



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 21.03.2023
Kabul Tarihi : 02.06.2023

Received Date : 21.03.2023
Accepted Date : 02.06.2023

BETON NUMUNE ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALARI İLE ÜRETİLEN BETONLARDA YÜKSEK SICAKLIK ETKİLERİ

Mounzer *KHIR ALLAH*¹ (ORCID: 0000-0002-1744-3858)

Zinnur *ÇELİK*^{2*} (ORCID: 0000-0001-7298-7367)

Ahmet *Ferhat BİNGÖL*³ (ORCID: 0000-0002-8798-8343)

¹ *Dayan Beton, Kilis, Türkiye*

² *Atatürk Üniversitesi, Pasinler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Erzurum, Türkiye*

³ *Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Erzurum, Türkiye*

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Zinnur ÇELİK, zinnur.celik@atauni.edu.tr

ÖZET

Geri dönüştürülmüş agregaların (GDA) betonda kullanılması ile doğal agrega kaynaklarının korunması, düzenli depolama talebinin azalması ve sonuç olarak sürdürülebilirlik açısından çevreye olumlu anlamda katkı sağlaması amaçlanır. Bu amaçla, GDA kullanılarak üretilen betonların yüksek sıcaklık etkilerinden sonra özelliklerinin belirlenmesi için yapılan bu çalışmada; kontrol grubu haricinde, agrega olarak hazır beton laboratuvarlarında 28 günlük dayanım testine tabi tutularak kırılmış beton atıklarından elde edilen GDA'lar kullanılmıştır. GDA'lar betona %25, %50, %75 ve %100 oranında kırmataş agregası ile yer değiştirerek ikame edilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, 100 mm x 200 mm boyutlarında silindirik numuneler üretilmiştir. Üretilen numunelerin birim ağırlıkları belirlenmiştir. Ayrıca numunelerin oda sıcaklığında ve 100°C, 250°C, 500°C ve 750°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımı ve kılcal geçirimsizlik sonuçları tespit edilmiştir. Sonuç olarak, beton atıklarından üretilen GDA'ların kullanımı oda sıcaklığında tespit edilen beton basınç dayanımında kayda değer bir düşüşe neden olmamıştır. GDA ile üretilen numunelerin yüksek sıcaklık sonrası (250°C, 500°C ve 750°C) basınç dayanım sonuçları, kontrol numunesine kıyasla daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Geri dönüştürülmüş agrega, dayanım, sürdürülebilirlik, kılcal geçirimsizlik, yüksek sıcaklık

ABSTRACT

With the use of recycled aggregates (GDA) in concrete, it is aimed to protect natural aggregate resources, to reduce the demand for landfills, and as a result, to contribute positively to the environment in terms of sustainability. Except for the control group, during the concrete production phase, GDAs obtained from concrete wastes, which were subjected to 28-day strength test in ready-mixed concrete laboratories, were used as aggregate. GDAs were substituted for concrete by replacing 25%, 50%, 75% and 100% crushed stone aggregate. Within the scope of the experimental study, cylindrical samples of 100 mm x 200 mm dimensions were produced. The unit weights of the produced samples were determined. In addition, the compressive strength and capillary permeability results were determined after the samples were exposed to room temperature and temperatures of 100°C, 250°C, 500°C and 750°C. As a result, the use of GDAs produced from concrete wastes did not cause a significant decrease in the concrete compressive strength determined at room temperature. It was determined that the compressive strength results of the samples produced with GDA after high temperature (250°C, 500°C and 750°C) were higher than the kontrol sample.

ToCite: *KHIR ALLAH, M., ÇELİK, Z., & BİNGÖL A.F., (2023). BETON NUMUNE ATIKLARINDAN ELDE EDİLEN GERİ DÖNÜŞÜM AGREGALARI İLE ÜRETİLEN BETONLARDA YÜKSEK SICAKLIK ETKİLERİ. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 26(3), 663-675.*

Keywords: Recycled aggregate, compressive strength, sustainability, capillary permeability, high temperature

GİRİŞ

Beton, inşaat sektöründe en çok kullanılan yapı malzemesidir. Beton endüstrisi, doğal kaynakların büyük bir kısmının tüketicisi olarak kabul edilmektedir. Beton bileşenlerinin içinde en fazla paya sahip olan doğal agrega, beton kullanımının artmasıyla birlikte tüketimi de hızlı bir şekilde artmıştır (Marinković vd., 2010). İnşaat ve yıkım atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş agrega (GDA), beton üretiminde kullanılan doğal agrega ile kısmen veya tamamen yer değiştirme için uygun bir malzeme olmuştur. Geri dönüştürülmüş agregaların kullanılması, kireçtaşı kaynaklarının yaklaşık %60'ının korunmasına ve CO₂ emisyonunu yaklaşık %15-20 oranında azalmasına neden olabilir (Xiao vd., 2012; Guo vd., 2018). Bu nedenle, kaynakların korunması ve inşaat sektörünün sürdürülebilirliği açısından GDA kullanımı büyük önem taşımaktadır.

GDA'larla üretilen betonun, doğal agrega ile üretilen betonla aynı işlenebilirliğe sahip olması için daha fazla suya ihtiyacı vardır. GDA'lı betonun basınç dayanımı ve elastisite modülü, normal agregalı betonunkinden nispeten daha düşüktür ve belirli bir su/çimento oranı için geçirgenlik ve donatı korozyon riski daha yüksektir (Padmini vd., 2009). GDA ve doğal agrega ile üretilen betonların dayanım ve durabilite açısından oluşan bu farklılıkları, GDA'ya yapışan eski harçtan kaynaklanmaktadır. GDA'ların fiziksel özellikleri, hem yapıştırılan harcın kalitesine hem de harç miktarına bağlı olarak değişmektedir (Poon vd., 2004).

GDA'ların yoğunluğu ve su emme kapasiteleri yapıştırılan harçtan etkilenmektedir. Geri dönüştürülmüş agregaların üzerinde yaklaşık %30-35 oranında çimento hamuru bulunmasından dolayı, yoğunlukları 2200 ile 2400 kg/m³ ve su emme kapasiteleri ise %5 ile %15 arasında değişkenlik göstermektedir (Poon vd., 2004). GDA ile üretilen betonun taze ve sertleştirilmiş özelliklerini kontrol edebilmek için, betonda kullanılan GDA'ların özelliklerinin önceden tespitine ihtiyaç vardır. Özellikle su emme kapasitesi, geri dönüştürülmüş agregayı doğal agregadan ayıran en önemli parametrelerden olup; betonun hem taze hem de sertleştirilmiş özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Etxeberria vd., 2007).

Harcın özellikleri ve harçtaki hidrate olmayan çimento miktarının zamanla değişmesinden dolayı (Geng vd., 2019), geri dönüştürülmüş agrega elde edilen atık betonların hizmet süresi, betonun mekanik özelliklerini etkileyen temel faktörlerden biri olmaktadır. Bu kapsamda Geng vd. (2019) çalışmalarında, geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen betonun basınç dayanımı, statik elastiklik modülü ve büzülme deformasyon özelliklerinin GDA'nın hizmet süresinden (1, 18 ve 40 yıl) nasıl etkilendiğini araştırmışlardır. Deneysel çalışmada GDA, doğal kaba agrega ile %0, %30, %50 ve %100 oranında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Çalışma sonucunda, GDA elde edilen atık betonun servis süresi, geri dönüştürülmüş agregalı betonun basınç dayanımını kayda değer bir şekilde etkilerken, statik elastisite modülü ve büzülme üzerindeki etkisinin ise sınırlı olduğu tespit edilmiştir.

Demirel & Şimşek (2015) çalışmalarında, beton sınıfı C30 olan ve 7 günlük kür süresi sonunda basınç dayanım testine tabi tutulan beton numune atıklarından elde edilen ince ve iri GDA'ların betonda kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada, kırma agrega %0, 10, 20, 30, 40, 50 ve 100 oranların da GDA ile yer değiştirilmiştir. Beton örneklerinin 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ve 28 günlük elastisite modülleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda, beton içindeki iri GDA miktarı arttıkça basınç dayanımının azaldığı tespit edilmiştir. Farklı oranlarda GDA kullanılarak üretilen betonların tamamında hedeflenen C25 sınıfı betonun basınç dayanım değeri elde edilmiştir. Batman (2018), hazır beton santrallerinde basınç dayanım testine maruz bırakılan farklı yaşlardaki numunelerin (3, 7, 28 gün) öğütülerek betonda GDA olarak kullanımını araştırmıştır. Çalışma kapsamında, GDA ve kırmataş agrega ile üretilen betonların mekanik özellikleri (basınç ve eğilme dayanımı) ve su emme test sonuçları belirlenmiştir. Araştırma sonucunda, %15 ve %30 oranlarında GDA kullanılan numunelerin basınç dayanımları, kontrol betonuna kıyasla yaklaşık olarak sırasıyla %2 ve %4 oranında düşüş göstermiştir. Ayrıca kontrol betonuna göre en fazla dayanım kaybı %13 oranıyla %60 GDA kullanılan numunelerde elde edilmiştir. Sonuç olarak, %60 oranında GDA kullanımı sonucunda elde edilen betonun sınıfı C30 olarak tespit edilmiştir.

Hafif beton, yoğunluğu genellikle 2000 kg/m³'ten az olması ve ısı iletkenliğinin de 1.0 W/m²C'den az olması ile tanımlanır (Newman, 1993). Hafif beton elde etmek için farklı tür agregalar (perlit, genleştirilmiş vermikülit, pomza) kullanılmaktadır. Yaygın kullanım alanına sahip kaba ve ince pomza agregaları, daha hafif beton sağlamanın yanı sıra, betonun uzun vadede dayanım ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirilmesinde önemli etkisi bulunmaktadır.

(Hossain vd., 2011). Sancak vd. (2008), agrega olarak pomza içeren hafif ve normal betonun yüksek sıcaklık direncini karşılaştırmışlardır. Normal betondaki dayanım kaybının hafif betona göre daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Abbu vd., (2023), 100°C ile 450°C arasında değişen yüksek sıcaklığa maruz kalan doğal agregalı betona kıyasla pomza içeren betonların yüksek sıcaklık direncinin daha iyi olduğunu bildirmişlerdir.

GDA'nın beton üretiminde kullanımı onaylanmış olmasına rağmen, yüksek sıcaklıklara maruz kalan geri dönüştürülmüş agregalı betonun performansı çok az ilgi görmüştür (Bui vd., 2018). Zega & Maio (2009) çalışmalarında, %70 kaba GDA içeren betonun, GDA ve yeni harç arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin daha yüksek kalitesi nedeniyle 500°C'de doğal agregadan üretilen betondan daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Xiao & Zhang (2007), yüksek sıcaklıklarda (200–800°C), %30 GDA içeren geri dönüştürülmüş agregalı betonun artık basınç dayanımının doğal agrega ile üretilen betonunkinden daha düşük olduğunu ancak %50'den fazla GDA içeren betonda ters eğilimin bulunduğunu ortaya koymuştur. Vieira vd. (2011) çalışmalarında, %20, %50 ve %100 oranında GDA içeren betonun yüksek sıcaklıklarda ki (400°C, 600°C ve 800°C) davranışını araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, GDA içeren betonun yüksek sıcaklık sonrasındaki mekanik özelliklerinin, normal betonunkinden önemli ölçüde farklılık göstermediğini tespit etmişlerdir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar beton sınıfı ve yaşı belli olmayan atık betondan elde edilen GDA'lı betonların yüksek sıcaklık sonrası davranışını belirlemeye amaçlamıştır. Bu çalışma literatürden farklı olarak, beton sınıfı (C30) ve yaşı (28 gün) belli olan numunelerden elde edilen GDA'lardan üretilen betonun yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası özelliklerini tespit etmeyi hedeflemiştir. Ayrıca günümüzde yeni yapılan inşaatların özellikle kentsel dönüşüm sonrası artışı gözönüne alınırsa çok fazla sayıda atık beton numunesinin olduğu ve olacağı kaçınılmaz bir gerçektir. Bu çalışma, yapısal bir yüke ve dış etkilere maruz kalmayan sınıfı belli olan beton atıklarından elde edilen GDA'ların betonda kullanımının sürdürülebilirlik açısından beton teknolojisine fayda sağlayabileceğini göstermiştir. Bu kapsamda, beton numunelerinden elde edilen GDA'lar betona, kırmataş agrega ile %25, %50, %75 ve %100 oranında yer değiştirilerek ikame edilmiştir. Ayrıca betona ince agrega olarak pomza kumu ilave edilerek hafif beton üretimi hedeflenmiştir. Üretilen GDA'lı ve doğal kırmataş agregalı betonların birim ağırlıkları belirlenmiş ve numuneler üzerinde basınç dayanımı ve kılcal geçirimsizlik deneyleri yapılmıştır. Ayrıca farklı agregalardan, farklı oranlarda elde edilen numuneler 100°C, 250°C, 500°C ve 750°C sıcaklıklara maruz bırakıldıktan sonraki basınç dayanımı ve kılcal geçirimsizlik sonuçları tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, GDA ile üretilen tüm numunelerde yüksek sıcaklık sonrası, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında daha az düşüşler meydana gelmiştir. Sonuç olarak, yaşı ve sınıfı belli olan beton atıklarından elde edilen GDA ile üretilen betonların mekanik ve durabilite özellikleri açısından kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışma kapsamında, tüm karışımlarda kullanılan çimento cinsi CEM I 42.5R Portland çimentosudur. Çimentonun özgül ağırlığı ve özgül yüzey alanı sırasıyla 3,14 g/cm³ ve 3807 cm²/g idi. Çimentonun kimyasal bileşimi Tablo 1'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Çimentonun Kimyasal Bileşimi

Kimyasal Özellikler	%
SiO ₂	17,73
Al ₂ O ₃	4,56
Fe ₂ O ₃	3,07
CaO	62,81
MgO	2,07
SO ₃	2,9
Fiziksel Özellikler	%
Kızdırma kaybı	3,36
Çözünmeyen kalıntı	0,46

Kontrol numunesi olarak incelenen beton karışımlarında iri agrega olarak maksimum 16 mm boyutunda kırmataş agregası kullanılmıştır. Kırmataş agregasının özgül ağırlığı ve su emmesi sırasıyla 2.68 g/cm^3 ve %0.41 olarak belirlenmiştir. GDA temin edilecek beton küp numuneler çeneli kırıcı kullanılarak birincil kırma işlemine tabi tutulmuş ve kırımdan sonra elde edilen agregalar elenerek 4–16 mm aralığındaki kısmı kullanılmıştır. Elde edilen GDA'lar normal agregaya kıyasla daha keskin ve düzdü. Ayrıca kırımın etkisinden dolayı GDA'ya yapışık olan harcın çok az bir kısmı kaybolmuştu. Geri dönüştürülmüş beton üretiminde kullanılan GDA'nın en büyük tane boyutu 16 mm, özgül ağırlığı 2.48 g/cm^3 ve su emmesi %5.62 olarak tespit edilmiştir. Ayrıca çalışmada ince agrega olarak özgül ağırlığı 1.66 g/cm^3 ve su emmesi %14.5 olarak belirlenen pomza kumu kullanılmıştır.

Numune Karışım Oranları

Bu çalışmada, kontrol ve GDA'lı beton karışımlarının karışım kompozisyonu Tablo 2'de verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan tüm karışım numuneleri 0,46 su/çimento oranında dökülmüştür. Tüm karışım gruplarında çimento miktarı 465 kg olarak kullanılmıştır. İri agrega ve kumun hacimsel oranları sırasıyla %50 ve %50 olarak belirlenmiştir. GDA'lı gruplarda kırmataş agrega (KTA) yerine hacimce %25, %50, %75 ve %100 oranlarında GDA ikame edilerek beton numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere kodlama yapılırken kullanılan agrega ve karışımdaki oranı şeklinde yazılmıştır.

Tablo 2. Beton Karışım Oranları

Karışım kodu	Çimento (kg/m^3)	İnce agrega (kg/m^3)	GDA (kg/m^3)	KTA (kg/m^3)	Su (kg/m^3)
Kontrol	465	510,74	0	824,58	214
GDA25	465	510,74	190,76	618,43	214
GDA50	465	510,74	381,52	412,29	214
GDA75	465	510,74	572,28	206,14	214
GDA100	465	510,74	763	0	214

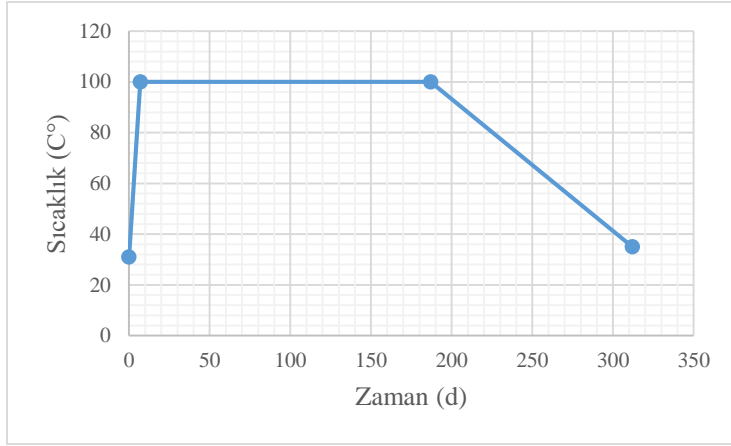
DeneySEL Yöntemler

DeneySEL çalışma, agrega tipi ve hacim fraksiyonlarının betonun işlenebilirlik parametreleri, basınç dayanımı, kılcal geçirimsizlik ve yüksek sıcaklık üzerindeki etkisini belirlemeyi amaçlamaktadır. Beton karışımları 60 dm^3 kapasiteli laboratuvar mikserinde üretilmiştir. Basınç dayanımı ve kılcal geçirimsizlik deneyleri için $100 \times 200 \text{ mm}$ boyutunda silindir numuneler hazırlanmıştır. Silindir numuneler, TS EN 12390-2 (2019)'de belirtilen şekilde hazırlanmış ve 28 günlük kür süresine tabi tutulmuştur. Basınç dayanımı için kullanılacak oda sıcaklığındaki numunelere 28 günlük kür süresinden sonra TS EN 12390-3 (2019)'e uygun olarak kükürt başlıklama işlemi yapılmış (Şekil 1) ve sonrasında dayanım testine maruz bırakılmıştır.

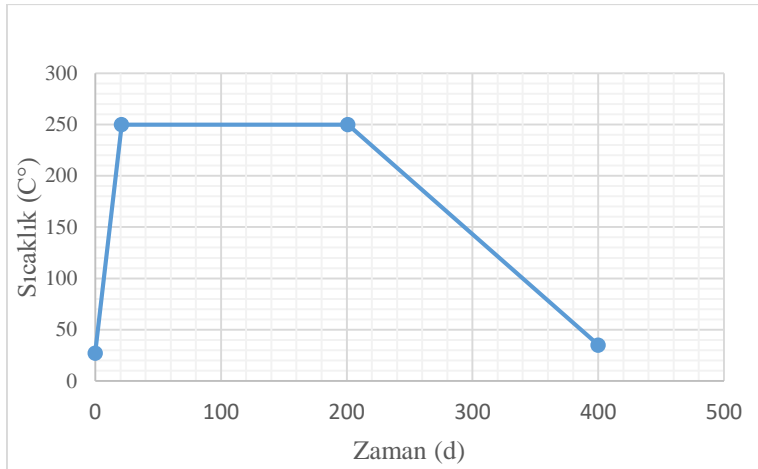


Şekil 1. Silindir Numunelerin Başlıklama İşlemi

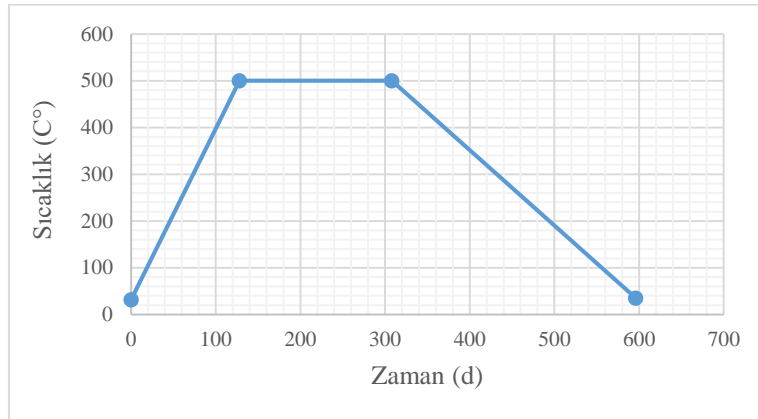
28 günlük kürelemeden sonra, 100 °C, 250 °C, 500 °C ve 750 °C’de yüksek sıcaklığa maruz bırakılan numunelerin basınç dayanımları TS EN 12390-3 (2019) standardına göre elde edilmiştir. 1200 °C’ye kadar ısıtma kapasitesine sahip elektrikli fırın ile yüksek sıcaklık sağlanmıştır. Fırında hedeflenen sıcaklık elde edildikten sonra, numunelerin sıcaklığını homojenleştirmek için 3 saat hedeflenen sıcaklıkta bekletilmiştir. Numuneler daha sonra oda sıcaklığına soğumaya bırakıldı ve sonra basınç dayanımı testine tabi tutulmuştur. Hedeflenen her bir sıcaklık için sıcaklık – zaman grafiği 100 °C, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklar için sırasıyla Şekil 2, Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’te sunulmuştur.



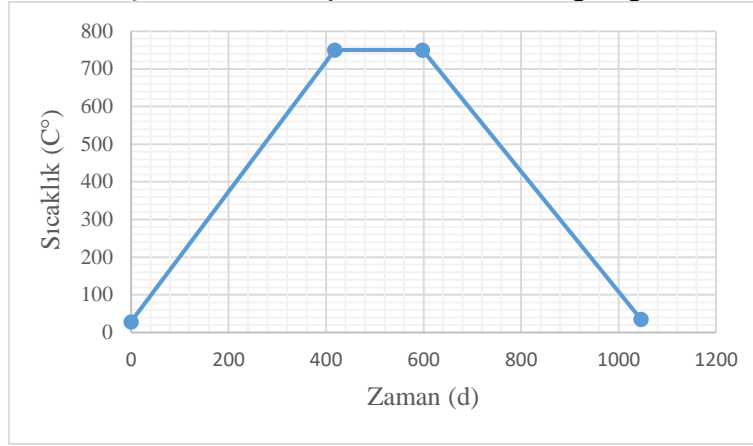
Şekil 2. 100 °C için sıcaklık – zaman grafiği



Şekil 3. 250 °C için sıcaklık – zaman grafiği



Şekil 4. 500 °C için sıcaklık – zaman grafiği



Şekil 5. 750 °C için sıcaklık – zaman grafiği

Kılcal geçirimsizlik, harcın / betonun iletken suyu kılcal yolla emme ve iletme eğilimini gösteren en kolay testlerden biri olarak bilinir. Kılcal geçirimsizlik, beton dayanıklılığını belirleyen geçirimsizlik ile ilgili önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle, oda sıcaklığına ve 100 °C, 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklara maruz bırakılan betonların 24 saatlik süreç sonucundaki kılcal geçirimsizlikleri ASTM C1585 standardına uygun olarak ölçülmüştür.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Taze Beton Özellikleri

İşlenebilirlik

Çalışma kapsamında, kırmataş agregası ve GDA ile hazırlanan taze beton numuneleri üzerinde TS EN 12350-2 (2019) standardına uygun olarak çökme deneyi yapılmıştır. Çökme deneyine ait sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

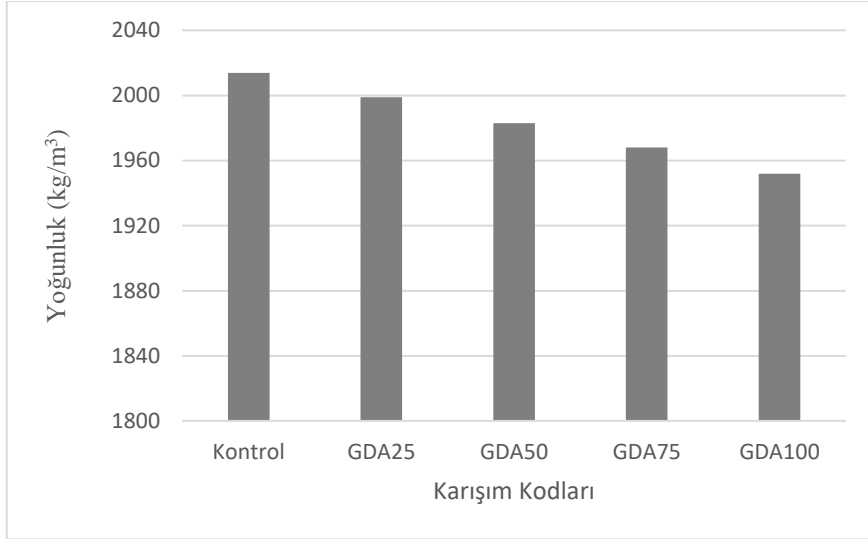
Tablo 3. Beton Karışımlarının Çökme Miktarları

Karışım tipi	Kontrol	GDA25	GDA50	GDA75	GDA100
Çökme miktarı (cm)	6	5,9	5,9	5,8	5,8

Deney sonuçları incelendiğinde, GDA100 karışım numunesindeki çökme değerinde, kontrol numunesi göre yaklaşık %3.33 değerinde azalma meydana gelmiştir. Bu durum, karışımlardaki GDA oranının artmasının çökme değerleri açısından önemli bir değişime neden olmadığını göstermektedir. GDA içeren betonun işlenebilirliğinin azalması, GDA'nın daha yüksek su emme kapasitesine, daha pürüzlü ve düzensiz yüzeylerine atfedilebilir (Kurda vd., 2017). Bazı durumlarda, GDA'nın uygun şekilde kullanılması ve betonun uygun şekilde tasarlanması, GDA ile üretilen betonların işlenebilirliğinde önemli bir değişikliğe sebep olmaz. Örneğin, GDA, beton üretim aşamasında doygun kuru yüzey durumunda kullanılması halinde normal agregalı betona benzer işlenebilirlik elde edilebilir (Brand vd., 2015).

Birim Hacim Ağırlık

Karışım numunelerinin taze beton birim hacim ağırlık sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. Farklı oranlarda GDA içeren karışım numunelerinin yoğunlukları 1952 kg/m³ ile 2014 kg/m³ arasında değişiklik göstermiştir.



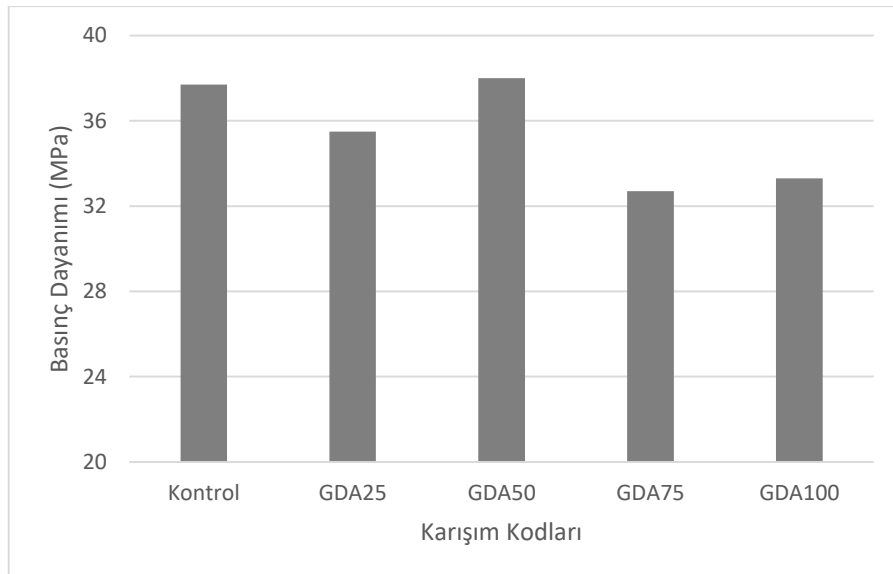
Şekil 6. Farklı Miktarda GDA İçeren Betonun Yoğunluğu

Karışımlarda kullanılan GDA miktarı arttıkça betonun yoğunluğunda azalmalar meydana gelmiştir. %75 ve %100 GDA ile ikame edilen geri dönüştürülmüş beton karışımların yoğunluk değerlerinde, %100 normal kırmataş agregası ile üretilen betona kıyasla sırasıyla %2.28 ve %3.8 oranında azalma elde edilmiştir. Xiao vd. (2005) çalışmalarında, %100 iri GDA içeren beton yoğunluğunun, %100 normal agregası ile üretilen betonlara göre yaklaşık %5 daha az olduğunu tespit etmişlerdir. Etxeberria vd. (2007), iri doğal agreganın tamamı iri GDA ile değiştirildiğinde betonun yoğunluğunun yaklaşık %3.3 oranında azaldığını belirlemişlerdir. Marinković vd. (2010), normal agreganın %65'ini değiştirmek için üç farklı GDA fraksiyonu kullandı ve kontrol betonuna kıyasla %4.7 ile %4.9 arasında daha düşük yoğunluklu geri dönüştürülmüş beton elde etmişlerdir. Betonda artan miktarda GDA kullanımı, geri dönüştürülmüş agregası içeren betonun yoğunluğunun azalmasına katkıda bulunmuştur. Bu durum, GDA'nın daha düşük özgül ağırlığı ve üzerindeki yapıştırılmış eski harçtan kaynaklanmaktadır.

Sertleştirilmiş Beton Özellikleri

Basınç Dayanımı

Bu çalışmada, basınç dayanımı 28 günlük 100 mm x 200 mm boyutlarında 3 silindir numunenin ortalaması alınarak değerlendirilmiştir. Normal kırmataş agregası ve GDA ile üretilen beton karışımlarının oda sıcaklığındaki ortalama basınç dayanımı değerleri Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Numune Karışımlarının Basınç Dayanımları

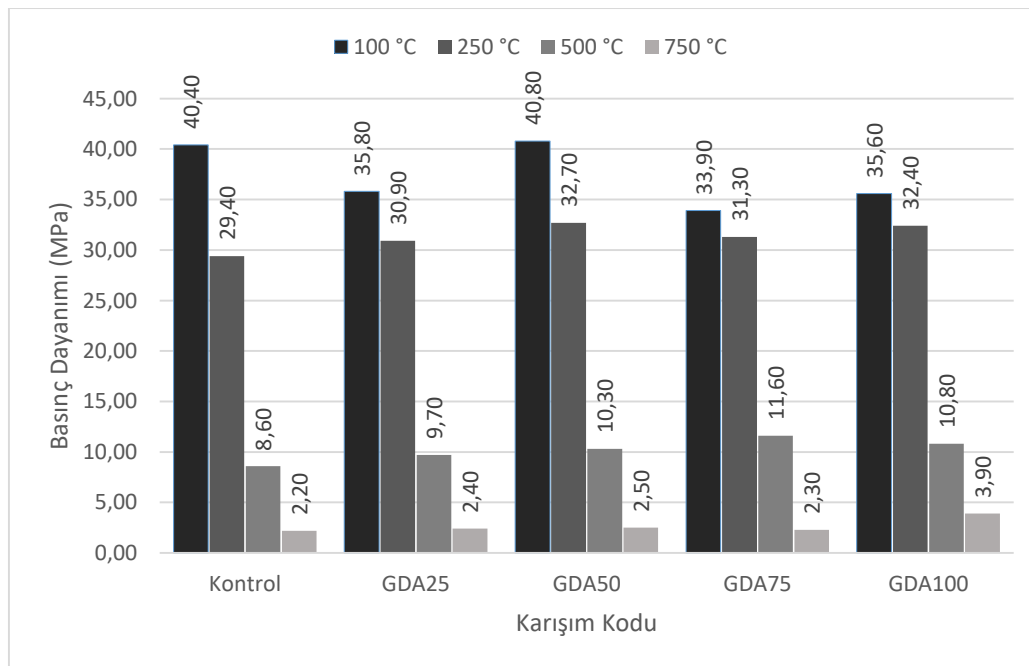
Basınç dayanımı sonuçlarına göre, kırmataş normal agregası ile üretilen beton numunesinin dayanım değeri 37.7 MPa olarak belirlenmiştir. GDA75 ve GDA100 numunelerinin basınç dayanımı değerlerinde, kontrol numunesine kıyasla %13.26 ve %11.67 oranlarında azalma meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri 38 MPa ile GDA50 karışımından elde edilirken, en düşük dayanım değeri 32.7 MPa ile GDA75 serisinde hesaplanmıştır. GDA'nın yüzeylerinde eski harcın bulunmasından dolayı GDA daha düşük yoğunluğa sahip olmaktadır. Bu durum, geri dönüştürülmüş betonun daha düşük basınç dayanımına katkıda bulunur (Kurda vd., 2017). GDA ile yapılan betonun daha düşük basınç dayanımı, matriste iki tip ara yüzey geçiş bölgesinin varlığına atfedilebilir. Ara yüzey geçiş bölgesi, agregası ve hamur arasındaki bağı temsil eder ve normalde agregası veya hidratlı çimento hamurundan daha zayıftır. Doğal agregası ile yapılan betonda, ara yüzey geçiş bölgesi agregası ile harç arasında oluşurken, GDA içeren betonda, orijinal agregası ile eski harç ve yeni harç arasında yer alır (Etxeberria vd., 2007; Kou vd., 2011; Verian vd., 2018).

Bu çalışma kapsamında, %75 ve %100 oranında GDA ile üretilen numunelerin basınç dayanımında kayda değer bir düşüş meydana gelmiştir. Ancak GDA50 karışımının referans numuneye kıyasla dayanımında çok az bir artış elde edilmiştir. Bu durum, çalışmada kullanılan GDA'nın, 28 günlük erken yaştaki beton numunelerinden temin edilmesine bağlanabilir. Geng vd. (2019) araştırmalarında, %100 GDA kullanılan karışımlarda, 1 yaşındaki GDA kullanılarak üretilen geri dönüştürülmüş beton, 28 günlük 38.9 MPa'lık bir basınç dayanımı sergilemiş ve kontrol numunesine göre yalnızca %1 daha düşük olduğu tespit edilmiştir. 18 yıllık ve 40 yıllık GDA ile yapılan betonların 28 günlük basınç dayanımı ise kontrol numunesine kıyasla sırasıyla %23–34 azalma meydana gelmiştir.

Ana betondaki harç ve ara yüzey geçiş bölgeleri, ıslanma-kurumadan kaynaklı aşınma döngülerine ve klorür girişi ve karbonatlaşma gibi erozyonun birleşik etkilerinden dolayı zamanla bozulur (Xiao vd., 2013; Maruyama vd., 2014). Bu bağlamda, daha uzun hizmet süresine sahip GDA, daha zayıf artık harç ve ara yüzey geçiş bölgeleri içerir ve bu da üretilen betonda daha düşük basınç dayanımı elde edilmesine yol açar.

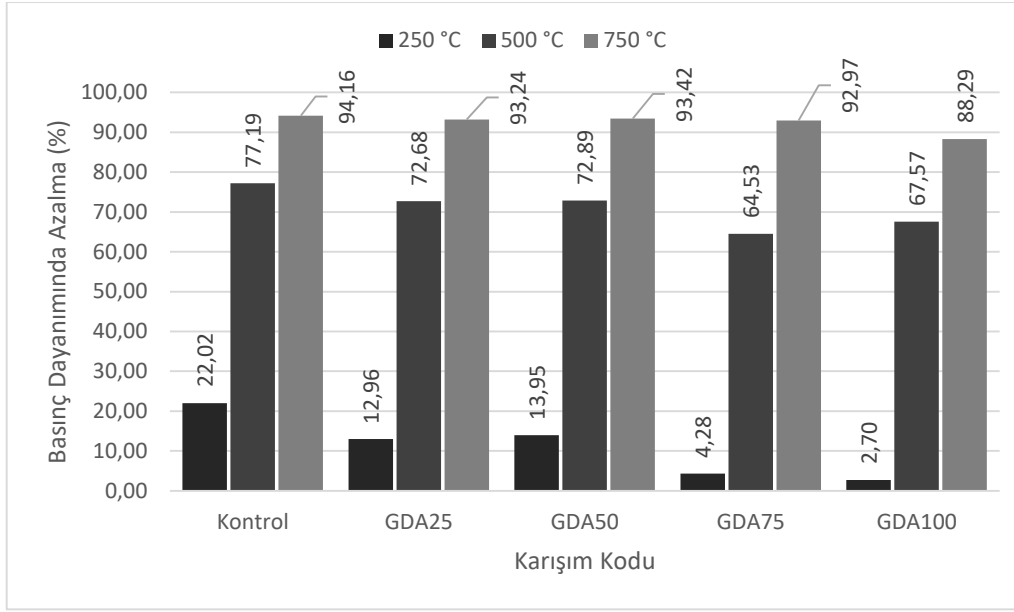
Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan karışım numunelerine ait basınç dayanımı değerleri Şekil 8'de verilmiştir. 100 °C sıcaklığa tabi tutulan tüm numunelerin dayanımlarında artış meydana gelmiştir. 100 °C'de en yüksek basınç dayanımı 40.8 MPa ile GDA50, en düşük dayanım değeri ise 33.9 ile GDA75 serisinden elde edilmiştir. Bu durum, yüksek sıcaklıklarda hidrate olmayan çimento parçacıkları ile kireç arasındaki reaksiyondan dolayı tobermorit oluşumundan kaynaklanabilir (Hossain, 2006; Uysal & Tanyıldızı, 2012).



Şekil 8. Numune Karışımlarının Basınç Dayanımları

Ayrıca, meydana gelen bu dayanım artışı, kılcal boşluklardaki su içeriğinin buharlaşması nedeniyle jel partikülleri arasındaki kuvvetlerdeki (Van der Walls) artışa bağlanabilir (Behnood & Ziari, 2008). Beton numunelerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, numunelerin basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. Sertleştirilmiş numunelerin orijinal dayanımlarına kıyasla basınç dayanımlarındaki azalmalar Şekil 9'da gösterilmiştir. 250 °C'de numunelerin basınç dayanımdaki azalma değerleri, kontrol, GDA25, GDA50, GDA75 ve GDA100 için sırasıyla %22.02, %12.96, %13.95, %4.28 ve %2.70 olarak bulunmuştur. GDA ile üretilen tüm numunelerde, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında daha az düşüşler meydana gelmiştir.



Şekil 9. 250 °C, 500 °C ve 750 °C'de Basınç Dayanımlarındaki Azalmalar

500 °C'de numunelerin basınç dayanımdaki azalma değerleri, kontrol, GDA25, GDA50, GDA75 ve GDA100 için sırasıyla %77.19, %72.68, %72.89, %64.53 ve %67.57 olarak hesaplanmıştır. 250 °C'de ki sonuçlara benzer şekilde, 500 °C'ye maruz bırakılan numunelerden basınç dayanım değerinde en fazla düşüş kontrol numunesinde meydana gelmiştir. 750 °C'ye tabi tutulan beton numunelerin dayanım sonuçlarının incelenmesi sonucunda, tüm serilerin dayanım değerlerinde önemli düşüşler elde edilmiştir. Basınç dayanımı açısından en az düşüş %88.29 ile GDA100 serisinden elde edilirken, en fazla düşüş %94.16 ile kontrol numunesinde tespit edilmiştir. GDA25, GDA50 ve GDA100 serilerindeki düşüş miktarları ise sırasıyla %93.24, %93.42 ve %92.97 olarak hesaplanmıştır. 250 °C, 500 °C ve 750 °C sıcaklıklarda, GDA kullanılan serilerin basınç dayanımı değerleri, kontrol numunesine kıyasla daha yüksektir. Bu durum, geri dönüştürülmüş agreganın çimentolu matris ile daha iyi termal uyumluluk göstermesine bağlanabilir. Ayrıca, GDA ve kırmataş agregaların su emme miktarları göz önüne alındığında, beton içerisinde ki kılcal boşluklarda bulunan serbest su miktarının GDA içeren betonlarda daha düşük olacağı düşünülebilir. Kontrol numunelerinin, GDA'lı beton numunelerine kıyasla daha fazla dayanım kaybı, kılcal çatlaklarda bulunan daha fazla miktarda ki suyun buharlaşması ile meydana gelen çatlak artışına atfedilebilir.

Vieira vd. (2011) çalışmalarında, %20, %50 ve %100 GDA içeren geri dönüştürülmüş betonun yüksek sıcaklıklarda (400°C, 600°C ve 800°C) davranışını değerlendirmiştir. Sonuçlar, geri dönüştürülmüş betonun yüksek sıcaklık sonrası mekanik özelliklerinin normal betondan önemli ölçüde farklı olmadığını göstermiştir. Laneyrie vd. (2016), yüksek sıcaklıklarda geri dönüştürülmüş betonun artık dayanımının, normal agregaya içeren betondan biraz düşük olduğunu kanıtlamıştır. Zega & Maio (2009) çalışmalarında, yüksek sıcaklığa tabi tutulan farklı yüzdelerde GDA içeren geri dönüştürülmüş betonun özelliklerini araştırmıştır. %70 kaba GDA içeren betonun, GDA ve yeni harç arasındaki ara yüzey geçiş bölgesinin daha yüksek kalitesi nedeniyle, 500°C'de normal agregalı betona kıyasla daha iyi performans gösterdiğini tespit etmişlerdir. Xiao ve Zhang (2007), yüksek sıcaklıklarda (200–800°C), %30 GDA içeren betonun artık basınç dayanımının normal agregadan üretilen betondan daha düşük olduğunu, ancak %50'den fazla GDA içeren betonlarda ters eğilimin bulunduğunu ortaya koymuşlardır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakılan örnek bir seriye ait renk ve görsel değişim Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Sıcaklık Değişimlerine Göre Numunelerde Meydana Gelen Görsel Değişim

Kılcal Su Emme

Kılcal su emme testi, gözenekli yapının karakterizasyonuna izin verir ve beton dayanıklılığının bir göstergesidir. Karışım serilerine ait yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası kılcal su emme sonuçları Tablo 4’de verilmiştir. Betonlarda farklı oranlarda geri dönüştürülmüş agrega kullanımının (GDA50, GDA75 ve GDA100) betonun kılcal su emmesinin azalmasına neden olmuştur. %100 oranında geri dönüştürülmüş agrega ikame edilen betonun oda sıcaklığındaki kılcal su emme değerinde, kontrol numunesine kıyasla %11.1 oranında düşüş tespit edilmiştir. Bununla birlikte, %100 lük GDA ikame oranında, geri dönüştürülmüş betonların su emmesi 500 °C ve 750 °C’de referans betondan sırasıyla %6 ve %2.42 daha yüksektir. Kou vd. (2014) çalışmalarında, yüksek sıcaklığa maruz kalan (500 °C) GDA’lı numunelerin kılcal su emme değerlerinin, normal agregalı betona kıyasla daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun nedeni, geri dönüştürülmüş agreganın, kırmataş agregasına kıyasla daha fazla su emme ve gözeneklilik kapasitesi olabilir. Ayrıca, GDA’lı beton numunelerinde ki daha fazla harç miktarında atfedilebilir.

Tablo 4. Karışım Serilerine Ait Kılcal Su Emme Değerleri

Sıcaklık Değerleri	Oda Sıcaklığı	100 °C	250 °C	500 °C	750 °C
Karışım Kodları					
Kontrol	0,18	0,19	0,61	9,50	18,96
GDA25	0,19	0,22	0,87	8,44	18,13
GDA50	0,14	0,25	0,61	9,47	18,04
GDA75	0,13	0,19	0,72	8,65	19,80
GDA100	0,16	0,26	1,03	10,07	19,42

SONUÇLAR

Bu çalışmada, yapısal bir yüke ve dış etkilere maruz kalmayan sınıfı ve yaşı belli olan beton atıklarından elde edilen GDA’lı betonların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası davranışı incelenmiştir.

Erken yaş beton atıklarından elde edilen geri dönüştürülmüş agrega ile üretilen geri dönüştürülmüş betonların mekanik ve durabilite özellikleri açısından kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir.

Karışımlarda kullanılan GDA miktarı arttıkça betonun yoğunluğunda azalmalar meydana gelmiştir. %75 ve %100 GDA ile ikame edilen geri dönüştürülmüş beton karışımların yoğunluk değerlerinde, %100 normal kırmataş agrega ile üretilen betona kıyasla sırasıyla %2.28 ve %3.8 oranında azalma elde edilmiştir.

Yüksek sıcaklık öncesi basınç dayanımı sonuçlarına göre, kırmataş normal agrega ile üretilen beton numunesinin dayanım değeri 37.7 MPa olarak belirlenmiştir. GDA75 ve GDA100 numunelerinin basınç dayanımı değerlerinde, kontrol numunesine kıyasla %13.26 ve %11.67 oranlarında azalma meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri 38 MPa ile GDA50 karışımından elde edilirken, en düşük dayanım değeri 32.7 MPa ile GDA75 serisinde hesaplanmıştır.

GDA ile üretilen tüm numunelerde yüksek sıcaklık sonrası, kontrol numunesine kıyasla basınç dayanımında daha az düşüşler meydana gelmiştir. 100 °C yüksek sıcaklığa maruz kalan serilerin tamamının basınç dayanımında artış meydana gelmiştir. Beton numunelerin maruz kaldığı sıcaklık arttıkça, numunelerin basınç dayanımlarında düşüşler meydana gelmiştir. 750 °C'ye tabi tutulan beton numunelerin dayanım sonuçlarının incelenmesi sonucunda, tüm serilerin dayanım değerlerinde önemli düşüşler elde edilmiştir. Basınç dayanımı açısından en az düşüş %88.29 ile GDA100 serisinden elde edilirken, en fazla düşüş %94.16 ile kontrol numunesinde tespit edilmiştir.

KAYNAKLAR

Abbu M., Al-Attar A.A., Abd Alrahman S., Al-Gburi M. (2023). The mechanical properties of lightweight (volcanic pumice) concrete containing fibers with exposure to high temperatures. *J. Mech. Behav. Mater.*, 32. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0249>

ASTM C1585 – 13. (2013). Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.

Batman, M. (2018). Beton deney numune atıklarının geri dönüşüm agregası olarak betonda kullanılabilirliğinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Erzurum 78 s.

Behnood A. & Ziari H. (2008). Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 30, 106-112. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.06.003>.

Brand A.S., Roesler J.R., Salas A. (2015). Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 79, 83-89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.047>.

Bui N.K., Satomi T., Takahashi H. (2018). Effect of mineral admixtures on properties of recycled aggregate concrete at high temperature, *Construction and Building Materials*, 184, 361-373. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.237>.

Demirel C. & Şimşek O. (2015). Erken Yaşdaki Atık Betonların Geri Dönüşüm Agregası Olarak Beton Üretiminde Kullanılabilirliği ve Sürdürülebilirlik Açısından İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 3, 226-235.

Etxeberria M., Vázquez E., Marí A., Barra M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37, 735-742. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.02.002>.

Geng Y., Wang Q., Wang Y., Zhang H. (2019). Influence of service time of recycled coarse aggregate on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Materials and Structures*, 52. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1395-0>

Guo H., Shi C., Guan X., Zhu J., Ding Y., Ling T-C., Zhang H., Wang Y. (2018). Durability of recycled aggregate concrete – A review. *Cement and Concrete Composites*, 89, 2018, 251-259. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>.

- Hossain K.M.A. (2006). High strength blended cement concrete incorporating volcanic ash: Performance at high temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 28, 535-545. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.01.013>.
- Hossain K.M.A., Ahmed S., Lachemi M. (2011). Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics. *Construction and Building Materials*, 25, 1186-1195. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.036>.
- Kahanji C., Ali F., Nadjai A., Alam N. (2018). Effect of curing temperature on the behaviour of UHPFRC at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 182, 670-681. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.163>.
- Kou S.C., Poon C.S., Etxeberria M. (2014). Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 53, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.001>.
- Kou S., Poon C., Agrela F. (2011). Comparisons of natural and recycled aggregate concretes prepared with the addition of different mineral admixtures. *Cement and Concrete Composites*, 33, 788-795. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.05.009>.
- Kurda R., Brito J., Silvestre J. D. (2017). Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. *Cement and Concrete Composites*, 84, 198-213. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.09.009>.
- Laneyrie C., Beaucour A-L., Green M.F., Hebert R.L., Ledesert B., Noumowe A. (2016). Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 111, 368-378. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.056>.
- Marinković S., Radonjanin V., Malešev M., Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management*, 30, 2255-2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- Maruyama I., Sasano H., Nishioka Y., Igarashi G. (2014). Strength and Young's modulus change in concrete due to long-term drying and heating up to 90°C. *Cement and Concrete Research*, 66, 48-63. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.016>.
- Newman J.B. (1993). Properties of structural lightweight aggregate concrete. J.I. Clarke (Ed.), *Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Chapman & Hall, London, 19-44.
- Padmini A.K., Ramamurthy K., Mathews M.S. (2009). Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23, 829-836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.03.006>.
- Poon C.S., Shui Z.H., Lam L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18, 461-468. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.03.005>.
- Sancak E., Sari Y. D., Simsek O. (2008). Effects of elevated temperature on compressive strength and weight loss of the light-weight concrete with silica fume and superplasticizer. *Cement and Concrete Composites*. 30, 715-721. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.01.004>.
- TS EN 12350-2. (2019). Beton – Taze beton deneyleri- Bölüm 2: Çökme (Slump) deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-2. (2019). Beton – sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 2: Dayanım deneylerinde kullanılacak deney numunelerinin hazırlanması ve küre tabi tutulması, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12390-3. (2019). Beton – sertleşmiş beton deneyleri- Bölüm 3: Deney numunelerinde basınç dayanımının tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Uysal M.& Tanyildizi H. (2012). Estimation of compressive strength of self compacting concrete containing polypropylene fiber and mineral additives exposed to high temperature using artificial neural network. *Construction and Building Materials*, 27, 404-414. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.028>.

Verian K.P., Ashraf W., Cao Y. (2018). Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 133, 30-49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005>.

Vieira J.P.B., Correia J.R., Brito J. (2011). Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cement and Concrete Research*, 41, 533-541. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.02.002>.

Xiao J., Li J., Zhang Ch. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35, 1187-1194. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.09.020>.

Xiao J., & Zhang C. (2007). Fire damage and residual strengths of recycled aggregate concrete. *Key Eng Mat*, 348–349, 937-940. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.348-349.937>

Xiao J.J., Li W.G., Fan Y.H., Huang, X. (2012). An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996-2011). *Construct. Build. Mater.*, 31, 364-383. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.074>.

Xiao J., Li W., Sun Z., Lange D.A, Shah S.P. (2013). Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. *Cement and Concrete Composites*, 37, 276-292. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.01.006>.

Zega C.J., Di Maio A.A. (2009). Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. *Construction and Building Materials*, 23, 2047-2052. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.08.017>.