



Kaolin esaslı geopolimer harçlarda silis dumanı ve mikro SiO₂ katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi

The effect of silica fume and micro SiO₂ additive on the strength properties in kaolin based geopolymer mortars

Mehmet Kaya^{1,*} 

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 66900, Yozgat Türkiye

Özet

Bu çalışmada, kaolin kullanılarak üretilen geopolimer harçlarda, silis dumanı (SD) ve mikro SiO₂ (MS) katkısının dayanım özellikleri üzerine etkisi incelenmiştir. Kaolin içerisine ağırlıkça %3, %6 ve %9 oranında SD ve MS ayrı ayrı katılarak bağlayıcı hazırlanmıştır. Bağlayıcılar, ağırlıkça %11, %13, %15 ve %17 sodyum (Na) içeren NaOH ile aktive edilmiştir. Bağlayıcı, kum, NaOH ve sudan oluşan karışım, harç mikseri içerisinde karıştırılıp kalıplara yerleştirildikten sonra 24 saat süre ile 110 °C aktivasyon sıcaklığı uygulanmıştır. Daha sonra kalıptan çıkarılan numuneler 28 güne kadar oda sıcaklığında bekletilmiştir. Numuneler üzerinde birim ağırlık, boşluk oranı, su emme, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır. Deneyler sonucunda, %9 SD ve %11 Na ile %9 MS ve %17 Na içeren numunelerde sırasıyla 21.4 MPa ve 45.3 MPa basınç dayanımı tespit edilmiştir. Ağırlıkça %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS katkısının dayanım üzerinde olumlu etkisi gözlenmemiş, %15 ve %17 Na ile üretilmiş numunelerde ise SD ve MS katkısının dayanımı artırdığı tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Kaolin, Geopolimer, Silis dumanı, Eğilme dayanımı, Basınç dayanımı

1 Giriş

Çimentonun çevreye verdiği olumsuz etkileri azaltmak amacıyla çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Dünyadaki toplam CO₂ salınımının %7-%10'unun geleneksel portland çimentosundan kaynaklı olması nedeniyle çevre dostu alternatif bir bağlayıcı olarak geopolimer beton önerilmektedir [1-3]. Geopolimerin geleneksel çimentoya kıyasla CO₂ salınımını yaklaşık %20 azalttığı belirtilmektedir [4]. Bazı çalışmalarda, geopolimerin geleneksel betona kıyasla, maliyetinin kabaca eşit olduğu [5, 6], bazı çalışmalarda ise daha düşük olduğu [7] belirtilmektedir. Bunların yanı sıra çimento ile üretilmiş betonlarla kıyaslandığında, geopolimer daha yüksek basınç dayanımı [8, 10] ve daha iyi durabilite [11-16] sağlamaktadır. Geopolimerler, alüminosilikatların alkali veya alkali-silikat çözeltileri ile ortam sıcaklığında veya daha yüksek sıcaklıkta reaksiyonu sonucu oluşur. Geopolimer ve geopolimerleşme üzerine yapılan önemli

Abstract

In this study, the effects of silica fume (SD) and micro SiO₂ (MS) additives on the strength properties of geopolymer mortars produced using kaolin were investigated. The binder was prepared by adding 3%, 6% and 9% by weight of SD and MS into the kaolin separately. The binders were activated with NaOH containing 11%, 13%, 15% and 17% sodium (Na) by weight. The mixture consisting of binder, sand, NaOH and water was mixed in the mortar mixer and placed in the molds, and an activation temperature of 110 °C was applied for 24 hours. Then, the samples that were removed from the mold were kept at room temperature for up to 28 days. Unit weight, void ratio, water absorption, ultrasound pulse velocity, flexural and compressive strength tests were performed on the samples. As a result of the experiments, the compressive strength of 21.4 MPa and 45.3 MPa was determined in samples containing 9% SD and 11% Na, 9% MS and 17% Na, respectively. In samples containing 11% and 13% Na by weight, no positive effect of SD and MS was observed on the strength, and SD and MS additives were found to increase the strength in samples produced with 15% and 17% Na.

Keywords: Kaolin, Geopolymer, Silica fume, Flexural strength, Compressive strength

çalışmalarda, genel olarak aktivatör oranı [17], kür şartları [18], Na₂O/SiO₂, K₂O/SiO₂ ve Si/Al oranı, NaOH ve KOH oranı [19], su miktarı ve kür sıcaklığı gibi faktörlerin etkili olduğu görülmektedir [11, 20].

Bazı çalışmalarda geopolimer üretiminde kaolin kullanılmıştır [21-23]. Kaolinin geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmasının amacı, ön işlem için enerji gerektirmemesi ve yüksek alümina-silikat içermesidir. Alümino-silikat, geopolimerleşme sürecindeki ana yapıyı oluşturmaktadır [24]. Doğal bir kaynak olan kaolin, genellikle kuvars, illit gibi diğer minerallerle birlikte kaolinit, hematit, götit, gibsit, halloysit, anataz vb. ana minerallerden oluşur [25-27]. Kaolinin hammaddesi Alüminyum-Hidra-Silika (Al₂Si₂O₅(OH)₄)'dır. Farklı mineralleri ise, dikit, halloysit ve nakrit olarak bilinmektedir. Ancak, kaolinit, daha düşük bir çözünme hızına sahiptir ve ana bileşenler arasındaki etkileşimler için belirli bir zaman geçmesi gerekir [28]. Kaolinitin bileşiminde bulunan

* Sorumlu yazar / Corresponding author, e-posta / e-mail: mehmet.kaya@yobu.edu.tr (M. Kaya)

Geliş / Received: 26.02.2021 Kabul / Accepted: 25.03.2021 Yayınlanma / Published: 27.07.2021

doi: 10.28948/ngumuh.886863

kuvarsın, geopolimerleşme üzerinde olumlu etkisi bulunmaktadır [27]. Son yıllarda çimentoya kıyasla daha az CO₂ salınımı olan kil bazlı geopolimerlerin prefabrik tuğla üretiminde kullanıldığı gözlenmektedir [29]. Geopolimer teknolojisinde kullanılan malzemelerden birisi olan metakaolin, ana puzolaniklerden biri olan mineral kaolinitin hidroksile edilmiş formudur. Metakaolinin ana bileşenleri amorf Al₂O₃ ve SiO₂'dir. [30, 31]. Katılma sürecindeki reaksiyon, kaolin ve metakaolin için benzerdir [28]. Aradaki tek fark kaolin, metakaoline kıyasla daha fazla alkali saldırıya maruz kalır. Metakaolinin reaksiyon yüzey alanı kaolinden daha fazladır ve daha hızlı sertleşebilme özelliğine sahiptir [32]. Kaolinin üretimi sırasında çıkan atıkların kalsinasyonu ile de geopolimer üretimi yapılmaktadır [33]. SD, silikon ve ferrosilikon alaşımlarının üretimi sırasında yüksek saflıkta kuvarsın elektrikli fırınlarda kömür yardımıyla indirgenmesi sonucu oluşan bir yan üründür. Aşırı inceliği ve yüksek silika içeriği nedeniyle, silis dumanı oldukça etkili bir puzolanik malzemedir. Beton üretiminde betonun özelliklerini iyileştirmek için silis dumanı kullanılır. Basınç dayanımını, bağ dayanımını ve aşınma direnci artırır. Geçirgenliği azaltır ve bu nedenle çeliğin korozyondan korunmasına yardımcı olur [34]. Silis dumanı C-S-H jeli oluşumunu artırır. Aynı zamanda bu puzolanik jel Al ve Cl gibi alkali iyonlarla olan reaksiyona katkıda bulunur [35]. Endüstriyel atık olan silis dumanı, son yıllarda geopolimer üretiminde, uçucu kül, metakaolin, yüksek fırın cürufu, pirinç kabuğu külü gibi endüstriyel atıklarla birlikte kullanılmaktadır. Geopolimer dayanım ve dayanıklılık özelliklerini artırmak için uçucu kül [36-37] ve metakaolin [38] gibi bağlayıcılara nano parçacık ilave edilmektedir. Diğer taraftan, geopolimer özelliklerinin iyileştirilmesinde nano SiO₂ önemli rol oynar. Si/Al oranını değiştirerek alümina-silikat jel gelişimine yardım eder [39]. Ayrıca, geniş özgül yüzey alanına sahip iyi bir filtre görevi görür ve mukavemetin geliştirilmesine katkıda bulunur [40, 41].

Bu çalışmada çimentonun aksine, herhangi bir enerji ihtiyacı olmadan doğal kaynaklardan elde edilen kaolin, geopolimer üretiminde bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Doğal bir silis kaynağı olan SD ile nano parçacıklara göre daha ekonomik olan MS'nin kaolin esaslı geopolimerlerde fiziksel özellikler ve dayanım özelliklerine etkisi incelenmiştir.

2 Materyal ve metot

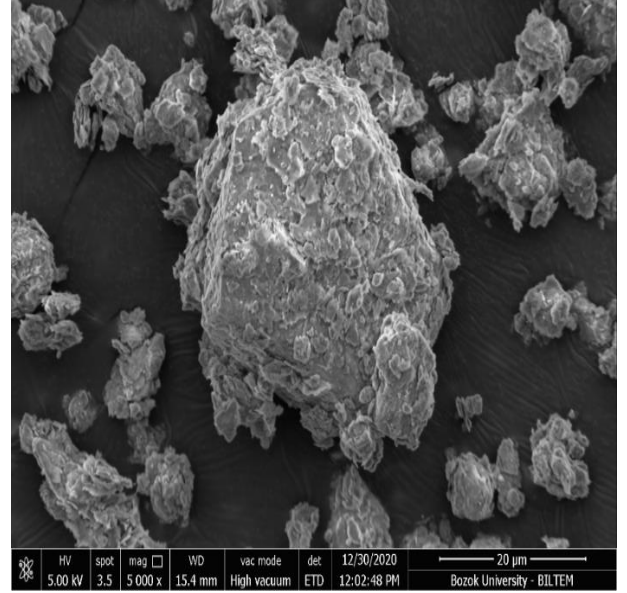
2.1 Materyal

Bu çalışmada Balıkesir'de faaliyet gösteren Utelka Firması'ndan tedarik edilen kaolin kullanılmıştır. Kaolinin taramalı elektrom mikroskopu (SEM) görüntüsü Şekil 1'de, SD'nin SEM görüntüsü Şekil 2'de verilmiştir. Silis dumanının camı küresel yapıda olduğu görülmektedir. Kaolinin ise yaklaşık 30 µm ve daha küçük düzensiz taneciklerden oluştuğu gözlenmektedir. Kaolin ve SD'nin kimyasal içeriği Tablo 1'de verilmiştir.

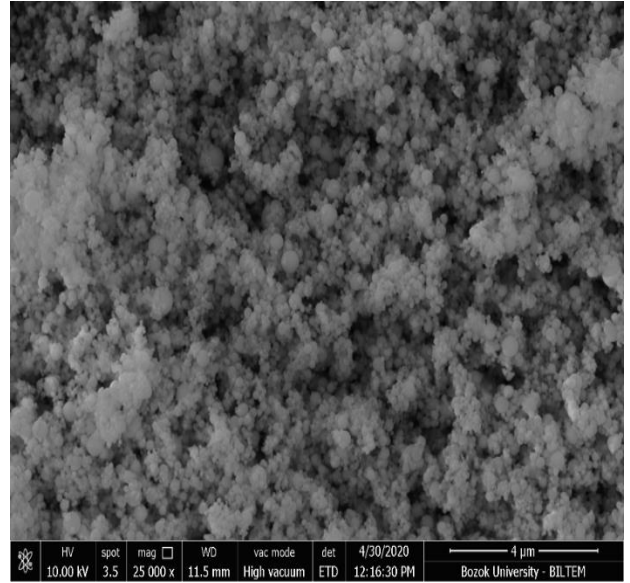
Çalışmada kullanılan MS, İzmir'de faaliyet gösteren Ege Nanotek Kimya Sanayi firmasından temin edilmiştir. 0-63 µm arasında tane büyüklüğüne sahip MS kullanılmıştır. Aktivatör olarak kullanılan NaOH Balıkesir'de faaliyet gösteren Karan Kimya Firması'ndan temin edilmiştir

Tablo 1. Kaolin ve SD'nin kimyasal içeriği(%)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Kaolin	70.32	18.87	1.44	0.58	0.32	1.33	0.04	0.87	0.1
SD	93.9	0.01	1.04	0.72	1	0.43	0.77	1.1	0.08



Şekil 1. Kaolinin SEM görüntüsü



Şekil 2. SD'nin SEM görüntüsü

Harç karışımlarında şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Çalışmada, en büyük tane çapı 4 mm ve özgül ağırlığı 2.74 g/cm³ olan bazalt agregası kullanılmıştır.

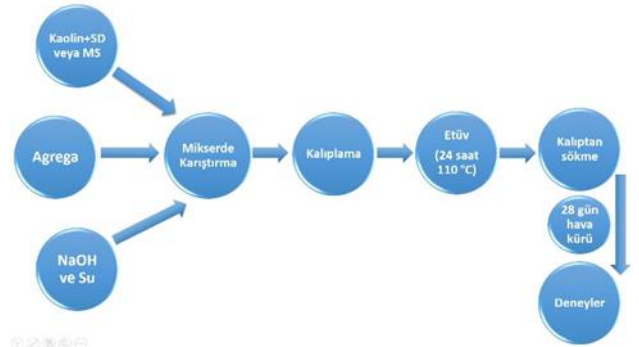
2.2 Metot

Numunelerin üretimi ile ilgili şema Şekil 3'te verilmiştir. Çalışmada kaolin içerisine ağırlıkça %3, %6 ve %9 oranında SD ve MS ayrı ayrı ilave edilmiştir. Geopolimer harçlarda,

dayanım özelliklerinin %10 sodyum (Na) üzerinde belirgin olarak artış gösterdiği bilinmektedir [8,9,11,46]. Bu nedenle, kaolin+SD ve kaolin+MS den oluşan bağlayıcı, ağırlıkça %11, %13, %15 ve %17 sodyum (Na) içeren NaOH ile aktive edilmiştir. Likit/bağlayıcı oranı 0.50, bağlayıcı/kum oranı ise 1/3 olarak belirlenmiştir. Bağlayıcı, agrega, NaOH ve sudan oluşan karışım standart çimento mikserinde karıştırıldıktan sonra 40 mm×40 mm×160 mm boyutlarındaki standart kalıplara yerleştirilmiştir. Sıcaklığın dayanım gelişiminde önemli olduğu bilinmektedir [8,11,47]. Bu nedenle numuneler etüv içerisinde 110 °C’de, 24 saat süre ile aktivasyon sıcaklığına maruz bırakılmıştır. Etüvden çıkarılan numunelere 28 güne kadar 22±2 °C oda sıcaklığında hava kuru uygulanmıştır. Daha sonra numuneler üzerinde birim ağırlık, su emme ve boşluk oranı, TS-EN 12504-4 standardına göre ultrasonik atımlı dalga hızının tayini deneyi [42], TS EN 1015 -11 standardına göre eğilme dayanımı ve basınç dayanımı deneyleri yapılmıştır [43]. Geopolimer numunelerin karışım oranları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Geopolimer numunelerin karışım oranları

No	Numune Kodu	Na %	Kaolin (g)	SD (g)	MS (g)	Likit/bağlayıcı
1	S0-11	11	450	0	0	0.5
2	SD3-11	11	436.5	13.5	0	0.5
3	SD6-11	11	423	27.0	0	0.5
4	SD9-11	11	409.5	40.5	0	0.5
5	S0-13	13	450	0	0	0.5
6	SD3-13	13	436.5	13.5	0	0.5
7	SD6-13	13	423	27.0	0	0.5
8	SD9-13	13	409.5	40.5	0	0.5
9	S0-15	15	450	0	0	0.5
10	SD3-15	15	436.5	13.5	0	0.5
11	SD6-15	15	423	27.0	0	0.5
12	SD9-15	15	409.5	40.5	0	0.5
13	S0-17	17	450	0	0	0.5
14	SD3-17	17	436.5	13.5	0	0.5
15	SD6-17	17	423	27.0	0	0.5
16	SD9-17	17	409.5	40.5	0	0.5
17	MS3-11	11	436.5	0	13.5	0.5
18	MS6-11	11	423	0	27.0	0.5
19	MS9-11	11	409.5	0	40.5	0.5
20	MS3-13	13	436.5	0	13.5	0.5
21	MS6-13	13	423	0	27.0	0.5
22	MS9-13	13	409.5	0	40.5	0.5
23	MS3-15	15	436.5	0	13.5	0.5
24	MS6-15	15	423	0	27.0	0.5
25	MS9-15	15	409.5	0	40.5	0.5
26	MS3-17	17	436.5	0	13.5	0.5
27	MS6-17	17	423	0	27.0	0.5
28	MS9-17	17	409.5	0	40.5	0.5

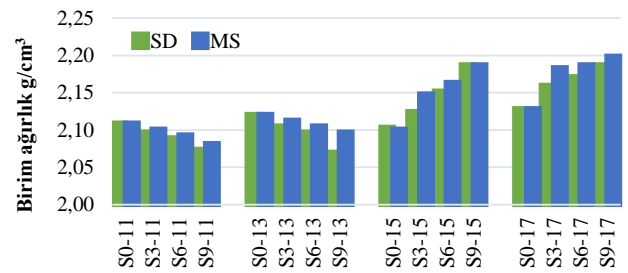


Şekil 3. Numune üretim şeması

3 Bulgular ve tartışma

3.1 Birim ağırlık

Numunelerin birim ağırlıkları Şekil 4’te verilmiştir. Geopolimer numunelerin birim ağırlıkları 2.07 g/cm³ ile 2.20 g/cm³ arasında değişmektedir. En düşük birim ağırlık %9 SD ve %11-%13 Na içeren geopolimer numunelerde 2.07 g/cm³, en yüksek birim ağırlık ise %9 MS ve %17 Na içeren numunelerde 2.20 g/cm³ olarak tespit edilmiştir. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilave edilmesi ile numunelerin birim ağırlıklarında azalma, %15 ve %17 Na içeren numunelerin birim ağırlıklarında artış gözlenmiştir. MS içeren numunelerin birim ağırlıkları SD içeren numunelerin birim ağırlıklarından daha büyüktür. Fakat bu fark fazla belirgin değildir. %11 Na ve sadece kaolin ile üretilen numunelere kıyasla %17 Na ve %9 SD ve MS içeren numunelerin birim ağırlıkları %4 artış göstermiştir. Metakaolin ve SD kullanılarak geopolimer üretilen bir çalışmada birim ağırlığın 2.36 kg/dm³, %10 SD ilave edilmiş numunelerde ise birim ağırlığın 2.35 kg/dm³ olduğu belirtilmektedir [31]. Doğal kil kullanılarak geopolimer üretilen başka bir çalışmada ise 13 M NaOH miktarında 2179.8 kg/m³ birim ağırlık tespit edilmiştir [44].

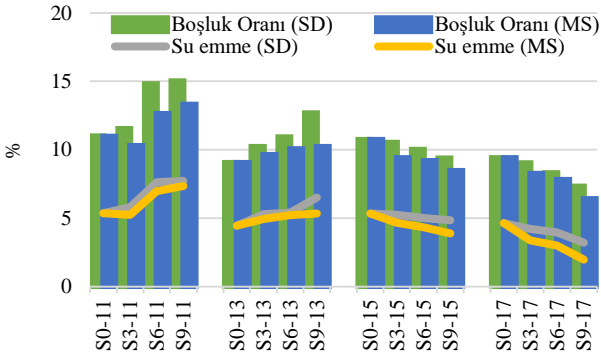


Şekil 4. Numunelerin birim ağırlıkları

3.2 Su emme ve boşluk oranı

Numunelerin boşluk oranı ve su emme oranları Şekil 5’te gösterilmiştir. Boşluk oranları %6.23 ile %14.84 arasında, su emme oranları ise %1.98-%7.73 arasında değişiklik göstermektedir. SD içeren numunelerin boşluk oranları ve su emme oranları MS içeren numunelerden daha fazladır. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birlikte boşluk oranı ve su emme oranlarında artış gözlenmiştir.

Buna karşılık %15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS oranının artışı ile birlikte boşluk oranı ve su emme oranlarında azalma olduğu görülmektedir. Numunelerde aktivatör oranının artışı ile birlikte boşluk oranı ve su emme oranlarının azaldığı gözlenmektedir. %11 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen numunelere kıyasla %17 Na ve %9 SD içeren numunelerin boşluk oranları %33, su emme oranları ise %61 azalma göstermiştir. Benzer şekilde %17 Na ve %9 MS içeren numunelerin boşluk oranları %42, su emme oranlarında ise %63 azalma görülmüştür. SD taneciklerinin kaolin taneciklerinden daha küçük olması ve SD ile MS' nin %17 Na gibi yüksek aktivatör içeriğinde karışım içerisinde bağlayıcılık özelliğini artırması boşluk oranının ve su emme oranının azalmasına sebep olmuştur. Uçucu kül ile geopolimer üretilen bir çalışmada, boşluk oranlarının %5.4 ile %10.6, su emme oranlarının ise %2.7 ile %4.9 arasında değiştiği gözlenmiştir [39]. Uysal ve arkadaşları, metakaolin tabanlı geopolimerlerde boşluk oranını %16.38, su emme oranını %8.35 olarak tespit etmişler, %10 SD katkısının boşluk oranını %15.81 su emme oranını ise %8.03'e düşürdüğünü belirlemişlerdir [31]. Meassaoud ve arkadaşları ise kil tabanlı geopolimerlerde en düşük boşluk oranı ve su emme oranı 13 M NaOH oranının sağladığını belirtmişlerdir [44].

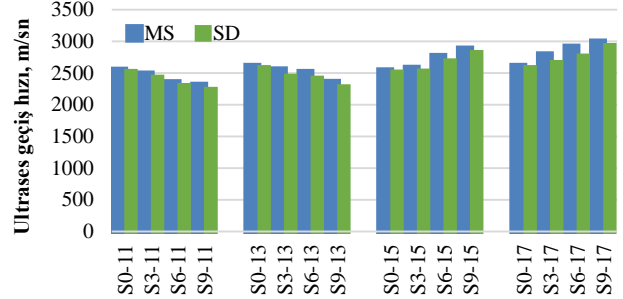


Şekil 5. Numunelerin boşluk oranı ve su emme oranları

3.3 Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini deneyi

Numunelerin ultrases geçiş hızları Şekil 6'da verilmiştir. Ultrases geçiş hızları 2235 m/s ile 2929 m/s arasında değişmektedir. MS içeren numunelerin ultrases geçiş hızları SD içeren numunelerden daha fazladır. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birlikte ultrases geçiş hızlarında azalma gözlenmiştir. Buna karşılık %15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS oranının artışı ile birlikte ultrases geçiş hızlarında artış olduğu görülmektedir. %11 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen geopolimer numunelere kıyasla %11 Na, %9 SD içeren numunelerin ultrases geçiş hızları %11, %9 MS içeren numuneler ise %9 azalma göstermiştir. %17 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen numunelere kıyasla %17 Na, %9 SD içeren numunelerin ultrases geçiş hızları %16, %9 MS içeren numunelerde ise %15 artış gözlenmiştir. Bor katkılı metakaolin tabanlı geopolimer üretilen bir çalışmada 28 günlük numunelerin ultrases geçiş hızları 3633 m/s olarak tespit edilmiştir [45]. Uçucu kül esaslı ve çimento katkılı

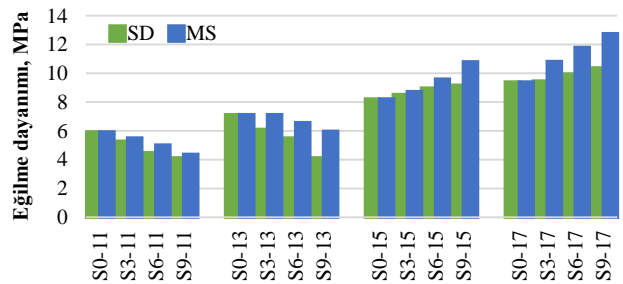
geopolimerlerde ultrases geçiş hızlarının 2842 m/sn ile 3478 m/sn arasında değiştiği tespit edilmiştir [46]. Geopolimer üretilen başka bir çalışmada ise 100 °C' de kür edilen numunelerden C sınıfı uçucu kül içeren 28 günlük harç numunelerde ultrases geçiş hızının 1600 m/sn, F sınıfı uçucu kül içeren numunelerde ise 2514 m/sn olarak tespit edilmiştir. Boşluk oranının azalması ile ultrases geçiş hızının arttığı bilinmektedir [47].



Şekil 7. Numunelerin ultrases geçiş hızları

3.4 Eğilme ve basınç dayanımı deneyleri

Numunelerin eğilme dayanımları Şekil 7'de verilmiştir. Eğilme dayanımları 3.9 MPa ile 12.5 MPa arasında değişmektedir. MS içeren numunelerin eğilme dayanımları SD içeren numunelerden daha fazladır. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birlikte eğilme dayanımlarında azalma gözlenmiştir. Buna karşın %15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS oranının artışı ile birlikte eğilme dayanımlarında artış olduğu görülmektedir. Sadece kaolin içeren numunelerle kıyaslandığında %11 Na ile üretilen ve %9 SD içeren numunelerin eğilme dayanımı %23, MS içeren numunelerin eğilme dayanımları ise %27 azalma göstermiştir. Buna karşılık, %17 Na ile üretilen ve sadece kaolin içeren numunelere kıyasla %17 Na ve %9 SD içeren numunelerin eğilme dayanımı %11, %17 Na ve %9 MS içeren numunelerin eğilme dayanımı ise %37 artış göstermiştir.

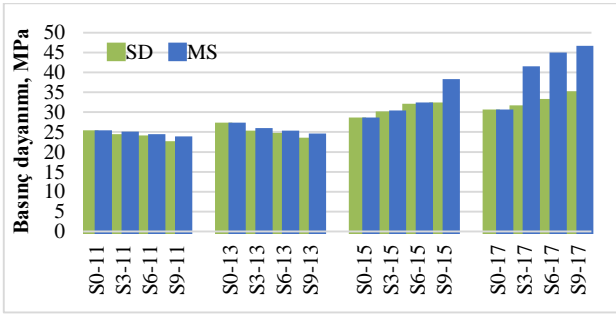


Şekil 7. Numunelerin eğilme dayanımları

Uçucu kül ve %15 çimento katkısı ile geopolimer üretilen bir çalışmada %18 Na içeriğine sahip numunelerde 10.2 MPa eğilme dayanımının tespit edilmiştir [46]. F sınıfı uçucu kül ile geopolimer üretilen başka bir çalışmada ise 2.2 MPa ile 12.4 MPa arası eğilme dayanımı tespit edilmiştir [47]. Atış ve arkadaşları F sınıfı uçucu kül içeren geopolimerlerde 24 saat 105 °C aktivasyon sıcaklığında, %10 Na oranında 7 MPa,

%18 Na oranında ise 14.3 MPa eğilme dayanımı tespit etmişlerdir [8]. Metakaolin tabanlı geopolimer üretilen bir çalışmada 10.4 MPa olan 28 günlük eğilme dayanımının %10, %20, %30 ve %40 SD ikamesi ile 13.2 MPa, 13.5 MPa, 10.7 MPa ve 10.4 MPa gibi değerler ile artış azaldığını tespit etmişlerdir. Aşırı SD ikamesinin geopolimer özelliklerini olumsuz etkilediğini belirtmişlerdir [31].

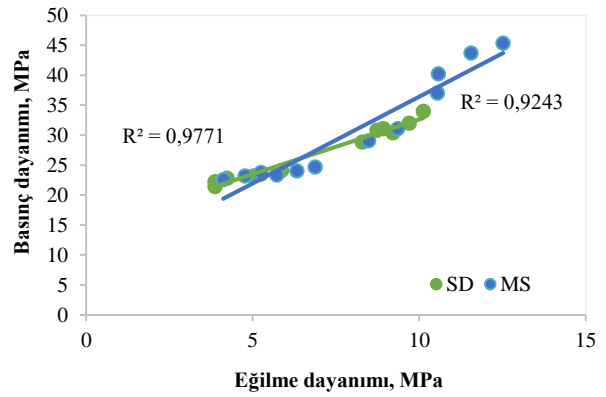
Numunelerin basınç dayanımları Şekil 8’ de verilmiştir. Basınç dayanımları 21.4 MPa ile 45.3 MPa arasında değişmektedir. MS içeren numunelerin basınç dayanımları SD içeren numunelerden daha fazladır. %11 ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birlikte basınç dayanımlarında azalma gözlenmiştir. Buna karşılık %15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS oranının artışı ile birlikte basınç dayanımlarında artış olduğu görülmektedir. %11 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen numunelerin basınç dayanımına kıyasla, %11 Na ve %9 SD içeren numunelerin basınç dayanımları %8, %11 Na ve %9 MS içeren numunelerin basınç dayanımı ise %6 azalma göstermiştir. Buna karşılık %17 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen numunelere kıyasla, %17 Na ile üretilen %9 SD içeren numunelerde basınç dayanımı %16, MS ile üretilen numunelerde ise %54 artış göstermiştir. Yüksek aktivatör oranlarında SD ve MS ilavesinin basınç dayanımındaki etkisi belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 8. Numunelerin basınç dayanımları

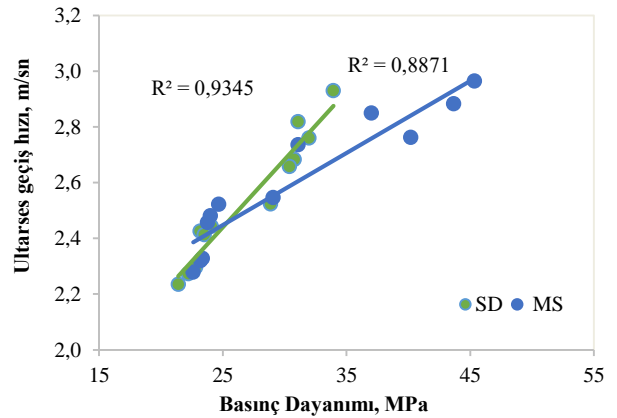
Atık kazan altı külü atığı ve pomza elek altı atığı ile geopolimer üretilen bir çalışmada, NaOH miktarının artırılması ile basınç dayanımında artış olduğu gözlenmiştir [48]. Metakaolinin sodyum silikat ve NaOH ile aktive edildiği bir çalışmada 6 M-10 M arası NaOH’un basınç dayanımını artırdığı, 10M-14 M aralığında basınç dayanımının azaldığı belirtilmektedir. NaOH içeriğinin artırılması, alümina-silikatın çözünme süreci ve geopolimerleşmenin ilerlemesine yardımcı olmaktadır. Yüksek NaOH içeriğinde aşırı Na⁺ iyonları sebebiyle geopolimerin yapısı zayıflamaktadır [49]. %98.9 SiO₂ içeren nano kum ve kaolin karışımı ile geopolimer üretilen bir çalışmada, nano silika miktarının %2.5’tan %5’e çıkarılması ile basınç dayanımının 60.8 MPa’ dan 21.5 MPa’ a indiği belirtilmektedir [41]. Nano tanecikler, Si/Al oranını değiştirerek alümina-silikat jel gelişimine yardımcı olmakta, geopolimeri iyileştirmede önemli bir rol oynamaktadır [38]. Metakaoline SD ilave edilen bir çalışmada ise, %7’ye kadar SD ilavesinin basınç dayanımını artırdığı %7-%10 aralığında ise azalttığı belirtilmektedir [35]. Nmiri ve arkadaşları, metakaolin tabanlı geopolimerlerde 33.7 MPa basınç dayanımını %2 SD

ikamesi ile 20.4 MPa’ a indiğini %6 SD ikamesi ile 35 MPa’ a çıktığını tespit etmişlerdir. Bu durumun reaksiyon için gerekli aktivatörün yetersizliğinden kaynaklandığını belirtmişlerdir [50]. Genel olarak SiO₂/Al₂O₃ oranının basınç dayanımı üzerinde etkili olduğu bilinmektedir. Bazı çalışmalarda SiO₂/Al₂O₃ oranının 3.4 ün altında olmasının basınç dayanımını azaltıcı, üstünde olmasının ise basınç dayanımını artırıcı etki yaptığı belirtilmektedir [51, 52]. Bu çalışmada SD ve MS içermeyen numunelerde katı SiO₂/Al₂O₃ oranı 3.72’ tir. %9 SD ilavesi ile bu oranın 11.84’e ulaştığı, bu durumda aktivatör oranının SiO₂/Al₂O₃ oranından daha etkili olduğu görülmektedir [50, 53]. NaOH içeriğinin artırılması ile Si ve Al’in kaolin parçacıklarından çözümlere süzülmesini artırmakta ve N-A-S-H jel oluşumuna yardımcı olmaktadır [10, 54]. Numunelerin eğilme dayanımları ve basınç dayanımları arasındaki ilişki Şekil 9’ da verilmiştir.



Şekil 9. Numunelerin eğilme ve basınç dayanımları arasındaki ilişki

SD içeren numunelerin eğilme ve basınç dayanımları arasında R²= 0.97, MS ile üretilen numunelerin eğilme ve basınç dayanımları arasında ise R²=0.92 olan bir ilişki bulunmaktadır. Numunelerin ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasında ilişki Şekil 10’ da verilmiştir.



Şekil 10. Numunelerin ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasındaki ilişki

SD içeren numunelerin ultrases geçiş hızları ve basınç dayanımları arasında $R^2=0.93$, MS ile üretilen numunelerin ultrases geçiş hızları ile basınç dayanımları arasında ise $R^2=0.88$ olan bir ilişki bulunmaktadır. Geopolimer harçlarda eğilme-basınç dayanımı, basınç dayanımı-ultrases geçiş hızı arasında lineer bir ilişki olduğu bilinmektedir [46-47]. Sodyum karbonat (Na_2CO_3) ile aktive edilmiş ve kuru küre uygulanmış diatomitli harçlarda eğilme ve basınç dayanımı arasında $R^2=0.86$ olan bir ilişki tespit edilmiştir [55].

4 Sonuçlar

Kaolin içerisine SD ve MS ilave edilmesi ile üretilen geopolimer harçlar üzerinde yapılan deneyler sonucunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- %11 Na ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile birim ağırlık değerlerinde azalma, su emme ve boşluk oranlarında artış gözlenmiştir. % 15 Na ve %17 Na içeren numunelerde ise SD ve MS ilavesi ile birim ağırlık değerlerinde artış, su emme ve boşluk oranlarında azalma tespit edilmiştir.
- %11 Na ve %13 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile ultrases geçiş hızlarında, eğilme ve basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Buna karşılık % 15 Na ve %17 Na içeren numunelerde SD ve MS ilavesi ile ultrases geçiş hızlarında, eğilme ve basınç dayanımlarında artış gözlenmiştir.
- %17 Na içeren ve sadece kaolin ile üretilen geopolimer numunelerde 29.3 MPa olan basınç dayanımı, %9 SD ilavesi ile 33.9 MPa, %9 MS ilavesi ile 45.3 MPa' a yükselmiştir.
- Basınç dayanımı üzerinde, aktivatör oranındaki artışın, SD ve MS oranındaki artıştan daha etkili olduğu gözlenmiştir.
- Kaolin esaslı geopolimer harçlarda, fiziksel ve mekanik özelliklere, MS ilavesinin SD ilavesinden daha etkili olduğu tespit edilmiştir.

Çıkar çatışması

Yazar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir.

Benzerlik oranı (iThenticate): %4

Kaynaklar

- [1] S. A. Miller, A. Horvath and P. J. M. Monteiro, Readily implementable techniques can cut annual CO_2 emissions from the production of concrete by over 20%, Environmental Research Letters,11, 074029, 2016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074029>
- [2] A. Hasanbeigi, C. Menke, and L. Price, The CO_2 abatement cost curve for the Thailand cement industry. Journal of Cleaner Production. 18 (15), 1509-1519, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.005>
- [3] L. N. Assi, K. Carter, E. Deaver, P. Ziehl, Review of availability of source materials for geopolimer/sustainable concrete, Journal of Cleaner Production, 263, 2020, 121477. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121477>
- [4] L. N. Assi, K. Carter, E. Deaver, R. Anay, and P. Ziehl, Sustainable concrete: building a greener future. Journal

- of Cleaner Production, 198, 1641-1651, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.123>.
- [5] J. Thaarrini, and S. Dhivya, Comparative study on the production cost of geopolimer and conventional concretes. International Journal of Civil Engineering Research, 7(2), 117-124, 2016
- [6] B. J. Mathew, M. Sudhakar, and C. Natarajan, Strength, economic and sustainability characteristics of coal ash -GGBS based geopolimer concrete. International Journal of Computational Engineering Research, 3(1), 207-212, 2013
- [7] B. C. McLellan, R. P. Williams, J. Lay, A. van Riessen, and G. D. Corder, Costs and carbon emissions for geopolimer pastes in comparison to ordinary portland cement. Journal of Cleaner Production, 19, 9(10),1080-1090, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- [8] C. D. Atiş, E. B. Görür, O. Karahan, C. Bilim, S. İlkentapar, and E. Luga, Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolimer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. Construction and Building Materials, 96, 673-678, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.089>
- [9] İ. İ. Atabey, O. Karahan, C. Bilim, and C. D. Atiş, Very high strength Na_2SiO_3 and NaOH activated fly ash based geopolimer mortar, Cement Wapno Beton, 25, 292-305, 2020. <https://doi.org/10.32047/CWB.2020.25.4.4>
- [10] A. M. Al Bakri, H. Kamarudin, M. Bnhussain, I. K. Nizar, A. Rafiza, and Y. Zarina, Microstructure of different NaOH molarity of fly ash-based. Journal of Engineering and Technology Research, 3(2), 44-49, 2011.
- [11] M. Kaya, M. Uysal, K. Yılmaz, and C. D. Atiş, Behaviour of geopolimer mortars after exposure to elevated temperatures. Materials Science, 24, 428-436, 2018. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.24.4.18829>
- [12] D. L. Y Kong, and J. G. Sanjayan, Effect of elevated temperatures on geopolimer paste, mortar and concrete, Cement and Concrete Research, 40, 2, 334-339, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.10.017>
- [13] Y. Fu, L. Cai, W. Yonggen, Freezethaw cycle test and damage mechanics models of alkali-activated slag concrete, Construction and Building Materials. 25, 3144-3148. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.12.006>
- [14] M. A. M. Ariffin, M. A. R. Bhutta, M. W. Hussin, M. M. Tahir, and N. Aziah, Sulfuric acid resistance of blended ash geopolimer concrete. Construction and Building Materials, 43, 80-86, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.018>
- [15] S. Çelikten, M. Saridemir, and İ. Ö. Deneme, Mechanical and microstructural properties of alkaliactivated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature. Construction and Building Materials, 217, 50-61, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.055>

- [16] Ü. Yurt, B. Dündar, ve E. Çınar, Jeopolimer betonlarda sülfürik asit etkisinin araştırılması, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8 (2), 1548- 1561, 2020. <https://doi.org/10.29130/dubited.644176>
- [17] X. Hua, J. S. J. van Deventer, The effect of alkali metals on the formation of geopolymeric gels from alkali-feldspars, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 216, 27–44, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0927-7757\(02\)00499-5](https://doi.org/10.1016/S0927-7757(02)00499-5)
- [18] D. S. Perera, O. Uchida, E. R. Vance, K. S. Finnie, Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers. Journal of Materials Science, 42, 3099–3106, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0533-6>
- [19] K. Divya, and C. Rubina, Mechanism of geopolymerisation and factors influencing its development: A review. Journal of Materials Science, 42, 729–746, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0401-4>
- [20] S. Çelikten ve İ. İ. Atabey, Su içeriği ve ısıl kür süresinin atık bazalt tozu esaslı jeopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(1): 328- 332, 2021. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.836998>
- [21] M. Naghsh, K. Shams, Synthesis of a kaolin-based geopolymer using a novel fusion method and its application in effective water softening, Applied Clay Science, 146, 15, 238-245, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.06.008>
- [22] F. N. Okoye, J. Durgaprasad, N. B. Singh, Mechanical properties of alkali activated flyash/Kaolin based geopolymer concrete, Construction and Building Materials. 98, 15, 685-691, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.009>
- [23] W. Wang, H. Liu, and W Gu, A novel fabrication approach for improving the mechanical and sound absorbing properties of porous sound-absorbing ceramics. Journal of Alloys and Compounds. 695, 2477-2482, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.147>
- [24] H. Xu and J. S. J. van Deventer, Geopolymerisation of alumino-silicate minerals. International Journal of Mineral Processing, 59 (3), 247-266, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)
- [25] F. Zibouche, H. Kerdjoudj, L. J.-B d'Espinose, and H. van Damme, Geopolymers from Algerian metakaolin. Influence of secondary minerals. Applied Clay Science, 43 (3-4), 453-458, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2008.11.001>
- [26] Z. Zhang, H. Wang, X. Yao, and Y. Zhu, Effects of halloysite in kaolin on the formation and properties of geopolymers. Cement and Concrete Composites, 34(5), 709-715, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.02.003>
- [27] C. H. Rüscher, A. Schulz, M. H. Gougazeh, and A. Ritzmann, Mechanical strength development of geopolymer binder and the effect of quartz content, Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/9781118807743.ch2>
- [28] C.Y. Heah, H. Kamarudin, A. M. Mustafa Al Bakri, M. Luqman, I. Khairul Nizar, Y. M. Liew, Potential application of kaolin without calcine as greener concrete: A review. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 5(7), 1026-1035, 2011.
- [29] A. Heath, K. Paine, and M. McManus, Minimising the global warming potential of claybased geopolymers. Journal of Cleaner Production, 78, 75-83, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.046>
- [30] P. Duxson, G. C. Lukey, and J. S. J. Van Deventer, Physical evolution of na-geopolymer derived from metakaolin up to 1000 degrees. Journal of Materials Science, 42, 3044–3054, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0535-4>
- [31] M. Uysal, M. M. Al-Mashhadani, Y. Aygörmez, and O. Canpolat, Effect of using colemanite waste and silica fume as partial replacement on the performance of metakaolin-based geopolymer mortars. Construction and Building Materials, 176, 271-282, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.034>
- [32] J. Davidovits, Geopolymer chemistry and application, 2nd ed, Institute Geopolymere, Saint-Quentin, 2008
- [33] S. Prasanphan, A. Wannagon, T. Kobayashi, and S. Jiemsirilars, Reaction mechanisms of calcined kaolin processing waste-based geopolymers in the presence of low alkali activator solution, Construction and Building Materials, 221, 409-420, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.116>
- [34] R. Bajpai, K. Choudhary, A. Srivastava, K. S. Sangwan, M. Singh, Environmental impact assessment of fly ash and silica fume based geopolymer concrete, Journal of Cleaner Production, 254, 120147,2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120147>
- [35] H. M. Khater, Effect of silica fume on the characterization of the geopolymer materials, Khater International Journal of Advanced Structural Engineering, 5:12, 2013.
- [36] P. S. Deb, P. K. Sarker, and S. Barbhuiya, Effects of nano-silica on the strength development of geopolymer cured at room temperature. Construction and Building Materials, 101, 675-683, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.044>
- [37] U. Durak, O. Karahan, B. Uzal, S. İlkentapar, and C. D. Atış, Influence of nano SiO₂ and nano CaCO₃ particles on strength, workability, and microstructural properties of fly ash-based. Structural Concrete, 22(S1),E352-E367, 2021. <https://doi.org/10.1002/suco.201900479>
- [38] K. W. Lo, K. L. Lin, T. W. Cheng, Y. M. Chang, and J. Y. Lan, Effect of nano-SiO₂ on the alkali-activated characteristics of spent catalyst metakaolin-based geopolymers. Construction and Building Materials, 143, 455-463, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.152>
- [39] M. Sivasakthi, R. Jeyalakshmi, N. P. Rajamane, and R. Joseb, Thermal and structural micro analysis of micro silica blended fly ash based geopolymer composites.

- Journal of Non-Crystalline Solids. 499, 117-130, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2018.07.027>
- [40] E. D. Rodriguez, S. A. Bernal, J. L. Provis, J. Paya, J. M. Monzo, and M. V. Borrachero, Effect of nanosilica-based activators on the performance of an alkali-activated fly ash binder, *Cement and Concrete Composites*, 35 (1), 1-11, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.025>
- [41] M. F. Zawrah, S. E. Abo Sawan, R. M. Khattab, and A. A. Abdel-Shafi, Effect of nano sand on the properties of metakaolin-based geopolymer: Study on its low rate sintering. *Construction and Building Materials*, 246, 11848620, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118486>
- [42] TS-EN 12504-4. Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini, Ankara, Türk Standardları Enstitüsü, 2012
- [43] TS EN 1015 -11, Kagir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini, Türk Standardları Enstitüsü, 2013
- [44] I. B. Messaoud, N. Hamdi, and E. Srasra, Physicochemical characterization of geopolymer binders and foams made from Tunisian clay. *Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering*, 9392743, 8, 2018. <https://doi.org/10.1155/2018/9392743>
- [45] A. Celik, K. Yilmaz, O. Canpolat, M. M. Al-mashhadani, Y. Aygörmmez, and M. Uysal, High-temperature behavior and mechanical characteristics of boron waste additive metakaolin based geopolymer composites reinforced with synthetic fibers. *Construction and Building Materials*, 187, 1190-1203, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.062>
- [46] M. Kaya, F. Köksal. Effect of cement additive on physical and mechanical properties of high calcium fly ash geopolymer mortars, *Structural Concrete*, 22(S1), E452-E465, 2021. <https://doi.org/10.1002/suco.202000235>
- [47] M. Kaya, M. Uysal, K. Yilmaz, O. Karahan, and C. D. Atiş, Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars, *Gradevinar*, 72 (4), 297- 309, 2020. <https://doi.org/10.14256/JCE.2421.2018>
- [48] N. Doğan-Sağlamtimur and A. Bilgil, Atık kazan altı külü ve pomza elek altı atığından geopolimer yapı malzemesi üretimi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 7(2): 590-599, 2018. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.443221>
- [49] M. Rowles, and B. O'Connor, Chemical optimisation of the compressive strength of aluminosilicate geopolymers synthesized by sodium silicate activation of metakaolinite, *Journal of Materials Chemistry*, 13 1161–1165, 2003. <https://doi.org/10.1039/B212629J>
- [50] A. Nmiri, M. Duc, N. Hamdi, O. Yazoghli-Marzouk, and E. Srasra, Replacement of alkali silicate solution with silica fume in metakaolin-based geopolymers. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 26 (5), 555, 2019. <https://doi.org/10.1007/s12613-019-1764-2>
- [51] P. De Silva, K. Sagoe-Crenstil, and V. Sirivivatnanon, Kinetics of geopolymerization: role of Al₂O₃ and SiO₂, *Cement and Concrete Research*, 37 (4), 512-518, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.003>
- [52] C. K. Ma, A. Z. Awang, and W. Omar, Structural and material performance of geopolymer concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 186, 90-102, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111>
- [53] İ. İ Atabey, O. Karahan, C. Bilim, and C. D. Atiş. The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer, *Construction and Building Materials*. 264: 120268, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120268>
- [54] U. Rattanasak, P. Chindapasirt, Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer, *Minerals Engineering*, 22(12), 2009. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.022>
- [55] M. Saridemir, Alkali ile aktive edilmiş öğütülmüş diatomitli harçların dayanım özellikleri. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2): 124-134, 2016. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.294970>

