksek olduğu ve ultrasonik geçiş hızının daha düşük olduğu önceki bölümlerde gösterilmiştir. Bu yüzden daha boşluksuz daha kompakt yapıda olan % 3 diatomit ikameli geopolimer harcın yarma dayanımı en yüksek çıkmıştır. Bu durumun aksine en fazla boşluklu yapıya sahip olan % 5 diatomit ikameli geopolimer harcın yarma dayanımı en düşük (0,87 MPa) çıkmıştır. Literatürde daha önce yapılan % 1, %2, %3 oranlarında diatomit ikame edilmiş olan geopolimer harç numunelerin 90°C de 24 ve 48 saat sıcaklık kürü uygulanması ile eğilme ve basınç dayanımlarının geopolimer kontrol numunesine göre arttığı rapor edilmiştir [35]. Bu yönüyle çalışma literatürle uyumluluk göstermektedir. Ayrıca ısı iletkenlik katsayıları ile yarmada çekme dayanımları arasında yüksek oranda doğrusal ilişki ($R=0,9645$) olduğu Şekil 11'de gösterilmiştir.

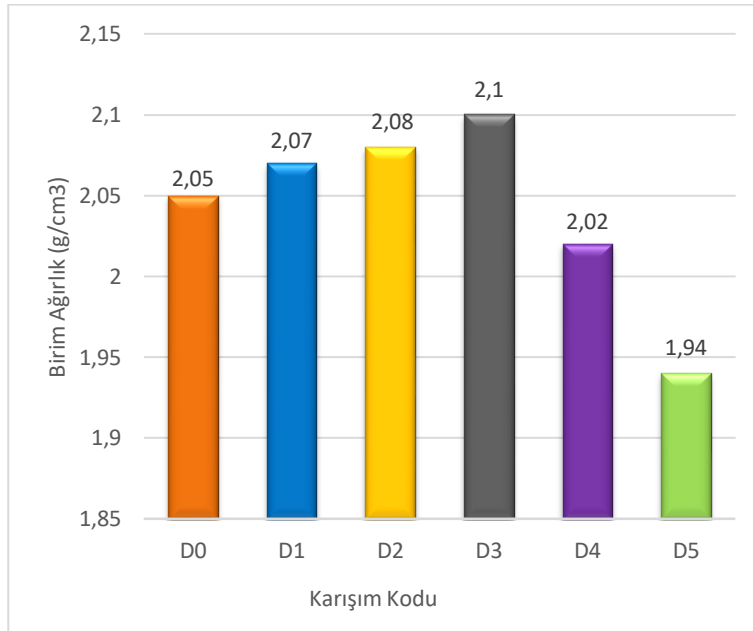


Şekil 10. Yarmada çekme dayanımı değerleri

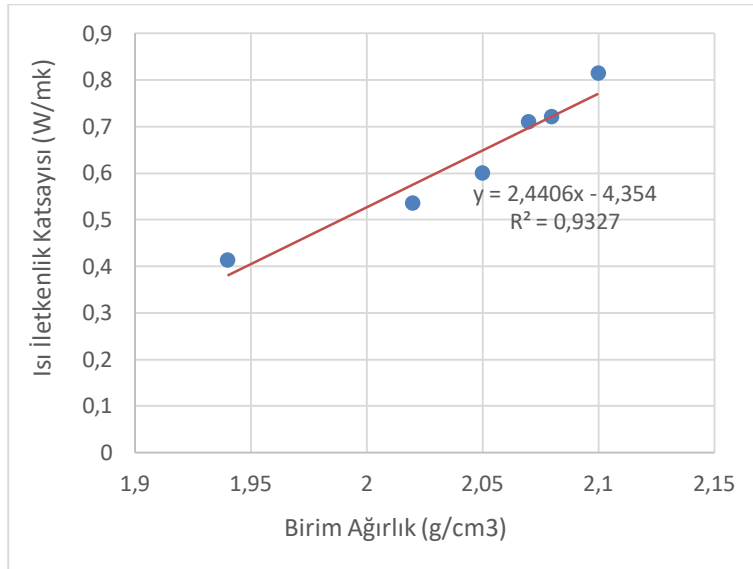


Şekil 11. Diatomit ikameli harçlarda ısı iletkenlik ile yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki

Geopolimer harç numunelerin birim ağırlık değerleri 1,94 ile 2,08 g/cm³ arasında olduğu Şekil 12’de gösterilmiştir. Geopolimer harç numunelerin birim ağırlıkları kıyaslandığında çok çarpıcı farklılık olmamıştır. Referans numuneye göre D1, D2, D3 kodlu numunelerin birim ağırlık değerleri az miktarda artmıştır. Bu artış uçucu küle göre yoğunluğu daha az olan diatomitin ikamesi ile muhal gözükse de yüksek oranda reaktif silis içeren diatomitin geopolimer sistemde %3 oranına kadar daha fazla NASH jeli oluşumu sağladığı ve daha yoğun bir mikro yapı oluşturduğu ile açıklanabilir. D4 ve D5 kodlu numunelerin birim ağırlık değerleri referans numuneye göre azalmıştır. % 3 den fazla oranda kullanılan diatomitin topaklanma yaptığı, geopolimer reaksiyonu bloke ettiği, bu sebeple NASH jelini kısıtladığı ve daha boşluklu bir yapıya sebep olduğu ile izah edilebilir. Özellikle % 5 diatomit ikame edilmiş geopolimer harçlarda bu boşluklu yapının en fazla olduğu görülmektedir. Ayrıca ısı iletkenlik katsayıları ile birim ağırlık değerleri karşılaştırıldığında yüksek oranda doğrusal ilişki (R=0,9327) bulunduğu Şekil 13’de gösterilmiştir. Birim ağırlık değerinin azalması ile ısı iletkenlik katsayısındaki düşüşler orantılı olmuştur.

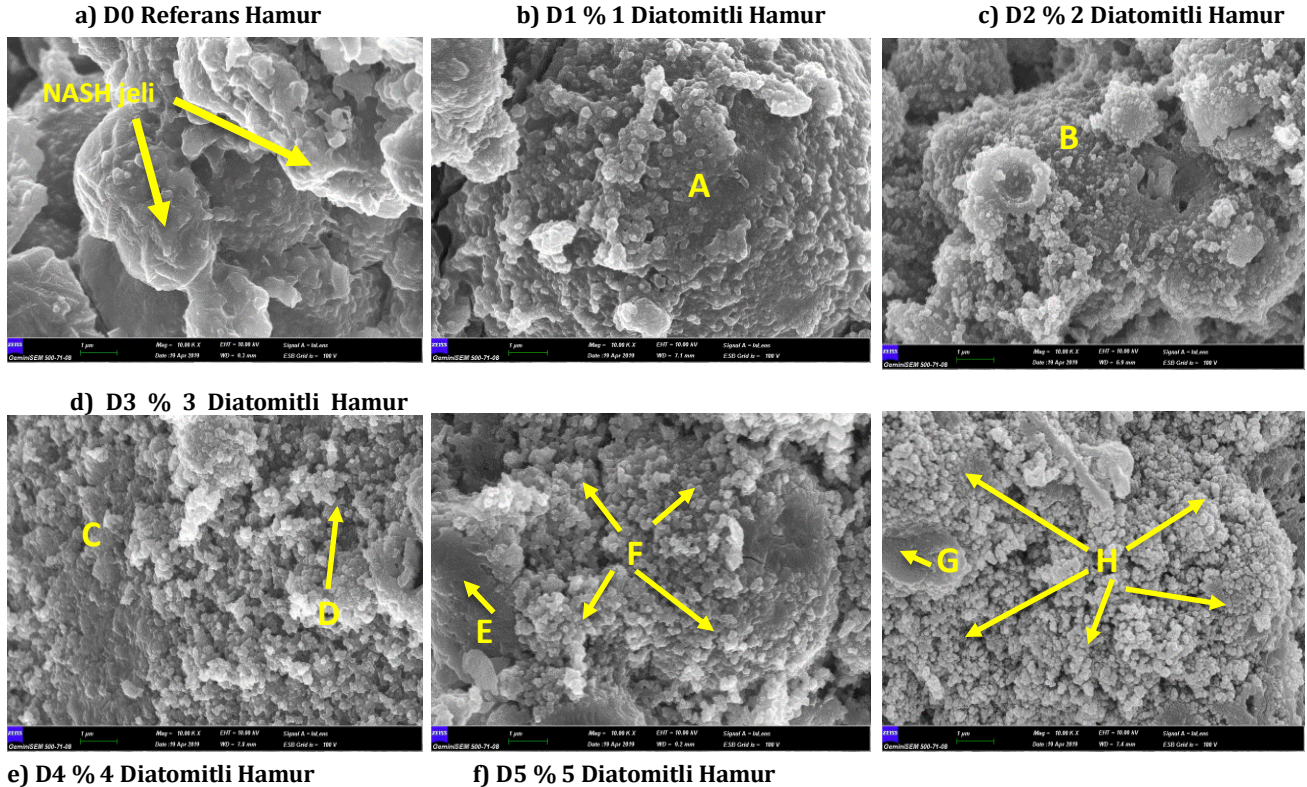


Şekil 12. Birim ağırlık değerleri



Şekil 13. Diatomit ikameli harçlarda ısı iletkenlik ile birim ağırlık arasındaki ilişki

90°C sıcaklıkta 24 saat kür edilen referans, %1, %2, %3, %4 ve %5 oranında diatomit içeren numunelerin FESEM görüntüleri 10000 kez büyütülerek incelenmiştir. Şekil 14'de verilen FESEM görüntüleri incelendiğinde D0 referans hamur numunesinde NASH jeli görüntülenmiştir. D1 ve D2 harç numunelerinde gösterilen A, B bölgelerinde NASH jeli yapısı daha yoğun bir şekilde görüntülenmiştir. D3 hamur numunesinde C bölgesinde referansa göre daha yoğun jel yapısı gözlemlenirken D bölgesinde kısmi topaklanmış diatomit tanecikleri de görüntülenmektedir. Uçucu kül taneciklerinin yanı sıra reaktif silis içeren diatomitin 90°C sıcaklık küründe alkali ortamda bozularak NASH jelini desteklediği ve daha yoğun bir hamur oluşturduğu görülmektedir. Optimum % 3 oranında diatomitin NASH jeli reaksiyonları en fazla desteklediği boşluklu yapıyı azalttığı diğer deney sonuçlarında gösterilmiştir. Ayrıca %4 ve %5 oranında diatomit ikameli hamurlarda yoğun bir şekilde topaklanmış diatomit tanecikleri görülmektedir. Bu topaklanmış ve reaksiyona girmeyen diatomit tanecikleri NASH jelinin üstünü kaplamış olduğu görülmektedir. D4 ve D5 harç numunelerinde sırasıyla gösterilen E, G bölgelerinde kısıtlı NASH jeli görüntülenirken F, H bölgelerinde yüksek oranda topaklanmış diatomit taneleri görüntülenmiştir. Özellikle D5 geopolimer hamur numunesinin H bölgesinde yoğun olarak topaklanmış diatomit tanecikleri görüntülenmiştir.



Şekil 14. 10000 kez büyütülmüş geopolimer hamur numunelerinin FESEM görüntüleri

4. Tartışma ve Sonuç

Uçucu kül tabanlı geopolimer harçlara diatomit ikamesinin ısı iletkenlik katsayısındaki değişimleri incelendiğinde %1, %2 ve %3 oranında diatomit ikamesi yapılan harçlarda ısı iletkenlik katsayılarının arttığı, ancak daha boşluklu yapıda olan %4 ve %5 oranında diatomit ikamesi yapılan harçlarda ise ısı iletkenlik katsayılarının azaldığı görülmüştür.

Geopolimer numunelerin ultrasonik geçiş hızları değerlendirildiğinde %1, %2, %3 oranında diatomit ikamesi yapılan numunelerde kontrol numunesine göre ultrasonik geçiş hızlarında artış görülmüştür. Ancak boşluk yapısının arttığı %4 ve %5 oranında diatomit ikamesi yapılan numunelerde ise ultrasonik geçiş hızlarında azalma olduğu belirlenmiştir.

Deney numunelerinin yarmada çekme dayanımı sonuçları incelendiğinde %1, %2 ve %3 oranında diatomit ikamesi içeren numunelerde yarmada çekme dayanımlarını arttığı ancak %4 ve %5 oranında diatomit ikamesi içeren harçlarda ise yarmada çekme dayanımlarının düştüğü görülmüştür.

90°C sıcaklıkta 24 saat kür edilen geopolimer numunelerin, birim ağırlıkları değerlendirildiğinde referans, %1, %2 ve %3 oranında diatomit ikamesi yapılan numunelerde birim ağırlıkların çok değişmediği ancak %4 ve %5 oranında diatomit ikamesi yapılan numunelerde ise birim ağırlıkların azaldığı tespit edilmiştir.

FESEM görüntüleri incelendiğinde ise diatomit ikamesi yapılan D1, D2, D3 numunelerinin kontrol numunesine göre daha yoğun, boşluksuz olduğu görülmüştür. D4 ve D5 numunelerinde ise fazla miktarda diatomitin topaklanma yaptığı ve geopolimer sisteme blokaj yaptığı görüntülenmiştir.

Tüm veriler incelendiğinde ısı iletkenlik katsayısı ile birim ağırlık, ultrasonik geçiş hızı ve yarmada çekme dayanımı arasında yüksek oranda doğrusal ilişki olduğu görülmüştür. FESEM görüntülemeleri de elde edilen verileri destekler niteliktedir.

Kaynakça

- [1] Davidovits, J., 1994. Globalwarmingimpact on thecementandaggregatesindustries. World Resource Review, 6, 263.
- [2] P.K. Mehta.2001. Reducing the Environmental Impact of Concrete, Concr. Int. 23(10) (2001) 61–66.
- [3] Karthik A, Sudalaimani K, Vijayakumar CT. 2017. Durability Study on Coal Fly Ash-Blast Furnace Slag Geopolymer Concretes. Ceram Int 43:11935–11943.
- [4] Gunasekara C, Law DW, Setunge S, Sanjayan JG. 2015. Zeta Potential, Gel Formation and Compressive Strength of Low Calcium Fly Ash Geopolymers. Constr Build Mater 95:592–599.
- [5] N.B. Singh, B. Middendorf , 2008.Chemistry of Blended Cements Part-I: Natural Pozzolanas, Fly Ashes and Granulated Blast-furnace Slags. Cem. Int., 6 (4) pp. 76-91.
- [6] S.P. Pandey, A.K. Singh, R.L. Sharma, A.K. Tiwari . 2003. Studies on High Performance Blended/Multiblended Cements and Their Durability Characteristics .Cem. Concr. Res., 33 (9) , pp. 1433-1436.
- [7] N.B Singh, B. Middendorf. 2020. Geopolymers as an Alternative to Portlant Cement: An Overview. Construction and Building Materials vol 237.
- [8] J. Feng, R. Zhang, L. Gong, Y. Li, W. Cao, X. Cheng. 2015. Development of Porous Fly Ash-Based Geopolymer with Low Thermal Conductivity. Mater. Des., 65 (2015), pp. 529-533.
- [9] Davidovits J., (1991), Geopolymers: Inorganic polymeric new materials, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 37, 1633-1656.
- [10] Khale D., Chaudhary R. 2007. Mechanism of Geopolymerization and Factors Influencing its Development: A Review. Journal of Materials Science, 42, 729– 746.
- [11] J. Davidovits, Geopolymer.1991. İnorganic Polymeric New Materials. J. Therm. Anal.37 (1991) 1633–1656.

- [12] İlkentapar, S., Atiş, C. D. , Karahan, Ö. I. , & Avsaroglu, E. B. G. 2017. Influence of Duration of Heat Curing and Extra Rest Period After Heat Curing on the Strength and Transport Characteristic of Alkali Activated Class F Fly Ash Geopolymer Mortar. *Construction and Building Materials* , vol.151, 363-369.
- [13] Atiş, C.D., Görür, E. B., Karahan, O., Bilim, C., İlkentapar, S., Luga, E. 2015. Very High Strength (120 MPa) Class F Fly Ash Geopolymer Mortar Activated at Different NaOH Amount, Heat Curing Temperature and Heat Curing Duration. *Construction and Building Materials*, 96: 673-678.
- [14] Durak, U., Karahan, O., Uzal, B., İlkentapar, S., Atiş, C. D. 2020. Influence of Nano SiO₂ and Nano CaCO₃ Particles on Strength, Workability, and Microstructural Properties of Fly Ash-Based Geopolymer. *Structural Concrete* , vol.0, no.0, pp.1, 2020.
- [15] G. Görhan, G. Kürklü. 2014. The Influence of The NaOH Solution on The Properties of The Fly Ash-Based Geopolymer Mortar Cured at Different Temperatures. *Compos. Part B*, 58 (2014), pp. 371-377.
- [16] Kaya M, Uysal M, Yılmaz K, Karahan O, Atiş C,D. 2020. Mechanical Properties of Class C and F Fly Ash Geopolymer Mortars. *Gradevinar*, 2020/05, Volume 72, issue 4, Pages 297-309.
- [17] N. Toniolo, A.R. Boccaccini. 2017. Fly Ash-Based Geopolymers Containing Added Silicate Waste. A Review *Ceram. Int.* 43(17):14545-14551.
- [18] F.N. Okoye, J. Durgaprasad, N.B. Singh. 2016. Effect of Silica Fume on Mechanical Properties of Fly Ash Based-Geopolymer Concrete. *Ceram. Int.*, 42 (2) (2016), pp. 3000-3006.
- [19] F.N. Okoye, S. Prakash, N.B. Singh. 2017. Durability of Fly Ash Based Geopolymer Concrete in The Presence of Silica Fume. *J. Clean. Prod.*, 149 (2017), pp. 1062-1067.
- [20] Durak, U., Karahan, O., Uzal, B., İlkentapar, S., & Atiş, C. D. 2018. The investigation of mechanical effects of nano sio₂ particles for different sodium ion concentrartions on fly ash based geopolmer mortar . 13th Internatioanl Congress on Advances in Civil Engineering.
- [21] Sevinç, A. H., Durgun, Y.M., 2020. Properties of High-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concretes Improved with High-Silica Sources. *Construction and Building Materials* 261(2020)120014.
- [22] F. Akhtar, Y. Rehman, L.t Bergström. 2010. A Study of The Sintering of Diatomaceous Earth to Produce Porous Ceramic Monoliths with Bimodal Porosity and High Strength. *Powder Technol.* 201 (2010) 253-257.
- [23] H. Elden, G. Morsy, M. Bakr. 2010. Diatomite: Its Characterization, Modifications and Applications, *Asian J. Mater. Sci.* 2(3) (2010) 121-136.
- [24] Thammarong, S., Lertcumfu, N., Jaita, P., Manotham, S., Tunkasiri, T., Pimpha, N., & Rujijanagul, G. 2019. The Effects of Replacement Metakaolin with Diatomite in Geopolymer Materials. *Key Engineering Materials*, 798, 267-272.
- [25] Thammarong, S., Lertcumfu, N., Jaita, P., Manotham, S., Tunkasiri, T., Pimpha, N., & Rujijanagul, G. 2019. The Effects of Replacement Metakaolin with Diatomite in Geopolymer Materials. *Key Engineering Materials*, 798, 267-272.
- [26] Tokay H. 2019. Vermikülit ve Uçucu Kül Katkılı Geopolimer Harç Üretilmesi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Bartın, 72s.
- [27] TS EN 1015-11., 2000. Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [28] TS EN 1008, 2003. Beton karma suyu- Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [29] TS EN 12504-4., Testing concrete - Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. Ankara: TSE, 2012.

- [30] TS 2824 EN 1338/AC Zemin Döşemesi İçin Beton Kaplama Blokları - Gerekli Şartlar Ve Deney Metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2009.
- [31] Whitehurst, E.A., "Soniscope Tests Concrete Structures", Journal of the American Concrete Institute,47, 433-444, 1951.
- [32] Zoldners, N.G., "Thermal Properties of Concrete Under Sustained Elevated Temperatures", ACI Publication, SP-25, 1-31, 1971.
- [33] Özcan, F.; Akçaözoğlu, K. 2018. Hava Sürüklenmiş Betonların Isıl İletkenlik Değerlerinin Belirlenmesi. Niğde Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7, 716-724.
- [34] Davraz M, Kiliñarslan S, Kuru M, Tuzlak F. 2016. Investigation of Relationships Between Ultrasonic Pulse Velocity and Thermal Conductivity Coefficient in Foam Concretes. Acta Phys Pol A. 2016;130(1):469–70.
- [35] Örklemes E., 2019. Uçucu Kül Tabanlı Geopolimer Harçlarda Diatomit İkamesinin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri Üzerine Etkilerinin Araştırılması. Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kayseri, 137