



## FARKLI SİLİS VE ALÜMİN KAYNAKLARININ ATIK MERMER TOZU ESASLI ALKALİ İLE AKTİVE EDİLMİŞ HARÇLARIN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

Serhat ÇELİKTEN, İsmail İsa ATABEY\*

Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, Türkiye

| Anahtar Kelimeler   | Öz   |
|---|--|
| <i>Alkali Aktivasyon,<br/>Atık Mermer Tozu,<br/>Atık Cam Tozu,<br/>Kalsiyum Alüminat<br/>Çimentosu.</i> | Bu çalışmada mermer kesim atölyesinden kesim atığı olarak doğaya bırakılan atık mermer tozları alkali ile aktive edilerek çimentosuz harçlar üretilmiştir. Üretilen harçların fiziksel ve mekanik özellikleri üzerine atık cam tozu ile kalsiyum alüminatlı çimentonun etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, mermer tozu yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında atık cam tozu ile kalsiyum alüminatlı çimento ayrı ayrı veya %5+%5, %10+%10 ve %15+%15 oranlarında birlikte ikame edilerek harç karışımları oluşturulmuştur. Harçlar üzerinde yayılma tablası, birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, eğilme ve basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mermer tozu yerine %10+%10 oranlarında atık cam tozu ile kalsiyum alüminatlı çimento birlikte ikame edilen harçlarda en yüksek mekanik özellikler elde edilmiştir. Bu harçlarda 28 günlük eğilme ve basınç dayanımları sırasıyla 4.7 MPa 26.3 MPa olmuştur. Deney sonuçları mermer tozu yerine silis kaynağı olarak atık cam tozu ve alümin kaynağı olarak da kalsiyum alüminatlı çimento ikame edilmesinin, atık mermer tozunun çimentosuz harç üretimiyle geri kazanım potansiyelini artırdığını göstermiştir. |

## THE EFFECT OF DIFFERENT SILICA AND ALUMIN SOURCES ON THE PROPERTIES OF THE WASTE MARBLE POWDER BASED ALKALI-ACTIVATED MORTARS

| Keywords   | Abstract   |
|--|--|
| <i>Alkali Activation,<br/>Waste Marble Powder,<br/>Waste Glass Powder,<br/>Calcium Aluminate Cement.</i> | In this study, cementless mortars are produced with activation of waste marble dust, a waste material disposed from stone cutting plants, The influences of waste glass powder and calcium aluminate cement on the physical and mechanical properties of the mortars. For this purpose, mortar mixtures are composed replacing 10%, 20% and 30% of waste marble dust by waste glass powder and calcium aluminate cement separately and also together at the 5%+5%, 10%+10% and 15%+15% proportions by weight. The flow table, unit weight, ultrasound pulse velocity, flexural strength and compressive strength test are performed on the mortars. The highest mechanical properties are achieved on the mortars including 10%+10% waste glass powder + calcium aluminate cement by waste marble dust. The flexural and compressive strength of these mortars are 4.7 MPa and 26.3 MPa at the age of 28 days, respectively. The experimental results showed that substituting waste glass powder as a silica source and calcium aluminate cement as a source of alumina instead of marble dust, increased the recovery potential of waste marble powder through cementless mortar production. |

### Alıntı / Cite

Çelikten, S., Atabey, İ.İ., (2021). Farklı Silis ve Alümin Kaynaklarının Atık Mermer Tozu Esaslı Alkali İle Aktive Edilmiş Harçların Özelliklerine Etkisi, Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 9(2), 396-405.

### Yazar Kimliği / Author ID (ORCID Number)

S. Çelikten, 0000-0001-8154-7590  
İ.İ. Atabey, 0000-0002-7026-5579

### Makale Süreci / Article Process

|   |            |
|---|------------|
| <b>Başvuru Tarihi / Submission Date</b> | 21.02.2021 |
| <b>Revizyon Tarihi / Revision Date</b>  | 12.05.2021 |
| <b>Kabul Tarihi / Accepted Date</b>     | 14.05.2021 |
| <b>Yayın Tarihi / Published Date</b>    | 20.06.2021 |

\* İlgili yazar / Corresponding author: ismailatabey@nevsehir.edu.tr, +90-384-228-1000

## 1. Giriş (Introduction)

Portland çimentosu üretimi atmosfere yüksek CO<sub>2</sub> salınımı sebebiyle çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu nedenle çimentolu üretilen yapı malzemelerine ek olarak çimentosuz üretilen yeni çevreci yapı malzemelerine talep giderek artmaktadır (Yurt, 2020; Yurt ve Emiroğlu, 2020). Bununla birlikte günümüzde giderek artan katı atıklar önemli çevresel sorunlar oluşturmaktadır. Mermer atölyesi kesim atıkları da araştırmacılar tarafından çimentolu ve çimentosuz harç yapımı için talep gören katı atıklar arasındadır. Türkiye yaklaşık 3782 milyon m<sup>3</sup> mermer rezervi ile Dünyadaki toplam mermer rezervinin %40'ına sahiptir (Singh vd., 2019). Türkiye'de farklı renk ve karakteristiğe sahip 250'nin üzerinde mermer çeşidi bulunmaktadır (Çelik ve Sabah, 2008). Türkiye'de işlenen farklı türdeki mermer bloklardan kayda değer miktarda atık malzeme ortaya çıkmaktadır. Mermer maden ocaklarından gelişigüzel şekillerde çıkarılan mermer bloklar istenilen şekillerdeki daha küçük bloklar halinde kesilir. Bu kesme işlemi sırasında mermerin yaklaşık %25'i kesim sırasında bıçaklara dökülen suyla birlikte atık mermer çamurunu oluşturur (Karaşahin ve Terzi, 2007). Daha sonra bu çamur mermer kesim atölyesinden kanallar vasıtasıyla dışarı atılır ve kendiliğinden kurumaya bırakılır (Singh vd., 2019). Kuruyan çamurdan arta kalan mermer tozu özellikle yaz aylarında toz oluşumuna yol açmakta ve çevreye dağılan bu tozların tarıma ve canlı sağlığına olumsuz etkileri olmaktadır. Bu nedenle atık mermer tozunun geri kazanımı ekonomik ve ekolojik açıdan önem arz etmektedir. Ayrıca diğer bir katı atık olan camlar geri dönüştürülemez ise depolama alanlarında bekletilmektedir. Birleşmiş Milletler, yıllık ortaya çıkan katı atıkların 200 milyon ton civarında olduğunu, bunun %7'sini atık camın oluşturduğunu tahmin etmektedir. Türkiye'de ise bu atık cam miktarının 120000 ton olduğu ve bunun ancak 80000 tonu geri dönüştürülebildiği belirtilmektedir (Topçu ve Canbaz, 2004).

Atıkların kullanımında kristal yapıları kadar kimyasal kompozisyonu da önemlidir (Bingöl ve Balaneji, 2019). Yüksek oranda Ca içeren atık mermer tozunun inşaat sektöründe çeşitli uygulamalarda geri kazanımı ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır (Zorluer ve Demirbaş, 2013; Binici vd., 2007; Saboya vd., 2007). Bu çalışmalardan bazıları da atık mermer tozunun çimento yerine belirli oranlarda ikame edilmek suretiyle çimento esaslı bağlayıcılarda kullanılabilirliği üzerinedir (Singh vd. 2019; Aliabdo vd., 2014; Ergün, 2011; Shirule vd., 2012). Yapılan çalışmalar mermer tozunun özellikle boşluk doldurma etkisiyle çimento esaslı bağlayıcıların mekanik özelliklerini geliştirmede etkili olduğunu göstermiştir (Ergün, 2011). Diğer taraftan, atık mermer tozunun çimento yerine optimum ikame oranı %7.5 (Ergün, 2011), %10 (Shirule vd., 2012), veya %10-%15 (Singh vd., 2019) gibi düşük oranlarda kaldığından, bu atık malzemenin tüketilmesi için alternatifler araştırılmıştır. Bu nedenle atık mermer tozunun alkali ile aktive edilmiş bağlayıcı üretiminde kullanımı ile daha yenilikçi bir bağlayıcı elde edilmeye çalışılmıştır (Tekin, 2016).

Alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar ile ilgili çalışmalar araştırmacılar tarafından son zamanlarda ilgi görmektedir. Ayrıca atık tozların alkali aktivatörler kullanılarak harç üretilmesi ile ilgili araştırmalar endüstriyel atıkların çevresel etkileri nedeniyle yaygınlaşmaktadır (Çelikten ve Atabay, 2021). Ancak, araştırmalarımıza göre atık mermer tozu ile yenilikçi bağlayıcı elde edilmesi hakkında literatürde kısıtlı çalışma bulunmaktadır. Coppola vd. (2020), atık mermer tozunu alkali ile aktive ederek cam tozunun farklı kür koşullarına etkisini araştırmışlardır. Havada, suda ve nemli ortamda kür uygulayarak optimum kür şartlarını belirlemişlerdir. Cam tozu ilave edilmesi hava küründe hem dayanımı arttırdığını hem de büzülme özelliklerini iyileştirdiğini ifade etmişlerdir. Salihoğlu ve Salihoğlu (2018), mermer kesim atıklarını 8M NaOH ile aktive ederek atık geri dönüşüm potansiyelini araştırmışlardır. %25 atık mermer, %25 uçucu kül, %25 yüksek fırın cürufu ve %25 çimento ile karışım hazırlayarak 52 MPa dayanıma ulaşarak mermer kesim atıklarının alkali aktivatörler ile geri dönüşümünün uygun olduğunu öne sürmüşlerdir.

Alkali ile aktive edilmiş harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinde harç içerisine giren bağlayıcı malzemenin kimyasal içeriği önemli rol oynar. İstenilen mekanik özelliklerin elde edilebilmesi için başlangıç malzemelerinde uygun miktarda Silis (Si) ve Alümin (Al) bulunması gerekmektedir. Atık mermer tozu yüksek oranda Ca, atık cam tozu yüksek oranda Si içerdiği için daha düşük miktarda yer alan Al miktarını arttırmak için zengin Al içeren bir malzeme ilave edilerek bileşimin değiştirilmesi bağlayıcının özelliklerini iyileştirmektedir (Atabay ve Ay; 2021). Al kaynağı olarak kullanılabilir kalsiyum alüminat çimentosu, araştırmalarda yaygın olarak portland çimentolu harç/beton üretiminde etkisi üzerine çalışmalar yapılmaktadır (Davraz vd. 2021; Yılmaz vd. 2018). Ancak son zamanlarda Si bakımından zengin toz atıkların alkali ile aktive edilmesi ile elde edilen harçlarda kalsiyum alüminat çimentosunun Al kaynağı olarak bu harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmaktadır (Atabay ve Ay; 2021).

Atık mermer tozu gibi yüksek kalsiyum içerikli ham malzemelerin alkali ile aktive edilmesi ile elde edilen bağlayıcılarda görülen jel oluşumları genellikle kalsiyum alümina silikat hidrat (C-A-S-H) (Provis ve Bernal, 2014; Wang vd., 1995) ve sodyum ilaveli kalsiyum alümina silikat hidrat (N-C-A-S-H) şeklinde tanımlanmıştır (Coppola vd., 2020; Puertas vd., 2000; Kaya vd., 2020). Bununla birlikte, atık mermer tozu amorf silisyum ve alüminyum

içeriği bakımından fakir olduğundan, bu tanımlanan jellerin oluşumlarının sınırlı düzeyde meydana gelmesi ve atık mermer tozundan elde edilen alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların dayanımları düşük seviyelerde kalması beklenir. Tekin (2016), içeriğinde %80 oranında mermer tozu ve %20 oranında Bayburt taşı atığı bulunan 10M NaOH ile üretilen bağlayıcılar için en yüksek 28 günlük basınç dayanımını yaklaşık 15 MPa olarak rapor etmiştir. Ayrıca, yazar benzer içeriğe sahip daha düşük NaOH içeriği ile üretilen bağlayıcılarda daha düşük basınç dayanımı elde etmiştir. Ayrıca literatürde, atık mermer tozu ile üretilen alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların özellikleri ile ilgili yeterli çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada amorf silis kaynağı olarak diğer bir endüstriyel atık malzeme olan atık cam tozu ve amorf alüminyum kaynağı olarak ise kalsiyum alüminatlı çimento atık mermer tozu yerine kullanılmıştır. Üretilen harçların işlenebilirlik, birim ağırlık, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ultrases geçiş hızı özellikleri araştırılmıştır. Atık mermer tozu esaslı harçların özelliklerine atık cam tozu ve kalsiyum alüminatlı çimentonun ayrı ayrı ve birlikte ilave edilmesi ile uygun karışım içeriği araştırılmıştır.

## 2. Materyal ve Yöntem (Material and Method)

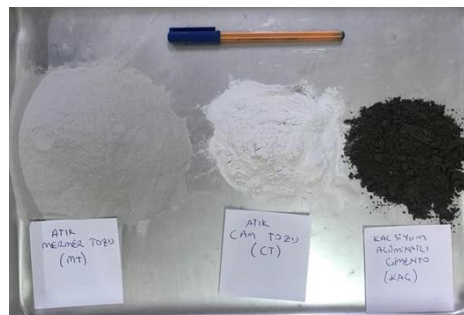
Harç karışımlarında alkali ile aktive etmek amacıyla kullanılan hammaddelerden atık mermer tozu çamur halinde Nevşehir’de bulunan Dokuz Kardeşler mermer kesim atölyesinden, atık cam tozu Akcihan Cam Geri Dönüşüm’den ve kalsiyum alüminatlı çimento da Çimsa Mersin Çimento Fabrikası’ndan temin edilmiştir. Çamur halinde temin edilen mermer çamuru etüvde 105°C’de değişmeyen ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuştur. Kurutulmuş mermer tozu 125 µm göz açıklıklı elekten elenmiş ve elekten geçen malzeme harç karışımlarında kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan atık mermer tozu (MT), atık cam tozu (CT) ve kalsiyum alüminatlı çimentonun (KAÇ) kimyasal içerikleri Tablo 1’de ve görünümleri de Şekil 1’de sunulmuştur. Harç karışımlarında Nevşehir şebeke suyu ve özgül ağırlığı 2.673, su emme değeri %1.94 olan dere kumu kullanılmıştır. Kullanılan kumun tane dağılımı Tablo 2’de verilmiştir.

**Tablo 1.** MT, CT ve KAÇ’ın Kimyasal Özellikleri (Chemical Properties of MT, CT ve KAÇ)

| ÖZELLİK                            | KAÇ   | MT    | CT    |
|------------------------------------|-------|-------|-------|
| SiO <sub>2</sub> (%)               | 3.60  | 5.06  | 69.42 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 39.80 | 0.18  | 1.09  |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | 17.05 | 1.26  | 0.48  |
| CaO (%)                            | 36.20 | 58.1  | 8.27  |
| MgO (%)                            | 0.65  | 0.38  | 4.25  |
| SO <sub>3</sub> (%)                | 0.04  | 0.08  | -     |
| Na <sub>2</sub> O (%)              | 0.16  | 0.79  | 12.31 |
| K <sub>2</sub> O (%)               |       | -     | -     |
| Cl <sup>-</sup> (%)                | 0.009 | -     | -     |
| K. K. (%)                          | 0.30  | 34.15 | -     |
| Yoğ. (g/cm <sup>3</sup> )          | 3.25  | 2.82  | 2.89  |

**Tablo 2.** Dere Kumu Tane Dağılımı (Sieve Analysis of River Sand)

| Elek Çapı, mm | Geçen, % |
|---------------|----------|
| 4.00          | 99.1     |
| 2.00          | 65.1     |
| 1.00          | 40.2     |
| 0.5           | 21.3     |
| 0.25          | 9.9      |
| 0.125         | 3.7      |
| 0.063         | 0.9      |



**Şekil 1.** MT, CT ve KAÇ Görünümü (Appearances of MT, CT and KAÇ)

Bu deneysel çalışmada, atık mermer tozu içeriğine göre 4 seride 10 farklı harç karışımı üretilmiştir. Karışım hazırlamak için kullanılan malzeme miktarları Tablo 3’de verilmiştir. Tüm harç karışımlarında su/bağlayıcı oranı 0.5, kum/bağlayıcı oranı ise 3 olarak belirlenmiştir. Karışımlarda NaOH su içerisinde eritilerek 10 molar (M)

solüsyon elde edilecek miktarda kullanılmıştır. Bununla birlikte, karışımlar içerdikleri atık mermer tozu miktarına bağlı olarak 4 farklı seride (%100, %90, %80 ve %70) üretilmiştir. Atık mermer tozu yerine ağırlıkça %10, %20 ve %30 oranlarında atık cam tozu ve kalsiyum alüminatlı çimento ayrı ayrı veya birlikte ikame edilmiştir. Harç karışımları TS EN 196-1 (2009) standardına uygun olarak üretilmiştir. Harç üretiminde Hobart mikseri kullanılmıştır. Mikserin karıştırma kabına öncelikle bağlayıcı malzeme (atık mermer tozu, cam tozu ve kalsiyum alüminatlı çimento toplamı) içeriği ve 10M NaOH solüsyonu dökülmüş ve 140 rpm dönüş hızı ile 30 saniye boyunca karıştırılmıştır. İlk 30 saniye bitiminde mikser durdurulmadan mikserin kum haznesinden karıştırma kabına kum yavaşça dökülmüş ve toplamda 60 saniyede bu hızda karıştırılmıştır. Daha sonra karışım 30 saniye boyunca 280 rpm dönüş hızı ile 30 saniye daha karıştırılmış, bu hızlı karıştırmadan sonra da karışım 90 saniye boyunca dinlenmeye bırakılmıştır. Son olarak da 60 saniye daha 280 rpm dönüş hızı ile karıştırılan harç karışımları kalıplara dökülmeden önce 15 saniye dinlendirilmiştir. Dinlendirilen karışımdan alınan numune üzerinde TS EN 1015-3 (2006) standardına uygun olarak yayılma tablası deneyi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra karışımlar 40×40×160 mm boyutlarında 3 göze sahip harç kalıplarına üç aşamada dökülmüştür. 3 gözlü harç karışımlarına dökülen karışımlar kalıplarıyla birlikte etüve konulmuş ve 24 saat boyunca 100°C sıcaklıkta ısıl küre tabi tutulmuştur. Isıl kür işleminden sonra ise kalıplarından çıkarılan harç numuneleri laboratuvar koşullarında yaklaşık 23±2°C sıcaklıkta 28 gün bekletilmiştir. Daha sonra, 28 gün bekletilen numunelerin birim ağırlıkları belirlenerek ultrases geçiş hızı deneyi uygulanmıştır. Aynı numuneler üzerinde TS EN 1015-11 (2013) standardına uygun üç noktadan eğilme deneyi yapılarak ortadan kırılan iki parça numuneye de basınç dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir deneysel değer 3 numuneden elde edilen sonuçların ortalaması alınmak suretiyle belirlenmiştir.

**Tablo 3.** Harçların Karışım Oranları (Mixture Proportions of Mortars)

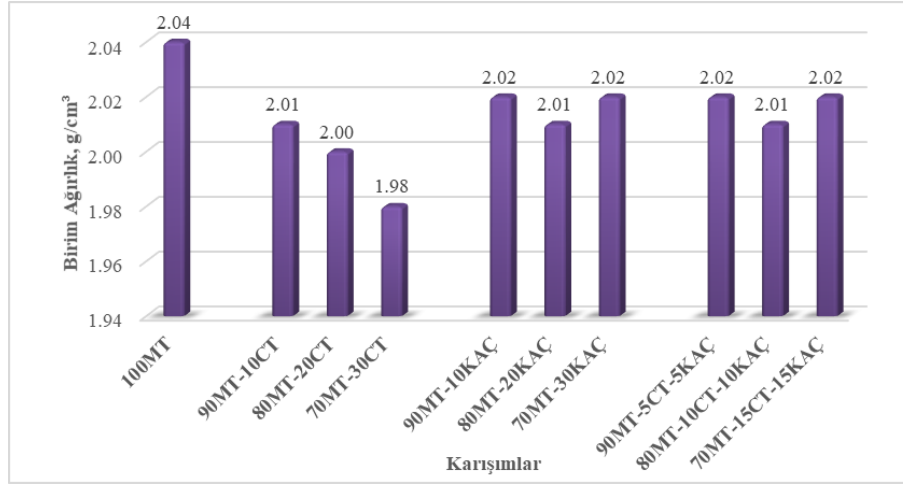
| Seri Kodu | Karışım Kodu*   | Atık Mermer Tozu (g) | Atık Cam Tozu (g) | Kalsiyum Alüminat Çimentosu (g) | Kum (g) | Su (g) | NaOH (g) |
|-----------|-----------------|----------------------|-------------------|---------------------------------|---------|--------|----------|
| 100MT     | 100MT           | 450                  | 0                 | 0                               | 1350    | 225    | 90       |
| 90MT      | 90MT-10CT       | 405                  | 45                | 0                               | 1350    | 225    | 90       |
|           | 90MT-10KAÇ      | 405                  | 0                 | 45                              | 1350    | 225    | 90       |
|           | 90MT-5CT-5KAÇ   | 405                  | 22.5              | 22.5                            | 1350    | 225    | 90       |
| 80MT      | 80MT-20CT       | 360                  | 90                | 0                               | 1350    | 225    | 90       |
|           | 80MT-20KAÇ      | 360                  | 0                 | 90                              | 1350    | 225    | 90       |
|           | 80MT-10CT-10KAÇ | 360                  | 45                | 45                              | 1350    | 225    | 90       |
| 70MT      | 70MT-30CT       | 315                  | 135               | 0                               | 1350    | 225    | 90       |
|           | 70MT-30KAÇ      | 315                  | 0                 | 135                             | 1350    | 225    | 90       |
|           | 70MT-15CT-15KAÇ | 315                  | 67.5              | 67.5                            | 1350    | 225    | 90       |

\*MT:Atık mermer tozu, CT:Atık cam tozu, KAÇ: kalsiyum alüminat çimentosu

### 3. Deneysel Sonuçlar (Experimental Results)

#### 3.1. Birim Ağırlık (Unit Weight)

Deneysel çalışmada üretilen harçların birim ağırlıkları Şekil 2’de sunulmuştur. Harçlarda en yüksek birim ağırlık değeri 2.04 g/cm<sup>3</sup> ile 100MT kodlu harçlarda gözlenirken, en düşük birim ağırlık değeri 1.98 g/cm<sup>3</sup> ile 70MT-30CT kodlu harçlarda elde edilmiştir. Harçlardaki atık cam tozu ikamesiyle birim ağırlık değerleri %3’e varan oranlarda azalırken, kalsiyum alüminatlı çimento ikamesi harçların birim ağırlıklarında kayda değer bir değişime yol açmamıştır. Bu harçların birim ağırlıklarının 100MT harçlara göre %1 ile %1.5 oranları arasında daha düşük olduğu görülmüştür. Atık cam tozu ve kalsiyum alüminatlı çimentonun mermer tozu yerine ikame oranları düşük değerlerde olduğu için birim ağırlıklara önemli bir etkisi olmamıştır.

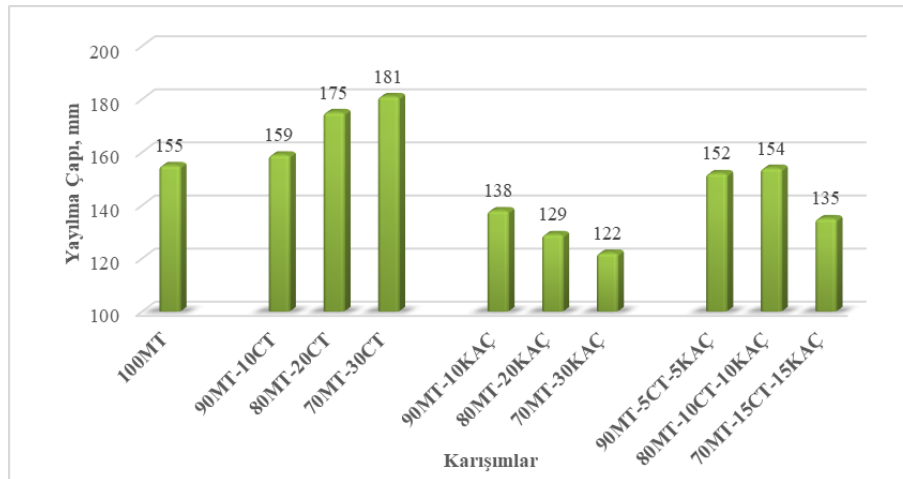


Şekil 2. Harçların Birim Ağırlıkları (Unit Weights of Mortars)

### 3.2. İşlenebilirlik (Workability)

Alkali ile aktive edilmiş mermer tozlu harçların yayılma çapları üzerine atık cam tozu, kalsiyum alüminatlı çimento ve atık cam tozu ile birlikte kullanılan kalsiyum alüminatlı çimentonun etkisi Şekil 3'de gösterilmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak sadece atık mermer tozu içeren (MT100) harçların yayılma çapları ortalama 155 mm olarak ölçülmüştür. Harçların yayılma çapları cam tozu ikamesiyle kademeli olarak artmış, ikame oranı %30'a ulaştığında da (70MT-30CT) yayılma çapı ortalama olarak 181 mm olmuştur. Daha önce yapılan çalışmalarda, atık mermer tozunun çimento yerine ikame edildiği bağlayıcılarda işlenebilirliğin de arttığı görülmüş, bunun nedeni olarak da atık cam tozunun çimentoya göre daha pürüzsüz yüzeye sahip olması gösterilmiştir (Wang vd., 2010; Terro, 2006). Bu çalışmada da atık mermer tozu yerine atık cam tozu ikamesi ile artan işlenebilirliğin nedeni olarak atık cam tozunun az pürüzlü tanecik yüzeyi gösterilebilir.

Atık mermer tozu yerine kalsiyum alüminatlı çimento kullanılan harçlarda ise ikame oranı arttıkça yayılma çapları azalmıştır. Mermer tozu yerine %30 oranında kalsiyum alüminatlı çimento (70MT-30KAÇ) kullanıldığında da yayılma çapı 122 mm'ye kadar düşmüştür. Atık mermer tozu yerine kalsiyum alüminatlı çimento ile atık cam tozunun birlikte ikame edildiği karışımlarda ise 90MT-5CT-5KAÇ ve 80MT-10CT-10KAÇ kodlu harçlarda 100MT harçlarıyla benzer yayılma çapı elde edilmiştir. Ancak, 70MT-15CT-15KAÇ kodlu harçlarda ise yayılma çapı özellikle kalsiyum alüminatlı çimento içeriği ile azalan işlenebilirlik nedeniyle 135 mm'ye kadar düşmüştür.



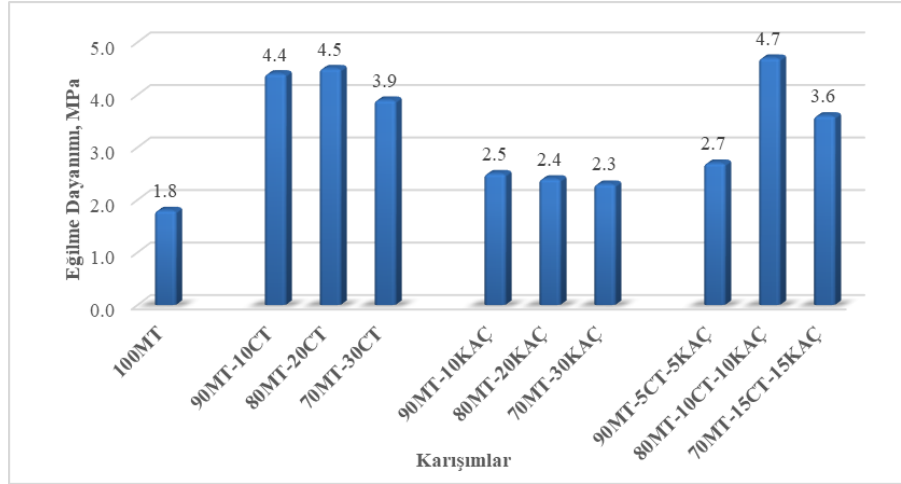
Şekil 3. Harçların Yayılma Çapları (Flow Diameters of Mortars)

### 3.3. Eğilme Dayanımı (Flexural Strength)

Çalışma kapsamında üretilen harçların eğilme dayanımları üzerine atık cam tozu, kalsiyum alüminatlı çimento ve atık cam tozu ile birlikte kullanılan kalsiyum alüminatlı çimentonun etkileri Şekil 4'de sunulmuştur. 100MT kodlu harçların eğilme dayanımı 1.8 MPa olarak belirlenmiştir. Atık mermer tozu yerine atık cam tozu ikame edilen (MT-CT) harçlarda en yüksek eğilme dayanımı 4.5 MPa ile 80MT-20CT kodlu numunelerde elde edilmiştir. Eğilme dayanımının 100MT harcına göre 80MT-20CT karışımında %150'ye varan oranlarda daha yüksek olduğu

görülmüştür. Literatürde bu çalışmada elde edilen deney sonuçlarını karşılaştırabilecek kısıtlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Coppola vd. (2020), atık mermer tozunu cam tozu ile hacimce %2,5 ve %5 yer değişiminde cam tozunun artması ile daha yüksek eğilme dayanımına ulaşmışlardır. Çalışmamızda da benzer şekilde 100MT karışımlara göre CT içeriği ile birlikte eğilme dayanımında artışlar görülmüştür.

Atık mermer tozu yerine kalsiyum alüminatlı çimento ikame edilen (MT-KAÇ) harçların eğilme dayanımlarının da 100MT harçlardan 90MT-10KAÇ karışımında 2.5 MPa ile %39'a varan oranlarda daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu harçlarda ise en yüksek eğilme dayanımı değerine 90MT-10KAÇ kodlu harçlarda ulaşılmıştır ancak %20 ve %30 KAÇ yer değişimi eğilme dayanımı değerleri de oldukça yakındır. Ayrıca, atık cam tozu ikame edilen (MT-CT) harçların eğilme dayanımlarının kalsiyum alüminat ikameli (MT-KAÇ) harçlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Üçlü karışımlarda ve tüm harçlar arasında en yüksek eğilme dayanımı değerine 80MT-10CT-10KAÇ kodlu harçlarda ulaşılmıştır. Bu harçların en yüksek eğilme dayanımı 4.7 MPa olarak belirlenmiştir.

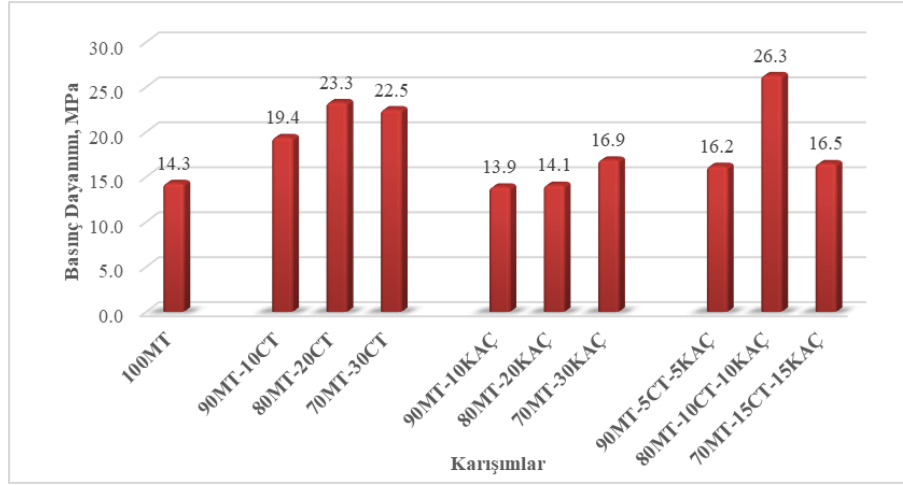


Şekil 4. Harçların Eğilme Dayanımları (Flexural Strengths of Mortars)

### 3.4. Basınç Dayanımı (Compressive Strength)

Alkali ile aktive edilmiş harçların basınç dayanımları Şekil 5'de sunulmuştur. 100MT harçların basınç dayanımları 14.3 MPa iken; 90MT-10CT harçların 19.4 MPa, 80MT-20CT harçların 23.3 MPa ve 70MT-30CT harçların basınç dayanımları da 22.5 MPa olarak elde edilmiştir. Harçlarda atık cam tozu ikamesiyle basınç dayanımları belirgin bir şekilde artmıştır. Bununla birlikte, %10 ve %20 kalsiyum alüminatlı çimento ikamesinin harçların basınç dayanımına olumlu bir etkisi görülmezken, ikame oranı %30 olduğunda 100MT harçların basınç dayanımlarına göre yaklaşık %18 oranında artış gözlenmiştir. Ayrıca üç bağlayıcının birlikte kullanıldığı (MT-CT-KAÇ) harçların tamamının basınç dayanımlarının 100MT harçlara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu çalışmada üretilen harçlarda eğilme dayanımlarında olduğu gibi basınç dayanımlarında da en yüksek değerlere 80MT-10CT-10KAÇ kodlu harçlarda ulaşılmıştır. Bu harçların basınç dayanımları 26.3 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar, alkali ile aktive edilecek bağlayıcı malzemelerdeki CaO, SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> oksitlerinin uygun oranlarda bir araya getirilmesi ile üretilen kompozit malzemelerde daha iyi mekanik özelliklerin elde edilebileceğini göstermektedir.

Daha önceki bir çalışmada, Kumar vd. (2017) tarafından uçucu kül, yüksek fırın cürufu ve metakaolen üçlü karışımı ile alkalilerle aktive edilmiş bağlayıcı üretilerek, sabit aktivatör, su ve kür koşullarında en uygun karışım elde edilmeye çalışılmıştır. En yüksek dayanım değerleri %60 uçucu kül, %25 yüksek fırın cürufu ve %15 metakaolin içeriği ile elde edilmiştir. Bu çalışmada uçucu kül özellikle SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, yüksek fırın cürufu CaO ve SiO<sub>2</sub>, metakaolin de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve SiO<sub>2</sub> kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan atık cam tozu, atık mermer tozu ve kalsiyum alüminatlı çimentonun kimyasal kompozisyonuna göre atık mermer tozu CaO, atık cam tozu SiO<sub>2</sub> ve kalsiyum alüminatlı çimento da özellikle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kaynağı olarak kullanılmıştır. Bu kaynakların birlikte kullanıldığı 80MT-10CT-10KAÇ kodlu harçlarda basınç dayanımı 100MT harçlara göre %84 daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca Jiménez vd. (2008) KAÇ çimentolarının alüminosilikatların alkali aktivasyonunda ilave Al kaynağı olarak kullanılabilirliğini ve küçük miktarda KAÇ varlığının mekanik mukavemeti iyileştireceğini ifade etmişlerdir. Önceki çalışmalarda (Vafaei ve Allahverdi, 2016; Vafaei ve Allahverdi, 2017; Fernández-Jiménez vd., 2008) KAÇ tipi çimento kullanımının alkali aktivasyon yönteminde kullanımı araştırılmış ve dayanım gelişimi belirlenmiştir.

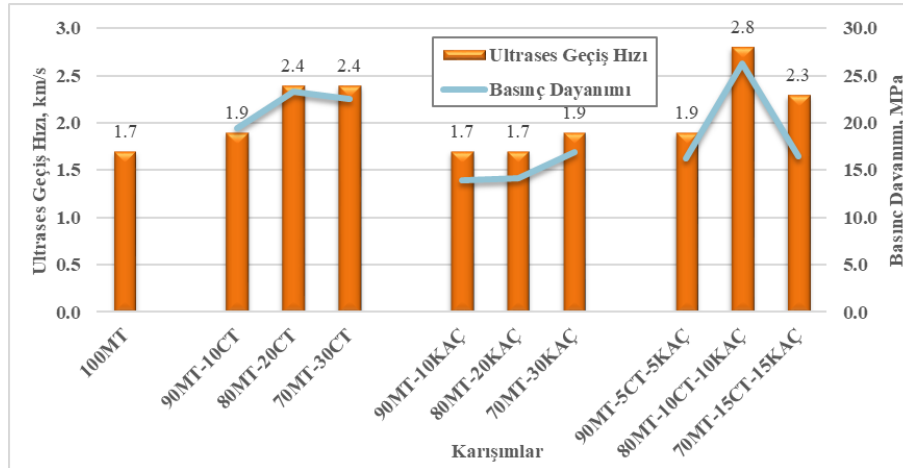


Şekil 5. Harçların Basınç Dayanımları (Compressive Strengths of Mortars)

### 3.5. Ultrases Geçiş Hızı (Ultrasonic Pulse Velocity)

Alkali ile aktive edilmiş harçların ultrases geçiş hızları Şekil 6'da sunulmuştur. 100MT harçların ultrases geçiş hızları 1.7 km/s ile sadece atık mermer tozu-kalsiyum alüminat çimentolu (MT-KAÇ) karışımlara eşit veya çok yakındır. Ancak atık mermer tozu- atık cam tozu karışımları (MT-CT) ve atık mermer tozu-atık cam tozu-kalsiyum alüminatlı çimento (MT-CT-KAÇ) karışımlarından düşüktür. Şekil 6'da görüldüğü gibi bu sonuçlar basınç dayanım değerleri ile de uyumludur. En yüksek ultrases geçiş hızına sahip 80MT-10CT-10KAÇ karışımı, 100MT karışımından yaklaşık %65 daha yüksek değerdedir.

Ultrases geçiş hızı testi uzun yıllardan beri geleneksel beton ve harçların homojenliği, basınç dayanımı ve boşluk miktarı ile ilgili fikir sahibi olma adına kullanılmaktadır (Kaplan, 1958). Basınç dayanımı ile ultrases geçiş hızı değerleri arasında benzer ilişki daha önceki çalışmalarda alkali ile aktive edilmiş bağlayıcılar için de rapor edilmiştir (Omer vd., 2015; Ghosh 2018). Bu sonuçlar, alkali aktivasyon işleminin daha iyi gerçekleştiği beton ve harçlarda boşlukların daha az olduğunu, dayanım değerlerinin de daha yüksek elde edildiğini ve ultrases geçiş hızı değerlerinin de bu bağlamda daha yüksek elde edildiğini göstermektedir.

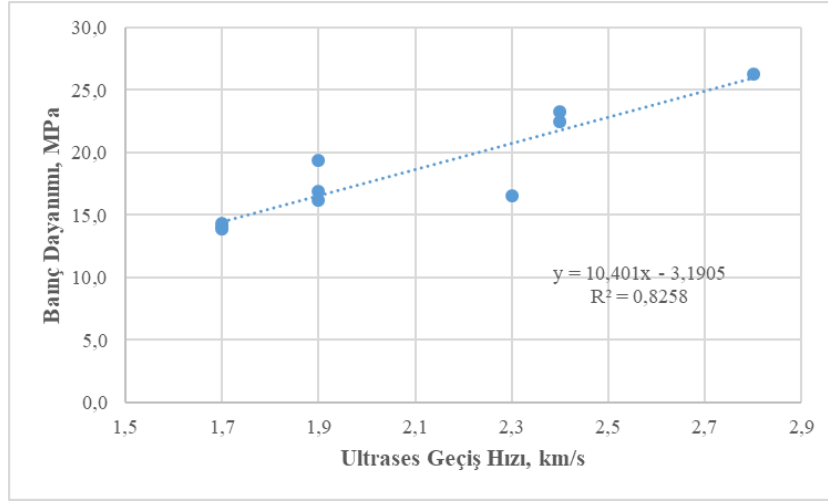


Şekil 6. Harçların Ultrases Geçiş Hızı-Basınç Dayanımı Değişimi (Variation Between Ultrasonic Pulse Velocity-Compressive Strength of Mortars)

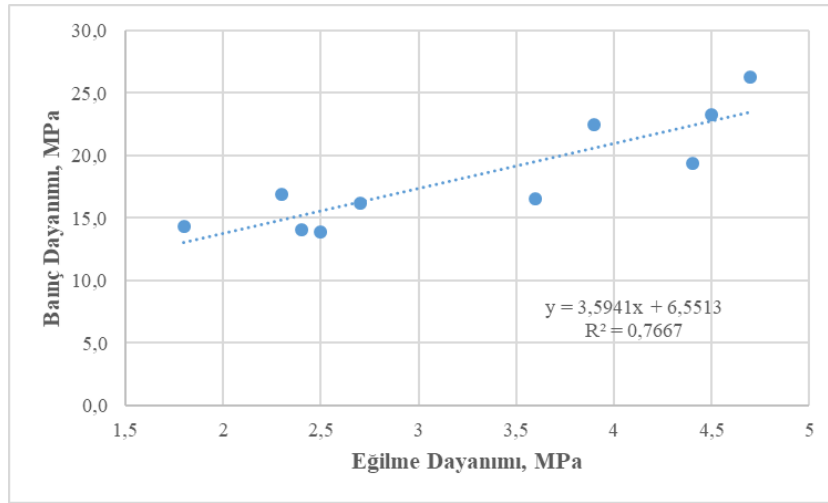
### 3.6. Mekanik Özellikler Arasındaki İlişki (Relation Between Mechanical Properties)

Harçların mekanik özellikleri arasındaki ilişkiler Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur. Şekil 7'de görülen  $R^2$  değeri harçların ultrases geçiş hızı değerleri ile basınç dayanımı değerleri arasında güçlü bir ilişki olduğunu göstermektedir. Ayrıca eğilme dayanımı ile basınç dayanımı değerleri arasında korelasyonun harçların ultrases geçiş hızı değerleri ile basınç dayanımı arasındaki korelasyona göre biraz daha düşük olduğu görülmüştür. Bu farklılığın nedeni CaO içeriğinin artışı ile birlikte alkali ile aktive edilmiş bağlayıcıların eğilme dayanımının basınç dayanımına oranının daha düşük olması gösterilebilir (Marjanović vd., 2015; Çelikten vd., 2019).





Şekil 7. Harçların Ultrases Geçiş Hızı-Basınç Dayanımı Değerleri Arasındaki İlişki (Relationship Between Ultrasonic Pulse Velocity-Compressive Strength of Mortars)



Şekil 8. Harçların Eğilme Dayanımı-Basınç Dayanımı Değerleri Arasındaki İlişki (Relationship Between Flexural Strength-Compressive Strength of Mortars)

## 5. Sonuç ve Öneriler (Conclusions)

- Alkali ile aktive edilmiş atık mermer tozu esaslı harçların yayılma çapları atık cam tozu ikamesiyle kademeli olarak artarken, kalsiyum alüminatlı çimento içeriğiyle de belirgin bir şekilde azalmıştır. Harçlarda mermer tozu yerine %5+%5 ve %10+%10 oranlarında atık cam tozu ve kalsiyum alüminatlı çimentonun birlikte ikame edilmesi ise harçların yayılma çaplarında önemli bir değişime yol açmamıştır.
- Eğilme dayanımlarında, atık mermer tozu (100MT) ile üretilen harçlara göre 80MT-20CT karışımında %150, 90MT-10KAÇ karışımında %39 ve 80MT-10CT-10KAÇ karışımında ise %161 daha yüksek değere ulaşılmıştır.
- Basınç dayanımlarında, atık mermer tozu (100MT) ile üretilen harçlara göre 80MT-20CT karışımında %63, 70MT-30KAÇ karışımında %18 ve 80MT-10CT-10KAÇ karışımında ise %84 daha yüksek değere ulaşılmıştır.
- Sadece cam tozu ikame edilen harçlarda en uygun ikame oranı %20 iken, sadece kalsiyum alüminatlı çimento ikame edilen harçlarda bu oran %30 olmuştur. Bu malzemelerin mermer tozu yerine beraber ikame edildiği karışımlarda ise en uygun ikame oranı %10 CT+%10 KAÇ olmuştur.
- Mermer tozu yerine atık cam tozu ve kalsiyum alüminatlı çimentonun birlikte ikame edilmesi, mermer tozunun çimentosuz harç üretimiyle geri kazanım potansiyelini arttırmıştır.
- Çalışma sonucunda, atık mermer tozu ve atık cam tozunun alkali ile aktive edilmiş harç üretimi için önemli bir potansiyele sahip olduğu ve ek alümin kaynakları ile fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilebileceği ortaya konmuştur. Bu kapsamda değerlendirildiğinde olumsuz çevresel etkisi yüksek toz atıkların, ekonomiye geri kazanımı ve depolama sahalarından azaltılması mümkün olabilecektir. İleriki çalışmalar için, atık mermer tozu ve atık cam tozu kullanılarak farklı aktivatör ve kür koşullarının dayanım ve dayanıklılık özelliklerine etkisinin incelenmesi önerilir.



## Çıkar Çatışması (Conflict of Interest)

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir. No conflict of interest was declared by the authors.

## Kaynaklar (References)

- Aliabdo, A.A., Elmoaty, A.E.M.A., Auda, E.M., 2014. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 28-41.
- Atabey, İ.İ., Ay, C., 2021. Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Farklı Kür Koşullarında Atık Cam Tozu Esaslı Geopolimer Harçların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (24), 184-189.
- Binici, H., Kaplan H., Yılmaz S., 2007. Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete. *Scientific Research and Essay*, 2(9), 372-379.
- Bingöl, A.F., Balaneji, H.H., 2019. Yüksek Fırın Cürufu ve Zeolit Katkılı Betonların Sülfat Direncinin Belirlenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2), 254-264.
- Çelik, M.Y., Sabah, E., 2008. Geological and technical characterisation of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. *Journal of environmental management*, 87(1), 106-116.
- Çelikten, S., Atabey, İ. İ., 2021. Su içeriği ve ısıl kür süresinin atık bazalt tozu esaslı geopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10(1), 328-332.
- Çelikten, S., Sarıdemir, M. Deneme, İ.Ö., 2019. Mechanical and microstructural properties of alkali-activated slag and slag+ fly ash mortars exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*. 217, 50-61.
- 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.
- Davraz, M., Koru, M., Yanardağ, B., 2021. Kalsiyum Alüminat Çimentolu Hafif Betonun Fiziko-Mekanik ve Termal Özelliklerinin Araştırılması, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(1), 217-229.
- Ergün A., 2011. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 806-812.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., Vazquez, T., Vallepu, R., Terai, T., Ikeda, K., 2008. Alkaline activation of blends of metakaolin and calcium aluminate. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(4), 1231-1236.
- Ghosh, R., Sagar, S. P., Kumar, A., Gupta, S. K., Kumar, S. 2018. Estimation of geopolymer concrete strength from ultrasonic pulse velocity (UPV) using high power pulser. *Journal of Building Engineering*, 16, 39-44.
- Kaplan, M., 1958. Compressive strength and ultrasonic pulse velocity relationships for concrete in columns. *ACI Journals*, 54(2), 675-688.
- Karavaşin, M., Terzi S., 2007. Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, 21(3), 616-620.
- Kaya, M., Uysal, M., Yılmaz, K., Karahan, O., Atiş, C.D., 2020. Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars. *Gradevinar*. 72(4), 297-309.
- Kumar, V.S., Ganesan N., Indira P.V., 2017. Effect of Molarity of Sodium Hydroxide and Curing Method on the Compressive Strength of Ternary Blend Geopolymer Concrete. In *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. Vol. 80*, p. 12011.
- Marjanović, N., Komljenović, M., Baščarević, Z., Nikolić, V., Petrović, R., 2015. Physical-mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash-blast furnace slag blends. *Ceramics International*. 41(1), 1421-1435.
- Omer, S. A., Demirboga, R., Khushefati, W. H., 2015. Relationship between compressive strength and UPV of GGBFS based geopolymer mortars exposed to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*. 94, 189-195.
- Provis, J.L., Bernal S.A., 2014. Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*, 44, 299-327.
- Puertas, F., Martínez-Ramírez S., Alonso S., Vazquez T., 2000. Alkali-activated fly ash/slag cements: strength behaviour and hydration products. *Cement and concrete research*, 30(10), 1625-1632.
- Saboya, Jr. F., Xavier G.C., Alexandre J., 2007. The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. *Construction and Building Materials*, 21(10), 1950-1960.
- Salihoğlu, N.K., Salihoğlu, G., 2018. Marble sludge recycling by using geopolymerization technology. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*. 22(4):04018019.
- Shirule, P.A., Rahman A., Gupta R.D., 2012. Partial replacement of cement with marble dust powder. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies*, 1(3), 2249.
- Singh, M., Srivastava A., Bhunia D., 2019. Long term strength and durability parameters of hardened concrete on partially replacing cement by dried waste marble powder slurry. *Construction and Building Materials*, 198, 553-569.
- Tekin, İ., 2016. Properties of NaOH activated geopolymer with marble, travertine and volcanic tuff wastes. *Construction and Building Materials*, 127, 607-617.
- Terro, M.J., 2006. Properties of concrete made with recycled crushed glass at elevated temperatures. *Building and Environment*, 41(5), 633-639.
- Topçu İ. B., Canbaz M., 2004. Properties of concrete containing waste glass, *Cement and Concrete Research*, 34(2), 267-274.
- TS EN 196-1, 2009. Çimento Deney Metotları, Bölüm 1: Dayanım Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-3/A1, 2006. Kâgir harcı- Deney metotları- Bölüm 3: Taze harç kıvamının tayini (yayımla tablası ile), Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1015-11/A1, 2013. Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 11: Sertleşmiş Harcın Basınç ve Eğilme Dayanımının Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Vafaei, M., and Allahverdi, A., 2016. Influence of calcium aluminate cement on geopolymerization of natural pozzolan, *Constr. Build. Mater.*, 28(1), 215-222.

- Vafaei, M., and Allahverdi, A., 2017. "High strength geopolymer binder based on waste-glass powder," *Adv. Powder Technol.*, vol. 28, no. 1, pp. 215–222.
- Wang, S.D., Pu X.C., Scrivener K.L., Pratt P.L., 1995. Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems. *Advances in Cement Research*, 7(27), 93-102.
- Wang, H.Y., Huang W.L., 2010. Durability of self-consolidating concrete using waste LCD glass. *Construction and Building Materials*, 24(6), 1008-1013.
- Yılmaz, H., Sallı Bideci, Ö., Bideci, A., 2018. Pomza Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Kalsiyum Alüminat Çimentosunun Etkisi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 154-160.
- Yurt, Ü., 2020. An experimental study on fracture energy of alkali activated slag composites incorporated different fibers. *Journal of Building Engineering*, (32) 101519.
- Yurt, Ü, Emiroğlu M., 2020. Zeolit İkameli Geopolimer Betonlarda Kür Şartlarının Etkileri. *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 8(2), 396-402.
- Zorluer, I., Demirbas A., 2013. Use of marble dust and fly ash in stabilization of base material. *Science and Engineering of Composite Materials*, 20(1), 47-55.