

Araştırma Makalesi -Research Article

Tuğla, Kiremit ve Mermer Atığı Tozları ile Üretilen Jeopolimer Harçların Özellikleri

Properties of Geopolymer Mortars Produced with Brick, Tile and Marble Waste Powders

Mehmet Uğur Toprak¹, Ahmet Ferdi Şenol^{2*}, Nazım Çağatay Demiral³, Cenk Karakurt⁴

Geliş / Received: 07/04/2022

Revize / Revised: 23/06/2022

Kabul / Accepted: 18/08/2022

ÖZ

Bu çalışmada çevre kirliliğini azaltmak amacı ile pişmiş kil (tuğla, kiremit) ve mermer atığı tozları jeopolimer harç üretiminde hammadde olarak kullanılmıştır. Bu amaçla, jeopolimer harçların taze ve sertleşmiş özelliklerine hammadde kullanım oranının ve kür sıcaklığının (60 ve 80 °C) etkileri incelenmiştir. Pişmiş kil tozu (%50) ve mermer tozu (%50) beraber kullanılarak hazırlanan jeopolimer harç, %100 kil tozu ile üretilene göre %40 fazla yayılma göstermiştir. Jeopolimer harçların 7 günlük basınç dayanımları, 28 günlük dayanımlarının yaklaşık %90'ına ulaşmıştır. En yüksek basınç dayanımı (28,50 MPa), %100 pişmiş kil tozu kullanılarak üretilen ve 80 °C de kür uygulanan 28 günlük jeopolimer harçlarda görülmüştür.

Anahtar Kelimeler- Jeopolimer Harç, Tuğla Tozu, Mermer Tozu, Fiziksel Özellik, Mekanik Özellik

ABSTRACT

In this study, baked clay (brick, tile) and marble waste powders were used as raw materials in the production of geopolymer mortar in order to reduce environmental pollution. The effect of the amount of baked clay and marble powder used and the curing temperature (60 and 80 °C) on the work ability, physical, and mechanical properties of geopolymer mortars were investigated. Geopolymer mortar prepared by using baked clay powder (50%) and marble powder (50%) showed 40% more flow than that produced with 100% clay powder. The 7-day compressive strength of geopolymer mortars has reached approximately 90% of their 28-day strength. The highest compressive strength (28.50 MPa) was observed for 28-day geopolymer mortars produced with 100% baked clay powder and cured at 80°C.

Keywords – Geopolymer Mortar, Brick Powder, Marble Powder, Physical Property, Mechanical Property

¹İletişim: mugur.toprak@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5483-2871>)

^{2*}Sorumlu yazar iletişim: ahmetferdi.senol@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6663-3340>)

³İletişim: cağatay.demiral@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5927-7299>)

⁴İletişim: : cenk.karakurt@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-4204-5341>)

⁵İletişim: : ahmetferdi.senol@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-6663-3340>)

⁶İletişim: : mugur.toprak@dpu.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5483-2871>)

⁷İletişim: : cağatay.demiral@bilecik.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0001-5927-7299>)

I. GİRİŞ

Çimento üretiminden kaynaklı CO₂ emisyonu, toplam CO₂ emisyonunun %5-7'si oranındadır [1]. CO₂ emisyonlarını azaltabilmek için harç ve beton üretiminde çimento yerine jeopolimerlerin bağlayıcı olarak kullanılması alternatif bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [2]. Jeopolimerler, alkali çözeltiler ile alümina-silikat içeren malzemeler kullanılarak üretilen inorganik polimerlerdir [3]. Jeopolimer üretiminde hammadde olarak uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolin, alkali aktivatör olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve sodyum silikat (Na₂SiO₃) yaygın olarak kullanılmaktadır [4]. Yapılan çalışmalara göre, jeopolimer karışımlarına ilave su eklenmesi, işlenebilirliği artırırken basınç dayanımını önemli ölçüde azaltmaktadır. Bu nedenle, işlenebilirliği artırmak için su eklemek yerine silikat modülünü artırmak önerilmektedir [5]. Düşük sıcaklıklarda kür, jeopolimerin dayanımlarını artırmaktadır [6-8]. Jeopolimerlerin yangına dayanıklılık ve korozyon dirençleri çimento bağlayıcılı malzemelerden daha yüksektir [9]. Reig vd. [10] yaptıkları bir çalışmada, tuğla atıkları ile aktivatör olarak NaOH çözeltisi ve Na₂SiO₃ kullanarak jeopolimer harç numuneleri üretmişlerdir. Daha sonra numunelerin, 65 °C'de 7 gün süre ile kür edilmesi ile 30 MPa basınç dayanımına ulaştığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, çalışmalarındaki SiO₂/Na₂O oranlarını optimize ederek jeopolimerlerin mekanik özelliklerini 50 MPa'ya kadar artırmışlardır. Hwang vd. [11], sırasıyla bileşen ve ince agrega olarak, atık tuğla tozu ve atık seramik kumunu kullanarak jeopolimer harç serileri üretmişlerdir. Karışımlarda, atık tuğla tozlarının yerine hacimce %0-50 aralığında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu kullanmışlardır. Çalışma sonunda, hazırladıkları numuneleri ortam sıcaklığında 3, 7, 28 ve 56 gün bekleterek 24-93 MPa aralığında ölçülen basınç dayanımları elde etmişlerdir.

Türkiye'nin maden endüstrisindeki en yüksek ihracat oranına sahip doğal kaynaklarından biri de mermerdir. Mermerlerin, madencilik ve işleme aşamalarında iken yaklaşık %70'i atık olarak ortaya çıkmaktadır [12]. Söz konusu atıklar, genellikle mermer çamuru ile kırık mermer parçalarından oluşarak çevresel sorunlara neden olabilmektedirler. Bu sorunları gidermek amacıyla, araştırmacılar tarafından atık mermer tozlarının beton ve harç üretimlerinde kullanılabilirliği üzerine birçok çalışma [13-15] yapılmıştır. Ancak, atık mermer tozlarının jeopolimer harçların üretiminde bileşen olarak kullanıldığı çalışma sayısı çok azdır. Tekin [16], mermer, traverten ve volkanik tüf atıklarının 200 µm'nin altındaki boyutlarda öğütülerek NaOH çözeltileri ile aktive ederek jeopolimer harç üretmiştir. Jeopolimer harçlarda 1 gün 45°C'de etüv kürünün en uygun olduğunu, 75°C'lik ısı kür sonucunda jeopolimer harçların çatladığını tespit etmiştir. Ayrıca, ıslak kürede jeopolimer harçların basınç dayanımları zamanla azalırken, kuru kürede zamanla arttığı sonucuna ulaşmıştır. Coppola vd. [17] atık mermer çamurunun farklı kürlenme koşulları (kuru, nemli ve ıslak atmosferler) ve karışım çeşitleri (%2,5 ve 5,0 atık cam tozu ilaveli) etkisinde alkali aktivasyona uğrama potansiyelini araştırmışlardır. Üretilen numuneler, 60°C'de 24 saat kür edildikten sonra oda sıcaklığında hava, nem ve suda küre tabii tutulmuşlardır. Kür sonunda, havayla kürlenmenin en uygun kürlenme koşulu olduğunu ve 38 ile 45 MPa arasında basınç dayanımlarına ulaştıklarını bildirmişlerdir. Ayrıca, cam tozu ilavesinin mekanik özellikleri iyileştirdiği, Ca(OH)₂ ile reaksiyona girebilen ilave silikalar oluşturduğu ve numunelerin suya daldırıldıktan sonra çatlama problemlerini iyileştirdiği sonucuna ulaşmışlardır. Tekin vd. [18] zeolitik tüf ve mermer atığı ile üretilen 5 M (mol) ve 10 M NaOH çözelti jeopolimer kompozitlere, doğal lif (pamuk ve viskon) takviyesinin etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonunda, 10 M NaOH ile hazırlanan jeopolimerlerin daha yüksek basınç dayanımına (28 günde %53-371), elastisite modülüne, kuru yoğunluğa ve termal iletkenliğe sahip olduklarını tespit etmişlerdir. Ayrıca, viskon lif takviyeli jeopolimerlerin, pamuk lif takviyeli jeopolimerlerden daha yüksek bir basınç dayanımına, elastisite modülüne ve termal iletkenliğe ulaştığını bildirmişlerdir.

Mermer, yapısında yüksek oranda CaCO₃ içerirken, pişmiş kil ise daha çok alümina, silika ve alkali oksit (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, K₂O, Na₂O) içermektedir [19]. Atık mermer tozu ne puzolanik ne de tamamen inert bir malzemedir [20]. Bilecik ilinde bol miktarda bulunan pişmiş kil ve mermer atıkları tozlarının değişen oranlarda karıştırılarak jeopolimer harç üretiminde kullanılması hakkında literatürde kısıtlı çalışma olduğu görülmüştür. Hem çimento kullanımından hem de bu atıklardan kaynaklanan çevre kirliliğinin azaltılması amacı ile bu çalışmada çimento bağlayıcılı harçlara alternatif olarak, pişmiş kil ve mermer atıkları kullanılarak üretilen jeopolimer bağlayıcılı harçların işlenebilirlik, fiziksel ve mekanik özellikleri araştırılmıştır.

II.MALZEME VE YÖNTEM

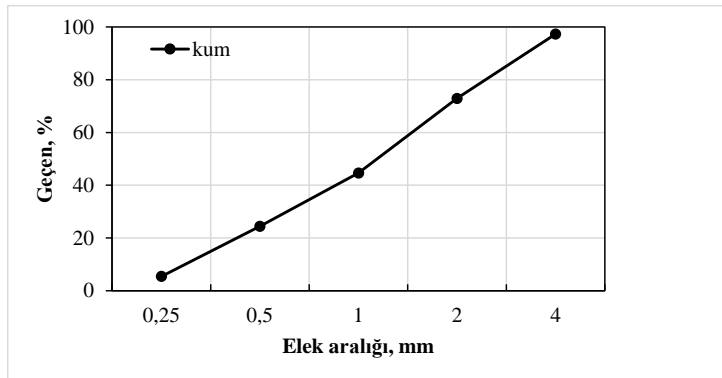
A. Malzeme

Jeopolimer harç üretimlerinde Şekil 1’de verilen harman tuğlası (HT), delikli tuğla (DT), çatı kiremiti (ÇK) ve mermer atığı (M) öğütülüp kullanılmıştır. Bu amaçla malzemeler önce çeneli kırıcıda 4 mm elek altından geçecek şekilde kırılmıştır. Daha sonra bilyalı değirmende yüzey alanını artırmak için 120 dakika boyunca öğütülerek, %95’i 90 µm’lik elekten geçebilecek şekilde toz haline getirilmiştir.



Şekil 1. a) Çatı kiremiti (ÇK), b) Delikli tuğla (DT), c) Harman tuğlası (HT) d) Mermer atığı (M).

Karışımlarda agrega olarak 0-4 mm boyutlarında Osmaneli nehir kumu kullanılmıştır. Kullanılan kumun özgül ağırlığı 2,61 gr/cm³ ve ağırlıkça su emmesi %1,28’dir. Agrega üzerinde yapılan elek analizi sonrası oluşturulan granülometri eğrisi Şekil 2’de sunulmuştur. Çalışmada kullanılan atıklar (ÇK, DT, HT ve M) üzerinde yapılan analiz sonuçları Tablo 1’de verilmiştir. Jeopolimer harç üretimlerinde Detsan Tic.Ltd.Şti.’den temin edilen NaOH (yoğunluğu 2,1 gr/cm³, pH değeri 14 ve %98 saflıktadır) ve cam suyu olarak da bilinen Na₂SiO₃ (yoğunluğu 1,38 gr/cm³, %8,9 Na₂O, %28,7 SiO₂ ve %64,8 H₂O) beraber kullanılmıştır.



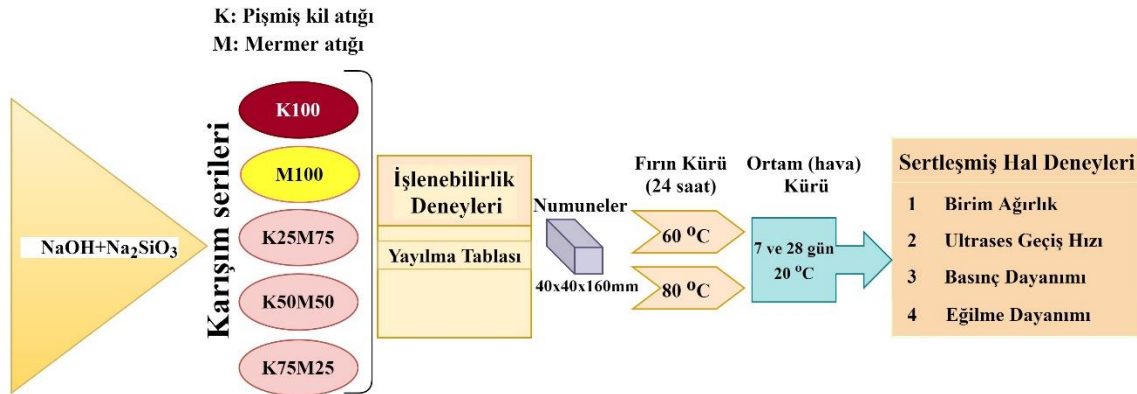
Şekil 2. Agrega granülometri eğrisi.

Tablo 1. ÇK, DT, HT ve M'nin kimyasal kompozisyonu.

Oksitler, %	ÇK	DT	HT	M
SiO ₂	44,7	48,9	44,6	1,2
Al ₂ O ₃	14,7	17,2	17,2	-
Fe ₂ O ₃	12,2	7,1	9,8	1,2
CaO	8,8	4,7	7,5	72,1
MgO	5,2	6,5	6,8	0,4
SO ₃	0,3	3,5	0,3	-
K ₂ O	1,6	3,2	3,2	-
TiO ₂	1,9	0,8	0,8	-
P ₂ O ₅	1,3	1,2	1,1	-
MnO	0,2	0,1	0,1	-
Kızdırma Kaybı	9,1	6,8	8,6	25,1
Özgül Ağırlık	2,9	2,9	2,8	2,3

B. Yöntem

Şekil 3'te verilen akış şemasına göre değişen oranlarda pişmiş kil ve atık mermer tozları, agrega ve hazırlanan alkali çözelti karıştırılarak jeopolimer harçlar üretilmiştir ve özellikleri belirlenmiştir. Bütün serilerde ağırlıkça agrega/atık oranı 1,5, Na₂SiO₃/10 M NaOH oranı 2,0 olmak üzere sabittir. 10 M NaOH çözeltisi oda sıcaklığına gelinceye kadar bekletilmiş ve kullanılmadan önce manyetik karıştırıcıda 5 dk karıştırılmıştır. Karıştırma işleminde ilk aşamada atık tozlar ve kum, harç mikserinde 1,5 dk süre ile düşük hızda (62,5 devir/dakika) karıştırılmış, arkasından miksera 10 M NaOH ilave edilmiş, aynı hızda 1,5 dk daha karıştırılmıştır. Üçüncü aşamada, Na₂SiO₃ karışıma eklenip 1,5 dk daha düşük hızda karıştırma işlemine devam edilmiştir. Son olarak mikser yüksek hızda (125 devir/dakika) 1,5dk daha çalıştırılmıştır. Seri kodlarındaki K indisi; ÇK, DT ve HT atıkları karışımını (pişmiş kil atıkları karışımını), sayılar ise malzemenin toplam atık içerisinde kütlece yüzdesini ifade etmektedir. Örnek olarak, K25M75: %25 pişmiş kil atığı (K) ve %75 atık mermer tozu (M) içeren jeopolimer harç karışımını belirtmektedir. Jeopolimer harçların karışım oranları Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 3. Çalışmanın akış şeması.

Tablo 2. Jeopolimer harçların karışım oranları.

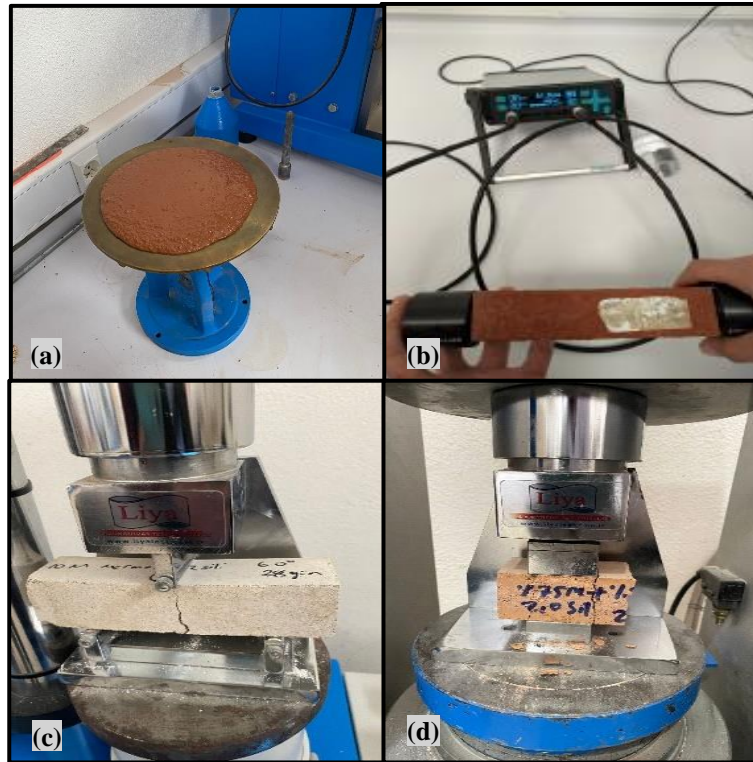
Seriler	NaOH (mol)	Na ₂ SiO ₃ (g)	ÇK (g)	DT (g)	HT (g)	M (g)	Kum (g)	S/B
K100	10	320	333,3	333,3	333,3	0	1500	0,4
K75M25	10	320	250	250	250	250	1500	0,4
K50M50	10	320	166,7	166,7	166,7	500	1500	0,4
K25M75	10	320	83,3	83,3	83,3	750	1500	0,4
M100	10	320	0	0	0	1000	1500	0,4

Hazırlanan karışımlar, TS EN 12390-1 [21]'e göre 40×40×160 mm boyutlarındaki kalıplara yerleştirilmiştir. Üretilen jeopolimer harçlara, 60 ve 80 °C'lik etüvde 1 gün süre ile kür işlemi uygulanmıştır (Şekil 4). Bir günün sonunda kalıplarından çıkartılan jeopolimer harçlara deney gününe (7 veya 28 gün) kadar ortam koşullarında (20±2 °C sıcaklık) hava kürü uygulanmıştır.



Şekil 4. Üretilen jeopolimer harçlar ve etüvde kür işlemleri.

Jeopolimer harç serilerine, TS EN 12350-5 [22] standartlarında yayılma tablası, sertleşmiş jeopolimer harç numunelerine TS EN 772-4 [23]'e göre birim hacim ağırlık, TS EN 12504-4 [24]'e göre ultrases geçiş hızı ve TS EN 196-1 [25]'e göre mekanik özellik deneyleri uygulanmıştır (Şekil 5). Birim ağırlık, ultrases geçiş hızı ve eğilme dayanımı testlerinde her bir karışım serisi için üç adet numunenin ortalama değerleri alınırken, basınç dayanım testinde altı adet numunenin değerlerinin ortalaması alınmıştır.

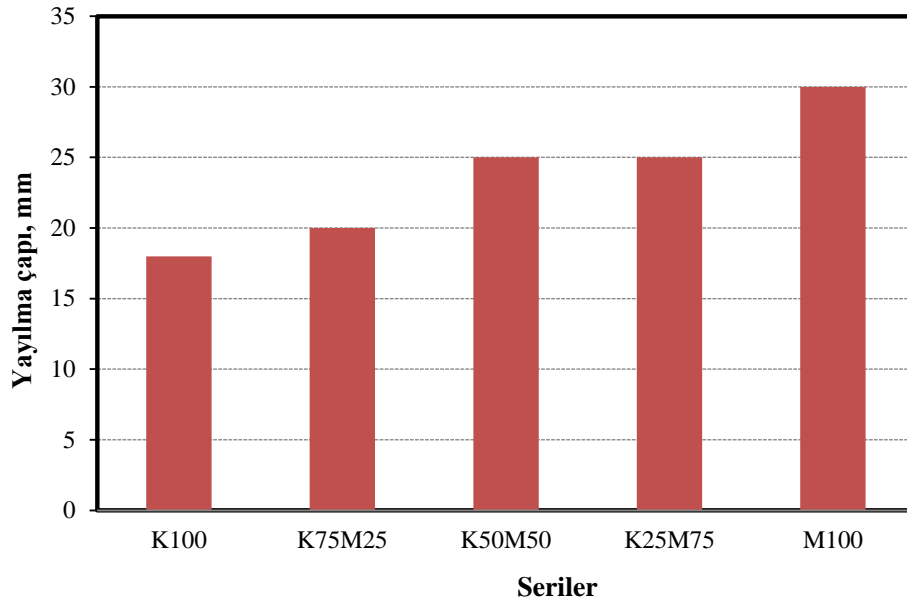


Şekil 5. Deneyler: a) Yayılma tablası, b) Ultrases geçiş hızı ölçümü, c) Eğilme dayanımı, d) Basınç dayanımı.

III. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

A. İşlenebilirlik Deney Sonuçları

Yayılma tablası deneyi ile jeopolimer harç karışımlarının işlenebilirlik özellikleri belirlenmiştir. Üretilen jeopolimer harç serilerinin yayılma çaplarındaki değişimler Şekil 6'da verilmiştir. Deney sonuçlarına göre, karışımda "M" ikamesi arttıkça yayılma değerleri artmış, yani işlenebilirlik özellikleri iyileşmiştir. Bu sonuç, iki malzemenin incelikleri arasındaki farka bağlanabilir. Özellikle %100 mermer atığı tozu ile üretilen M100 serisi, en büyük yayılma çapı olan 30 cm'ye ulaşmıştır. M100 serisi K100 serisine göre yaklaşık %67 daha fazla yayılma özelliği göstermiştir. Mermer atığı tozunun özgül ağırlığı ($2,3 \text{ g/cm}^3$), pişmiş kil atıklarından ($2,8-2,9 \text{ g/cm}^3$ arası) daha düşüktür. Yamanel vd. [26]'nin de benzer bir çalışmada değerlendirdikleri gibi, karışımdaki malzemelerin ağırlıkça yer değiştirmesi ile aynı ağırlıkta pişmiş kil atığı yerine kullanılan mermer atığı tozu, karışımlarda daha fazla hacim kaplamakta ve toplam hamur hacminin artması ile daha yüksek işlenebilirlik sağlayabilmektedir.

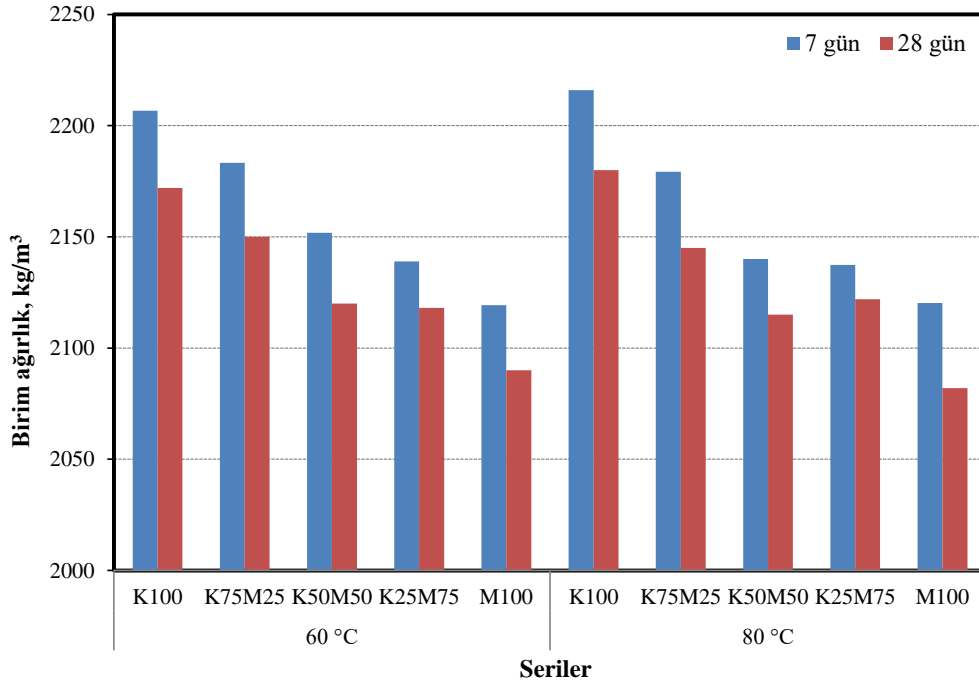


Şekil 6. Yayıma çaplarının jeopolimer harç serilerine göre değişimi.

Jeopolimerizasyon sırasında, su reaksiyona katılmadığından, jeopolimer harç karışım hesaplarında su/bağlayıcı oranının düşmesi dayanım açısından avantajlı bir durumdur. Bu durum, işlenebilirlik özelliğini yükselten atık mermer tozlu serilerin, karışımdaki su/bağlayıcı oranının belirli bir orana kadar azaltılabilmesini sağlayabilir.

B. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

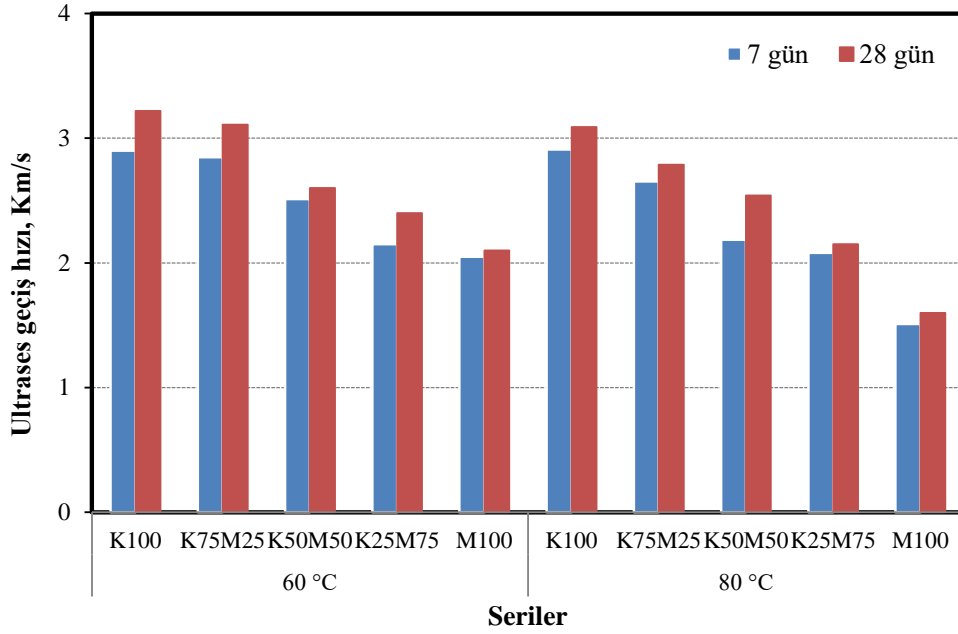
Üretilen jeopolimer harç numunelerinin 7 ve 28 günlük birim ağırlık sonuçlarının kür sıcaklıklarına ve serilere göre değişimi Şekil 7’de görülmektedir. ÇK, DT, HT ile M’nin özgül ağırlıkları arasındaki fark nedeniyle, karışımlarda M ikamesi arttıkça birim hacim ağırlıkları; 60°C’lik kür sonrasındaki numunelerin 7’nci gününde %3,98, 28’inci günde ise %3,77 oranına kadar azalmıştır. Yine aynı şekilde karışımlardaki M ikamesi arttıkça 80 °C’lik kür uygulanan numunelerin birim ağırlıkları, 7’nci gününde %4,33 ve 28’inci günde ise %4,49 oranına kadar azalmıştır. Kür sıcaklığı arttıkça karışım serilerinde birim ağırlık kaybı meydana gelmiştir. Bu durum hem yüksek kür sıcaklığı (80 °C) sonrasındaki termal çatlak oluşumuna hem de gözle görülebilen gözeneklilik artışına bağlanabilir.



Şekil 7. Jeopolimer harçların birim ağırlıklarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.

C. Ultrases Geçiş Hızı Deney Sonuçları

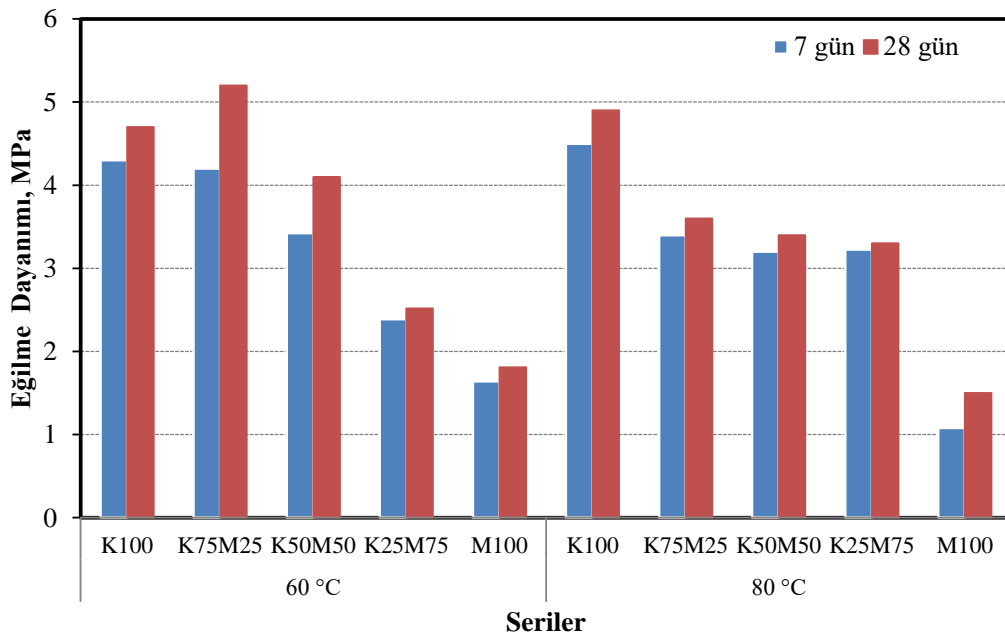
Ultrases geçiş hızı ölçümleri ile jeopolimer numunelerinin sürekliliği, homojenliği, muhtemel çatlak ve hasarları gibi birçok değişken değerlendirilebilir. Jeopolimer harç numunelerinin 7 ve 28 günlük ultrases geçiş hızı ölçüm değerlerinin kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi Şekil 8’de verilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, karışım serilerinde M ikamesi arttıkça ultrases geçiş hızları da genel olarak düşmektedir. Fakat 60 °C sıcaklıkta kürlenmiş serilerden, K100 serisi ile K75M25 serisinin ultrases geçiş hızı değerleri arasında önemli bir fark oluşmadığı (7 günde %1,7 ve 28 günde %3,4) tespit edilmiştir. Bu durum, %25 M ikamesinin filler malzeme olarak görev yapıp boşlukları daha iyi doldurmasına, matriste daha sürekli ve homojen bir yapı oluşturmasına bağlanabilir. Araştırmacılar [27, 28], filler malzemelerin harçlarda boşlukları doldurduğu ve bu sebeple ultrases geçiş hızı değerlerini artırdığını belirlemişlerdir. Jeopolimer karışımlarda, %25’ten daha yüksek M ikamesinin kullanıldığı serilerde, ultrases geçiş hızı değerleri azalmıştır. Önce 60 °C sıcaklıkta, daha sonra 7 ve 28 gün boyunca ortam şartlarında (havada) kürlenmiş M100 serisinin ultrases geçiş hızı değerleri, K100 serisine göre sırasıyla; %29 ve %35 oranında azalmıştır. Yine aynı şekilde, önce 80 °C sıcaklıkta daha sonra 7 ve 28 gün boyunca ortam şartlarında (havada) kürlenmiş M100 serisinin ultrases geçiş hızı değerleri ise K100 serisine göre her iki kür süresinde %48 oranında azalmıştır. Bunun sebebi, matriste alümina-silikat kaynağı sağlayan ve Si-O-Al bağlarını oluşturan pişmiş kil miktarının azalmasına bağlanabilir [29]. Sistemde yeterli miktarda alümina-silikat olmaması jeopolimerizasyon gelişimini azaltarak süreksizlik oluşturmaktadır. Bunun da ultrases geçiş hızı değerlerini düşürdüğü sonucuna varılmıştır. Jeopolimer harçların kür süresi arttıkça ultrases geçiş hızı değerlerinde artış görülmektedir. Ultrases geçiş hızı değerlerine genel olarak bakıldığında, 60 °C sıcaklıkta kürlenmiş 28 günlük K100 karışımının ultrases geçiş hızı, en yüksek değere sahiptir. Kür sıcaklığının ultrases geçiş hızı değerlerine etkisi incelendiğinde, 60 °C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin geçiş hızı değerleri, tüm karışımlarda ve kür sürelerinde daha yüksek çıkmıştır. Bu durum, priz sırasında daha yüksek kür sıcaklığına maruz kalan karışımların su kaybına bağlı olarak matriste çatlakların artmasından kaynaklanmıştır.



Şekil 8. Jeopolimer harçların ultra ses geçiş hızlarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.

D. Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

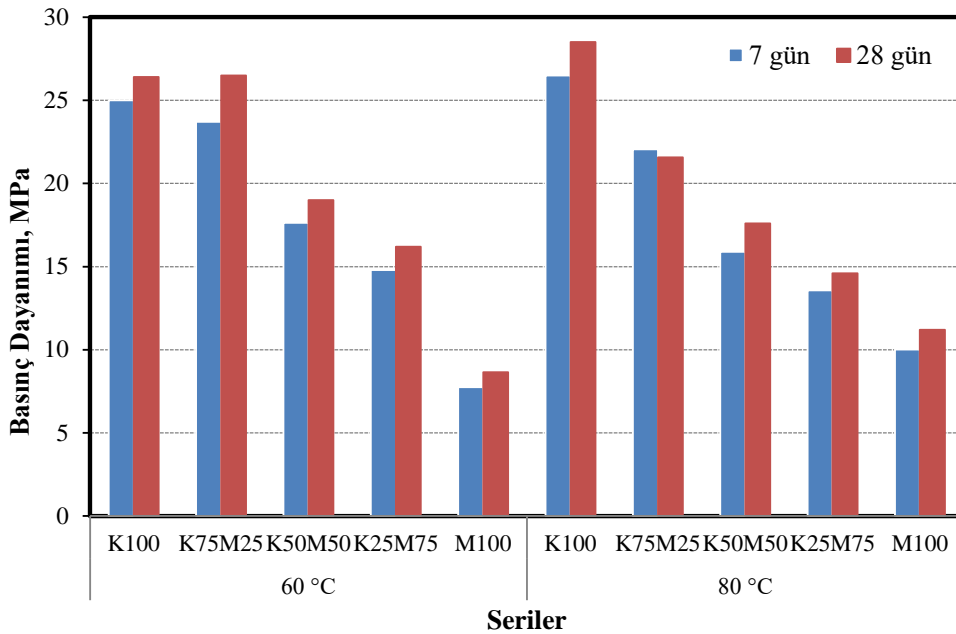
Laboratuvar ortamında 7 ve 28'inci günlere kadar ortam (hava) kürüne tabi tutulan numunelere, deney gününde üç noktalı eğilme dayanımı deneyi uygulanmıştır. Jeopolimer harç numunelerinin eğilme dayanımı değerlerinin kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi Şekil 9'da sunulmuştur. Eğilme dayanımları, karışımlardaki M ikamesi arttıkça genel olarak düşüş göstermiştir. En yüksek eğilme dayanımları; 60 °C'de kürlenmiş 28 günlük K75M25 serisi ve 80 °C'de kürlenmiş 28 günlük K100 serileridir. Karışımda M ikamesi arttıkça, eğilme dayanımları da 60 °C'lik kür yapılan serilerde ilk 7 günde %62 (M100), 28'inci günde %61 (M100) oranına kadar azalmıştır. Aynı şekilde 80 °C'lik kür sonrasında serilerin eğilme dayanımlarında da ilk 7 günde %76 (M100), 28'inci günde ise %69 (M100) oranına kadar kayıp tespit edilmiştir.



Şekil 9. Jeopolimer harçların eğilme dayanımlarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.

E. Basınç Dayanımı Deney Sonuçları

Jeopolimer harç numunelerinin 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi Şekil 10'da görülmektedir. Şekil 10 incelendiğinde, 28 günlük kür sonrasında en yüksek basınç dayanımı (28,50 MPa) 80 °C'de kürlenen K100 serisinden, en düşük basınç dayanımı (8,65 MPa) ise 60 °C'de kürlenen M100 serisinden elde edilmiştir. Deney sonuçlarına göre, her iki kür sıcaklığında da karışımlarda M'nin %25'ten daha fazla ikame edilmesi ile basınç dayanımları düşmüştür. Kür sıcaklığı 60 °C uygulanan serilerde; K yerine M'nin %100 oranına kadar ikame edilmesi ile 28'inci gündeki basınç dayanımları %67,2 oranında, 80 °C kür uygulanan serilerde ise %60,7 oranına kadar azalmıştır. Düşük sıcaklıkta (60 °C) kürlenen K100 ve K75M25 serilerinin basınç dayanımları arasında ihmal edilebilir bir fark (28 gün kür süresinde %0,3) oluşmuştur. Bu durum, literatürdeki çalışmalara [18, 30] benzer şekilde, karışımdaki M'nin %25 oranında ikamesi ile jeopolimerizasyonu sağlayacak K miktarının yeterli miktarda jel yapısının oluşması sağlanmıştır. Karışımda %25 oranında kullanılan M'nin, matrisin boşluklu yapısını doldurarak basınç dayanımına katkıda bulunduğu düşünülmektedir.



Şekil 10. Jeopolimer harçların basınç dayanımlarının kür sıcaklıkları ve serilere göre değişimi.

M ikamesi işlenebilirliği artırdığından, karışımın daha düşük su/bağlayıcı oranlarında üretilebilmesi mümkündür. Ancak, %25'ten daha yüksek ikamelerde üretilen K50M50, K25M75 ve M100 karışımlarında her iki kür sıcaklığında da basınç dayanımlarında azalma belirlenmiştir. Bunun sebebi ortamda jeopolimerizasyonu sağlayacak yeterli alümina-silikatların bulunmamasına bağlanabilir. Buna ilave olarak, inert yapıdaki M'nin matrisin homojenliğini bozduğu ve basınç dayanımlarında düşüşe neden olduğu düşünülmektedir. Isıl kürün basınç dayanımlarına etkisi incelendiğinde ise K100 ve M100 karışımları dışındaki bütün karışımlarda kür sıcaklığının yükselmesi basınç dayanımlarını düşürmüştür. Sıcaklık arttıkça basınç dayanımları 7'nci günde %10 (K50M50), 28'inci günde %19 (K75M25) oranında azalmıştır. Yüksek kür sıcaklığı etkisinde kalan K100 serisinin basınç dayanımının artması, polikondansasyon ve sert yapı oluşumunu sağlayan pişmiş kil atığındaki amorf fazlarının başlangıçta çözünme hızının artmasına bağlıdır [31,32]. Diğer serilerde kür sıcaklığı yükseldikçe basınç dayanımlarının düşmesi rötre ve dehidrasyondan kaynaklanan mikro ölçekteki çatlama ve jeopolimerik jel rötresi ile ilişkilidir [33].

IV. SONUÇ VE ÖNERİLER

DeneySEL çalışmalar kapsamında elde edilen sonuçlara göre yapılan değerlendirmeler aşağıda sunulmuştur.

- Yayılma tablası deneyi sonuçlarından, karışımlardaki M ikamesinin artması ile jeopolimer serilerinin işlenebilirlik özelliklerinin arttığı tespit edilmiştir.
- Birim hacim ağırlık deneyi sonuçlarına göre karışımlardaki M ikamesi ve kür sıcaklığı arttıkça, jeopolimer serilerinin birim hacim ağırlıklarının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum; M'nin özgül ağırlığının pişmiş kil atığına göre daha düşük olmasına ve 24 saatlik sıcak kürleme ile numuneler üzerinde oluşan termal çatlak artışından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- Karışım serilerinde M ikamesi arttıkça, ultrases geçiş hızları da basınç dayanımlarına benzer şekilde azalmıştır. Kür sıcaklığının ultrases geçiş hızı değerlerine etkisi incelendiğinde ise 60°C sıcaklıkta kürlenmiş numunelerin ultrases geçiş hızı değerleri, 80 °C'de kürlenmiş serilerden daha yüksek olmuştur. Bu durum, yüksek kür sıcaklığı etkisinde kalan karışımların su kaybı ile birlikte matriste çatlak oluşumunun artmasından kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmiştir. Ayrıca, tüm serilerde kür süresi (28 günde) arttıkça ultrases geçiş hızı değerleri de artmış, böylece jeopolimer harç numunelerinin daha boşluksuz hale geldiği tespit edilmiştir.
- Eğilme ve basınç dayanımları incelendiğinde, M'nin düşük Si ve Al içeriği nedeniyle yetersiz jeopolimerizasyon oluşturduğu, bu sebeple karışımlarda %25'ten daha yüksek oranda M ikame edilmesi ile eğilme ve basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Isıl kürün basınç dayanımlarına etkisi incelendiğinde ise; genel olarak kür sıcaklığının yükselmesi, basınç dayanımlarını düşürmüştür. Karışımlarda %100 oranında K kullanımı ile belirli dayanımlarda (25,0-28,50 MPa) jeopolimer harçların üretilebileceği görülmüştür. Bununla birlikte, K'ye %25 oranında M ikame edilmesi, karışımın işlenebilirliğini iyileştirmiş ve 60 °C kür sonrasındaki mekanik özelliklerinde ihmal edilebilir bir fark oluşturduğu görülmüştür.
- Genel olarak, jeopolimer harç üretiminde %25 oranına kadar M ilavesi, %100 K ile üretilen harçların özelliklerini önemli ölçüde değiştirmemektedir. Ancak M'nin karışımdaki miktarı %25 üzeri oranlarda kullanıldığında, K ile üretilen jeopolimerlerin fiziksel ve mekanik özellikleri önemli ölçüde değişmektedir.
- Sonuç olarak, K ile üretilen jeopolimer harçlara, optimum ağırlıkça %25'e varan oranlarda M ikamesinin yapılabileceği değerlendirilmektedir. Bu miktarlardan daha yüksek M ikame edilmesi, harçların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Jeopolimer harç üretimlerinde K ve M'nin kullanılması ile hem atık malzemeler değerlendirilebilecek hem de çimento esaslı kompozitlere alternatif, sürdürülebilir ve ekonomik harç üretimi gerçekleştirilebilecektir.

Daha sonra yapılacak olan çalışmalarda, jeopolimer harçlarda oluşan çatlak gelişimini azaltıcı araştırmalar ile farklı kür sıcaklık ve süreleri üzerine üretim süreçlerini iyileştirici çalışmalar yapılabilir.

TEŞEKKÜR

Yapılan bu çalışma, 2021-02.BŞEÜ.03-02 numaralı proje kapsamında yapılmış olup yazarlar desteğinden ötürü Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- [1] Chen, C., Habert, G., Bouzidi, Y., & Jullien, A. (2010) Environmental impact of cement production: Detail of the processes and cement plant variability evaluation. *J. Clean. Prod.*, 18, 478-485.
- [2] Gao, T., Shen, L., Shen, M., Liu, L., Chen, F., & Gao, L. (2017). Evolution and projection of CO₂ emissions for China's cement industry from 1980 to 2020. *Renewable and sustainable energy reviews*, 74, 522-537.
- [3] Zawrah, M. F., Sadek, H. E. H., Ngida, R. E., Sawan, S. A., & El-Kheshen, A. A. (2022). Effect of low-rate firing on physico-mechanical properties of unfoamed and foamed geopolymers prepared from waste clays. *Ceramics International*, 48(8), 11330-11337.
- [4] Podolsky, Z., Liu, J., Dinh, H., Doh, J. H., Guerrieri, M., & Fragomeni, S. (2021). State of the art on the application of waste materials in geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00637.
- [5] Khalil, M. G., Elgabbas, F., El-Feky, M. S., & El-Shafie, H. (2020). Performance of geopolymer mortar cured under ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 242, 118090.
- [6] Poloju, K. K., & Srinivasu, K. (2021). Impact of GGBS and strength ratio on mechanical properties of geopolymer concrete under ambient curing and oven curing. *Materials Today: Proceedings*, 42, 962-968.
- [7] Hardjito, D. (2005). Studies of fly ash-based geopolymer concrete (Doctoral dissertation, Curtin University).
- [8] Hu, W., Nie, Q., Huang, B., Shu, X., & He, Q. (2018). Mechanical and microstructural characterization of geopolymers derived from red mud and fly ashes. *Journal of Cleaner Production*, 186, 799-806.
- [9] Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 8(3), 283-314.
- [10] Reig, L., Tashima, M. M., Borrachero, M. V., Monzó, J., Cheeseman, C. R., & Payá, J. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials*, 43, 98-106.
- [11] Hwang, C. L., Yehualaw, M. D., Vo, D. H., Huynh, T. P., & Largo, A. (2019). Performance evaluation of alkali activated mortar containing high volume of waste brick powder blended with ground granulated blast furnace slag cured at ambient temperature. *Construction and Building Materials*, 223, 657-667.
- [12] Hebhoub, H., Aoun, H., Belachia, M., Houari, H., & Ghorbel, E. (2011). Use of waste marble aggregates in concrete. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1167-1171.
- [13] Li, L. G., Huang, Z. H., Tan, Y. P., Kwan, A. K. H., & Chen, H. Y. (2019). Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar. *Journal of Cleaner Production*, 210, 55-65.
- [14] Gencel, O., Özel, C., Köksal, F., Erdoğan, E., Martínez-Barrera, G., & Brostow, W. (2012). Atık mermer ile yapılan beton parke taşlarının özellikleri. *Temiz üretim dergisi*, 21 (1), 62-70.
- [15] Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, M., & Auda, E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and building materials*, 50, 28-41.
- [16] Tekin, I. (2016). Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Construction and Building Materials*, 127, 607-617.
- [17] Coppola, B., Palmero, P., Montanaro, L., & Tulliani, J. M. (2020). Alkali-activation of marble sludge: Influence of curing conditions and waste glass addition. *Journal of the European Ceramic Society*, 40(11), 3776-3787.
- [18] Tekin, İ., Gençel, O., Gholampour, A., Oren, O. H., Köksal, F., & Ozbakkaloglu, T. (2020). Recycling zeolitic tuff and marble waste in the production of eco-friendly geopolymer concretes. *Journal of Cleaner Production*, 268, 122298.
- [19] Ahmad, M., & Rashid, K. (2022). Novel approach to synthesize clay-based geopolymer brick: Optimizing molding pressure and precursors' proportioning. *Construction and Building Materials*, 322, 126472.
- [20] Munir, M. J., Kazmi, S. M. S., & Wu, Y. F. (2017). Efficiency of waste marble powder in controlling alkali-silica reaction of concrete: A sustainable approach. *Construction and Building Materials*, 154, 590-599.
- [21] TS EN 12390-1. (2021). Beton-Sertleşmiş Beton Deneyleri Bölüm 1: Deney Numunesi ve Kalıplarının Şekil, Boyut ve Diğer Özellikleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [22] TS EN 12350-5. (2019). Beton – Taze beton deneyleri - Bölüm 5: Yayılma tablası deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [23] TS EN 772-4. (2000). Kâğır Birimler, deney metotları- Bölüm 4: Tabii taş kâğır birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile boşluksuz ve boşluklu birim hacim kütlelerinin tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- [24] TS EN 12504-4. (2021). Yapılarda beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- [25] TS EN 196-1.(2016). Çimento test yöntemleri-Bölüm 1: Dayanımın belirlenmesi,TürkStandartlarıEnstitüsü, Ankara.
- [26] Yamanel, K., Durak, U., İlkentapar, S., Atabey, İ. İ., Karahan, O., & Duran, C. (2019). Influence of waste marble powder as a replacement of cement on the properties of mortar. *Revista de la Construcción. Journal of Construction*, 18(2), 290-300.
- [27] Binici, H. & O. Aksogan (2018). Durability of concrete made with natural granular granite, silica sand and powders of waste marble and basalt as fine aggregate. *Journal of Building Engineering*. 19, 109-121.
- [28] Tammam, Y., Uysal, M., & Canpolat, O. (2022). Effects of alternative ecological fillers on the mechanical, durability, and microstructure of fly ash-based geopolymer mortar. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(12), 5877-5900.
- [29] Thakur, A. K., Pappu, A., & Thakur, V. K. (2019). Synthesis and characterization of new class of geopolymer hybrid composite materials from industrial wastes. *Journal of Cleaner Production*, 230, 11-20.
- [30] Kabirova, A., Uysal, M., Hüsem, M., Aygörmez, Y., Dehghanpour, H., Pul, S., & Canpolat, O. (2022). Physical and mechanical properties of metakaolin-based geopolymer mortars containing various waste powders. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-20.
- [31] Rovnanik, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and building materials*. 24(7), 1176-1183.
- [32] Ulugöl, H., Kul, A., Yıldırım, G., Şahmaran, M., Aldemir, A., Figueira, D., & Ashour, A. (2021). Mechanical and microstructural characterization of geopolymers from assorted construction and demolition waste-based masonry and glass. *Journal of Cleaner Production*, 280, 124358.
- [33] Mo, B. H., Zhu, H., Cui, X. M., He, Y., & Gong, S. Y. (2014). Effect of curing temperature on geopolymerization of metakaolin-based geopolymers. *Applied clay science*, 99, 144-148.