



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Atık cam tozu içeren alkali - aktive edilmiş cüruf harçlarının mekanik, por yapısı, termal yalıtkanlık ve mikro yapı özellikleri

Mechanical, pore structure, thermal insulation and micro structure properties of alkali-activated slag mortars containing waste glass powder

Yazar(lar) (Author(s)): Levent BOSTANCI

ORCID¹: 0000-0002-4686-9102

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Bostancı L., “Atık cam tozu içeren alkali - aktive edilmiş cüruf harçlarının mekanik, por yapısı, termal yalıtkanlık ve mikro yapı özellikleri ”, *Politeknik Dergisi*, 25(1): 75-87, (2022).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.714390

Atık Cam Tozu İçeren Alkali – Aktive Edilmiş Cüruf Harçlarının Mekanik, Por Yapısı, Termal Yalıtkanlık ve Mikro Yapı Özellikleri

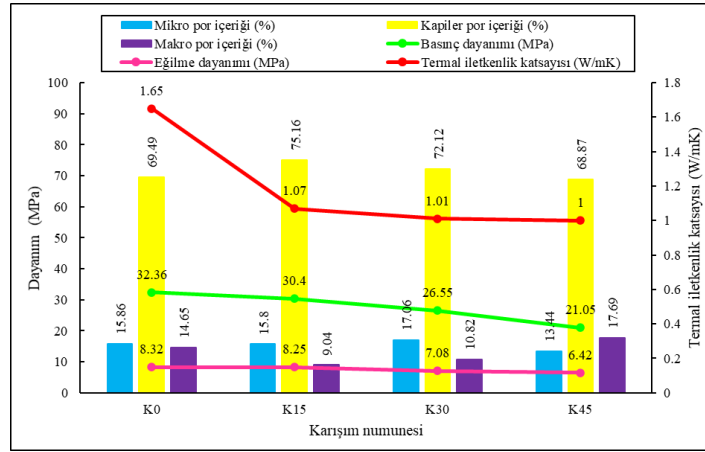
Mechanical, pore structure, thermal insulation and micro structure properties of alkali-activated slag mortars containing waste glass powder

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Atık cam tozunun harçlarda kullanımı./ Utilization of waste glass powder in mortar mixtures.
- ❖ Cüruf harcı karışımlarında termal yalıtım-mekanik özellikler optimizasyonu./ Optimization between thermal insulation and mechanical properties in slag mortar mixtures containing waste glass powder.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Termal yalıtım ve mekanik özellikler arasında istenen bir optimizasyon, % 15 atık cam tozu içeriğinde elde edilebilir./ A desired optimization between thermal insulation and mechanical properties could be achieved at a 15% content of waste glass powder in slag mortar mixtures.



Şekil. Atık cam tozu içeriğinin harç özelliklerine etkisi. /Figure.Effect of waste glass content on various mortar properties.

Amaç (Aim)

Bu çalışmada cüruf harcı karışımlarında atık cam tozunun numune özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır./ In this study, the effect of waste glass powder on slag mortar properties was investigated.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Mekanik, por yapısı, termal iletkenlik ve mikroyapı deneyleri gerçekleştirilmiştir./Mechanical, pore structure, thermal conductivity and microstructure tests were performed.

Özgünlük (Originality)

Atık cam tozunun numune özelliklerine olan etkisi değişen por yapısı özellikleri vasıtasıyla irdelenmiştir./ The effect of waste glass powder content on various mortar properties was investigated by the change on pore structure properties.

Bulgular (Findings)

Atık cam tozunun cüruf harcı karışımlarındaki optimum katkı oranı %15 olarak tespit edilmiştir./ The optimum content of waste glass powder was determined as 15%.

Sonuç (Conclusion)

Değişen cüruf harcı por yapısı, termal özellikler ile mekanik özellikler arasındaki optimizasyonu belirler./ The change in slag mortar pore structure properties dominates the optimization between mechanical and insulation properties.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Atık Cam Tozu İçeren Alkali – Aktive Edilmiş Cüruf Harçlarının Mekanik, Por Yapısı, Termal Yalıtkanlık ve Mikro Yapı Özellikleri

Araştırma Makalesi / Research Article

Levent BOSTANCI*

Meslek Yüksek Okulu, İnşaat Bölümü, Beykent Üniversitesi, Türkiye

(Geliş/Received : 04.04.2020 ; Kabul/Accepted : 07.09.2020 ; Erken Görünüm/Early View : 05.10.2020)

ÖZ

Enerji ve doğal kaynak tüketiminin sınırlandırılması fikri, günümüzdeki sürdürülebilirlik politikalarının odak noktasını oluşturmaktadır. Yüksek enerji gereksinimleri ve doğal kaynak tüketimleri sebebiyle çimento harçları için alternatif arayışı her geçen gün artmaktadır. Bu amaçla; bu çalışmada alkali-aktive edilmiş cüruf harçlarında atık cam tozu ilavesinin harç numunelerinin mekanik, por yapısı, termal iletkenlik ve mikro yapı özelliklerine olan etkisi araştırılmıştır. Atık cam tozu, harç karışımlarında ağırlıkça %15, %30 ve %45 oranlarında doğal kum ile yer değiştirilmiş ve tüm harç karışımlarında bağlayıcı malzeme içeriğinde çimento yerine ağırlıkça %50 oranında da cüruf tercih edilmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar, %15 seviyesindeki kum – atık cam tozu yer değişimi için sınırlı düzeydeki mekanik dayanım düşüşü ile termal yalıtkanlık özelliklerinin %35 düzeyinde artabileceğini ortaya koymuştur. Atık cam tozu katkılı alkali-aktive edilmiş cüruf harçları, üstün termal yalıtkanlık özellikleri ve sürdürülebilirlik politikalarına uyumlu çevre dostu özellikleri ile gelecekte çimento harçları yerine kullanılacak potansiyeli işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: Cüruf, cam tozu, alkali aktive edilmiş harç, termal iletkenlik, tokluk.

Mechanical, Pore Structure, Thermal Insulation and Micro Structure Properties of Alkali-Activated Slag mortars Containing Waste Glass Powder

ABSTRACT

The idea of limiting the consumption of energy and natural resources is the focal point of today's sustainability policies. Due to its high energy requirement and natural resource consumption, the studies in order to develop an alternative for conventional cement mortars are increasing day by day. For this purpose; in this study, the effect of the waste glass powder inclusion on the mechanical, pore structure, thermal conductivity and microstructure properties of the alkali-activated slag mortars was investigated. Waste glass powder was utilized as a partial replacement of sand at contents of 15%, 30% and 45% by weight and slag was used in the binder content at a level of 50% as a replacement of cement in mixtures. The results obtained from the study revealed that the thermal insulation properties could be increased by 35% with a limited level of mechanical strength reduction for the replacement of sand with waste glass powder at the level of 15%. The alkali-activated slag mortars containing waste glass powder indicate a great potential to be used in the future instead of conventional cement mortars with their superior thermal insulation and eco-friendly properties in compliance with sustainability policies.

Keywords: Slag, glass powder, alkali-activated mortar, thermal conductivity, toughness.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yakın geçmişte yapılan çalışmalar, 2050 yılında dünya nüfusunun 9772 milyonu aşmasını öngörmektedir [1]. Nüfus artışıdaki hızlı trend, başta inşaat sektörü olmak üzere birçok sektörün artan talep doğrultusunda büyümesini zorunlu kılmakla; bununla birlikte enerji ve doğal kaynakların tüketimi de ciddi boyutlara ulaşmaktadır. Günümüzdeki sürdürülebilirlik politikalarının odaklandığı enerji ve doğal kaynak tüketiminin sınırlandırılması hedefleri ise inşaat sektöründe özellikle çimento üretimi ile de yakından ilişkilidir.

Dünyada her yıl kişi başına ortalama 1 ton beton üretilmektedir. Beton üretiminde bağlayıcı malzeme olarak sıklıkla kullanılan portland çimentosunun üretimi esnasında ise kilogram başına 0.81 kg CO₂ açığa çıkmaktadır [2]. Söz konusu rakam, dünyadaki toplam CO₂ salınımının yaklaşık %5'inin tek başına çimento üretiminden kaynaklandığını işaret etmektedir [3]. Ayrıca, endüstriyel bazda dünyadaki toplam endüstriyel enerjinin de %12-15'i de çimento üretimi esnasında tüketilmektedir [4]. Gerek küresel ısınmaya olan negatif etkisi gerekse üretimi esnasındaki yüksek enerji tüketimi, inşaat sektöründe çimento benzeri hidrolik aktivite sergileyen alternatif bağlayıcı malzemelerin yaygınlaşmasını zorunlu kılmaktadır.

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : leventbostanci@beykent.edu.tr

Alkali-aktif edilmiş harçlar, üstün mekanik ve durabilite özellikleri ile çimento harçlarına alternatif oluşturabilecek düzeyde potansiyele sahiptir [5]. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül, silika tozu gibi mineral kökenli ve hidrolik aktivite gösteren malzemelerin kısmen veya tamamen çimento yerine kullanılabilirdiği alkali-aktif edilmiş harçlarda azalan çimento içeriği ile orantılı olarak çimento üretimine olan ihtiyaç da azalmaktadır [6]. Çimentoya olan ihtiyacın endüstriyel bağlayıcılar aracılığı ile azaltılması fikri dünyadaki CO₂ salımını sınırlamakla birlikte cüruf, uçucu kül gibi endüstriyel yan ürünlerin de verimli bir şekilde yeniden değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır [7]. Harç karışımlarında, başta cam tozu olmak üzere pek çok diğer atık türü malzeme de çeşitli amaçlar doğrultusunda harç karışımlarına ilave edilip atık yönetimi politikaları ile uyumlu olarak yeniden değerlendirilebilmektedir.

Cam tozu, diğer atık katı ürünlere kıyasla herhangi bir kalite kaybı olmadan %100 oranında geri dönüştürülebilir bir malzemedir. Düşük maliyeti, kolay ulaşılabilirliği, kalsiyum – silikat yapısına kazandırdığı mekanik, termal ve optik kazanımlar göz önüne alındığında kalsiyum – silikat yapısı ile oldukça uyumlu bir atık üründür [8,9]. Mevcut atık cam stokunun değerlendirilip yeniden kullanımı için beton endüstrisi, en büyük potansiyele sahip endüstrilerin başında gelmektedir [10, 11].

Cam tozunun çimento esaslı malzemelerin üretimi esnasında kullanımına yönelik geçmişte pek çok deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalarda cam tozu, kalsiyum-silikat yapısı içerisinde iri agrega / ince agrega olarak ya da çimento ile kısmi oranda yer değiştirecek şekilde bağlayıcı malzeme matrisine dahil edilmiştir [12]. Cam tozunun harç ve beton karışımlarında kullanılması dünyadaki doğal kum kaynaklarının kullanımını sınırlandırması vasıtasıyla sürdürülebilirlik politikalarına hizmet ederken aynı zamanda numunelerde artan termal yalıtıklık özellikleri aracılığıyla yapılarıdaki enerji tüketimini de sınırlandırmaktadır. Öte yandan, cam tozu partiküllerinin prizmatik şekli sebebiyle çimento matrisine olan adhezyonun zayıf olması ve cam partiküllerinin öğütülmesi esnasında oluşan mikro çatlakların varlığı gibi faktörler cam tozu içerikli numunelerde genelde mekanik performans düşüşüne sebep olabilmektedir [13-19]. Gorospe vd. [13] harç karışımlarında kum ile çeşitli tipteki cam partiküllerini yer değiştirerek cam partiküllerinin agrega olarak kullanılması durumu için değişen harç özelliklerini araştırdılar. Cam partiküllerinin çimento matrisindeki zayıf adhezyonu sebebiyle harç numunelerinde %32'e kadar varan basınç dayanımı düşüşlerini tespit ettiler. Choi vd. [14] harç karışımlarında kum ile cam partiküllerini yer değişimini %100 seviyesine kadar gerçekleştirerek harç numunelerinin mekanik dayanımlarındaki değişimleri incelediler. Artan cam partikülü içeriği ile basınç dayanımlarında %36, eğilme dayanımlarında %35'e kadar dayanım düşüşleri saptadılar. Numunelerin dayanımlarındaki kayıplar, cam agrega partiküllerinin

yüzündeki mikro çatlaklar ile yakından ilişkiliydi. Kim vd. [15] beton karışımlarında %0, %50 ve %100 oranlarında agrega olarak cam partiküllerini kullandılar. %100 seviyesinde agrega olarak cam partiküllerinin kullanıldığı karışımlarda zayıf cam partikülü – çimento geçiş bölgesine bağlı olarak basınç ve eğilme dayanımlarında sırasıyla ortalama %20 ve %15 düzeylerinde düşüşler saptadılar. Hama ve diğ. [16] ise en iyi mekanik performans içeriği için cam tozu içeriğinin %10 – 15 aralığında olması gerektiğini belirtmişlerdir. Öte yandan; cam tozu içeriği ile çimento esaslı malzemelerde termal yalıtıklık özellikleri gelişebilmektedir. Termal iletkenlik değeri 3.62 W/m.K düzeyine kadar ulaşabilen doğal agregalar yerine termal iletkenliği 0.93 W/m.K düzeyinde olan cam agregaların kullanılması, cam partiküllerinin katkı oranları ile orantılı olarak numunelerin termal yalıtıklık özelliklerini arttırmaktadır [17].

Esasen amorf yapıda olması ve yüksek oranda silika içermesi sebebiyle cam tozu partikülleri, puzolanik özellik gösterebilmektedir. Önceki deneysel çalışmalarda cam tozunun puzolanik özelliğinin en çok öğütüldüğü tane boyutu ve kimyasal içerik ile alakalı olduğu tespit edilmiştir. Cam tozunun puzolanik özelliğinin ortaya çıkması için tane boyutunun genellikle 300 µm değerinin altında olması gerekmektedir. Tane boyutunun incelenmesi, puzolanik karakterini artırırken artan tane boyutu hem bağlayıcılık özelliğini zayıflatmakta hem de alkali – silika reaksiyonuna elverişli ortam hazırlamaktadır. Cam tozu partiküllerinin 20µm mertebesinde altta öğütülmesi durumunda ise kalsiyum – silikat yapısı içerisinde sergilediği olumlu özellikler artmaktadır. Bu durumda, cam tozu içeriği hidrasyon esnasında kalsiyum-hidroksit (CH) tüketimini arttırabilme özelliği ile mekanik dayanımlarda daha yüksek değerlerin elde edilmesine katkı sunar [18, 19]. CH tüketiminin mekanik dayanımların gelişmesine olanak sağlaması ise kalsiyum – silikat – hidrat (C-S-H) jel oluşumunu attırması sayesinde gerçekleşmektedir [9]. Öğütme işleminin 100 µm değerinin altında olması durumunda, uçucu kül mertebesinde bağlayıcılık yeteneği de ortaya çıkmaktadır. Schwarz vd. [12] deneysel çalışmalarında %10 düzeyinde çimento – cam tozu yer değişiminin eşit koşullarda %10 düzeyinde uçucu kül – çimento yer değişimine kıyasla 28 günlük basınç dayanım sonuçları için daha yüksek basınç dayanımlarının elde edilmesine olanak tanıdığı tespit etmişlerdir.

Önceki deneysel çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada atık cam tozu ilavesi, çimento harcı yerine alkali-aktif edilmiş cüruf harcı karışımlarına ilave edilmiştir. Harç numunelerinin mekanik özellikleri, deformasyon kontrollü mekanik parametreler aracılığıyla tespit edilmiştir. İlaveten; saptanan mekanik özellikler detaylı bir porozimetre analizi aracılığıyla 3 – 350,000 nanometre (nm) por çapı aralığındaki por yapısı davranışı çerçevesinde sorgulanmıştır. Bu çalışma, atık cam tozu katkılı alkali-aktif edilmiş cüruf harçlarının tasarımı için por yapısı esaslı yeni bir bakış açısı sunmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL and METHOD)

2.1. Malzemeler (Materials)

2.1.1. Bağlayıcı Malzemeler (Binder Materials)

Harç karışımlarında bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42.5 R tipi çimento ve granüle yüksek fırın cürufundan oluşan karma bağlayıcı malzeme kullanılmıştır. Kullanılan çimento ve yüksek fırın cürufuna ait kimyasal kompozisyon ve fiziksel özellikler Çizelge 1' de sunulmuştur.

Çizelge 1. Çimento ve cürufun kimyasal kompozisyonu ve fiziksel özellikleri (Chemical compositions and physical properties of cement and slag)

	Çimento	Cüruf
Kimyasal kompozisyon (wt/wt %)		
SiO ₂	19.14	34.74
Al ₂ O ₃	4.77	9.91
Fe ₂ O ₃	3.21	0.84
CaO	64.22	39.24
MgO	1.09	6.74
SO ₃	2.71	1.87
K ₂ O	0.7	0.91
Na ₂ O	0.21	0.28
Cl ⁻	0.01	0.02
Fiziksel özellikler		
Yoğunluk (g/cm ³)	3.11	2.79
Özgül yüzey alanı (cm ² /g)	3682	5100

2.1.2. Alkali-aktivatör (Alkali-activator)

Harç karışımlarında alkali aktivatör olarak potasyum karbonat (K₂CO₃) tercih edilmiştir. İlgili ürün Balmumcu Kimya Ürünleri Tic. Ltd. Şti. vasıtasıyla temin edilmiştir.

2.1.3. Kum (Sand)

Harç karışımlarında kum olarak TS EN 196-1 [20] standartlarına uygun olarak hazırlanmış standart RILEM Cembureau kumu kullanılmıştır. Yoğunluğu ve özgül ağırlığı sırasıyla 1.35 kg/dm³ ve 2.63 olan standart Rilem kumu Limak Çimento Trakya A.Ş tarafından hazırlanmıştır.

2.1.4. Cam tozu (Glass Powder)

Harç karışımlarında doğal kuma alternatif olarak kullanılmak üzere yerel bir firmadan temin edilen atık cam tozu kumu kullanılmıştır. Kullanılan atık cam tozu 2.61 g/cm³ yoğunluğunda ve 3360 cm²/g özgül yüzey alanına sahiptir.

2.2. Karışım Oranları (Mix Proportions)

Alkali-aktive edilmiş cüruf harçlarında atık cam tozu içeriğinin harç numunelerinin mekanik, por yapısı, termal iletkenlik ve mikro yapı özelliklerine olan etkisini

araştırmak amacıyla 4 farklı karışım oranlarında harç karışımları hazırlanmıştır. Harç karışımlarında atık cam tozu, kum ile yer değiştirilmek suretiyle ağırlıkça %15, %30 ve %45 oranlarında kullanılmıştır. Karışımlar; bağlayıcı malzeme, kum ve su oranları sırasıyla 1:3:0.5 olacak şekilde tasarlanmıştır. Karışımlarda karma suyu olarak şebeke suyu kullanılmıştır. Tüm karışımlarda su/bağlayıcı oranı 0.5 olarak düzenlenmiştir. Karışımlarda tek tip karma bağlayıcı malzeme kullanılmış olup, bağlayıcı malzemenin ağırlıkça yarısı çimentoya yerine yüksek fırın cürufundan oluşmaktadır. Yüksek fırın cürufunun, endüstriyel bir atık bağlayıcı olarak çimentoya kıyasla daha düşük hidrolik aktivesi sebebiyle karışımlara bağlayıcı malzemenin ağırlığının %0.25'ince K₂CO₃ ilave edilerek karışımların alkali aktivasyonu gerçekleştirilmiştir. Karışım numunelerinin etiketlenmesinde, karışım numunesini temsilen K harfinin yanında yer alan rakam karışımlardaki atık cam tozu içeriğini simgelemektedir. Çizelge 2' de harç karışım oranları görülmektedir.

Çizelge 2. Karışım oranları (Mix Proportions)

	K0	K15	K30	K45
Çimento (%wt)	50			
Cüruf (%wt)	50			
K₂CO₃ (%wt)	0.25			
Su (ml)	225			
Su/bağlayıcı	0.5			
Kum (%wt)	100	85	70	55
Atık cam tozu (%wt)	0	15	30	45

2.3. Numune Hazırlanması, Kür Koşulları ve Uygulanan Testler (Sample Preparation, Curing Conditions and Testing Procedures)

DeneySEL çalışmalar kapsamında 40 x 40 x160 mm'lik kalıplar vasıtasıyla her bir karışımdan 3'er adet harç numunesi üretilmiştir. Taze karışımların oluşturulması esnasında başlangıçta kuru bir karıştırma işlemi uygulanmış ve karışımlara su ilavesi azar azar yapılmıştır. Karışımlarda kum yerine kısmi olarak ilave edilen cam tozu partiküllerinin çimento matrisi ile olan etkileşimini arttırmak amacıyla etkin bir vibrasyon işlemi ayrıca gerçekleştirilmiştir.

Üretilen harç numuneleri ilk 24 saat kalıpta bekletilmiştir. Ertesi gün kalıptan çıkarılan numuneler 2,7 ve 28 gün boyunca üç farklı periyotta suda kür işlemine tabi tutulmuştur. Numunelerin suda kür işlemi, oda sıcaklığı koşullarında kür havuzuna tamamiyle batırılmaları suretiyle gerçekleştirilmiştir. Kür süresini tamamlayan numuneler, kür havuzundan çıkarılarak uygulanacak mekanik testler öncesinde 24 saat etüvde bekletilmiştir. Kür süresini tamamlayan harç

numuneleri, ilk olarak mekanik testlere tabi tutulmuştur. Mekanik testler, eğilme ve basınç dayanımı testlerinden oluşmaktadır.

Eğilme dayanımı testi, 40 x 40 x 160 mm ölçülerinde üretilen harç numunelerine 3 noktali olarak uygulanmıştır. Eğilme dayanımı testi, TS EN 1015-11 [21] standardı esaslarına göre gerçekleştirilmiştir. Test düzeneği, orta açıklık 100 mm ve yükleme hızı 50±10 N/s olacak şekilde düzenlenmiştir. Her bir karışımdan toplam 3 adet numuneye uygulanan eğilme testinde karışımın eğilme dayanımı, aynı karışıma ait numunelerin eğilme dayanımlarının aritmetik ortalaması alınarak tespit edilmiştir. Eğilme dayanımı testinde numunelerin 2, 7 ve 28 günlük farklı kür sürelerindeki dayanımları ayrı ayrı test edilmiştir.

Basınç dayanımı testi, eğilme testini takiben gerçekleştirilmiştir. Eğilme dayanımı testinde ikiye ayrılan numuneler muhafaza edilmiş ve basınç dayanımı tespiti, eğilme testinden geriye kalan parçalar üzerinden gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı tespitinde, her bir karışım için 3 farklı test sonucunun aritmetik ortalaması alınarak karışımın basınç dayanımı tespit edilmiştir. Basınç dayanımı testleri, TS EN 1015-11 [21] standardı esaslarına göre gerçekleştirilmiştir. Basınç dayanımı testi, eğilme dayanımı testinden farklı olarak deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilmiştir. Tüm harç numuneleri için basınç etkisi altındaki aksel deformasyonlar, lineer değişken diferansiyel transformatörler (LVDT' ler) aracılığı ile kaydedilmiştir. Testin deformasyon kontrollü gerçekleştirilmesi sayesinde numunelerin basınç dayanımlarının yanı sıra basınç etkisi altındaki tokluk kapasiteleri de ilaveten saptanabilmektedir.

Harç numunelerinin termal iletkenlik katsayılarının tespiti için ilaveten numune üretilmemiş ve mekanik dayanım testlerinden geriye kalan 28 günlük numune parçalar değerlendirilerek termal iletkenlik katsayısı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Analizler TCI- Thermal Conductivity Analyzer model cihaz ile gerçekleştirilmiştir.

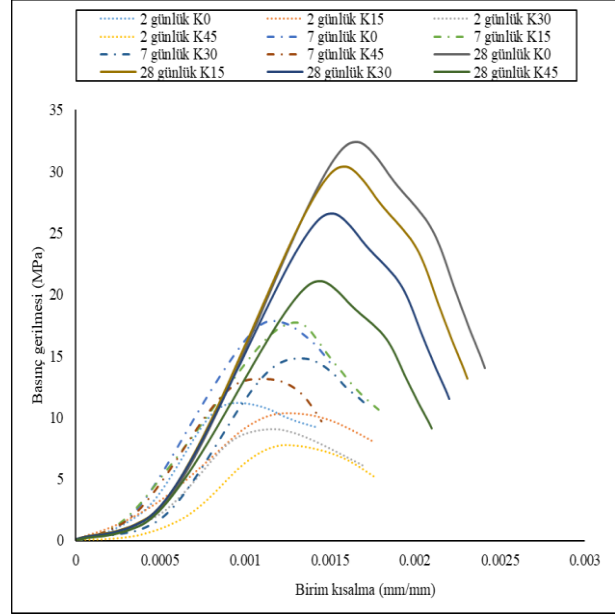
Harç numuneleri, por yapısı özelliklerinin tespit edilebilmesi amacıyla termal iletkenlik ölçüm işlemlerini takiben cıva porozimetresi testine tabi tutulmuşlardır. Termal iletkenlik katsayısı ölçümü hasarsız olarak gerçekleştirildiğinden, iletkenlik özellikleri tespit edilmiş numunelerin por yapısı özellikleri de aynı numune parçaları üzerinden gerçekleştirilebilmiştir. Cıva Porozimetresi deneyi, Micromeritics marka cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Cihaz, 3 ile 360,000 nm aralığındaki por çaplarını ölçebilmektedir.

Harç numunelerinin mikro yapı özelliklerinin tespiti için, mekanik testlerden geriye kalan parçalar üzerinden SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM analizleri LEO 1430 VP model SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS and DISCUSSIONS)

3.1. Basınç Dayanımı Test Sonuçları (Compressive Strength Test Results)

Şekil 1' de 2, 7 ve 28 günlük kür süresini tamamlayan harç numunelerinin aksel basınç testine tabi tutulması sonucunda elde edilen gerilme – birim deformasyon ilişkileri görülmektedir.



Şekil 1. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde basınç gerilmesi – birim deformasyon ilişkisi (Compressive stress-strain relationships for 2-, 7- and 28- day samples)

2 günlük kür süresini tamamlayan numunelerin basınç dayanımları incelendiğinde en yüksek basınç dayanımı atık cam tozu içermeyen K0 kontrol numunesinde 11.22 MPa olarak tespit edilmiştir. Harç karışımlarında kum – atık cam tozu yer değişimi ile basınç dayanımlarında kısmi düzeyde düşüşler saptanmıştır. Bu düşüşler kontrol numunesine kıyasla K15, K30 ve K45 numunelerinde sırasıyla %8.02, %19.25 ve %30.92 düzeyindedir. Gorospe vd. [13] toz formdaki cam partikül içeriğinin daha büyük tane formuna kıyasla dayanım kayıplarını minimum seviyeye indirdiğini ancak kum – cam tozu yer değişiminin %50 ve üzerindeki değişim seviyesi için bu olumlu özelliğin işlevini yitirdiğini rapor etmiştir. Bu anlamda maksimum seviyedeki yer değişimi için tespit edilen dayanım kaybı beklenen düzeydedir. Kum – atık cam tozu yer değişimi, basınç dayanımlarında kayıplara sebep olsa da atık cam tozu içeriği basınç etkisi altında oluşan aksel şekil değişimleri üzerinde oldukça pozitif etki yaratmaktadır. Kontrol numunesine kıyasla tüm numunelerde kırılma anında daha yüksek birim kısalma kapasiteleri gözlemlenmiştir. Kırılma anındaki şekil değiştirme kapasitesindeki artışlar, K0 numunesine kıyasla K15, K30 ve K45 numunelerinde sırasıyla %24.11, %19.14 ve %24.82 düzeyindedir.

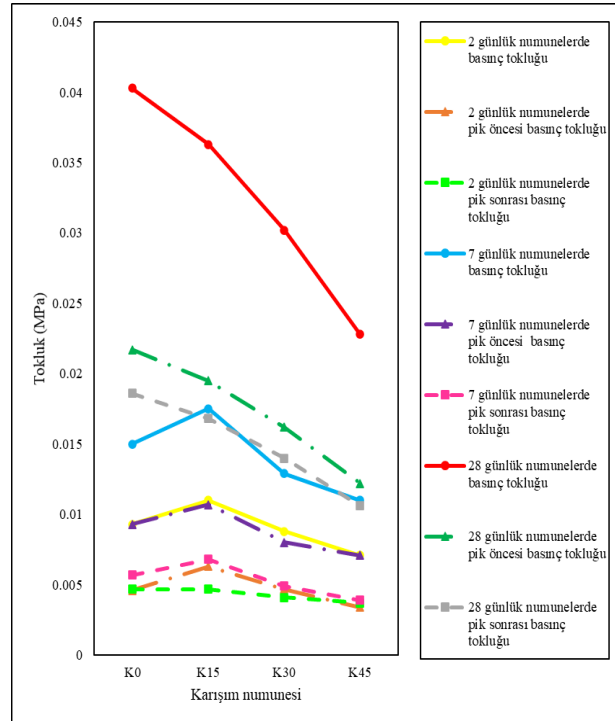
7 günlük kür süresinin tamamlanması ile en yüksek basınç dayanımı atık cam tozu içermeyen kontrol numunesinde 17.88 MPa olarak tespit edilmiştir. 2 günlük dayanım sonuçlarına benzer şekilde, kum – atık cam tozu yer değişimi basınç dayanımları üzerinde kayıplara sebep olsa da saptanan dayanım düşüşleri 2 günlük sonuçlardakine kıyasla sınırlı seviyededir. Kontrol numunesi ile %15 atık cam tozu içerikli numunede dayanım farkı sadece %0.86 düzeyinde iken K30 ve K45 numunelerindeki dayanım düşüşleri K0 numunesine kıyasla sırasıyla %17 ve %26.56 seviyelerindedir. Bu noktada; cam tozu içeriğinin hidrasyon esnasında ilave CH tüketimine olanak sağlama yeteneğinin, optimum yer değiştirme seviyeleri için dayanım düşüşünü sınırlandırdığı söylenebilir [22]. Kum – atık cam tozu yer değişiminin basınç etkisi altında oluşan deformasyonlar üzerindeki olumlu etkisini 7 günlük kür süresi sonunda da görmek mümkündür. Kontrol numunesi K0'a kıyasla K15 ve K30 numunelerinde kırılma anında sırasıyla %17.88 ve %12.58 düzeylerinde daha yüksek birim deformasyon kapasiteleri tespit edilmiştir. Atık cam tozu içeriğinin %45 düzeyinde harç karışımlarına ilave edilmesi ise kısmi oranda numunelerin deformasyon yeteneğini azaltmıştır. K45 numunesinin birim kısalma kapasitesindeki düşüş %4.63 düzeyindedir.

28 günlük kür süresi sonunda elde edilen dayanımlar incelendiğinde, en yüksek basınç dayanımı değeri atık cam tozu içermeyen K0 kontrol numunesinde 32.36 MPa olarak tespit edilmiştir. K0 kontrol numunesinin 2 ve 7 günlük kür süreleri sonunda da en yüksek dayanım değerlerinin saptandığı numune olduğu göz önüne alınırsa karışımlardaki atık cam tozu içeriğinin alkali aktive edilmiş cüruf harçlarında tüm kür süreleri için dayanım kaybına sebep olduğu net olarak ifade edilebilir. Kontrol numunesine kıyasla K15, K30 ve K45 numunelerinde saptanan dayanım düşüşleri sırasıyla %6.05, %17.95 ve %34.95 düzeyindedir. Dayanım testinden elde edilen sonuçlar, artan atık cam tozu içeriğinin dayanımlarda sürekli bir düşüşe neden olacağını işaret etmektedir. Cam tozunun, çimento matrisinde yarattığı boşluklar sebebiyle katkı oranı ile orantılı olarak dayanım düşüşlerine sebep olması oldukça olası bir durumdur [23]. Ancak; dayanımdaki düşüşün özellikle %15 atık cam tozu içeriğinde minimum düzeyde olduğu ve düşüş trendinin artan atık cam tozu içeriği ile orantılı olarak arttığı gerçeği de net olarak gözükmektedir. %45 cam tozu içeriğinde, cam tozu partiküllerinin geometrik şekliyle kaynaklanan zayıf adhezyon nedeniyle önceki deneysel çalışmalarda da benzer seviyede dayanım düşüşleri tespit edilmiştir [24]. 28 günlük numunelerde tespit edilen deformasyon davranışı incelendiğinde ise 2 ve 7 günlük kür süreleri sonunda tespit edilen davranıştan farklı olarak atık cam tozu içeriğinin harç numunelerinin deformasyon kapasitesi üzerinde olumlu etkisinin hidrasyonun erken dönemi ile sınırlı olduğu görülmektedir. K0 kontrol numunesine kıyasla K15, K30 ve K45 numunelerinde kırılma esnasında sırasıyla %4.56, %8.71 ve %13.27

seviyelerinde daha düşük birim kısalma kapasiteleri saptanmıştır. Bu noktada; artan cam tozu içeriği ile deformasyon değerlerinde saptanan düşüşler, dayanım düşüşleri ile hidrasyonun ilk günlerinde tespit edilenden farklı olarak paralellik göstermektedir.

3.2. Tokluk (Toughness)

Şekil 2' de 2, 7 ve 28 günlük kür süresini tamamlayan harç numunelerinde tespit edilen tokluk kapasiteleri görülmektedir. Numunelerin tokluk kapasiteleri, basınç gerilmesi – birim deformasyon grafiklerinin altında kalan alanlar aracılığı ile hesaplanmıştır. Gerilme – deformasyon grafiğinin altında kalan toplam alan basınç tokluğu; başlangıç – maksimum gerilme altında kalan alan pik-öncesi basınç tokluğu ve maksimum gerilme – kırılma anındaki gerilme arasında kalan toplam alan ise pik-sonrası basınç tokluğuna karşılık gelmek üzere ayrı ayrı dikkate alınmıştır.



Şekil 2.2, 7 ve 28 günlük numunelerdeki tokluk kapasiteleri (Toughness capacities of 2-, 7- and 28-day samples)

2 günlük kür süresi sonunda basınç etkisi altında elde edilen tokluk kapasiteleri incelendiğinde harç karışımlarında %15 oranında gerçekleştirilen kum – atık cam tozu yer değişiminin numunelerin basınç tokluğu yeteneklerine katkı sunduğu görülmektedir. Atık cam tozu kimyasal kompozisyonunda yüksek düzeyde bulunan Na₂O içeriğinin mekanik performansa olan olumlu katkısı bilinmektedir [18]. Bu sebeple, K15 numunesinde kontrol numunesine kıyasla %18.27 düzeyinde basınç tokluğu kapasite artışı saptanabilmektedir. Daha yüksek seviyelerdeki atık cam tozu içeriği ise basınç tokluk kapasitesinde katkı oranı ile orantılı olarak düşüşlere sebep olmaktadır. K0 numunesine kıyasla K30 ve K45 numunelerinde sırasıyla %5.37 ve %23.65 düzeylerinde kapasite düşüşleri saptanmıştır.

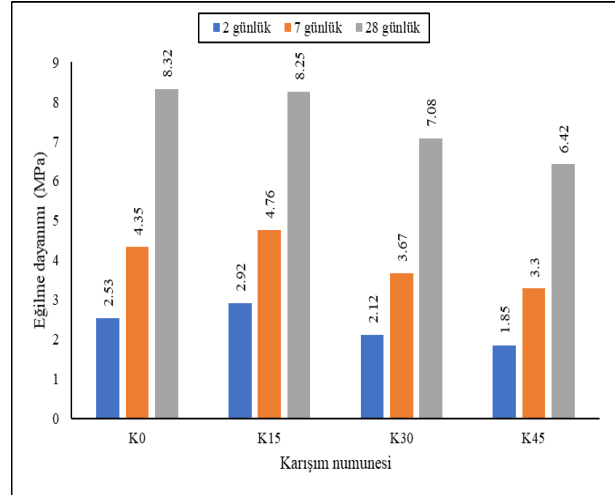
Numunelerin pik-sonrası basınç tokluğu davranışları incelendiğinde ise %15 düzeyindeki atık cam tozu içeriğinin pik-sonrası tokluk davranışında herhangi bir fark yaratmadığı ancak artan cam tozu içeriği ile orantılı olarak %30 ve %45 kum – atık cam tozu yer değişim düzeyleri için sırasıyla %12.76 ve %21.27 seviyelerinde pik-sonrası tokluk kapasitesi düşüşleri saptanmıştır. Hidratasyonun ilk 2 günlük periyodu sonunda genel anlamda tokluk davranışı değerlendirildiğinde ise K15 numunesinde tespit edilen basınç tokluğu artışının, kontrol numunesi ile eşit düzeyde tespit edilen pik-sonrası basınç tokluğu dikkate alındığında oldukça değerli olduğu görülmektedir.

7 günlük numunelerde de 2 günlük numunelerde olduğu gibi atık cam tozu içeriğinin tokluk davranışı üzerindeki olumsuz etkisi sadece yüksek düzeydeki kum – atık cam tozu yer değişimi için ortaya çıkmaktadır. Karışımlara ilave edilen cam tozu, optimum koşullarda numunelerin kırılma enerjilerine pozitif yönde katkı sunabilmektedir [26]. Kontrol numunesine kıyasla K15 numunesinde %16.66 düzeyinde basınç tokluk kapasite artışı tespit edilmiştir. Buna karşın K30 ve K45 numunelerinin tokluk kapasitelerindeki düşüşler ise %14 ve %26.66 seviyelerindedir. Harç numunelerinin pik-sonrası basınç tokluğu kapasitelerindeki değişimler de numunelerin genel tokluk davranışları ile oldukça benzerlik göstermektedir. %15 düzeyindeki kum – atık cam tozu yer değişimi, pik – sonrası kapasitede %19.29 artışa olanak sağlarken daha yüksek atık cam tozu içeriği için K30 ve K45 numunelerinde sırasıyla %14.03 ve %31.57 seviyelerinde pik – sonrası tokluk kayıpları tespit edilmiştir.

Harç numunelerinin 28 günlük tokluk davranışları incelendiğinde, düşük düzeydeki atık cam tozu içeriğinin tokluk davranışı üzerindeki olumlu etkisinin hidratasyonun ilk günleri ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Atık cam tozu içeren tüm numunelerde, artan cam tozu içeriği ile orantılı olarak hem basınç tokluğu hem de pik – sonrası basınç tokluğu düşüşleri gözlemlenmektedir. K15, K30 ve K45 numunelerinin tokluk kapasitelerinde tespit edilen düşüşler kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %9.92, %25.06 ve %43.42 seviyelerindedir. Bu noktada cam partiküllerinin kırılma yapısının numunelerdeki tokluk düşüşünü desteklediği söylenebilir [27]. Benzer şekilde genel tokluk düşüşü ile paralel olarak K0 numunesine kıyasla K15, K30 ve K45 numunelerinde %9.67, %24.73 ve %43.01 düzeylerinde pik – sonrası kapasite düşüşü saptanmıştır.

3.3. Eğilme Dayanımı Test Sonuçları (Flexural Strength Test Results)

Şekil 3' de 2, 7 ve 28 günlük kür sürelerini tamamlayan harç numunelerinin üç noktalı eğilme dayanımı testine tabi tutulması sonucunda elde edilen eğilme dayanımları görülmektedir.



Şekil 3. 2, 7 ve 28 günlük numunelerde eğilme dayanımı test sonuçları. (Flexural strength test results of 2-, 7-, and 28- day samples)

Harç numunelerine ait eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde özellikle hidratasyonun 2. ve 7. günleri sonunda tespit edilen davranışların birbirine oldukça benzer olduğu görülmektedir. %15 atık cam tozu içeren K15 numunesinde hem 2 hem de 7 günlük kür süreleri sonunda kontrol numunesinden sırasıyla %15.41 ve %9.42 düzeylerinde daha yüksek eğilme dayanımları tespit edilmiştir. İnce öğütülmüş cam tozu partiküllerinin puzolanik özellikleri sebebiyle kısmi oranda dayanım artışlarına olanak sağlayabildikleri bilinmektedir [18]. Bu noktada elde edilen sonuçlar Aly vd. [26] çalışmalarındaki artan eğilme performansı ile uyumludur. Buna karşın karışımlarda artan atık cam tozu içeriği K30 ve K45 numunelerinde dayanım düşüşlerine sebep olmaktadır. Dayanım düşüşleri 2 ve 7 günlük kür süreleri boyunca stabil bir düzeyde olup K30 ve K45 numuneleri için yaklaşık olarak sırasıyla %15 ve %25 seviyelerindedir.

28 günlük eğilme dayanımı sonuçları incelendiğinde, tokluk davranışlarına benzer olarak düşük düzeydeki atık cam tozu içeriğinin harç numunelerinin eğilme performansı üzerindeki olumlu etkisinin de hidratasyonun ilk günleri ile sınırlı kaldığı görülmektedir. Bu durum özellikle hidratasyonun ilk günlerinde ince öğütülmüş cam tozunun kireç ile olan kimyasal etkileşiminde dayanıma katkı sunan ilave C-S-H bağ oluşumunu artırması ile yakından ilgilidir [18]. Tüm atık cam tozu katkılı numunelerin eğilme dayanımları, 28 günlük kür süresi sonunda kontrol numunesinden daha düşük seviyededir. K0 numunesine kıyasla K15, K30 ve K45 numunelerinde tespit edilen dayanım düşüşleri sırasıyla %0.84, %14.9 ve %22.83 seviyelerindedir. Sonuçlar eğilme performansı açısından kum – atık cam tozu yer değişim düzeyinin %15'i geçmemesi gerektiğini işaret etmektedir. %15 atık cam tozu içeriğinde, 2 ve 7 günlük kür sürelerinden farklı olarak 28 inci günde daha yüksek dayanım değeri elde edilememesine rağmen tespit edilen %1'in altındaki

dayanım düşüşü ile katkısız durum ile benzer dayanımların elde edilebileceğini göstermiştir.

Atık cam tozu içerikli harç numunelerinin kür süresine bağlı olarak mekanik performans gelişimleri değerlendirildiğinde ise basınç dayanım sonuçlarına benzer şekilde eğilme dayanımı sonuçlarında da belirgin faktörün karışımlardaki atık cam tozu içeriği olduğu dikkat çekmektedir. Bu açıdan; numune yaşına bağlı olarak saptanan eğilme dayanımı sonuçları, basınç dayanımı sonuçları ile uyum içerisindedir. İlaveten; atık cam tozu içeriğinden dolayı kaynaklanan puzolanik etkinin de optimum atık cam tozu içeriğinde artan kür süresi ile baskın hale geldiği görülmektedir. %15 atık cam tozu içeriğinde 2 günlük kür süresi sonunda kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %34.09 ve %15.41 düzeylerinde tespit edilen basınç ve eğilme dayanımı düşüşleri 28. günde sırasıyla %1.75 ve %0.84 seviyelerine indirgenmektedir. Buna karşın; %45 atık cam tozu içeriğinde kontrol numunesine kıyasla 2 günlük yaşta tespit edilen sırasıyla %36.03 ve %26.87'lik basınç ve eğilme dayanımı düşüşleri ise 28. günde sırasıyla ancak %25.18 ve %22.83 seviyelerine indirgenebilmektedir. Sonuçlar optimum atık cam tozu katkı oranında, hidrasyonun ilerlemesi ile orantılı olarak numunelerdeki mekanik dayanım düşüşlerinin minimum seviyeye indirildiğini işaret etmektedir.

3.4. Cıva Porozimetresi Testi (Mercury Intrusion Porosimetry Test)

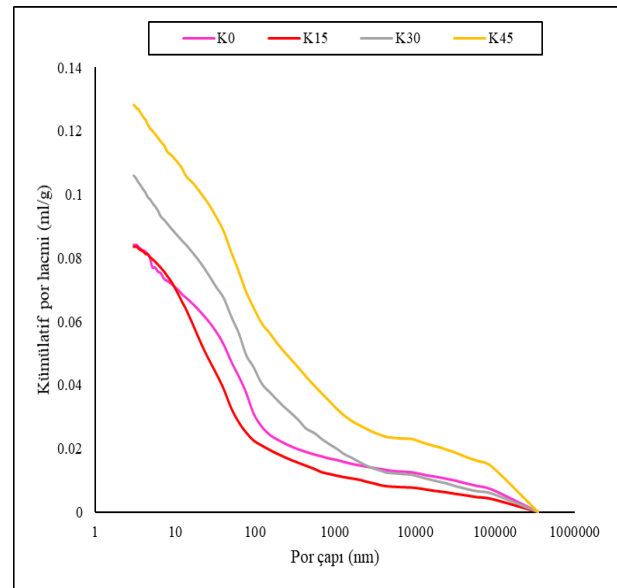
Kalsiyum – silikat esaslı malzemelerde; porozite, ortalama por çapı, toplam por hacmi ve por çapı dağılımı gibi boşluk yapısını ortaya koyan porozimetre özellikleri cıva porozimetresi tekniği ile ölçülebilmektedir [28]. Çizelge 3' de 28 günlük numunelere uygulanan cıva porozimetresi test sonuçları görülmektedir.

Çizelge 3. Cıva porozimetresi analizi test sonuçları (Mercury intrusion porosimetry test results)

Karışım numunesi	Porozite (%)	Hacimsel ortalama por çapı (nm)
K0	17.36	64.1
K15	17.6	35.5
K30	20.85	69
K45	24.01	96.4

Atık cam tozu içermeyen kontrol numunesinde %17.6 oranında porozite değeri tespit edilmiştir. Harç karışımlarında gerçekleştirilen kum – atık cam tozu yer değişimi, numunelerin porozite değerlerinde artışlara neden olmaktadır. Numunelerin porozite değerlerindeki katkı oranı ile orantılı olan artış, Choi vd. [14] çalışmasındaki porozite artışı ile uyumludur. %15 atık cam tozu içerikli K15 numunesinin porozite değerinde tespit edilen artış sınırlı düzeyde olmakla birlikte daha yüksek oranlardaki kum – atık cam tozu yer değişimi, porozite değerinde ciddi düzeyde artışlara neden olmaktadır. Farklı oranlardaki yer değişim seviyelerinin toplam porozite üzerinde yarattığı etki, harç numunelerinin por yapısındaki ortalama hacimsel por

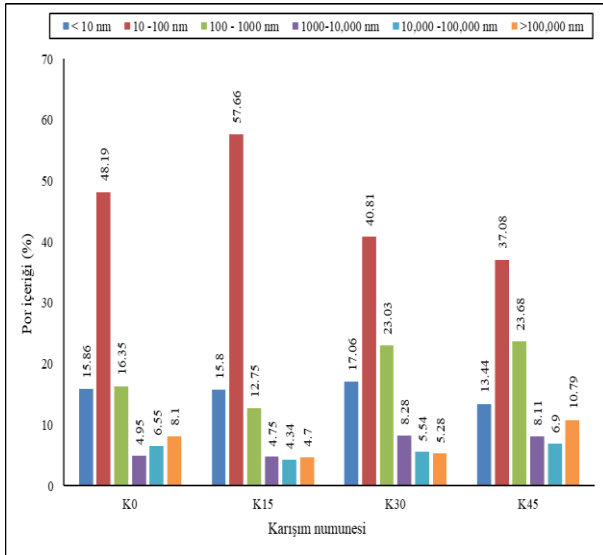
çapları açısından değerlendirildiğinde ise %15 düzeyindeki yer değişim oranının daha yüksek yer değişim oranlarından farkı net olarak gözükmemektedir. Kontrol numunesinin por yapısında, ortalama por çapı 64.1 nm olarak ölçülmüştür. Karışımlardaki %15 atık cam tozu içeriği, ortalama por çaplarını küçültecek bir etki yaratarak ortalama por çapı değerini %44.61 oranında azaltmaktadır. Bu değer, karışımlara toz formda ilave edilen atık cam tozu içeriğinin boşluk doldurucu fonksiyonunu işaret etmektedir. Cam tozunun 600µm'nin altında öğütüldüğü tane boyutlarında boşluk doldurucu özellik sergilemesi karşılaşılması olağan bir durumdur [23]. Ancak yer değişim düzeyinin %15'ten %30'a çıkarılması, ortalama por çapını %7.64 düzeyinde arttırarak cam tozunun farklı bir fonksiyonda işlev göstermesine neden olmaktadır. Benzer durum %45 atık cam tozu içeriğinde de gözükmemektedir. K0 numunesine kıyasla K45 numunesinin por yapısında ortalama por çapı değeri, %50.39 oranında artmaktadır. Elde edilen sonuçlar; %30 ve %50 katkı oranlarında cam partikülleri içeren numunelerde kontrol durumuna kıyasla sırasıyla %21.6 ve %30.4 por artışı tespit edilen çalışmalar ile uyumludur [29]. Bu noktada %15 düzeyindeki kum – atık cam tozu yer değişiminin boşluk doldurucu; daha yüksek düzeydeki atık cam tozu içeriğinin ise cam tozu partiküllerinin prizmatik şekilden ötürü ilave boşluk yaratıcı bir fonksiyonel rol üstlendiğini net olarak ifade etmektedir.



Şekil 4. Harç numunelerinde kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisi (Relationship between the cumulative pore volume and the pore diameters)

Şekil 4' de harç numunelerinin porozimetre analizinden elde edilen kümülatif por hacmi – por çapı ilişkisi görülmektedir. Beklendiği üzere; maksimum düzeyde atık cam tozu içeren K45 numunesi, saptanan maksimum porozite ve maksimum ortalama por çapı değerleri ile uyumlu olarak ölçüm işleminin gerçekleştirildiği 3 – 360,000 nm'lik por çapı aralığı boyunca en yüksek por hacmini sergilemiştir. Benzer şekilde %30 atık cam tozu

içerikli K30 numunesi de atık cam tozu içeriği ile uyumlu olarak 3 – 4000 nm'lik por çap aralığı boyunca en yüksek ikinci por hacmi davranışını sergilemiştir. K30 numunesinde 4000 nm ve üzerindeki por çapları için ise kontrol numunesi ile bir yakınlaşma göze çarpmaktadır. Bu durum %15 üzerindeki kum – atık cam tozu yer değişiminin başlangıçta por doldurucu, daha yüksek düzeylerde ise por genişletici etkisi ile yakından alakalıdır. K15 numunesi için tespit edilen por hacmi – por çapı ilişkisi de mevcut durumu doğrulamaktadır. K15 numunesi 10 – 360,000 nm'lik por çap aralığı boyunca en düşük por hacmi davranışını sergilemiştir. Bu durum %15 düzeyindeki kum – atık cam tozu yer değişiminin por doldurucu etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Kontrol ve K15 numuneleri için 10 – 360,000 nm'lik por çap aralığı boyunca tespit edilen rölatif davranış ayrıca kontrol numunesine kıyasla K15 numunesinde 64.1 nm' den 35.5 nm' e indirgenen ortalama por çaplarını da izah etmektedir. Kashani vd. [30] por yapısındaki makro boşlukların daha küçük kapiler ve mikro boşluklara cam tozu partikülleri aracılığı ile dönüştürülebileceğini saptamışlardır.

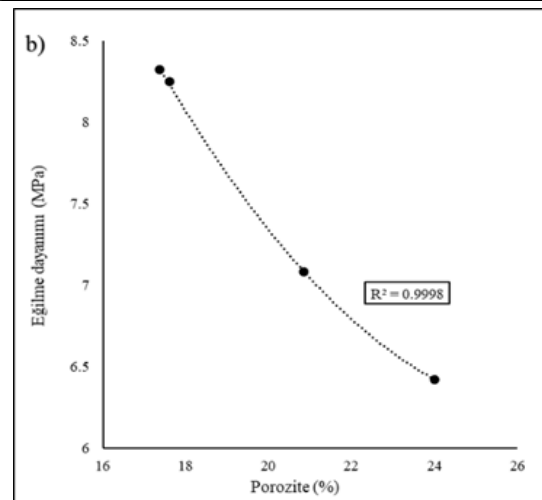
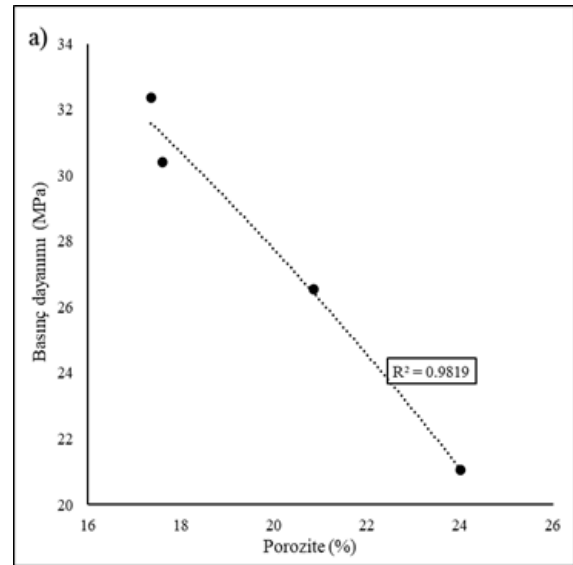


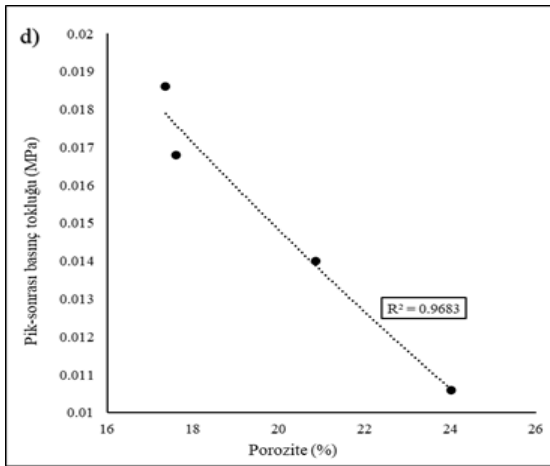
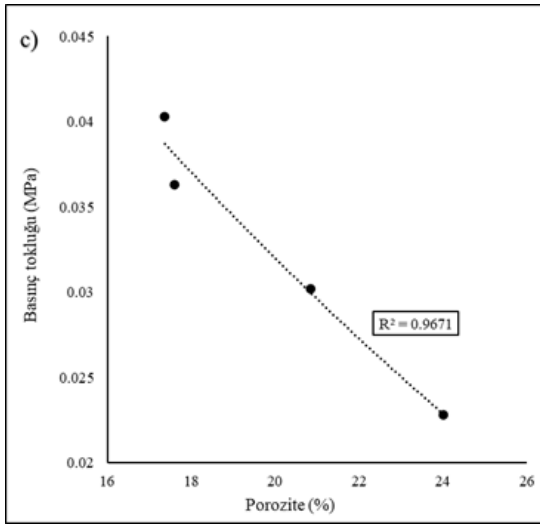
Şekil 5. Harç por yapısında por içeriklerinin dağılımı (Distribution of pore contents in mortar pore structure)

Şekil 5' de harç numunelerinin por yapısını oluşturan farklı por çap aralığındaki por içeriklerinin dağılımı görülmektedir. K0 kontrol numunesinde 10,000 nm ve üzerindeki makro düzeydeki por çapları, toplam por yapısının %14.65'ini oluşturmaktadır. %15 atık cam tozu içerikli K15 numunesinde ise aynı por çap içeriği %9.04 düzeyindedir. K0 numunesine kıyasla K15 numunesinde azalan makro düzeydeki por çapı içeriği, %15 düzeyindeki kum – atık cam tozu yer değişiminin özellikle makro düzeydeki por çapları üzerindeki boşluk doldurucu etkisini ortaya koymaktadır. Bu özellikten ötürü K0 numunesine kıyasla K15 numunesinde 10 – 100 nm aralığındaki por çaplarının ise %57.66 seviyesine çıkarak zirve yaptığı görülmektedir. Özetle %15 düzeyinde atık cam tozu içeriği ile makro düzeydeki boşluklar atık cam tozu partikülleri ile dolarak kapiler

düzeyde ciddi bir por artışına neden olmaktadır. Daha önce bahsedildiği üzere atık cam tozu içeriğinin boşluk doldurucu etkisi, artan cam tozu içeriği ile sınırlanmaktadır. Bu durum K45 numunesinin 10,000 nm ve üzerindeki por çapları ile açıkça ortaya çıkmaktadır. %45 oranındaki atık cam tozu içeriği, K0 numunesine kıyasla K45 numunesinde makro düzeydeki por içeriğini %14.65'ten %17.69 seviyesine çıkartmaktadır. Buna karşın %30 seviyesindeki kum – atık cam tozu yer değişiminin başlangıçta kısmi olarak boşluk doldurucu daha sonradan ise kısmi olarak boşluk artırıcı fonksiyonel özelliği, K30 numunesi için tespit edilen por çapı dağılımında net olarak gözükmemektedir. K30 numunesinde makro düzeydeki boşluklar K0 numunesine kıyasla yaklaşık olarak %4 düzeyinde daha düşük düzeydedir. Azalan makro düzeydeki boşlukların, K30 numunesinde 10– 10,000 nm por çapı aralığındaki kapiler por çapları arttırdığı saptanmıştır. Bu noktada %15 ve %45 düzeydeki atık cam tozu içerikleri sırasıyla por doldurucu ve por artırıcı fonksiyonel işleve karşılık gelmektedir.

Harç numunelerinde tespit edilen mekanik özellikler ile por yapısı özellikleri arasındaki ilişkiler Şekil 6' da görülmektedir.





Şekil 6. Mekanik özellikler- porozite ilişkisi (Relationship between total porosity and mechanical properties)

Harç numunelerinde ölçülen porozite değerinin, numunelerin mekanik özellikleri ile yakından ilişkili olduğu Şekil 6' da görülmektedir. Daha önceden tartışıldığı gibi karışımlara ilave edilen atık cam tozu içeriği numunelerin genel anlamda porozite değerlerini artırıcı bir etkiye sahip olmakla birlikte porozite artışı özellikle %15 'in üzerindeki kum – atık cam tozu yer değişimi için daha ciddi düzeydedir. Buna karşın artan por hacmi sebebiyle harç numunelerinin mekanik özelliklerinde kayıplar yaşanması olasıdır. Numunelerin porozite değerleri ile mekanik özelliklerin değişimi incelendiğinde tespit edilen R^2 değerleri, tüm mekanik özellikler ile porozite arasındaki güçlü bir korelasyonu işaret etmektedir. Porozitenin; basınç dayanımı, eğilme dayanımı, basınç tokluğu ve pik-sonrası basınç tokluğu ile olan ilişkisinden sırasıyla 0.98, 0.99, 0.96 ve 0.96 düzeylerinde R^2 değerlerinin elde edilmesi atık cam tozu ilaveli harçlarda porozite esaslı tasarımın bir tasarım metodu olarak değerlendirilebileceğini işaret etmektedir.

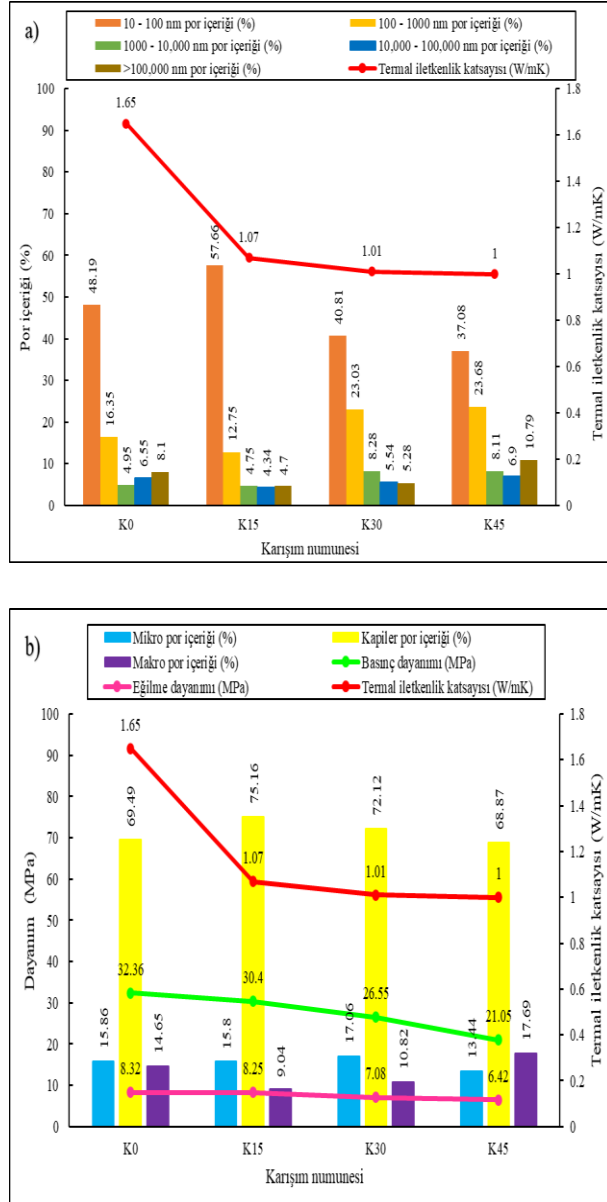
3.5. Termal İletkenlik Test Sonuçları (Thermal Conductivity Test Results)

Çizelge 4' de alkali-aktive edilmiş cüruf harçlarında, atık cam tozu ilavesi nedeniyle değişen termal iletkenlik katsayıları görülmektedir. Termal iletkenlik katsayıları, W/m.K cinsinden 1.00 – 1.65 aralığında ölçülmüştür.

Çizelge 4. Termal iletkenlik katsayısı test sonuçları. (Thermal conductivity test results)

Karışım numunesi	Termal iletkenlik
	Katsayısı (W/m.K)
K0	1.65
K15	1.07
K30	1.01
K45	1.00

Atık cam tozu içermeyen kontrol numunesinde 1.65 W/m.K'lık termal iletkenlik katsayısı ölçülmüştür. Harç karışımlarına ilave edilen atık cam tozunun, numunelerin yalıtkanlık özelliklerine önemli ölçüde katkı sunduğu görülmektedir. Doğal kum partiküllerine kıyasla daha düşük termal iletkenlik katsayısına sahip olan cam partiküllerinin, toz formuna indirgenmiş tane boyutlarıyla termal performans açısından maksimum seviyede yalıtkanlık sergilediği bilinmektedir [27]. Harç karışımlarında gerçekleştirilen %15, %30 ve %45 düzeyindeki kum – atık cam tozu yer değişimi için sırasıyla %35.15, %38.78 ve %39.39 düzeylerinde iletkenlik düşüşleri saptanmıştır. Lu vd. [31] deneysel çalışmalarında karışımlarda artan cam tozu içeriğinin çimento matrisinde yarattığı boşluk sebebiyle numunelerin yoğunluğunu düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Bu durumda, artan boşluk sebebiyle yalıtkanlık özelliklerinin de artması da olasıdır. Sonuçlar %15 atık cam tozu içeriğinin karışımlarda ciddi düzeyde yalıtkanlık sağladığını ortaya koyarken; %15 'in üzerinde gerçekleştirilen kum – atık cam tozu yer değişiminin neredeyse alkali – aktive edilmiş cüruf harçlarında yalıtkanlığa katkı sunmadığını işaret etmektedir. %15 seviyesinden %30 seviyesine çıkan atık cam tozu içeriği K15 numunesine kıyasla K30 numunesinde sadece %5.6 düzeyinde iletkenlik düşüşüne olanak sağlamıştır. Bununla birlikte; K15 ve K45 numunelerinin iletkenlik değerleri karşılaştırıldığında %15 seviyesinden %45 seviyesine çıkan atık cam tozu içeriğine rağmen termal iletkenlik değeri sadece %6.54 düzeyinde düşmüştür. Elde edilen sonuçlar; ortaya çıkan mekanik dayanımlardan bağımsız olarak alkali aktive edilmiş cüruf harçlarında termal yalıtkanlık hedefi için optimum kum – atık cam tozu yer değişim seviyesinin %15 olduğunun altını çizmektedir.



Şekil 7. Harç numunelerinde mekanik özellikler – por yapısı özellikleri – termal yalıtıklık ilişkisi (Relationship between mechanical - pore structure - thermal insulation properties)

Şekil 7’ de termal iletkenlik düşüşü ile por yapısındaki spesifik por çap aralığındaki por içeriklerinin değişimi görülmektedir. Termal iletkenlik katsayısında ciddi düzeyde düşüşün yaşandığı %15 atık cam tozu katkı oranında (10 – 100) nm por çap aralığındaki por içeriği artış gösterirken 100 – 350,000 nm aralığındaki tüm por içerikleri ise düşüş trendindedir. Buna karşın %30 ve %45 içerikli numunelerde aynı çap aralıkları boyunca tam tersi bir durum yaşanırken iletkenlik düşüşü de minimuma inmektedir. Mevcut durum termal iletkenlikteki düşüşün spesifik por çap aralığındaki por içeriklerinin değişimi ile yakından alakalı olduğunu işaret etmektedir. Yukarıda elde edilen sonuçlar, K0 – K15 numuneleri arasındaki yüksek düzeydeki termal

yalıtıklık artışı ile K15 – K30 – K45 numuneleri arasındaki sınırlı yalıtıklık artışının ayırt edilerek detaylı olarak analiz edilmesini gerektiğini işaret etmektedir.

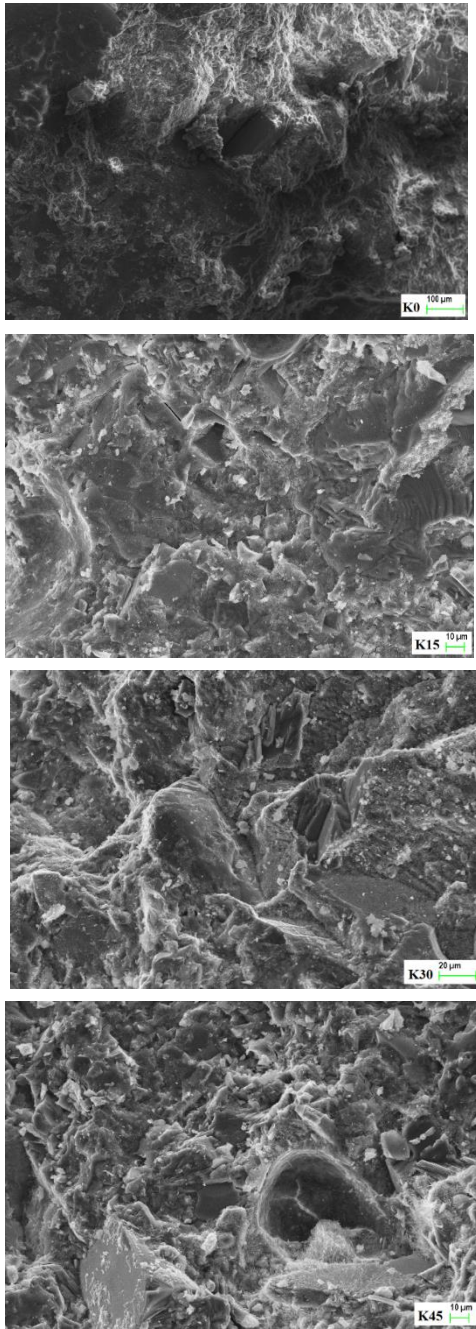
Harç karışımlarına ilave edilen %15 düzeyindeki atık cam tozu, K0 numunesine kıyasla K15 numunesinde saptanan %35.15 düzeyindeki yüksek düzeydeki termal yalıtıklık artışını esasen makro boyuttaki por çaplarını kapiler por çaplarına dönüştürerek gerçekleştirmektedir. Kapiler düzeydeki por hacminin artışı ile gelişen yalıtıklık özelliği aynı zamanda kum partiküllerine kıyasla daha düşük termal iletkenlik katsayısına sahip olan cam tozu partiküllerinin katkısı ile desteklenmektedir.

K15, K30 ve K45 numunelerinin iletkenlik değerleri arasındaki değişimler değerlendirildiğinde ise karışımlara %30 ve %45 düzeylerinde ilave edilen atık cam tozu içeriğine rağmen termal iletkenlik katsayısındaki değişim, oldukça sınırlı ve arzu edilen düzeyde değildir. K0 ve K15 numunelerinin por yapısındaki geçişlerden farklı olarak %15 atık cam tozu içeriğinde maksimum düzeye çıkan kapiler por hacmi, karışımlara ilave edilen cam tozu içeriği ile orantılı olarak tekrar azalma trendine yönelmektedir. Kapiler por çaplarının azaldığı bu noktada %9.04’ten %17.69’a çıkan makro por içeriği termal yalıtıklık özelliklerine ancak 1.07-1.01 W/m K aralığında katkı sunabilmektedir. Bu noktada elde edilen %6.54 düzeyindeki yalıtıklık artışına karşın mekanik dayanımlarda basınç dayanımı için %30.75, eğilme dayanımı için %22.18 ve basınç tokluğu için %37.18 düzeyinde ciddi kayıplar saptanmıştır.

DeneySEL çalışmalardan elde edilen sonuçlar alkali aktive edilmiş cüruf harçlarında termal yalıtıklık özelliğinin kapiler por hacmi artışı ile elde edilmesi durumunda mekanik özellikler – termal yalıtıklık optimizasyonunun maksimum verimlilikte olacağına işaret etmektedir. Buna karşın azalan kapiler por hacmine karşılık makro por hacim artışı mekanizması ile elde edilen termal yalıtıklık artışı, oldukça sınırlı olmasının yanı sıra mekanik özelliklerde aşırı kayıplara sebep olmaktadır.

3.6. SEM Analizi (SEM Analysis)

Harç karışımlarında kum ile yer değiştirilerek kullanılan cam tozunun harç numunelerinin mekanik, por yapısı ve termal iletkenlik özelliklerine olan etkisini detaylı olarak incelemek için 28 günlük mekanik testlerden geriye kalan numune parçalarının kırılma yüzeylerinden hassas olarak alınan örnekler üzerinden mikro yapı incelemeleri SEM analizi ile gerçekleştirilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu tüm numuneler için standart 20 kV hızlandırma voltajı altında çalıştırılmış olup mikro yapı görüntülemeleri cam tozu içermeyen K0 kontrol numunesi için 200x, cam tozu içerikli K15, K30 ve K45 numuneleri için 1000x büyütme ile elde edilmiştir. Şekil 8’ de harç numunelerine ait SEM görüntüleri sunulmaktadır.



Şekil 8. Harç numunelerinin mikro yapı görüntülemeleri (SEM observations of mortar samples)

Harç numunelerine ait mikro yapı görüntülemeleri incelendiğinde, atık cam tozu içermeyen K0 kontrol numunesinde yaklaşık 80 µm genişliğe sahip boşlukların konumlanabildiği bir çimento matrisi görüntüsü elde edilmiştir. Elde edilen mikro yapı görüntüsü, numunenin cıva porozimetresi deneyi aracılığı ile ölçülen 64.1 nm'lik hacimsel ortalama por çapı ve %17.36 düzeyindeki porozite değerleri ile uyumludur. Atık cam tozu içeren K15 numunesinde ise, atık cam tozu ilavesinin por doldurucu işlevi nedeniyle çimento matrisinin daha yoğun bir matris halini aldığı görülmektedir. Bu noktada tespit edilen mikro yapı

morfolojisi, por yapısının ölçülen 35.5 nm'lik ortalama hacimsel por çapı ile uyumludur. Optimum düzeydeki cam tozu içeriğinin kontrol numunesine kıyasla daha yoğun bir çimento matrisi yaratması Lu vd. [31] çalışmaları ile uyumludur. K30 ve K45 numunelerine ait SEM görüntülemelerinde ise K0 ve K15 numunelerine kıyasla morfolojik açıdan yüzey görünümü daha prizmatik formda olan çimento matrisi görüntülemeleri dikkat çekmektedir. Bu noktada artan cam tozu içeriği ile aynı zamanda prizmatik morfoloji oluşumunun arttığı da söylenebilir. Kum ile yer değiştiren cam tozu taneciklerinin keskin köşeli ve prizmatik tane şekli, tanelerin birbiri ile temas ettiği noktalarda neredeyse geometrik formda por gelişimi oluşumuna olanak sağlamaktadır. Ayrıca, K0 numunesine kıyasla K15, K30 ve K45 numunelerine ait görüntülemelerde agrega fonksiyonu ile kullanılmış olan cam tozu partiküllerinin çimento matrisi ile temas noktalarında lokal çatlaklar görülmektedir. Kırılabilir cam tozu partiküllerinde görülen çatlaklar, numunelerin basınç tokluğu kapasitelerinde elde edilen kayıpları açıklamakla birlikte partiküllerin düşük termal iletkenlik özellikleri ve ısıl dalga boyu kısaltıcı etkileri yalıtkanlık özelliğine katkı sunabilmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Deneyel çalışmadan aşağıdaki önemli sonuçlar elde edilmiştir:

- Harç karışımlarında gerçekleştirilen %15, %30 ve %45 düzeylerindeki kum – atık cam tozu yer değişimleri ile numunelerin termal yalıtkanlık özellikleri sırasıyla %35.15, %38.78 ve %39.39 düzeylerinde artmaktadır.
- %15 atık cam tozu içeriğinde tespit edilen %35.15'lik termal yalıtkanlık artışı; basınç dayanımında %6.05, eğilme dayanımında %0.84, basınç tokluğu kapasitesinde %9.92 ve pik – sonrası basınç tokluğu kapasitesinde %9.67 düşüş ile elde edilebilmiştir.
- %45 atık cam tozu içeriğinde tespit edilen %39.39'luk termal yalıtkanlık artışı; basınç dayanımında %34.05, eğilme dayanımında %22.83, basınç tokluğu kapasitesinde %43.42 ve pik – sonrası basınç tokluğu kapasitesinde %43.01 düşüş ile elde edilebilmiştir.
- %15 düzeyindeki kum – atık cam tozu yer değişimi ile sağlanan termal yalıtkanlık, eşit kabul edilebilecek düzeydeki mikro por hacmi altında artan kapiler por hacmi artışı sayesinde olmaktadır. Bu mekanizma ile sağlanan iletkenlik düşüşünde mekanik özelliklerdeki düşüşler sınırlı olmaktadır.
- %30 ve %45 düzeyindeki kum – atık cam tozu yer değişimi ile sağlanan termal iletkenlik düşüşü ise azalan kapiler por hacmine karşılık artan makro por hacmi ile gerçekleşmektedir.

Bu mekanizma ile sağlanan iletkenlik düşüşünde mekanik özelliklerdeki düşüşler ciddi düzeydedir.

- Harç numunelerinin por yapısı özellikleri dikkate alındığında %15 düzeyindeki atık cam tozu içeriği por doldurucu, daha yüksek düzeydeki atık cam tozu içeriği ise por artırıcı fonksiyon üstlenmektedir. SEM görüntülemeleri ve cıva porozimetresi analizinde ölçülen por çapları, mevcut durumu mikro yapı ve por yapısı özellikleri açısından doğrulamaktadır.
- Diğer katkı oranlarından farklı olarak %15 atık cam tozu içeriğinde hidrasyonun ilk günlerinde gözlemlenen puzolanik etki sayesinde eğilme, basınç tokluğu ve pik- sonrası basınç tokluğu kapasitelerinde artışlar saptanabilmektedir.
- Atık cam tozu içeriğinin numunelerin mekanik performansları üzerindeki olumlu etkisinin hidrasyonun gelişimi, numune yaşı ve atık cam tozu içeriği ile yakından alakalı olduğu saptanmıştır. Tüm kür sürelerinde, puzolanik etki kaynaklı mekanik performans gelişimi düşük cam tozu içeriğinde daha baskındır. Artan atık cam tozu içeriği özellikle 28 günlük yaşta mekanik performans gelişimini sınırlamaktadır.
- Harç numunelerinde mekanik özellikler – termal iletkenlik optimizasyonu dikkate alındığında optimum atık cam tozu içeriği %15 olarak gözükmektedir.

Günümüzdeki sürdürülebilirlik ve enerji tasarrufu politikaları, inşaat sektöründe çimento ve kum alternatif malzemelerin kullanımını teşvik etmektedir. Üretimi için yüksek düzeyde enerji harcanan çimento yerine demir – çelik endüstrisinde yan ürün olarak elde edilen yüksek fırın cürufu, endüstriyel bir bağlayıcı malzeme olarak yüksek kullanım potansiyeline sahiptir. Bununla birlikte; cam tozunun düşük ısı iletkenliği ile kalsiyum – silikat yapısına kattığı üstün yalıtımlık özellikleri, gelecekte atık cam tozu ilaveli alkali – aktive edilmiş cüruf harçlarına olan ilgiyi arttırabilecek ölçüdedir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Levent BOSTANCI: Deneyleri yapmış, sonuçlarını analiz etmiş ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Wong C.L., Mo K. H., Yap S. P., Alengaram U. J., Ling, T.-C., “Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review”, *Journal of Cleaner Production*, 195: 226-239, (2018).
- [2]. Huntzinger D.N., Eatmon T.D., “A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative Technologies”, *Journal of Cleaner Production*, 17: 668–675, (2009).
- [3]. Mikulcic H., Cabezas H., Vujanovic M., Duic N.C., “Environmental assessment of different cement manufacturing processes based on Emergy and Ecological Footprint analysis”, *Journal of Cleaner Production*, 130: 213-221, (2016).
- [4]. Madlool N.A., Saidur R., Hossain M.S., Rahim N.A., “A critical review on energy use and savings in the cement industries”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15: 2042-2060, 2011.
- [5]. Kim G.M., Khalid R., Kim H.J., Le H.K., “Alkali activated slag pastes with surface-modified blast furnace slag”, *Cement and Concrete Composites*, 76: 39-47, (2017).
- [6]. Huseien G.F., Mirza J., Ismail M., Ghoshal S.K., Hussein A., “Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80: 54-74, (2017).
- [7]. Ding Y., Dai J.-G., Shi C.-J., “Fracture properties of alkali-activated slag and ordinary Portland cement concrete and mortar”, *Construction and Building Materials*, 165 :310-320, (2018).
- [8]. Sobolev K., Turker P., Soboleva S., Iscioglu G., “Utilization of waste glass in ECO-cement:Strength properties and microstructural observations”, *Waste Management*, 27:971-976, (2007).
- [9]. Ke G., Li W., Li R., Li Y., Wang G., “Mitigation Effect of Waste Glass Powders on Alkali–Silica Reaction (ASR) Expansion in Cementitious Composite”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 12:1-14, (2018).
- [10]. Mirzahosseini M., Riding K. A.,” Effect of curing temperature and glass type on the pozzolanic reactivity of glass powder”, *Cement and Concrete Research*, 58:103-111, (2014).
- [11]. Sharifi Y., Afshoon I., Firoozjaei Z., Momeni A., 2016. “Utilization of Waste Glass Micro-particles in Producing Self-Consolidating Concrete Mixtures”, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 10: 337-353, (2016).
- [12]. Schwarz N., Cam H., Neithalath N.,”Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash”, *Cement & Concrete Composites*, 30: 486-496, (2008).
- [13]. Gorospe K., Booya E., Ghaednia H., Das S., “Effect of various glass aggregates on the shrinkage and expansion of cement mortar”, *Construction and Building Materials*, 210: 301–311, (2019).
- [14]. Choi S.Y., Choi Y. S., Yang E. I.,”Effects of heavy weight waste glass recycled as fine aggregate on the

- mechanical properties of mortar specimens”, *Annals of Nuclear Energy*, 99: 372–382, (2017).
- [15]. Kim I.S., Choi S. Y., Yang E. I., “Evaluation of durability of concrete substituted heavyweight waste glass as fine aggregate”, *Construction and Building Materials*, 184: 269–277, (2018).
- [16]. Hama S.M., Mahmoud A. S., Yassen M. M.,” Flexural behavior of reinforced concrete beam incorporating waste glass powder”, *Structures*, 20: 510–518, (2019).
- [17]. Lu J.-X., Yan X., He P., Poon C. S., “Sustainable design of pervious concrete using waste glass and recycled concrete aggregate”, *Journal of Cleaner Production*, 234 :1102-1112, (2019).
- [18]. Khmiri A., Chaabouni M., Samet B.,” Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars”, *Construction and Building Materials*, 44: 74-80, (2013).
- [19]. He Z., Zhan P., Du S., Liu B., Yuan W., “Creep behavior of concrete containing glass powder”, *Composites Part B*, 166: 13-20, (2019).
- [20]. TS EN 196-1, “Çimento deney metotları- Bölüm 1: Dayanım tayini”, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, (2016).
- [21]. TS EN 1015-11, “Kagir harcı- Deney metotları- Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini”, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara, (2000).
- [22]. Jang B.-K., Lee J.-C., Kim J.-H., Chung C.-W., “Enhancement of thermal neutron shielding of cement mortar by using borosilicate glass powder”, *Applied Radiation and Isotopes*, 123:1–5, (2017).
- [23]. Jiang Y., Ling T.-C., Mo K. H., Shi C., “A critical review of waste glass powder – Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products”, *Journal of Environmental Management*, 242: 440–449, (2019).
- [24]. Topcu B.I., Canbaz M.,” Properties of concrete containing waste glass”, *Cement and Concrete Research*, 34: 267–274, (2004).
- [25]. Šimonová H., Zahálková J., Rovnaníková P., Bayer P., Keršner Z., Schmid P., “Mechanical Fracture Parameters of Cement Based Mortars with Waste Glass Powder”, *Procedia Engineering*, 190: 86 – 91, (2017).
- [26]. Aly M., Hashmi M.S.J., Olabi A.G., Messeiry M., Abadir E.F., Hussain A.I., “Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and physical behaviour of waste-glass cement mortar”, *Materials and Design*, 33: 127–135, (2012).
- [27]. Yang S., Ling T.-C., Cui H., Poon C. S., “Influence of particle size of glass aggregates on the high temperature properties of dry-mix concrete blocks”, *Construction and Building Materials*, 209: 522–531, (2019).
- [28]. Moretti J.P., Sales A., Quarcioni V. A., Silva D. C.B., Oliveira M. C.B., Pinto N. S., Ramos L. W.S.L., “Pore size distribution of mortars produced with agroindustrial waste”, *Journal of Cleaner Production*, 187: 473-484, (2018).
- [29]. Park S. B., Lee B. C., Kim J. H., “Studies on mechanical properties of concrete containing waste glass aggregate”, *Cement and Concrete Research*, 34: 2181–2189, (2004).
- [30]. Kashani A., Ngo T. D., Hajimohammadi A., “Effect of recycled glass fines on mechanical and durability properties of concrete foam in comparison with traditional cementitious fines”, *Cement and Concrete Composites*, 99: 120–129, (2019).
- Lu J.-X., Zheng H., Yang S., He P., Poon C.S., “Co-utilization of waste glass cullet and glass powder in precast concrete products”, *Construction and Building Materials*, 223: 210–220, (2019)