



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.01.2024
Kabul Tarihi : 25.03.2024

Received Date : 03.01.2024
Accepted Date : 25.03.2024

ATIK CAM TOZU KATKILI BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIK ALTINDAKİ PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF WASTE GLASS POWDER SUBSTITUTED CONCRETES UNDER HIGH TEMPERATURES

Tuba DEMİR^{1*} (ORCID: 0000-0003-2092-1029)
Bahar DEMİREL¹ (ORCID: 0000-0001-7483-2668)
Ayşe Çiğdem ŞİRECI¹ (ORCID: 0000-0001-8465-8624)

¹ Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Tuba DEMİR, t.demir@firat.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmanın amacı atık cam tozu kullanılarak üretilen betonların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası dayanım performanslarındaki değişimini araştırmaktır. Bu doğrultuda, farklı atık cam tozu ikame oranı içeren 6 farklı beton karışım serisi hazırlanmıştır. Üretilen beton serileri üzerinde mekanik testler içeren deneysel bir program yürütülmüştür. Kür süresini tamamlayan beton serileri, sırasıyla 400 °C, 600 °C, 800 °C'de, 1 saat yüksek sıcaklıkta bekletilmiştir. Bu beton gruplarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı kayıpları belirlenmiştir. Betonda atık cam tozu ikamesinin artmasıyla betonun mekanik özelliklerinde azalma görülmüştür. Öte yandan en iyi sonuç cam tozu oranının %10 oranında kullanıldığı serilerde gözlenmiştir. Betonda cam tozu oranının %10'a kadar kullanımının betonun performansını arttırdığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, atık cam tozunun yüksek sıcaklığa dayanıklı beton üretiminde çimento ikame malzemesi olarak kullanılabilmesi görülmüştür. Çimento miktarında yapılacak bu azaltma ile karbon ayak izi azaltılmış daha çevreci bir beton üretiminin mümkün olabileceği görülmüştür. Ayrıca beton üretiminde atık cam tozu kullanımının, atık yönetimine çözüm ve döngüsel ekonomiye katkı sağlayarak inşaat sektörü için potansiyel bir seçenek haline gelmektedir.

Anahtar Kelimeler: Beton, atık cam tozu, beton basınç dayanımı, yüksek sıcaklık

ABSTRACT

This study aims to investigate the changes in the strength performance of concretes produced using waste glass powder before and after high temperature. Accordingly, a series of 6 concretes with different waste glass powder replacement ratios were produced. An experimental program including mechanical tests was carried out on the produced concrete series. Concrete series that completed the curing period were kept at 400 °C, 600 °C, 800 °C, respectively, and compressive strength losses after high temperature were determined. The mechanical properties of concrete decreased with the increase of waste glass powder substitution in concrete. On the other hand, the best results were observed in the series where the glass powder ratio was 10%. It was observed that the use of up to 10% of glass powder in concrete increased the performance of concrete. As a result, it was observed that waste glass powder can be used as a cement replacement material in the production of high temperature resistant concrete. With this reduction in the amount of cement, it has been seen that it is possible to produce a more environmentally friendly concrete with a reduced carbon footprint. In addition, the use of waste glass powder in concrete production becomes a potential option for the construction sector by providing a solution to waste management and contributing to the circular economy.

Keywords: Concrete, waste glass powder, concrete compressive strength, high temperature

GİRİŞ

Yapı sektöründe kullanılan beton, istenilen şeklin verilmesi, ekonomik olması, dayanımının ve durabilitesinin yüksek olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Bengal vd., 2022). Kentsel dönüşümlerin, depremler sonrası meydana gelen yıkımların vb. durumlar nedeniyle betonun kullanımı sürekli artmaktadır. Yaşanan bu artış çevre kirliliğinin, endüstriyel atıkların ve doğaya salınan sera gazlarının artışı da beraberinde getirmektedir. Bu durumu en aza indirmek için çok sayıda çalışma yapılmaktadır (Acikgenc Ulas, 2022; Alyamac vd., 2017; Ferdosian vd., 2017). Bu çalışmaların birçoğu beton üretimi sırasında kullanılacak çimento miktarını azaltmaya yöneliktir; kalan kısmı ise atıkların beton kullanımında nasıl geri kazandırılabilirliği şeklindedir. Yapılan bu çalışmalar CO₂ salınımı tamamen ortadan kaldırmaya da minimum seviyede tutmaya yardımcı olmaktadır (Demir ve Alyamaç, 2022). Sanayileşmiş ülkeler arasında sera gazı etkisini azaltmak için Kyoto Antlaşması imzalanmıştır. Bu protokolün maddelerinden biri olan yüksek enerji tüketen ve endüstriyel atık oluşturan üretim tesislerinde atık işlemlerinin yeniden düzenlenmesi açıkça belirtilmiştir (Delay, 2008). Bu düzenlemeler göz önüne alındığında sürdürülebilirlik kavramı üretim alanına uyarlanmaya başlanmıştır. Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların kullanımı sürerken, diğer yandan bu kaynakların korunması, tasarrufu, geri kazanımının gerçekleştirilmesi ve gelecek nesillerin de kullanılabilmesini güvence altına almak olarak tanımlanabilir (Katare vd., 2020) (Demir vd., 2022). İnşaat endüstrisinde sürdürülebilirlik kavramı ise kullanılan malzemenin CO₂ salınımı, tekrar kullanılabilirliği, çevre kirliliği oluşturması, atıkların kullanımı gibi birçok boyuttan ele alınmaktadır (Martínez-Lage vd., 2020). Bir malzemenin sürdürülebilir olması inşaat sektöründe tek parametre değildir. Malzemenin aynı zamanda beton dayanımına olumlu etki yapması da önemli bir parametredir (Monteiro, 2006; Zhong vd., 2018).

Beton endüstrisinde kullanılabilir bir malzeme olarak tercih edilen atık ürünlerden biri cam tozudur. Diğer atık türleri ile birlikte cam tozunun da saklanması, yok edilmesi veya tekrar kullanıma hazır olması önemli bir çalışma konusu olarak ele alınmaktadır (Orhan vd., 2017). Şöyle ki cam tozu, ahşap ve plastik gibi birçok katı atık türüyle karşılaştırıldığında, kimyasal yapısı gereği stabildir (Raju ve Kumar, 2014). Toprağa gömülü kalan cam diğer atık ürünlere nazaran uzun süre biyolojik olarak parçalanamaz (Derinpınar vd., 2022; Shayan vd., 2006). Bununla birlikte bazı kimyasal birleşenleri içeren camlar toprağı ve yeraltı sularını kirletmektedir. Bu durum toplumsal olarak büyük tehdit oluşturmaktadır (Paul vd., 2022). Dünya genelinde yıllık cam üretim miktarı 140 milyon ton seviyesindedir. Bu oran doğal çevre için önemli bir kirlilik anlamına gelmekte aynı zamanda halkın sağlığını tehlikeye atmaktadır (Omran vd., 2016).

Betonda camın geri dönüştürülmesi, katı atık yönetiminde büyük umut vaat etmektedir. Ancak atık camın betondaki etkileri konusunda belli bir kanaat oluşmamıştır. Çünkü bazı literatür çalışmalarında betonda atık cam kullanımının betonun mekanik özelliklerine olumlu etkisi olduğu belirtilirken, bazı çalışmalarda ise betonun performansının düşürdüğü belirtilmektedir. Ayrıca literatür çalışmalarında diğer mineral katkılarla birlikte atık cam tozu (CT) kullanılarak betonun performansı belirlenmiştir. Bu çalışmada farklı oranlarda sadece atık cam tozu içeren betonların yüksek sıcaklık öncesi mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık sonrası dayanım performanslarındaki değişim araştırılmıştır. Böylece sadece atık cam tozu kullanılarak, bu katkının betonun performansına olan etkisi incelenmiştir. Dolayısıyla hem çevresel boyutta hem de betonun özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sunulması hedeflenmiştir.

MALZEME VE METOT

Malzeme

Atık CT katkılı beton numunelerinin üretimi için Elazığ çimento fabrikasında üretilen TS EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 R - Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır (TS EN 197-1, 2012). Atık cam tozu, 50 µm tane boyutuna sahip olup, Mey kimya firmasından temin edilmiştir (Şekil 1). Çimento ve atık cam tozuna ait kimyasal özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Beton numunelerin üretiminde Elazığ yöresine ait kırma taş kullanılmıştır. Agregalara standartlara uygun şekilde agrega elek analizi deneyi yapılmıştır (TS EN 1097-2, 2000). Deneysel çalışmada kullanılan maksimum agrega tane çapı 8 mm olup, agregalar 0-4 mm, 4-8 mm olmak üzere 2 farklı gruba ayrılmıştır (Şekil 2). Agregaya ait granülometri eğrisi Şekil 3'te verilmiştir. Beton karışım suyu olarak Elazığ şebeke suyu kullanılmıştır.



Şekil 1. Atık Cam Tozu

Tablo 1. Çimento ve Atık Cam Tozuna Ait Kimyasal ve Fiziksel Özellikler

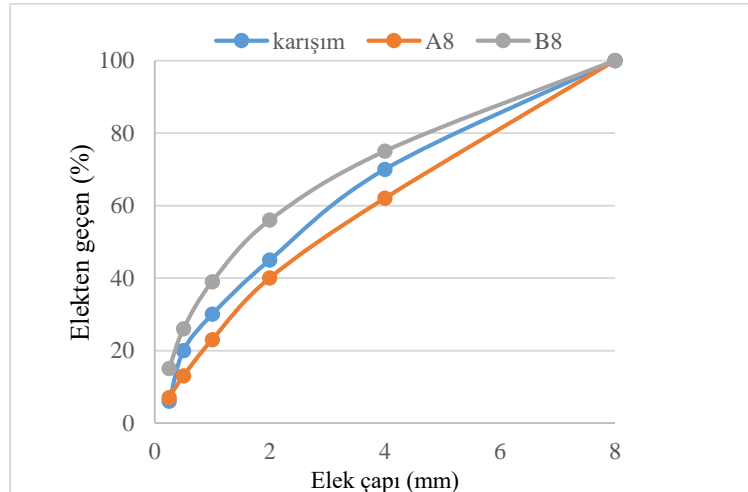
Kimyasal Özellikler	Çimento	Atık CT
SiO ₂	21,12	73,90
Al ₂ O ₃	5,62	1,69
Fe ₂ O ₃	3,24	0,98
CaO	62,94	9,89
MgO	2,73	1,72
SO ₃	2,30	2,96
Na ₂ O	-	7,89
K ₂ O	-	-
Fiziksel Özellikler		
Özgül ağırlık (gr/cm ³)	3,15	2,60



(a)

(b)

Şekil 2. (a) 0-4 mm Agrega (b) 4-8 mm Agrega



Şekil 3. Agrega Granülometri Eğrisi

Kimyasal katkı malzemesi, Basf firmasından temin edilen MasterLife WP 701'dir. Bu katkıya ait kimyasal özellikler Tablo 2' de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kimyasal Katkı Malzemesine Ait Özellikler

Görünüm	Kahverengi – Sıvı
Yoğunluk (20 oC' de)	1.053-1.093 kg/lt
Alkali içeriği (%)	≤ 10 ağırlıkça
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0.10 ağırlıkça
Korozyon davranışı	Sadece BS EN 934-1:2008,EK A.1 standardına uygun bileşenleri içerir.
Tehlikeli maddeler	Tamamen Ek – AZ 'ye uygundur.

Beton Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada, atık cam tozu ilavesiz 1 adet kontrol karışımı ve atık cam tozunun hacimce % 5, % 10, % 15, % 20, % 25 ve % 30 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanıldığı toplamda 7 farklı beton karışım hazırlanmıştır. Tüm serilerde %1.5 oranında kimyasal katkı kullanılmıştır. Karışım oranlarına ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Beton Karışım Miktarları (kg/m³)

Seri Adı	Çimento	Su	Cam Tozu	İnce agrega (0-4) mm	İri agrega (4-8) mm	Kimyasal katkı
CT 0	400	200	0	1164	543	6,0
CT 5	380	200	17	1164	543	6,0
CT 10	360	200	34	1164	543	5,9
CT 15	340	200	50	1164	543	5,9
CT 20	320	200	67	1164	543	5,8
CT 25	300	200	84	1164	543	5,8
CT 30	280	200	101	1164	543	5,7

Karışım hazırlanırken ilk olarak ince ve iri agregalar karıştırılıp daha sonra atık cam tozu ve çimento ilave edilerek kuru karışım hazırlanmıştır. Kuru karışım hazırlandıktan sonra su ve su ile seyreltilmiş kimyasal katkı karışıma eklenmiştir. Karılma işlemi sonrası her seriye slump (çökme) deneyi uygulanmıştır. Daha sonra beton karışım 100x100x100 mm'lik kalıplara yerleştirilerek 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Prizini alan numuneler kalıplardan çıkarılarak kür havuzuna bırakılmıştır. Numuneler 7., 28. ve 90. günlerde kür havuzundan çıkartılarak 105 °C'de 24 saat boyunca etüvde kurutulmuş daha sonra su emme, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmanın deneysel programı Tablo 4'te sunulmuştur.

Tablo 4. Deneysel Program Özeti

Testler	Test standartı	Test yaşı (gün)	Test edilen numune sayısı	Numune geometrisi (mm ³)
Slump (çökme)	TS EN 12350-2			
Ultrases geçiş hızı	TS EN 12504-4	28	3	100x100x100
Su emme	TS EN 993-1	28	4	100x100x100
Basınç dayanımı	TS EN 12390-3	7, 28, 90	3	100x100x100
Yarmada çekme dayanımı	TS EN 12390-6	28	3	100x100x100

Slump (çökme)Deneyi

Beton üretiminden sonra taze betonun işlenebilirliği TS EN 12350-2'ye göre uygulandı (TS EN 12350-2, 2019). Bu standart doğrultusunda taban çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan metalik koni şeklindeki kalıp, her beton seri üretiminden hemen sonra üç aşamada taze beton karışımıyla doldurulmuştur. Her aşamada, 16 mm çapında ve 600 mm uzunluğunda bir sıkıştırma çubuğu kullanılarak 25'er defa eşit şekilde şişleme işlemi yapılmıştır. Kalıbın dikey olarak yukarıya doğru kaldırılmasıyla elde edilen çökme değeri ölçülmüştür. (Şekil 4).



Şekil 4. Slump (çökme) deneyi

Basınç Dayanımı ve Yarmada Çekme Dayanımı Testi

Basınç dayanım testleri, TS EN 12390-3'e göre, 3 kN/sn yükleme hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir (TS EN 12390-3, 2019). Testlerde Autotest 3000 hidrolik yük kontrollü Beton Basınç Dayanım Presinde, elde edilen basınç dayanım sonuçları ortalamaları, o seriye ait basınç dayanımı olarak hesaplanmıştır. (Şekil 5a).

Ultrases Geçiş Hızı Testi

Tahribatsız test metotlarında ultrases geçiş hızı (UGH) testi, basit ve ekonomik olması sebebiyle betonda yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang vd., 2021). Ultrases geçiş hızı değerlerine göre beton kalitesi hakkında fikir edinebilmek için Whitehurst tarafından yapılmış bir önerme bulunmaktadır. Bu önermeye göre betonun zamana bağlı olarak aldığı yol için sınır değerler tanımlanmıştır. Tanımlanan sınırlara göre betonlar çok kötü ($UGH < 2$ km/sn), kötü ($2 < UGH < 3$), şüpheli ($3 < UGH < 3.5$), iyi ($3.5 < UGH < 4.5$) ve mükemmel ($4.5 < UGH$) olarak genel bir fikir yürütmeye tabi tutulabilmektedir (BS Standard, 2004). (Şekil 5b).



(a)

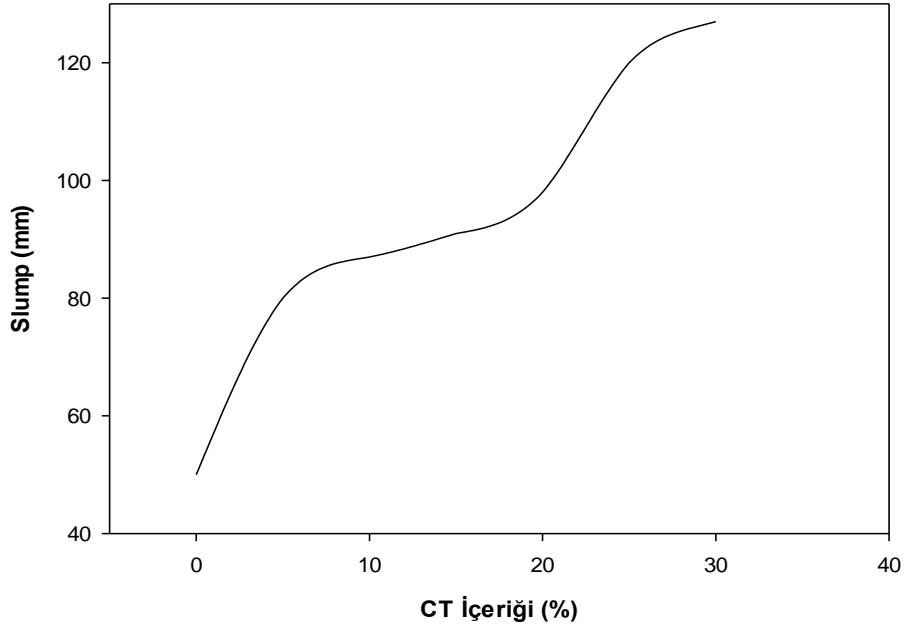
(b)

Şekil 5. (a) Basınç dayanımı –yarmada çekme dayanımı testi (b) Ultrases geçiş hızı testi

BULGULAR VE TARTIŞMA

Slump (çökme)Deneyi

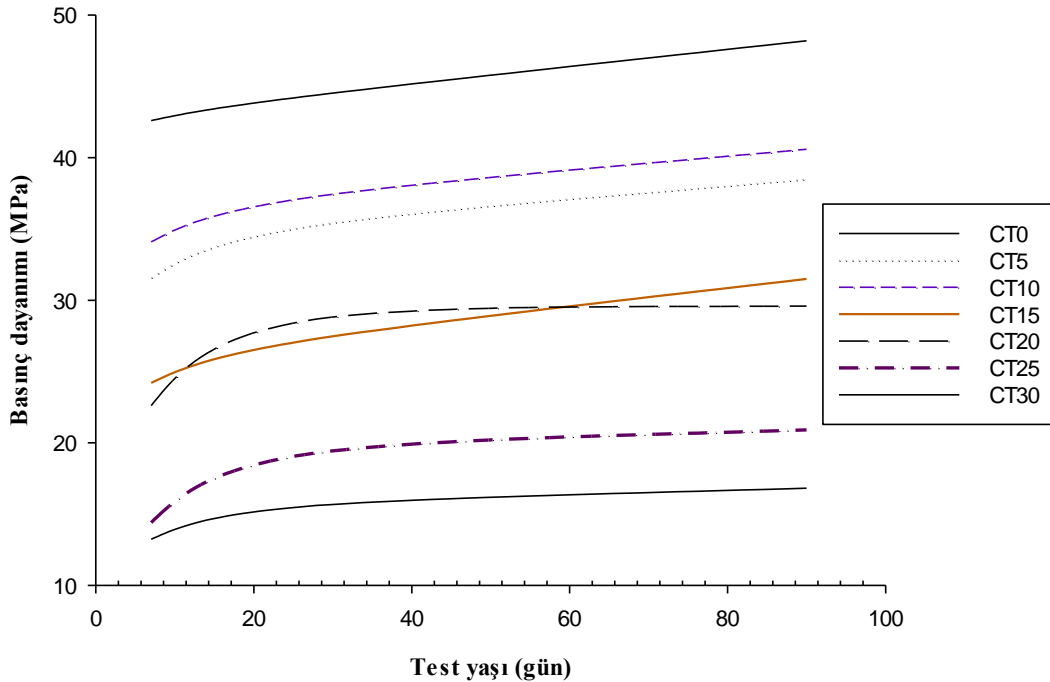
Şekil 4'te gösterildiği gibi CT içeriğindeki artışla birlikte çökmede de bir artış gözlenmiştir. Bu artan işlenebilirliğin, CT'lerin yapışmayan yüzeyinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Guo vd., 2020). Ayrıca CT'nin hidratasyonun yavaş gerçekleşmesi de slump değerinde artışa neden olabilmektedir (Paul vd., 2022).



Şekil 4. Slump (çökme) Değerleri

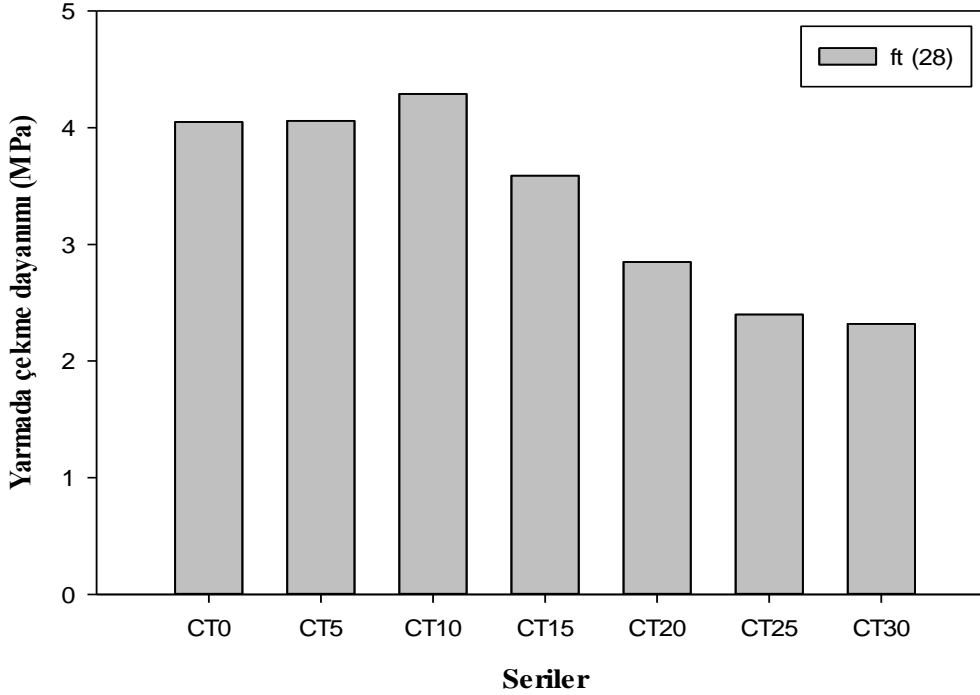
Basınç Dayanımı ve Yarmada Çekme Dayanımı

Tüm beton serilerine ait 7, 28 ve 90 günlük beton basınç dayanım değişimleri Şekil 5'te gösterilmiştir. CT0, CT5, CT10, CT15, CT20, CT25, CT30 serilerinin 7 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla 42.6, 31.6, 34.1, 24.2, 22.6, 14.4 ve 13.2 MPa'dır. 7 günlük ve diğer kür yaşlarında CT0 serisinin basınç dayanımı en yüksek değerde çıkmıştır. Çimento miktarının fazla olmasından kaynaklanan bu durum beklenen bir sonuçtur. CT oranının artmasıyla puzolanik reaksiyon için yeterli su bulunmadığından, kalsiyum-silikat hidrat (CSH) oluşamamaktadır. (Öz, 2017). Kontrol serisinden (CT0) sonra en yüksek basınç dayanım değeri %10 çimento ikamesinin yapıldığı CT10 serisinde gözlenmiştir. Beton serilerinde CT kullanım yüzdesinin artmasına bağlı basınç dayanım değerinde azalma eğilimi görülmektedir. Bunun nedeni CT'lerin puzolanik reaksiyonun yavaş gerçekleşmesinden yani erken yaşlarda puzolanik aktivitesinin daha düşük değerde olduğu düşünülmektedir (Derinpınar vd., 2022). Ayrıca CT'lerin yeterli inceliğe sahip olmaması sebebiyle yeterli miktarda CSH yapısı oluşamadığından basınç dayanımı değerinde düşüş olduğu kanaatine varılmıştır (Turkey vd., 2022).



Şekil 5. Beton Serilerin 7, 28, 90 Günlük Basınç Dayanım Sonuçları

Yarmada çekme dayanımına (f_t) ait veriler Şekil 6'da sunulmuştur. f_t sonuçları incelendiğinde CT 10 serisinde f_t değeri, CT0 serisine göre % 5.94 oranında bir artış göstermiştir. Bu durum nedeni CT oranının belli miktarda artmasıyla daha fazla CSH oluşmaktadır. Bu da dayanım değerinde artışa sebep olmaktadır. Ancak atık cam tozu oranının %15 ve üzeri olan serilerde yarmada çekme dayanımı düşüş göstermiştir. Bu durum CT oranının belli orandan sonra kullanımının ortamda yeterli suyun da bulunmaması nedeni ile puzolanik aktivitenin yeterince gerçekleşemediğinden ve arayüz geçiş bölgesinin özelliğinden kaynaklanabileceği kanaatine varılmıştır (Paul vd., 2022).



Şekil 6. Beton Serilerin 28 Günlük Yarmada Çekme Dayanım (f_t) Sonuçları

Porozite

Porozite değerlerine ait veriler Şekil 7'de sunulmuştur. Porozite testinde numuneler ilk olarak doymun yüzey ağırlıkları daha sonra su altındaki ağırlıkları ölçülmüştür. Sonrasında 105 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra etüvden çıkarılan numuneler tartılmış ve Eşitlik 1'deki formül kullanılarak Porozite değerleri belirlenmiştir (TS EN 772-4, 2000).

$$P = \frac{W_{dyk} - W_{kuru}}{W_{dyk} - W_{sualti}} \times 100 \quad (1)$$

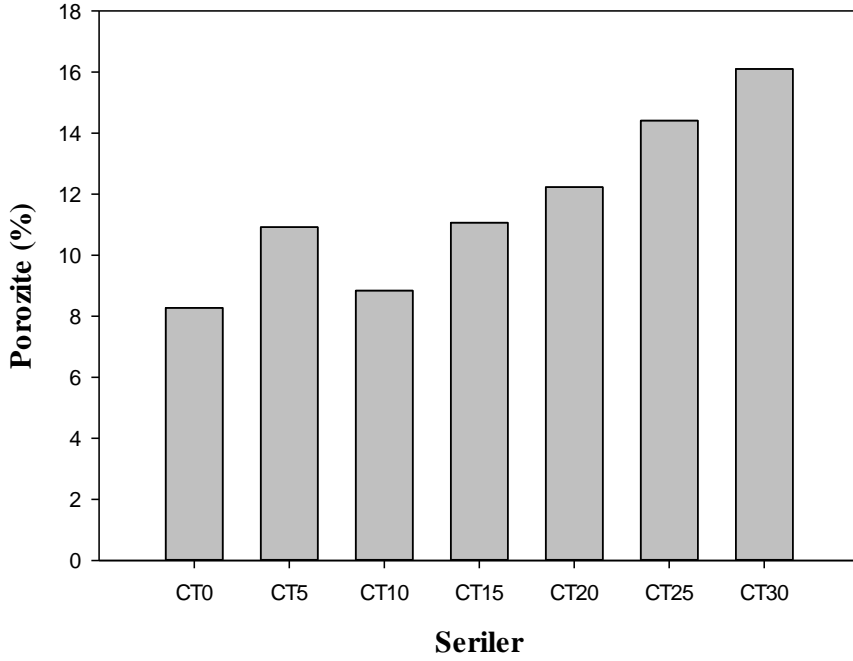
Burada;

W_{dyk} = Numunenin doymun yüzey kuru ağırlığı, (kg)

W_{kuru} = Numunenin etüv kurusu ağırlığı, (kg)

W_{sualti} = Numunenin su altındaki ağırlığı, (kg).

Şekil 7 incelendiğinde genel olarak CT kullanım yüzdesinin artmasına bağlı olarak porozite değerinde artış olmuştur. Ancak bu artış CT10 serisinden sonra düzenli bir artma eğilimi göstermiştir. Yarmada çekme dayanımı sonuçlarında olduğu gibi porozite değerlerindeki bu değişimde de CT10'dan sonraki artışın ortamda yeterli suyun bulunmaması nedeni ile puzolanik aktivitenin yeterince gerçekleşemediğinden ve arayüz geçiş bölgesinin özelliğinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

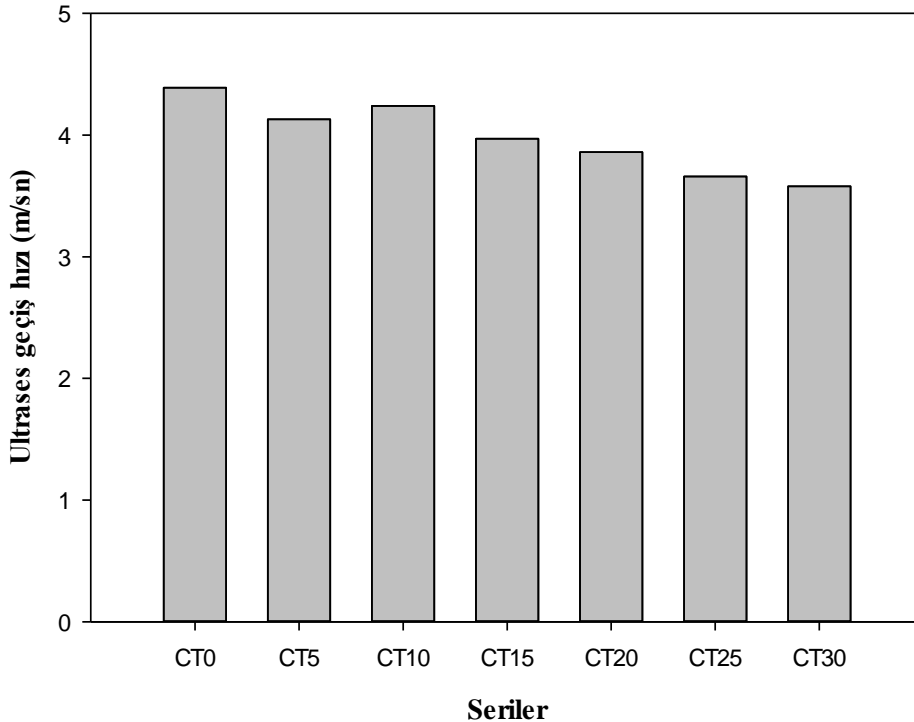


Şekil 7. Beton Serilerin 28 Günlük Porozite Deneyi Sonuçları

Ultrases Geçiş Hızı

Şekil 8’de görüleceği üzere üretilen betonların ultrases geçiş hızı değerleri CT0 için 4.3 km/sn, CT5 için 4.1 km/sn, CT 10 için 4.2 km/sn, CT 15 için 4.0 km/sn, CT 20 için 3.9 km/sn ve CT 25 için ise 3.7 km/sn olarak bulunmuştur. Elde edilen bulgular incelendiğinde, üretilen serilerin hiçbiri içyapısındaki doluluk bakımından mükemmel kaliteye sahip olmamakla birlikte, Whitehurst tarafından yapılan önermeye göre içyapıdaki boşluk miktarının az ve iyi kalitede olduğu söylenebilir (Saint-Pierre vd, 2016). Sonuç olarak çimento yerine farklı oranlarda atık cam tozunu ikame edilerek ikamesiz betonlara benzer şekilde iyi yerleştirilmiş ve içyapısında az boşluk bulunan kaliteli betonlar üretmek mümkündür.

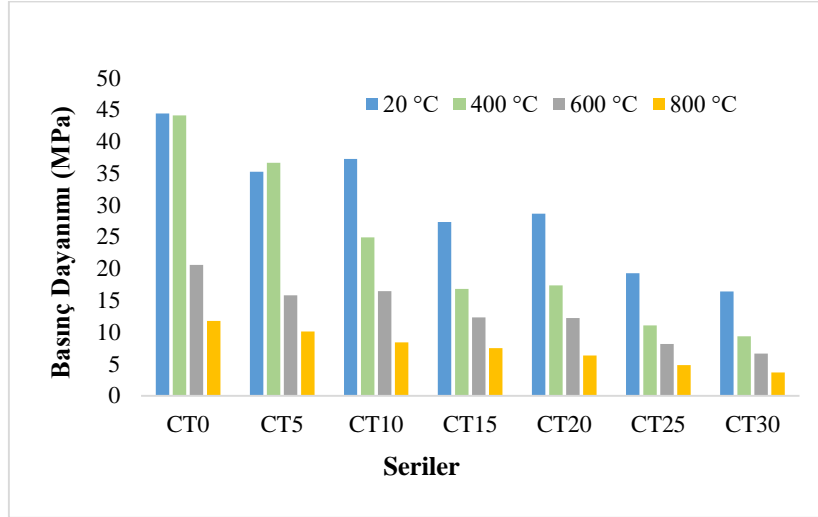
Ayrıca atık cam tozu oranı arttıkça ultrases geçiş hızının azaldığı görülmektedir. Atık cam tozu içeren beton numuneleri arasında en yüksek ultrases geçiş hızı değerine CT10 serisinin ulaştığı görülmektedir.



Şekil 8. Beton Serilerin 28 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Testi Sonuçları

Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılacak seriler, Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan, ısınma hızı 2.5 °C / dk. olan 1200 °C kapasiteli Protherm HLF 150 markalı laboratuvar tipi fırında yapılmıştır. 28 günlük kürünü tamamlayan tüm seriler 3 farklı yüksek sıcaklık değerine (400 °C, 600 °C ve 800 °C) maruz bırakılmışlardır. Beton serilerin basınç dayanımlarının değişimi Şekil 9' da verilmiştir.



Şekil 9. Beton Serilerin Yüksek Sıcaklık Sonrası 28 Günlük Beton Basınç Dayanımı Sonuçları

400 °C sıcaklıkta CT 0 ile CT 5 en iyi sonucu vermiştir ve 20 °C' ye göre dayanım kaybı görülmemektedir. Yüksek sıcaklıkla birlikte serbest suyun buharlaşması ve beton numunelerin jel yapısının da bozulması ile çatlaklar oluşmuştur (Binici vd., 2013). Özellikle 600 °C ve üzeri sıcaklıkta çatlakların artmasına bağlı olarak bozulmalar meydana gelmiştir. Dolayısıyla beton basınç dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Bu dayanım kayıplarının oranları Tablo 5' te gösterilmiştir.

Tablo 5. Beton Serilerin Yüksek Sıcaklık Sonrası 28 Günlük Basınç Dayanımındaki Değişimler

Seri Adı	T (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım Kaybı (%)
CT0	20	47,14	-
	400	44,13	6,37
	600	20,57	56,35
	800	11,77	75,03
CT5	20	36,18	-
	400	36,66	-1,33
	600	15,81	56,29
	800	10,11	72,07
CT10	20	38,47	-
	400	24,9	35,23
	600	16,44	57,26
	800	8,38	78,22
CT15	20	28,49	-
	400	16,80	41,03
	600	12,31	56,81
	800	7,51	73,65
CT20	20	30,52	-
	400	17,36	43,13

CT20	600	12,20	60,02
	800	6,32	79,29
CT25	20	19,29	-
	400	11,16	42,0
	600	8,15	57,76
	800	4,80	75,12
CT30	20	16,42	-
	400	9,37	42,94
	600	6,64	59,56
	800	3,64	77,83

Tablo 5 incelendiğinde CT0 beton serisinde, 20 °C' den 800 °C' ye kadar basınç dayanım kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Cam tozu kullanılan seriler içinde CT5 'te, 20 °C ve 400 °C' deki dayanımın % 1.33 değerinde arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi yükselen sıcaklıkla birlikte beton içerisinde bulunan suyun buharlaşmasıyla birbirine daha yakın hareket eden çimento jel tabakaları arasında bulunan Van der Waals kuvvetlerinin artması ile çimento pastasının dayanım kazanmasından kaynaklandığı ortaya çıkmıştır (Abed vd., 2020; Wu vd., 2019). Serilerin 600 °C'de yüksek oranda dayanım kaybettikleri gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık artışına bağlı olarak beton numuneler içerisindeki suyun buhara dönüşmesi ile oluşan iç gerilmeler sonucu bu dayanım kayıpları meydana gelmektedir (Derinpinar vd., 2022). Cam tozu katkılı seriler de yüksek sıcaklıktan olumsuz etkilenmiştir.

SONUÇLAR

Literatürde çeşitli mineral katkılarla birlikte atık cam tozunun bir arada kullanıldığı betonların yüksek sıcaklık sonrası performanslarını inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada farklı oranlarda sadece atık cam tozu kullanılarak üretilen geleneksel betonların mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık sonrası dayanım performanslarındaki değişim araştırılmıştır. Bunun sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- CT içeriğinin artmasıyla literatüre paralel olarak betonun işlenebilirliğinin arttığı görülmüştür (Paul vd., 2022).
- Yüksek sıcaklık öncesi yapılan deneylerde, beton seriler dayanım performansları açısından incelendiğinde, sadece atık cam tozu ile üretilen betonlarda, CT'nin optimum kullanım oranı %10 olarak tespit edilmiştir. Böylece betonda çimento ile cam tozunun ikamesiyle, atık malzemelerin azaltılması, yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesiyle hem mekanik hem de çevresel açıdan önemli kazanımlar elde edilmiştir.
- Ultrases geçiş hızı; basınç dayanım deneyi ve yarmada çekme dayanım deneyleri ile paralellik göstermektedir.
- Yüksek sıcaklık sonrası yapılan deneylerde, 400 °C' de Van der Waal's kuvvetlerinin artmasından dolayı CT 5 serisinde basınç dayanımlarında artış meydana gelmektedir.
- Cam tozu olsun ya da olmasın tüm seriler 400'ün üzerindeki sıcaklıklarda yüksek dayanım kayıplarına maruz kalmıştır.
- Yüksek sıcaklık sonrası kalan dayanım değerleri incelendiğinde cam tozu kullanılan serilerin yüksek sıcaklıktan daha az etkilendiği görülmüştür. Bu durumun betonda CT kullanımının, betonun yüksek sıcaklık direncini arttırdığını göstermektedir.

Bu çalışma ile bütünsel bir yaklaşım benimsenerek CT kullanımının sürdürülebilir kalkınma açısından kapsamlı bir değerlendirmesi yapılmıştır. CT'nin betonda kullanımı ile azalan çimentoya paralel olarak çimento üretimi sırasındaki karbon salınımı da düşmektedir. Bununla birlikte CT'nin betonda efektif kullanımının ve özellikle yüksek sıcaklık sonrası beton performansının tespit edilmeye çalışıldığı bu çalışma ile hem atık yönetimi hem dayanım performansının iyileştirilmesi hem de karbon ayak izinin azaltılması gibi hedeflere ulaşılmaya çalışılmıştır. Ayrıca önemli sosyal, çevresel ve ekonomik kazanımlar elde edileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Abed, M., & de Brito, J. (2020). Evaluation of high-performance self-compacting concrete using alternative materials and exposed to elevated temperatures by non-destructive testing. *Journal of Building Engineering*, 32, 101720. <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101720>

- Acikgenc Ulas, M. (2022). Development of an artificial neural network model to predict waste marble powder demand in eco-efficient self-compacting concrete. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202200043>
- Alyamac, K. E., Ghafari, E., & Ince, R. (2017). Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*, 144, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>
- Bengal, S. N., Pammar, L. S., & Nayak, C. B. (2022). Engineering application of organic materials with concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 581–586. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.390>
- Binici, H., Temiz, H., Sevinç, A. H., Mustafa, E., Mehmet, K., & Şayir, Z. (2013). Alüminyum Talaşı, Bims ve Gazbeton Tozu İçeren Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(1), 1–15. e-ISSN:1305-631X
- Delay, R. (2008). Our Post-Kyoto Treaty Climate Change Framework: Open Market Carbon-Ranching as Smart Development. *Penn St. Envtl. L. Rev.*, 17, 55.
- Demir, T., and Alyamaç, K. E. (2022). Investigation of the Use of Marble Powder in Production of High Strength Concretes. *Open Journal of Nano*, 7(1), 18–25. <https://doi.org/10.56171/ojn.1034691>
- Demir, T., Demirel, B., and Öztürk, M. (2022). An Evaluation of the Effect of Waste Aluminum Sawdust on the Carbonation of Concrete. *Bitlis Eren University Journal of Science*, 11(4), 993–999. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1141419>
- Demirel, B., & Keleştemur, O. (2011). Yüksek Sıcaklığa Maruz Pomza ve Silis Dumanı Katkılı Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Kür Yaşının Etkisi. *Electronic Journal of Construction Technologies/Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1). e-ISSN:1305-631X
- Derinpinar, A. N., Karakoç, M. B., & Özcan, A. (2022). Performance of glass powder substituted slag based geopolymer concretes under high temperature. *Construction and Building Materials*, 331, 127318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127318>
- Ferdosian, I., & Camões, A. (2017). Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology. *Cement and Concrete Composites*, 84, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.019>
- Guo, P., Meng, W., Nassif, H., Gou, H., & Bao, Y. (2020). New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, 257, 119579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>
- Katare, V. D., & Madurwar, M. V. (2020). Design and investigation of sustainable pozzolanic material. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118431>
- Martínez-Lage, I., Vázquez-Burgo, P., & Velay-Lizancos, M. (2020). Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management*, 104, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.044>
- Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing.
- Omran, A., & Tagnit-Hamou, A. (2016). Performance of glass-powder concrete in field applications. *Construction and Building Materials*, 109, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006>
- Orhan, E., & Yüksel, E. (2017). Öğütülmüş Atık Cam Tozu Katkılı Betonun Pozzolank Aktivitesi ve Yarmada Çekme Dayanımının Belirlenmesi. *Engineering Sciences*, 12(2), 108–116. ISSN: 1308 7231
- Öz, H. Ö. (2017). Atık Cam Tozu ve Yüksek Fırın Cürufunun İçeren Kendiliğinden Yerleşen Harçların Taze, Mekanik ve Durabilite Özellikleri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 9–22.
- Paul, D., Bindhu, K. R., Matos, A. M., & Delgado, J. (2022). Eco-friendly concrete with waste glass powder: A sustainable and circular solution. *Construction and Building Materials*, 355, 129217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129217>
- Raju, S., & Kumar, P. R. (2014). Effect of using glass powder in concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 31, 21–427. ISSN: 2319 8753

- Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022–1027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.158>
- Shayan, A., & Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 457–468. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>
- Standard, B. (2004). BS EN 12504-4: 2004: Testing concrete–Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. London, Reino Unido.
- TS EN 772-4. (2000). Kagir Birimler, deney metotları–Bölüm 4: Tabii taskâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile bosluksuz ve bosluklu birim hacim kütlelerinin tayini (Methods of test for masonry units–Part 4: Determination of real and bulk density and of total a. TS EN 772-4 Ankara-Turkey.
- TS EN 197-1. (2012). Cement - Part 1: General Cements, Composition, Ankara, Türkiye.
- TS EN 1097–2. (2000). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2. (2019). T. beton deneyleri-B. 2: Ç. (slump) deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Turkey, F. A., Beddu, S. B., Ahmed, A. N., & Al-Hubboubi, S. K. (2022). Effect of high temperatures on the properties of lightweight geopolymer concrete based fly ash and glass powder mixtures. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01489. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01489>
- Wu, Z., Lo, S. H., Kang, H. T., & Su, K. L. (2019). High strength concrete tests under elevated temperature. *Athens Journal of Technology & Engineering*. ISSN: 2241-8237
- Zhang, Y., Aslani, F., & Lehane, B. (2021). Compressive strength of rubberized concrete: Regression and GA-BPNN approaches using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 307, 124951. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124951>
- Zhong, R., Wille, K., & Viegas, R. (2018). Material efficiency in the design of UHPC paste from a life cycle point of view. *Construction and Building Materials*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.049>